

RONNY BERGMAN, ERIK JOHANSSON, AGNETA H. PLAMBOECK,  
BJÖRN SANDSTRÖM, LENNART THANING, THOMAS ULVSAND,  
GÖRAN ÅGREN



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Ronny Bergman, Erik Johansson, Agneta H. Plamboeck, Björn Sandström,  
Lennart Thaning, Thomas Ulvsand, Göran Ågren

## Smutsig bomb - ett hot?



<b>Utgivare</b> FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut NBC-skydd 901 82 Umeå	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1973--SE	<b>Klassificering</b> Teknisk rapport
	<b>Forskningsområde</b> 3. Skydd mot NBC och andra farliga ämnen	
	<b>Månad, år</b> Maj 2006	<b>Projektnummer</b> E4724
	<b>Delområde</b> 31 N-forskning	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare/redaktör</b> Ronny Bergman                      Björn Sandström Erik Johansson Agneta H. Plamboeck Lennart Thaning Thomas Ulvsand Göran Ågren	<b>Projektledare</b> Lena Melin	
	<b>Godkänd av</b>	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b>	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>	
<b>Rapportens titel</b> Smutsig bomb - ett hot?		
<b>Sammanfattning</b>  <p>Smutsiga bomber, dvs. radioaktivt material som t.ex. sprids ut med vanligt explosivämne, har uppmärksammats mycket på senare år. Orsaken till det ökande intresset är framförallt oron för att terrorister skulle kunna iscensätta en sådan händelse. Vi inleder studien med en värdering av tillgängligheten och hanterbarheten av strålkällor som visar att det är möjligt för en tänkt förövare att få tag i radioaktivt material i Sverige. Den visar även att det är möjligt att föra in radioaktivt material i Sverige från utlandet. Möjligheterna för en potentiell förövare att komma i besittning av starka strålkällor som vid ett attentat kan ge människor akuta strålskador är däremot begränsade i och med att det endast finns ett fåtal sådana strålkällor. Om förövaren trots allt får tag i en stark källa beror hanterbarheten och möjligheten att skapa en effektiv utsprängning på förövarens vilja att utsätta sig för strålningsrisker. Risken är liten för att ett stort antal individer ska drabbas av så höga stråldoser att det leder till akuta strålskador vid ett attentat med en smutsig bomb. Trots detta kan konsekvenserna av en smutsig bomb bli allt annat än försumbara. Sena, stokastiska effekter kan uppträda, t.ex. i form av en förhöjd cancerfrekvens, vid betydligt lägre doser.</p>		
<b>Nyckelord</b> Joniserande strålning, stokastisk spridningsmodell, stråldos, strålkälla, terrorism, utspridning		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 40 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency NBC Defence SE-901 82 Umeå	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--1973--SE	<b>Report type</b> Technical report
	<b>Programme Areas</b> 3. NBC Defence and other hazardous substances	
	<b>Month year</b> May 2006	<b>Project No.</b> E4724
	<b>Subcategories</b> 31 Nuclear Defence Research	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s (editor/s)</b> Ronny Bergman                      Björn Sandström Erik Johansson Agneta H. Plamboeck Lennart Thaning Thomas Ulvsand Göran Ågren	<b>Project manager</b> Lena Melin	
	<b>Approved by</b>	
	<b>Sponsoring agency</b>	
	<b>Scientifically and technically responsible</b>	
<b>Report title (In translation)</b> Dirty bomb - a threat?		
<b>Abstract</b> <p>The potential use of dirty bombs, i.e. conventional explosives packed with radioactive material has been a point of significant concern in recent years. The primary cause for the increasing interest is the fear that terrorists could stage such an attack.</p> <p>This study opens with an evaluation of the availability and handling of radioactive sources which shows the potential for a perpetrator managing to obtain radioactive material in Sweden. The study also shows the possibility of transporting radioactive material from abroad into Sweden. However, the likelihood for a potential perpetrator to use strong radioactive sources in an attack causing acute radiation sickness is reduced due to a few available sources of that magnitude. Still, should a perpetrator manage to obtain a strong radioactive source, actual handling and development of an efficient dispersion device would depend on the willingness of the perpetrator to expose him-/herself in the process. Although the risk for a high number of people receiving high radiation doses after a dirty bomb attack is low, the consequences can not be ignored. Late stochastic consequences might appear, e.g. by higher cancer frequency at considerably lower doses.</p>		
<b>Keywords</b> Ionizing radiation, radioactive source, radiation dose, terrorism, dispersial, stochastic dispersion model, IRD		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 40 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

## Sammanfattning

Smutsiga bomber dvs. radioaktivt material som t.ex. sprids ut med vanligt explosivämne har uppmärksammats mycket på senare år. Orsaken till det ökande intresset är framförallt oron för att terrorister skulle kunna iscensätta en sådan händelse.

Problemet med smutsiga bomber och de konsekvenser en användning skulle orsaka samhället har dock i flera avseenden ännu inte blivit föremål för en tillräckligt ingående analys. Syftet med den här studien är att analysera hotet från smutsiga bomber, dvs. vilka krav en sådan bomb ställer på användare och material och vilka effekterna skulle kunna bli.

Vi inleder studien med en värdering av tillgängligheten och hanterbarheten av strålkällor som visar att det är möjligt för en tänkt förövare att få tag i radioaktivt material i Sverige. Den visar även att det är möjligt att föra in radioaktivt material i Sverige från utlandet. Möjligheterna för en potentiell förövare att komma i besittning av starka strålkällor som vid ett attentat kan ge människor akuta strålskador är däremot begränsade i och med att det endast finns ett fåtal sådana strålkällor. Om förövaren trots allt får tag i en stark källa beror hanterbarheten och möjligheten att skapa en effektiv utsprängning på förövarens vilja att utsätta sig för strålningsrisker, vilket inneburit att vi har delat in tänkta förövare i tre kategorier beroende på viljan att utsätta sig för strålning. För de tre kategorier av möjliga förövare vi identifierat kan vi konstatera att möjligheterna för kategori ett (50 mSv) att hantera radioaktivt material begränsar sig till att hantera strålkällor med strålskydd. Kategori två (1-2 Sv), som är villiga att utsätta sig för större strålningsrisker, kommer främst att kunna hantera strålkällor med strålskydd, men kan även utföra enklare operationer, såsom att på kort tid flytta strålkällan från ett strålskydd till ett annat. Självordsgruppen (>3 Sv) kan planera en operation med de allra starkaste källorna under förutsättning att de hinner genomföra allt de planerat innan de själva blir oförmögna till arbete. Vikten på strålkällor med strålskydd anser vi inte i något fall utgöra något hinder.

För att många individer ska drabbas av så höga stråldoser att det leder till akuta strålskador vid ett attentat med en smutsig bomb krävs extremt starka strålkällor. Stråldoser som kan leda till att ett flertal individer drabbas av akuta effekter orsakas främst av partiklar under deposition och av uppvirvling av redan deponerat material. Partiklar som fastnar på hud eller i kläderna kan ge akuta strålskador, både från gamma- och betastrålning, genom relativt hög exponering av den näraliggande huden och hårbotten. Effekterna av en lokal bestrålning av hud kan dock inte jämföras med motsvarande helkroppsdos, och är oftast inte livshotande.

Ett stort upptag av aktivitet genom inandning förutsätter att man befinner sig nära strålkällan under just den korta tid då det förorenade molnet driver förbi. Akuta strålskador i särskilt utsatta vävnader i lungor, näsa, svalg och tarmkanalen (eller i andra organ som kan absorbera relativt höga koncentrationer av vissa nuklider efter upptag från tarmkanalen och blodet) bland en stor grupp människor är därför inte troliga. Däremot bidrar intaget av radioaktiva ämnen till ökad risk för sena (stokastiska) effekter samt att vissa ämnen är giftiga i små mängder.

Trots detta kan konsekvenserna av en smutsig bomb bli allt annat än försumbara. Sena, stokastiska effekter kan uppträda, t.ex. i form av en förhöjd cancerfrekvens, vid betydligt lägre doser. Dessa kan erhållas på större avstånd från explosionen, och man kan då räkna med

att ett större antal individer kan ha blivit drabbade. Om källan är tillräckligt stark, kan den radioaktiva kontamineringen av bebyggelsen i det mest drabbade området medföra krav på sanering, och få ekonomiska följder för handel och annan verksamhet i det berörda området. Utöver sådana socioekonomiska konsekvenser blir troligen den psykologiska verkan stor, även i fall med så svaga strålkällor att endast inga eller obetydliga radiologiska effekter kan väntas bland de direkt exponerade.

Föreliggande studie är en teknisk analys som möjliggör jämförelser av hur stråldoser kan variera vid olika exponeringsvägar och för olika nuklider. Rapporten riktar sig främst till personer som arbetar med krisberedskap.

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>RADIOLOGISKA BAKGRUNDSFAKTA.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>TILLGÄNGLIGHET .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>HANTERBARHET.....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>UTSPRIDNING OCH EXPONERING .....</b>	<b>21</b>
5.1	Koppling mellan partikelstorlek och depositionsavstånd .....	21
5.2	Exposition i förhållande till utspridningssätt och beläggningsmönster .....	23
5.2.1	Strålningsbidragen från homogent deponerad aktivitet .....	23
5.2.2	Strålningsbidragen från inhomogent deponerad aktivitet .....	24
5.2.3	Kontaminering av kläder eller hud .....	24
5.2.4	Inandning av radioaktiva partiklar .....	25
<b>6</b>	<b>RISKER .....</b>	<b>27</b>
6.1	Riskområden .....	27
6.1.1	Risker vid markdeposition .....	27
6.1.2	Risker vid inandning .....	29
6.2	Skaderisker.....	30
<b>7</b>	<b>SLUTSATSER.....</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>ORDLISTA.....</b>	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>39</b>





# 1 Inledning

Radioaktivt material som exempelvis sprids ut med vanligt explosivämne – ofta under benämningen ”smutsig bomb” – har uppmärksammats mycket i media under senare år. Även i diskussionen om svåra påfrestningar på samhället har problematiken kring smutsiga bomber figurerat. Orsaken till det ökande intresset är framförallt oron för att terrorister skulle kunna skaffa sig sådan kapacitet, eller redan har tillgång till den i någon form.

Problemet med smutsiga bomber och de konsekvenser en användning skulle orsaka samhället har dock i flera avseenden ännu inte blivit föremål för en tillräckligt ingående analys. Syftet med den här studien är att analysera hotet från smutsiga bomber, dvs. vilka krav en sådan bomb ställer på användare och material och vilka effekterna skulle kunna bli.

För att uppnå en förbättrad strålskyddsberedskap vid ett attentat med en smutsig bomb behövs grundläggande teknisk och radiologisk kunskap som medverkar till att skapa realistiska scenarier vilka kan ligga till grund för överväganden och bedömningar avseende beredskapen.

Utspridning av radioaktivt material och de radiologiska följderna är centrala faktorer i denna analys. Om utspridningen orsakats av en explosion eller åstadkommits på annat sätt är delfrågor som alla behöver belysas. Den radioaktiva beläggningen kan exempelvis vara resultatet av en avsiktlig utspridning utan användning av explosivämne (från enkla manuella till mer avancerade tekniska tillvägagångssätt). Beteckningen ”utspridningsanordning för radioaktivt material” vore därför en mer korrekt beskrivning, men framstår som lång och vi använder istället begreppet smutsig bomb med en bred tolkning, dvs. olika former av utspridning av radioaktivt material.

För att belysa hotet från smutsiga bomber diskuteras i denna rapport följande frågor:

- *Vilka strålkällor är möjliga att få tag på för en tänkt förövare?*
- *Begränsas hanterbarheten av radioaktivt material av t.ex. tunga strålskydd, eller av skaderisker för förövaren?*
- *Blir det stora skillnader i exponeringen från utspridda, stora fragment jämfört med en beläggning av små partiklar, avseende a) strålningsbidragen från omgivningen, b) kontaminering av kläder eller hud?*
- *Hur långt når partiklarna från utspridningspunkten?*
- *Är inandningsrisken viktig, och i så fall för vilka partikelstorlekar, strålslag eller nuklider, samt på vilka avstånd från utspridningspunkten?*
- *Vilken radiologisk verkan (omfattning och typ av skada) kan en smutsig bomb förorsaka?*

Denna studie är en teknisk analys som möjliggör jämförelser av hur stråldoser kan variera vid olika exponeringsvägar och för olika nuklider, och riktar sig främst till personer som arbetar med krisberedskap. Rapporten inleds med fakta om radioaktiva ämnen och joniserande strålning i kapitel 2. Därefter följer en genomgång av tillgängligheten (kapitel 3) och hanterbarheten (kapitel 4) av strålkällor för en tänkbar förövare. I kapitel 5 åskådliggörs hur utspridningen och fördelningen av radioaktivt material påverkas av partikelstorleken. Kapitlet är främst avsett för tillämpningar, exempelvis i spel, där mer detaljerat underlag kan vara av intresse. Slutligen görs i kapitel 6 en bedömning av vilka risker och effekter det kan finnas med utspridning av sådant radioaktivt material som tas upp i denna rapport.

Författarna vill rikta ett stort tack till Nils Olsson vid FOI som med mycket tålamod och skicklighet kommit med värdefulla synpunkter på innehållet i rapporten. Ett stort tack riktas även till följande medarbetare vid FOI, Britta Häggström, Kenneth Lidström, Henrik Ramebäck, Louise Waldenström, Mattias Waldenvik och Lennart Widlund som alla på olika sätt bidragit till rapporten. Författarna vill även tacka Lena Melin som i egenskap av projektledare lett projektet. Delar av materialet i kapitel 5 och 6 har producerats med stöd från Statens strålskyddsinstitut.

## 2 Radiologiska bakgrundsfakta

*Radioaktiva ämnen* har instabila atomkärnor som sönderfaller under avgivande av joniserande strålning, exempelvis alfastrålning, betastrålning eller gammastrålning. Alfastrålning har en räckvidd i luft på ungefär fem centimeter och stoppas av ett pappersark. Betastrålning däremot har en räckvidd i luft som varierar mellan 10 centimeter och 20 meter, beroende på dess energi. Betastrålning stoppas av en tre millimeter tjock stålplåt, vilket innebär att strålskyddet inte behöver bli särskilt tungt. Både alfa- och betastrålning är därmed förhållandevis lätthanterliga. Gammastrålning är svårare att hantera pga. gammastrålningens stora räckvidd. Intensiteten reduceras dock avsevärt av en halv meter tjock betongvägg eller några centimeter bly. Den exakta tjocklek som krävs för att reducera gammastrålningen till ofarliga nivåer är beroende av strålkällans aktivitet och strålningens energi (Knoll, 2000).

*Aktivitet* är ett mått på en strålkällans styrka och anges i Becquerel (Bq), som är lika med antalet atomer av ett visst radioaktivt ämne som sönderfaller per sekund. Bq är en mycket liten enhet, och därför använder man ofta prefix, såsom kBq ( $10^3$  Bq), MBq ( $10^6$  Bq), GBq ( $10^9$  Bq) TBq ( $10^{12}$  Bq) och PBq ( $10^{15}$  Bq). All strålning från radioaktiva ämnen har en joniserande verkan, dvs. den kan slå ut elektroner i andra atomer eller molekyler. Därmed skapas möjlighet till nya, kemiska bindningar, vilket i vävnad leder till skada. Antalet sådana enskilda jonisationer ökar med den totala deponerade energin, dvs. med stråldosen.

I strålskyddssammanhang anges *stråldosen* vanligtvis i form av effektiv dos (Sv), där den absorberade dosen (Gy) har viktats beroende på vilken biologisk verkan olika typer av joniserande strålning har på mänsklig vävnad samt olika organs strålningskänslighet. Vi har genomgående valt att ange stråldoserna som effektiv dos och har använt förhållandet 1:1 mellan absorberad och effektiv stråldos, vilket är en god approximation för de förhållanden vi behandlat. *Doshastigheten* är den stråldos som erhålls per tidsenhet, och anges t ex i Sv/h.

Effekterna på människa av joniserande strålning kan delas upp i akuta (deterministiska) samt långsiktiga (stokastiska) effekter. Akuta effekter erhålls av stråldoser höga nog att ge en märkbar effekt eller skada över ett visst tröskelvärde. Långsiktiga effekter är framförallt en statistiskt ökad risk att få cancer. Denna ökade risk ligger ungefär på 10 % per Sv erhållen stråldos. Detta innebär t.ex. att 1 mSv till en människa ger en 0,01 % ökad risk att få cancer. Detta kan jämföras med att risken att få cancer någon gång under sin livstid är ca 30 %, även utan den extra bestrålning som diskuteras här. Eftersom man i dag anser att all stråldos ger en ökad risk för långsiktiga effekter så gäller ALARA-principen (As Low As Reasonably Achievable), dvs. att alla onödiga stråldoser skall undvikas.

Med de strålskyddsregler som gäller idag får personer som arbetar i radiologisk tjänst under ett enskilt år högst erhålla en stråldos på 50 mSv. Vid räddningsarbete i ett nödläge, då stråldosen beräknas överskrida 50 mSv, får arbetet endast utföras av frivilliga. En räddningsinsats som kan medföra att stråldosen överskrider 100 mSv, dock max 500 mSv, får endast göras i livräddande syfte och utföras av personer med god vetskap om vilka risker detta medför.

För momentana stråldoser upp till enstaka Sv gäller att den drabbade kan bli milt illamående och kräkas. Vid något högre stråldos (ca 4 Sv) kommer ca hälften av de som exponeras att dö efter några veckor. Om man får en stråldos överstigande 20-30 Sv kommer de akuta

symptomen att vara så kraftiga att den drabbade kommer att ha svårt att utföra något arbete inom några minuter efter bestrålning (se tabell 1).

De angivna effekterna uppträder när den givna stråldosen absorberats i hela kroppen. Vid bestrålning av delar av kroppen, där dosen alltså mottagits lokalt, blir förhållandena annorlunda. Vid bestrålning av t ex endast händerna kan betydligt större stråldoser erhållas utan att fara för livet föreligger. Lokala skador i händerna kan dock uppkomma.

**Tabell 1.** Risken att drabbas av akuta effekter som illamående och kräkningar samt risken för dödsfall vid olika stråldoser. Tiden det tar innan de akuta effekterna utvecklas varierar med stråldosen.

Helkroppsstråldos	0,05 Sv	1-2 Sv	3,5-5,5 Sv	10 Sv	20-30 Sv
Tid		2-6 timmar	1-3 timmar	30 minuter	Några minuter
Illamående, kräkningar	inga	5-50 %	>80 %	100 %	100 %
Dödsfall			50-99 %	100 %	100 %

### 3 Tillgänglighet

Några av kärnfrågorna för en potentiell förövare är säkerligen hur och var man får tag på radioaktivt material och vilka material som är användbara. Om förövaren representerar en organisation med stark finansiell uppbackning, och därmed möjlighet att legalt eller illegalt köpa strålkällor, eller i stort sett är hänvisad till sin egen initiativförmåga, har naturligtvis betydelse för möjligheterna att komma över en strålkälla. Det bedöms att många av de strålkällor som försvinner runt om i världen inte är i rutinmässig användning (Ferguson et al., 2003; Tyle et al., 2003), vilket innebär att det kan vara svårt att upptäcka om och när en sådan strålkälla försvinner.

*The International Atomic Energy Agency* (IAEA) har gjort en indelning i fem kategorier av instrument och apparater som innehåller strålkällor (IAEA, 2003). I kategori ett och två återfinns de strålkällor som kan orsaka störst skada, och som därigenom är svårast att hantera (se tabell 2). Kategori 3 - 5 omfattar svagare strålkällor som utgör en betydligt mindre risk för akuta radiologiska skador. Dessa strålkällor är relativt lätta att hantera. Kärnbränsle, som också behandlas i denna studie, kategoriseras inte av IAEA enligt denna mall.

**Tabell 2.** Tekniska data för radioaktivt material och olika strålkällor (Alimov, 2003; Chu et al. 1999; Håkansson, 2000; IAEA, 2003).

Strålkälla	IAEA kategori	Ämne	Strålslag (keV) och fysikalisk halveringstid	Aktivitet (TBq)	Doshastighet på 1 m (Sv/h)	Dimensioner* på blyskyddet som reducerar doshastigheten till 1 Sv/h
Utbränt reaktorbränsle	Ej kategoriserat	Pu, Cm, Am, U, fissionsprodukter		Mycket hög	Mycket hög, >2300	*Vägg tjocklek: >8 cm Vikt: ≥8000 kg
Steriliseringsutrustning	1	Co-60	$\gamma$ (1173;1333) $\beta$ (max: 318) $T_{1/2}$ =5,3 år	190- 560 000	60-179 000	Vägg tjocklek: 3-17 cm Vikt: 100-1000 kg
		Cs-137	$\gamma$ (662) $\beta$ (max: 514) $T_{1/2}$ =30 år	190- 190 000	18-17 600	
Termoelektriska generatorer (RTG)	1	Sr-90/ Y-90	Sr-90: $\beta$ (max: 546) $T_{1/2}$ =29 år Y-90: $\beta$ (max: 2280) $T_{1/2}$ =2,7 dagar	330- 25 000	0,5-10	Vikt: ≥ 300 kg
		Pu-238	$\gamma$ (100) $\alpha$ ( 5500) $T_{1/2}$ =88 år	1-10	<0,00022	
		Po-210	$\gamma$ (803) $\alpha$ (5304) $T_{1/2}$ =139 dagar			
	Ej kategoriserat					

Strålkälla	IAEA kategori	Ämne	Strålslag (keV) och fysikalisk halveringstid	Aktivitet (TBq)	Doshastighet på 1 m (Sv/h)	Dimensioner* på blyskyddet som reducerar doshastigheten till 1 Sv/h
Medicinsk utrustning (strålknivar, strålterapi)	1	Co-60	$\gamma(1173;1333)$ $\beta(\text{max: } 318)$ $T_{1/2}=5,3$ år	40-560	13-180	Vägg tjocklek: 8 cm Vikt: 300 kg
		Cs-137	$\gamma(662)$ $\beta(\text{max: } 514)$ $T_{1/2}=30$ år	20-56	2-5	
Radiograferingsutrustning	2	Co-60	$\gamma(1173;1333)$ $\beta(\text{max: } 318)$ $T_{1/2}=5,3$ år	0,4-7,4	0,13-2,4	Vikt: <300 kg
		Ir-192	$\gamma(317)$ $\beta(\text{max: } 675)$ $T_{1/2}=74$ dagar	0,2-7,4	0,03-0,42	
		Se-75	$\gamma(401;280;265;136;121)$ $\beta(\text{max: } 463)$ $T_{1/2}=120$ dagar	3	0,2	
		Yb-169	$\gamma(308;198;177;131;110;63)$ $\beta(\text{max: } 530;436)$ $T_{1/2}=32$ dagar	0,093-0,4	0,006-0,026	
		Tm-170	$\gamma(84)$ $\beta(\text{max: } 968)$ $T_{1/2}=129$ dagar	0,74-7,4	0,00089-0,0089	

\* För samtliga strålkällor utom för utbränt reaktorbränsle antas blyskyddet vara cylinderformat med en yttre diameter och höjd på 0,5 meter. Reaktorbränslets blyskydd antas vara rektangulärt med bredden 0,58 meter och en längd på drygt fyra meter.

Utbränt reaktorbränsle innehåller dock stora mängder fissions- och aktiveringsprodukter med hög aktivitet. I Sverige lagras de utbrända bränsleelementen det första året i bassänger på kärnkraftverken, och får under denna tid anses svåråtkomliga för en potentiell förövare. Efter detta år transporteras bränsleelementen till det centrala mellanlagret för använt kärnbränsle (Clab) i Oskarshamn. Under denna transport kan det inte uteslutas att det är möjligt för en förövare, med resurser och vilja, att tillskansa sig utbränt reaktorbränsle.

I Sverige finns ett 70-tal starka strålkällor som tillhör kategorierna 1 och 2 enligt IAEA:s indelning (efter genomgång av SSI:s register). Till dessa starka strålkällor som kommer att behandlas mer ingående i kapitel 4 hör steriliseringsutrustning, strålknivar, strålterapiutrustning och radiograferingsutrustning (tabell 2). Denna typ av strålkällor används huvudsakligen vid sjukhus, forskningsinstitutioner och inom industrin. Med sitt strålskydd är dessa strålkällor mycket tunga, vilket innebär att det krävs tekniska lyft- och transportresurser

för att flytta dem. Utan strålskydd ger strålkällorna snabbt livshotande stråldoser. I västvärlden byts numera de starkaste strålkällorna ut mot acceleratorbaserad utrustning, eftersom den är säkrare och lättare att hantera. På så vis minskar också risken att strålkällor kommer på avvägar.

Speciellt vid transporter är det känt att det åtminstone tidigare förekommit att strålkällor lämnats utan uppsikt på t.ex. lastbryggor. De få stölder av radioaktivt material som förekommit i Sverige visar att transporter är den svagaste länken i säkerheten kring hanteringen av strålkällor (Karlberg, 1991, 1995).

I början av 2000-talet bedömdes det årligen inom EU försvinna ca 70 strålkällor tillhörande kategorierna 1-5 (IAEA, 2002). Sedan dess har EU utökats med ytterligare tio stater, vilket torde innebära att än fler strålkällor försvinner årligen inom EU.

En udda typ av källor av intresse för denna studie är termoelektriska generatorer (RTG), i vilka den termiska energi som radioaktivt sönderfall alstrar används för att generera elektrisk energi. De har bl.a. använts, och används fortfarande, som elektriska energikällor till avlägset belägna fyrar, företrädesvis i Ryssland utefter norra ishavskusten, samt på andra ställen inom det forna Sovjetunionen.

En tidigare studie har visat att den svenska gränskontrollen för radioaktiva ämnen är otillräcklig (Oliver et al., 2004) vilket innebär att det är möjligt att olagligt transportera radioaktivt material in i Sverige. För att förbättra gränskontrollen införskaffade Tullverket tillsammans med Strålskyddsinstitutet under 2005 tre mobila enheter för strålningsdetektion som ska kunna agera längs Sveriges gränser. Även om en förbättring i och med detta skett är kontrollen idag långtifrån så effektiv att den kan anses som heltäckande.

Slutsatsen är att det är möjligt för en tänkt förövare att få tag i radioaktivt material i Sverige. Det är även möjligt att föra in radioaktivt material i Sverige från utlandet.



**Figur 1.** En gammal termoelektrisk generator (RTG) kontrolleras inför borttransporten. (Foto: Fylkesmannen i Finnmark.)





## 4 Hanterbarhet

Ämnen som endast eller huvudsakligen sänder ut alfa- eller betastrålning är lättare att hantera på grund av strålningens korta räckvidd jämfört med gammastrålande ämnen. För alfa- och betastrålande ämnen är det viktigt att förhindra att hanteringen ger upphov till hud- eller internkontaminering via inhalation. Gammastrålande ämnen är som nämnts tidigare svårare att hantera pga. gammastrålningens stora räckvidd och därmed behovet av tunga strålskydd. I tabell 3 anges gammakonstanten, dvs. relationen mellan aktivitet och doshastighet, för viktiga gammastrålande ämnen aktuella i denna studie. Gammakonstanten definieras som doshastigheten på en meters avstånd för en viss aktivitet. Behöver doshastigheten beräknas på andra avstånd än en meter används kvadratlagen, dvs. doshastigheten avtar med kvadraten på avståndet från källan. Om t.ex. avståndet ökas till två meter blir doshastigheten en fjärdedel av tabellvärdet.

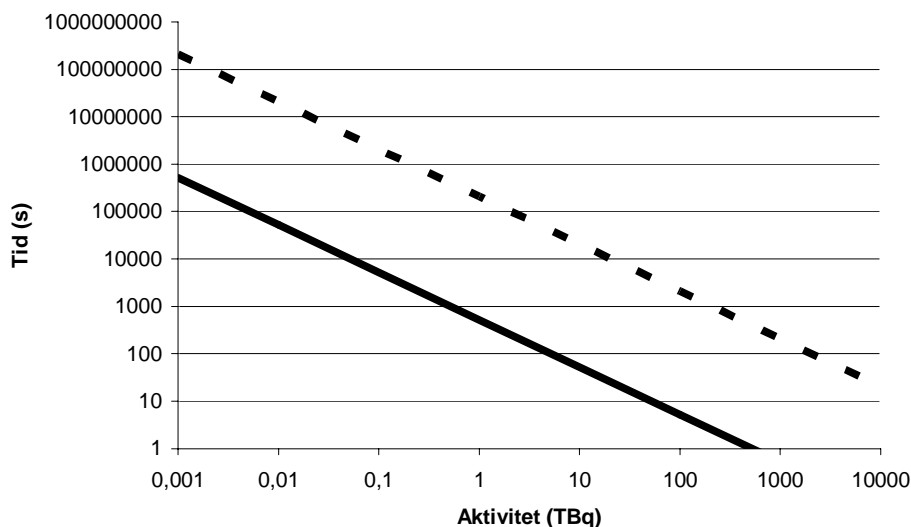
**Tabell 3.** Gammakonstanter (Sv/h på en meters avstånd per TBq) för aktuella radioaktiva ämnen (Delacroix et la., 2002).

Radioaktiva ämnen	Gammakonstant (Sv h <sup>-1</sup> TBq <sup>-1</sup> )
Co-60	0,347
Ir-192	0,139
Cs-137	0,096
Se-75	0,066
Yb-169	0,066
Tm-170	0,0012

Den värdering av hanterbarhet som genomförts i denna studie bygger huvudsakligen på uppgifter om aktivitet (Bq) och strålslag (alfa-, beta-, gammastrålning) hos strålkällorna eller ämnena. Dessa uppgifter, tillsammans med värdena i tabell 2, gör det möjligt att beräkna doshastigheten och behovet av strålskärmar. Detta kan i sin tur utnyttjas för skattningar av vilka stråldoser som hanteringen ger upphov till, liksom dimensioner och vikter på det som ska hanteras.

Hanterbarheten varierar naturligtvis beroende på förövarens ovilja/vilja att utsätta sig för stråldoser. Vi har delat in tänkta förövare i tre kategorier beroende på viljan att utsätta sig för strålning; 1) inom gränsvärdet för arbete med joniserande strålning (50 mSv), 2) villig att utsätta sig för stråldoser som ger lindriga effekter (1-2 Sv), 3) självmordsförövare (>3 Sv).

I figur 2 åskådliggörs den tid det tar att uppnå den "tolerabla" stråldosen för förövare i grupp ett (50 mSv) respektive tre (>3 Sv) på en meters avstånd från en punktkälla innehållande <sup>60</sup>Co. För andra nuklider än <sup>60</sup>Co kan tabell 3 användas för att beräkna tiderna i figur 2. Vid exponering på andra avstånd än en meter används kvadratlagen för att uppskatta tiden.



**Figur 2.** Den heldragna linjen visar den tid det tar i sekunder att erhålla 50 mSv, gränsvärdet för arbete med joniserande strålning, på avståndet en meter från en  $^{60}\text{Co}$ -strålkälla. Den streckade linjen visar motsvarande tid för stråldosen 20 Sv.

Att hantera utbränt reaktorbränsle, som innehåller fissions- och aktiveringsprodukter med hög aktivitet, innebär mycket stora risker. Ett utbränt bränsleelement utan strålskydd, och som nyligen tagits ut ur reaktorn, ger på någon meters avstånd en dödlig helkroppsdos inom loppet av minuter (tabell 2) (Håkansson, 2000), och får därför anses som mycket svårt att hantera. Efter ett år har aktiviteten i bränsleelementen minskat avsevärt, men ligger trots detta på en mycket hög nivå. När de utbrända bränsleelementen transporteras till Clab är de placerade i stål-koppar-cylindrar, som avsevärt minskar doshastigheten (till 6-14 Sv/h). Under transporten är det fullt möjligt för en förövare, med stora resurser och vilja att utsätta sig för strålningsrisker, att hantera det utbrända reaktorbränslet.

En utgångspunkt i analysen är att en förövare endast är intresserad av själva strålkällan i de olika utrustningar som nämns i tabell 2. Detta innebär att strålkällan måste plockas ut ur utrustningen, vilket i många fall inte kan göras med manuella metoder utan att orsaka akuta strålskador eller dödsfall. Ett undantag är radiograferingsutrustning där strålkällan är enkel att manuellt ta ut utan att erhålla höga stråldoser. För att ta ut en strålkälla från en steriliseringsutrustning (>3000 TBq) utan att utsättas för dödliga stråldoser krävs det däremot fjärrmanövrerade specialverktyg bakom ett massivt strålskydd. Inte heller för strålkällor i det nedre intervallet (<3000 TBq), som bl.a. omfattar medicinsk utrustning, är det möjligt att manuellt plocka ut strålkällorna utan att få akuta strålskador. Det är däremot möjligt att utföra enklare operationer, såsom att på kort tid flytta strålkällan från ett strålskydd till ett annat. Ett enklare scenario, sett ur förövarens synvinkel, är förstås att komma över strålkällor som redan har plockats ut ur utrustningen och därefter lagrats i ett enklare strålskydd.

En intakt RTG, som är omgiven av strålskydd, ger en doshastighet på ungefär 2 mSv/h på ytan och 100  $\mu\text{Sv/h}$  på en meters avstånd (Alimov, 2003). Detta är låga värden och de ger under kort tid inga akuta effekter. Om den radioaktiva cylindern tas ut ur RTG-höljet uppstår däremot hanteringsproblem pga. höga doshastigheter (0,5-10 Sv/h; se tabell 2). Sr-90/Y-90

sänder ut högenergetiska betapartiklar som vid inbromsning i det omgivande skyddet genererar bromsstrålning.

I och med att det radioaktiva materialet i strålkällor avklingar blir strålkällorna med tiden för svaga för att kunna användas i sitt ursprungliga syfte, vilket innebär att det radioaktiva materialet i vissa strålkällor rutinmässigt måste bytas ut. Detta radioaktiva material kan fortfarande vara starkt nog för att ge upphov till hanteringsmässiga problem och därmed också användas i antagonistiska syften.

I dagsläget tar de företag som byter ut strålkällor bara hand om gamla strålkällor som tillhör IAEA:s kategori 1. Strålkällorna skickas tillbaka till tillverkaren eller till företag som arbetar med återanvändning av strålkällor. Svagare strålkällor (kategori 2-5) måste ägare i Sverige själva skicka till slutförvar. Detta innebär att strålkällor kan bli undanställda i källarlokaler under långa tider eftersom det medför en kostnad för företaget att sända dem till slutförvaring.

De flesta utrustningar som nämns i tabell 2 är stora och tunga, vilket innebär att det behövs tekniska transport- och lyftresurser för att flytta dem. Även om strålkällan är utanför utrustningen behövs tunga strålskydd för gammastrålande källor. Alfa- och betastrålande ämnen är däremot lättare att hantera på grund av strålningens korta räckvidd jämfört med den för gammastrålande ämnen. Rena alfa- och betastrålande ämnen är dock sällsynta, förutom i olika typer av kärnbränsle, men där förekommer de då tillsammans med höga gammaaktiviteter.

För de tre kategorier av förövare vi identifierat, utifrån viljan att utsätta sig för strålning, kan vi konstatera att möjligheterna för kategori ett (50 mSv) att hantera radioaktivt material begränsar sig till att hantera strålkällor med strålskydd. Kategori två (1-2 Sv), som är villiga att utsätta sig för mer strålning, kommer främst att kunna hantera strålkällor med strålskydd, men kan även utföra enklare operationer, såsom att på kort tid flytta strålkällan från ett strålskydd till ett annat. Självmordsgruppen (>3 Sv) kan planera en operation med de allra starkaste källorna under förutsättning att de hinner genomföra allt de planerat innan de själva blir oförmögna till arbete. Vikten på strålkällor med strålskydd anser vi inte i något fall utgöra något hinder.



## 5 Utspridning och exponering

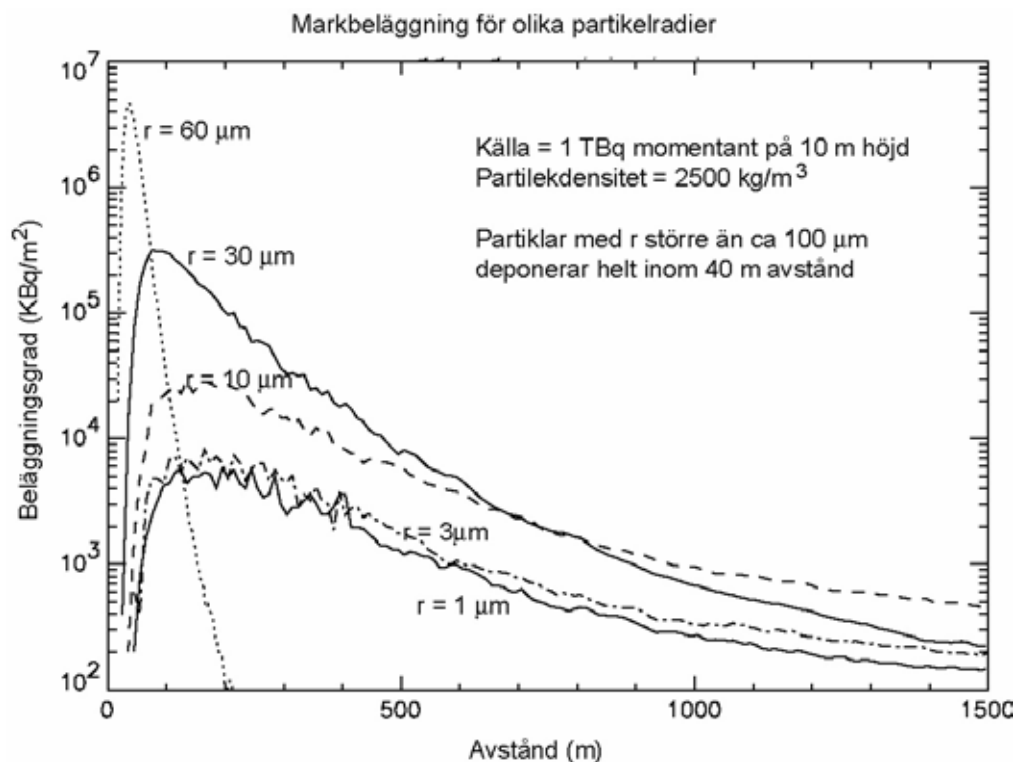
Utspridning och fördelning av radioaktivt material efter t.ex. en explosion påverkas av många faktorer, varav flera är specifika för den enskilda händelsen. Detta begränsar givetvis möjligheterna att finna generaliserbara egenskaper av betydelse för beredskapen. Samband mellan explosionsstyrka, materialegenskaper för den radioaktiva källan, och spridningsavstånd innebär ändå att man kan ta fasta på några ur beredskapssynpunkt viktiga aspekter. Detta gäller främst a) kopplingen mellan partikelstorlek och depositionsavstånd, och b) exponering kopplad till grov- respektive finpartikulära komponenter i det utspridda materialet.

En av de mest angelägna frågeställningarna är naturligtvis hur många som kan väntas löpa risk att få strålskador vid en inträffad händelse. När radioaktivt material spridits ut blir information om beläggningsmönstret successivt tillgänglig genom att man genomför mätningar. Detta tar dock tid, och en viktig fråga är om det med hjälp av enkla modeller går att prediktera utspridningen och därmed tjäna dyrbar tid i inledningsskedet. Eftersom man i en verklig situation troligen inte vet något om hur aktiviteten är fördelad på partikelstorlek, är en möjlighet att bestämma riskavstånd för ett värsta fall, dvs. att för varje avstånd från utspridningspunkten anta den partikelstorlek som vid detta avstånd ger största stråldos från markbeläggning respektive inandning.

### 5.1 Koppling mellan partikelstorlek och depositionsavstånd

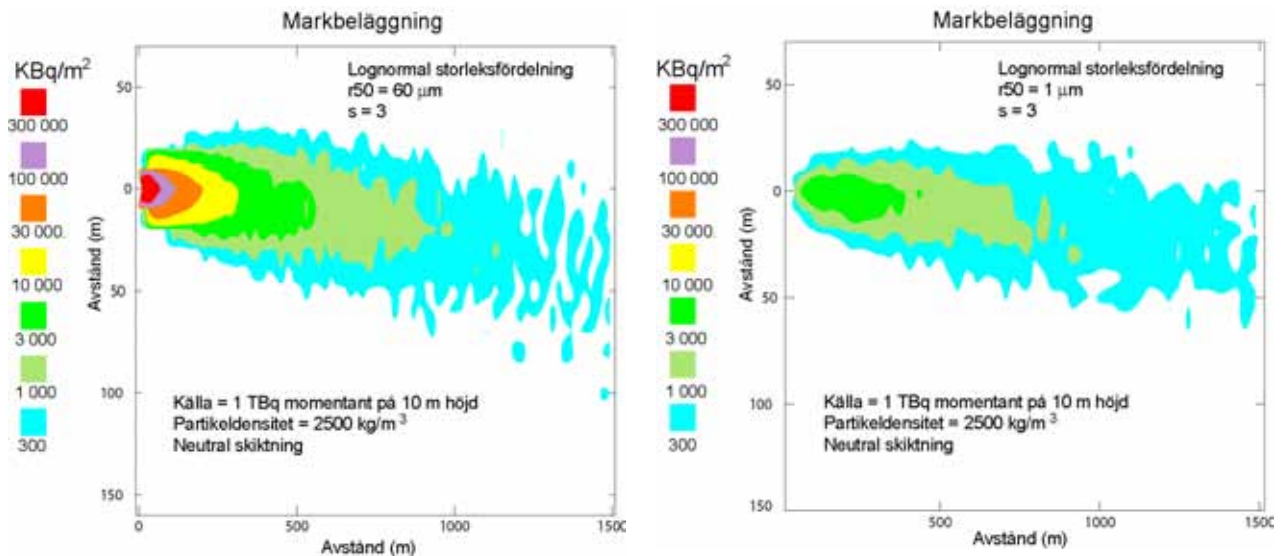
Aerosolisering och fragmentering vid en explosion beror på explosionsförloppet (innefattande explosionsstyrka, typ av sprängämne, hur laddningen applicerats tillsammans med det radioaktiva materialet och placering i förhållande till omgivande objekt) och materialegenskaper för den radioaktiva källan. En del radioaktiva källor består av finpartikulärt material i form av pulver eller korn, medan andra förekommer som solida enheter i form av metall eller keramer.

Stora partiklar faller till marken snabbare än små. Man kan därför utgå från att finna större högaktiva fragment i närområdet, medan de finpartikulära kan ge upphov till mätbara aktiviteter på större avstånd och över stora områden. Figur 3 visar beräkningar av den maximala beläggningen för monodispersa aerosoler för ett antal olika partikelradier som funktion av avståndet. I figuren framgår det tydligt hur stora partiklar kommer att hamna i ett litet område nära källan. Samtliga 60  $\mu\text{m}$ -partiklar hamnar på marken inom ca 200 meter. Partiklar större än ca 100  $\mu\text{m}$  återfinns inom ett avstånd av ca 40 meter (redovisas ej i figur 3). För partiklar mindre än 3  $\mu\text{m}$  blir skillnaderna små på alla avstånd vilket visar att den turbulenta transporten ner till marken dominerar över sedimentationsprocessen för dessa partiklar.



**Figur 3.** Markbeläggning som funktion av avstånd och medianradie för monodispersa aerosoler. En källa på 1 TBq har antagits för varje partikelstorlek.

I verkligheten skulle aerosolen inte bestå av partiklar med bara en storlek utan en mer eller mindre bred storleksfördelning skulle uppträda. Detta betyder att ett helt spektrum av partikelstorlekar, och därmed fallhastigheter, skulle förekomma och att den "spridande" effekt som turbulensen orsakar, ytterligare skulle förstärkas. I figur 4 illustreras resultatet av beräkningar där två olika storleksfördelningar, "stora" partiklar och "små" partiklar, för aerosolen använts. Beräkningarna är gjorda med FOI:s stokastiska partikelspridningsmodell (Schönfeldt, 1997) för samma vädersituation (neutral skiktning; vindhastighet 5 m/s) och samma mängd utsläppt aktivitet (1 TBq). Starthöjden för partiklarna efter själva utspridningsförloppet har satts till tio meter. De "stora" partiklarna har antagits vara normalfördelade (medianradie  $r_{50} = 60 \mu\text{m}$  med geometrisk standardavvikelse,  $s=3$ ), vilket innebär att 68 % av aktiviteten finns på partiklar med radie mindre än  $100 \mu\text{m}$ , medan ca 5 % finns på partiklar med en radie mindre än  $10 \mu\text{m}$ . För de "små" partiklarna ( $r_{50} = 1 \mu\text{m}$ ;  $s=3$ ) finns 98,2 % av aktiviteten på partiklar med radie mindre än  $10 \mu\text{m}$ .



**Figur 4.** Markbeläggnings beräknad med stokastisk partikelmodell för en aerosol med (a) ”stora” partiklar (medianradie  $r_{50} = 60 \mu\text{m}$ ) och (b) ”små” partiklar ( $r_{50} = 1 \mu\text{m}$ ).

Figur 4 visar att en utspridning med ”stora” partiklar kan orsaka en markbeläggnings som nära utspridningspunkten blir flera storleksordningar större än motsvarande med ”små” partiklar. På större avstånd blir skillnaderna mindre.

## 5.2 Exposition i förhållande till utspridningssätt och beläggningsmönster

Om det radioaktiva materialet sprids till omgivningen t.ex. genom explosion kommer radioaktiva partiklar (och eventuellt radioaktiva gaser) att transporteras av vinden. Dessutom blir mark och bebyggelse i spridningsområdet radioaktivt belagda. Individer som befann sig i vindriktningen vid händelsen och senare befinner sig i, eller tar sig in i, det kontaminerade området kan exponeras på olika sätt. Främst gäller det exponering från:

- *den radioaktiva markbeläggningsen,*
- *kontaminering av kläder eller hud,*
- *radioaktivt splitter som fastnat i kroppen,*
- *inandning av radioaktiva partiklar.*

Det finns flera tänkbara exponeringsvägar utöver dessa, men de bedöms innebära en lägre grad av radiologisk risk. Till de senare hör upptag i kroppen av radioaktiva partiklar genom sår eller genom att man sväljer föroreningar som fastnat kring munnen eller på händerna, alternativt äter eller dricker radioaktivt förorenade produkter.

Vilka exponeringsformer som dominerar riskbilden för individer som befinner sig i det kontaminerade området, respektive personer som i ett tidigt skede ger sig in i området, är starkt scenarieroende. Diskussionen nedan berör sådana – delvis ämnesspecifika – faktorer som väntas vara avgörande för exponeringsriskerna.

### 5.2.1 Strålningsbidragen från homogent deponerad aktivitet

Vid förhållandevis homogen beläggnings över stora ytor kan man grovt räkna med att 90 % av exponeringen från gammastrålning på nivån en meter över markytan kommer från radioaktiv



beläggning inom en radie av tio meter, medan ytterligare åtta procentenheter av expositionen finns i området 10-30 meter. Betastrålningens räckvidd i luft är avsevärt mer begränsad och vid de aktuella partikelenergierna är räckvidden som tumregel högst en meter. Eftersom genomträngningen i fasta material (kläder, organisk vävnad etc.) vid dessa energier endast är några få millimeter, är det främst partiklar på hud eller tunna kläder som utanför kroppen kan ge betydande betaexponering, och då endast i huden. Utsänder den radioaktiva nukliden både gammastrålning och betastrålning är det därför främst gammastrålningen som ger bidrag till stråldosen.

Antag att strålkällan som spridits ut i figur 4 är en  $^{60}\text{Co}$ -källa ( $^{60}\text{Co}$  utgör värsta fallet bland de nuklider vi behandlat i denna rapport). För en person som befinner sig nära strålkällans utspridningspunkt (med en beläggning på  $300 \text{ MBq/m}^2$ , se figur 4a) blir stråldosen från deponerad aktivitet ca 3 mSv efter en timmes exponering. För en person som befinner sig ca 100 meter i vindriktningen från utspridningspunkten blir stråldosen från beläggningen ca 0,3 mSv.

### 5.2.2 Strålningsbidragen från inhomogent deponerad aktivitet

Inhomogeniteter i fördelningen kan ha stor betydelse för den totala exponeringen under vistelse i ett radioaktivt område. I närheten av stora och relativt högaktiva fragment blir strålfältet särskilt kraftigt. Ett högaktivt fragment går att jämföra med t.ex. en försåtligt utplacerad strålkälla. För personer som rör sig i området är det ändå rimligt att vänta sig att de höga och låga dosbidragen sammanvägt närmar sig en medeldos för den tid de uppehåller sig i området, trots det varierande strålfältet. Ur den synvinkeln kan man urskilja två skilda kategorier av exponeringssituationer som gäller a) skadade som inte hunnit avlägsnas ur området och b) personer som ger sig in i området. För kategori a) kan enskilda högaktiva fragment på nära håll under förhållandevis lång tid ge betydande exponering. För kategori b), som rör sig i området, är det främst den totala aktivitetsmängden i det aktuella området som bidrar, oavsett om det är inhomogent utspridda, större fragment, eller en mer homogen, finpartikulär deposition.

### 5.2.3 Kontaminering av kläder eller hud

Ju närmare man befinner sig en strålkälla desto kraftigare blir exponeringen. Det är dock stor skillnad på avståndsberoendet för gammastrålning och betastrålning.

För gammastrålning gäller med god approximation kvadratlagen. Tar man hänsyn till absorptionen i det mellanliggande mediet minskar intensiteten ytterligare. I luft är dock absorptionen mycket liten vid avstånd kortare än 30 meter.

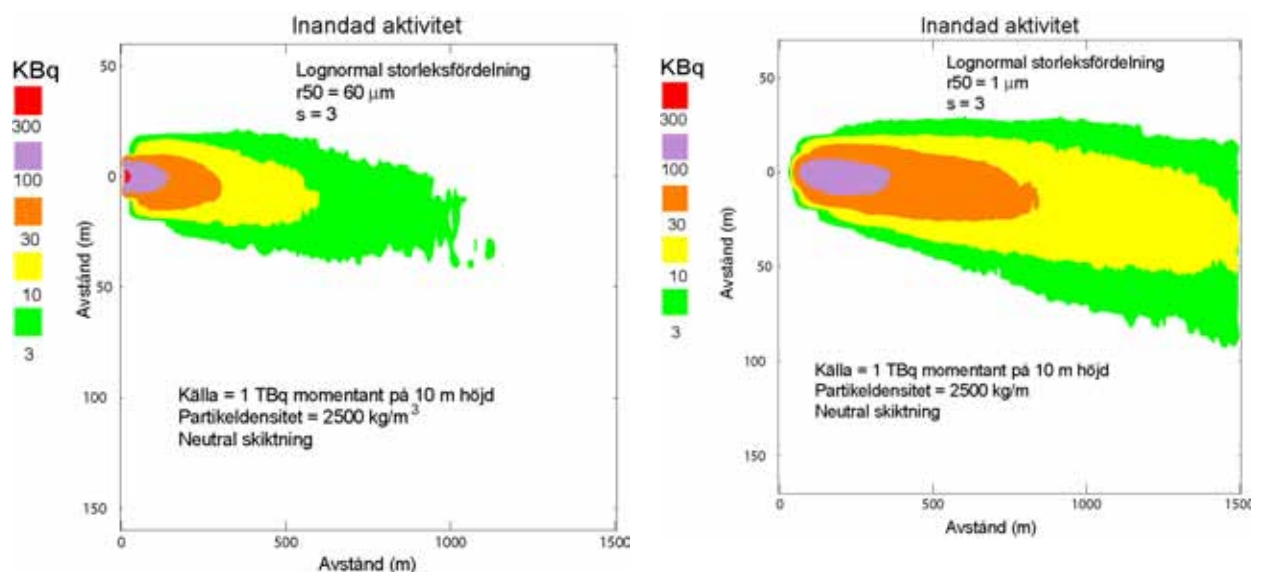
Betastrålning, som utgörs av laddade partiklar, har jämförelsevis begränsad räckvidd. För de radioaktiva nuklider som är aktuella i denna rapport är räckvidden för betapartiklarna högst någon meter i luft. Dessutom är räckvidden i vävnad mindre än 0,5 centimeter för samtliga betastrålande ämnen behandlade i denna rapport. Sammantaget innebär detta att enstaka små betastrålande eller gammastrålande partiklar som hamnat på hud kan ge relativt stora stråldoser i huden inom en liten yta. På större avstånd bidrar endast gammastrålning och doshastigheten är då avsevärt lägre. Gammastrålning har dock stor genomträngningsförmåga, och om en stor mängd gammastrålande partiklar, exempelvis i form av damm, kontaminerar ytan (kläder eller hud) kan summan av de individuella bidragen leda till relativt höga stråldoser även på större djup i vävnaderna. Om ytdoserna blir stora kan håravfall (vid ca

3 Sv) och hudrodnad (uppträder över ca 6 Sv) i detta sammanhang utgöra viktiga indikatorer på joniserande strålning. Om ett antagande görs att beläggningen på huden blir ungefär motsvarande markbeläggningen i området nära utspridningspunkten i figur 4 (300 MBq/m<sup>2</sup>), blir dosen till hud lokalt ca 20-100 mSv efter en timme (endast 0.2-1 mSv adderas dock till helkropps-dosen).

#### 5.2.4 Inandning av radioaktiva partiklar

Kort tid efter explosionen är partikelkoncentrationerna relativt höga i luften nära utspridningspunkten. Som tidigare har nämnts minskar mängden större partiklar i luft förhållandevis snabbt med avståndet från utspridningspunkten pga. deposition. Under passagen av det radioaktiva molnet sker också successivt en utspädning av den kvarvarande aktiviteten genom molnets utvidgning. Detta samverkar till att inandningen av kontaminerad luft har störst betydelse i närområdet, där redan ett fåtal inandningar utan andningsskydd av den förbidrivande radioaktiva luftmassan kan leda till ett stort intag av såväl stora som små radioaktiva partiklar.

Betydelsen av storleksfördelningen för inandad aktivitet illustreras i figur 5, dels för en utspridning av ”stora” partiklar och dels för utspridning av ”små” partiklar. Beräkningarna är gjorda för samma vädersituation (neutral skiktning) och samma mängd utsläppt aktivitet (1 TBq), som i kapitel 5.1.



**Figur 5.** Total mängd inandad aktivitet för en person som står still under hela molnpassagen och andas 25 liter/minut. Det passerande molnet innehåller en aerosol med (a) ”stora” partiklar (medianradie  $r_{50} = 60 \mu\text{m}$ ) och (b) ”små” partiklar ( $r_{50} = 1 \mu\text{m}$ ).

När det radioaktiva stoftmolnet sprids i vindriktningen kommer personer som i närområdet nås av den passerande radioaktiva luftmassan att kortvarigt andas in radioaktiva partiklar. Vi har beräknat hur stora mängder – i förhållande till aktiviteten i strålkällan och partikelstorleken – som en person andas in under molnpassagen på olika avstånd från utspridningspunkten (se figur 5). Den totala mängd aktivitet som kan andas in under en molnpassage efter utspridning av ”små” partiklar är betydligt större på längre avstånd än för ”stora” partiklar. För korta avstånd är skillnaderna mindre mellan de olika partikelstorlekarna.

Stråldoserna som erhålls är dessutom nuklidberoende. Den maximala stråldosen från inandad aktivitet har uppskattats till 5-50 mSv under en 50-årsperiod från en källa av storleken 1 TBq. Anledningen till att den inandade stråldosen anges för en 50-årsperiod är att den maximala stråldosen fås av svårlösliga partiklar som är kvar under mycket lång tid i kroppen.

Nästan allt tillgängligt radioaktivt material består av partiklar större än 10 µm. I lungvävnaden deponeras däremot praktiskt taget endast partiklar i storleksintervallet 0,2 - 10 µm (ICRP, 1994). Detta innebär att om inte en brand, en explosion eller annan aktivitet förändrat utgångsmaterialet mot avsevärt mindre partikelstorlekar ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ), kommer det mesta av det radioaktiva materialet som andats in att fastna i övre luftvägarna. Därifrån transporteras det mesta vidare till matstrupen där partiklarna når mag- och tarmkanalen (ICRP, 1979). Strålning från radioaktiva ämnen i tarmkanalen och – efter ämnesberoende upptag från tarminnehållet – i olika vävnader utgör i sådana fall de viktigaste expositionsformerna. Den stråldos som mest utsatta respektive känsliga organ utsätts för vid givet intag av en specifik nuklid kan därför uppskattas. På så vis kan man belysa hur stor risken är för akuta eller sena strålskador vid olika stort intag genom inandning av en specifik radionuklid. För olika scenarier kan denna risk relateras till riskerna kopplade till kontaminering av kläder och bar hud samt strålningsbidraget från den radioaktiva beläggningen i omgivningen

Viktiga kvarstående frågor, som behöver belysas för att klargöra betydelsen av radioaktivt intag med andningsluften i förhållande till övriga expositionsbidrag (från yttlig kontaminering och radioaktivitet i omgivningen), är följande:

- *Hur ser aerosoliseringen och fragmenteringen ut för olika strålkällor och utspridningsmetoder?*
- *Hur länge finns det stora mängder radioaktivt material i luften genom uppvirvling över ett kontaminerat område?*

Dessa frågor har ännu inte studerats närmare med avseende på hur källans kemiska och fysiska form, respektive utspridningssätt, påverkar partikelfördelningen.

## 6 Risker

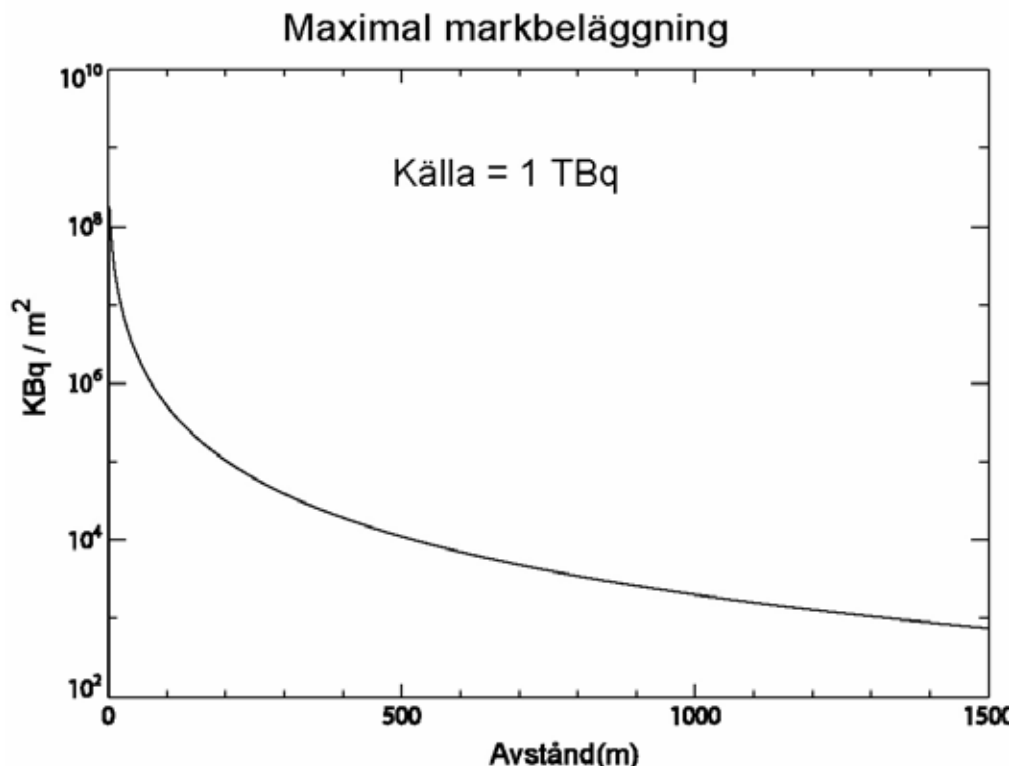
För att bedöma risker och effekter av bestrålning i samband med utspridning av radioaktivt material i luft och på marken behövs, som nämnts ovan, kunskap om den radioaktiva aerosolens storleksfördelning. Vid en inträffad händelse är det idag omöjligt att snabbt få klarhet i storleksfördelningen hos aerosolen. En beslutsfattare måste ändå snabbt kunna avgöra vilka riskavstånd som ska gälla. En viktig del av beslutsunderlaget är risken för att ett flertal personer drabbas av akuta effekter och skador. Det kan gälla dem som befinner sig i det kontaminerade området redan när utspridningen äger rum, eller personer som kommer in i området något senare. Som vi visat ovan beror exponeringen från en strålkälla främst på kombinationen av strålkällans styrka, det kontaminerade områdets storlek, avståndet till den exponerade personen, och tiden den drabbade stannar i strålfältet.

### 6.1 Riskområden

#### 6.1.1 Risker vid markdeposition

Att simulera riskavstånd med hjälp av en stokastisk partikelmodell tar lång tid och därför har en enkel analytisk modell tagits fram som mycket snabbt kan generera resultat som avviker marginellt från den stokastiska partikelmodellens skattningar, vilka åskådliggjorts tidigare i rapporten. Beräkningar med den analytiska modellen, som visas i figur 6, är oberoende av partikelstorlek och vindhastighet. Eftersom beläggningen på varje avstånd maximerats genom att bl.a. optimera fallhastigheten för en monodispers aerosol, blir alltid den verkliga beläggningen från en aerosol med en storleksfördelning mindre än de skattningar som visas i figur 6. Resultaten är skalbara vad gäller utsläppt mängd aktivitet. Motsvarande riskmall för en utspridning av t.ex. 10 TBq erhålls genom att värdena på den vertikala axeln multipliceras med 10.

Räddningsverkets rekommendationer till sina räddningsledare är att ett område med minst 50 meters radie initialt ska spärras av efter en explosion där okända fasta ämnen varit inblandade. Befinner sig ämnena i vätske- eller gasfas ökar riskavståndet. Avspärningar bör enligt SSI göras vid 100  $\mu\text{Sv}/\text{timme}$ , vilket kan vara ett problem i och med att räddningstjänsten eller polisen, som ofta är först på plats vid inträffade händelser, inte alltid kan, eller har möjlighet att, mäta doshastigheter. Är räddningsledaren medveten om att radioaktivt material spridits sker dock avspärningen vid 100  $\mu\text{Sv}/\text{timme}$ . Är så inte fallet kan låga doshastigheter ge betydande doser till personer som av olika anledningar befinner sig i området under lång tid.



**Figur 6.** Exempel på uppskattade riskavstånd. Den maximala markbeläggningen för varje vindhastighet och partikelstorlek. Strålkällan med aktiviteten 1 TBq, är utspridd på 10 meters höjd.

Skattningarna i figur 6 visar att markbeläggningen kan vara 10 MBq/m<sup>2</sup> 500 meter från utspridningsplatsen, vilket innebär att stråldosen under en timme som mest kan bli 100 µSv (monodispers aerosol med <sup>60</sup>Co). Om räddningsledaren gjort avspärningen vid 50 meter från explosionsplatsen, kan markbeläggningen i värsta fallet vara 3000 MBq/m<sup>2</sup> vid avspärningen. Detta innebär att personer som befinner sig i avspärningsområdet under en timme som mest kan få en stråldos på 30 mSv, och att personer som befunnit sig där under t.ex. ett och ett halvt dygn som mest kan få stråldoser på 1 Sv (monodispers aerosol med <sup>60</sup>Co).

För att personer som vistas en timme i ett beläggingsområde – med det mesta av källan relativt homogent fördelat inom en radie av 30 meter – ska få stråldoser på nivån 1 Sv fordras att den totala utspridda aktivitetsmängden är av storleksordningen 100-1000 TBq (kategori 1 enligt IAEA:s klassificering). Emellertid kan större fragment (punktkällor) ge betydligt högre stråldoser lokalt. Sker däremot utspridningen över ett större område än en yta med radien 30 meter (t.ex. genom mer finpartikulärt material som når längre på grund av uppehållstiden i luften) blir markbeläggning och exposition från omgivningen lägre. Oavsett om utspridningen leder till en förhållandevis homogen och finpartikulär deposition eller en inhomogen fördelning av relativt stora fragment, kan det strålfält man utsätts för genom bidragen från det deponerade radioaktiva materialet i närområdet bli högt när det gäller gammastrålning. För att skadorna ska bli livshotande för annat än de enstaka individer som befinner sig nära utspridningsplatsen vid utspridningen fordras dock strålkällor med mycket höga aktivitetsnivåer (1-1000 PBq), vilket endast ett begränsat antal källor uppfyller (IAEA, 2003).

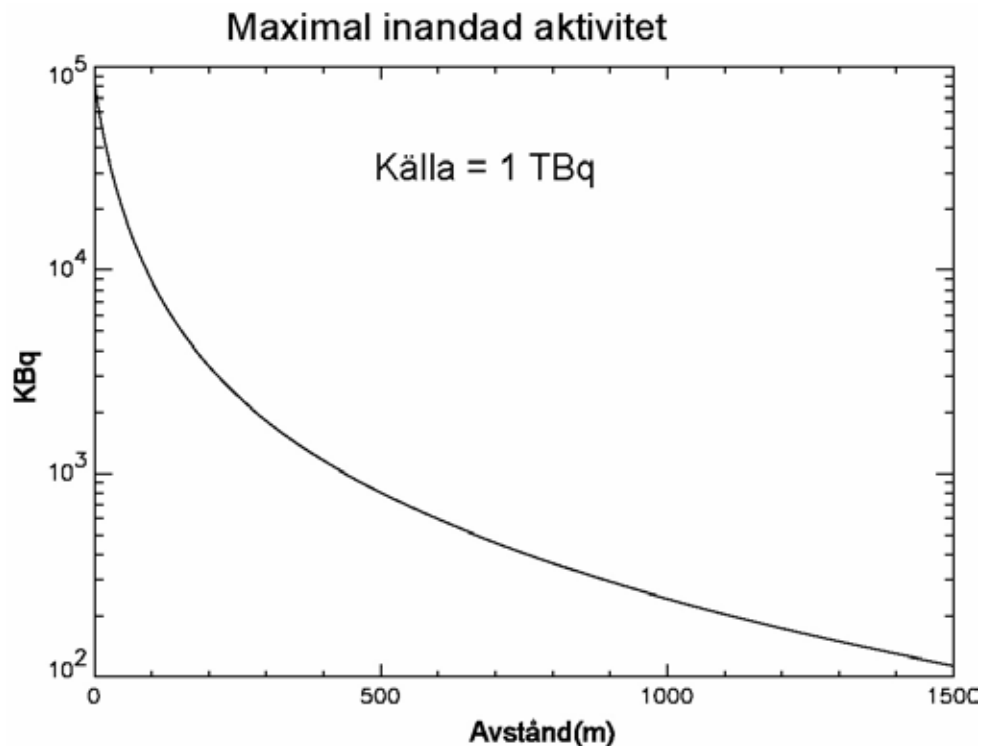
För strålkällor i kategorierna 2-5 enligt IAEA:s indelning är källstyrkorna mycket lägre och därigenom är riskerna avsevärt mer begränsade. Det krävs vistelse under vad som bedöms vara osannolikt lång tid (från flera timmar till flera dygn) i närheten av dessa svagare strålkällor för att drabbas av livshotande strålskador. Bortsett från källorna tillhörande kategori 1 är det därför inte troligt att man vid utspridning under fragmentering av materialet i något fall når dödliga stråldosnivåer (Oliver et al. 2004).

För att uppnå stråldoser av storleksordningen 1 mSv per år från extern bestrålning krävs en markbeläggning på 10-100 kBq per m<sup>2</sup> över relativt stora ytor (> 1000 m<sup>2</sup>), samt att man vistas på ytan under långa tider, t.ex. ett helt år. 1 mSv per år motsvarar ungefär den stråldosbefolkningen erhöill i Gävletrakten efter Tjernobylyolyckan (Edvarson, 1991).

### 6.1.2 Risker vid inandning

Med den analytiska modellen går det även att uppskatta den inandade aktiviteten vid olika avstånd från utspridningsplatsen. Beräkningarna är gjorda för en person som andas in 25 liter/minut. Enligt skattningarna i figur 7 andas en person, som befinner sig på avståndet 50-100 meter från utspridningsplatsen när det radioaktiva molnet passerar, in en aktivitet på 10-20 MBq, vilket innebär en inandad dos på 1,3-2,6 Sv under en 50-årsperiod (monodispers aerosol med <sup>60</sup>Co). Innehåller däremot källan betastrålande ämnen som t.ex. <sup>90</sup>Sr eller <sup>238</sup>Pu blir dosen >6 Sv. Personer som befinner sig 500 meter eller mer från utspridningsplatsen när det radioaktiva molnet passerar erhåller en inandad dos under en 50-årsperiod på 0,1 Sv (monodispers aerosol med <sup>60</sup>Co) eller >0,5 Sv (monodispers aerosol med <sup>90</sup>Sr eller <sup>238</sup>Pu). Som nämnts tidigare är anledningen till att den inandade stråldosen anges för en 50-årsperiod att den maximala stråldosen fås av svårlösliga partiklar som är kvar under mycket lång tid i kroppen. Viktigt att notera är att under en 50-årsperiod ger de betastrålande ämnena vi behandlar i denna rapport högre doser vid inandning än de gammastrålande ämnena.

Som diskuterats tidigare förutsätter ett stort intag av aktivitet genom inandning att man befinner sig nära utspridningspunkten just under den korta tid då det förorenade molnet driver förbi. Akuta strålskador i särskilt utsatta vävnader i lungor, näsa, svalg och tarmkanalen (eller i andra organ som kan absorbera relativt höga koncentrationer av vissa nuklider efter upptag från tarmkanalen och blodet) bland en stor grupp människor är därför inte troliga.



**Figur 7.** Exempel på uppskattade riskavstånd. Inandad aktivitet för varje vindhastighet och partikelstorlek. Strålkällan innehåller en aktivitet på 1 TBq, och har spridits på 10 m höjd.

Avspärningsavståndet till utspridningsplatsen har ingen betydelse för den inandade stråldosen i och med att avspärningen först görs efter att det radioaktiva molnet passerat. Endast i förebyggande syfte när man misstänker att något kan hända finns det skäl att väga in riskavstånd vad gäller inandning av radioaktiva ämnen i avspärningsavståndet.

## 6.2 Skaderisker

I diskussionen ovan har vi huvudsakligen fokuserat på stråldoser i det övre området, dvs. sådana som kan ge akuta skador, eller t o m vara livshotande. För detta erfordras totala doser som är större än 1 Sv. Eftersom relationen mellan dos och effekt/skada beskrivs av en brant kurva, kan en frisk person utan större risk för akuta skador utsätta sig för upp till 0,5 Sv. Detta betyder dock inte att sådana dosnivåer är ofarliga, utan att de istället ökar riskerna för andra sjukdomar på längre sikt, som diskuterades i kapitel 2.

Under normala, civila och fredliga förhållanden använder man gränsvärden som ska garantera att det finns en stor säkerhetsmarginal. Vid extraordinära förhållanden, t.ex. krig eller andra svåra påfrestningar på samhället, får de risker en bestrålning innebär vägas mot andra risker allmänhet eller insatspersonal utsätts för. I ett sådant perspektiv kan toleransen för erhållna stråldoser vara betydligt högre.

Stråldoser som kan leda till att ett flertal individer drabbas av akuta effekter orsakas främst av partiklar under deposition och av uppvirvling av redan deponerat material. Även partiklar som fastnat på hud eller i kläderna kan ge akuta strålskador, både från gamma- och betastrålning,

genom relativt hög exponering av den näraliggande huden och hårbotten. Effekterna av detta är dock inte livshotande. Akuta strålskador efter inandning av radioaktivt stoft är inte särskilt sannolika.

Sena, stokastiska effekter kan uppträda, t.ex. i form av en förhöjd cancerfrekvens, efter betydligt lägre erhållna doser. Eftersom låga doser kan erhållas på större avstånd från explosionen, får man också räkna med att ett större antal individer kan ha blivit exponerade. Både deponerad aktivitet på marken och inandning av radioaktivt stoft kan ge bidrag till förhöjda stråldoser.

Till detta kommer att vissa radioaktiva ämnen även är kemiskt giftiga i små mängder, t.ex. uran och plutonium. Om uran i en kemiskt löslig form andas in och fastnar i lungorna transporteras det bort med blodet via njurarna inom några dagar. Små mängder kemiskt lösligt uran kan orsaka njurskador. Om uranet däremot är kemiskt svårlöst kan det bli kvar i lungorna under lång tid, t o m decennier, vilket innebär ökad risk för sena (stokastiska) effekter.





## 7 Slutsatser

Möjligheterna för en potentiell förövare att komma i besittning av starka strålkällor som vid ett attentat kan ge människor akuta strålskador är begränsade i och med att det endast finns ett fåtal sådana strålkällor. Om förövaren trots allt får tag i en stark källa beror hanterbarheten och möjligheten att skapa en effektiv utsprängning på förövarens vilja att utsätta sig för strålningsrisker. För de tre kategorier av möjliga förövare vi identifierat kan vi konstatera att möjligheterna för kategori ett (50 mSv) att hantera radioaktivt material begränsar sig till att hantera strålkällor med strålskydd. Kategori två (1-2 Sv), som är villiga att utsätta sig för större strålningsrisker, kommer främst att kunna hantera strålkällor med strålskydd, men kan även utföra enklare operationer, såsom att på kort tid flytta strålkällan från ett strålskydd till ett annat. Självmondsgruppen (>3 Sv) kan planera en operation med de allra starkaste källorna under förutsättning att de hinner genomföra allt de planerat innan de själva blir oförmögna till arbete. Vikten på strålkällor med strålskydd anser vi inte i något fall utgöra något hinder.

För att många individer ska drabbas av så höga stråldoser att det leder till akuta strålskador vid ett attentat med en smutsig bomb krävs extremt starka strålkällor. Stråldoser som kan leda till att ett flertal individer drabbas av akuta effekter orsakas främst av partiklar under deposition och av uppvirvling av redan deponerat material. Partiklar som fastnar på hud eller i kläder kan ge akuta strålskador, både från gamma- och betastrålning, genom relativt hög exponering av den näraliggande huden och hårbotten. Effekterna av en lokal bestrålning av hud kan dock inte jämföras med motsvarande helkroppsdos, och är oftast inte livshotande.

Ett stort upptag av aktivitet genom inandning förutsätter att man befinner sig nära strålkällan under just den korta tid då det förorenade molnet driver förbi. Akuta strålskador i särskilt utsatta vävnader i lungor, näsa, svalg och tarmkanalen (eller i andra organ som kan absorbera relativt höga koncentrationer av vissa nuklider efter upptag från tarmkanalen och blodet) bland en stor grupp människor är därför inte troliga. Däremot bidrar intaget av radioaktiva ämnen till ökad risk för sena (stokastiska) effekter samt att vissa ämnen är giftiga i små mängder.

Trots detta kan konsekvenserna av en smutsig bomb bli allt annat än försumbara. Sena, stokastiska effekter kan uppträda, t.ex. i form av en förhöjd cancerfrekvens, vid betydligt lägre doser. Dessa kan erhållas på större avstånd från explosionen, och man kan då räkna med att ett större antal individer kan ha blivit drabbade. Om källan är tillräckligt stark, kan den radioaktiva kontamineringen av bebyggelsen i det mest drabbade området medföra krav på sanering, och få ekonomiska följder för handel och annan verksamhet i det berörda området (IAEA, 1988). Utöver sådana socioekonomiska konsekvenser blir troligen den psykologiska verkan stor, även i fall med så svaga strålkällor att inga, eller endast obetydliga, radiologiska effekter kan väntas bland de direkt exponerade.



## 8 Ordlista

Absorberad dos	Absorberad strålningsenergin per massenhet. Enhet 1 gray (Gy)= 1 J/kg
Aerosol	Samling luftburna partiklar eller droppar
Aerosolpartikel	Enstaka partikel i en aerosol
Aktiveringsprodukt	Det radioaktiva ämne som bildas när ett stabilt ämne tar upp ytterligare en neutron
Aktivitet	Antalet radioaktiva sönderfall per sekund och anges i becquerel (Bq), där 1Bq är ett sönderfall per sekund
ALARA-principen	As Low As Reasonably Achievable, dvs. att alla onödiga stråldoser skall undvikas
Alfastrålning ( $\alpha$ -strålning)	En typ av joniserande strålning bestående av alfapartiklar, det vill säga, atomkärnor av helium (två protoner och två neutroner)
Am	Americium
Betastrålning ( $\beta$ -strålning)	En typ av joniserande strålning bestående av betapartiklar, det vill säga, elektroner och/eller positroner
Becquerel (Bq)	Antalet atomer som sönderfaller per sekund av ett visst radioaktivt ämne
Bromsstrålning	Typ av strålning som uppkommer när snabba elektriskt laddade partiklar främst elektroner bromsas upp av de elektriska kraftfälten intill atomkärnor
Co	Kobolt
Cs	Cesium
Cm	Curium

Doshastighet	Även kallad dosrat eller intensitet. Den stråldos som erhålls per tidsenhet. Anges ofta i millisivert per timme (mSv/h) eller sievert per timme (Sv/h)
Deterministiska effekter	Akuta effekter
Effektiv dos (Sv)	Den absorberade dosen (Gy) har viktats beroende på vilken biologisk verkan olika typer av joniserande strålning har på mänsklig vävnad samt olika organs strålningskänslighet
Fissionsprodukt	De radioaktiva ämnen som bildas när t.ex. en kärna av uran eller plutonium klyvs efter bestrålning med neutroner. Kallas även klyvningsprodukt
Gammakonstant	Anger doshastigheten på en meters avstånd för en viss aktivitet
Gammastrålning (γ-strålning)	En typ av joniserande strålning bestående av fotoner med en våglängd som är kortare än röntgenstrålningens ( $10^{-11}$ m)
Grey (Gy)	SI-enheten för absorberad dos
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiation Protection
Ir	Iridium
Joniserande strålning	Strålning som kan jonisera atomer eller molekyler i kemiska föreningar
Kvadratlagen	Avståndslagen, innebär att gamma- och röntgenstrålningens intensitet avtar med kvadraten på avståndet till strålkällan. För beta- och alfastrålning är luftabsorptionen betydande och enbart kvadratlagen beskriver inte strålningens avtagande

Monodispers aerosol	Samtliga partiklar i aerosolen är lika stora
Neutral skiktning	Relativt god omblandning av luften och därmed relativt snabb utspädning av utsläppet. Neutral skiktning gynnas av hög vindhastighet och hög molninghet.
Pu	Plutonium
Se	Selen
Sievert (Sv)	SI-enheten för dosekvivalent. Ett grovt mått på hur skadad organismen blivit av den joniserande strålningen som absorberats
Sr	Strontium
Stokastiska effekter	Långsiktiga effekter
Tm	Tulium
U	Uran
Y	Yttrium
Yb	Ytterbium



## 9 Referenser

- Alimov R. 2003. Radioisotope Thermoelectric Generators, Bellona's working paper, 2003-11-23.
- Categorization of Radiation Sources*. 2003. Revision of IAEA-Tecdoc-1911, IAEA-TECDOC-1344, Wien.
- Chu S Y F, Ekström L P, Firestone R B. 1999. The Lund/LBNL Nuclear Data Search, version 2.0.
- Delacroix D, Guerre J, Leblanc P, Hickman C. 2002. Radionuclide and radiation protection data handbook. *Radiat prot Dosimetry* 98:1-168.
- Edvarson K. 1991. Fallout over Sweden from the Chernobyl accident. In *The Chernobyl fallout in Sweden*. (ed. Moberg), 47-65. Sundt Artprint, Stockholm.
- Ferguson C., Kazi T. och Perera J. 2003. Commercial Radioactive Sources: Surveying the Security Risks. Occasional paper No.11. Center for Nonproliferation Studies, Monterey Institute of International Studies.
- Håkansson R. 2000. Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. SKB R-99-74, Svensk kärnbränslehantering AB, SKB.
- IAEA. 1988. The radiological Accident in Goiânia.
- IAEA. 2002. Inadequate control of world's radioactive sources. IAEA press release 2002/09.
- ICRP publication 30. 1979. Part I. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Vol. 2 No. 3/4. Pergamon press.
- ICRP Publication 66. 1994. Human Respiratory Tract model for Radiological Protection. . Vol. 24 No. 1/3. Elsevier Science LTd., Oxford.
- Karlberg J. 1991 Jodstöldsepilog. *Strålskyddsnytt* 3/91.
- Karlberg J. 1995. Ny nuklidstöld på nattåg. *Strålskyddsnytt* 2/95.
- Knoll G F. 2000. Radiation detection and measurement. John Wiley and Sons Ltd, New York, UK, 816 s..
- Oliver L., Melin L., Prawitz J., Ringbom A., Sandström B., Wigg L. och Wirstam J. 2004. Otillåten hantering av radioaktivt material och kärnämne. SKI Rapport 2003:42. SSI Rapport 2003:18.
- Schönfeldt Fredrik. 1997. A Langevin equation dispersion model for the stably stratified planetary boundary layer, 20 s. (FOA-R--97-00523-862--SE).



FOI-R--1973--SE

Tuyle G., Strub T., O'Brien H., Mason C. och Gitomer S. 2003. Reducing RDD Concerns Related to Large Radiological Source Applications. LA-UR-03-6664. Los Alamos National Laboratory.