



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Rapport

Strålskyddskonsekvenser av radioaktivt nedfall från kärnvapenexplosioner

2023:05

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

Datum: Mars 2023

Rapportnummer: 2023:05

ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.ssm.se



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

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

2023:05

Strålskyddskonsekvenser
av radioaktivt nedfall från
kärnvapenexplosioner

Datum: Mars 2023

Rapportnummer: 2023:05

ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Sammanfattning

I den här rapporten redovisar Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) en analys av möjliga konsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner på avstånd mellan ca 10 kilometer och ca 300 kilometer från explosionen, samt effekten av olika skyddsåtgärder. Innehållet i rapporten utgör ett kunskapsunderlag och inte något färdigt planeringsunderlag. Vissa slutsatser kan dock dras och redan nu beaktas i beredskapsplaneringen.

Bakgrund

SSM har ett samlat ansvar för strålskydd och kärnsäkerhet. Inom den nationella strålskyddsberedskapen ska myndigheten vara pådrivande och bl.a. svara för expertkompetens samt kunskaps- och beslutsunderlag inom strålskyddsområdet, inklusive spridningsprognoser, strålningsmätningar och strålskyddsbedömningar. Detta ansvar är oförändrat vid höjd beredskap.

Regeringen har betonat vikten av en sammanhängande totalförvarsplanering för att öka den samlade förmågan i totalförsvaret. Av gällande inriktning¹ framgår att planeringen ska utgå från att kärnvapen kan komma att användas mot Sverige. Ökad kunskap om möjliga konsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner kan därför utgöra ett värdefullt underlag för att utveckla totalförsvaret.

Syfte och metod

Sedan 2018 har SSM bedrivit ett projekt för att studera strålskyddskonsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner. Arbetet har huvudsakligen syftat till att utveckla förståelse och kunskap om radiologiska konsekvenser, särskilt avseende tidiga konsekvenser för allmänheten, samt effekterna av olika skyddsåtgärder. Ett annat syfte har varit att utveckla SSM:s förmåga inom spridnings- och dosberäkningar. Arbetet utgör en plattform för vidare utveckling.

I en kärnvapenexplosion bildas stora mängder radioaktiva ämnen, som kan leda till radioaktivt nedfall. Vid explosionen blandas de radioaktiva ämnena i ett moln med vapenrester och material från omgivningen. När molnet svalnar bildas radioaktiva partiklar som sprids med vinden över stora områden. De allvarligaste radiologiska konsekvenserna genom nedfall uppkommer i samband med kärnvapenexplosioner vid marken. Vid kärnvapenexplosioner utan markkontakt förväntas inte, i samma utsträckning, nedfall som motiverar brådskande strålskyddsåtgärder.

Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) har för SSM:s räkning tagit fram kärnvapenfall som kan förmodas vara representativa för hur en angripare skulle använda kärnvapen operativt, i syfte att uppnå militära mål. Som huvudscenario har SSM valt det kärnvapenfall som förväntas ge de allvarligaste strålskyddskonsekvenserna, dvs. en kärnvapenexplosion vid marken med en laddningsstyrka på 100 kiloton. För att ta fram mer generellt användbara resultat bygger SSM:s analys på statistisk utvärdering av resultat från spridnings- och dosberäkningar för ett stort antal olika historiska väderfall.

¹ Handlingskraft - Handlingsplan för att främja och utveckla en sammanhängande planering för totalförsvaret 2021-2025

En utgångspunkt i beredningsplanering avseende strålskydd är den nivå på stråldos som kallas referensnivån. Planeringen ska möjliggöra att stråldoser inte blir högre än den gällande referensnivån. Under referensnivån ska dessutom optimeringen av strålskyddet fortsätta. Vilket värde som väljs för referensnivån beror på de omständigheter som gäller för den situation som beaktas. Den referensnivå för exponering av personer i allmänheten i en radiologisk nödsituation som nu gäller enligt strålskyddsförordningen (20 mSv årlig effektiv dos) är inte en lämplig utgångspunkt för optimeringen av strålskyddet vid en kärnvapenexplosion. De risker som exponeringen medför måste ställas mot övriga risker som kan råda i en sådan situation. De övergripande målen för strålskyddet i radiologiska nödsituationer är dock fortfarande tillämpliga, dvs. att allvarliga deterministiska hälsoeffekter (akuta strålskador) ska kunna undvikas eller minimeras, och att sannolikheten för stokastiska hälsoeffekter (i huvudsak cancer) ska minskas så långt det är möjligt och rimligt. I rapporten har tre tänkbara referensnivåer i samband med nedfall från kärnvapenexplosioner använts i utvärderingen: 100, 500 och 1000 mSv årlig effektiv dos.

Omfattning

Rapporten fokuserar på områden som ligger på sådant avstånd från explosionen att stråldoser från nedfallet utgör de huvudsakliga konsekvenserna. Initialstrålning och andra direkta verkansformer ingår därför inte. I första hand behandlas de konsekvenser som föranleder behov av brådskande åtgärder. Effekten av skyddsåtgärderna inomhusvistelse, utrymning och intag av jodtabletter utvärderas, liksom behovet av hantering av akuta strålskador.

Ett antal brådskande skyddsåtgärder som kan bli aktuella i samband med kärnvapenexplosioner (personsanering, åtgärder för att minska oavsiktligt intag, samt tidiga åtgärder för livsmedel och varor) behandlas dock inte i denna rapport. Mer långsiktiga eller indirekta konsekvenser som kan uppträda som en följd av nedfallet, såsom konsekvenser för livsmedelsproduktion eller transporter, behandlas inte heller.

Resultat och slutsatser

Stråldoserna från nedfall efter en kärnvapenexplosion kan i vissa fall vara så höga att de är dödliga, livshotande eller resulterar i en bestående skada för en oskyddad person på avstånd upp till tiotals kilometer. Det är viktigt att planera för ett gott skydd mot nedfall i områden på dessa avstånd. Det är även viktigt att planera för ett gott skydd på stora avstånd, upp till hundratals kilometer, för att minska långsiktiga strålskyddskonsekvenser. Eftersom platsen för explosionen inte är känd på förhand innebär detta att sådan planering kan behövas i stora delar av landet.

På kort sikt domineras stråldoserna helt av strålning från radioaktiva ämnen som deponerat på marken. Detta är en viktig skillnad jämfört med utsläpp vid en allvarlig kärnkraftsolycka, där det största bidraget till stråldoser under de första dygnet kommer från inandning av radioaktiva ämnen i luften. Den stråldos som kan erhållas från nedfallet minskar snabbt med tiden efter kärnvapenexplosionen. Vistelse i lokaler som erbjuder gott skydd mot strålning från markbeläggning av radioaktiva ämnen under de första dygnet efter en kärnvapenexplosion är därför effektivt och gör att höga stråldoser kan undvikas även i områden som påverkats av kraftigt nedfall. Exempel på sådant skydd är skyddsrum,

skyddade utrymmen, fortifikatoriskt skyddade ledningsplatser, källare eller liknande lokaler som skyddar mot strålning, och där det går att stanna under flera dygn.

Efter en kärnvapenexplosion tar det viss tid innan nedfallet anländer (beroende på avstånd och väder) och den tiden kan vara tillräcklig för att uppsöka ett gott skydd. Utrymning i denna situation ökar risken att människor är oskyddade om utrymningen inte hinner slutföras innan nedfallet kommer. Det är dessutom svårt att i tid förutse vilka områden som inte kommer att påverkas av nedfall. Att snabbt uppsöka gott skydd vid en kärnvapenexplosion är därför en lämpligare skyddsåtgärd än utrymning.

Efter att behovet av vistelse i gott skydd upphört kan det finnas områden där det är olämpligt att bo kvar. Sådana områden kan behöva utrymmas för att på sikt begränsa stråldoser från markbeläggningen. Den förmåga och planering som finns på plats inom kärnenergiberedskapen, t.ex. för att snabbt kartlägga markbeläggning över stora områden, kan utgöra en god grund för vidare utveckling.

Jodtabletter fyller ingen praktisk funktion vid nedfall från kärnvapenexplosioner. Inom de avstånd där jodtabletter skulle kunna vara motiverade krävs gott skydd för att undvika höga stråldoser från markbeläggningen. I sådant skydd blir stråldoserna till sköldkörteln så låga att jodtabletter inte är motiverade. Detta är ytterligare en skillnad jämfört med utsläpp vid en allvarlig kärnkraftsolycka, där intag av jodtabletter kan vara en viktig åtgärd för att sänka stråldoserna till sköldkörteln.

Behov av vidare utredning och utveckling

Några områden med anknytning till resultaten i rapporten framstår som angelägna för ansvariga myndigheter att fortsätta utreda.

Den här rapporten visar på behovet av att planera för ett gott skydd för allmänheten i samband med nedfall efter en kärnvapenexplosion. I betänkandet *Ett stärkt skydd för civilbefolkningen vid höjd beredskap* (SOU 2022:57) betonas vikten av tillgång till skyddsrum och andra skyddade utrymmen för civilbefolkningen. Utredningen lämnar i betänkandet förslag på ett antal åtgärder med avseende på skyddsrum och andra skyddade utrymmen.

Strålskyddslagstiftningen avseende allmänheten och arbetstagare som inte ingår i totalförsvaret behöver ses över. Av rapporten framgår det att den reglering som gäller för allmänheten i fredstid inte är lämplig för alla situationer som kan tänkas uppstå under höjd beredskap. För arbetstagare som inte ingår i totalförsvaret bör det utredas om den reglering som gäller i fredstid är lämplig vid de situationer som kan uppstå under höjd beredskap.

För att kunna besluta om skyddsåtgärder och andra åtgärder vid kärnvapenexplosioner behöver underlag som baseras på bästa möjliga information om händelsen tas fram skyndsamt. Vilka aktörer som ska samverka i en sådan process behöver utredas. Även former för och innehåll i samverkan behöver utvecklas. Utformningen av beslutsunderlag är också beroende av den planering som finns för skyddsåtgärder och andra åtgärder. Utvecklingen av samverkan behöver därför, liksom för kärnenergiberedskapen, gå hand i hand med utvecklingen av relevanta beslutsstöd.

Systemet för larmning, varning och kommunikation med allmänheten i samband med nedfall från kärnvapenexplosioner behöver utvecklas. Utvecklingen behöver beakta flera frågeställningar som är beroende av tids- och avståndsförhållanden när det gäller skydd mot radioaktivt nedfall från kärnvapenexplosioner. Det kan finnas stora områden som inte kommer att påverkas av nedfall, och där skyddsåtgärder kan undvikas genom tidig analys av rådande väderförhållanden. Vidare kan det finnas stora områden som så småningom kommer att påverkas, men där det finns tid att ta sig till förberedda lokaler som erbjuder gott skydd från strålning under flera dygn, istället för att onödigt skyndsamt bege sig till ett mer närliggande men sämre och mindre uthålligt skydd. Den tid människor behöver tillbringa i skydd mot nedfall på marken beror på mängden nedfall på platsen, och går inte att fastställa i förväg. Utan egen mätförmåga är människor i skydd beroende av information från ansvariga myndigheter om när de kan lämna skyddet. Denna information behöver följas av rekommendationer angående förhållningssätt efter att vistelsen i skyddet avbrutits.

Lämpliga åtgärdsnivåer för livsmedel i samband med kärnvapenedfall behöver tas fram. Nedfall efter en kärnvapenexplosion kan påverka livsmedel på stora avstånd. Konsekvenser för livsmedelsproduktion kan utvärderas med den metod som använts i detta arbete men det kräver tillgång till lämpliga åtgärdsnivåer, dvs. nivåer av markbeläggning där en viss skyddsåtgärd kan behöva vidtas. Kärnvapenedfall skiljer sig så mycket från nedfall i samband med kärnkraftsolyckor att man inte utan vidare kan förutsätta att de åtgärdsnivåer för livsmedel som tidigare tagits fram kan användas.

Det behöver utredas vilken förmåga till strålningsmätningar som bör finnas på lokal, regional respektive nationell nivå, liksom vilka typer av strålningsmätningar som bör genomföras i olika tidsskeden i samband med en kärnvapenexplosion. Förmåga till strålningsmätningar behövs på alla nivåer i samhället, från nationella resurser för kvalificerade analyser och storskalig kartering av nedfall till lokal förmåga för att avgöra om det går att lämna sitt skydd. Vid strålningsmätningar i samband med en kärnvapenexplosion behövs även förberett stöd för tolkning av mätresultat, exempelvis för att kunna ge vägledning om när det kan vara lämpligt att lämna initialt skydd.

I det fortsatta arbetet avser SSM att kontinuerligt förbättra modelleringsförmågan avseende nedfall från kärnvapenexplosioner. Myndigheten kommer också att, i samverkan med ansvariga myndigheter och andra berörda aktörer, använda föreliggande och kommande resultat för att analysera och bidra till att förbättra samhällets skydd mot nedfall från kärnvapenexplosioner.

Innehåll

Sammanfattning	3
Innehåll	7
1. Inledning	9
1.1. Bakgrund och syfte.....	9
1.2. Metodval	10
1.3. Kärnvapenscenarier och val av huvudscenario.....	10
1.4. Omfattning och avgränsningar	11
2. Nedfall från kärnvapenexplosioner	13
2.1. Uppkomst.....	13
2.2. Spridning.....	14
2.3. Nedfallens sammansättning och radioaktiva sönderfall	14
3. Strålskydd	18
3.1. Utgångspunkter för strålskydd.....	18
3.2. Skyddsåtgärder och andra åtgärder.....	20
3.3. Generiska kriterier och doskriterier	22
4. Metod	24
4.1. Allmän översikt	24
4.2. Källterm.....	24
4.3. Urval av nuklider	25
4.4. Strålskyddsutvärdering	26
4.5. Spridnings- och dosberäkningar.....	28
4.6. Tidsinvariant beskrivning av nedfall: "H+1"	28
5. Resultat	31
5.1. Effektiv dos från olika exponeringsvägar.....	31
5.2. Total effektiv dos efter skyddsåtgärder	32
5.3. Organdoser.....	35
6. Diskussion	40
6.1. Begränsningar i beräkningar och modellering.....	40
6.2. Jämförelser med andra studier och metoder.....	44
6.3. Slutsatser angående beredskapsplanering	47
6.4. Förslag till vidare utredning	52
7. Slutkommentar	56
Bilagor	57
Referenser	58

1. Inledning

I den här rapporten redovisar Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) en analys av möjliga radiologiska konsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner, och effekten av olika skyddsåtgärder.

Med *nedfall* avses radioaktiva ämnen som sprids i luften efter en kärnvapenexplosion och så småningom faller mot marken. I detta arbete inkluderas i begreppet nedfall inte bara sådant material som deponerat på marken, utan även radioaktiva ämnen i lägre luftlager som kan förorsaka stråldoser vid marknivå genom inandning eller extern exponering.

1.1. Bakgrund och syfte

SSM har ett samlat ansvar för strålskydd och kärnsäkerhet. Inom den nationella strålskyddsberedskapen ska myndigheten vara pådrivande och vidta åtgärder för att förebygga, identifiera och detektera radiologiska nödsituationer som kan leda till skador på människors hälsa eller miljön. SSM ska bl.a. svara för expertkompetens samt kunskaps- och beslutsunderlag inom strålskyddsområdet, inklusive spridningsprognoser, strålningsmätningar och strålskyddsbedömningar. Detta ansvar är oförändrat vid höjd beredskap.

Regeringen har beslutat att planeringen av totalförsvaret ska återupptas. Under innevarande försvarsbeslutsperiod har regeringen ytterligare betonat vikten av en sammanhängande totalförvarsplanering för att öka den samlade förmågan i totalförsvaret. Av gällande handlingsplan för totalförsvaret [1] framgår att planeringen ska utgå från att kärnvapen kan komma att användas mot Sverige. Ökad kunskap om möjliga konsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner kan därför utgöra ett värdefullt underlag i utvecklingen av totalförsvaret.

Utifrån myndighetens ansvar och den gällande inriktningen för totalförvarsplaneringen har SSM sedan 2018 bedrivit ett projekt för att studera strålskyddskonsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner. Projektet dokumenteras i den här rapporten.

Ett huvudsyfte med arbetet har varit att utveckla förståelse och kunskap om radiologisk påverkan av nedfall från kärnvapenexplosioner, särskilt avseende konsekvenser för allmänheten och effekterna av skyddsåtgärder. Arbetet har resulterat i fördjupade konsekvensbeskrivningar under olika förutsättningar, och för olika exponeringsvägar för joniserande strålning från nedfallet efter en kärnvapenexplosion. Resultaten kan användas för att dra slutsatser om behov och effekter av tänkbara skyddsåtgärder, och rapporten utgör därmed ett kunskapsunderlag för beredskapsplanering.

Ett annat syfte har varit att utveckla SSM:s förmåga inom spridnings- och dosberäkningar för nedfall från kärnvapenexplosioner. Prognoser för nedfall kan ha olika syften och ske under olika förutsättningar. Det kan finnas tids- och resursmässiga begränsningar för vilken detaljeringsgrad i nedfallsbeskrivningar som går att åstadkomma, eller som gör nytta. Därför behövs flera olika verktyg, från mycket snabba och till sin natur schematiska och schablonmässiga metoder till fullskaliga spridnings- och dosprognoser.

Både avseende kunskap om radiologisk påverkan av nedfall från kärnvapenexplosioner och avseende förmågeutveckling är avsikten att arbetet ska utgöra en plattform för vidare utveckling.

1.2. Metodval

Analysen bygger på resultat från spridnings- och dosberäkningar som syftar till att uppskatta strålskyddskonsekvenser på olika avstånd från explosionsplatsen vid olika tidpunkter, för olika nuklider och genom olika exponeringsvägar för joniserande strålning. Genom att använda avancerade spridnings- och dosberäkningar erhålls bättre prognoser än med enklare s.k. idealiserade beläggingsfält. Vidare har strävan varit att ta fram mer generellt användbara resultat än vad som blir fallet om man väljer enstaka exempel eller fallstudier. Ett stort antal historiska väderfall har därför använts i beräkningarna.

SSM har i stor utsträckning använt, kombinerat och vidareutvecklat metoder och modelleringsverktyg som använts i tidigare analyser och utredningar. Metoderna beskrivs översiktligt i kapitel 4 och mer utförligt i Bilaga 2 (nuklidsammansättning) och i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar). I det här avsnittet syftar diskussionen till att motivera valet av metoder och illustrera kontinuiteten med beprövade verktyg och metodik.

SSM har tidigare tagit fram förslag på utformning av nya beredskaps- och planeringszoner kring de svenska kärnkraftverken [2] med en metod som i många avseenden och i tillämpliga delar liknar den som använts i detta arbete. I den tidigare utredningen användes spridnings- och dosberäkningar utgående från några olika dimensionerande händelser vid de svenska kärnkraftverken och ett stort antal olika väderfall. De metoder som då användes för statistisk behandling av modelleringsutfall har bedömts användbara även vid analysen av nedfall från kärnvapenexplosioner i föreliggande arbete.

I utredningen av nya beredskaps- och planeringszoner användes spridningsmodeller anpassade för den typen av utsläpp. I den här studien har en annan källbeskrivning och en annan spridningsmodell använts. Både källbeskrivning och spridningsmodell, härrörande från Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) respektive Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), har använts sedan länge av SSM, och har under arbetet utvecklats i vissa avseenden.

Källbeskrivningen baseras på en empirisk amerikansk parametrisering av det stabiliserade radioaktiva molnet ca 10 minuter efter en kärnvapenexplosion [3]. Källbeskrivningen kompletteras med den s.k. nuklidvektorn som beskriver nuklidsammansättningen. SSM har utfört ett tämligen omfattande arbete med att välja ut vilka nuklider som behöver representeras i spridnings- och dosberäkningen, och mängden av varje nuklid. Här har i stor utsträckning samma principer använts för urval som i utredningen om nya beredskaps- och planeringszoner. Huvudsakligen har urvalet skett baserat på nuklidernas bidrag till stråldos från markbeläggningen under olika tidsperioder som sträcker sig till och med det första året. Dessutom kompletterades urvalet genom en analys av olika nuklidernas bidrag till inandningsdos för att inte missa viktiga nuklider för intern exponering. Det dominerande bidraget till extern exponering från radioaktiva ämnen i luften antas representeras av samma nuklider som för markdos. Urvalet beskrivs i detalj i Bilaga 2 (nuklidsammansättning). Mer om de olika exponeringsvägarna finns i avsnitt 3.2.1.

1.3. Kärnvapenscenarier och val av huvudscenario

Som utgångspunkt för bedömningar av konsekvenser av kärnvapenexplosioner inom totalförsvarsplanering har FOI, på uppdrag av SSM, tagit fram exempel som kan förmodas vara representativa för hur en angripare använder kärnvapen [4]. SSM har utgått från dessa kärnvapenfall i valet av scenario att studera. FOI påpekar att kärnvapenfallen begränsas till operativ användning främst i syfte att uppnå militära mål, med laddningsstyrkor och andra

insatsparametrar valda så att optimal militär effekt uppnås. Samtidigt påpekar FOI att kärnvapenfallen har en övervikt mot sådana som ger den allvarligaste situationen avseende markbeläggning av radioaktiva ämnen, även om dessa inte nödvändigtvis är de mest troliga.

Av de åtta kärnvapenfall som FOI presenterar är två markexplosioner med en laddningsstyrka på 100 kiloton¹, där målen är en hamnanläggning i det ena fallet och en militär anläggning utanför en medelstor stad i det andra fallet. Två är luftexplosioner (höjd 700 m) med en laddningsstyrka på 100 kiloton, där målen är en hamnanläggning och en mobiliseringsplats. Ett fall är bekämpning av fartyg i en hamn med en laddningsstyrka på 10 kiloton på vattenytan i hamnbassängen. Två är insatser med flera laddningar (4 x 3 kiloton i det ena fallet och 3 x 10 kiloton i det andra) genom markexplosioner mot en militär anläggning respektive en större flygplats. Det sista kärnvapenfallet är en insats där initieringen av laddningen misslyckas och 5 kg plutonium sprids ut då det konventionella explosivämnet i vapnet exploderar.

FOI föreslår att kärnvapen med laddningsstyrkor på 10 kiloton eller mindre i exemplen antas vara fissionsvapen medan övriga antas ha en fusionsandel på 50 %.²

En explosion vid marken förväntas ge svårare nedfallskonsekvenser än en explosion utan markkontakt. Vidare ger litteraturen på området anledning att tro att nedfallet från en vattenexplosion allmänt sett är ett mindre problem än från en markexplosion [5]. Bland exemplen har SSM som huvudscenario för denna studie därför valt markexplosion med en laddningsstyrka på 100 kiloton och en fusionsandel på 50 %. Detta scenario, bland de tänkbara representativa exempel som FOI tagit fram, bör ge de allvarligaste nedfallskonsekvenserna och lämpar sig därför från SSM:s utgångspunkt bäst som dimensionerande fall.

En kemisk explosion med utspridning av plutonium faller inte inom ramen för den här studien. För olyckor eller antagonistiska händelser med kemisk utsprängning av farliga ämnen, inklusive radioaktiva ämnen, behöver andra metoder och verktyg användas. Dock ingår ofissionerat vapenplutonium som en del i nedfallet efter en kärnvapenexplosion, och som en av flera känslighetsanalyser har SSM undersökt om det är sannolikt att inkluderande av något eller några kilogram plutonium i modelleringen skulle påverka resultaten nämnvärt avseende de radiologiska konsekvenser som redovisas i rapporten. SSM har funnit att så inte är fallet.

1.4. Omfattning och avgränsningar

SSM har valt att göra ett antal avgränsningar för vad som behandlas i denna studie.

Analyserna behandlar den radiologiska nödsituation som kan uppstå på grund av radioaktivt nedfall från kärnvapenexplosioner. Initialstrålning och andra direkta verkansformer behandlas inte, eftersom de måste analyseras med andra verktyg och metoder, kräver annorlunda planering och hantering och har en mer begränsad utbredning i tid och rum. Fokus ligger därmed på områden som ligger på sådant avstånd från explosionen att den huvudsakliga påverkan utgörs av stråldoser från nedfallet, grovt sett ett antal kilometer. Dessutom kan användbarheten i den spridningsmodell som använts, med ca 2,5 km upplösning, förväntas vara begränsad inom avstånd som är av ungefär samma storlek som källan, som i huvudscenariot har en radie av ca 5,5 km, se avsnitt 2.2. I

¹ Ett kiloton innebär en energiutveckling motsvarande 1000 ton konventionellt högexplosivämne.

² Se kapitel 2 avseende fission och fusion.

praktiken har detta inneburit att SSM i analyserna inte beaktat resultat på mindre avstånd än 8 km från explosionen.

Vidare behandlar analyserna i första hand de effekter som föranleder behov av brådskande skyddsåtgärder, såsom inomhusvistelse eller utrymning, och andra brådskande åtgärder för att minska konsekvenserna av nedfallet. Andra, huvudsakligen mer långsiktiga eller indirekta effekter som kan uppträda som en följd av nedfallet, såsom effekter på livsmedelsproduktion eller transporter, har inte behandlats.

När det gäller effekter på livsmedel kan även brådskande skyddsåtgärder bli nödvändiga på grund av nedfallet, såsom avrådan från användning av dricksvatten från ytvattentäkter eller förbud mot saluföring av mjölk, men SSM har valt att behandla konsekvenser för livsmedel vid ett senare tillfälle. Konsekvenser för livsmedelsproduktion kan behandlas med den metod som används här, vilket gjordes i utredningen om nya beredskaps- och planeringszoner [2]. Detta kräver dock att åtgärdsnivåer, dvs. nivåer av markbeläggning som förväntas ge en viss nivå av radioaktiva ämnen i olika livsmedel, kan bestämmas. Nedfall från kärnvapenexplosioner skiljer sig så mycket från nedfall från kärnkraftsolyckor att man inte utan vidare kan förutsätta att de åtgärdsnivåer för livsmedel som tagits fram för kärnkraftsolyckor kan användas vid kärnvapenedfall. En mer omfattande utredning i syfte att ta fram lämpliga åtgärdsnivåer för livsmedel i samband med kärnvapenedfall planeras i samarbete med FOI, som i en tidigare metodstudie [6] tagit fram exempel på åtgärdsnivåer för dricksvatten från ytvattentäkter under olika förhållanden.

2. Nedfall från kärnvapenexplosioner

2.1. Uppkomst

Energien som utvecklas i en kärnvapenexplosion härrör allmänt sett dels från fission (klyvning) av tunga atomkärnor (uran eller plutonium) och dels från fusion (sammanslagning) av lätta atomkärnor som deuterium och tritium. För att åstadkomma fusion krävs en primär fissionsladdning. Alla kärnvapenexplosioner har därför en fissionskomponent, medan andelen fusionsenergi kan variera från noll till en relativt hög andel fusion. Som huvudscenario i den här rapporten har använts en kärnvapenexplosion med en total energiutveckling på 100 kiloton (kt) – dvs. motsvarande 100 000 ton konventionellt högexplosivämne – varav hälften av energin (50 kt) skapas genom fission och den andra hälften genom fusion.

I en kärnvapenexplosion bildas stora mängder radioaktiva ämnen, som kan leda till radioaktivt nedfall. Andelen fusion har betydelse för det nedfall som skapas, eftersom huvuddelen av de radioaktiva restprodukterna från explosionen är s.k. fissionsprodukter (dvs. klyvningsrester). Dessa uppkommer inte vid fusionsreaktioner. Däremot ger både fissions- och fusionsreaktioner upphov till intensiv neutronstrålning, som i sin tur skapar radioaktiva ämnen genom att aktivera material i vapnet eller dess omgivning, s.k. aktiveringsprodukter. Fusion ger relativt sett (per kiloton) upphov till fler neutroner än fission, och med högre energi, och skapar därigenom relativt sett mer aktiveringsprodukter.

Samtliga radioaktiva ämnen förekommer initialt i gasform i det eldklot som bildas i explosionen. De förs uppåt tillsammans med andra vapenrester och material från omgivningen, t.ex. från marken om explosionen sker på tillräckligt låg höjd. Ett radioaktivt moln bildas som stabiliseras när det svalnar och den värmedrivna expansionen avtar. I molnet bildas radioaktiva partiklar genom kondensation och genom infångning av radioaktiva ämnen på material från omgivningen som blandats in i molnet. Partiklarnas fördelning i molnet och deras storlek är avgörande för vilka radiologiska konsekvenser ett nedfall kan leda till. Sker explosionen strax under, vid eller nära markytan kvarstannar en del av aktiviteten i den bildade kratern. Dessutom bildas luftburna partiklar med olika storlekar. Tämmligen stora partiklar av markmaterial blandat med fissions- och aktiveringsprodukter faller till marken nära explosionsplatsen. Mindre partiklar kan föras iväg över större avstånd och falla till marken som s.k. lokalt nedfall. Sker explosionen på tillräckligt hög höjd bildas ytterst små partiklar som normalt sprids och späds ut över stora avstånd, s.k. globalt nedfall. Detta utgör vanligtvis inte ett akut radiologiskt problem, såvida inte nederbörd för ner material till marken. För en kärnvapeninsats med 100 kt är ”tillräckligt hög höjd” i detta avseende omkring 350 m.

De radioaktiva ämnen som bildas består av ett stort antal olika nuklider, och utgörs framför allt av fissionsprodukter, även om bidraget från aktiveringsprodukter inte är försumbart i alla sammanhang. Vilka nuklider som bildas och hur mycket av varje nuklid beror av många faktorer, varav en del är svåra att beräkna eller ha kännedom om för en given explosion. Förekomsten beror t.ex. på neutronflöden i olika delar av vapnet samt vilka material som ingår i ett givet kärnvapen. Vissa antaganden behöver därför göras för att analysera konsekvenserna av det radioaktiva nedfallet.

2.2. Spridning

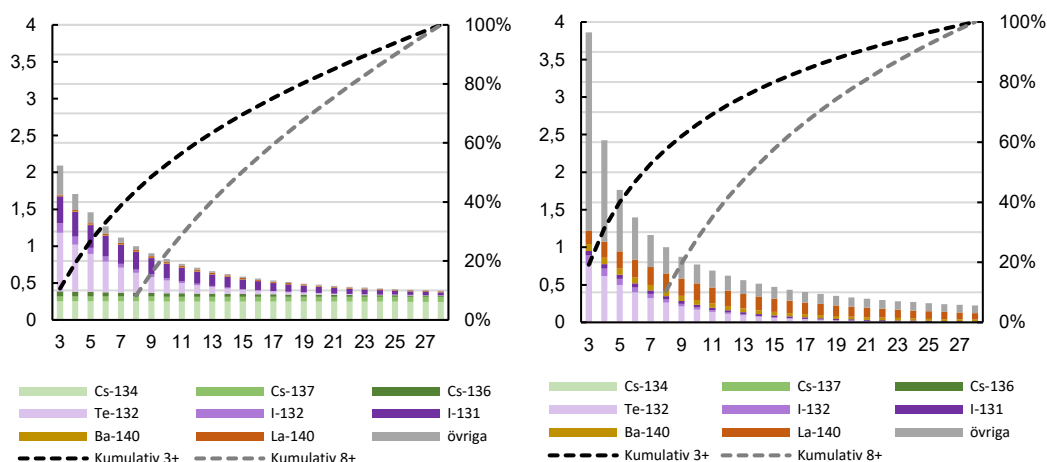
De nuklider som uppträder i atmosfären kommer att spridas vidare. Spridningen bestäms i det allmänna fallet dels av deras ursprungliga fördelning i rummet, dels av vind och nederbörd, dels av de olika nuklidernas fysikalisk-kemiska form, t.ex. om de är i gas- eller partikelform och hur de i det senare fallet fördelar sig på partiklar av olika storlekar.

Ursprungstillståndet (källan) i den spridningsmodell som använts utgörs av det stabiliserade molnet, som antas färdigbildat efter 10 minuter. För den kärnvapeninsats som varit huvudscenariot (100 kt markexplosion) når överdelen av det stabiliserade molnet en höjd av omkring 14 500 m, och huvudmolnets radie är omkring 5 500 m. Radioaktiviteten är fördelad i olika delar av molnet och på partiklar av olika storlekar. De radioaktiva ämnena i ursprungsmolnet kommer sedan att spridas över stora områden och nå marknära luft för att till slut deponera på marken.

Hur stora områden som påverkas av nedfallet för ett givet kärnvapenscenario, och i vilken grad, beror på de meteorologiska omständigheterna (vind, nederbörd, etc.) samt terrängens beskaffenhet (topografi och marktyp).

2.3. Nedfallets sammansättning och radioaktiva sönderfall

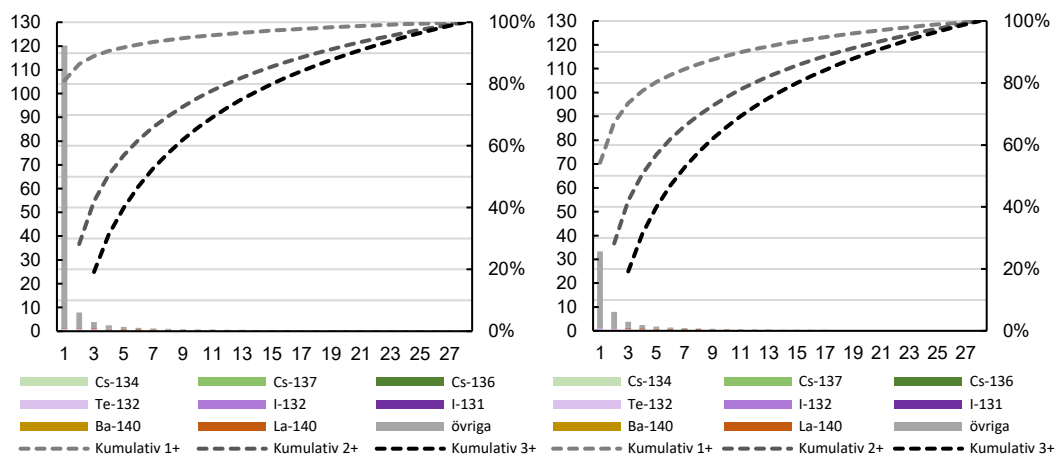
För att ge en uppfattning om likheter och skillnader mellan nedfall från en kärnvapenexplosion och det nedfall som kan uppkomma genom utsläpp under en allvarlig kärnkraftsolycka jämförs i Figur 1 effektiv dos från markbeläggning per dygn efter en kärnvapenexplosion med en kärnkraftsolycka. Jämförelsen är skalad så att markbeläggningarna ger samma effektiva doser under dygn 8. För kärnkraftsfallet representerar nuklidsammansättningen ett tänkt värsta fall för utsläpp från ett svenskt kärnkraftverk (händelse utan fungerande konsekvenslindrande system, se [2]). Eftersom detta utsläpp pågår under två dygn efter inledande händelse börjar jämförelsen vid dygn 3, trots att nedfall, i synnerhet från en kärnvapenexplosion, i många fall kan anlända tidigare än så. Här bör man notera att för det valda kärnkraftsfallet dominerar stråldoserna av inandningsdosen, medan jämförelsen här endast avser extern dos från marken. För nedfall från kärnvapenexplosionen utgör istället markdosen den dominerande exponeringsvägen. För kärnvapenfallet har den nuklidsammansättning som finns i SSM:s nuklidvektor för huvudscenariot använts, se Bilaga 2 (nuklidsammansättning).



Figur 1. Effektiv dos per dygn från markbeläggning i samband med en kärnkraftsolycka (utan fungerande konsekvenslindrande system) under dygn 3 t.o.m. dygn 28 (vänster) jämfört med motsvarande dos för kärnvapenedfall (höger). Staplar och vänster vertikalskala visar effektiv dos från marken per dygn, normerat till den dos som erhålls under dygn 8. Streckade linjer och höger vertikalskala visar utvecklingen av ackumulerad effektiv dos från markbeläggningen med början dygn 3 och med början dygn 8, som andel av den totala dos som erhålls t.o.m. dygn 28.

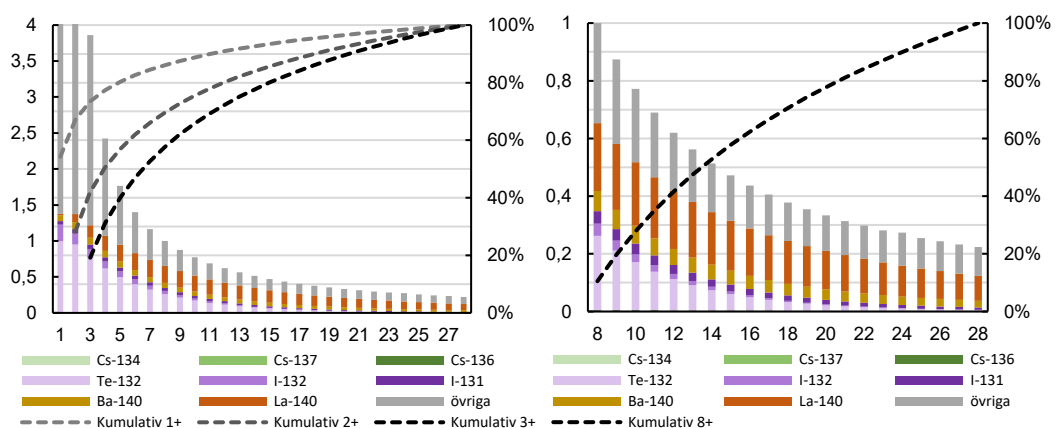
Man kan lägga märke till att det delvis är olika nuklider som är viktiga för erhållna stråldoser från marken. För kärnkraftsfallet spelar den relativt långlivade Cs-134 stor roll, och dominerar efter ett par veckor, medan den inte finns i kärnvapenedfallet. I kärnvapenedfallet spelar istället det mer kortlivade sönderfallsparet Ba-140/La-140 stor roll, liksom åtminstone i början mer kortlivade nuklider bland ”övriga” (t.ex. fissionsprodukterna I-133 och Zr-97/Nb-97 samt aktiveringsprodukterna Na-24 och Np-239). I båda fallen spelar det kortlivade sönderfallsparet Te-132/I-132 stor roll under de första veckorna.

Kärnvapenedfalllets nuklidsammansättning, med stor andel kortlivade nuklider, gör att dosraterna avtar mycket snabbt med tiden. Detta blir särskilt tydligt om man betraktar även de första dygnen efter kärnvapenexplosionen. Till vänster i Figur 2 visas de effektiva doser som erhålls per dygn från markbeläggningen med början 10 minuter efter explosionen, dvs. dygn 1. Normeringen är densamma som i Figur 1, dvs. värdet 1 svarar mot den dos som erhålls under dygn 8. Den effektiva dosen från markbeläggningen under det första dygnet är således omkring 120 gånger den dos som erhålls under dygn 8 och omkring 20 gånger den dos som erhålls under dygn 2. Till höger i Figur 2 visas de relativa doser som erhålls per dygn från markbeläggningen om man undantar de första tre timmarna efter explosionen – vilket t.ex. kan illustrera situationen på en plats där nedfallet anländer tre timmar efter explosionen. Sammantaget är det uppenbart att det finns mycket att vinna på att undvika tidig exponering för nedfallet.



Figur 2. Effektiv dos per dygn från kärnvapennedfall på marken under dygn 1 t.o.m. dygn 28, inkluderande (vänster) och exkluderande (höger) de första tre timmarna efter explosionen. Staplar och vänster vertikalskala visar effektiv dos från marken per dygn, normerat till den dos som erhålls under dygn 8. Streckade linjer och höger vertikalskala visar utvecklingen av ackumulerad effektiv dos från markbeläggningen med början dygn 1, med början dygn 2 och med början dygn 3, som andel av den totala dos som erhålls t.o.m. dygn 28.

Figur 2 visar att stråldosen från markbeläggningen under de första dygnen domineras helt av mycket kortlivade nuklider. I Figur 3 visas samma dygnsdoser som i Figur 2, men med andra vertikalskalor för att visa utvecklingen under de efterföljande dygnen.



Figur 3. Effektiv dos per dygn från kärnvapennedfall på marken under dygn 1 t.o.m. dygn 28 (vänster), exkluderande de första tre timmarna efter explosionen, och under dygn 8 t.o.m. dygn 28 (höger). Staplar och vänster vertikalskala visar effektiv dos från marken per dygn, normerat till den dos som erhålls under dygn 8. Vertikalskalan i den vänstra figuren är avbruten för dygn 1 och dygn 2; den fullständiga skalan visas till höger i Figur 2. Streckade linjer och höger vertikalskala visar utvecklingen av ackumulerad effektiv dos erhållen från markbeläggningen från och med i förklaringen angivet dygn, som andel av den totala dos som erhålls t.o.m. dygn 28.

Gruppen ”övriga” för kärnvapennedfallet som visas i Figur 1-3 omfattar en stor mängd nuklider. Därför redovisas de ur dossynpunkt viktigaste nukliderna i kärnvapennedfallet även i tabellform i Tabell 1. Nuklider som representeras separat (utanför gruppen ”övriga”) i Figur 1-3 visas i fetstil. Beräkningarna är gjorda med SSM:s mjukvara *DosCalc*³ där dos från inväxta sönderfallsdöttrar har hänförs till modern. Exempelvis redovisas Te-132 och dottern I-132 separat, men i det redovisade värdet för Te-132 ingår dosbidraget från I-132 som växer in under beräkningens gång. I raden för I-132 redovisas istället dosbidraget från det I-132 som fanns vid beräkningens början.

³ DosCalc v 1.0 (Manual 20-914)

Tabell 1. Bidrag till markdosen (%) från de nuklider i kärnvapennedfallet som står för minst 2 % av den totala markdosen. Nuklider som representeras separat (utanför gruppen "övriga") i Figur 1-3 visas i fetstil.

Dygn 1 (från 10 min)	%	Dygn 1 (från 3 timmar)	%	Dygn 2	%	Dygn 3	%	Dygn 8	%
Te-134	7,4	Zr-97	11,5	Zr-97	21,8	Te-132	19,7	Te-132	25,7
Xe-138	5,6	I-135	11,3	Na-24	15,0	Zr-97	16,6	La-140	23,6
Tc-104	4,7	Na-24	8,8	Te-132	11,9	Na-24	10,1	Ba-140	7,0
Ba-142	4,4	Kr-88	7,4	I-133	8,5	I-133	7,8	U-237	6,4
I-135	4,4	Sr-92	6,8	Sr-91	5,5	Np-239	6,8	Np-239	6,0
Kr-88	4,1	La-142	6,1	I-135	5,3	La-140	4,6	I-131	4,4
Sr-92	4,0	I-134	6,1	Np-239	4,4	Te-131m	3,3	I-132	4,2
Zr-97	3,9	Sr-91	5,7	Te-131m	2,8	I-132	3,2	Ru-103	2,7
I-134	3,7	Ru-105	4,2	Xe-135	2,8	Ce-143	3,1	Mo-99	2,6
Te-133m	3,3	I-133	3,5	Ce-143	2,5	U-237	2,8	Sb-127	2,6
Mo-101	3,3	Mn-56	3,1			Mo-99	2,4	Zr-95	2,6
Na-24	3,0	Te-132	3,0			Ba-140	2,4	Mn-54	2,0
Sb-131	3,0					Sr-91	2,0		
Rb-89	2,9								
La-142	2,7								
Sr-93	2,7								
Cs-138	2,6								
Sb-130	2,1								
Sr-91	2,0								

3. Strålskydd

3.1. Utgångspunkter för strålskydd

3.1.1. Reglering av strålskydd under höjd beredskap

Strålskydd regleras i Sverige i huvudsak genom strålskyddslagen [7], strålskyddsförordningen [8] och i föreskrifter från SSM. Regleringen följer EU:s strålskyddsdirektiv från 2013 [9], vilket i sin tur utgår från rekommendationer som Internationella strålskyddskommissionen (ICRP) publicerade 2007 [10].

Regleringen av strålskydd i strålskyddslag, strålskyddsförordning och föreskrifter gäller även i samband med höjd beredskap, om inget annat meddelas med stöd av lagstiftningen. Regeringen, Försvarsmakten och SSM får meddela föreskrifter som avviker från nuvarande lagstiftning avseende arbetstagare inom totalförsvaret. Försvarsmakten arbetar för närvarande på att ta fram föreskrifter för sin egen personal. Något motsvarande arbete med att ta fram föreskrifter för arbetstagare inom totalförsvaret som inte är anställda av Försvarsmakten pågår dock inte.

Det är oklart om nuvarande lagsstiftning ger stöd för att regeringen eller någon myndighet får meddela föreskrifter som avviker från nuvarande strålskyddslagstiftning avseende allmänheten eller arbetstagare generellt. För allmänheten bör detta utredas vidare, eftersom det tydligt framgår av bland annat denna rapport att den reglering som gäller för allmänheten i fredstid inte är lämplig för alla situationer som kan tänkas uppstå under höjd beredskap. För arbetstagare som inte ingår i totalförsvaret bör det först utredas om det kan uppstå situationer under höjd beredskap där den reglering som gäller för arbetstagare i fredstid inte är lämplig. Om det visar sig att det finns sådana situationer behöver mandatet att meddela föreskrifter som avviker från regleringen i fredstid för arbetstagare som inte ingår i totalförsvaret också utredas.

3.1.2. Exponeringssituationer

Regleringen av strålskydd utgår från att all tänkbar exponering kan delas in i tre exponeringssituationer: *planerade exponeringssituationer*, *radiologiska nödsituationer* och *befintliga exponeringssituationer*. Planerade exponeringssituationer är vanlig verksamhet med joniserande strålning. Radiologiska nödsituationer är situationer där det krävs att brådskande skyddsåtgärder antingen förbereds eller genomförs. Nedfall från en kärnvapenexplosion skulle kunna ge upphov till en radiologisk nödsituation. Befintliga exponeringssituationer är situationer som behöver hanteras efter att de uppstått. En radiologisk nödsituation med anledning av nedfall från en kärnvapenexplosion kan övergå i en befintlig exponeringssituation när det inte längre finns något behov av att förbereda eller vidta brådskande skyddsåtgärder.

Det finns en tydlig koppling mellan räddningstjänst enligt lagen om skydd mot olyckor [11] och radiologisk nödsituation enligt strålskyddslagen [7]. I de fall kriterierna för räddningstjänst är uppfyllda på grund av skador som orsakats eller kan orsakas av en strålkälla är också kriterierna för en radiologisk nödsituation i de flesta tänkbara fall uppfyllda. Räddningstjänst i samband med nedfall från en kärnvapenexplosion är ett exempel på en situation som också är en radiologisk nödsituation.

3.1.3. Strålskyddsprinciper

Strålskydd utgår från tre principer: *berättigande*, *optimering* och *tillämpande av dosgränser*. Berättigande innebär att alla beslut som ändrar en exponeringssituation ska göra mer nytta än skada. Optimering innebär att sannolikheten för att exponeras, antal personer som exponeras och storleken på stråldosen till varje enskild person ska hållas så låg som det är möjligt och rimligt med beaktande av ekonomiska och samhällsliga faktorer. Det är strålskyddet som ska optimeras och inte enskilda skyddsåtgärder. I en radiologisk nödsituation, t.ex. som en följd av radioaktivt nedfall från en kärnvapenexplosion, innebär detta i praktiken att varje enskild skyddsåtgärd ska vara berättigad. Det är sedan kombinationen av skyddsåtgärder som ska optimeras med beaktande av att den kombination av skyddsåtgärder som ger lägst total dos inte nödvändigtvis är den bästa under alla tänkbara omständigheter. Den tredje principen, tillämpande av dosgränser, används bara i planerade exponeringssituationer och berörs därför inte ytterligare i denna rapport.

3.1.4. Strålskyddsmål i radiologiska nödsituationer

Vid radiologiska nödsituationer finns det två övergripande mål för strålskyddet: att undvika eller minimera allvarliga deterministiska hälsoeffekter⁴ samt att minska sannolikheten för stokastiska hälsoeffekter⁵ så långt det är möjligt och rimligt [12]. Skyddsåtgärder för att undvika eller minimera allvarliga deterministiska hälsoeffekter är i stort sett alltid motiverade, även om vissa överväganden angående dominerande risker kan vara nödvändiga i samband med nedfall från en kärnvapenexplosion. För skyddsåtgärder som vidtas för att minska sannolikheten för stokastiska hälsoeffekter krävs noggranna överväganden. Under höjd beredskap kan högre stråldoser vara motiverade jämfört med i fredstid, men i vilken utsträckning måste avgöras utifrån händelse och rådande omständigheter.

3.1.5. Referensnivåer

För att begränsa individuella stråldoser vid optimering i samband med både radiologiska nödsituationer och befintliga exponeringssituationer används referensnivåer som stöd. Referensnivåer representerar en nivå av dos över vilken det är olämpligt att planera för att exponering ska inträffa och under vilken optimering av strålskyddet ska fortsätta. Värdet som väljs för referensnivån beror på de omständigheter som gäller för den situation som beaktas. En strategi för skyddsåtgärder i samband med en radiologisk nödsituation ska både möjliggöra att i förväg valda referensnivåer kan underskridas och att strålskyddet kan optimeras. Ett exempel på en strategi kan vara beredskapsplaner som tillämpas vid nedfall från kärnvapenexplosioner. Vid utvärderingen av om en strategi möjliggör att valda referensnivåer kan underskridas beräknas stråldoser till representativ person⁶. Vid radioaktivt nedfall från en kärnvapenexplosion utgör normalt ettårigt barn en representativ person. De slutsatser angående skyddsåtgärder som redovisas i den här rapporten utgår därför från ettårigt barn.

⁴ Med allvarliga deterministiska hälsoeffekter avses tidiga hälsoeffekter som uppstår som en direkt följd av exponeringen för joniserande strålning och som är så pass allvarliga att de är dödliga, livshotande eller resulterar i en bestående skada som försämrar livskvaliteten.

⁵ Med stokastiska hälsoeffekter avses slumpmässiga hälsoeffekter som kan uppstå på sikt som en följd av exponering för joniserande strålning. Sannolikheten att de ska inträffa ökar med ökande stråldos, men allvarligheten av hälsoeffekten om den inträffar är oberoende av stråldosens storlek. Ett exempel på en stokastisk hälsoeffekt är cancer.

⁶ En representativ person erhåller en stråldos som är representativ för stråldoserna till mer exponerade personer ur allmänheten, med undantag för personer som har extrema eller sällsynta vanor [34].

Referensnivåer för radiologiska nödsituationer regleras i strålskyddsförordningen. Referensnivån för exponering av personer ur allmänheten i en radiologisk nödsituation är 100 mSv årlig effektiv dos för händelser på ett kärnkraftverk som inte beaktats i kärnkraftsreaktorns konstruktion och 20 mSv årlig effektiv dos för alla andra händelser, inklusive nedfall från kärnvapenexplosioner [8]. En referensnivå på 20 mSv effektiv dos är dock inte en lämplig utgångspunkt för optimeringen av strålskyddet vid nedfall från en kärnvapenexplosion. De risker som exponeringen medför måste ställas mot övriga risker som kan råda i en sådan situation.

De övergripande målen för strålskyddet i radiologiska nödsituationer är dock fortfarande tillämpliga. Allvarliga deterministiska hälsoeffekter ska kunna undvikas eller minimeras. En referensnivå bör därför inte sättas högre än 1000 mSv effektiv dos [13]. Därefter ska sannolikheten för stokastiska hälsoeffekter, i huvudsak cancer, minska så långt det är möjligt och rimligt. Med utgångspunkt i vad som gäller i fredstid bör en lägsta referensnivå kunna sättas till 100 mSv effektiv dos. Ett lämpligt steg mellan 100 mSv och 1000 mSv kan vara att sätta en referensnivå till 500 mSv. Vid denna nivå kan deterministiska hälsoeffekter, även sådana som inte är allvarliga, sannolikt undvikas. I denna rapport har därför tre tänkbara referensnivåer i samband med nedfall från kärnvapenexplosioner använts i utvärderingen: 100, 500 och 1000 mSv årlig effektiv dos.

3.2. Skyddsåtgärder och andra åtgärder

3.2.1. Exponeringsvägar

I samband med nedfall från en kärnvapenexplosion kan personer exponeras för joniserande strålning externt och internt. Vid extern exponering utsätts personer för joniserande strålning från radioaktiva ämnen utanför kroppen. Vid intern exponering utsätts personer för joniserande strålning från radioaktiva ämnen som kommit in i kroppen. Exponeringen kan ske via olika exponeringsvägar. Extern exponering kan ske från radioaktiva ämnen i luften, på marken eller från radioaktiva ämnen som hamnat på huden, kläderna eller håret. Intern exponering kan ske genom att radioaktiva ämnen kommer in i kroppen via inandning av radioaktiva ämnen i luften, via livsmedel som påverkats av nedfallet eller via oavsiktligt intag av t.ex. radioaktiva ämnen som hamnat på huden.

I denna rapport har extern exponering från radioaktiva ämnen i luften, på marken och (delvis) radioaktiva ämnen som hamnat på huden studerats, liksom intern exponering från radioaktiva ämnen som kommit in i kroppen via inandning. Intern exponering från radioaktiva ämnen som kommit in i kroppen via livsmedel eller via oavsiktligt intag har inte studerats. Det är dock rimligt att anta att även dessa exponeringsvägar har stor betydelse i samband med nedfall från kärnvapenexplosioner. SSM har därför för avsikt att i kommande studier undersöka dessa exponeringsvägar närmare.

I spridnings- och dosberäkningarna ger extern exponering från radioaktiva ämnen i luften och på marken upphov till molndos respektive markdos. Extern exponering från radioaktiva ämnen på huden ger upphov till huddos. Intern exponering genom inandning av radioaktiva ämnen ger upphov till inandningsdos och i förlängningen, sköldkörteldos. Både extern och intern exponering kan ge upphov till dos till röd benmärg, men eftersom bidraget från radioaktiva ämnen på marken är helt dominerade har endast markdosen beaktats i beräkningen av dos till röd benmärg.

3.2.2. Skyddsåtgärder och andra åtgärder

Skyddsåtgärder syftar till att undvika eller minska framtida exponering och utgår från strålskyddets grundregler, se faktaruta nedan. Vid storskaliga olyckor med spridning av radioaktiva ämnen kan följande skyddsåtgärder bli aktuella: förebyggande utrymning, utrymning före och under utsläpp, inomhusvistelse, intag av jodtabletter, åtgärder för att minska oavsiktligt intag, personsanering, livsmedelsåtgärder, åtgärder för varor, utrymning på grund av markbeläggning (dvs. utrymning som sker efter att utsläpp och nedfall upphört) samt saneringsåtgärder [14]. I samband med nedfall från kärnvapenexplosioner kan flera av dessa skyddsåtgärder också bli aktuella.

Strålskyddets grundregler:

- Vistas så kort tid som möjligt nära en strålkälla
- Håll ett så stort avstånd som möjligt till strålkällan
- Ha så mycket skärmande material som möjligt mellan dig själv och en strålkälla
- Undvik att få i dig radioaktiva ämnen
- Undvik att få radioaktiva ämnen på huden

Inomhusvistelse minskar extern exponering från radioaktiva ämnen på marken och i luften samt intern exponering genom inandning av radioaktiva ämnen eller oavsiktligt intag av radioaktiva ämnen. Graden av skydd för olika exponeringsvägar skiljer mellan olika lokaler. Intag av jodtabletter minskar upptaget av radioaktiv jod till sköldkörteln. Jodtabletter kan dels skydda mot allvarliga deterministiska hälsoeffekter på grund av exponering av sköldkörteln för alla åldersgrupper och dels minska risken att utveckla sköldkörtelcancer för personer under 40 år, i synnerhet barn och foster. Utrymning på grund av markbeläggning leder till att exponeringen från radioaktiva ämnen som hamnat på marken efter att nedfallet upphört avbryts, under förutsättning att utrymningen sker till ett område som inte påverkats eller endast påverkats i mindre utsträckning av nedfallet.

Skyddsåtgärderna personsanering, åtgärder för att minska oavsiktligt intag, livsmedelsåtgärder, åtgärder för varor och saneringsåtgärder kan också bli aktuella i samband med kärnvapenexplosioner, men behandlas inte i den här rapporten. För att utvärdera behovet av dessa skyddsåtgärder krävs utveckling av kriterier för när åtgärderna kan vara motiverade i samband med nedfall från kärnvapenexplosioner.

Förebyggande utrymning kan inte uteslutas, men bygger i så fall på information om hot om användning av kärnvapen eller varning om en förestående kärnvapeninsats. Förebyggande utrymning behandlas därför inte vidare i den här rapporten. Utrymning före och under pågående nedfall är inte en lämplig skyddsåtgärd i samband med kärnvapenexplosioner på grund av att tiden innan nedfallets ankomst kan förväntas vara för kort för att utrymning ska hinna genomföras och på grund av att det är svårt att bedöma om en förflyttning sker till ett säkrare område.

Utöver skyddsåtgärder finns andra åtgärder, som syftar till att mildra konsekvenserna av en radiologisk nödsituation. I samband med nedfall från kärnvapenexplosioner kan hantering av allvarliga deterministiska hälsoeffekter, personmätning och uppskattning av individuella stråldoser bli aktuella. Hantering av allvarliga deterministiska hälsoeffekter innebär behandling inom hälso- och sjukvården. I rapporten behandlas behov av hantering av allvarliga deterministiska hälsoeffekter för barn och vuxna på grund av exponering av

röd benmärg och exponering av huden. Behov av hantering av allvarliga deterministiska hälsoeffekter för sköldkörteln har också utvärderats, men något sådant behov uppstår inte på de avstånd som beräkningarna omfattar, dvs. avstånd längre än 8 km. För foster tillkommer några möjliga hälsoeffekter som inte behandlas i rapporten. Personmätning och uppskattning av individuell stråldos behandlas inte heller.

3.2.3. Skyddsfaktorer

Med skyddsfaktor vid inomhusvistelse avses kvoten mellan stråldosen inomhus i skydd och stråldosen utomhus utan skydd för samma plats och exponeringstid. Det betyder att ju lägre skyddsfaktorn är, desto bättre skydd erhålls. Skyddsfaktorn kan variera mycket beroende på bland annat hustyp, byggnadsmaterial, typ av ventilation och partikelstorlek för de radioaktiva ämnena i nedfallet. I rapporten behandlas småhus, hyreshus (flerbostadshus, skolor, m.m.), skyddsrum som uppfyller kraven i SR 15 [15], källare i större betonghus samt skyddsrum i källare i större betonghus eller motsvarande.

Generellt gäller att ju mer och ju tyngre material som finns mellan strålkällan, i detta fall radioaktiva ämnen i luften eller på marken, och en person som vistas inomhus, desto bättre skydd mot extern exponering. Det innebär att betonghus och många källare ger ett gott skydd mot exponering från radioaktiva ämnen utanför byggnaden. Generellt gäller också att filtrerad ventilation eller avstängd ventilation med låg luftomsättning ger ett bra skydd mot intern exponering vid inandning, eftersom det minskar mängden radioaktiva ämnen som kommer in i lokalen.

Effekten av att ta jodtabletter kan också beskrivas med en skyddsfaktor. I det fallet avser skyddsfaktorn kvoten mellan stråldosen med intag av jodtabletter och stråldosen utan intag av jodtabletter för samma plats och exponeringstid. Inomhusvistelse leder också till lägre sköldkörteldoser, eftersom koncentrationen av radioaktiv jod i luften är mindre inomhus jämfört med i luften utomhus.

Normalt boende över tid i ett område som påverkats av nedfall från en kärnvapenexplosion ger också ett skydd mot exponering från radioaktiva ämnen på marken. Detta gäller tidsperioden efter att inomhusvistelsen avbrutits eller i områden som påverkats, men inte i sådan utsträckning att inomhusvistelse varit motiverad. Se Bilaga 1 (strålskydd) för bakomliggande resonemang och värden för skyddsfaktorer.

3.3. Generiska kriterier och doskriterier

Ett *generiskt kriterium* är ett värde på stråldos till en oskyddad person, som när det överskrids eller riskerar att överskridas under en bestämd tidsperiod i de flesta fall innebär att det är berättigat att vidta skyddsåtgärder. Ett *doskriterium* är ett värde på stråldos till en oskyddad person som när det överskrids eller riskerar att överskridas under en bestämd tidsperiod i de flesta fall innebär att en viss skyddsåtgärd eller annan åtgärd är berättigad. Generiska kriterier uttrycker sålunda att skyddsåtgärder bör vidtas medan doskriterier uttrycker att en specifik skyddsåtgärd eller annan åtgärd bör vidtas. Generiska kriterier och doskriterier väljs så att så att de skyddsåtgärder som vidtas möjliggör att stråldosen till personer ur allmänheten kan underskrida vald referensnivå.

SSM har i denna rapport använt generiska kriterier för kombinationer av olika skydd initialt och skydd under resten av året uttryckta i effektiv dos. För de enskilda skyddsåtgärderna inomhusvistelse, utrymning på grund av markbeläggning och intag av jodtabletter har SSM

använt doskriterier uttryckta i effektiv dos och ekvivalent dos till sköldkörteln. För behov av att hantera av allvarliga deterministiska hälsoeffekter har SSM använt doskriterier för röd benmärg, hud och sköldkörteln uttryckta i RBE-viktad absorberad dos till respektive organ. Se Bilaga 1 (strålskydd) för bakomliggande resonemang och värden för generiska kriterier och doskriterier.

4. Metod

4.1. Allmän översikt

SSM har genomfört spridnings- och dosberäkningar för det radioaktiva nedfallet från en kärnvapenexplosion enligt huvudscenariot (100 kt markexplosion med 50 % fusionsandel) på en plats i Sverige. Beräkningarna skiljer sig från varandra endast i fråga om tidpunkt för explosionen, dvs. i fråga om rådande väderförhållanden. Beräkningar har genomförts för explosioner med 13 timmars intervall under ett år. Totalt genomfördes 663 olika beräkningar.

Källan i beräkningarna, den s.k. källtermen, har utgjorts av det stabiliserade initialmolnet ca 10 minuter efter explosionen (avsnitt 4.2) och en nuklidvektor som beskriver den relativa fördelningen av radioaktiviteten mellan olika nuklider (avsnitt 4.3). Spridnings- och dosberäkningarna har gjorts för att möjliggöra strålskyddsutvärdering (avsnitt 4.4).

Resultaten av beräkningarna har analyserats statistiskt, där vissa resultat kopplar direkt till kriterier definierade i beräkningarna, och andra tagits fram genom efterbearbetning av utdata från beräkningarna.

4.2. Källterm

Källtermen för spridnings- och dosberäkningarna utgörs dels av en beskrivning av det stabiliserade molnet som antas föreligga 10 minuter efter explosionen och den totala aktiviteten i molnet, dels av en nuklidvektor, dvs. hur aktiviteten i molnet är fördelad på olika radionuklider. I modelleringen har gjorts flera förenklande approximationer och antaganden. Förekomsten av ett stabiliserat moln med utsträckning och dimensioner oberoende av väderförhållanden är en sådan approximation. Kärnvapenexplosionens egen påverkan på meteorologiska förhållanden, t.ex. i form av lokal nederbörd nära explosionsplatsen, har också försumrats. Inverkan av dessa förenklingar antas vara begränsad, då arbetet fokuserat på konsekvenser på större avstånd (se avsnitt 1.4). Källtermen bestäms i modellen av följande parametrar:

- Laddningsstyrka
- Andel av laddningsstyrkan som härrör från fusion
- Explosionens höjd över marken

Nuklidvektorn och urvalet av de ingående nukliderna beskrivs i avsnitt 4.3, och i större detalj i Bilaga 2 (nuklidsammansättning).

Källbeskrivningen omfattar initialmolnets dimensioner samt hur radioaktiviteten är fördelad mellan molnets olika delar och på olika partikelstorlekar. Detta beskrivs närmare i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar). Det huvudscenario som SSM använt ger enligt modellen ett initialmoln (som utgör starttillstånd för spridningsberäkningen) med en höjd av ca 14 500 m och en största radie av ca 5 500 m. Knappt hälften av radioaktiviteten (ca 45 %) återfinns i huvudmolnet, på en höjd mellan ca 9 000 m och ca 14 500 m, och drygt hälften i det svampformade initialmolnets stam. En mindre del (mindre än 1 %) utgörs av relativt stora partiklar i ett "basmoln" nära marken, som deponerar i närheten av explosionen. Huvuddelen av radioaktiviteten utgörs av fissionsprodukter, med ett mindre tillskott av aktiveringsprodukter från marken och vapenkonstruktionen.

Radioaktiviteten i molnet är fördelad på olika partikelstorleksfraktioner, men sammansättningen, dvs. den relativa mängden av varje radionuklid på partiklarna, är densamma i hela modellen och beskrivs av nuklidvektorn (se avsnitt 4.3). Detta är en approximation som försummar s.k. fraktionering, dvs. att ämnen med olika kemiska egenskaper kan uppföra sig på olika sätt i partikelbildningsfasen och fördelas på olika stora partiklar. SSM har inte tagit hänsyn till initial fraktionering eller till att olika ämnen kan bete sig på olika sätt under spridningen eller efter att de deponerat på marken.

4.3. Urval av nuklider

SSM har tagit fram en nuklidvektor som använts i spridnings- och dosberäkningar och andra analyser inom ramarna för detta arbete. Nuklidvektorn är en uppsättning fissions- och aktiveringsprodukter med tillhörande aktiviteter vid en viss tidpunkt. Andra radioaktiva ämnen som kan spridas efter en kärnvapenexplosion, t.ex. ofissionerat plutonium, har inte beaktats då de har mindre betydelse för de strålskyddskonsekvenser som beaktas. Radioaktiva ämnen sönderfaller till nya ämnen som i sin tur kan vara radioaktiva. Med kännedom om nuklidvektorn vid en viss tidpunkt ger beräkningar av sönderfall och inväxt dessa nuklidens aktiviteter vid en godtycklig senare tidpunkt.

Nuklidvektorn som använts i detta arbete innehåller 129 nuklider vid tiden 10 minuter efter en kärnvapenexplosion enligt huvudscenariot. Vid en kärnvapenexplosion bildas ca tusen olika fissionsprodukter. Urvalet av nuklider har därför varit en stor del av arbetet med nuklidvektorn. Urvalet har gjorts utifrån kriteriet att nuklidvektorn ska beskriva minst 95 % av dosbidragen för de exponeringsvägar och för de tider som beaktats i detta arbete. Nuklidvektorn ska därför beskriva minst 95 % av den totala effektiva dosen från mark, moln och inandning från det första dygnet till det första året. I nuklidvektorn ingår även de jodisotoper som behövs för att beskriva minst 95 % av sköldkörteldosen från inandning av radioaktiv jod. Urvalet har skett stegvis genom att beakta de olika exponeringsvägarna och sönderfallsprocesserna.

En fullständig uppsättning fissionsprodukter omedelbart efter explosionen beräknades för tre representativa fissionsreaktioner: fission av Pu-239 och U-235 inducerad av neutroner med energin 1 MeV samt fission av U-238 inducerad av neutroner med energin 14 MeV. Först beräknades nuklidernas relativa bidrag till markdos. Utifrån denna beräkning identifierades 91 nuklider, inklusive dosbärande döttrar, som behövs för att beskriva markdos. Därefter beräknades vilka nuklider som behövs för att beskriva inandningsdos. Ytterligare två nuklider, utöver de 91 nuklider som redan identifierats, inkluderades för denna exponeringsväg. Analysen fokuserade därefter på vilka ädelgaser som kan förväntas bidra till främst molndos. Detta resulterade i att 13 nuklider från ädelgasgruppen inkluderades i nuklidvektorn. Åtta mödrar som inte på egen hand kvalificerat sig, men som sönderfaller till en redan identifierad dosbärande dotternuklid och därigenom ger ett icke-försumbart bidrag till dosen lades också till. Slutligen inkluderades fyra nuklider som visserligen inte behövs enligt ovanstående kriterium (minst 95 % av dosen), men som kan vara intressanta att ha med som markörnuklider i spridningsberäkningarna för vidare studier av effekter på lång sikt, exempelvis påverkan på livsmedelsproduktion eller behov av saneringsåtgärder.

Aktiveringsprodukternas bidrag till stråldosen, och i synnerhet valet av specifika nuklider, är förknippade med större osäkerheter än när det gäller fissionsprodukterna. För att välja vilka aktiveringsprodukter som ska ingå har SSM utgått från s.k. aktiveringsandel (*"fission equivalent yield"* eller *"fissionsekvivalent"*) enligt nedfallsmodellen *KDFOC3* [3] för olika

typer av kärnvapenexplosioner. Ett kiloton fissionsekvivalent aktiveringsandel ger samma dos från marken under perioden 10 minuter till 50 timmar efter explosionen som fissionsprodukterna från ett kiloton fissionsutbyte. I enlighet med föreslagna tumregler i *KDFOC3*-modellen ansätts en aktiveringsandel om 0,1 kt fissionsekvivalent per kiloton fusionsutbyte i en viss explosion. För huvudscenariot ansätts därför 5 kt fissionsekvivalent, där 4 kt antas härröra från aktivering av mark och 1 kt från aktivering av vapendelar. Därefter bestämdes vilka specifika nuklider som ska stå för detta fissionsekvivalenta bidrag och vilka deras inbördes proportioner ska vara. SSM har uppskattat detta från publicerade analyser av nedfall från provsprängningar i Nevada i USA, som inkluderar ett antal aktiveringsprodukter. Urvalet med avseende på bidrag till dos skedde därefter enligt samma metod och med samma kriterier som för fissionsprodukterna. SSM har på detta sätt inkluderat 11 aktiveringsprodukter i nuklidvektorn.

Efter 10 minuter utgörs nuklidvektorn av 129 nuklider – 118 fissionsprodukter och 11 aktiveringsprodukter – som sedan använts i spridnings- och dosberäkningarna. Nuklidvektorn redovisas i Tabell 2. En fullständig beskrivning av metoden och urvalet redovisas i Bilaga 2 (nuklidsammansättning).

4.4. Strålskyddsutvärdering

SSM har med hjälp av spridnings- och dosberäkningar utvärderat de största avstånden där en viss stråldos kan överskridas. Utvärderingar har skett för olika tidsperioder och för olika grader av skydd. I de fall stråldoserna beräknats för en oskyddad person under en begränsad tidsperiod har utvärderingen skett mot doskriterier för enskilda skyddsåtgärder. I de fall stråldoserna beräknats för personer som vidtar en enskild skyddsåtgärd under en begränsad tidsperiod har utvärderingen skett mot värden som SSM har valt⁷. I de fall stråldoserna beräknas för kombinationer av skydd initialt och skydd under resten av första året har utvärderingen skett mot generiska kriterier om inga särskilda skyddsåtgärder vidtas och mot referensnivåer om en eller flera skyddsåtgärder vidtas. SSM har vidare med hjälp av spridnings- och dosberäkningar på givna avstånd utvärderat dels de högsta effektiva doserna för olika kombinationer av skydd initialt och skydd under resten av första året och dels de högsta effektiva doserna från olika exponeringsvägar. Se Bilaga 1 (strålskydd) för bakomliggande resonemang om kopplingen till referensnivåer, generiska kriterier och doskriterier samt en sammanställning över vilka kombinationer av skydd initialt och skydd under resten av första året som utvärderats.

SSM har också med hjälp av spridnings- och dosberäkningar utvärderat dels de största avstånden där en viss markbeläggning (H+1) kan överskridas och dels den högsta markbeläggningen (H+1) på givna avstånd. Se avsnitt 4.6 för en förklaring av begreppet ”H+1”. Resultaten redovisas i Bilaga 6 (detaljerade resultat (allmänt)) och kan användas för att i efterhand utvärdera t.ex. konsekvenser för livsmedel.

⁷ SSM har av praktiska skäl valt värden som motsvarar doskriterierna för respektive skyddsåtgärd.

Tabell 2. Nuklidvektor efter 10 minuter för huvudscenariot, 100 kt markexplosion med 50 % fusion.

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

4.5. Spridnings- och dosberäkningar

Med spridningsmodellen *MATCH-BOMB* [16] [17] [18] har SSM beräknat hur radioaktiva ämnen från explosionen sprids i atmosfären och deponerar på marken under två dygn efter explosionen. Källan i spridningsberäkningen är det stabiliserade initialmolnet vilket antas föreligga ca 10 minuter efter explosionen, med ett innehåll av radioaktiva ämnen fördelat på partiklar av olika storlekar i olika delar av molnet, se avsnitt 4.2. I Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar) beskrivs i detalj den modell som SSM använt för att beräkna spridningen i atmosfären och depositionen på marken av det material som ursprungligen finns i det stabiliserade initialmolnet.

Luftkoncentration och markbeläggning från spridningsberäkningarna har använts till dosberäkningar med besluts- och analysstödsystemet *ARGOS* [19]. De olika nuklidernas bidrag till den totala effektiva dosen från de beaktade exponeringsvägarna har beräknats under spridningsfasen, samt efter spridningsfasen då enbart markdosen bidrar till den totala effektiva dosen (se avsnitt 3.2.1 om exponeringsvägar). Dessutom har ekvivalent dos till sköldkörteln vid inandning av radioaktiv jod beräknats med *ARGOS*.

Utgående från markbeläggningsresultaten har även vissa andra dosberäkningar gjorts med SSM:s mjukvara *DosCalc* (absorberad dos till röd benmärg samt kompletterande beräkningar av effektiv dos) och manuellt (absorberad dos till huden).

Dosberäkningarna har utförts för ettårigt barn och för vuxen. För mer detaljer se Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar).

För varje beräkningsfall med *MATCH-BOMB* och *ARGOS* har stråldoser och markbeläggning av radioaktiva ämnen från nedfallet beräknats på varje plats i beräkningsområdet, och följande modelleringsutfall har sparats:

- Maximala avstånd från explosionen där valda kriterier för olika stråldoser och markbeläggning överskrids
- Maximala värden för olika stråldoser och markbeläggning på valda avstånd

Modelleringsutfall från alla beräkningarna har sammanställts i kumulativa frekvensfördelningar för varje kriterium. Ur frekvensfördelningarna kan bestämmas

- För varje kriterium (dos eller markbeläggning) de avstånd som svarar mot givna percentiler av maxavståndsfördelningen
- För varje kriterium (avstånd) de värden på dos eller markbeläggning som svarar mot givna percentiler av maxvärdesfördelningen

Materialet från beräkningar och analys enligt ovan medger utsagor av typen

- Det största avståndet där effektiv dos D överskrids är X , givet att P % av alla väderfall beaktas
- Den högsta ekvivalenta dosen till sköldkörteln som överskrids vid avståndet X är D , givet att P % av alla väderfall beaktas

4.6. Tidsinvariant beskrivning av nedfall: "H+1"

Modellering av nedfallet med en enda nuklidvektor medger att modelleringen delvis kan ske baserat på tidsinvariant (icke-sönderfallande) nedfallsmängd. SSM använder termen *H+1* för sådant tidsinvariant nedfall. För en given tidpunkt i modelleringen kan resultat

uttryckta i H+1 räknas om till faktisk aktivitet, totalt eller för en viss nuklid. Detta kräver endast definition av total mängd H+1 i modellen samt beräkning av nuklidvektorns tidsutveckling genom radioaktivt sönderfall. H+1 uttrycks för enkelhets skull i bequerel, trots att det handlar om en ”beräkningsstorhet” som inte förändras genom sönderfall.

Total mängd H+1 i modellen sätts till $2 \cdot 10^{19}$ Bq per kiloton fissionsutbyte. Siffran är egentligen godtycklig i SSM:s tillämpning men kommer från den källmodell (*NWSwamp*) som utvecklats av FOI [20] och överensstämmer med vanliga schablonvärden för gammaemission från fissionsprodukterna 60 minuter efter en kärnvapenexplosion med fissionsutbytet 1 kt [5] [21]. Därtill kommer en andel från aktivering per kiloton fusionsutbyte. För huvudscenariot med 100 kt markexplosion och 50 % fusionsandel innebär det att total mängd H+1 i modellen är $1,10 \cdot 10^{21}$ Bq.⁸ Detta motsvarar tämligen väl den totala aktiviteten i SSM:s nuklidvektor för huvudscenariot 60 minuter efter explosionen ($1,09 \cdot 10^{21}$ Bq), vilket alltså inte är en slump eftersom båda siffrorna har sin grund i uppskattningar av fissionsprodukternas aktivitet per kiloton efter 60 minuter.⁹ Just referenstiden 60 minuter efter explosionen är också skälet till beteckningen H+1.

Modellering av nedfallet baserat på H+1 kan ge värdefull information. En begränsning i detta förfarande är att markbeläggningsresultat från spridningsmodelleringen avser resultat då spridningsmodelleringen upphört (efter 48 timmar). Inte desto mindre kan det vara användbart. Ett antal beräkningskriterier för dos som kan relateras till markbeläggning under olika förutsättningar, t.ex. för uppskattning av ekvivalenta doser till röd benmärg eller till huden, har utifrån den använda nuklidvektorn räknats om till beräkningskriterier uttryckta i markbeläggning av H+1. Dessutom har ett större antal beräkningskriterier uttryckta i markbeläggning H+1 definierats för att ge en bild av nedfallets påverkan genom markbeläggning på godtyckliga avstånd. Nedan följer några exempel för att tydliggöra hur detta fungerar.

Exempel: *Man kan med kännedom om nuklidvektorn för huvudscenariot räkna ut att en markbeläggning som per m^2 innehåller en andel $1,6 \cdot 10^{-10}$ av den totala aktiviteten i nuklidvektorn krävs för att ge en oskyddad vuxen en effektiv dos på 100 mSv från marken under det andra dygnet efter explosionen. För att modellera var en oskyddad vuxen kan få 100 mSv effektiv dos från marken under andra dygnet kan man då använda markbeläggningskriteriet $1,6 \cdot 10^{-10} m^{-2} \times 1,10 \cdot 10^{21} Bq \approx 180 GBq/m^2 H+1$.*

Exempel: *Om spridningsberäkningen ger att den högsta markbeläggning som erhålls på avståndet 30 km från explosionen (då 90 % av alla väderfall beaktas) är $550 GBq/m^2 H+1$, kan man med kännedom om nuklidvektorn för huvudscenariot räkna ut vilken högsta dosrat som erhålls från marken på avståndet 30 km från explosionen vid olika tidpunkter. $550 GBq/m^2 H+1$ representerar en andel $5,50 \cdot 10^{11} / 1,10 \cdot 10^{21} = 5,0 \cdot 10^{-10}$ av den totala aktiviteten i nuklidvektorn. En markbeläggning som motsvarar den totala nuklidvektorn per m^2 ger två timmar efter explosionen en effektiv dosrat till en vuxen på $1,03 \cdot 10^9 Sv/h$.*

⁸ Här har SSM använt de aktiveringsandelar från KDFOC3 [3] som diskuteras i avsnitt 4.3 (som för huvudscenariot ger en aktiveringsandel på sammanlagt 10 % av fissionsutbytet), trots att dessa avser bidrag till markdos under ett visst tidsintervall (10 minuter till 50 timmar), inte bidrag till aktivitet efter 60 minuter. I själva verket blir aktiveringsandelen av aktiviteten annorlunda än aktiveringsandelen av markdosen, och varierar med tiden efter explosionen. Efter 60 minuter är aktiveringsprodukternas andel av aktiviteten i nuklidvektorn ca 13 %. Detta spelar ingen roll då den totala mängden H+1 i modellen är en godtycklig parameter, även om den numeriska överensstämmelsen med nuklidvektorns totala aktivitet vid 60 minuter är en fördel i vissa avseenden.

⁹ Båda siffrorna är egentligen något högre än vanliga uppskattningar av fissionsprodukternas faktiska aktivitet (t.ex. $1,7 \cdot 10^{19}$ Bq per kiloton fission från [21]). Skälen till detta är olika. Siffran $2 \cdot 10^{19}$ Bq efter 60 minuter per kiloton fission representerar gammaemissionen från en fiktiv monoenergetisk gammakälla som skall ge samma dosrat från marken som fissionsprodukter, vilket kan vara användbart för att modellera markdos från nedfall (se [5] avsnitt 9.154-9.160 och [21] sid. 5-66 för detaljer). Motsvarande siffra för SSM:s nuklidvektor ($1,9 \cdot 10^{19}$ Bq per kiloton fission) är också för hög, vilket beror på att SSM har använt en s.k. *maxvektor* för att inte riskera att underskatta bidrag från viktiga dosbärande nuklider som skiljer mellan olika möjliga fissionsreaktioner, se Bilaga 2 (nuklidsammansättning).

Markbeläggningen $550 \text{ GBq/m}^2 \text{ H+1}$ ger då en dosrat på $5,0 \cdot 10^{-10} \times 1,03 \cdot 10^9 \text{ Sv/h} \approx 520 \text{ mSv/h}$ två timmar efter explosionen. Tre timmar efter explosionen ger den totala nuklidvektorn per m^2 en dosrat på $5,93 \cdot 10^8 \text{ Sv/h}$. Markbeläggningen $550 \text{ GBq/m}^2 \text{ H+1}$ ger alltså en dosrat på $5,0 \cdot 10^{-10} \times 5,93 \cdot 10^8 \text{ Sv/h} \approx 300 \text{ mSv/h}$ tre timmar efter explosionen.

Det kan vara värt att upprepa att den markbeläggning som spridningsberäkningen ger avser resultatet då spridningsmodelleringen upphört (efter 48 timmar). Exemplet förutsätter alltså att det nedfall man räknar på faktiskt skett inom det första dygnet (det första exemplet) och inom två respektive inom tre timmar (det andra exemplet).

5. Resultat

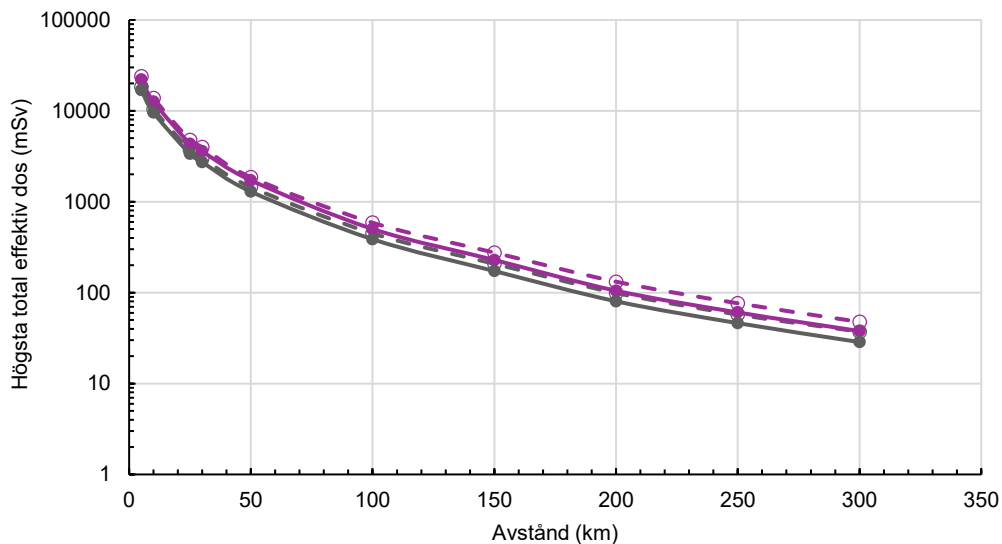
Resultat av beräkningarna finns utförligt redovisade i resultatbilagorna (4-6), men med ett minimum av kommentarer. Här redovisas ett urval av resultaten, som stöd för diskussion och slutsatser i kapitel 6.

Beräkningarna har gjorts för fem olika typer av initialt skydd, med följande beteckningar: *småhus*, *hyreshus*, *skyddsrum (SR 15)*, *källare* och *skyddsrum (källare)*. Dessa förklaras närmare, inklusive antagna skyddsfaktorer, i Bilaga 1 (strålskydd). För extern exponering från markbeläggning efter att initial vistelse i skydd avbrutits har beräkningar gjorts för två typer av normalvistelse: *småhus* och *hyreshus*. För normalvistelse har antagits att personer i genomsnitt vistas inomhus 80 % av tiden.

5.1. Effektiv dos från olika exponeringsvägar

I det här avsnittet redovisas resultat av beräkningar av effektiv dos som under ett tidigt skede erhålls från olika exponeringsvägar. De exponeringsvägar som beaktats är effektiv dos från extern exponering från markbeläggning och moln samt intecknad effektiv dos från intern exponering genom inandning. För molndos och inandningsdos beaktas hela spridningsfasen, dvs. de första två dygnen efter kärnvapenexplosionen då spridning av radioaktiva ämnen i luften modelleras, och för markdos beaktas antingen det första eller de två första dygnen efter explosionen.

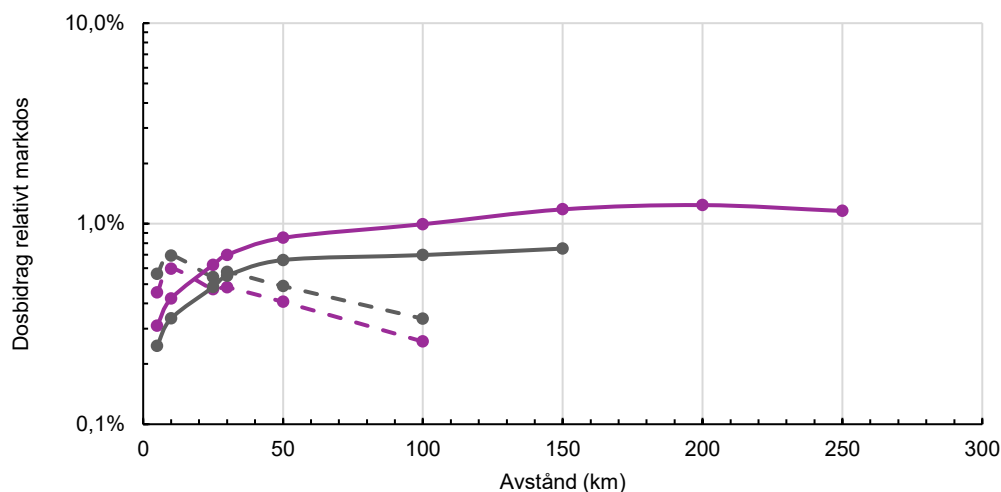
Figur 4 visar högsta total effektiv dos från alla exponeringsvägar som erhålls av ett oskyddat ettårigt barn och av en oskyddad vuxen på olika avstånd från explosionen. Heldragna linjer visar resultat där effektiv dos från marken beräknats för det första dygnet efter explosionen medan streckade linjer visar resultat för de första två dygnen. Den dos som erhålls under det första dygnet dominerar.



Figur 4. Högsta total effektiv dos som erhålls av oskyddat ettårigt barn (lila) och oskyddad vuxen (grå) vid givna avstånd från explosionen om 90 % av förekommande väderfall beaktas. Heldragna linjer visar effektiv dos under det första dygnet efter explosionen och streckade linjer visar effektiv dos under de första två dygnen.

Beräkningarna visar även att total effektiv dos som erhålls på alla avstånd helt domineras av bidraget från extern exponering från marken. Figur 5 visar bidragen från de övriga två

beaktade exponeringsvägarna som andel av effektiv dos från marken erhållen under första dygnet. På relativt korta avstånd ger molndosen ett större bidrag än inandningsdosen, men aldrig över en procent av markdosen under första dygnet. På större avstånd är bidraget från inandningsdosen större än molndosen, men uppgår ändå till som mest drygt en procent av markdosen under första dygnet. På stora avstånd blir bidragen från moln- och inandningsdos för små för att kunna beräknas med den tillgängliga modelleringsprecisionen.



Figur 5. Högsta effektiv dos som erhålls genom extern exponering för molnet (streckade linjer) och högsta intecknad effektiv dos som erhålls genom inandning (heldragna linjer) av oskyddat ettårigt barn (lila) och oskyddad vuxen (grå) vid givna avstånd från explosionen om 90 % av förekommande väderfall beaktas, som andel av högsta effektiv dos genom extern exponering från marken under det första dygnet efter explosionen.

5.2. Total effektiv dos efter skyddsåtgärder

Under antagandet att allmänheten kan skyddas genom vistelse inomhus under de första två dyggen kommer den totala effektiva dosen till boende i småhus under det första året att överskrida de olika referensnivåerna ut till avstånd enligt Tabell 3a och 3b för vuxen respektive för ettårigt barn, givet olika typer av initialt skydd. Inom dessa avstånd skulle utrymning eller andra åtgärder bli nödvändiga i vissa områden för att hålla doserna under respektive referensnivå.

Tabell 3a. Största avstånd för vilka total effektiv dos under det första året överskrider de olika referensnivåerna för vuxen boende i småhus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Initialt skydd (2 dygn)	Första året (vuxen boende i småhus)								
	Avstånd (km) för 100 mSv			Avstånd (km) för 500 mSv			Avstånd (km) för 1000 mSv		
Småhus	150	170	200	61	68	78	38	43	49
Hyreshus	120	140	160	39	46	53	20	24	28
Skyddsrum (SR 15)	110	120	140	36	41	46	18	21	24

Källare	100	110	130	35	40	45	17	20	23
Skyddsrum (källare)	100	110	130	34	39	44	17	19	23

Tabell 3b. Största avstånd för vilka total effektiv dos under det första året överskrider de olika referensnivåerna för ettårigt barn boende i småhus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Initialt skydd (2 dygn)	Första året (ettårigt barn boende i småhus)								
	Avstånd (km) för 100 mSv			Avstånd (km) för 500 mSv			Avstånd (km) för 1000 mSv		
Småhus	170	190	220	74	82	94	47	52	59
Hyreshus	140	160	180	52	56	65	27	30	35
Skyddsrum (SR 15)	130	140	160	47	50	58	24	27	31
Källare	130	140	160	46	49	57	23	27	31
Skyddsrum (källare)	130	140	150	45	48	56	23	26	30

Under antagande att man inte kan räkna med någon egentlig förvarning är den enda möjliga och effektiva skyddsåtgärden omedelbart efter explosionen vistelse i skydd med hög skyddsfaktor under de första dyggen. Sådan vistelse i skydd med hög skyddsfaktor kan leda till låga stråldoser även på ganska korta avstånd från explosionen. Först efter att inomhusvistelse avbrutits finns möjlighet till andra åtgärder. Därför kan det vara intressant att utvärdera behovet av ytterligare skyddsåtgärder (här handlar det främst om utrymning) för att underskrida referensnivåerna givet att all effektiv dos erhålls under tiden efter den första fasen, då nedfallet inte längre sprids och inomhusvistelse avbrutits. Tabell 4 visar ut till vilka avstånd de olika referensnivåerna överskrids under det första året, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dyggen.

Tabell 4a. Största avstånd för vilka total effektiv dos under det första året överskrider referensnivåerna, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dyggen, för vuxen boende i småhus och i hyreshus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Boende	Första året (vuxen, ingen effektiv dos första två dyggen)								
	Avstånd (km) för 100 mSv			Avstånd (km) för 500 mSv			Avstånd (km) för 1000 mSv		
Småhus	100	110	130	33	39	44	17	19	23
Hyreshus	69	73	98	17	20	24	< 8	< 8	13

Tabell 4b. Största avstånd för vilka total effektiv dos under det första året överskrider referensnivåerna, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dygnen, för ettårigt barn boende i småhus och i hyreshus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Första året (ettårigt barn, ingen effektiv dos första två dygnen)									
Boende	Avstånd (km) för			Avstånd (km) för			Avstånd (km) för		
	100 mSv			500 mSv			1000 mSv		
Småhus	130	140	150	45	48	56	23	26	30
Hyreshus	85	85	110	23	27	31	12	13	15

Tabell 4 ger alltså de avstånd innanför vilka vissa områden kan behöva utrymmas för att stråldoserna skall underskrida referensnivåerna, givet att ingen stråldos erhållits under de första två dygnen. Innanför de avstånd som ges i Tabell 4 kan det finnas områden där utrymning behöver ske mer skyndsamt. I Tabell 5 och 6 ges de avstånd inom vilka referensnivåerna kan överskridas inom en månad respektive inom en vecka efter explosionen, återigen givet att inga stråldoser erhållits under de första två dygnen.

Tabell 5a. Största avstånd för vilka total effektiv dos under den första månaden överskrider referensnivåerna, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dygnen, för vuxen boende i småhus och i hyreshus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Första månaden (vuxen, ingen effektiv dos första två dygnen)									
Boende	Avstånd (km) för			Avstånd (km) för			Avstånd (km) för		
	100 mSv			500 mSv			1000 mSv		
Småhus	87	90	110	19	20	24	9	9	11
Hyreshus	50	54	63	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8

Tabell 5b. Största avstånd för vilka total effektiv dos under den första månaden överskrider referensnivåerna, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dygnen, för ettårigt barn boende i småhus och i hyreshus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Första månaden (ettårigt barn, ingen effektiv dos första två dygnen)									
Boende	Avstånd (km) för			Avstånd (km) för			Avstånd (km) för		
	100 mSv			500 mSv			1000 mSv		
Småhus	99	110	130	23	27	31	12	15	15
Hyreshus	59	66	76	13	16	20	< 8	< 8	9

Tabell 6a. Största avstånd för vilka total effektiv dos under den första veckan överskrider referensnivåerna, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dyggen, för vuxen boende i småhus och i hyreshus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.

Första veckan (vuxen, ingen effektiv dos första två dyggen)									
Boende	Avstånd (km) för 100 mSv			Avstånd (km) för 500 mSv			Avstånd (km) för 1000 mSv		
	Småhus	46	49	60	10	10	10	< 8	< 8
Hyreshus	27	32	25	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8

Tabell 6b. Största avstånd för vilka total effektiv dos under den första veckan överskrider referensnivåerna, givet att ingen effektiv dos erhålls under de första två dyggen, för ettårigt barn boende i småhus och i hyreshus då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas.¹⁰

Första veckan (ettårigt barn, ingen effektiv dos första två dyggen)									
Boende	Avstånd (km) för 100 mSv			Avstånd (km) för 500 mSv			Avstånd (km) för 1000 mSv		
	Småhus	57	66	74	14	11	16	< 8	< 8
Hyreshus	34	41	40	< 8	< 8	9	< 8	< 8	< 8

5.3. Organdoser

SSM har beräknat till vilka avstånd tröskeldoser¹¹ för allvarliga deterministiska hälsoeffekter kan överskridas för tre organ: sköldkörteln, huden och röd benmärg. Dessutom har ekvivalent dos till sköldkörteln beräknats för att kunna utvärdera effekten av den möjliga skyddsåtgärden intag av jodtabletter. Respektive doskriterier diskuteras i Bilaga 1 (strålskydd). I det här avsnittet redovisas de viktigaste resultaten avseende dessa organdoser.

Fissionsprodukten jod kan förekomma både i samband med kärnvapenexplosioner och kärnkraftsolyckor. Beräkningarna visar att tröskeldosen för allvarliga deterministiska hälsoeffekter till sköldkörteln inte överskrider i det område som ingår i beräkningarna, dvs. avstånd större än 8 km från explosionen. Sköldkörteldosen ingår i beräkningarna som ett bidrag till effektiv dos, men för att utvärdera behovet av jodtabletter räcker det inte med att studera möjliga effektiva doser. I samband med allvarliga kärnkraftsolyckor kan sköldkörteldoserna utgöra huvuddelen av den effektiva dosen, och kan vara mycket höga även vid måttlig effektiv dos. SSM har därför beräknat ekvivalent dos till sköldkörteln för att kunna utvärdera effekten av den möjliga skyddsåtgärden intag av jodtabletter.

¹⁰ I vissa fall resulterar numeriska begränsningar i de beräkningsdata som använts för att uppskatta effektiv dos givet olika kombinationer av skyddsåtgärder i ofysikaliska steg, så att t.ex. ett något större avstånd faller ut för den 80:e percentilen än för den 90:e. I tabellen markeras sådana ofysikaliska steg genom att avstånden ges med *kursiv* stil. Avstånden presenteras trots de numeriska begränsningarna med två siffrors noggrannhet för att bättre illustrera övergripande trender.

¹¹ Tröskeldoser innebär en ökad incidens av allvarliga deterministiska hälsoeffekter bland de personer som erhåller stråldoser över denna nivå.

5.3.1. Ekvivalent dos till sköldkörteln

Tabell 7a och 7b visar största avstånd för vilka doskriterier för intag av jodtabletter för vuxen respektive för ettårigt barn överskrider under spridningsfasen då 90 % av förekommande väderfall beaktas. Tabellerna har kompletterats med ungefärlig effektiv dos på respektive avstånd, uppskattad med ledning av resultat för högsta effektiv dos vid givna avstånd (där markdosen beräknats under det första dygnet och inandnings- och molndos under hela spridningsfasen). I tabellerna anges även uppskattat bidrag från sköldkörteldosen till den totala effektiva dosen.

Den lägsta nivån som visas i tabellerna, 50 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln, är det doskriterium som ligger till grund för utdelning av jodtabletter inom beredningsplaneringen för allvarliga kärnkraftsolyckor. Denna sköldkörteldos kan överskridas utanför det omedelbara närområdet av kärnvapenexplosionen (< 8 km) för de fall som visas i tabellerna – barn och vuxna som är oskyddade eller vistas i småhus samt för barn som vistas i hyreshus. Den överskrider inte utanför närområdet för de andra typer av skydd som ingått i modelleringen (skyddsrum SR 15, källare i betonghus samt skyddsrum i källare i betonghus).

Intag av jodtabletter kan antas minska den ekvivalenta dosen till sköldkörteln till en tiondel, men som tabellerna visar innebär detta endast en marginell minskning av den totala effektiva dosen. Till exempel skulle bidraget från sköldkörteldosen på ca 2,5 mSv till den totala effektiva dosen på ca 440 mSv för ett oskyddat ettårigt barn på ett avstånd av ca 110 km sänkas till ca 0,25 mSv, vilket skulle innebära en väsentligen oförändrad total effektiv dos. Inomhusvistelse minskar inte endast sköldkörteldosen utan även den totala effektiva dosen, och krävs i vilket fall som helst för att minska de höga effektiva doser som kan erhållas inom de avstånd som visas i tabellerna. Detta diskuteras närmare i avsnitt 6.3.3.

Tabell 7a. Största avstånd för vilka ekvivalent dos till sköldkörteln för vuxen överskrider de angivna nivåerna. Tabellen visar även ungefärlig effektiv dos under första dygnet efter explosionen på respektive avstånd samt med uppskattat bidrag från sköldkörteldosen till den totala effektiva dosen. 90 % av förekommande väderfall har beaktats.

Sköldkörteldos	Vuxen		
	Avstånd	Effektiv dos på detta avstånd (första dygnet)	Bidrag till effektiv dos från sköldkörteldos
Utomhus			
50 mSv	68 km	800 mSv	~2,5 mSv
100 mSv	35 km	2100 mSv	~5 mSv
500 mSv	< 8 km	> 11000 mSv	~25 mSv
Inomhus i småhus			
50 mSv	35 km	850 mSv	~2,5 mSv
100 mSv	11 km	3300 mSv	~5 mSv
500 mSv	< 8 km	> 4600 mSv	~25 mSv

Tabell 7b. Största avstånd för vilka ekvivalent dos till sköldkörteln för ettårigt barn överskrider de angivna nivåerna. Tabellen visar även ungefärlig effektiv dos under första dygnet efter explosionen på respektive avstånd samt uppskattat bidrag från sköldkörteldosen till den totala effektiva dosen. 90 % av förekommande väderfall har beaktats.

Ettårigt barn			
Sköldkörteldos	Avstånd	Effektiv dos på detta avstånd (första dygnet)	Bidrag till effektiv dos från sköldkörteldos
Utomhus			
50 mSv	110 km	440 mSv	~2,5 mSv
100 mSv	74 km	890 mSv	~5 mSv
500 mSv	9 km	13000 mSv	~25 mSv
Inomhus i småhus			
50 mSv	74 km	360 mSv	~2,5 mSv
100 mSv	43 km	850 mSv	~5 mSv
500 mSv	< 8 km	> 5700 mSv	~25 mSv
Inomhus i hyreshus			
50 mSv	9 km	1300 mSv	~2,5 mSv
100 mSv	< 8 km	> 1400 mSv	~5 mSv
500 mSv	< 8 km	> 1400 mSv	~25 mSv

5.3.2. Absorberad dos till huden

SSM har uppskattat under vilka förutsättningar nedfall från en kärnvapenexplosion skulle kunna ge allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden genom att radioaktivt material deponerar på huden. I Tabell 8 redovisas största avstånd för vilka doskriteriet för allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden (10 Gy RBE-viktad absorberad dos till ett djup av 0,4 mm) överskrids vid en exponeringstid, dvs. tid från kontaminering till personsanering, på 10 timmar. Tidpunkter för kontaminering har varierats och nedfallet antas orsaka samma aktivitetskoncentration på huden som på marken. Andra antaganden redovisas i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar).

Tabell 8. Största avstånd för vilka ett nedfall som kan ge allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden överskrids då 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas, givet olika kontamineringsstidpunkter och en exponeringstid på 10 timmar. Avstånd som troligen inte kan nås från explosionsplatsen ens vid en transporthastighet på 20 m/s står inom parentes.

Kontamineringsstidpunkt	70 %	80 %	90 %
60 minuter efter explosionen	(110 km)	(120 km)	(140 km)
2 timmar efter explosionen	82 km	92 km	110 km
3 timmar efter explosionen	69 km	77 km	89 km
6 timmar efter explosionen	48 km	53 km	60 km
12 timmar efter explosionen	27 km	30 km	36 km

Nedfallets snabba förändring genom sönderfall särskilt under de första timmarna efter explosionen gör att dosraten till huden från en given mängd deponerat nedfall minskar mycket snabbt. Detta gör presentation av resultaten avseende absorberad dos till huden genom deposition av nedfall på huden relativt komplex. Modelleringen utgår dessutom i detta fall från tidsinvarianta nedfallsmängder (H+1, se avsnitt 4.6) på marken vid spridningsfasens slut (efter två dygn), på vilka dosratens kända tidsberoende har överlagrats. Det gör att även avstånd som i de flesta förekommande väderfall troligen inte kan nås av nedfall på de angivna tiderna finns med i Tabell 8. De har fått stå kvar för att ge en uppfattning om vilka tider och avstånd som i stora drag kan vara aktuella, men de mest uppenbara fallen (som kräver en transporthastighet på över 20 m/s) har satts inom parentes.

Ett annat sätt att ge en uppfattning om under vilka förutsättningar kontaminering på huden kan behöva beaktas relativt skyndsamt är att betrakta nedfall på ett givet avstånd. Tabell 9 ger den huddos som kan erhållas genom kontaminering med nedfall på avståndet 30 km från explosionen, givet det högsta nedfall som uppkommer på detta avstånd om 90 % av alla väderfall beaktas, och givet olika kontamineringsstidpunkt (nedfallets ankomst) och exponeringstid (tid mellan kontaminering och sanering).

Tabell 9. Största RBE-viktad absorberad dos till huden (till ett djup av 0,4 mm) vid kontaminering genom nedfall på 30 km avstånd från explosionen, som anländer efter olika tider, för givna exponeringstider.

Exponeringstid	Nedfallets ankomst (tid efter explosionen) vid 30 km avstånd				
	30 minuter	60 minuter	2 timmar	3 timmar	6 timmar
30 minuter	37 Gy	18 Gy	7,5 Gy	4,7 Gy	2,3 Gy
2 timmar	72 Gy	41 Gy	22 Gy	15 Gy	7,9 Gy
10 timmar	110 Gy	72 Gy	47 Gy	36 Gy	22 Gy

Även i detta fall bör man beakta att modelleringen egentligen inte är utformad för denna typ av dosuppskattning, utan SSM har gjort uppskattningen genom att kombinera tidsinvariant nedfallsmängd på marken efter två dygn med den kraftigt tidsberoende dosraten från nedfallet. När det gäller Tabell 9 innebär detta t.ex. att en ”dold förutsättning” för att 30 minuters exponeringstid för nedfall som deponerar på huden 60 minuter efter explosionen skall ge en huddos på 18 Gy är att detta nedfall motsvarar den fullständiga

mängden nedfall som deponerar på platsen i fråga under spridningsfasens två dygn. Inte desto mindre ger resultaten sammantaget att man måste beakta risken att kontaminering med relativt färskt nedfall (timmar efter explosionen) kan ge allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden.

5.3.3. Dos till röd benmärg

SSM har uppskattat avstånd där nedfall från en kärnvapenexplosion skulle kunna ge upphov till allvarliga deterministiska hälsoeffekter på röd benmärg genom extern exponering från markbeläggning.

I Tabell 10 redovisas största avstånd där ett oskyddat ettårigt barn kan få allvarliga deterministiska hälsoeffekter på röd benmärg utifrån olika starttider för exponeringen. I tabellen kan exempelvis utläsas att om exponeringen börjar 6 timmar efter explosionen kan tröskeldosen för allvarliga deterministiska hälsoeffekter på röd benmärg överskridas på 19 km avstånd, om 90 % av väderfallen beaktas.

Tabell 10. Största avstånd för vilka doskriteriet för allvarliga deterministiska hälsoeffekter till röd benmärg överskrids under 10 timmar för ettårigt barn om 70 %, 80 % respektive 90 % av förekommande väderfall beaktas, givet att exponeringen påbörjas vid givna tidpunkter efter explosionen.

1000 mGy under 10 timmar med start efter	70 %	80 %	90 %
3 timmar	25 km	28 km	33 km
6 timmar	14 km	16 km	19 km
12 timmar	< 8 km	< 8 km	9 km
≥ 24 timmar	< 8 km	< 8 km	< 8 km

6. Diskussion

Detta kapitel syftar dels (avsnitt 6.1 och 6.2) till att sammanfatta och diskutera tillvägagångssättet, beräkningarnas begränsningar och begränsningarnas inverkan på resultatens giltighet och robusthet, dels (avsnitt 6.3 och 6.4) till att sammanfatta viktiga slutsatser som SSM drar av resultaten och föreslå områden för vidare utredning.

6.1. Begränsningar i beräkningar och modellering

SSM:s modellering under arbetet med den här studien har beroenden och begränsningar i flera olika avseenden. I det här avsnittet diskuteras dessa, både avseende inverkan på slutsatserna i studien och mer allmänt.

6.1.1. Ingångsparametrar

Viktiga ingångsparametrar i beräkningarna är laddningsstyrka, explosionens höjd över marken samt den andel av laddningsstyrkan som härrör från fusion. I ett allmänt fall kan samtliga dessa vara svåra att fastställa. Därför är det intressant att betrakta hur modelleringsresultaten kommer att bero av dessa ingångsparametrar. Laddningsstyrkan påverkar initialmolnets dimensioner och därmed direkt den efterföljande spridnings- och dosberäkningen. För kärnvapen som inte har en mycket hög fusionsandel (vilket gäller samtliga kärnvapenfall som FOI tagit fram för SSM:s räkning [4], inklusive huvudscenariot som SSM valt) domineras den totala aktiviteten i nedfallet av fissionsprodukter. Aktiviteten för fissionsprodukterna är linjärt beroende av den del av laddningsstyrkan som härrör från fission. Resterande del av den totala aktiviteten utgörs huvudsakligen av aktiveringsprodukter, och i SSM:s modellering bestäms denna andel dels av den del av laddningsstyrkan som utgörs av fusion, och dels av avståndet till marken. För explosioner över en viss höjd över marken innehåller nedfallet inga aktiveringsprodukter från marken. Explosionshöjden har även stor påverkan på hur stor andel av den totala aktiviteten i molnet som kan orsaka betydande radiologiska konsekvenser genom nedfall. För explosioner över en viss höjd över marken bärs en tillräckligt stor del av radioaktiviteten av så små partiklar att betydande lokalt nedfall sannolikt inte uppkommer, åtminstone utanför explosionens närområde.

I det här arbetet har SSM som huvudscenario valt en kärnvapeninsats med de parametrar som diskuterats tidigare (100 kt markexplosion med 50 % fusionsandel). Vid bedömningen av andra felkällor kan det vara på sin plats att först beakta inverkan av dessa parametrar på modelleringen. Om fissionsutbytet t.ex. är 75 kt istället för 50 kt, med samma fusionsutbyte (50 kt) blir totala laddningsstyrkan 125 kt. Detta skulle ge ett initialmoln med något andra dimensioner, men framför allt skulle det innebära 50 % mer aktivitet från fissionsprodukter och ungefär 45 % större dospåverkan från nedfallet på en given plats. Varierar man istället explosionshöjden så att explosionen sker på 50 m höjd över marken istället för vid markytan minskar aktiviteten på partiklar som sannolikt kan bidra till nedfall av radiologisk betydelse med mer än 20 %.

6.1.2. Mark- och vattenyta

De resultat som redovisas avser nedfall från kärnvapenexplosioner vid markytan, vilka ger allvarligare radiologiska konsekvenser än explosioner på högre höjd. Kärnvapenexplosioner under, vid, eller över en vattenyta har inte beaktats. Ytans beskaffenhet kan antas påverka spridningen av radioaktivt material både genom det initiala

molnets dimensioner och dess sammansättning avseende radioaktiva ämnens fördelning i molnet samt utanpå och inuti olika typer och storlekar av partiklar. Allmänt sett kan en kärnvapenexplosion i anslutning till en vattenyta förväntas ge upphov till partiklar i atmosfären som är mindre än vad som är fallet för en explosion i anslutning till en markyta. Därmed kan de radiologiska konsekvenserna av tidigt nedfall också förväntas bli mindre vid en sådan kärnvapenexplosion [21].

6.1.3. Val av representativ plats

I föreliggande arbete har SSM strävat efter så generiska resultat som möjligt, t.ex. största avstånd från explosionen där en viss grad av påverkan erhålls, oavsett platsen för explosionen. Emellertid kan valet av plats förväntas påverka resultaten i någon mån, på grund av faktorer som dominerande väder, topografi, markanvändning och närhet till vattenytor.

I synnerhet kan närheten till större vattenytor förväntas påverka. SSM har inte använt s.k. *landmask* i beräkningarna, dvs. utfall över vatten hanteras på samma sätt som över land. Detta för att den valda platsen för explosionen inte har någon särskild betydelse för tolkningen av resultaten, och det därför inte är intressant med resultat som speglar hur just den platsen ligger i förhållande till större vatten. Emellertid sprids nedfallet allmänt sett längre över vattenytor än över landytor, varför en viss påverkan på resultaten t.ex. av närhet till kust kan förväntas. För att begränsa denna effekt har SSM valt en plats för explosionen som ligger i inlandet, ca 200 km från kusten.

En viss inverkan av valet av plats kan dock förväntas kvarstå, och för att få en uppfattning om hur stor denna påverkan kan vara har SSM jämfört resultat av beräkningar för explosioner på ett mindre antal olika platser i Sverige. Jämförelsen ger vid handen att olika val av plats ger skillnader i avståndsresultat på upp till 20 %, i något fall mer, jämfört med den plats som valts för huvudberäkningarna. För de fall som ger störst avvikelser mot den plats som valts för huvudberäkningarna kan avvikelserna kvalitativt förklaras av att vid dessa platser samverkar geografi och dominerande vindriktning så att en stor del av spridningen sker över havet.

I den mån resultaten av föreliggande studie huvudsakligen används för att bedöma effekter av nedfall som transporterats över land, t.ex. från en explosion på svenskt fastland till en annan plats på svenskt fastland, kan alltså bidraget från valet av plats för beräkningarna till osäkerheten i resultaten applicerade på en annan plats uppskattas vara upp till omkring 20 % men troligen lägre.

6.1.4. Hantering av aktiveringsprodukter

Huvuddelen av den aktivitet som ingår i beräkningarna härrör från fissionsprodukter. Därutöver har SSM tagit fram ett bidrag från neutronaktiveringsprodukter, som schablonmässigt representerar dosbidraget från aktivering av omgivning och vapendelar. De specifika radionuklider som ingår i respektive bidrag (fission, aktivering av omgivning och aktivering av vapendelar), liksom bidragens storlek, kan i det allmänna fallet varieras beroende på den information som kan finnas tillgänglig.

I de beräkningar som ligger till grund för den här rapporten har SSM antagit ett bidrag från fissionsprodukter som konservativt ska representera utbytet av varje fissionsprodukt oavsett fissionsbränsle. För storleken på de två bidragen från aktivering har SSM gjort antaganden enligt tumregler för standardjord och ”en väldefinierad vapenkonstruktion” [3].

Specifika radionuklider från aktivering har valts utgående från rapporterade observationer och analyser gjorda efter marknära kärnvapenprov. Urvalet kan modifieras om mer specifikt underlag finns, t.ex. om vilka ämnen som på en viss plats ingår i mark eller byggnader. SSM:s urval innefattar nuklider som även förekommer i andra beräkningar och sammanställningar i litteraturen (se t.ex. [22] [23] [24]). Emellertid finns oundvikligen ett inslag av godtycklighet i urvalet av specifika nuklider, och slutsatser som bygger på resultat beroende av någon enstaka aktiveringsprodukt bör användas med försiktighet. Det bör då säkerställas att just den aktiveringsprodukten rimligen kan förväntas i det aktuella scenariot. Föreliggande studie innehåller inga sådana slutsatser.

6.1.5. Fraktionering

Allmänt sett förväntas kondensationsprocesserna efter explosionen då ämnen i molnet svalnar och bildar radioaktiva partiklar leda till relativa överskott av lättflyktiga ämnen på små partiklar och av svårflyktiga ämnen på större partiklar. Detta förväntas leda till relativa överskott av lättflyktiga ämnen och deras sönderfallsprodukter i nedfallet på större avstånd från explosionen och av svårflyktiga ämnen och deras sönderfallsprodukter på mindre avstånd. Sådan fraktionering, dvs. olika spridning av olika radionuklider, har inte beaktats i SSM:s modellering. SSM har genomfört en känslighetsstudie där spridning av endast ”små” partiklar ($< 50 \mu\text{m}$) jämfördes med spridning av hela det förväntade spektrumet av partikelstorlekar. Försummande av denna fraktioneringseffekt ledde till mycket kraftig överskattning av nedfall av nuklider på ”små” partiklar på korta avstånd (mindre än 50-100 km) och underskattning av motsvarande nedfall på långa avstånd ($> 100\text{-}150$ km). Detta visar att effekten av fraktionering kan vara betydande, men den totala effekten av fraktionering på beräkningsresultat för t.ex. extern effektiv dos från marken är svår att uppskatta kvantitativt utifrån denna jämförelse.

Försök gjordes därför med en grov fraktioneringseffekt enligt den metod som beskrivs i [25]. Metoden har inte använts i de spridnings- och dosberäkningar som ligger till grund för de redovisade resultaten, utan skall ses som en ungefärlig maxuppskattning av i vilken omfattning dosberäkningarna vid olika avstånd och tidpunkter bör kunna påverkas av fraktionering. Grundämnen som förekommer i nedfallet indelades i två klasser: flyktiga och icke-flyktiga enligt det schema som presenteras i [26]. Fullständig separation av flyktiga och icke-flyktiga ämnen vid tiden 20 sekunder efter explosionen applicerades på fissionsprodukter från snabb fission av Pu-239. Doserater efter en timme och efter 12 timmar från nedfall på marken beräknades dels under antagande att all aktivitet i nedfallet bestod av flyktiga ämnen (ett extremfall av den fraktioneringseffekt som kan förväntas på stora avstånd från explosionen), dels under antagandet att all aktivitet bestod av icke-flyktiga ämnen (ett extremfall av den fraktioneringseffekt som kan förväntas vid små avstånd från explosionen). Resultaten ger vid handen att en sådan ”extrempåverkan” skulle kunna förändra dosresultat som erhållits utan hänsyn tagen till fraktionering med 20-30 %.

6.1.6. Dosberäkningar

Stråldoser orsakade av nedfallet från en kärnvapenexplosion har beräknats för olika exponeringsvägar. Effektiva doser och organdoser (röd benmärg) erhållna genom extern exponering från nedfall på marken bedöms ha beräknats med bäst noggrannhet.

Noggrannheten i beräkningen av inandningsdosen (och därmed sköldkörteldosen) begränsas av att de beräknade doserna avser intecknad effektiv dos från relativt små partiklar i det storleksintervall som kallas ”standardaerosolen” (grovt sett $0,1 - 1 \mu\text{m}$). Nedfall från en kärnvapenexplosion med markkontakt kan förväntas innehålla ett mycket

bredare spektrum av partikelstorlekar, där en betydande del av aktiviteten bärs av avsevärt större partiklar.¹² Detta kan allmänt sett förväntas leda till att de genomförda beräkningarna överskattar inandningsdosen (se närmare diskussion om dosfaktorernas beroende av partikelstorlek i [27]).

Noggrannheten i beräkningen av molndosen begränsas av att dosen genom denna exponeringsväg beräknats utgående från koncentrationen av radioaktiva ämnen i luftskiktet närmast marken (upp till något tiotal meter). Den koncentrationen har i dosberäkningen antagits gälla i hela luftrummet, vilket kan leda till både över- och underskattning av molndosen (beroende på den faktiska fördelningen av radioaktiva ämnen i höjddled).

Resultaten i den här studien visar att effektiv dos genom extern exponering från marken är den helt dominerande exponeringsvägen, så att begränsningarna vad avser noggrannhet i beräkning av inandningsdos, sköldkörteldos och molndos är av mindre betydelse för slutsatserna. Undantaget är slutsatsen om behov av jodtabletter, som baseras på dos till sköldkörteln från inandad radioaktiv jod. I detta fall bedömer SSM dock att sköldkörteldoserna, liksom övriga inandningsdoser, snarare överskattas än underskattas.

De uppskattningar av absorberad dos till huden som gjorts är bl.a. beroende av antaganden om hur koncentrationen av nedfall på marken förhåller sig till koncentrationen på huden. Detta förhållande är mycket scenarieroende (fuktighet, partikelstorlekar, vilket hudparti som avses, klädsel, hårväxt osv.). Uppskattningarna av möjliga huddoser i den här rapporten bygger på ett generiskt antagande att koncentrationen på ett kontaminerat hudparti är densamma som koncentrationen på marken, vilket ligger inom spannet av möjligheter. Resultaten kan alltså visa att uppkomsten av allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden är en möjlighet som måste beaktas, men innebär inte en kvantitativ förutsägelse av vilka huddoser som under alla omständigheter erhålls givet en viss markbeläggning.

6.1.7. Ofissionerat plutonium

I föreliggande studie försummas inverkan av ofissionerat plutonium, dvs. plutonium som utgjort fissionsbränsle i kärnvapnet men inte förbrukats i fissionsreaktioner. För att uppskatta vilken inverkan ofissionerat plutonium skulle kunna ha på beräkningsresultaten har några enkla men försiktiga antaganden gjorts avseende mängd och sammansättning av ofissionerat plutonium. Dessa antaganden leder sannolikt till att inverkan av ofissionerat plutonium överskattas.

De försiktiga antaganden som gjorts innebär att ofissionerat plutonium skulle kunna tillföra en andel omkring 10^{-12} till markdosraten från nedfallet efter 10 minuter jämfört med markdosraten från nuklidvektorn enligt huvudscenariot, och en andel omkring 10^{-6} efter 365 dygn då många andra nuklider i nedfallet klingat av. Ur markdossynpunkt behöver ofissionerat plutonium alltså inte beaktas.

Vidare innebär antagandena att ofissionerat plutonium jämfört med nuklidvektorn enligt huvudscenariot skulle kunna tillföra ytterligare 1 % till inandningsdosen vid tiden 60 minuter efter explosionen och ytterligare 16 % vid tiden 200 minuter efter explosionen. Dessa bidrag är visserligen inte försumbara, men givet att inandning som exponeringsväg

¹² Partikelstorleksfördelningen i nedfallet varierar med avståndet från explosionen (där större partiklar tenderar att falla närmare explosionen och mindre partiklar att föras längre bort), men ett närmare studium av några resultat med den spridningsmodell som SSM använt ger att aktiviteten i marknära (dvs. inandningsbar) luft kan bäras av partiklar större än 20 µm även ut till stora avstånd (>200 km).

totalt sett spelar en så begränsad roll (se avsnitt 5.1) kan konstateras att beaktande av inandningsdosen från ofissionerat Pu inte skulle påverka slutsatserna i föreliggande arbete. De antaganden som gjorts får dessutom anses vara mycket försiktiga. Om man istället utgår från uppskattningar av den mängd plutonium som totalt tillförts den globala miljön genom kärnvapenprov ovan jord [28] och den summerade fissionsladdningsstyrkan hos dessa kärnvapenprov [29] och använder det resulterande medelvärdet, blir det extra bidraget från ofissionerat plutonium till inandningsdosen betydligt mindre.

Antaganden och analys beskrivs närmare i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar).

Ovanstående slutsatser gäller i det tidsperspektiv och för de exponeringsvägar som behandlas i studien. För andra exponeringsvägar skulle bilden, framför allt i ett längre tidsperspektiv, kunna bli annorlunda när det gäller hur viktigt det är att ta hänsyn till utspridning av plutonium jämfört med de fissions- och aktiveringsprodukter som ingår i nuklidvektorn som använts här. Det skulle t.ex. kunna gälla långsiktig livsmedelspåverkan eller inandningsdoser från resuspension av nedfall på marken.

6.1.8. Tritium och C-14

Tritium (H-3) bildas i fusionsreaktioner när ett kärnvapen med en fusionsdel detonerar, och huvuddelen förbrukas som bränsle i ytterligare fusionsreaktioner i explosionen. En del av det tritium som bildas förbrukas dock inte. En mindre mängd tritium bildas dessutom genom neutronreaktioner på kväve i den omgivande luften. Neutronreaktioner på kväve i luften bildar även C-14. Både tritium och C-14 utgör en del av den radiologiska källtermen från en kärnvapenexplosion, men har försumrats i föreliggande studie.

Utgående från en parametrering [29] som uppskattar den mängd tritium och C-14 som tillförs atmosfären från olika mekanismer per kiloton fusion och per kiloton fission i en kärnvapenexplosion bedöms varken beaktande av tritium eller C-14 kunna påverka slutsatserna i den här rapporten. Antaganden och analys beskrivs närmare i Bilaga 3 (spridnings- och dosberäkningar).

Liksom i fallet med ofissionerat plutonium (avsnitt 6.1.7) gäller detta inom ramen för vad som behandlas i studien, och bilden skulle kunna bli en annan i ett längre tidsperspektiv.

6.2. Jämförelser med andra studier och metoder

6.2.1. Exponeringsvägarnas relativa betydelse

Resultaten i den här studien visar att en av de viktigaste skillnaderna mellan nedfall från en kärnvapenexplosion och utsläpp vid en allvarlig kärnkraftsolycka är de olika exponeringsvägarnas relativa betydelse för erhållna stråldoser till en oskyddad person under spridningsfasen. För kärnvapenedfallet dominerar extern dos från marken, medan inandningsdosen, i synnerhet genom upptag av radioaktiv jod i sköldkörteln, dominerar vid en allvarlig kärnkraftsolycka. Denna skillnad har stor betydelse för vilka skyddsåtgärder som är effektiva, och det är därför lämpligt att jämföra föreliggande resultat med andra studier.

I Tabell 11 jämförs den relativa storleken på de tre bidragen till total effektiv dos som beaktats i den här studien (markdos, molndos och inandningsdos) med motsvarande resultat i två andra studier [23] [27]. Jämförelsen skall göras med försiktighet eftersom det är många

parametrar som skiljer de olika fallen. En detaljerad jämförelse riskerar därför att bli missvisande. Huvudbudskapet är emellertid samstämmigt i det avseendet att extern exponering för radioaktiva ämnen som deponerat på marken är den viktigaste exponeringsvägen även under spridningsfasen.

Tabell 11. Relativ storlek på bidragen till total effektiv dos från extern markdos, extern molndos och inandning i föreliggande studie och i två andra studier av stråldoser från scenarier med kärnvapenexplosioner.

Källa	Scenario	Relativ andel av total effektiv dos (***)		
		Mark	Moln	Inandning
Lidström <i>et. al.</i> [27]	100 kt uranfission, markbrisad, vuxen på avstånd 30 km, 20-200 min (*)	96,8 %	1,0 %	2,3 %
Kraus och Foster [23]	10 kt uranfission (**), vuxen på avstånd 10 km, 0-24 h	97,0 %	2,6 %	0,3 %
Föreliggande studie	100 kt (50 % fission), markbrisad, vuxen på avstånd 30 km, 0-24 h, 90:e percentil av 663 väderfall	98,9 %	0,6 %	0,5 %

(*) Lidström *et. al.* fokuserar på inandningsdosen, och har därför räknat på ett tidsintervall (20-200 minuter) som innefattar den radioaktiva plymens passage av referensavståndet 30 km. Det korta tidsintervallet innebär att markdosen får en relativt sett lägre vikt än i föreliggande studie och [23], där markdosen integreras från nedfallets ankomsttid till 24 timmar efter explosionen. Exponering för molnet (extern molndos och inandning) sker endast under plympassagen, vilket kan innebära ett väsentligt kortare tidsintervall.

(**) Kraus och Foster specificerar inte explosionshöjd, men det scenario som deras studie anknyter till (US DHS *National Planning Scenario 1*) liksom deras diskussion om partikelstorlekar antyder att det rör sig om en marknära explosion.

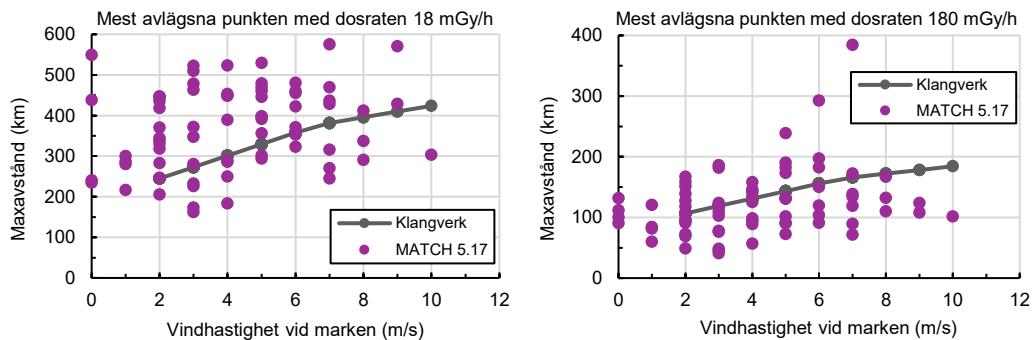
(***) Kraus och Fosters beräkning av total effektiv dos inkluderar även ett bidrag som inte visas i tabellen (med relativ andel 0,1 %) från inandning av radioaktivt material som virvlar upp från marken (resuspension). Resuspension beaktas inte i föreliggande studie eller i [27]. I beräkningen av andelarna för scenariot i [27] har för markdos ansatts mittpunkten i det skattade intervall som Lidström *et. al.* anger, och det har antagits att de av författarna angivna absorberade doserna (helkroppsdos) även motsvarar effektiv dos.

6.2.2. Markdos från idealiserade beläggningsfält

SSM har i detta arbete genomfört detaljerade spridningsberäkningar. Ett snabbare och i vissa situationer mer ändamålsenligt sätt att uppskatta radiologiska konsekvenser från nedfall efter en kärnvapenexplosion är att använda s.k. idealiserade beläggningsfält. Det finns olika sätt att göra detta, med olika grad av komplexitet. Programmet *KlangVerk* [30], utvecklat av FOI, använder en parametrering ur [5] för att beräkna elliptiska beläggningsfält (med en cirkulär komponent kring nollpunkten) utgående enbart från laddningsstyrka och en vindhastighet. Beläggningsfält uppskattade med *KlangVerk* kan användas som exempel för att få en uppfattning om hur beläggningsfält beräknade med *MATCH-BOMB* kan förhålla sig till idealiserade beläggningsfält. Beläggningsfält uppskattade med *KlangVerk* jämfördes med utdata från *MATCH-BOMB*-beräkningar för 72 olika väderfall. Indata till *KlangVerk* var vindhastigheter vid marken rapporterade vid SMHI:s väderstation på den aktuella platsen vid varje tillfälle.

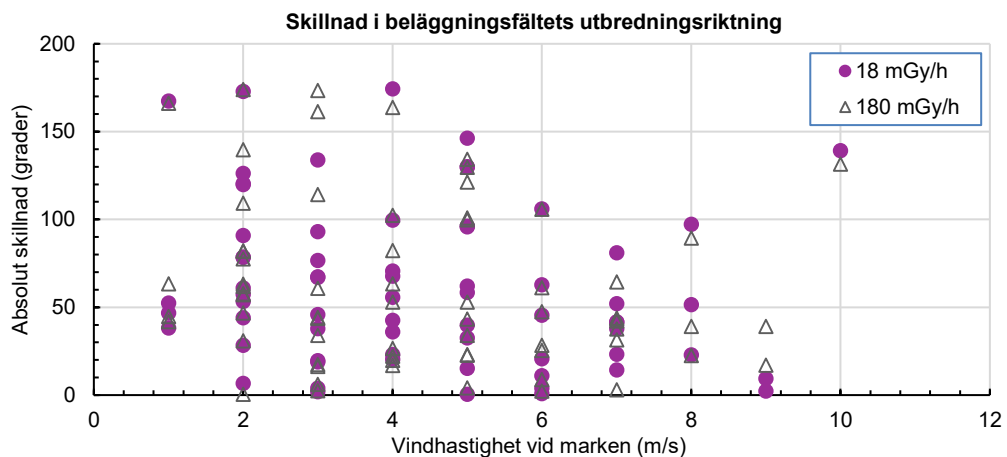
Figur 6 visar avståndet till den mest avlägsna punkten där de angivna dosraterna (absorberad helkroppsdos från marken vid tiden 60 minuter efter explosionen) erhålls. Väderfall med mycket låg rapporterad vindhastighet vid marken har utelämnats för *KlangVerk*, eftersom en vindhastighet över 1 m/s krävs för att programmet ska kunna beräkna ett beläggningsfält. På ett övergripande plan är överensstämmelsen relativt god.

Förutsägelseerna i de enskilda väderfallen skiljer sig dock åt en hel del, och det finns inte med *MATCH-BOMB* någon särskilt stark korrelation mellan vindhastigheten på marken och belägningsfältets största utsträckning.



Figur 6. Största avstånd till en punkt där dosraterna 18 mGy/h (vänster) och 180 mGy/h (höger) erhålls (korrigerat till tiden 60 minuter efter explosionen) enligt beräkning med *KlangVerk* och *MATCH-BOMB*, för fallet med 100 kt markexplosion med 50 % fusionsandel och för olika rapporterade vindhastigheter vid marken.

Vid uppskattning av idealiserade belägningsfält kan man använda en ”effektiv vindhastighet”, dvs. en vindhastighet som så gott det går representerar vindhastigheter på olika höjder i molnet. Likaså kan man i olika mån ta hänsyn till vindskjuvning, dvs. att vinden kan ha olika riktning på olika höjd. Detta kan ha relativt stor betydelse. *KlangVerk* har bara en vindhastighet som indata, men denna skulle kunna vara den ”effektiva vindhastigheten” eventuellt korrigerad för vindskjuvning om man har tillgång till vinddata för olika höjder. Detta har inte gjorts här utan exemplet får istället illustrera resultatet av att endast använda den oftast enklast tillgängliga informationen (vindens hastighet och riktning vid marken). Om man lägger ut de elliptiska belägningsfälten från *KlangVerk* enligt den rapporterade vindriktningen på marken vid olika tillfällen får man i många fall relativt stora avvikelser gentemot resultaten från *MATCH-BOMB*-beräkningarna för samma tillfällen, särskilt för lägre vindhastigheter. Detta illustreras i Figur 7, som visar att vindriktningen vid marken inte räcker som indata för att med hjälp av idealiserade belägningsfält åstadkomma en användbar prognos över vilka områden som riskerar att påverkas av nedfall.



Figur 7. Absolutbeloppet av skillnaden mellan bäring beräknad med *MATCH-BOMB* från explosionsplatsen till den mest avlägsna punkten med en given dosrat och rapporterad vindriktning på marken (dvs. den enklaste vindriktningen att använda för att lägga ut ett idealiserat belägningsfält).

6.3. Slutsatser angående beredskapsplanering

De viktigaste slutsatserna av betydelse för beredskapsplanering sammanfattas i det här avsnittet.

6.3.1. Tidsaspekter

Tiden har stor betydelse – det är viktigt att agera på rätt sätt vid rätt tidpunkt

- Den stråldos som kan erhållas från nedfall efter en kärnvapenexplosion minskar snabbt med tiden
- Tiden för nedfallets ankomst beror av avstånd och väderförhållanden
- Tiden innan nedfallets ankomst bör utnyttjas till att snabbt uppsöka gott skydd

Stråldoserna från nedfall efter en kärnvapenexplosion domineras av radionuklider som är kortlivade, jämfört med vad som kan förväntas efter en kärnkraftsolycka (se diskussionen i avsnitt 2.3). Genom att snabbt ta sig inomhus i gott skydd kan stråldoserna i samband med nedfall från en kärnvapenexplosion begränsas kraftigt, även om vistelsen i gott skydd sker under begränsad tid. Hur lång tid man behöver vara i skydd på en given plats för att undvika en viss stråldos beror på hur mycket nedfall som deponerat just på den platsen. Nedfallets snabba avklingning medför att det i ett tidigt skede alltid är fördelaktigt att fördröja oskyddad exponering för nedfallet genom att vänta med att gå in i ett kontaminerat område eller genom att vänta med att lämna sitt skydd.

Till skillnad mot de direkta verkansformerna i kärnvapenexplosionens omedelbara närområde (t.ex. stötvåg, värme och initialstrålning) tar det viss tid för radioaktivt nedfall att nå ett givet område. Den tid det tar beror på väder och vind, men avstånd där det är nödvändigt att ta skydd kan vara så stora att denna tid är tillräcklig för att befolkning i hotade områden skall kunna varnas och uppsöka skydd. Figur 4 (avsnitt 5.1) visar t.ex. att en effektiv dos runt 1 000 mSv kan erhållas under första dygnet på ca 70 km avstånd. Med vanligt förekommande vindstyrkor kan det ta flera timmar för nedfallet att nå detta avstånd. Tiden det tar för nedfallet att nå platser där höga stråldoser kan erhållas kan emellertid inte förväntas vara tillräckligt lång för att storskalig utrymning före eller under nedfall skall fungera som en effektiv skyddsåtgärd, vilket diskuteras i avsnitt 6.3.4.

Även efter den initiala skyddsfasen kvarstår markbeläggning som ger stråldoser över längre tid till människor som bor och verkar i ett område. Till skillnad mot vad som är fallet under och omedelbart efter spridning av nedfall från en kärnvapenexplosion kan detta hanteras genom andra åtgärder och på lite längre tidsskala, ytterst utrymning av särskilt drabbade områden. Sådana områden kan endast identifieras genom strålningsmätningar.

Mer långsiktiga konsekvenser kan uppkomma genom att nedfallet även innehåller en del långlivade radionuklider som kan ge stråldoser över tid, exempelvis genom radioaktiva ämnen i livsmedel. Påverkan på livsmedelsproduktion, vare sig på kort sikt (t.ex. dricksvatten från ytvattentäkter) eller på lång sikt, har inte ingått i arbetet som presenteras i den här rapporten.

6.3.2. Stråldosen från markbeläggningen dominerar

Gott initialt skydd mot radioaktiva ämnen på marken är det viktigaste

- Tidiga stråldoser från kärnvapenedfall domineras av strålning från markbeläggning
- De tidiga stråldoserna kan i vissa fall vara så höga att de är dödliga, livshotande eller resulterar i en bestående skada
- Vistelse i gott skydd minskar effektivt stråldoser från markbeläggning
- Den tid som vistelse i skydd behöver fortgå beror på markbeläggningen på platsen

Resultaten i avsnitt 5.1 visar att den exponeringsväg som dominerar stråldoserna från kärnvapenedfall, även under spridningsfasen, är extern exponering från ämnen som deponerat på marken. Dos genom inandning och dos från extern exponering från radioaktiva ämnen i luften i ett tidigt skede utgör en liten andel (någon procent) av den totala dosen. Efter att molnet med de radioaktiva ämnena passerat bidrar endast nedfall på marken till stråldosen.

Resultaten visar även att en oskyddad person under de första två dygna kan erhålla en effektiv dos över 100 mSv ut till 200-250 km avstånd från explosionen, och över 1000 mSv ut till 50-75 km avstånd. Resultaten som redovisas i avsnitt 5.3.3 visar att för en oskyddad person kan allvarliga deterministiska hälsoeffekter på grund av höga doser till röd benmärg uppstå ut till ca 30 km. Detta innebär att hantering av allvarliga deterministiska hälsoeffekter behöver beaktas i planeringen.

Inomhusvistelse i gott skydd, t.ex. källare i större betonghus, skyddar mot allvarliga deterministiska hälsoeffekter och minskar risken för stokastiska hälsoeffekter genom att effektiv dos från nedfall på marken under de första dygna kraftigt begränsas. Med skyddsfaktor 0,01 (källare i större betonghus) begränsas avståndet ut till vilket 100 mSv effektiv dos kan erhållas under de första två dygna till ca 12 km och med skyddsfaktor 0,001 (skyddsrum i källare i större betonghus) till mindre än de 8 km som utgör ungefärlig gräns för modelleringens giltighetsområde. Detta avstånd närmar sig det område där kärnvapenexplosionens direkta verkansformer dominerar skadeverkan. Detaljerade resultat för kombinationer av olika skydd redovisas i bilagorna 4-5.

6.3.3. Jodtabletter

Jodtabletter fyller ingen praktisk funktion vid kärnvapenedfall

- Jodtabletter skyddar endast sköldkörteln från radioaktiv jod som kommit in i kroppen, t.ex. via inandning
- Vid kärnvapenedfall bidrar inandad radioaktiv jod med en mycket liten del av den totala stråldosen
- På avstånd där jodtabletter skulle kunna övervägas är det nödvändigt att vistas i gott skydd mot strålning från markbeläggning
- I sådant skydd blir även stråldoserna till sköldkörteln så låga att jodtabletter inte är motiverade

I avsnitt 5.3.1 redovisas resultat för ekvivalent dos till sköldkörteln, och jämförs med totala effektiva doser som kan erhållas på motsvarande avstånd. Resultaten innebär att även om jodtabletter kan bidra till att sänka de förhållandevis låga sköldkörteldoser som kan uppstå,

är de av liten betydelse i förhållande till de höga effektiva doser som kan uppstå på motsvarande avstånd på grund av exponering från markbeläggningen. Detta förhållande påverkar bedömningen av hur effektiv och motiverad skyddsåtgärden utdelning och intag av jodtabletter är i kärnvapensammanhang.

På de avstånd där sköldkörteldoser som skulle kunna motivera intag av jodtabletter kan uppstå krävs inomhusvistelse i lokaler som erbjuder gott skydd mot exponering från markbeläggningen för att undvika en markant ökad risk för stokastiska hälsoeffekter genom höga effektiva doser från marken.

SSM:s slutsats är att jodtabletter inte fyller någon praktisk funktion i samband med kärnvapenexplosioner, av flera skäl:

- Höga sköldkörteldoser (över 500 mSv) kan sannolikt inte uppstå för oskyddade överlevande
- På avstånd där jodtabletter skulle kunna vara motiverade enligt doskriterier för fredstida förhållanden krävs inomhusvistelse i lokaler som erbjuder gott skydd i syfte att minska effektiva doser från markbeläggningen. Vistelse i sådana lokaler kan förväntas minska även redan jämförelsevis låga doser från inandning, t.ex. till sköldkörteln.
- Tidsförhållanden i samband med kärnvapenexplosioner innebär att extrautdelning inte är möjlig. För att jodtabletter överhuvudtaget skulle kunna nyttjas måste de därför förhandsutdelas. Nyttan av en sådan förhandsutdelning är mycket begränsad, då sköldkörteldoserna blir låga om inomhusvistelse sker i lokaler som erbjuder gott skydd.

I syfte att optimera strålskyddet är det dock motiverat att verka för att de lokaler som förbereds för inomhusvistelse antingen har luftfilter eller att dörrar, fönster och ventilationen kan stängas av under plympassage. Det kan heller inte uteslutas att enkla åtgärder för att tillfälligt täta springor m.m. kan vara till nytta vid skydd i enklare lokaler.

6.3.4. Utrymning

Utrymning i samband med nedfall från en kärnvapenexplosion är inte effektivt

- Det är kort tid innan nedfallet startar efter en explosion och det är svårt att förutse vilka områden som kan komma att påverkas av nedfall
- Utrymning i samband med en kärnvapenexplosion kan öka risken att människor är oskyddade när nedfallet kommer
- Istället är det viktigt att utnyttja tiden till att uppsöka gott skydd

I beredskapsplaneringen för kärnkraftsolyckor ingår planering för *utrymning* i ett tidigt skede i syfte att undvika allvarliga deterministiska hälsoeffekter (förebyggande utrymning av den inre beredskapszonen) och för att minska risken för stokastiska hälsoeffekter (utrymning av delar av den yttre beredskapszonen). Utrymning sker då till platser utanför den yttre beredskapszonen, som sträcker sig ut till ca 25 km från respektive kärnkraftverk. Beslut om utrymning baseras på tillståndet på den drabbade anläggningen samt möjligheter att genomföra andra skyddsåtgärder (inomhusvistelse och intag av jodtabletter). Vid utrymning av delar av den yttre beredskapszonen kan beslut om vilka riktningar som skall omfattas baseras på spridningsprognoser.

SSM har inte värderat möjligheterna att i förebyggande syfte utrymma stora områden som hotas av anfall. Till skillnad mot vad som är fallet vid en kärnkraftsolycka är det vid en konstaterad kärnvapenexplosion dock inte sannolikt att utrymning fungerar som brådskande skyddsåtgärd för att minska stråldoser från nedfall i ett tidigt skede. Tiden från en konstaterad kärnvapenexplosion till att nedfall kan nå människor kan förväntas vara för kort för att genomföra storskalig utrymning. Det kan heller inte förväntas vara möjligt att i tid och med tillräcklig säkerhet avgöra vilka områden som inte kommer att påverkas av nedfall, dvs. områden till eller genom vilka utrymning skulle kunna ske. Till skillnad mot vad som är fallet vid en allvarlig kärnkraftsolycka domineras stråldoser från nedfall som når människor under pågående utrymning av tidig extern exponering, och kan inte begränsas i någon nämnvärd omfattning genom intag av jodtabletter (se avsnitt 6.3.3). Sammantaget innebär dessa faktorer att försök att utrymma i samband med en konstaterad kärnvapenexplosion kan öka risken att människor utsätts för höga stråldoser från tidigt nedfall. Istället bör inomhusvistelse i gott skydd mot nedfall på marken prioriteras.

Planering för *utrymning på grund av markbeläggning* ingår i beredskapen för kärnkraftsolyckor i syfte att begränsa den effektiva dosen från markbeläggning på längre sikt. Beslut om utrymning på grund av markbeläggning fattas baserat på resultatet från strålningsmätningar, och med beaktande av effekten av saneringsåtgärder och restriktioner på de stråldoser som kan erhållas. Efter en kärnvapenexplosion som lett till radioaktivt nedfall kan utrymning på grund av markbeläggning bli aktuellt i vissa områden, för att hålla nere stråldoser som erhålls efter den tidiga skyddsfasen. Detta diskuteras i avsnitt 6.3.5.

6.3.5. Påverkade områden över tid

Utrymning på grund av markbeläggning kan behövas

- Efter att vistelse i gott skydd upphört kan utrymning på grund av markbeläggning behöva ske i områden ut till stora avstånd från explosionen för att begränsa stråldoserna på sikt
- På kortare avstånd från explosionen kan områden finnas där utrymning behöver ske skyndsamt
- De avstånd som kan bli aktuella beror på vilka stråldoser som kan erhållas och omständigheterna i övrigt

Radiologisk påverkan över tid har analyserats genom modellering av erhållna stråldoser under första året efter explosionen, exklusive en initial skyddsfas. Dessa resultat (se avsnitt 5.2) visar att skyddsåtgärder som utrymning på grund av markbeläggning eller andra åtgärder och restriktioner kan bli nödvändiga i vissa områden ut till stora avstånd (över 100 km) för att kunna underskrida 100 mSv effektiv dos under första året efter explosionen (exklusive de första två dyggen). På kortare avstånd kan skyndsammare åtgärder krävas. På avstånd ut till tiotals kilometer kan utrymning på grund av markbeläggning eller andra åtgärder i vissa områden bli nödvändiga inom en vecka. Sätts ambitionsnivån istället till 500 mSv effektiv dos (exklusive de första två dyggen) kan utrymning på grund av markbeläggning eller andra restriktioner bli nödvändiga inom första året på avstånd ut till några tiotal kilometer, och i det absoluta närområdet till explosionen (något tiotal kilometer) inom någon vecka.

6.3.6. Kontamination på huden

Åtgärder för att skydda huden kan bli nödvändiga

- Nedfall som hamnar på huden inom kort tid efter en kärnvapenexplosion kan ge upphov till stråldoser till huden som är så höga att de är dödliga, livshotande eller resulterar i en bestående skada
- Det är viktigt att skydda huden mot nedfallet
- Brådsakande personsanering kan behöva genomföras om nedfallet hamnat på kroppen

Även om de uppskattningar av möjliga huddoser från kontaminering med nedfall på huden som gjorts i den här studien är tämligen grova är det uppenbart att risken för deterministiska och allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden från nedfall kan behöva beaktas, och att hantering av allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden behöver omhändertas i planeringen.

Åtgärder till skydd mot kontaminering med färskt nedfall, liksom brådsakande personsaneringsåtgärder, kan behöva prioriteras på relativt stora avstånd. Visserligen krävs på dessa avstånd skydd mot extern exponering från markbeläggning för att undvika höga effektiva doser under de första dygnet. En kortare vistelse utomhus som sammanfaller med nedfallets ankomst kan dock medföra en kontaminering som utan sanering inom några timmar ger en huddos som kan resultera i allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden, utan att för den skull resultera i en effektiv dos som ger upphov till deterministiska hälsoeffekter.

I detta avseende skiljer sig situationen från en allvarlig kärnkraftsolycka, där allvarliga deterministiska hälsoeffekter på huden genom kontaminering med nedfall i stort sett kan uteslutas utanför det drabbade anläggningsområdet [31].

6.3.7. Jämförelse med beredskapsplanering för kärnkraftsolyckor

Delar av beredskapsplaneringen för kärnkraftsolyckor utgör en god grund för beredskap vid kärnvapenedfall

- Den planering för utrymning på grund av markbeläggning som finns inom kärnenergiberedskapen kan ligga till grund för motsvarande planering för utrymning på grund av markbeläggning efter en kärnvapenexplosion
- Lokal, regional och nationell mätförmåga kan behöva användas till motsvarande ändamål som i kärnenergiberedskapen (t.ex. identifiera områden där utrymning på grund av markbeläggning behöver prioriteras)
- Lokal mätförmåga blir dessutom viktigt som underlag för tidiga beslut

Det finns ett flertal viktiga skillnader mellan radioaktivt nedfall från en kärnvapenexplosion och radioaktiva ämnen som sprids vid en allvarlig kärnkraftsolycka, med härdsmläta och tankgenomsmlätning följt av utsläpp utan fungerande konsekvenslindrande system. Det finns även några likheter, framför allt vad avser förmågor som finns inom samhällets beredskap för kärnkraftsolyckor och som kan utnyttjas i befintlig eller utvecklad form för att stärka beredskapen att hantera nedfall från kärnvapenexplosioner. I detta avsnitt sammanfattas några viktiga skillnader och likheter, där skillnaderna nämnts var för sig tidigare i det här kapitlet.

Kärnvapenedfallet kan ge höga stråldoser under spridningsfasen ut till mycket större avstånd än vad som blir fallet vid en allvarlig kärnkraftsolycka.¹³ Det medför bland annat att det blir betydligt svårare att avgöra vilka områden som kommer att påverkas av nedfall, och vilka som skulle kunna användas vid en eventuell utrymning. Detta i kombination med att platsen och andra omständigheter för explosionen (t.ex. laddningsstyrka och höjd över marken) inte kan förutsättas vara kända på förhand gör att utrymning före eller under pågående spridning av radioaktiva ämnen inte är en realistisk möjlighet i beredskapsplaneringen när det gäller kärnvapen. Utrymning riskerar istället leda till höga stråldoser om människor drabbas av nedfallet under pågående utrymning.

Liksom i fallet med en allvarlig kärnkraftsolycka kan det efter en kärnvapenexplosion bli nödvändigt att utrymma människor på grund av markbeläggning, för att begränsa stråldoser erhållna efter spridningsfasen. Detta kan efter en marknära kärnvapenexplosion bli aktuellt på avstånd jämförbara med eller större än motsvarande avstånd efter en allvarlig kärnkraftsolycka om samma doskriterium (20 mSv effektiv dos under ett år) tillämpas.

Inom kärnenergiberedskapen finns planering för strålningsmätningar efter radioaktivt nedfall i samband med en kärnkraftsolycka. Sådana mätningar syftar till att skyndsamt identifiera områden där utrymning på grund av markbeläggning behöver ske, och ge underlag för hur de skall prioriteras. Mätningar syftar även till att identifiera områden där åtgärder kan behövas för att minska stråldoser från intag av livsmedel. Den förmåga som finns i dessa avseenden kan användas som utgångspunkt för att utveckla motsvarande beredskap för nedfall efter en kärnvapenexplosion. Lokal mätförmåga kan förväntas bli mycket viktig av samma skäl som när det gäller en kärnkraftsolycka, men även i ett mycket tidigt skede för att t.ex. avgöra när det går att lämna ett gott skydd.

6.4. Förslag till vidare utredning

Den här rapporten visar på behovet av att planera för ett gott skydd för allmänheten i samband med nedfall efter en kärnvapenexplosion. En statlig utredning med uppdrag att lämna förslag till hur ett modernt och väl anpassat fysiskt skydd för civilbefolkningen mot direkta konsekvenser av krigshandlingar på svenskt territorium bör vara utformat har nyligen avslutats. Utredningens betänkande [32] lämnades till regeringen i november 2022. Betänkandet betonar vikten av tillgång till skyddsrum och andra skyddade utrymmen för civilbefolkningen och lämnar förslag på ett antal åtgärder för att åstadkomma och upprätthålla ett ändamålsenligt, effektivt och modernt fysiskt skydd för civilbefolkningen.

Utöver behovet av gott skydd är ett antal områden med anknytning till vad som behandlats i föreliggande arbete angelägna för fortsatt utredning i samverkan mellan ansvariga myndigheter. SSM diskuterar som avslutning kort några förslag till vidare arbete, som alla berör även andra myndigheters ansvarsområden.

6.4.1. Ramverk för strålskydd vid höjd beredskap

Det behöver utredas hur ramverket för strålskydd bör se ut under andra förhållanden än i fredstid. Det kan t.ex. gälla vilka referensnivåer som kan vara rimliga att använda vid höjd beredskap och krig. En sådan analys behöver beakta att delvis andra avvägningar kan

¹³ Detta gäller vid det huvudscenario som SSM räknat med i studien, dvs. en explosion vid marken (som kan förväntas ge de allvarligaste nedfallskonsekvenserna). Vid en luftexplosion behöver det inte bli något nedfall av radiologisk betydelse.

behöva göras mellan strålskydd och andra samhällsintressen (t.ex. energi- och livsmedelsförsörjning) än vad som är fallet i fredstid.

Detta arbete kan med fördel genomföras i två steg. Ett första steg syftar till att klarlägga vilka utgångspunkter som ska gälla för strålskydd vid höjd beredskap och krig. I ett andra steg tas sedan fram förslag till förändrad eller utökad reglering för att stödja relevant strålskydd under andra förhållanden än i fredstid.

6.4.2. Beslutsfattande avseende strålskydd vid kärnvapenexplosioner

Vid en kärnkraftsolycka tar SSM fram (och uppdaterar löpande) ett s.k. kärntekniskt och radiologiskt underlag (KRU), som stöd för SSM:s rådgivning till räddningsledare och andra beslutsfattare och som underlag för beslut. SSM har även, i samverkan med berörda aktörer (t.ex. räddningsledare och berörda centrala myndigheter), tagit fram ett relativt omfattande material som stöd för beslut om strålskydd vid en olycka i ett svenskt kärnkraftverk [14].

För beslut om skyddsåtgärder och andra åtgärder vid kärnvapenexplosioner behövs också underlag, som behöver tas fram skyndsamt och baseras på bästa möjliga information om händelsen. Det behöver utredas vilka aktörer som ska samverka i en sådan process, liksom form och innehåll i samverkan. Utformningen av beslutsunderlag är också beroende av de behov som finns hos olika beslutsfattare, och därmed av den planering som finns för skyddsåtgärder och andra åtgärder. Utvecklingen skulle, liksom när det gäller kärnenergiberedskapen, behöva gå hand i hand med utvecklingen av relevanta beslutsstöd.

6.4.3. Larmning och varning vid hot om kärnvapenedfall

Tids- och avståndsförhållanden när det gäller skydd mot nedfall från kärnvapenexplosioner leder till frågeställningar som behöver beaktas vid utformningen av ett ändamålsenligt system för larmning, varning och kommunikation med allmänheten. Förvarningstiden vid ett angrepp med kärnvapen kan vara mycket kort eller obefintlig, och i det hotade målområdet möjligen medge skyndsamt uppsökande av skydd mot direktverkan (stövåg, värmestrålning och joniserande initialstrålning). I den mån skyddet är ändamålsenligt mot direktverkan bör det även ge skydd mot nedfall i explosionens närområde. När det gäller nedfallet utanför det område som nås av direktverkan förhåller det sig i flera avseenden annorlunda.

Mycket stora områden ligger inom avstånd (hundratals kilometer) som skulle kunna nås av nedfall som resulterar i hög markbeläggning och som motiverar brådskande skyddsåtgärder. De områden som faktiskt påverkas är dock avsevärt mindre. Kan man i en given situation tillräckligt snabbt och med tillräcklig säkerhet fastställa vilka områden som sannolikt kommer att nås av nedfallet, respektive vilka områden som inte kommer att påverkas, och kan planeringen utformas för att kunna utnyttja den informationen?

Tiden mellan explosionen och ankomsten av nedfall som motiverar uppsökande av skydd kan vara lång (timmar). I områden som så småningom kommer att nås av nedfall, kan det finnas tid att optimera skyddet – t.ex. att uppsöka ett förberett skyddsrum där vistelse under flera dygn är möjlig, istället för att onödigt skyndsamt uppsöka ett mer närliggande men sämre och mindre uthålligt skydd.

Den tid som behöver tillbringas i skydd mot nedfall på marken beror av dosraten på platsen, dvs. hur mycket radioaktivt material som deponerat, och går inte att fastställa i förväg.¹⁴ Utan egen mätförmåga är människor i skydd beroende av information från ansvariga myndigheter om när de kan lämna skyddet. Denna information behöver sannolikt följas, omgående eller inom kort tid, av någon form av rekommendationer angående förhållningssätt efter att man lämnat skyddet. Bör man utrymma skyndsamt? Bör man tillsvidare begränsa vistelse utomhus? Kan olika former av verksamhet fortgå som vanligt?

SSM har i föreliggande rapport beaktat scenariot med markexplosion, som kan förväntas ge värsta tänkbara utfall avseende nedfall. Andra typer av kärnvapeninsats är möjliga, och mot många mål sannolikare. Vidare kan laddningsstyrkan vara en annan än den som SSM antagit här. Om man i en given situation tillräckligt snabbt kan fastställa väsentliga parametrar som explosionshöjd och laddningsstyrka, använda sådan information i någon form av spridnings- och dosprognoser, omsätta resultatet i en strålskyddsbedömning och sammanväga denna med andra relevanta faktorer, skulle det kunna påverka bedömningen av var och när olika skyddsåtgärder och andra åtgärder är motiverade. Detta förutsätter dock att sådan information snabbt kan tas fram och delas mellan myndigheterna.

6.4.4. Stråldoser genom livsmedel och oavsiktligt intag

Exponering genom intag av radioaktiva ämnen, via livsmedel eller oavsiktligt genom att nedfall som deponerat i omgivningen eller på t.ex. händer kommer in i kroppen, har inte behandlats i den här rapporten. Här kan ett delvis annat urval av nuklider för modellering visa sig motiverat än det urval som SSM hittills använt sig av, då det senare är avsett att väl representera framför allt effektiv dos från extern exponering från marken samt inandning.

Konsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner på livsmedelsproduktion, på kort och på lång sikt, har inte berörts rapporten. För att kunna uppskatta sådana konsekvenser på olika typer av livsmedelsproduktion behövs förutom markbeläggningsresultat från SSM:s spridningsmodellering även åtgärdsnivåer, framtagna genom modellering av radioaktiva ämnens upptag och transport genom produktions- och livsmedelskedjan till människa, samt vilka stråldoser intag av livsmedel kan ge givet olika konsumtionsmönster över tid.

En del av en sådan utredning skulle vara framtagande av gränsvärden för radionuklider från kärnvapenedfall i livsmedel givet lämpliga doskriterier för olika situationer och försörjningslägen i fred, höjd beredskap och krig. Det är inte på förhand givet att gränsvärden framtagna med antagande om nuklidsammansättning typisk för en allvarlig kärnkraftsolycka är fullt ut tillämpbara för kärnvapenedfall. När gränsvärden är framtagna kan lämpliga åtgärdsnivåer beräknas.

6.4.5. Planeringsunderlag och råd för strålningsmätningar

SSM har tagit fram ett planeringsunderlag avseende behovet av regionala strålningsmätningar i samband med en svensk kärnkraftsolycka [33]. På motsvarande sätt behöver det utredas vilka strålningsmätningar som bör genomföras i olika tidsskeden i samband med en kärnvapenexplosion. Som ovan nämnts behövs en förmåga till strålningsmätningar på alla nivåer i samhället, från nationella resurser för nuklidspecifika analyser och storskalig kartering av nedfall till lokal förmåga för att avgöra om det går att

¹⁴ Dosraten avtar, som diskuterats i tidigare avsnitt, snabbt med tiden oavsett hur hög den är från början. Detta innebär dock inte att det finns en given tid efter vilken dosraten alltid tillåter ett visst agerande (t.ex. att lämna sitt skydd). Det beror för en given plats på hur hög dosraten var från början.

lämna sitt skydd. Vilken förmåga till strålningsmätningar som bör finnas på lokal, regional respektive nationell nivå behöver utredas.

Vid strålningsmätningar i samband med en kärnvapenexplosion behövs även förberett stöd för tolkning av mätresultat. De åtgärdsnivåer som finns framtagna för fredstida radiologiska nödsituationer är inte avsedda att användas vid mätning på nedfall efter en kärnvapenexplosion. Dosratens snabba avtagande i samband med en kärnvapenexplosion gör det också svårare att uppskatta framtida doser. Åtgärdsnivåer som kan används vid tolkning av mätresultat från enklare mätningar behöver tas fram, exempelvis för att kunna ge vägledning om när det kan vara lämpligt att lämna initialt skydd.

7. Slutkommentar

Det möjliga utfallsrummet när det gäller konsekvenserna av nedfallet efter en kärnvapenexplosion är stort. Inte minst påverkas utfallet av de väderförhållanden som råder vid och efter explosionen. Enskilda exempel och scenarier kan vara illustrativa och användbara i olika sammanhang, men räcker inte som grund för beredskapsplanering.

De resultat i form av avstånd, stråldoser och markbeläggning som presenterats i den här rapporten representerar istället de allvarligaste konsekvenserna som kan förväntas med hänsyn tagen till en given andel (70 %, 80 % eller 90 %) av ett stort antal förekommande väderförhållanden. Det gäller dock att komma ihåg att inte heller dessa resultat nödvändigtvis representerar vad som faktiskt händer vid en kärnvapenexplosion. För det första representerar resultaten ett statistiskt utfall och inte faktiska väderförhållanden vid en given verklig explosion. För det andra representerar de ett antal antaganden om själva kärnvapenexplosionen (laddningsstyrka, explosionshöjd osv.). För det tredje finns som vid all modellering begränsningar i hur stråldoser, avstånd och markbeläggning modelleras för en kärnvapenexplosion med givna parametrar.

De slutsatser avseende beredskapsplanering som redovisas i rapporten (avsnitt 6.3) är framtagna med beaktande av ovanstående begränsningar. Dessa slutsatser kan alltså redan nu beaktas i beredskapsplaneringen. I övrigt är avsikten att resultaten i rapporten ska utgöra en del av ett växande kunskapsunderlag om de radiologiska konsekvenserna av kärnvapenexplosioner, även om de inte utgör något färdigt planeringsunderlag avseende skydd mot nedfall från kärnvapenexplosioner. Att, i tillämpliga delar, närma sig den tillgång till planerings- och beslutsunderlag som finns inom kärnenergiberedskapen för allvarliga kärnkraftsolyckor får istället ses som ett mål på längre sikt. SSM avser därför i sitt fortsatta arbete att kontinuerligt förbättra sin modellering, t.ex. avseende påverkan på livsmedelsproduktion och i många av de avseenden som diskuteras i avsnitt 6.1. SSM avser också att i samverkan med ansvariga myndigheter och andra berörda aktörer använda föreliggande och kommande resultat för att analysera och bidra till att förbättra samhällets skydd mot nedfall från kärnvapenexplosioner.


Bilagor

1. Strålskydd
2. Nuklidsammansättning
3. Spridnings- och dosberäkningar
4. Detaljerade resultat (barn)
5. Detaljerade resultat (vuxna)
6. Detaljerade resultat (allmänt)

Referenser

- [1] ”Handlingskraft. Handlingsplan för att främja och utveckla en sammanhängande planering för totalförsvaret 2021-2025 (FM2021-1 7683:2, MSB2020-16261-3),” Försvarsmakten och Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2021.
- [2] Strålsäkerhetsmyndigheten, ”Rapport 2017:27 Översyn av beredskapszoner,” 2017.
- [3] T. Harvey, F. Serduke, L. Edwards och L. Peters, ”KDFOC3: A Nuclear Fallout Assessment Capability,” Lawrence Livermore National Laboratory, 1992.
- [4] M. Goliath, ”Kärnvapenfall för totalförvarsplanering (FOI Memo 6724),” FOI, 2019.
- [5] S. Glasstone och P. J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons* (3rd Edition), United States Department of Defence och United States Department of Energy, 1977.
- [6] A. Tovedal, T. Nylén, O. Björnham och H. Grahn, ”Dricksvatten från ytvattentäkt efter ett radioaktivt nedfall (FOI-R--4930--SE),” FOI, 2021.
- [7] SFS 2018:396. Strålskyddslag, ”https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/stralskyddslag-2018396_sfs-2018-396”.
- [8] SFS 2018:506. Strålskyddsförordning, ”https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/stralskyddsforordning-2018506_sfs-2018-506”.
- [9] Rådets direktiv 2013/59/Euratom av den 5 december, ”<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=PL>”.
- [10] Internationella strålskyddskommissionen (ICRP), ”Publication 103 - The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” 2007.
- [11] SFS 2003:778. Lag om skydd mot olyckor, ”https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2003778-om-skydd-mot-olyckor_sfs-2003-778”.
- [12] Internationella atomenergiorganet (IAEA), ”Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSR Part 7,” 2015.
- [13] Internationella strålskyddskommissionen (ICRP), ”Publication 96 - Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack,” 2005.
- [14] Strålsäkerhetsmyndigheten, ”Beslutsstöd vid olycka i ett svenskt kärnkraftverk, version 2.0 (SSM2022-8091),” 2022.
- [15] B. Ekengren, ”Skyddsrumregler SR 15 (MSB748),” MSB, 2014.
- [16] C. Person, L. Robertson och L. Thaning, ”Model for Simulation of Air and Ground Contamination Associated with Nuclear Weapons. An Emergency Preparedness Model (Meteorologi No 95),” SMHI och FOA, 2000.
- [17] L. Robertson, J. Langner och M. Engardt, ”An Eulerian Limited-Area Atmospheric Transport Model,” *J. Appl. Meteor.*, vol. 38, nr 2, pp. 190-210, 1999.
- [18] S. Winter, P. von Schoenberg och L. Thaning, ”Redovisning av uppdrag - spridningsberäkningar (FOI Memo 2339),” FOI, 2008.
- [19] S. Hoe, P. McGinnity, T. Charnock, F. Gering, L. H. Schou Jacobsen, J. Havskov Sørensen, K. G. Andersson och P. Astrup, ”ARGOS Decision Support System for Emergency Management,” i *Proceedings (online) Argentine Radiation Protection Society*, 2009.

- [20] P. von Schoenberg, N. Brännström, H. Grahn, T. Nylén och G. Ågren, "Ny modell för spridning av radioaktivt material från kärnvapensprängningar, preliminära frågeställningar (FOI Memo 5621)," FOI, 2016.
- [21] P. J. Dolan (red.), *Capabilities of Nuclear Weapons. Part I Phenomenology (DNA EM-1 Part I Change 1)*, Defense Nuclear Agency, 1978.
- [22] L.-E. De Geer, "Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty: relevant radionuclides," *Kernteknik*, vol. 66, pp. 113-120, 2001.
- [23] T. Kraus och K. Foster, "Analysis of fission and activation radionuclides produced by a uranium-fuelled nuclear detonation and identification of the top dose-producing radionuclides," *Health Phys.*, vol. 107, pp. 150-163, 2014.
- [24] P. J. Drevinsky, J. T. Wasson, E. C. Couble och N. A. Dimond, "Be7, P32, P33, and S35: Stratospheric Concentrations and Artificial Production," *J. Geophys. Res.*, vol. 69, pp. 1457-1467, 1964.
- [25] J. R. Trabalka och D. C. Kocher, "Bounding Analysis of Effects of Fractionation of Radionuclides in Fallout on Estimation of Doses to Atomic Veterans," Defense Threat Reduction Agency, Fort Belvoir, 2007.
- [26] H. G. Hicks, "Calculation of the concentration of any radionuclide deposited on the ground by offsite fallout from a nuclear detonation," *Health Phys.*, vol. 42, pp. 585-600, 1982.
- [27] K. Lidström, T. Nylén, A. Tovedal och H. Grahn, "Ekvivalent och effektiv stråldos via inandning. Stråldoser via inhalation av fissionsprodukter från fission av Uran-235 motsvarande 100 kt trotyl på avståndet 130 km (FOI-R--4969--SE)," FOI, 2020.
- [28] J. H. Harley, "Plutonium in the Environment - A Review," *J. Radiat. Res.*, vol. 21, pp. 83-104, 1980.
- [29] A. Cauquoin, P. Jean-Baptiste, C. Risi, É. Fourré och A. Landais, "Modeling the global bomb tritium transient signal with AGCM LMDZ-iso: A method to evaluate aspects of the hydrological cycle," *J. Geophys. Res.: Atmos.*, vol. 121, 2016.
- [30] L. Björklund och M. Goliath, "Kärnladdningars skadeverkningar - beräkningsprogram med instruktion FOI-R--2741--SE," FOI, Stockholm, 2009.
- [31] Strålsäkerhetsmyndigheten, "Rapport 2019:11 Behov av personsanering för allmänheten i samband med en svensk kärnkraftsolycka," 2019.
- [32] Statens offentliga utredningar, "SOU 2022:57 Ett stärkt skydd för civilbefolkningen vid höjd beredskap," 2022.
- [33] Strålsäkerhetsmyndigheten, "Regionala strålningsmätningar i samband med en svensk kärnkraftsolycka (SSM2020-4331-23)," 2022.
- [34] Internationella strålskyddskommissionen (ICRP), "Publication 101a - Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public," 2006.



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

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

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

©Strålsäkerhetsmyndigheten