



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

2017:27

Översyn av beredskapszoner
Bilaga 2 – Spridnings- och dosberäkningar



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

2017:27

Översyn av beredskapszoner
Bilaga 2 – Spridnings- och dosberäkningar

Datum: Oktober 2017

Rapportnummer: 2017:27 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Innehåll

1. Inledning	4
2. Atmosfäriska spridningsberäkningar	5
2.1. Meteorologisk information	6
2.2. Meteorologiska grunddata	7
2.2.1. HIRLAM G05.....	8
2.2.2. HIRLAM E05.....	8
2.2.3. Sammanställning av vindrosor	8
2.3. Spridningsmodeller	10
2.4. Källterm.....	10
3. Beräkning av stråldos	12
3.1. Molndos	12
3.2. Markdos.....	13
3.3. Inandningsdos.....	14
3.4. Dos till sköldkörteln.....	14
3.5. Total effektiv dos.....	14
3.6. Beräkning av stråldoser för allvarliga deterministiska effekter..	15
4. Beräkningsförutsättningar	17
4.1. Konfiguration av beräkningsområde	18
4.2. Meteorologiska beräkningsfall.....	19
4.3. Känslighetsstudier	19
5. Statistisk databehandling	21
5.1. Beräkning av maximala avstånd	21
5.2. Kumulativa frekvensfördelningar.....	21
5.2.1. Intervall.....	21
5.3. Klassificering av datapunkter.....	22
5.3.1. Nollor.....	22
5.3.2. Samtliga datapunkter.....	22
5.3.3. Avstånd på fastlandet	22
5.3.4. Avstånd utanför fastlandet	23
5.4. Medelvärde och osäkerheter.....	23
5.5. Exempel på analysmetoder.....	24
5.6. Val av analysmetod.....	26
6. Parameterval	27
6.1. Meteorologiska data	27
6.2. Parametrisering av RIMPUFF	28
6.3. Doskoefficienter för RIMPUFF	30
6.3.1. Molndos	30
6.3.2. Markdos	30
6.3.3. Inandningsdos	31
6.4. Parametrisering av PIGLET	32
6.5. Doskoefficienter för PIGLET	33
Referenser	35

1. Inledning

Denna bilaga utgör en del av rapporten *Översyn av beredskapszoner*. I bilagan beskrivs de atmosfäriska spridnings- och dosberäkningsmodeller, RIMPUFF och PIGLET, som har använts för att bedöma utsträckning av de områden som bör omfattas av beredskapsplaneringen. I analyserna används historiska meteorologiska data från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) framtagna med hjälp av en regional prognosmodell, HIRLAM.

Spridnings- och dosberäkningar har genomförts för samtliga dimensionerande händelser vid anläggningar i hotkategori I och II. För varje beräkningsfall har ett utsläpp i enlighet med vald källterm använts. Beräkningsresultaten visar erhållen stråldos i beräkningsområdet kring utsläppspunkten baserat på luftkoncentration och markbeläggning av de radioaktiva ämnena. Dessa resultat jämförs med doskriterier för olika skyddsåtgärder (utrymning, inomhusvistelse, intag av jodtablett) samt åtgärdsnivåer för olika skyddsåtgärder (utrymning på grund av hög markbeläggning, sanering, livsmedelsåtgärder). Det eftersökta resultatet för varje beräkningskriterium är det största avstånd från utsläppspunkten till en punkt där kriteriet överskrids.

En kort beskrivning av spridningsmodellerna, utsläppet (källtermen), de tidsintervall och beräkningsområden som används redovisas. Dessutom presenteras vilka stråldoser som behandlas och hur dessa beräknas. I bilagan beskrivs även hur den statistiska bearbetningen av resultaten för beräkningsfallen görs. Slutligen finns en kort sammanställning av valda parametervärden till modellerna.

2. Atmosfäriska spridningsberäkningar

Syftet med att utföra atmosfäriska spridningsberäkningar är att erhålla information om hur radioaktiva ämnen, frigjorda till atmosfären via en känd eller uppskattad process från en utsläppskälla, sprids i den omgivande atmosfären via fysikaliska processer, för att slutligen deponera på marken och därigenom ge upphov till en markbeläggning av radioaktiva ämnen. Med kännedom om hur dessa ämnen uppträder i atmosfären och som deponerad aktivitet på marken, kan de stråldoser som aktiviteten kan ge upphov till beräknas.

Resultatet av spridningsberäkningarna uttrycks vanligen i form av luftaktivitet, tidsintegrerad luftaktivitet och markdeponerad aktivitet, detta per nuklid och som en funktion av tid och rum. Ur dessa storheter härleds sedan dos- och dosratrelaterade storheter med hjälp av modeller. Beroende på modell kan stråldoser på såväl kort som lång sikt beräknas. Till de förra hör doser erhållna som ett resultat av exponering för extern strålning från passage av den radioaktiva plymen¹, till de senare hör markbeläggning av radioaktiva ämnen efter det att plymen har passerat samt dos från inandning av nuklider, vilka upptas i kroppen för att senare sönderfalla och därigenom ge bidrag till stråldos även sedan den externa exponeringen upphört.

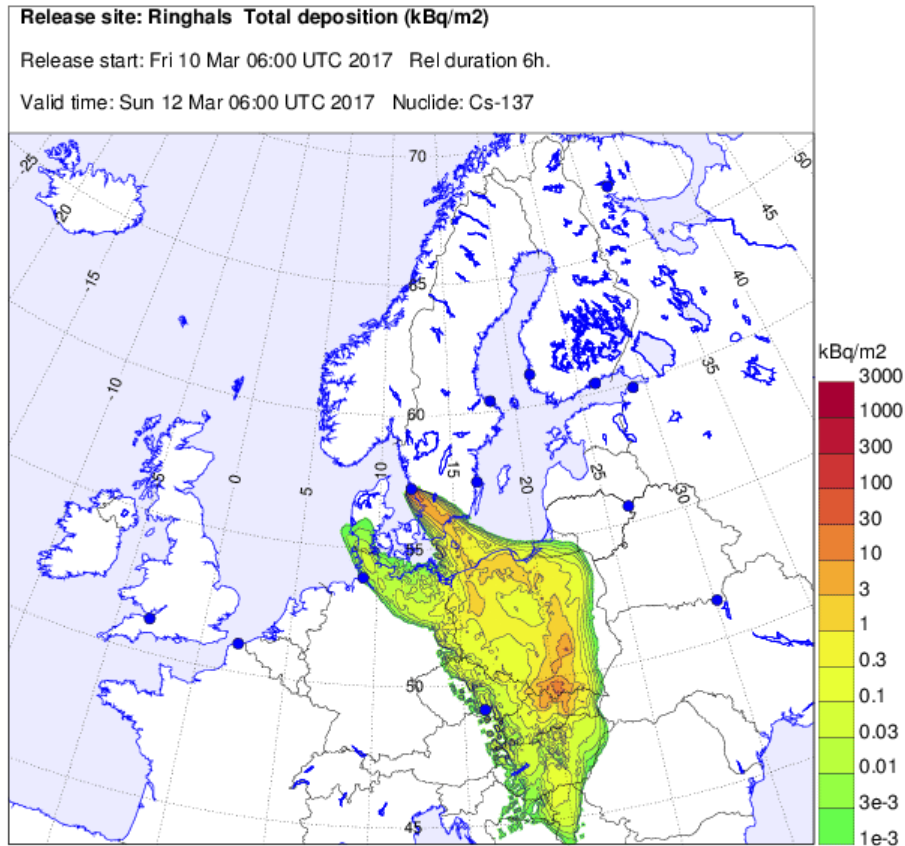
Slutligen kan den information spridningsberäkningarna ger avseende markbeläggning även användas för att beräkna långsiktiga effekter av överföring av aktivitet till foder- och födoämneskedjan.

Atmosfäriska spridningsberäkningar används vanligen för att erhålla information om vilket geografiskt område som kan beröras av ett utsläpp från en given källa vid en given tidpunkt, samt i vilken utsträckning och under vilka tidsförhållanden påverkan kan ske. Resultaten presenteras normalt i någon form av geografiskt kontext, exempelvis spridningsplymer på en karta utvisande en eller flera aktivitets- eller dosrelaterade storheter som funktion av tiden (se Figur 1).

I detta arbete har emellertid frågeställningarna varit något annorlunda. I syfte att kunna fastställa utsträckningen på de områden som bör omfattas av beredningsplanering har det funnits ett behov av att analysera på vilket avstånd från en given utsläppspunkt ett i förväg fastställt doskriterium eller åtgärdsnivå överskrids. Ett doskriterium kan vara en erhållen dos till ett visst organ och för en särskild åldersgrupp och en åtgärdsnivå kan vara av en viss storlek på markbeläggning av en enstaka, eller en kombination av flera, nuklider. I detta fall är därmed de absoluta tidsförhållandena inte av intresse, ej heller den specifika utsträckningen av det geografiska området som berörs. Däremot kommer det maximala avstånd på vilket ett givet doskriterium eller åtgärdsnivå överskrids att bero av de meteorologiska förutsättningar som råder under den tid utsläppet sker och under den tid som aktiviteten sprids i

¹ Plym är ett bildligt uttryck för att beskriva det moln av radioaktiva ämnen som sprids i luften vid ett utsläpp.

atmosfären. Det finns därmed ett behov av att genomföra ett stort antal spridningsberäkningar för varje given utsläppspunkt i syfte att undersöka på vilka avstånd de studerade kriterierna överskrids under varierande meteorologiska förhållanden.



Figur 1. Exempel på resultat från en atmosfärisk spridningsberäkning. Bilden bygger på ett fiktivt utsläpp av Cs-137 från Ringhals kärnkraftverk och visar den resulterande markbeläggning, uttryckt i kilobecquerel per kvadratmeter (kBq/m²) detta utsläpp skulle ge upphov till 48 timmar efter utsläppsstart. Beräkningen är utförd med hjälp av SMHI:s MATCH-modell.

2.1. Meteorologisk information

Atmosfäriska spridningsberäkningar förutsätter tillgång till meteorologisk information om tillståndet i atmosfären som funktion av de horisontella koordinaterna, höjden över marken och tiden. De beräkningar som genomförts har använt historiska meteorologiska data i numerisk form extraherade ur bandarkiv vid SMHI. Informationen, vilken ursprungligen lagras i GRIB-format, har genomgått extrahering, verifiering samt formatkonvertering till av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) efterfrågat ARGOS-HIRLAM-format samt därefter levererats till SSM.

Materialet representerar en period om cirka tio år (februari 2006 – februari 2016) och utgörs av 2,58 terabyte (TB) levererat data. Serien innefattar vissa, huvudsakligen kortare, perioder där data av tekniska orsaker saknas.

2.2. Meteorologiska grunddata

Den meteorologiska informationen bygger på två olika prognosmodeller, HIRLAM G05 respektive HIRLAM E05, vilka använts i produktionen vid SMHI under den aktuella perioden. Ur dessa modeller har en geografisk delmängd extraherats, omfattande det aktuella beräkningsområdet.

De båda prognosmodellerna skiljer sig något avseende parametrering. Dock har de samma horisontella upplösning (ca 5,5 km). Vidare har det geografiska utsnittet skett på så sätt att data i HIRLAM G05 respektive HIRLAM E05 täcker samma geografiska område enligt Figur 2.



Figur 2. Geografiskt område för meteorologiskt data (HIRLAM G05 och E05)².

² De nordligaste delarna av Sverige omfattas inte av det meteorologiska underlaget. Då de beräkningar som utförts ej sträcker sig längre ut än maximalt 500 km från utsläppspunkten påverkar detta inte resultaten.

2.2.1. HIRLAM G05

Leveransen av HIRLAM G05 omfattar perioden februari 2006 fram till juni 2012. Data omfattar två 12-timmarsprognoser per dygn, med en meteorologisk analys 00 UTC³ och 12 UTC. Prognoserna har en upplösning i tiden om 3 timmar och innefattar 36 höjdnivåer från markytan upp till 4910 m.

2.2.2. HIRLAM E05

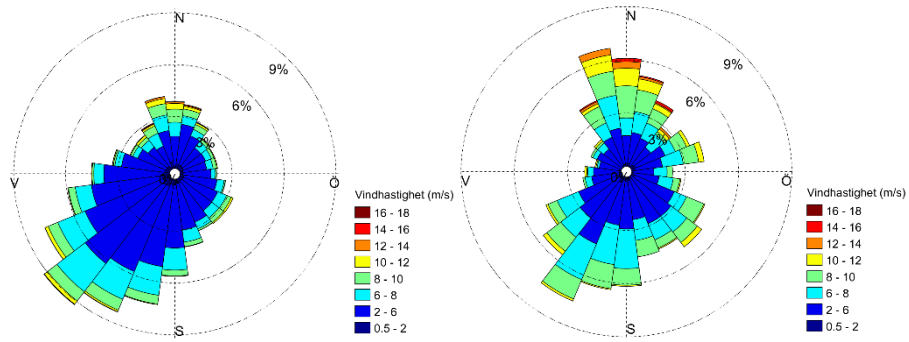
Leveransen av HIRLAM E05 omfattar perioden juni 2012 fram till februari 2016. Därefter upphörde SMHI:s arkivering av HIRLAM-data till förmån för den nyare, mer högupplösta modellen HARMONIE. Data omfattar fyra 6-timmarsprognoser per dygn, med en meteorologisk analys 00, 06, 12 och 18 UTC. Prognoserna har en upplösning i tiden om 3 timmar och innefattar 42 höjdnivåer från markytan upp till 5260 m.

2.2.3. Sammanställning av vindrosor

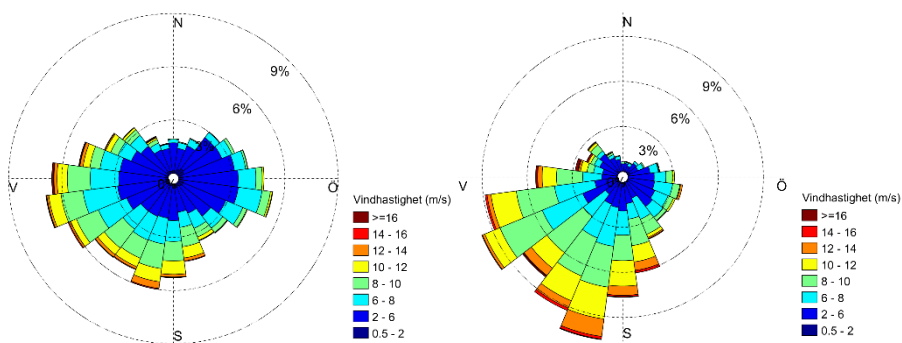
En vindros ger en överblick över dominerade vindriktningar och vindhastigheter på en specifik plats. Vindriktning anger den riktning varifrån vinden blåser. Vindrosor har härletts för den datapunkt i det meteorologiska grunddatat (HIRLAM E05) som ligger närmast respektive anläggning. Diagram för kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals, Oskarshamn (representerar även Centralt mellanlager för använt kärnbränsle, Clab) samt bränslefabriken i Västerås finns redovisade i figurerna 3-6. Vindrosen visar vindriktningsförhållandet på 20 meters höjd fördelat på 24 vindriktningar och 8 vindhastighetsintervall. Vindstill eller svag vind (lägre än 0,5 m/s) utelämnas i vindrosen då det är svårt att bedöma vindriktningen i dessa fall. Dessa förhållanden utgör 0,2 procent av väderfallen eller mindre. Då markbeläggningen av radioaktiva ämnen påverkas kraftigt av nederbörd är det även intressant att studera vilka vindriktningar som dominerar vid nederbörd (här är gränsen för nederbörd satt till 0,2 mm/h nederbörd).

SSM har vid förslag till utformning av beredskapszoner inte tagit hänsyn till förhärskande vindriktning, dvs. samma ungefärliga avstånd har tillämpats som grund för utformningen i alla riktningar på fastlandet. Förutsägelser om sammanlagd sannolikhet för ett visst utfall, t.ex. att en allvarlig kärnkraftsolycka inträffar just under vissa väderförhållanden, är så pass osäkra att de inte bör ligga till grund för en kortare eller längre utsträckning i vissa riktningar kring de berörda anläggningarna. Figurerna sammanfattar dock de vindförhållanden vid utsläppspunkterna som SSM använt i spridnings- och dosberäkningarna. Figurerna illustrerar även att starkare vindar förekommer mer frekvent vid kusten och att de förhärskande vindriktningarna kan förändras vid nederbörd.

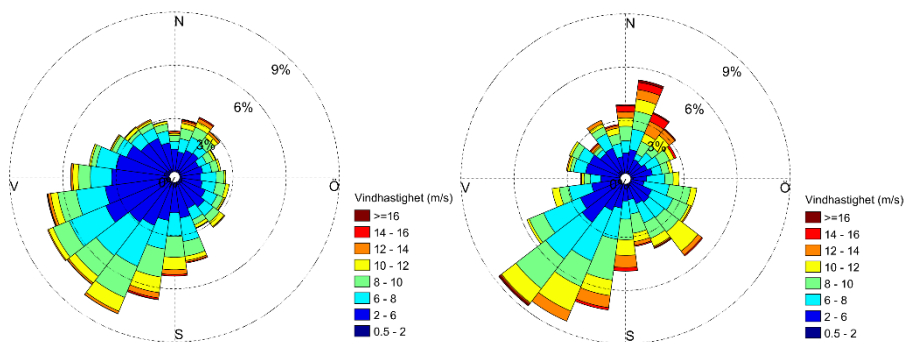
³ Coordinated Universal Time



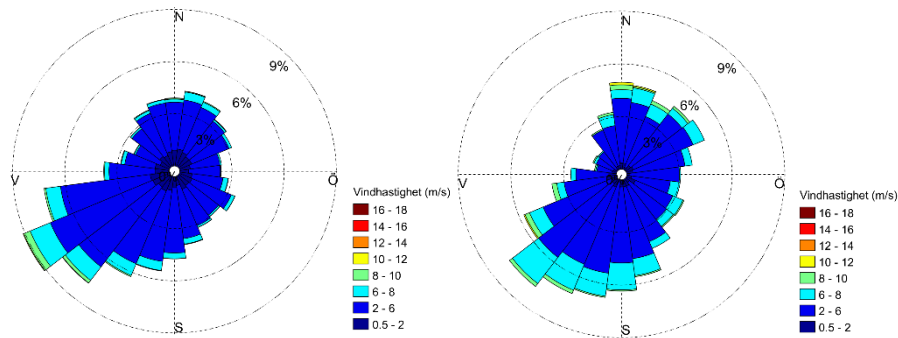
Figur 3. Vindros i närheten av Forsmarks kärnkraftverk, totalt (vänster) eller vid nederbörd (höger). Svaga vindar redovisas ej i figurerna.



Figur 4. Vindros i närheten av Ringhals kärnkraftverk, totalt (vänster) eller vid nederbörd (höger). Svaga vindar redovisas ej i figurerna.



Figur 5. Vindros i närheten av Oskarshamns kärnkraftverk och Clab, totalt (vänster) eller vid nederbörd (höger). Svaga vindar redovisas ej i figurerna.



Figur 6. Vindros i närheten av bränslefabriken i Västerås, totalt (vänster) eller vid nederbörd (höger). Svaga vindar redovisas ej i figurerna.

2.3. Spridningsmodeller

Den modell som huvudsakligen använts i detta arbete är den Gaussiska puffmodellen RIMPUFF⁴, vilken utvecklats av Risø National Laboratory (numera DTU Nutech), Danmark [1], [2]. Modellen tillhör gruppen Lagrangeska mesoskaliga atmosfäriska puffmodeller för spridning och är designad för att beräkna luftkoncentration och markbeläggning resulterande från atmosfärisk spridning av radioaktivt material i gas- eller aerosolform, samt de stråldoser som detta ger upphov till.

Modellen innefattar inte någon analys av atmosfärskemiska processer, ej heller hanteras förlopp relaterade till aerosoldynamik. Modellen tar däremot hänsyn till sönderfall av modernuklider och uppbyggnad av dotternuklider.

RIMPUFF är en väletablerad modell som har använts under många år i ett antal länder i Europa. Vidare ingår modellen i flera av de besluts- och analysstödsystem som används av strålskyddsmyndigheter inom och utom Europa. I detta arbete har RIMPUFF använts inom ramarna för besluts- och analysstödsystemet ARGOS [3].

Vid beräkning av allvarliga deterministiska effekter, vilket förutsätter beräkning av doser till specifika organ och till foster, har spridnings- och dosberäkningsmodellen PIGLET använts [4]. Skälet till detta är att RIMPUFF i den implementation inom ARGOS som finns vid SSM ej beräknar organdoser, med undantag för intecknad ekvivalent dos till sköldkörtel. Spridningsdelen i PIGLET utgörs av en probabilistisk Lagrangesk partikelmodell, i vilken utsläppet simuleras av ett stort antal utsläppta modellpartiklar vilka antas följa banor som bestäms av den förhärskande vindriktningen och luftens turbulens.

2.4. Källterm

Begreppet källterm betecknar i detta sammanhang en beskrivning av det radioaktiva utsläppet till atmosfären. Till källtermsbeskrivningen hör

⁴ Risø Mesoscale PUFF Model

sammansättning och aktivitet hos i utsläppet ingående nuklider, de tidsförhållanden under vilka aktiviteten släpps ut samt, i vissa fall, kemisk form. Till källtermen räknas också information om utsläppshöjd/er och eventuellt värmeinnehåll. Vidare kan källtermen också innehålla en beskrivning av partikelstorleksfördelning och partikeldensitet.

I detta arbete har absoluta källtermer använts, vilka beskriver utsläppt aktivitet per nuklid. För modellering av utsläpp från reaktorer används annars i många sammanhang relativa källtermer, vilka beskriver utsläppet i termer av andelar av härdinventariet för ämnen grupperade utgående från flyktighetsegenskaper.

Spridningsmodelleringen har i allmänhet skett under antagandet att alla i källtermen ingående nuklider uppträder antingen i form av gaser (ädelgaser och elementär jod) eller i form av aerosoler, varvid en aerosoldiameter om 1 μm och en partikeldensitet om 1 g/cm^3 antagits⁵.

Jodisotoper särbehandlas i källtermen. I det generella fallet uppträder jod i tre distinkta former i utsläppet: i elementär gasform (I_2), i organisk form (vanligen metyljodid) eller i aerosolform, vilket starkt påverkar möjligheten till utsläppsbegränsning via filtrering. Vidare uppvisar de tre formerna olika egenskaper avseende spridning i atmosfären och deposition på marken. Källtermen innehåller för varje utsläppsintervall en beskrivning av hur stor andel av joden som avgår i elementär, organisk respektive aerosol form. Denna beskrivning antas vara generell för samtliga i källtermen ingående jodisotoper.

Utsläppet antas ske på en viss utsläppshöjd i en definierad geografisk punkt som kan antas representera utsläppspunkten. I beräkningarna antas inget plymlyft med anledning av värmeinnehåll (termiskt lyft) eller vertikal utflödehastighet (mekaniskt lyft). Beräkningar av plymlyft är behäftade med stora osäkerheter. För att inte införa en eventuell underskattning av de beräknade doserna har det därför konservativt antagits att inget plymlyft förekommer.

Den representativa källtermen för respektive dimensionerande händelse diskuteras mer ingående i huvudrapporten.

⁵ För vissa specifika utsläppsfall har andra partikelstorlekar och –densiteter antagits. Hit hör händelsen med brand med utsläpp av uranpulver vid bränslefabriken i Västerås, där större partikelstorlekar kan förväntas.

3. Beräkning av stråldos

Joniserande strålning kan ge upphov till olika typer av effekter beroende på erhållen stråldos. Om stråldosen är tillräcklig hög uppstår *deterministiska effekter*. Exempel på dessa effekter är hudrodnad, sterilitet och fosterskador. Stråldoser under dessa nivåer kan fortfarande ge upphov till skador, men i detta fall styr stråldosen endast sannolikheten för att skador ska uppstå (*stokastiska effekter*). Cancer och ärftliga effekter hör till den senare typen.

Strålskyddet ska optimeras så att *allvarliga deterministiska effekter* undviks och risken för cancer och ärftliga effekter minskas så långt det är möjligt och rimligt. För uppkomsten av allvarliga deterministiska effekter används olika *tröskeldoser* som är valda ur ett strålskyddsperspektiv, dvs. baserade på de mest strålningskänsliga individerna ur en befolkning.

Effektiv dos används när risken för stokastiska effekter studeras. I den effektiva dosen summeras dosbidrag till olika organ eller vävnader till en helkroppsdos och kan därmed jämföras med en referensnivå eller doskriterium. Detta oavsett radioaktivt ämne (energi och strålslag), exponeringsväg (intag eller externt) eller olika organ eller vävnaders känslighet för exponering av joniserande strålning. Dosen till ett specifikt organ eller vävnad kallas *ekvivalent dos*.

De typer av stråldoser som analyserats utgörs av effektiv dos och dos till vissa specifika organ såsom sköldkörteln vars totala dos kan härröra från ett antal exponeringsvägar. Den externa exponeringen som bidrar till den effektiva dosen är i beräkningarna *molndos*, då radioaktiva ämnen förekommer i luften, och *markdos* från eventuell radioaktiv markbeläggning. Den interna exponeringen som bidrar till den effektiva dosen i beräkningarna är *inandningsdos* då radioaktiva ämnen i luften andats in. Den sistnämnda är en *inteknad effektiv dos*, vilket indikerar att stråldosen integreras över den tid som nukliden finns kvar i kroppen, där även dosbidrag från eventuella sönderfallsprodukter ingår.

Alla dosberäkningar refererar till en oskyddad person ur allmänheten under en period om sju dygn efter händelsestart.

Nedan beskrivs närmare de olika typer av doser som behandlats, hur dessa beräknats samt hur de förhåller sig till varandra. Beskrivningen avser, om inget annat anges, beräkningar för stokastiska effekter med stöd av ARGOS/RIMPUFF. I det sista avsnittet redovisas en kortare beskrivning av beräkningar för allvarliga deterministiska effekter gjorda med PIGLET.

3.1. Molndos

Molndosen utgörs av den externdos som härrör från gammastrålning från den passerande plymen. Denna dos erhålls genom att för varje nuklid beräkna den sammanlagda gammaenergiavgången per sönderfall i fyra energiintervaller. Intervaller samt exempel för nukliden Co-60 återfinns i Tabell 1.

Tabell 1. Exempel på parametrar för beräkning av molndos från nukliden Co-60. I intervall 3 återfinns summan av energierna för de två gammafotonerna (1,17 respektive 1,33 MeV) multiplicerade med sannolikheten för fotonemission per sönderfall (1,0).

Intervall	Co-60		Energiavgång (MeV)
	Nedre Intervallgräns (MeV)	Övre Intervallgräns (MeV)	
Intervall 1		0,35	~0
Intervall 2	0,35	0,75	0
Intervall 3	0,75	1,5	2,5
Intervall 4	1,5		~0

Den dosrat som vid varje given tidpunkt finns i varje given punkt inom beräkningsområdet erhålls genom att integrera bidraget från den aktivitet som vid ett givet tillfälle befinner sig i atmosfären. Detta sker genom att summera bidragen från de puffar som befinner sig inom beräkningsområdet, med hänsyn tagen till avstånd till puffcentra och med beaktande av spridnings- och attenueringseffekter inom de fyra energintervallen. Molndosen erhålls sedan genom en successiv integrering av dosraten över tiden.

De faktorer som använts för energiavgången i respektive energintervall beskrivs närmare i avsnitt 6.3.1.

Molndosen har beräknats oberoende av åldersgrupp och utgör en delkomponent av den totala effektiva dosen. Bidraget från molndosen till den totala effektiva dosen upphör när plymen passerat.

3.2. Markdos

Markdosen utgörs av den externdos som härrör från gammastrålning från de nuklider som deponerat på marken. Detta dosbidrag erhålls genom att för varje nuklid beräkna den dosrat som härrör från den deponerade aktiviteten. Dosraten integreras därefter över tiden och summeras slutligen för alla nuklider. I denna beräkning förutsätts att den deponerade aktiviteten kan approximeras med en oändlig ytbeläggning.

De faktorer som använts för att omvandla deponerad aktivitet till dosrat beskrivs närmare i avsnitt 6.3.2, liksom de överväganden som gjorts avseende nedträngning av de radioaktiva ämnena i marken.

Markdosen har beräknats oberoende av åldersgrupp och utgör en delkomponent av den totala effektiva dosen. Den dos som erhålls från markbeläggningen fortsätter att tillväxa så länge som aktivitet kvarliggert och exponeringen varar.

3.3. Inandningsdos

Inandningsdosen utgörs av den inandningsdosen som härrör från aktivitet som inandas och därefter sönderfaller och/eller tas upp av kroppen och vidaretransporteras ut i de olika organen. Som en följd av att aktiviteten i viss utsträckning kvarstannar i kroppen uttrycks denna dos som inandningsdos, då man beräknar vilket dosbidrag den aktivitet som inandats ger upphov till under en period av 50 år efter exponering (för barn gäller en integrationstid upp till 70 års ålder).

Dosen erhålls genom att för varje nuklid multiplicera den tidsintegrerade aktivitetskoncentrationen i det marknära luftskiktet med en antagen andningshastighet och därefter applicera en nuklidspecifik doskoefficient. Dosbidragen summeras därefter för samtliga nuklider.

De faktorer som använts för att omvandla tidsintegrerad luftaktivitet till dos beskrivs närmare i avsnitt 6.3.3.

Inandningsdosen har beräknats som funktion av åldersgrupp och utgör en delkomponent av den totala effektiva dosen. Den inandningsdos som erhålls i sin helhet under flympassagen bortsett från eventuellt tillkommande bidrag från resuspension.

3.4. Dos till sköldkörteln

Med sköldkörteldos avses här dos till sköldkörteln via inandning av radioaktiv jod. Sköldkörteldosen har härletts ur den effektiva dos som erhålls som ett resultat av inandning av de olika jodisotoperna med hänsyn tagen till de individuella dosbidragen för de olika jodformerna (organisk, elementär och aerosolform).

I ovanstående tillämpas normalt ett förenklat beräkningsförfarande för sköldkörteldos genom att en faktor 20 används för att multiplicera inandningsdosen från respektive jodisotop för att erhålla dosen till sköldkörteln⁶.

Sköldkörteldosen beräknas individuellt för respektive åldersgrupp genom användning av åldersgruppsberoende doskoefficienter och andningshastigheter.

3.5. Total effektiv dos

De komponenter som summeras till total effektiv dos utgörs av moln-, mark- och inandningsdos enligt de beskrivningar som givits ovan. Även det dosbidrag som härrör från direktstrålning från källan, exempelvis vid

⁶ Nuvarande doskoefficienter för allmänheten baseras på den Internationella strålskyddskommissionens rekommendationer i ICRP 60 [15]. Värnadsviktsfaktorn för sköldkörteln är således satt till 0,05 i enlighet med ICRP 60, och ej 0,04 i enlighet med ICRP 103.

kriticitetshändelser, är att betrakta som en komponent i den totala effektiva dosen. Detta dosbidrag har emellertid särbehandlats, se huvudrapporten.

Den totala effektiva dosen hänför sig till en given tidpunkt T efter utsläppsstart, och beskriver den dos som erhålls livsvarigt (in-tecknad dos) vid en oavbruten vistelse på den givna platsen fram till tiden T . Om den totala effektiva dosen beräknas för en tidpunkt efter det att plymen passerat och markdepositionen upphört kommer kvarvarande aktivitet på marken att fortsätta bidra med dos så länge som vistelsen fortsätter. Resuspension av på marken deponerad aktivitet skulle också kunna bidra till en ökning av den totala inandningsdosen. I detta arbete har resuspension dock ej behandlats eftersom det förutsätts ge upphov till en försumbar del av den totala effektiva dosen.

I huvudrapporten och dess bilagor används *effektiv dos* med betydelsen *total effektiv dos* genomgående.

3.6. Beräkning av stråldoser för allvarliga deterministiska effekter

Utöver de typer av dos som redovisats ovan har dos till röd benmärg, dos till embryo och dos till fostrets hjärna från de olika exponeringsvägarna beräknats för att identifiera eventuella förutsättningar för uppkomst av allvarliga deterministiska effekter. Då dessa beräkningar ej kan genomföras med den RIMPUFF-modell som i övrigt använts har istället PIGLET-modellen använts. I denna programvara kan organspecifika doskoefficienter ansättas för de olika exponeringsvägarna. Beräkningsmodulerna i programmet är till stora delar en anpassning av motsvarande moduler i programmet LENA [5].

Doser i PIGLET beräknas separat för de i källtermen angivna nukliderna. För jod genomförs separata beräkningar för jod i aerosolform, elementär jod och organisk jod.

Molndosen i PIGLET har beräknats utifrån de utsända partiklarnas uppehållstid i modellens tredimensionella rutnät. Vid beräkningen har doserna korrigerats för ändlig molnutsträckning.

Inandningsdosen i PIGLET beräknas utgående från den tidsintegrerade aktivitetskoncentrationen i det marknära luftskiktet, en antagen andningshastighet och doskoefficienter som ger dos per inandad aktivitetsmängd.

Markdosen i PIGLET beräknas genom att integrera dosraten från aktiviteten som ansamlats i markrutnätet från den tid depositionen sker fram till den integrationstid för vilken dosen ska beräknas. Hänsyn tas till avklingningen under transporten och efter depositionen. Deposition av aktivitet på marken beräknas i PIGLET så snart en partikel rör sig tillräckligt nära marken. I denna beräkning förutsätts att den deponerade aktiviteten kan approximeras

med en oändlig ytbeläggning. Hänsyn tas till effekter av successiv nedträngning, se avsnitt 6.5.

Vid beräkningarna tar PIGLET hänsyn till första generationens sönderfallsprodukter (dotternuklider) under transporten och efter depositionen, däremot inte till ytterligare sönderfall i en eventuell sönderfallskedja. Denna senare förenkling ger för de här aktuella beräkningarna försumbara effekter på de beräknade doserna.

För en närmare beskrivning av PIGLET se [4].

4. Beräkningsförutsättningar

Atmosfäriska spridningsberäkningar är krävande med avseende på beräkningskraft och lagringskapacitet, detta bland annat då dessa beräkningar baseras på numeriska väderdata, vilka beskriver atmosfärens tillstånd i de tre rumsdimensionerna och i tiden. Beräkningarna, vilka beroende på komplexiteten i källtermen och omfattningen av beräkningarna i tid och rum kan kräva många timmars beräkningstid per väderfall, ger upphov till resultat som även dessa kräver stor datalagringskapacitet då dessa innefattar stora mängder data innehållande luftkoncentration och markbeläggning som funktion av tid och rum per modellerad nuklid. Till detta kommer beräkningar av resulterande dosrater och doser, vilka lägger ytterligare dimensioner till arbetet med resultatbearbetning och datalagring.

I syfte att möjliggöra en analys av ett stort antal väder- och utsläppsfall har ett kriteriebaserat angreppssätt använts [6]. Detta har skett genom att fokusera på tre typer av resultat som kan härledas ur spridningsberäkningarna; total effektiv dos, dos till sköldkörteln samt deposition av aktivitet på marken. För varje efterfrågad storhet har ett eller flera kriterier uppställts i form av ett värde på dosen (Sv) eller markbeläggningen (Bq/m^2), den senare avseende en enskild nuklid eller summan av ett antal nuklider. Ett exempel på kriterier återfinns i Tabell 2.

Resultatet av varje enskild spridningsmodellering har därefter analyserats utgående från varje enskilt kriterium. För varje punkt inom beräkningsområdet har dos- och markbeläggningvärden beräknats. Om det erhållna värdet överstigit det givna kriteriet har information om punkten registrerats. Efter att hela beräkningsområdet analyserats har endast information om den punkt som befunnit sig på störst avstånd från utsläppspunkten, och för vilken kriteriet uppnåtts, bevarats. För denna punkt har information om koordinater, avstånd och bäring till utsläppspunkten, beräknat värde m.m. registrerats och lagrats för vidare bearbetning.

I ovanstående analys har hänsyn tagits enbart till datapunkter över land. Skälet till detta är att de processer som styr den atmosfäriska spridningen över stora vattenytor i allmänhet medför att aktiviteten förs ut till större avstånd från utsläppspunkten jämfört med spridning över land. Om inte detta faktum beaktats skulle det medföra att de avstånd för vilka kriterierna överskrids skulle bli längre, med en tendens till dominans av spridning över havet för kustnära anläggningar. Då detta är mindre relevant för etableringen av beredskapszoner har dessa resultat således filterats bort i den slutliga analysen. Datapunkter som faller över öar (exempelvis Öland), har dock beaktats.

För en närmare beskrivning av analysförfarandet se kapitel 5.

Tabell 2. Exempel på beräkningskriterier.

Storhet	Enhet	Åldersgrupp	Integrations-tid	Nuklider
Total effektiv dos	Sv	1-årigt barn	7 dygn	Samtliga
Total effektiv dos	Sv	Vuxen	7 dygn	Samtliga
Sköldkörteldos	Sv	1-årigt barn	Livslång	Jodisotoper
Sköldkörteldos	Sv	Vuxen	Livslång	Jodisotoper
Markbeläggning	Bq/m ²			Co-(58,60)
Markbeläggning	Bq/m ²			Co-60
Markbeläggning	Bq/m ²			Sr-(89,90)
Markbeläggning	Bq/m ²			Sr-90
Markbeläggning	Bq/m ²			I-131
Markbeläggning	Bq/m ²			Cs-(134,137)
Markbeläggning	Bq/m ²			Cs-(134,136,137)
Markbeläggning	Bq/m ²			U-(234,235,238)
Markbeläggning	Bq/m ²			Cm-242

Det slutliga resultatet av en spridningsmodellering utgörs således i detta fall av en, och endast en, datapost per kriterium, representerande den geografiska punkt som befinner sig längst bort från utsläppspunkten där det givna kriteriet överskrids, detta givet att det specifika kriteriet uppnås inom beräkningsområdet. Ingen information om plymens eller beläggningens specifika utsträckning i tid och rum registreras för den vidare bearbetningen. På så sätt reduceras de datavolymer som behöver lagras för den vidare bearbetningen till ett minimum, något som är helt nödvändigt då ett stort antal spridningsmodelleringar behöver utföras för att belysa effekterna av olika utsläpps- och väderfall.

En närmare beskrivning av de specifika kriterier som uppställts för respektive beräkningsfall återfinns i huvudrapporten.

4.1. Konfiguration av beräkningsområde

Spridningsberäkningar med stöd av modellen RIMPUFF har genomförts ut till ett avstånd om maximalt 500 km från utsläppspunkten. Detta avstånd kan antas utgöra en bortre gräns för när modellformuleringen i RIMPUFF kan anses vara tillämplig. Emellertid föreligger en beräkningsteknisk begränsning avseende hur stort modellområde som kan hanteras i relation till geografisk upplösning i resultaten. I syfte att erhålla högsta möjliga precision i analyserna har således för varje beräkningsfall ett antal modelleringar genomförts med successivt ökande modelleringsavstånd och grövre cellstorlek (se Tabell 3). De erhållna resultaten har därefter sambearbetats genom att för varje doskriterium och åtgärdsnivå identifiera vilken beräkningskonfiguration som erbjuder den högsta geografiska upplösningen utan att de erhållna maximala kriterieavstånden faller på randen av, eller utanför, beräkningsområdet.

Tabell 3. Konfigurering av beräkningsområden.

Konfiguration	Parametrar		
	Cellstorlek (m)	Beräkningsradie (km)	Antal celler
B0	50	5	4,0E+04
B1	100	20	1,6E+05
B15	250	50	1,6E+05
B2	1000	150	9,0E+04
B25	2000	300	9,0E+04
B3	5000	500	4,0E+04

Motsvarande beräkningar med den partikelbaserade PIGLET-modellen har genomgående använt ett kvadratisk rutnät om 201*201 celler, med en cellstorlek om 100*100 m. Cellstorleken baseras på en avvägning mellan upplösning och statistisk osäkerhet. Större celler skulle medföra en reduktion av den statistiska osäkerheten då detta skulle medföra fler partiklar per cell, men skulle samtidigt medföra en systematisk underskattning av aktivitet på korta avstånd. Mindre celler skulle medföra sämre statistik utan att nödvändigtvis medföra korrektare värden på mycket korta avstånd.

4.2. Meteorologiska beräkningsfall

För att belysa effekter under de varierande meteorologiska förhållanden som kan förekomma har ett stort antal spridningsberäkningar genomförts. Beräkningarna har skett för respektive anläggning och dimensionerande händelse, och med varierande utsläppstidpunkter fördelade över en tioårsperiod. I syfte att fånga upp såväl dygnsmässiga som årstidsmässiga variationer har beräkningar skett under antagande om ett utsläpp var 26:e timme under perioden. Varje händelse har därefter modellerats med RIMPUFF-modellen under en period om 72 timmar, dock längst till dess att all luftburen aktivitet lämnat beräkningsområdet.

I PIGLET-fallet har utsläpp med start var 21:a timme under perioden initierats och därefter har händelsen modellerats under en period av 72 timmar.

4.3. Känslighetsstudier

Det resultat som erhålls genom atmosfärisk spridningsmodellering är beroende såväl av vilken modell som används som parametersättningen för den givna modellen. Specifikt gäller att modelleringstiderna ökar i takt med att komplexiteten i de modellerade processerna ökar. I en partikelbaserad modell såsom PIGLET minskar den statistiska osäkerheten med ett ökat antal modellpartiklar, samtidigt som beräkningstiden ökar. I den typ av puffmodeller som RIMPUFF tillhör ökar beräkningstiden med ett ökat antal modellpuffar. Vidare påverkas resultaten av vilka antaganden som görs avseende spridnings- och depositionsparametrar m.m.

Detta arbete har inte medgivit, eller syftat till, en närmare analys av påverkan på beräkningsresultaten av variationer i de enskilda modellparametrarna. Istället har parametriseringen skett utgående från rimliga parameterintervall med viss hänsyn tagen till beräkningsprestanda.

Ett specifikt parameterintervall avseende RIMPUFF har dock studerats närmare, då detta val potentiellt skulle kunna påverka resultaten i en icke försumbar utsträckning. I det inledande utredningsarbetet kunde det konstateras att en aktivering av möjligheten för beräkningspuffar att genomgå trifurkation⁷ medförde en dramatisk påverkan på beräkningstider, då denna funktion resulterar i ett väsentligt större antal puffar inom beräkningsområdet, specifikt vid modellering på större avstånd från utsläppspunkten och under längre tider. Således inaktiverades denna funktion i de följande beräkningarna.

I syfte att utröna hur valet att ej ta hänsyn till trifurkation påverkar de beräknade avstånden för de valda kriterierna har ett större antal beräkningar under en period om tre år genomförts för ett specifikt utsläppsfall med trifurkationen aktiverad. Beräkningarna har fokuserat på de kriterier som uppnås på större avstånd, då betydelsen av denna parametersättning kan antas vara av störst betydelse på större avstånd från utsläppspunkten. Resultaten indikerar att de beräknade avstånden för dessa kriterier reduceras med cirka 10 procent med trifurkation aktiverad, vilket medför att utredningens resultat i detta hänseende tenderar till att vara något konservativa.

⁷ Trifurkation betyder att en enskild puff delas upp i tre puffar i höjdlid och är den process genom vilken vindskjuvning (plötsliga förändringar i vindriktning, och/eller vindhastighet under en relativ kort sträcka) omhändertas i RIMPUFF-modellen.

5. Statistisk databehandling

5.1. Beräkning av maximala avstånd

Resultatet från spridnings- och dosberäkningarna ges i form av ett största avstånd där ett doskriterium eller en åtgärdsnivå har överskridits. Avstånden sammanställs därefter i kumulativa histogram. Varje histogram presenterar för ett visst doskriterium eller en viss åtgärdsnivå andelen väderfall där kriteriet underskrids som funktion av avståndet. Medelvärde och osäkerheten där en given andel av de analyserade väderfallen överskrider ett bestämt kriterium har skattats genom statistisk dataanalys. Analysmetoden finns beskriven i detalj i detta kapitel. De avstånd som enligt ovanstående analys innehåller en viss del av alla väderfall (70, 80 eller 90 procent) ligger till grund för föreslagen utsträckning av beredskapszoner och planeringsavstånd. Hur många väderfall som beaktas i förslagen för de olika verksamheterna som ska ha beredskapszoner beskrivs i huvudrapporten.

5.2. Kumulativa frekvensfördelningar

Resultat från spridnings- och dosberäkningarna erhålls i form av en resultatrad med koordinater till en punkt längst bort från utsläppspunkten där ett givet doskriterium har överskridits. Ett sätt att sammanställa de största avstånden där ett givet doskriterium eller åtgärdsnivå överskrids är att sammanställa avståndsfördelningen och presentera denna i form av ett kumulativt histogram. Om det statistiska underlaget är tillräckligt bra, det vill säga om spridningsberäkningarna har tagit hänsyn till tillräckligt många väderfall, ger den kumulativa avståndsfördelningen information om det avstånd inom vilket en viss andel av alla observationer förväntas hamna, den s.k. percentilen. Ett histogram beräknas således per doskriterium eller åtgärdsnivå kopplat till en viss skyddsåtgärd och ur varje histogram går percentilen på en viss nivå att utläsa. Exempelvis ger den åttionde percentilen, P_{80} , information om det största avstånd där ett visst doskriterium eller en åtgärdsnivå överskrids, om 80 procent av väderfallen beaktas.

5.2.1. Intervall

Vid beräkning av histogram behöver ingående data delas in i ett antal intervall (eng. *bins*). Samtliga histogram är uppdelade i 30 lika stora intervall, oavsett skalan på de största avstånden. Fler intervall möjliggör en högre upplösning vid beräkning av percentiler men alltför många intervall i förhållande till underliggande data riskerar att ge upphov till större osäkerheter i percentiluppskattningen då datadensiteten riskerar att bli för låg i vissa intervall. SSM bedömer att 30 intervall erbjuder en tillräcklig detaljeringsnivå utan att datadensiteten inom varje intervall blir för låg.

5.3. Klassificering av datapunkter

5.3.1. Nollor

I de fall ett visst doskriterium aldrig överskrids i en spridnings- eller dosberäkning genereras ingen resultatrad. När kriteriet inte överskrids behöver detta återspeglas i det kumulativa histogrammet genom att en nolla läggs till. En nolla innebär i denna kontext en rad med det största avståndet 0 km. I spridningsberäkningarna beaktas enbart resultat där ett kriterium överskrids över land. En enskild spridningsberäkning med ett utsläpp som går direkt ut över havet och sedan leder till att ett visst kriterium överskrids en bit ut på öppet vatten genererar således ingen resultatrad. Även i detta fall behöver bortfallet representeras av en nolla i histogrammet. Antalet nollor, n_z , som på detta sätt läggs till i histogrammet beskrivs av ekvationen

$$n_z = n - n_r$$

där n är det totala antalet spridningsberäkningar och n_r är antalet spridningsberäkningar där kriteriet överskreds och därmed gav upphov till ett största avstånd.

Om dataanalysen syftar till att fastställa percentiler för största avstånd in över fastlandet behöver detta återspeglas i dataanalysen av dos- och spridningsberäkningen. I förekommande fall ersätts därför utfall på öar med nollor för att ge en rättvisande bild av percentilerna för avstånd över fastlandet. De olika metoderna för att beräkna kumulativa histogram beskrivs nedan.

5.3.2. Samtliga datapunkter

För bränslefabriken i Västerås som inte ligger vid kusten, eller där avstånden som ligger till grund för storleken på beredskapszonerna blir relativt små, kan samtliga resultatraderna från spridningsberäkningen hanteras på samma sätt utan att det leder till missvisande avstånd. Samtliga avstånd är i detta fall över fastlandet och inget bortfall i spridningsberäkningarna på grund av att det största avståndet där ett visst kriterium överskreds var öppet vatten är att förvänta. Metoden för att beräkna kumulativa histogram på detta sätt benämns i denna bilaga som ”Metod A” och illustreras med exemplet i Figur 7 i avsnitt 5.5.

5.3.3. Avstånd på fastlandet

Transport av radioaktiva ämnen betar sig av fysikaliska orsaker annorlunda beroende på om plymen går över vatten eller över en landmassa. Detta omhändertas i spridningsmodellen, men behöver också beaktas vid beräkning av de största avstånden där ett doskriterium eller en åtgärdsnivå överskrids. Dessa blir i medeltal något större vid öar ute i havet än över fastlandet. Eftersom beredskapszonernas huvudsakliga utsträckning är in över fastlandet behöver detta beaktas i dataanalysen för att inte öar ska förskjuta resultatet mot större avstånd än vad som är motiverat.

I dataanalysen definieras därför en kustlinje, exempelvis i fallet med kärnkraftverket i Oskarshamn i Östersjön utanför fastlandet, vilken i kombination med positionsinformationen från spridnings- och dosberäkningen används för att kategorisera utfall som ”fastland” eller ”icke-fastland”. Utfallen över fastland viktas i slutsteget med det totala antalet genomförda spridningsberäkningar, vilket leder till att percentilerna på ett korrekt sätt avspeglar det största avstånd där en viss andel av de analyserade väderfallen överskrids över fastlandet. Metoden för att beräkna kumulativa histogram på detta sätt benämns i denna bilaga som ”Metod B”, illustrerat med exemplet i Figur 8. Med Metod B tillgodoräknas det faktum att det ibland blåser ut över havet, vilket innebär att de största avstånden där ett givet kriterium blir något mindre in över fastlandet, om samtliga väderfall beaktas.

5.3.4. Avstånd utanför fastlandet

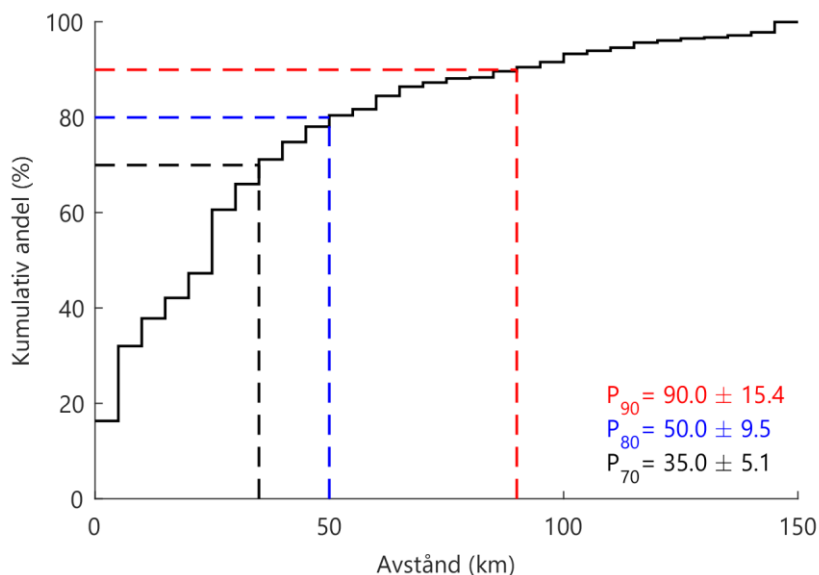
Öar som exkluderats i analysen med Metod B ovan beaktas istället i den samlade bedömningen av beredskapszonens utsträckning genom att i förekommande fall specialstudera komplementet. I detta fall studeras istället sannolikhetsfördelningen direkt i form av ett histogram. Utfallet över en ö i havet avspeglas därmed i histogrammet genom en ökad avståndsfrekvens på de avstånd från utsläppspunkten som innefattas av ön i fråga. Metoden för att beräkna histogram på detta sätt benämns i denna bilaga som ”Metod C” och illustreras med exemplet i Figur 9. Metoden visar den betingade sannolikheten för att det största avståndet där ett visst kriterium överskrids är d km, givet att plymen gått ut över havet.

5.4. Medelvärde och osäkerheter

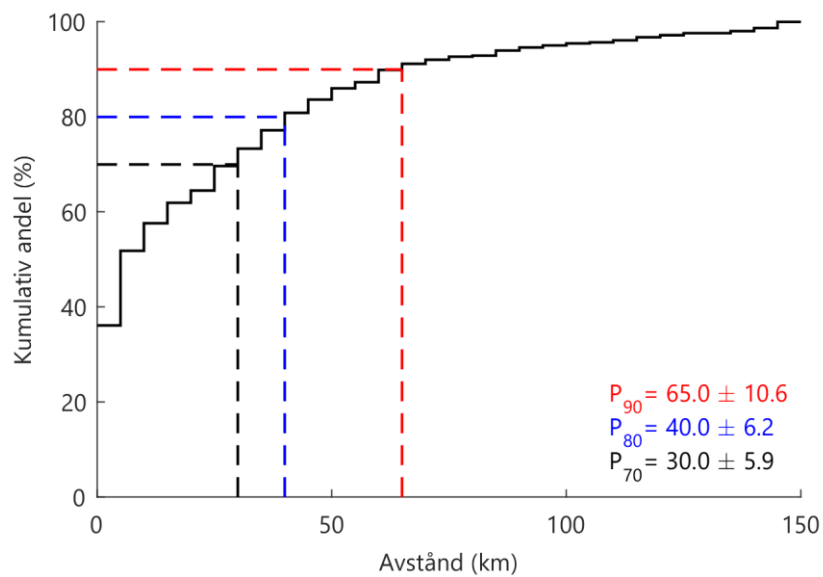
För att skatta största avstånd där ett visst kriterium överskrids och osäkerheterna i detta avstånd används s.k. boot strap-analys. Metoden utgår ifrån den observerade sannolikhetsfördelningen som bygger upp det kumulativa histogrammet. Genom att upprepade gånger dra ett antal slumpmässiga prov från den observerade sannolikhetsfördelningen och utifrån de dragna proven åter igen beräkna percentilen på en viss nivå kan medelvärdet och variansen för ett visst område i det kumulativa histogrammet som svarar mot en viss percentil skattas. Osäkerheten i medelvärdet erhålls sedan genom att beräkna standardavvikelsen och multiplicera med en s.k. täckningsfaktor, k , för att täcka in k standardavvikelser. Alla resultat ett detta arbete presenteras som ett avstånd i km (medelvärdet) med angivna osäkerheten med en täckningsfaktor $k=2$. Eftersom histogrammen byggs upp av diskreta steg, blir ibland osäkerheten noll. Det är värt att notera att osäkerheten i percentilerna för de största avstånden således endast beaktar den statistiska delen av analysen vilket medför att antaganden gjorda i tidigare analyssteg samt eventuella systematiska avvikelser i dos- och spridningsberäkningar inte beaktas i osäkerhetsskattningen.

5.5. Exempel på analysmetoder

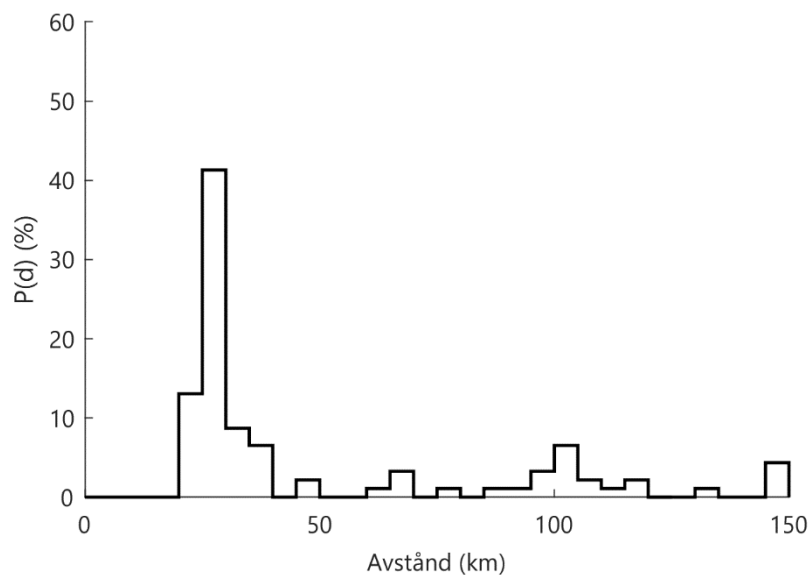
Följande exempel är baserade på samma spridnings- och dosberäkning och därmed samma grunddata. Resultat för en viss åtgärdsnivå där olika analysmetoder, beskrivna i avsnitt 5.3 ovan, illustreras i figurerna 7-10 i syfte att belysa vikten av en nogra avvägd analysmetod.



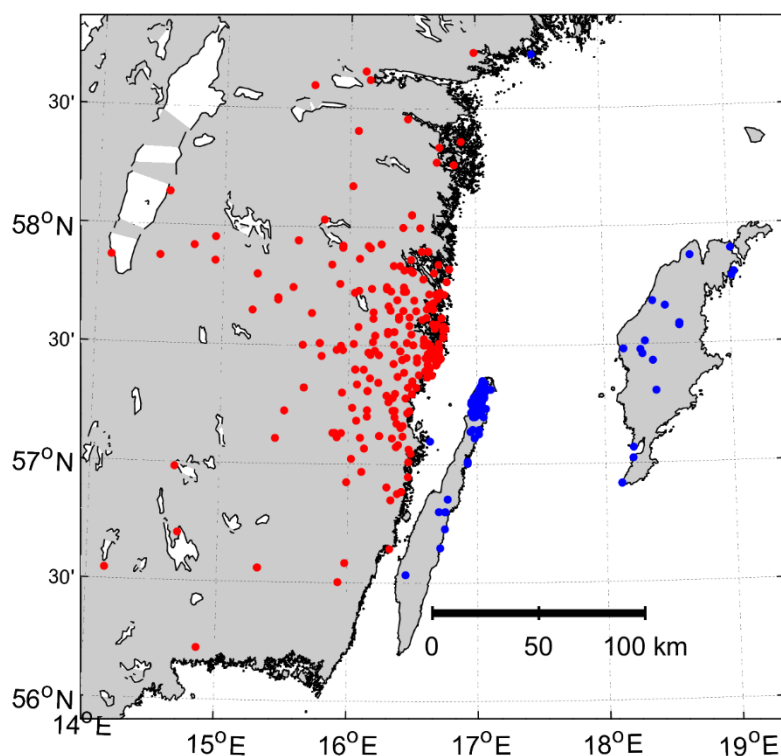
Figur 7. Exempel på ett kumulativt histogram beräknat enligt Metod A, beskriven i avsnitt 5.3.2 ovan. Varje intervall (trappsteg), beskriver andelen av de analyserade väderfallen som för det valda kriteriet (i detta fall en åtgärdsnivå) innehålls för ett visst avstånd. Utifrån figuren kan utläsas att avståndet där denna åtgärdsnivå överskrids i 80 procent av väderfallen kommer att vara kortare än $50 \pm 9,5$ km.



Figur 8. Exempel på ett kumulativt histogram beräknat enligt Metod B, beskriven i avsnitt 5.3.3 ovan. Varje intervall (trappsteg), beskriver andelen väderfall som för den valda åtgärdsnivån innehålls för ett visst avstånd, givet att utsläppet gått in över fastlandet. Utifrån figuren kan utläsas att avståndet för denna åtgärdsnivå blir kortare än $40 \pm 6,2$ km i 80 procent av väderfallen. Resultaten för motsvarande percentil blir alltså cirka 10 km kortare än då Metod A användes.



Figur 9. Exempel på sannolikhetsfördelning beräknat enligt Metod C, beskriven i avsnitt 5.3.4 ovan. Varje intervall (stapel) beskriver sannolikheten, P, att det största avståndet där den valda åtgärdsnivån överskrids, d, ligger inom intervallet givet att utsläppet gått ut över havet. En tydlig påverkan av en ö på cirka 30 km avstånd kan utläsas i figuren.



Figur 10. Exempel på kategorisering av utfallpunkter som fastland (röda punkter) och icke-fastland (blå punkter). Utifrån kategoriseringen illustrerad ovan inses att skillnader i resultat mellan Metod A och B beror på utfall på Öland och Gotland, vilka exkluderas i Metod B. Topparna på cirka 30 respektive 100 km avstånd i figuren för Metod C (Figur 9) beror alltså på utfall lokaliserade till dessa öar.

5.6. Val av analysmetod

Metod A har använts för beräkning av avstånd där doskriterier och åtgärdsnivåer kan överskridas kring bränslefabriken i Västerås. I fallet med bränslefabriken i Västerås blir de största avstånden för samtliga doskriterier och åtgärdsnivåer relativt korta (enstaka km). Det finns inget öppet vatten som kan påverka spridningen inom dessa avstånd och därför går Metod A att använda direkt.

För kärnkraftverken och Clab som ligger vid kusten används istället Metod B vid beräkning av avstånd där doskriterier och åtgärdsnivåer kan överskridas. Denna metod ger identiska resultat med Metod A om de största avstånden där kriterierna överskrids är korta och därmed inte förskjuts av förekomsten av öar.

Metod C har endast använts i förslaget till den yttre beredskapszonen kring kärnkraftverket i Oskarshamn där utfall över Öland särskilt behöver beaktas.

6. Parameterval

I det följande beskrivs närmare det meteorologiska data som använts för spridningsmodelleringen. Vidare beskrivs den specifika parametersättningen av de använda spridningsmodellerna. Slutligen utvecklas närmare hur de doskoefficienter som ansatts har härletts, och vilka överväganden som skett i samband med de specifika valen av parametrar.

6.1. Meteorologiska data

Historiska meteorologiska data för perioden februari 2006 – februari 2016 har använts för spridningsberäkningarna. I Tabell 4 framgår för vilka dagar under perioden som information saknas eller är ofullständig, och för vilka beräkningar således ej har kunnat genomföras.

Tabell 4. Avsaknad av meteorologiska data i SMHI:s arkiv under den behandlade tidsperioden (februari 2006 – februari 2016).

Modell	Avsaknad av data		
	Period (start)	Period (slut)	Antal dygn
G11	20070101	20070101	1
G11	20070215	20070215	1
G11	20081119	20081120	2
G11	20090509	20090510	2
G11	20090801	20090901	32
G11	20101001	20101118	49
G11	20120417	20120426	10
E11	20120904	20120904	1
E11	20120930	20121101	33
E11	20131023	20131024	2
E11	20131031	20131031	1
E11	20131123	20131124	2
E11	20140331	20140401	2
E11	20140513	20140513	1
E11	20140811	20140812	2
E11	20140918	20140919	2
E11	20150621	20150621	1
E11	20151001	20151101	32

6.2. Parametrering av RIMPUFF

I tabellen nedan återfinns de parametervärden som ansatts för RIMPUFF-modellen. Tabellen begränsar sig till de parametrar som är tillgängliga från gränssnittet i det använda besluts- och analysstödsystemet ARGOS. För en närmare beskrivning av RIMPUFF-modellen och betydelsen av respektive parameter se [7].

Tabell 5. Ansatta parametrar för RIMPUFF-modellen.

Konfiguration	Parameter		
	Enhet	Värde	Beteckning
Gamma Dose Rate from Plume	Y/N	Yes	
Gamma Dose Rate from Ground	Y/N	Yes	
Puff Released Every	min	10	
Outdata Every	min	60	
Trajectory	Y/N	No	
Local Scale Model Chain		No	
Minimum Relative Concentration of Interest		0,001	CHEMIN
Number of Advection Steps per Released Puff		10	TAU/ NTADV
Pentafurcation of Puffs	Y/N	No	
Trifurcation of Puffs	Y/N	No	
Stability		Similarity	
Number of Interpolations for Each Wind Field		6	
Wind Shift per 100 m	Grade	5	
Wind Speed Gradient	m/s	2	
Max Number of Trifurcations		2	
Maximum Pentafurcations		2	
Minimum Sigma for Pentafurcation	m	300	
Puff Centre Rise		Shear Rise	
Initial Puff Size [Sigma Y]	m	10	
Initial Puff Size [Sigma Z]	m	10	
Sigma Y Advection Factor		0,5	
Methodology for Deposition Velocities		Land Use	
Start of Long Parametrisation		1000	

För beräkning av torrdeposition på mark används parametern depositions hastighet. Parametrarna för aerosoler är valda utifrån antagandet om en partikeldiameter om 1 μm (se Tabell 6).

Tabell 6. Torrdepositions hastigheter i RIMPUFF.

Grupp	Depositionshastighet (m/s)
Jod aerosolform	0,001
Jod organisk form	0,0005
Jod elementär	0,01
Ädelgaser	0
Övriga nuklider (aerosol)	0,001

Ovanstående tabell beskriver den parametersättning som generellt tillämpats. För den dimensionerande händelsen brand med utsläpp av uranpulver i bränslefabriken i Västerås har dock olika partikelstorlekar och –densiteter antagits i spridningsberäkningarna. Detta medför ett behov av anpassning av depositions hastigheter utifrån dessa variabler. För en närmare beskrivning av hur detta implementerats i RIMPUFF se [8].

Torrdepositionen påverkas även av markskrovligheten (friktionen), vilken i sin tur beror på markens beskaffenhet. och hanteras genom att multiplicera de generella värdena för torrdeposition med en marktypspecifik faktor.

I RIMPUFF används en klassificering av marktyp i fem klasser (se Tabell 7). Dessa klasser är härledda ur data från CORINE⁸. Dessa fem klasser har i sin tur etablerats genom en sammanläggning av klasserna i det ursprungliga CORINE-datasetet.

Tabell 7. Multiplikatorer för markklasser i RIMPUFF.

Marktäcke (Land Cover)	Faktor
Skog (Forest)	2,0
Vatten (Water)	0,1
Stadsmiljö (Urban)	0,1
Gräs (Grass)	1,0
Landsbygd (Rural)	1,0

Våtdepositionen beräknas med hjälp av en depositions faktor multiplicerat med regnintensiteten (mm/h) upphöjt till en exponent. De i RIMPUFF använda värdena finns redovisade i Tabell 8. I RIMPUFF ansätts ingen våtdeposition vid en regnintensitet lägre än 0,001 mm/h.

⁸ CORINE: Coordination of Information on the Environment [18].

Tabell 8. Depositionsfaktorer samt exponenter för våtdeposition i RIMPUFF [9].

Grupp	Depositionsfaktor (våtdeposition) (1/s)	Exponent
Jod aerosolform*	0,000084	0,79
Jod organisk form	0,0000008	0,6
Jod elementär	0,00008	0,6
Övriga nuklider (aerosol*)	0,000084	0,79

* Gäller aerosoler av partiklar med en diameter mindre än 2,8 µm. För större partiklar ansätts ett uttryck med fler parametrar i enlighet med [9].

6.3. Doskoefficienter för RIMPUFF

I det följande redovisas närmare valet av doskoefficienter för beräkningar med RIMPUFF-modellen.

6.3.1. Molndos

Beräkningarna av molndos förutsätter att den sammanlagda gammaenergiavgången per sönderfall i fyra energiintervaller kan beräknas för varje i källtermen ingående nuklid enligt beskrivningen i avsnitt 3.1. Dessa fyra gammafaktorer har härletts ur data från nuklidbiblioteket JEFF 3.1 [10] och ENDF/B-VII.1 [11].

I vissa fall innefattar gammafaktorerna för en given modernuklid även bidragen från dess dotternuklider, med hänsyn tagen till eventuella grenkvoter. Detta är fallet då dotternukliden har en halveringstid som är kort i förhållande till den tid då aktiviteten är luftburen. Vidare krävs att halveringstiden för dotternukliden är väsentligt kortare än modernukliden, vilket medför att aktivitetsjämvikt i sönderfallskedjan uppnås inom det tidsintervall som är aktuellt för spridningsberäkningen. Ett exempel på detta förfarande är Cs-137 med en halveringstid om cirka 30 år, vilket huvudsakligen sönderfaller till Ba-137m via betasönderfall och därefter till stabilt Ba-137 (halveringstid ca 3 min). I denna sönderfallskedja sker gammaavgången vid sönderfallet av Ba-137m. Denna gammaavgång omhändertas i detta fall i gammafaktorerna för Cs-137, vilket medför att Ba-137m ej behöver modelleras.

6.3.2. Markdos

Beräkningen av markdos har skett i enlighet med vad som beskrivits i avsnitt 3.2. De faktorer som använts för att omvandla deponerad aktivitet till dosrat är härledda från DCFPAK 3.02 [12], varvid en nedträngning om 1 cm har antagits, innebärande att de radioaktiva ämnena är jämnt fördelade i den översta centimetern av ett jordlager med densitet 1,6 g/cm³. I valet av nedträngning har hänsyn tagits till det faktum att det primärt har varit 7-dygnsdosen som analyserats, och att aktiviteten under denna tidsperiod i viss mån kan antas ha trängt ned i marken. Ingen ytterligare modifiering av

omvandlingsfaktorerna har skett för att omhändertaga markskrovighet. Denna effekt har ansetts innefattas i effekten av nedträngningen.

Ett särskilt förfarande har tillämpats för att beräkna dosraten, och därmed dosen, från markbeläggningen efter det att spridningsmodelleringen upphört (normalt 72 timmar efter utsläpp). Exponeringen för strålningen från på marken deponerad aktivitet beror av hur i nedfallet ingående nuklider sönderfaller och tillväxer med tiden. Detta medför att denna process behöver modelleras från det att spridningsberäkningen har avslutats fram till den tidpunkt T för vilken markdosens bidrag till den totala effektiva dosen ska bestämmas (7 dygn). Denna modellering har skett genom användning av en programvarukomponent tillhörande FDMT [13]. Denna komponent innefattar en separat dosmodell med tillhörande doskoefficienter. Till skillnad från motsvarande beräkningar i RIMPUFF sker denna dosmodellering per åldersgrupp. Då den totala (åldersgruppsoberoende) aggregerade markdosen från deponerad aktivitet slutligen beräknats har markdosen till vuxna från FDMT använts för perioden efter depositionens upphörande.

6.3.3. Inandningsdos

För beräkning av inandningsdos har åldersgruppspecifika andningshastigheter använts enligt Tabell 9.

Tabell 9. Andningshastigheter som funktion av åldersgrupp, härledda från [14] (Indoor Worker).

Åldersgrupp	Andningshastighet (m ³ /s)
Barn 1 år	0,0000602
Barn 5 år	0,000101
Barn 10 år	0,000177
Barn 15 år	0,000233
Vuxen	0,000257

De nuklid- och åldersspecifika doskoefficienter som använts är härledda från ICRP 119 [15], Tabell G1 (aerosoler) samt Tabell H1 (reaktiva gaser).

För aerosoler har koefficienterna i allmänhet valts utgående från av ICRP rekommenderade absorptionstyp⁹ (F/M/S), se Tabell 10.

⁹ F/M/S betecknar olika hastigheter (Fast, Medium, Slow) vid upptag i kroppen efter inandning.

Tabell 10. Antagen absorptionstyp vid beräkning av inandningsdos.

Ämne	Absorptionstyp
Ag	M
Am	M
Ba	M
Ce	M
Cm	M
Co	M
Cs	F
Fe	M
I (aerosol)	F
La	M
Mn	M
Mo	M
Nb	M
Nd	M
Ni	M
Np	M
Pm	M
Pr	M
Pu	M
Rb	F
Rh	M
Ru	M
Sb	M
Sr	M
Tc	M
Te	M
Th	S
U	S
Y	S
Zr	M

6.4. Parametrisering av PIGLET

I PIGLET har beräkningarna utförts med en utsläppshastighet på en partikel var tionde sekund. Varje utsläppt partikel är kopplad till en viss utsläppt aktivitet mängd av de i källtermen ingående nukliderna.

För beräkning av torrdeposition på mark används parametern depositionshastighet (se Tabell 11).

Tabell 11. Torrdepositions hastigheter i PIGLET.

Grupp	Depositionshastighet (m/s)
Jod aerosolform	0,001
Jod organisk form	0,0005
Jod elementär	0,001
Ädelgaser	0
Övriga nuklider (aerosol)	0,001

I PIGLET används en klassificering av markanvändning i fyra klasser enligt Tabell 12.

Tabell 12. Multiplikatorer för markklasser i PIGLET.

Marktäcke	Faktor
Skog	2,0
Vatten	0,1
Stadsmiljö	0,5
Övrigt	1,0

Våtdepositionen beräknas med hjälp av en depositions faktor multiplicerat med regnintensiteten (mm/h) upphöjt till en exponent. De i PIGLET använda värdena finns redovisade i Tabell 13.

Tabell 13. Depositionsfaktorer samt exponenter för våtdeposition i PIGLET.

Grupp	Depositionsfaktor (våtdeposition) (1/s)	Exponent
Jod aerosolform	0,0001	0,8
Jod organisk form	0,000001	0,8
Jod elementär	0,0001	0,8
Övriga nuklider (aerosol)	0,0001	0,8

6.5. Doskoefficienter för PIGLET

I det följande redovisas närmare valet av doskoefficienter för beräkningar med PIGLET-modellen. Redovisningen begränsas till koefficienter för beräkning av allvarliga deterministiska effekter.

Källor till doskoefficienterna för beräkning av absorberad dos till röd benmärg för vuxna och barn, effektiv dos till embryo¹⁰ samt absorberad dos till fostrets hjärna redovisas i Tabell 14 nedan.

Tabell 14. Källor till använda doskoefficienter i PIGLET.

Dos	Referens
Absorberad dos till benmärg, vuxna, vid bestrålning från moln och mark. Absorberad dos till livmoder vid bestrålning från moln och mark*.	Eckerman K.F. och Leggett R.W. [12]
Absorberad dos till benmärg, 1-årigt barn, vid bestrålning från moln och mark.	Jacob et al. [16]
Absorberad dos till hjärna hos foster och effektiv dos till embryo, från moderns inandning.	ICRP 88 [17]
Absorberad dos till benmärg, vuxna och 1-årigt barn, från inandning. Absorberad dos till livmoder, från inandning*.	ICRP 119 [15]

* För de nuklider där doskoefficienter för absorberad dos till hjärna hos foster och effektiv dos till embryo saknas har i stället dos till livmoder använts.

Doskoefficienterna för dos från mark har multiplicerats med 0,65 för att kompensera för den succesiva nedträngningen under den period om sju dygn för vilka beräkningarna genomförts.

Dosen från inandning har beräknats med en integrationstid på 50 år för vuxna och 69 år för 1-årigt barn. Samma andningshastigheter som i RIMPUFF (se Tabell 9) har använts. Dock har för gravida kvinnor värdet 0,000206 m³/s använts [17].

¹⁰ I denna analys likställs effektiv dos till embryo med absorberad dos till embryo.

Referenser

- [1] S. Thykier-Nielsen, S. Deme och E. Láng, "Calculation method for gamma-dose rates from spherical puffs," Risø-R-692 (EN), Risø National Laboratory, 1993.
- [2] S. Thykier-Nielsen, S. Deme och E. Láng, "Calculation method for gamma-dose rates from spherical puffs," Risø-R-775 (EN), Risø National Laboratory, 1995.
- [3] 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," Proceedings (online), 2009.
- [4] SSM, "Partikelmodellen PIGLET. Modellbeskrivning och användarhandledning," SSM2017-4413-1, 2017.
- [5] SSM, "Lena version 5.0. Användarhandledning," SSM2017-4413-2, 2017.
- [6] H. Walter, F. Gering, K. Arnold, B. Gerich, G. Heinrich och U. Welte, "RODOS-based simulation of potential accident scenarios for emergency response management in the vicinity of nuclear power plants," Bundesamt für Strahlenschutz, 2015.
- [7] S. Thykier-Nielsen, S. Deme och T. Mikkelsen, "Description of the Atmospheric Dispersion Module, RIMPUFF," RODOS(WG2)-TN(98)-02, 1999.
- [8] P. Astrup, "Atmospheric dispersion of particles larger and heavier than aerosols," PREPARE(WP4)-3-01, 2016.
- [9] A. Baklanov och J. H. Sørensen, "Parameterisation of Radionuclide Deposition in Atmospheric Long-Range Transport Modelling," *Physical Chemistry Earth (B)*, vol. 26, nr 10, pp. 787-799, 2001.
- [10] OECD/NEA, "The JEFF 3.1 Nuclear Data Library," No. 6190, https://www.oecd-nea.org/dbdata/nds_jefreports/jefreport-21/jeff21.pdf, 2005.
- [11] M. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, et al., "Special issue on ENDF/B-VII.1 library," *Nuclear Data Sheets*, vol. 112, nr 12, 2011.
- [12] K. Eckerman och R. W. Leggett, "DCFPK 3.02 (Dose Coefficient Data File Package)," Oak Ridge National Laboratory, 2013.
- [13] H. Müller, F. Gering och G. Pröhl, "Model Description of the Terrestrial Food Chain and Dose Module FDMT in RODOS PV 6.0," RODOS(RA3)-TN(03)06, 2003.
- [14] ICRP, "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection.," ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3), 1994.
- [15] ICRP, "Compendium of Dose Coefficients based on ICRP publication 60.," ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41 (Suppl.), 2012.
- [16] P. Jacob, H. Rosenbaum, N. Petoussi och M. Zankl, "Calculations of Organ Doses from Environmental Gamma Rays Using Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part II: Radionuclides Distributed in the Air or Deposited on the Ground.," GSF-Berich

12/90, Institute für Strahlenschutz, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München, 1990.

- [17] ICRP, "Doses to Embryo and Fetus from Intake of Radionuclides by the mother," ICRP Publication 88. Ann. ICRP 31 (1-3), 2002.
- [18] EU, "CORINE land cover," European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>, 1995.



2017:27

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se