Strål
säkerhets
myndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

Rapport

Strålskydds-konsekvenser av olycka på reaktor-drivet fartyg

2026:02

Författare: Peder Kock, Jan Johansson, Anders Axelsson, Jonas Lindgren, Catharina Söderström, Patrick Isaksson, Mahdi Maaouia
Datum: Februari 2026
Rapportnummer: 2026:02
ISSN: 2000-0456
Tillgänglig på www.ssm.se

Strål
säkerhets
myndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Peder Kock, Jan Johansson, Anders Axelsson, Jonas Lindgren, Catharina Söderström, Patrick Isaksson, Mahdi Maaouia

2026:02

Strålskyddskonsekvenser av olycka på reaktordrivet fartyg

Datum: Februari 2026
Rapportnummer: 2026:02
ISSN: 2000-0456
Available at www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Sammanfattning

I den här rapporten redovisar Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) en analys av möjliga radiologiska konsekvenser av en händelse på ett reaktordrivet fartyg som sker på en plats i Sverige som är okänd på förhand. Analysen omfattar uppskattat utsläpp av radioaktiva ämnen (källterm) och en statistisk utvärdering av resultat från genomförda spridnings- och dosberäkningar i syfte att uppskatta stråldoser till allmänheten. I syfte att studera konsekvenserna av ett större utsläpp redovisar SSM även en konsekvensanalys av en utökad händelse.

Möjliga stråldoser och behov av skyddsåtgärder analyseras, och i rapporten redovisas även ett förslag till beredskapsplanering som ansvariga myndigheter kan använda som planeringsunderlag. Utöver åtgärder som faller inom ramarna för räddningstjänst och sanering redovisas också möjlig påverkan på livsmedelsproduktion.

Sammanfattningsvis bör inomhusvistelse inom cirka en kilometer vara tillräcklig för att hålla stråldoserna till allmänheten låga. Om ett större utsläpp befaras kan avspärrning till sjöss kring en eventuell nödhamn eller utrymning av allmänheten behöva genomföras inom cirka två kilometer för att klara målsättningarna som anges i strålskyddsförordningen. Även inomhusvistelse inom cirka 10 km skulle då vara motiverad. Livsmedelsproduktion kan påverkas inom ett större område, där gränsvärden för radioaktiva ämnen i livsmedel riskerar överskridas.

I rapporten redovisas ett ställningstagande om behov av jodtabletter för denna typ av händelser. Sammantaget bedömer SSM att det här inte är motiverat att planera för att dela ut jodtabletter till allmänheten i beredskapssyfte för en händelse med ett reaktordrivet fartyg där platsen är okänd på förhand, vare sig genom förhandutdelning längs Sveriges kuststräcka eller genom utdelning i samband med en händelse. Den strålskyddsmässiga nyttan bedöms vara förhållandevis liten i förhållande till effektivitet, kostnad och genomförbarhet för ett sådant alternativ.

Rapporten är avgränsad till en händelse som sker på en plats som är okänd på förhand. Om en eller flera platser i Sverige utses för att ta emot besök av allierade reaktordrivna fartyg är platsen inte längre okänd på förhand. Särskild beredskapsplanering för dessa platser kan därför komma ifråga. Sådan beredskapsplanering omfattas inte av denna rapport.

Innehåll

Sammanfattning **3**
Innehåll **4**
1. Inledning **5**
1.1. Bakgrund 5
1.2. Syfte och avgränsning 5
1.3. Metodval 5
2. Händelser och källtermer **6**
2.1. Sammanställning över reaktordrivna fartyg 6
2.2. Val av händelse 7
2.3. Källterm 7
2.4. Utökad händelse 10
2.5. Jämförelse med andra studier 10
3. Konsekvensanalys **10**
3.1. Spridnings och dosberäkningar 10
3.2. Doskriterier och åtgärdsnivåer 11
3.3. Beräkningsresultat 13
3.4. Analys 16
4. Behov av skyddsåtgärder **21**
4.1. Utrymning 21
4.2. Inomhusvistelse 21
4.3. Jodtabletter 22
4.4. Åtgärder inom livsmedelsproduktion och sanering 22
5. Slutsatser för beredskapsplaneringen **23**
5.1. Händelse med förlust av kylning och läckage 23
5.2. Utökad händelse 24
6. Dos efter skyddsåtgärder **24**
6.1. Händelse med förlust av kylning och läckage 25
6.2. Utökad händelse 25
Referenser **27**

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Strålsäkerhetsmyndighetens (SSM) uppdrag omfattar bland annat att genomföra beräkningar och ta fram underlag för bedömningar inom strålskyddsområdet [1]. Vidare ska myndigheten bistå med strålskyddsbedömningar vid analysen av risker som länsstyrelsens program för räddningstjänst och sanering ska utgå ifrån [2]. I den här rapporten redovisas en analys av möjliga radiologiska konsekvenser av en händelse på ett reaktordrivet fartyg som leder till utsläpp av radioaktiva ämnen. I rapporten ingår också ett avsnitt med underlag för ansvariga aktörers beredskapsplanering för skyddsåtgärder.

Indelningen i beredskapskategorier är ett internationellt vedertaget system för att utforma en riskanpassad beredskap för olika typer av olyckor [3]. En händelse på ett reaktordrivet fartyg som leder till utsläpp av radioaktiva ämnen är exempel på en händelse i beredskapskategori 4. Sådana händelser omfattar verksamheter med joniserande strålning som inte bedrivs på en bestämd plats samt antagonistiska eller oavsiktliga handlingar med strålkällor [4]. Det rör sig således om vitt skilda händelser som behöver analyseras utifrån sina förutsättningar för att möjliggöra en fullständig analys av radiologiska konsekvenser.

SSM har i rapporten *Strålskydd vid radiologiska nödsituationer – Planeringsunderlag för händelser där platsen är okänd på förhand* beskrivit strålskyddet för händelser i beredskapskategori 4 [5].

1.2. Syfte och avgränsning

I arbetet med risk- och sårbarhetsanalyser har SSM som ambition att genomföra detaljerade konsekvensanalyser för flertalet av händelserna i beredskapskategori 4 [6]. Som ett led i detta arbete redovisas i denna rapport en konsekvensanalys av en händelse på ett reaktordrivet fartyg, inklusive uppskattning av källterm för en sådan händelse. I syfte att studera konsekvenserna av ett större utsläpp ingår även en analys av en utökad händelse. Radiologiska konsekvenser för händelsen och den utökade händelsen i form av möjliga stråldoser till allmänheten redovisas. Utöver åtgärder som faller inom ramarna för räddningstjänst och sanering redovisas också konsekvenser för livsmedelsproduktion.

En förutsättning för analysen i rapporten är att händelsen inträffar på en plats som är okänd på förhand. Skulle Sverige ta emot besök av allierade reaktordrivna fartyg, exempelvis i en hamn avsedd för sådana besök, behöver en detaljerad konsekvensanalys och beredskapsplanering genomföras utifrån förutsättningarna för den platsen. En sådan analys ligger utanför syftet med denna rapport.

1.3. Metodval

I arbetet med den här rapporten har SSM använt och vidareutvecklat de metoder och modelleringsverktyg som använts i tidigare analyser och utredningar, exempelvis *Översyn av beredskapszoner* [7] och *Strålskyddskonsekvenser av nedfall från kärnvapenexplosioner* [8]. Vidare har myndigheten strävat efter att ta fram mer generellt användbara resultat än vad som blir fallet om man väljer enstaka exempel eller fallstudier. Analysen bygger därför

på resultat från ett stort antal spridnings- och dosberäkningar som syftar till att uppskatta stråldoser som kan erhållas på olika avstånd från olycksplatsen, för olika nuklider, via olika exponeringsvägar och med beaktande av tänkbara skyddsåtgärder. Genom att behandla olika väderfall statistiskt fås mer generella uppskattningar av strålskyddskonsekvenser som blir ett bättre underlag till beredskapsplaneringen.

2. Händelser och källtermer

I detta avsnitt redovisas först en kort sammanställning över reaktordrivna fartyg som förekommer i världen och därefter två händelser som skulle leda till utsläpp av radioaktiva ämnen. Händelseanalysen inkluderar en bashändelse och en utökad händelse med källtermer som kan användas för att analysera möjliga radiologiska konsekvenser.

2.1. Sammanställning över reaktordrivna fartyg

Ubåtar och större krigsfartyg (t.ex. hangarfartyg) som drivs med en eller flera kärnreaktorer förekommer i ett antal länder världen över. Enligt World Nuclear Association (WNA) är ca. 160 reaktordriva ubåtar idag i drift [9]. Här redovisas antalet fartyg inom parentes utifrån WNA:s genomgång. Natoländerna USA (70), Storbritannien (10) och Frankrike (9) har reaktordrivna ubåtar. Utanför Nato har Ryssland (40), Kina (19) och Indien (3) reaktordrivna ubåtar. Även Australien har planer på att anskaffa och på sikt bygga reaktordrivna ubåtar inom ramarna för försvarssamarbetet med Storbritannien och USA [10]. Vidare har USA (11) och Frankrike (1) hangarfartyg som är reaktordrivna medan Ryssland har en reaktordriven kryssare [9]. Ryssland har även ett mindre antal civila reaktordrivna fartyg, främst isbrytare, som opererar i Arktis [9].

Alla fartyg som är i drift idag uppges ha tryckvattenreaktorer, i många fall med kärnbränsle baserat på höganrikat uran (>20 % U-235). Bränslets kemiska form uppges vara uranlegeringar med zirkonium eller aluminium [9].

Reaktorernas termiska effekter ligger mellan ett tiotal MW för mindre ubåtar till hundratals MW för hangarfartyg [9]. Sveriges största kärnkraftsreaktor, Oskarshamn 3, har en termisk effekt på ca. 3900 MW [11], medan effekten hos en mindre reaktor som på Loviisa kärnkraftverk i Finland ligger på ca. 1500 MW [12]. Detta innebär att en reaktor på ett hangarfartyg kan ha en termisk effekt på så mycket som hälften av effekten hos en mindre kärnkraftsreaktor, medan reaktorer som används på ubåtar har i storleksordningen 1-10 % av den termiska effekten hos en stor kärnkraftsreaktor.

Information kring haverihantering ombord har inte gått att hitta i öppna källor. I samband med ett svårt haveri på ett reaktordrivet fartyg finns det dock god tillgång till vatten (havet) och scenariot att fartyget sjunker bör även beaktas, vilket i så fall kraftigt reducerar ett atmosfäriskt utsläpp.

I den norska övningen Arctic REIHN övades under 2023 ett scenario med ett svårt haveri på en reaktordriven isbrytare utanför Norges kust [13]. Källtermen i övningsscenariot baserades på en rapport från den australiensiska strålsäkerhetsmyndigheten

ARPANSA[1] [14]. Även i SSM Rapport 2020:15 [5] finns ett scenario som bygger på slutsatserna i den australiensiska rapporten.

2.2. Val av händelse

SSM har i analysen av reaktordrivna fartyg utgått från en postulerad händelse som leder till ett svårt haveri på en amerikansk ubåt i Los Angeles-klassen. Denna typ av ubåtar drivs av tryckvattenreaktorer med en effekt på ca. 160 MWt. Händelsen inleds med ett rörbrott i primärkretsen som leder till förlust av kylning. I händelsen förutsätts utebliven eller otillräcklig härdnödkylning, vilket i sin tur leder till att kärnbränslet i reaktorhärden smälter. Härdsmältan antas kvarhållas i inneslutningen[2] och utsläppen till omgivningen styrs av läckageflödet från inneslutningen. Utrymmen som omger inneslutningen antas ytterligare begränsa utsläppet av radioaktiva ämnen till omgivningen. Förloppet och antaganden beskrivs i ovan nämnda rapport från ARPANSA [14].

2.3. Källterm

ARPANSA har använt beräkningsverktyget ”ACCIDENT” från Nuclear Safety Bureau i Australien för att beräkna härdinventarium, frigörelse till inneslutningen och utsläpp till atmosfären för händelsen ovan. Även DSA[3] i Norge har genomfört analyser av källterm för samma scenario. SSM har i detta arbete valt att använda källtermen som tagits fram av ARPANSA med vissa justeringar. Rapporterna från ARPANSA [14] och DSA [15] och SSM:s val avseende justeringar sammanfattas nedan.

2.3.1. Antagande om drifthistorik

För att beräkna härdinventariet måste antaganden om ubåtens drifthistorik göras. ARPANSA antar konservativt att det var 15 år sedan bränslebyte, vilket innebär att långlivade fissionsprodukter som cesium har haft tid att byggas upp. Reaktorn antas ha körts på maximal effekt under 4 dygn innan händelsen inträffar, vilket innebär att även aktiviteten av kortlivade fissionsprodukter är hög.

I en rapport har DSA jämfört två olika metoder för att skatta härdinventariet för en hypotetisk ubåt i Los Angeles-klass [15]. De två koder som använts är ACCIDENT-koden som nämnts ovan och koden ORIGEN från Oak Ridge National Laboratory (ORNL) i USA. Vid jämförelsen konstateras att överensstämmelsen i allmänhet är god men att ACCIDENT-koden överskattar inventariet för ett antal nuklider, i synnerhet Cs-134 och Cs-136. Överskattningen beror på begränsningar i ACCIDENT-koden med avseende på neutronaktivering av stabila isotoper. ARPANSA har därför uppskattat inventariet för dessa två cesiumisotoper med hjälp av fissionstvärsnitten för Cs-133 och Xe-136.

2.3.2. Frigörelse till inneslutning

I sin rapport redogör ARPANSA för de överväganden som gjorts gällande andelen av tillgängliga radioaktiva ämnen som frigörs till inneslutningen för olika utsläppsgrupper. Deras antaganden sammanfattas i Tabell 1 under rubriken ”ARPANSA 2000”. DSA har i

[1] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Authority (ARPANSA)
[2] I detta fall är “inneslutningen” den del av ubåten som huserar reaktortank och primärkrets, vilken anges vara trycksatt [14]
[3] Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA)

sin rapport istället utgått från utsläppsandelar från NRC[4] (NUREG 1465) för att uppskatta frigjord aktivitet i inneslutningen [16]. Dessa värden redovisas också i Tabell 1 under rubriken ”NUREG 1465”.

Tabell 1. Andel av härdinventariet som antas frigöras till inneslutningen för de olika utsläppsgrupperna.

Utsläppsgrupp	Utsläppt andel	
	ARPANSA 2000	NUREG 1465*
Ädelgaser (Xe, Kr)	1	1
Halogener (I, Br)	0,5	0,65
Alkalimetaller (Cs, Rb)	0,3	0,65
Tellurgruppen (Te, Sb)	0,15	0,3
Strontium och barium (Sr, Ba)	0,05	0,12
Ädelmetaller (Ru, Mo, Tc)	0,01	0,005
Cerium (Ce)	0,01	0,0055
Lantanider (La, Zr)	0,01	0,0052

* NUREG-1465 (Accident Source Term for LWR NPP), Tabell 3.13 summan av ”gap release”, ”early in-vessel” och “ex-vessel”

2.3.3. Utsläpp till atmosfären

ARPANSA antar att utsläppet av radioaktiva ämnen inleds omedelbart och pågår under 12 timmar[5]. Utsläppet antas ske genom ett läckage från inneslutningen där 0,1% av den totala volymen i inneslutningen släpps ut till atmosfären per dygn. Motsvarande andel av de radioaktiva ämnen som frigjorts till inneslutningen släpps ut till omgivningen. Metodiken bygger på ett konstant läckage enligt ovan men där den tillgängliga aktiviteten per timme succesivt minskar på grund av sönderfall och att aerosoler antas deponera på ytor i inneslutningen. Antagandet är en förenkling då det inte tar hänsyn till driftryckets påverkan på läckageflödet, men bedöms ha marginell påverkan givet övriga osäkerheter. Depositionen i inneslutningen hanteras genom att ansätta en fix depositionshastighet, vilket modelleras med en halveringstid om ca. 5,3 timmar för alla utsläppsgrupper utom ädelgaser (som inte deponerar). Modellen tar hänsyn till enskilda nukliders sönderfall från händelsens inledning, men inväxt av nuklider från sönderfall beaktas inte. Att inte beakta inväxt leder till att aktiviteten för några nuklider som växer in under utsläppsfasen, såsom I-132, underskattas.

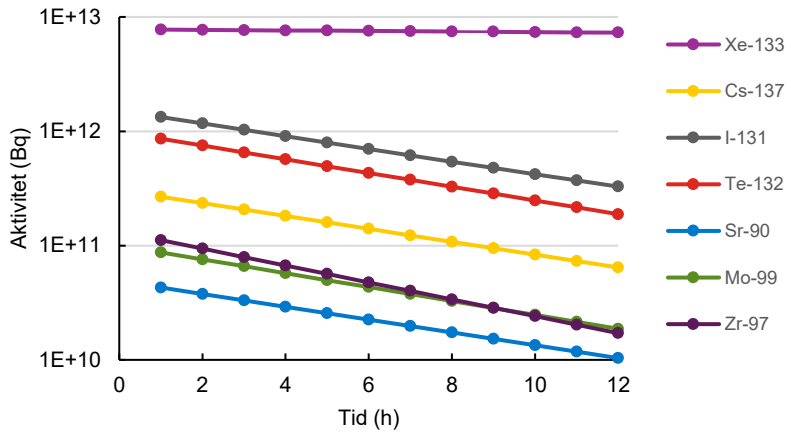
2.3.4. Val och justering av källterm

SSM har valt att utgå från källtermen som redovisas av ARPANSA [14] men har justerat ned aktiviteten[6] för Cs-134 och Cs-136 utifrån DSA:s observationer om överskattning av dessa nuklider [15]. Källtermen för händelsen redovisas i Tabell 2 med totalt utsläppt aktivitet under 12 timmar. Även om utsläppet kan pågå längre släpps huvuddelen av aktiviteten ut under de första timmarna. Undantaget är ädelgaser som inte deponerar i inneslutningen och därför inte minskar lika snabbt. SSM bedömer sammantaget att 12 timmar är en rimlig tid att ansätta för utsläppet. I Figur 1 visas den tidsupplösta källtermen

[4] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)
[5] ARPANSA har i dosberäkningarna för inandningsdos och molndos ansatt 12 timmars utsläppstid.
[6] Aktiviteten för Cs-134 har justerats ned med en faktor 1/48 medan Cs-136 har justerats ned med en faktor 1/173, vilket motsvarar aktivitetskvoterna mellan ORIGEN och ACCIDENT i DSA:s jämförelse. Även för andra nuklider noterar DSA skillnader, men utan närmare förklaring. SSM har i detta arbete valt att endast justera nivåerna för Cs-134 och Cs-136 som särskilt omnämns som osäkra av ARPANSA.

för ett antal nuklider som representerar olika utsläppsgrupper. Utsläppet antas ske nära havsytan utan värmeinnehåll.

Den valda händelsen som beskrivs ovan benämns händelse med *förlust av kylning och läckage*.



Figur 1. Utsläppt aktivitet för den valda händelsen *förlust av kylning och läckage* för några nuklider som representerar olika utsläppsgrupper.

Tabell 2. Källterm för den valda händelsen *förlust av kylning och läckage*.

Nuklid	Aktivitet (Bq)	Nuklid	Aktivitet (Bq)
Kr-83m	2,83E+12	Sb-127	1,60E+11
Kr-85	1,06E+12	Sb-129	1,05E+12
Kr-85m	1,48E+13	Ba-139	1,07E+12
Kr-87	9,53E+12	Ba-140	1,57E+12
Kr-88	2,88E+13	Sr-89	8,75E+11
Xe-131m	2,20E+11	Sr-90	2,79E+11
Xe-133	9,02E+13	Sr-91	2,73E+12
Xe-133m	3,10E+12	Sr-92	1,42E+12
Xe-135	1,03E+14	Ru-103	2,29E+11
Xe-135m	1,35E+12	Ru-105	1,27E+11
I-131	8,67E+12	Ru-106	2,53E+10
I-132	1,05E+13	Mo-99	5,43E+11
I-133	3,62E+13	Tc-99m	4,38E+11
I-134	8,86E+12	Rh-105	9,29E+10
I-135	2,61E+13	Ce-141	2,40E+11
Br-82	2,10E+08	Ce-143	6,17E+11
Cs-134	1,34E+11	Ce-144	1,77E+11
Cs-136	5,54E+10	La-140	6,39E+11
Cs-137	1,74E+12	La-141	4,06E+11
Cs-138	2,95E+12	Pr-143	2,89E+11
Rb-88	9,09E+11	Pr-145	3,14E+11
Rb-89	1,04E+12	Y-90	5,19E+11
Te-127	1,82E+11	Y-91	2,13E+11
Te-129	3,87E+11	Y-92	3,71E+11
Te-129m	2,06E+11	Y-93	5,82E+11
Te-131m	6,96E+11	Nb-95	2,49E+11
Te-132	5,39E+12	Nb-97	1,83E+11
Te-133m	1,67E+12	Zr-95	2,22E+11
Sb-125	9,86E+09	Zr-97	6,20E+11

I källtermen antas 2 % av jod som släpps ut vara i organisk form, medan resterande jod antas vara i aerosolform. Detta är samma antaganden som görs av ARPANSA och DSA.

2.4. Utökad händelse

En händelse med försvårande omständigheter jämfört med händelsen *förlust av kylning och läckage* har valts genom att skala upp läckaget. Istället för att anta ett läckage av 0,1 % av den totala volymen i inneslutningen per dygn antar SSM i den utökade händelsen ett läckage av 5 % per dygn, allt annat lika, vilket ger en 50 gånger större källterm än vad som redovisas i Tabell 2.

Den valda händelsen med *förlust av kylning och läckage* på en reaktordriven ubåt bygger på många antaganden. Den utökade händelsen ger ett underlag för att genomföra konsekvensanalyser där större utsläpp inte kan uteslutas, vilket bedöms vara användbart för att ringa in möjliga konsekvenser av händelser där dessa antaganden inte stämmer såsom mer allvarliga utsläppsförlopp (exempelvis på grund av skador på skrov och inneslutning) eller fartyg med större reaktorer.

2.5. Jämförelse med andra studier

Eftersom SSM har valt att utgå från den händelse och källterm som tagits fram av ARPANSA är källtermen densamma, med undantag för de justeringar av Cs-134 och Cs-136 som beskrivs ovan. Även DSA har i en konsekvensanalys utgått från händelsen och källtermen som redovisas av ARPANSA [17].

ARPANSA och DSA redovisar även en händelse och konsekvensanalyser för en olycka på ett hangarfartyg i Nimitzklassen, med större källterm än för ubåten [14] [18]. Källtermen i SSM:s utökade händelse ger totalt ca. 13 gånger högre aktivitet per nuklid än vad som redovisas[7] för hangarfartyget, undantaget cesiumgruppen där källtermen ger ca. 3 gånger högre aktivitet eftersom inventariet för Cs-134 och Cs-136 justerats ned.

Även Strålsäkerhetscentralen i Finland (STUK) har genomfört en konsekvensanalys för olyckor med en rysk reaktordriven isbrytare utgående från antaganden om inventarium och utsläppsfraktioner från NKS[8]-studier om sådana fartyg [19]. Utsläppet av jod och cesium från isbrytaren i STUK:s analys är i paritet med motsvarande utsläpp för SSM:s utökade händelse. För övriga utsläppsgrupper är utsläppet i STUK:s arbete generellt sett större än källtermen för den utökade händelsen, exempelvis dubbelt så stort för ädelgaser.

3. Konsekvensanalys

3.1. Spridnings och dosberäkningar

SSM har genomfört spridnings- och dosberäkningar i Argos [20] för de valda händelserna med ett års historiska väderdata (jan 2015 – dec 2015) med utsläpp var 13:e timme. Totalt

[7] ARPANSA och DSA räknar med att fartyget flyttas efter 2 timmar. Jämförelsen här avser totalt utsläpp under 12 timmar.
[8] Nordic nuclear safety research (NKS), www.nks.org

omfattar analysen ca. 570 spridnings- och dosberäkningar. Metoden för spridnings- och dosberäkningarna beskrivs i detalj i bilagor till rapporterna *Översyn av beredskapszoner* [7] och *Strålskyddskonsekvenser av radioaktivt nedfall från kärnvapenexplosioner* [8].

Spridningsmodellen som använts i beräkningarna är Rimpuff med historiska meteorologiska data (HIRLAM E05) från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI). Beräkningsområdet sträcker sig mellan 5 och 300 km beroende på vald cellstorlek. Dosberäkningar har genomförts för 1-årigt barn och vuxna. Genomförda beräkningar sammanfattas i Tabell 3, där källtermen för den valda händelsen *förlust av kylning och läckage* benämns 1xSUB och den utökade händelsen 50xSUB.

Tabell 3. Genomförda spridnings- och dosberäkningar i konsekvensanalysen.

Källterm	Åldersgrupp	Beräkningsområde	Cellstorlek	Genomförda beräkningar
1xSUB	1-årigt barn	5x5 km^2	50x50 m^2	573
1xSUB	Vuxna	5x5 km^2	50x50 m^2	573
1xSUB	1-årigt barn	50x50 km^2	250x250 m^2	565
50xSUB	1-årigt barn	50x50 km^2	250x250 m^2	565
50xSUB	Vuxna	50x50 km^2	250x250 m^2	565
50xSUB	Vuxna	300x300 km^2	2x2 km^2	536

Från varje spridnings- och dosberäkning erhålls ett största avstånd från fartyget där ett givet kriterium överskrids. Genom att rangordna resultaten från alla beräkningar kan percentiler för största avstånd beräknas för varje kriterium. I detta arbete redovisas genomgående avstånd för 90:e percentilen (P_{90}). Det innebär att i 90 % av de analyserade väderfallen blir det största avståndet där kriteriet överskrids kortare, i 10 % av fallen längre.

Sedan ovanstående rapporter publicerats har SSM utvecklat spridningsberäkningarna som nu även ger största arealer i km^2 för varje kriterium som beräknas. Genom att på samma sätt som för avstånd genomföra en statistisk analys av arealer som påverkas i varje enskild spridningsberäkning går det att beräkna percentiler för påverkade areor. Även största areor redovisas i detta arbete på nivån 90:e percentilen.

Eftersom platsen för fartyget är okänd på förhand har SSM antagit att ubåten är på besök i en stad på svenska västkusten och ligger förtöjd i hamnen när händelsen inleds.

3.2. Doskriterier och åtgärdsnivåer

I SSM Rapport 2020:15 beskrivs strålskyddet för händelser i beredskapskategori 4, inklusive tillämpbara referensnivåer och doskriterier[9] [5]. Tillkommande doskriterier för reaktordrivna fartyg är kriterier kopplade sköldkörteldoser på grund av utsläpp av radioaktiv jod. Dessa doskriterier har hämtats från SSM:s beslutsstöd för svensk kärnkraftsolycka [21]. Utöver detta har här även doskriterier för medicinsk uppföljning av sköldkörteln på grund av allvarliga deterministiska hälsoeffekter[10] använts. Dessa doskriterier beskrivs i en rapport från Kunskapscentrum för strålningsmedicin vid katastrofer (KcRN) [22]. IAEA anger i GSR Part 7 [3] ett generiskt kriterium för

[9] Doskriterium är ett värde på den stråldos som en person kan erhålla om inga skyddsåtgärder tillgodoräknas. När ett doskriterium för en viss skyddsåtgärd överskrids eller riskerar att överskridas så innebär det i regel att skyddsåtgärden bör vidtas.
[10] Allvarliga deterministiska hälsoeffekter är tidiga hälsoeffekter som uppstår som en direkt följd av exponering för joniserande strålning och är så pass allvarliga att de är dödliga, livshotande eller resulterar i en bestående skada som försämrar livskvaliteten.

uppföljning uttryckt i RBE-viktad[11] absorberad dos till sköldkörteln. KcRN har i sina rekommendationer räknat om IAEA:s kriterium till absorberad dos (utan RBE-viktning). För att underlätta jämförelser redovisar SSM doskriterier och resultat kopplat till allvarliga deterministiska hälsoeffekter på sköldkörteln i absorberad dos. De absorberade och ekvivalenta sköldkörteldoserna antas ha samma numeriska värden [23].

Slutligen har 1000 mSv effektiv dos använts för att ge en indikation på var allvarliga deterministiska hälsoeffekter som inte kopplar till sköldkörteln skulle kunna uppstå [24]. Tabell 4 sammanfattar de doskriterier som använts i konsekvensanalysen.

Tabell 4. Doskriterier som använts i konsekvensanalysen.

Doskriterium	Effektiv dos	Sköldkörteldos
Allvarliga deterministiska hälsoeffekter (indikation)	1000 mSv, 7 dygn	
Utrymning	20 mSv, 7 dygn	
Inomhusvistelse	10 mSv, 7 dygn	
Utrymning på grund av markbeläggning	20 mSv, 1 år*	
Allvarliga deterministiska hälsoeffekter sköldkörteln (foster, barn)		4 Gy
Utdelning av jodtabletter		50 mSv

* Från det att signifikanta utsläpp har upphört till ett år från inledningen av olyckan.

Utifrån källtermen som redovisas i avsnitt 2.3 har SSM beräknat åtgärdsnivåer för utrymning på grund av markbeläggning som kan användas för att analysera resultat från spridningsberäkningarna. Beräkningen av åtgärdsnivåer har skett med SSM:s mjukvara DosCalc[12] och med antagande om att nuklidfördelningen på marken efter nedfall är densamma som i utsläppet. Undantaget är ädelgaserna som inte antas deponera på markytor. Med dessa förutsättningar krävs en markbeläggning på ca. 1,4 MBq/m^2 Cs-137 för att en oskyddad person (1-årigt barn) ska erhålla 40 mSv effektiv dos under ett år från hela nuklidvektorn. Med antagande om normal vistelse under året (80 % inomhus och 20 % utomhus), som antas halvera stråldosen, erhålls då 20 mSv effektiv dos från markbeläggningen under första året vilket motsvarar doskriteriet för utrymning på grund av markbeläggning. Nivån av Cs-137 kan skalas linjärt så att exempelvis 10 mSv effektiv dos erhålls vid halva koncentrationen på marken (700 kBq/m^2). Dessa åtgärdsnivåer redovisas i Tabell 5 och kan användas för att få en uppfattning om saneringsbehovet på samma sätt som anges i *Översyn av beredskapszoner* [7]. Motsvarande nivåer av markbeläggning för vuxna blir genomgående ca. 30 % högre och redovisas inte här.

Eftersom cesium och jod förekommer i utsläppet kan påverkan på livsmedelskedjan uppskattas med de åtgärdsnivåer för markörnuklider (Cs-137 och I-131) som redovisas i bilaga 1 till *Översyn av beredskapszoner* [7]. Åtgärdsnivåerna är i detta fall uppskattade nivåer av markbeläggning där gränsvärden[13] riskerar överskridas i respektive livsmedel. I de fall summan av cesiumisotoper använts som markörnuklid har åtgärdsnivån räknats om till enbart Cs-137 utifrån den föreliggande källtermen. Exempelvis anges åtgärdsnivån för mjölkprodukter som 10 kBq/m^2 för summan av Cs-134, Cs-136 och Cs-137 i bilaga 1 till *Översyn av beredskapszoner*, men anges här som 10 kBq/m^2 Cs-137. Enligt aktivitetsfördelningen i källtermen (avsnitt 2.3) antas Cs-137 stå för drygt 90 % av aktivitetssumman för de tre Cs-isotoperna direkt efter nedfall, men givet de stora osäkerheter som finns i den

[11] Olika strålslags relativa effektivitet att orsaka en specifik hälsoeffekt kan beräknas med s.k. RBE-viktning. RBE står för ”relative biological effectiveness”.
[12] version 1.3, dok. 20-914
[13] Europeiska rådets förordning (Euratom) 2016/52 [25]

här typen av analyser har summan av cesiumisotoperna antagits vara samma som aktivitetsnivån för enbart Cs-137 i konsekvensanalysen för livsmedelsproduktion. I Tabell 5 sammanfattas de åtgärdsnivåer för livsmedelsproduktion som använts i spridningsberäkningarna.

Tabell 5. Åtgärdsnivåer som använts i konsekvensanalysen. Nivåerna för utrymning på grund av markbeläggning och sanering är beräknade för ett 1-årigt barn. Livsmedelsnivåerna är beräknade mot EU:s vilande gränsvärden. I kolumnen för årsdos redovisas koppling till doskriterier.

Åtgärdsnivå	**Årsdos (mSv)**	**Åtgärdsnivå Cs-137 (kBq/m^2)**	**Åtgärdsnivå I-131 (kBq/m^2)**
Utrymning på grund av markbeläggning	20	1400	
	Sanering		
Enklare insatser* kan vara motiverade	1	70	
Enklare insatser är troligen motiverade	5	350	
Avancerade insatser kan vara motiverade	10	700	
Avancerade insatser är troligen motiverade	20	1400	
Avancerade insatser är troligtvis inte tillräckliga	50	3500	
	Livsmedel**		
Dricksvatten (låg/hög utspädning)		100 / 1000	100 / 1000
Mjölk		10	5
Nöt/lamm/ren		1	
Fläsk		10	
Vilt (låg/hög)		10 / 100	
Spannmål		10	
Bladgrönsaker		1	
Potatis		1000	

* Saneringsåtgärderna sammanfattas här, för en fullständig beskrivnings hänvisas till [7]

** Gränsvärden enligt rådets förordning [25] syftar till att hålla årsdosen från livsmedel under 1 mSv effektiv dos

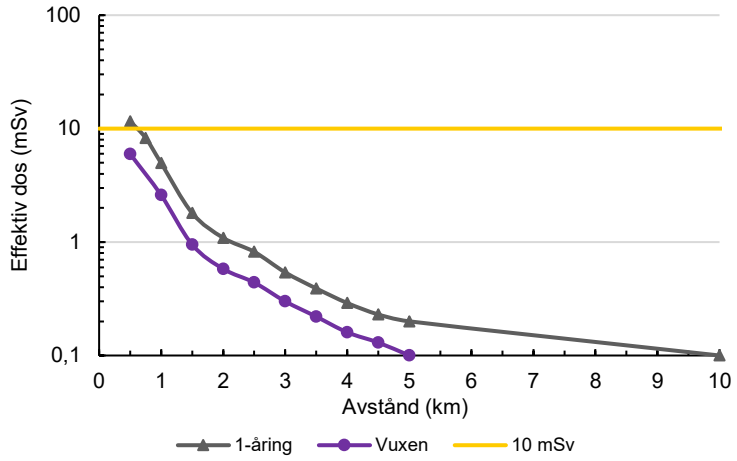
3.3. Beräkningsresultat

I detta avsnitt redovisas beräkningsresultat för händelsen med *förlust av kylning och läckage* samt för den utökade händelsen. Resultaten redovisas uppdelade i tre grupper: total effektiv dos, sköldkörteldos samt markbeläggning. För de första två grupperna redovisas resultaten för vuxna och 1-åriga barn i samma figur, medan för markbeläggning redovisas markörnukliderna Cs-137 och I-131 i samma figur.

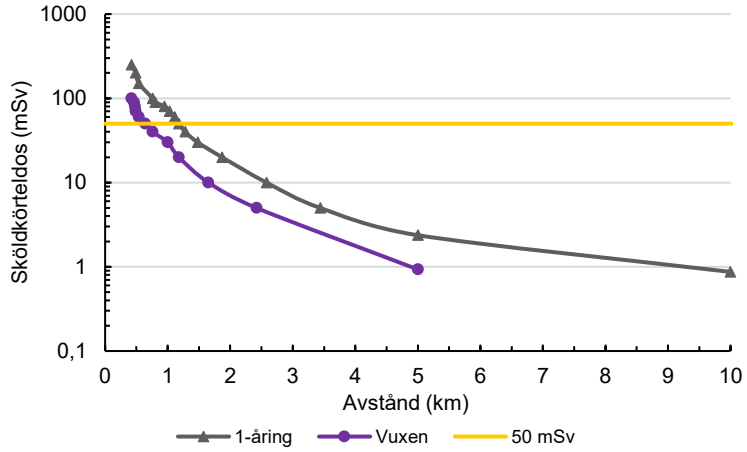
Genomgående redovisas endast 90:e percentiler för olika kriterier i resultaten, varför resultaten i detta avsnitt kan tolkas som att ”*i 90 % av väderfallen blir avståndet kortare än det redovisade resultatet*”. Samma percentil gäller också för de areor som redovisas i slutet av detta avsnitt.

3.3.1. Förlust av kylning och läckage

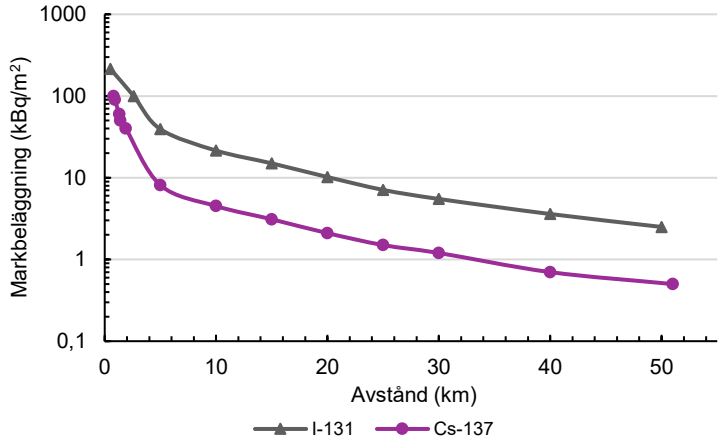
Total effektiv dos för händelsen *förlust av kylning och läckage* redovisas i Figur 2, sköldkörteldos i Figur 3 och markbeläggning i Figur 4.



Figur 2. Total effektiv dos (mSv) under sju dygn för 1-årigt barn (grå) och vuxen (lila) för händelsen med *förlust av kylning och läckage*. Nivån för doskriteriet för inomhusvistelse (10 mSv) är inlagd i figuren med en gul horisontell linje.



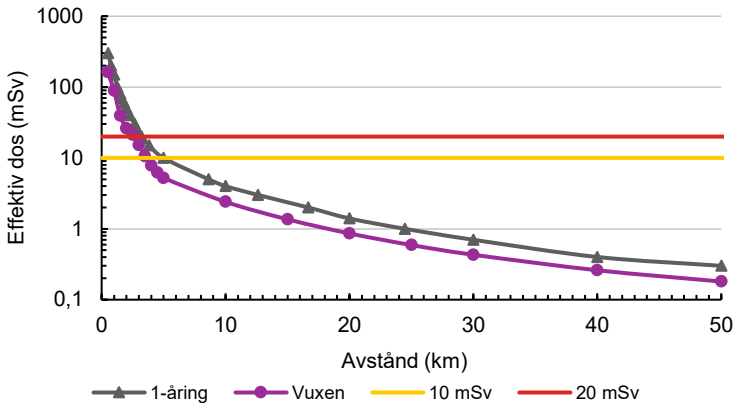
Figur 3. Ekvivalent dos till sköldkörteln (mSv) för 1-årigt barn (grå) och vuxen (lila) för händelsen med *förlust av kylning och läckage*. Nivån för doskriteriet för utdelning av jodtabletter (50 mSv) är inlagd i figuren med en gul horisontell linje.



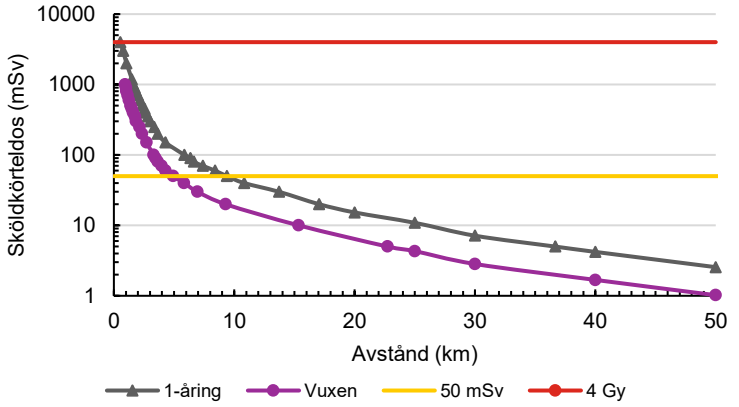
Figur 4. Markbeläggning (kBq/m^2) för I-131 (grå) och Cs-137 (lila) för händelsen med *förlust av kylning och läckage*.

3.3.2. Utökad händelse

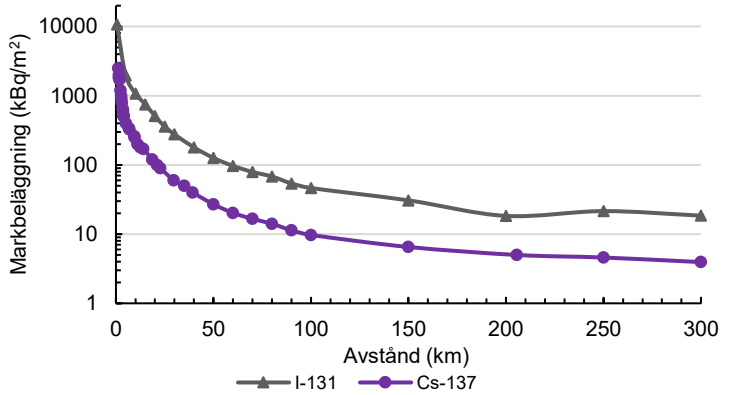
Resultaten från spridnings- och dosberäkningarna för den utökade händelsen redovisas för total effektiv dos i Figur 5, sköldkörteldos i Figur 6 samt markbeläggning i Figur 7.



Figur 5. Total effektiv dos (mSv) under sju dygn för 1-årigt barn (grå) och vuxen (lila) för den utökade händelsen. Nivåerna för doskriteriet för inomhusvistelse (10 mSv, gul) och utrymning (20 mSv, röd) är inlagda i figuren med horisontella linjer.



Figur 6. Ekvivalent dos till sköldkörteln (mSv) för 1-årigt barn (grå) och vuxen (lila) för den utökade händelsen. Nivån för doskriteriet för utdelning av jodtabletter (50 mSv) är inlagd i figuren (gul linje). Även doskriteriet för medicinsk uppföljning (4 Gy = 4 Sv till 1-årigt barn) är markerat (röd linje).



Figur 7. Markbeläggning (kBq/m^2) för I-131 (grå) och Cs-137 (lila) för den utökade händelsen.

3.4. Analys

I det följande avsnittet analyseras de radiologiska konsekvenserna utgående från spridnings- och dosberäkningarna för de två händelserna. För händelsens närområde (< 500 m) dras inga slutsatser om skyddsåtgärder då beräkningarna här påverkas av exempelvis byggnader, vilket riskerar att göra analysen alltför platsberoende för att stödja generella slutsatser.

3.4.1. Allvarliga deterministiska hälsoeffekter

Konsekvensanalysen för händelsen med *förlust av kylning och läckage* visar att inga allvarliga deterministiska hälsoeffekter kan förväntas i området utanför 500 m, även om inga skyddsåtgärder genomförs. Inget doskriterium för allvarliga deterministiska hälsoeffekter överskrids.

För den utökade händelsen kan doskriteriet 4 Gy till 1-årigt barn överskridas strax utanför 500 m från fartyget (Figur 6). Allvarliga deterministiska hälsoeffekter på sköldkörteln kan därför inte uteslutas. Avstånd där doskriteriet 4 Gy till foster överskrids antas bli något kortare än avståndet där 4 Gy till 1-årigt barn överskrids [26]. Resultat för gruppen foster redovisas därför inte separat utan kan konservativt antas vara identiska med resultaten för 1-årigt barn. Indikatorn för allvarliga deterministiska hälsoeffekter uttryckt i effektiv dos överskrids dock inte för händelsen (Figur 5).

3.4.2. Effektiv dos

Resultaten i Figur 2 för händelsen med *förlust av kylning och läckage* visar att doskriteriet för inomhusvistelse kan överskridas för 1-åriga barn ut till ca. 500 m avstånd från fartyget. För vuxna överskrids inte doskriteriet. Analysen av arealer visar också att det största området där doskriteriet överskrids är litet, väsentligt mindre än 1 km^2.

För den utökade händelsen (Figur 5) kan doskriteriet för utrymning överskridas för 1-åriga barn ut till ca. 3 km avstånd och inom ett område på ca. 1 km^2. Doskriteriet för inomhusvistelse överskrids ut till ca. 5 km. Analysen av arealer visar att det största området där doskriteriet för inomhusvistelse överskrids är ca. 2 - 3 km^2. För vuxna blir avstånden kortare och ytorna mindre.

Det är även intressant att för den utökade händelsen studera effektiva doser vid inomhusvistelse. SSM antar att inomhusvistelse reducerar stråldosen till hälften under utsläppsfasen. En sådan analys kan därför göras genom att i Figur 5 studera avståndet för den dubbla dosen. Avståndet där 10 mSv överskrids trots inomhusvistelse blir därmed detsamma som för utrymning enligt ovan. Kriteriet 40 mSv kan användas för att bedöma avstånd och områden där 20 mSv effektiv dos kan överskridas trots inomhusvistelse. Det kan ge en indikation på var inomhusvistelse inte räcker för att hålla doserna under 20 mSv. Därmed skulle andra alternativ såsom utrymning behöva övervägas istället. Detta avstånd blir för ett 1-årigt barn ca. 2 km inom ett område mindre än 1 km^2.

Resultat för effektiv dos sammanfattas i Tabell 6.

Tabell 6. Sammanfattning av största avstånd och största arealer för total effektiv dos första veckan. Samtliga resultat redovisas för 90:e percentilen. Ett '-' i tabellen indikerar att kriteriet inte överskrids.

Effektiv dos	Största avstånd	Största område
	Händelse med förlust av kylning och läckage	
10 mSv, 1-årigt barn	< 1 km	<< 1 km^2
10 mSv, vuxen	-	-
10 mSv trots inomhusvistelse, 1-årigt barn	-	-
	Utökad händelse	
10 mSv, 1-årigt barn	~ 5 km	~ 3 km^2
10 mSv, vuxen	~ 3 km	~ 2 km^2
20 mSv, 1-årigt barn	~ 3 km	~ 1 km^2
20 mSv, vuxen	~ 2 km	< 1 km^2
20 mSv trots inomhusvistelse, 1-årigt barn	~ 2 km	< 1 km^2
20 mSv trots inomhusvistelse, vuxen	~ 1 km	< 1 km^2

3.4.3. Sköldkörteldos

Resultaten i Figur 3 för händelsen med *förlust av kylning och läckage* visar att doskriteriet för utdelning av jodtabletter skulle kunna överskridas för ett 1-årigt barn inom drygt en kilometer från fartyget. För vuxna kan doskriteriet överskridas ut till ca. 600 m. Analysen av arealer visar att det största området där doskriteriet överskrids är mycket begränsat, väsentligt mindre än 1 km^2 för både barn och vuxna.

Det är även intressant att studera på vilket avstånd doskriteriet för utdelning av jodtabletter kan överskridas vid inomhusvistelse. Eftersom SSM antar att inomhusvistelse reducerar stråldosen till hälften under utsläppsfasen kan detta göras genom att i Figur 3 studera avståndet för det dubbla kriteriet, 100 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln. Det största avståndet där sköldkörteldoser överskrider 50 mSv trots inomhusvistelse blir då ca. 700 m för ett 1-årigt barn inom ett mycket begränsat område (<< 1 km^2). För vuxna överskrids inte doskriteriet vid inomhusvistelse.

För den utökade händelsen (Figur 6) är det största avståndet där sköldkörteldoser överskrider 50 mSv för barn ca. 9 km (areal ca. 11 km^2) medan det för vuxna är ca. 5 km (areal ca. 3 km^2). Under förutsättningar att inomhusvistelse kan genomföras blir dessa avstånd kortare, ca. 6 km för barn (areal ca. 4 km^2) och ca. 3 km för vuxna (areal ca. 1 km^2).

Resultat för sköldkörteldos sammanfattas i Tabell 7.

Tabell 7. Sammanfattning av största avstånd och största arealer för ekvivalent dos till sköldkörteln. Samtliga resultat redovisas för 90:e percentilen. Ett '-' i tabellen indikerar att kriteriet inte överskrids.

Sköldkörteldos	Största avstånd	Största område
	Händelse med förlust av kylning och läckage	
50 mSv, 1-årigt barn	~ 1 km	<< 1 km^2
50 mSv, vuxen	< 1 km	<< 1 km^2
50 mSv trots inomhusvistelse, 1-årigt barn	< 1 km	<< 1 km^2
50 mSv trots inomhusvistelse, vuxen	-	-
	Utökad händelse	
50 mSv, 1-årigt barn	~ 9 km	~ 11 km^2
50 mSv, vuxen	~ 5 km	~ 3 km^2
50 mSv trots inomhusvistelse, 1-årigt barn	~ 6 km	~ 4 km^2
50 mSv trots inomhusvistelse, vuxen	~ 3 km	~ 1 km^2

3.4.4. Markbeläggning

Resultaten i Figur 4 visar att en markbeläggning av I-131 på 100 kBq/m^2 skulle kunna uppstå ut till ca. 3 km medan 100 kBq/m^2 Cs-137 skulle kunna uppstå inom den närmsta kilometern från fartyget. Sammantaget visar analysen att behov av utrymning på grund av markbeläggning inte kan uppstå för händelsen med *förlust av kylnings och läckage* och att saneringsbehovet blir begränsat. Utanför den närmsta kilometern förväntas stråldoserna från markbeläggning på ett års sikt vara låga (< 1 mSv). Avståndet där saneringsinsatser kan vara motiverade är därför också begränsade till ca. 1 km från fartyget.

Påverkan på livsmedelskedjan skulle dock kunna uppstå på större avstånd, mycket beroende på typ av livsmedel.

Resultaten för markbeläggning för händelsen med *förlust av kylnings och läckage* sammanfattas i Tabell 8.

Tabell 8. Sammanfattning av största avstånd och största arealer där åtgärdsnivåer överskrids på grund av markbeläggning för händelsen *förlust av kylning och läckage*. Samtliga resultat redovisas för 90:e percentilen. Ett '-' i tabellen indikerar att kriteriet inte överskrids.

Åtgärdsnivå	Största avstånd	Största område
Utrymning på grund av markbeläggning	-	-
	Sanering	
Enklare insatser kan vara motiverade	~ 1 km	<< 1 km^2
Enklare insatser är troligen motiverade	-	-
Avancerade insatser kan vara motiverade	-	-
Avancerade insatser är troligen motiverade	-	-
Avancerade insatser är troligtvis inte tillräckliga	-	-
	Livsmedel	
Dricksvatten, hög utspädning (I-131)	-	-
Dricksvatten, låg utspädning (I-131)	~ 1 km	< 1 km^2
Dricksvatten, hög utspädning (Cs-137)	-	-
Dricksvatten, låg utspädning (Cs-137)	-	-
Mjölk (I-131)	~ 20 km	~ 25 km^2
Nöt/lamm/ren (Cs-137)	~ 20 km	~ 25 km^2
Fläsk (Cs-137)	~ 3 km	< 1 km^2

	Livsmedel (forts.)	
Vilt, hög (Cs-137)	-	-
Vilt, låg (Cs-137)	~ 3 km	< 1 km^2
Spannmål (Cs-137)	~ 3 km	< 1 km^2
Bladgrönsaker (Cs-137)	~ 20 km	~ 25 km^2
Potatis (Cs-137)	-	-

För den utökade händelsen kan behov av utrymning på grund av markbeläggning uppstå inom ett mindre område (< 1 km^2) ut till ca. 2 km från fartyget. Saneringsbehov skulle kunna uppstå på avstånd från enstaka till tiotals kilometer, beroende på nivån på åtgärden. Resultaten i Figur 7 visar även att påverkan på livsmedelskedjan skulle kunna uppstå på stora avstånd, men att det varierar mycket beroende på typ av livsmedel.

Resultaten för markbeläggning för den utökade händelsen sammanfattas i Tabell 9.

Tabell 9. Sammanfattning av största avstånd och största arealer där åtgärdsnivåer överskrids på grund av markbeläggning för den utökade händelsen. Samtliga resultat redovisas för 90:e percentilen. Ett '-' i tabellen indikerar att kriteriet inte överskrids.

Åtgärdsnivå	**Största avstånd**	**Största område**
Utrymning på grund av markbeläggning	~ 2 km	< 1 km^2
	Sanering	
Enklare insatser kan vara motiverade	~ 25 km	~ 70 km^2
Enklare insatser är troligen motiverade	~ 7 km	~ 4 km^2
Avancerade insatser kan vara motiverade	~ 3 km	~ 1 km^2
Avancerade insatser är troligen motiverade	~ 2 km	< 1 km^2
Avancerade insatser är troligtvis inte tillräckliga	-	-
	Livsmedel	
Dricksvatten, hög utspädning (I-131)	~ 11 km	~ 12 km^2
Dricksvatten, låg utspädning (I-131)	~ 70 km	~ 340 km^2
Dricksvatten, hög utspädning (Cs-137)	~ 3 km	< 1 km^2
Dricksvatten, låg utspädning (Cs-137)	~ 20 km	~ 40 km^2
Mjölk (I-131)	> 300 km	*
Nöt/lamm/ren (Cs-137)	> 300 km	*
Fläsk (Cs-137)	~ 140 km	~ 800 km^2
Vilt, hög (Cs-137)	~ 20 km	~ 40 km^2
Vilt, låg (Cs-137)	~ 140 km	~ 800 km^2
Spannmål (Cs-137)	~ 140 km	~ 800 km^2
Bladgrönsaker (Cs-137)	> 300 km	*
Potatis (Cs-137)	~ 3 km	< 1 km^2

* För kriterier som överskrider beräkningsområdets storlek (300 km) anges ingen area

3.4.5. Jämförelse med andra analyser

Eftersom SSM använt samma grundhändelse och i stort sett samma källterm som ARPANSA i Australien [14] och DSA i Norge [17] kan en jämförelse med dessa studier vara intressant. DSA har i sin analys använt Argos och historiskt väder medan ARPANSA har använt en enklare Gaussisk spridningsmodell med antagande om stabilitetsklass (Pasquillklass F) under de första 12 timmarna, vilket ger en låg vindhastighet på 1 m/s. Beräknade doser förväntas typiskt sett bli högre längs centerlinjen i en Gaussmodell med dessa antaganden än med detaljerade spridningsberäkningar med historiskt väder.

Resultaten för effektiv dos i Figur 2 är i linje med DSA:s konsekvensanalys för motsvarande åldersgrupp (vuxna) och percentil. I DSA:s arbete överskrids doskriteriet för inomhusvistelse ut till ca. en kilometer för 95:e percentilen medan det inte överskrids för mediandosen (P_{50}). DSA redovisar total effektiv dos under 2 dygn, dvs. under något kortare tid än i föreliggande arbete. I detta arbete redovisas genomgående 90:e percentilen och doskriteriet överskrids inte för vuxna.

Resultaten för sköldkörteldos i Figur 3 är också i linje med DSA:s resultat för motsvarande åldersgrupp (1-årigt barn) och percentil. I DSA:s arbete överskrids 50 mSv sköldkörteldos ut till ca. 3 km för 95:e percentilen medan det överskrids ut till ca. 700 - 800 m för mediandosen. I detta arbete är P_{90} för 50 mSv sköldkörteldos ca. en kilometer från fartyget. SSM bedömer överlag att resultaten både för effektiv dos och sköldkörteldos är i god överensstämmelse med tanke på att olika platser använts i studierna, vilket kan förväntas påverka resultaten.

I ARPANSA:s arbete överskrids 10 mSv effektiv dos under första dygnet för vuxna på ca. 900 m. I detta arbete överskrids inte 10 mSv under första veckan för vuxna på nivån P_{90}. Sköldkörteldoserna för 1-årigt barn redovisas i ARPANSAS arbete som ca. 200 mSv ekvivalent dos på 1 km avstånd, vilket kan jämföras med ca. 50 mSv på samma avstånd i föreliggande arbete för P_{90}.

Sammantaget visar jämförelserna god överensstämmelse mellan DSA:s och SSM:s beräkningar medan ARPANSA:s ger något högre stråldoser. Som tidigare nämnts beror dessa skillnader sannolikt till största del på olika spridningsmodeller och antaganden om stabilitetsklass.

Slutligen kan en jämförelse mellan resultaten för den utökade händelsen och STUK:s arbete [19] för en rysk reaktordriven isbrytare vara intressant eftersom källtermerna konstaterats vara i samma storleksordning gällande jod och cesium. STUK har beräknat 95:e percentilen för stråldoser vid en händelse på tre olika platser: Barents hav, Finska viken och Tromsö med ett års historiskt väder. STUK anger att 10 mSv respektive 20 mSv effektiv dos till vuxna överskrids på ca. 3 km respektive 2 km, vilket är samma avstånd som i detta arbete (Tabell 6). Vidare anger STUK att 100 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln för vuxna överskrids på 3 till 5 km beroende på plats, vilket är i god överensstämmelse med vad som anges i Tabell 7 (50 mSv trots inomhusvistelse för vuxna, 3 km).

4. Behov av skyddsåtgärder

I följande avsnitt redovisas behov av skyddsåtgärderna utrymning, inomhusvistelse, utdelning av jodtabletter, åtgärder inom livsmedelsproduktion samt sanering utifrån resultaten i konsekvensanalysen.

4.1. Utrymning

Konsekvensanalysen för händelsen med *förlust av kylning och läckage* visar att utrymning inte behövs av radiologiska skäl i området utanför 500 m från fartyget.

Analysen av den utökade händelsen ger stöd för att utrymning kan vara motiverad vid ett större utsläpp. Sköldkörteldoserna på ca. 500 meters avstånd från fartyget kan bli så pass höga att allvarliga deterministiska hälsoeffekter hos 1-åriga barn och foster inte kan uteslutas. Även på avstånd inom någon kilometer kan sköldkörteldoserna bli så pass höga att långtgående åtgärder såsom utrymning av riskgrupperna barn och gravida kan vara motiverade.

Utifrån resultatet drar SSM slutsatsen att för den utökade händelsen kan ett riktvärde för utrymning vara ca. 2 km från fartyget för alla åldersgrupper. På det avståndet kan 20 mSv effektiv dos till 1-årigt barn överskridas trots inomhusvistelse. Det är i sammanhanget värt att påpeka att ”utrymning” i det här fallet skulle kunna avse avspärrning till sjöss runt fartyget. Sjötrafiken skulle då avledas runt platsen för en eventuell nödhamn (skyddad plats). På så sätt kan även avståndet till närmsta bebyggelse eller tätort vägas in vid anvisning av nödhamn. Avståndet för utrymning analyseras mer i avsnitt 6.

4.2. Inomhusvistelse

För händelsen med *förlust av kylning och läckage* kan doskriteriet för inomhusvistelse överskridas ut till ca. 500 m för ett 1-årigt barn. Genom inomhusvistelse kan doserna antas halveras under utsläppsfasen. Att planera för inomhusvistelse genom VMA i närområdet kan därför vara motiverat med tanke på att det är en av få skyddsåtgärder som snabbt bör gå att genomföra då platsen är okänd på förhand. Utifrån den genomförda konsekvensanalysen i föreliggande arbete rekommenderar SSM inomhusvistelse inom ett avstånd på ca. 1 km från fartyget.

Den utökade händelsen ger stöd för att inomhusvistelse kan vara motiverat på större avstånd. Resultaten visar att för denna händelse räcker inomhusvistelse ut till ca. 5 km för riskgrupperna barn och gravida (i syfte att skydda fostret) och ca. 3 km för vuxna för att hålla effektiva doser låga. Inomhusvistelse med hänsyn till effektiv dos är dock inte alltid tillräcklig för att fullt ut skydda sköldkörteln, i synnerhet hos riskgrupperna. För den utökade händelsen kan inomhusvistelse i syfte att skydda sköldkörteln vara motiverad ut till ca. 9 km för barn och gravida och till ca. 5 km för vuxna. Utifrån konsekvensanalysen rekommenderar SSM inomhusvistelse inom ca. 10 km från fartyget för den utökade händelsen.

Även om det på strålskyddsmässiga grunder skulle kunna vara olika avstånd för inomhusvistelse för riskgrupperna barn och gravida respektive vuxna, kan det av andra skäl (exempelvis kommunikativa aspekter) vara lämpligt att rekommendera inomhusvistelse för alla. En sådan rekommendation baseras då på vad som är motiverat för riskgrupperna. Inom kärnenergiberedskapen pågår en diskussion om huruvida det kan vara lämpligt och görbart

att rekommendera inomhusvistelse enbart för riskgrupper inom ett visst område. Slutsatserna från en sådan diskussion är sannolikt tillämpbara även i planeringen för en händelse med ett reaktordrivet fartyg.

4.3. Jodtabletter

För händelsen med *förlust av kylning och läckage* kan doskriteriet för utdelning av jodtabletter (50 mSv sköldkörteldos) överskridas inom ca. 1 km för ett 1-årigt barn. Genom inomhusvistelse kan detta avstånd ytterligare begränsas.

För den utökade händelsen är avståndet där 50 mSv sköldkörteldos kan överskridas trots inomhusvistelse ca. 6 km. Detta resultat motiverar ett ställningstagande gällande jodtabletter för denna händelse.

Om utdelning av jodtabletter

Sammantaget bedömer SSM att det här inte är motiverat att planera för att dela ut jodtabletter till allmänheten i beredskapssyfte för en händelse med ett reaktordrivet fartyg där platsen är okänd på förhand, vare sig genom förhandutdelning längs Sveriges kuststräcka eller genom utdelning i samband med en händelse. Den strålskyddsmässiga nyttan bedöms vara förhållandevis liten i förhållande till effektivitet, kostnad och genomförbarhet för ett sådant alternativ.

Denna bedömning gäller för en händelse med ett reaktordrivet fartyg där platsen är okänd på förhand. Som tidigare påpekats behövs särskild beredskapsplanering om en mottagningsplats för fartyget finns utsedd på förhand. Där skulle jodtabletter kunna vara en viktig komponent i beredskapsplaneringen.

Ett specialfall finns då det handlar om en olycka i anslutning till beredskapszonerna kring kärnkraftverken där jodtabletter finns förhandsutdelade. För det fall olyckan sker inom ett sådan område skulle det i optimeringssyfte kunna vara motiverat med en rekommendation för barn och gravida av ett intag av jodtabletter[14] inom ca. 3 km (och för den utökad händelsen ca. 25 km för barn och gravida). För vuxna är inomhusvistelse tillräckligt för att också skydda sköldkörteln utom för den utökade händelsen där det skulle kunna vara motiverat att inta jodtabletter ut till ca. 5 km.

4.4. Åtgärder inom livsmedelsproduktion och sanering

Avstånd och arealer där saneringsåtgärder skulle kunna behövas och där gränsvärden enligt rådets förordning (Euratom) 2016/52 skulle kunna överskridas anges i Tabell 8 för händelsen med *förlust av kylning och läckage*. För den utökade händelsen finns motsvarande i Tabell 9.

I övrigt gör SSM inga ytterligare analyser eller bedömningar kopplat till sanering eller åtgärder inom livsmedelsproduktion i denna rapport.

[14] För intag av förhandsutdelade jodtabletter används doskriteriet 10 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln för barn och gravida. Av Figur 3 framgår att avståndet där 10 mSv kan överskridas för händelsen med *förlust av kylning och läckage* är ca. 2,5 km. För den utökade händelsen blir detta avstånd enligt Figur 6 ca. 25 km för 1-årigt barn.

5. Slutsatser för beredskapsplaneringen

Ett underlag till planering för skyddsåtgärder sammanfattas här för en händelse på ett reaktordrivet fartyg och de två fallen *förlust av kylning och läckage* samt för en utökad händelse. Planeringsunderlaget baseras på möjliga radiologiska konsekvenser och behov av skyddsåtgärder som redovisats i föregående avsnitt.

5.1. Händelse med förlust av kylning och läckage

Förslaget till beredskapsplanering delas här in i två faser, beroende på om det skett ett utsläpp av radioaktiva ämnen eller inte.

Inledningsvis (innan och under utsläpp)

- Inomhusvistelse ca. 1 km från fartyget (barn och gravida)
- Åtgärder inom livsmedelsproduktionen inom möjligt påverkat område där gränsvärden riskerar överskridas
- Information till allmänheten om hur oavsiktligt intag kan minskas inom möjligt påverkat område

Som tidigare nämnts bör inomhusvistelse omfatta riskgrupperna barn och gravida men skulle även kunna omfatta vuxna, beroende på vad som anses vara lämpligt utifrån exempelvis kommunikativa aspekter. Spridningsprognoser för uppskattning av möjligt påverkat område samt rådgivning om skyddsåtgärder kan erhållas från SSM.

Därefter (efter utsläpp)

- Kartering med strålningsmätningar efter nedfall för att identifiera faktiskt påverkade områden i syfte att:
    - Utesluta behov av utrymning på grund av markbeläggning
    - Ta fram underlag för vidare beslut om skyddsåtgärder, inklusive information om att leva i ett kontaminerat område och sanering
- Fortsatta åtgärder inom livsmedelsproduktion för att säkerställa att gränsvärden inte överskrids

Stöd i form av resurser för strålningsmätningar och rådgivning kan erhållas från SSM för att identifiera faktiskt påverkade områden för dessa skyddsåtgärder. Planeringsunderlag för strålningsmätningar som finns framtaget inom kärnenergiberedskapen kan användas även för denna händelse [27].

5.2. Utökad händelse

För den utökade händelsen ges ett förslag till beredskapsplanering på samma sätt.

Inledningsvis (innan och under utsläpp)

- Utrymning eller avspärrning till sjöss, minst ca. 2 km från fartyget
- Inomhusvistelse inom möjligt påverkat område ut till ca. 10 km från fartyget
- Åtgärder inom livsmedelsproduktionen inom möjligt påverkat område där gränsvärden riskerar överskridas
- Information till allmänheten om hur oavsiktligt intag kan minskas inom möjligt påverkat område

Som tidigare nämnts bör inomhusvistelse ut till ca. 10 km omfatta riskgrupperna barn och gravida. Avståndet skulle kunna begränsas till ca. 5 km för vuxna, beroende på vad som anses vara lämpligt utifrån exempelvis kommunikativa aspekter. Spridningsprognoser för uppskattning av möjligt påverkade områden samt rådgivning om skyddsåtgärder kan erhållas från SSM.

Därefter (efter utsläpp)

- Kartering med strålningsmätningar efter nedfall för att identifiera faktiskt påverkade områden i syfte att:
    - Identifiera behov av utrymning på grund av markbeläggning
    - Ta fram underlag för vidare beslut om skyddsåtgärder, inklusive information om att leva i ett kontaminerat område och sanering
- Fortsatta åtgärder inom livsmedelsproduktion för att säkerställa att gränsvärden underskrids

Stöd i form av resurser för strålningsmätningar och rådgivning kan erhållas från SSM för att identifiera faktiskt påverkade områden för dessa skyddsåtgärder. Planeringsunderlag för strålningsmätningar som finns framtaget inom kärnenergiberedskapen kan användas även för denna händelse [27].

6. Dos efter skyddsåtgärder

I detta avsnitt analyseras vilka stråldoser som kan uppstå om de skyddsåtgärder som rekommenderats i avsnitt 5 genomförs framgångsrikt i samband med en händelse. Analysen syftar till att visa att referensnivån[15] för allmänheten i strålskyddsförordningen för händelsen i fråga, 20 mSv effektiv dos under det första året, kan underskridas med dessa rekommendationer.

Stråldoserna från oavsiktligt intag och livsmedel förväntas bli låga, i storleksordningen 1 mSv effektiv dos under det första året och analyseras därför inte vidare här.

[15] Strålskyddsförordning (2018:506), 3 kap. 8 § 2

6.1. Händelse med förlust av kylning och läckage

I och med att ingen utrymning genomförs blir möjliga stråldoser för en individ generellt sett högre ju närmare fartyget denne befinner sig. Som nämnts ovan analyseras endast möjliga stråldoser på avstånd större än 500 m i detta arbete. Ett 1-årigt barn som vistas inomhus 500 m från fartyget under den första veckan, inklusive under hela utsläppsförloppet, erhåller en total effektiv dos på ca. 6 mSv. Nästa grupp som behöver beaktas är ett oskyddat barn som vistas utomhus strax utanför området där inomhusvistelse rekommenderats (ca. 1 km). Detta barn får en total effektiv dos på ca. 5 mSv under den första veckan. För vuxna är de erhållna doserna lägre. De förväntade effektiva doserna blir alltså låga för händelsen även då ett förhållandevis konservativt väderfall valts. I 90 % av fallen blir doserna lägre än de värden som redovisas här.

Istället är det sköldkörteldoser som blir gränssättande. Ett 1-årigt barn som vistas inomhus på 500 m avstånd får ca. 100 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln, medan ett barn som vistas utomhus på 1 km avstånd får ca. 70 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln.

Som framgår av Tabell 8 i avsnitt 3.4.4 kan den effektiva dosen från markbeläggning under det första året bli i storleksordningen 1 mSv för ett 1-årigt barn som lever normalt i det område där inomhusvistelse rekommenderats under händelsens inledning.

Sammantaget kan referensnivån 20 mSv årlig effektiv dos underskridas även utan skyddsåtgärder men inomhusvistelse bör rekommenderas för att optimera strålskyddet, inte minst för att skydda sköldkörteln hos riskgrupper.

6.2. Utökad händelse

Om utrymning eller avspärrning genomförs så att ingen ur allmänheten vistas inom området närmast fartyget blir det istället en person som vistas inomhus precis utanför det utrymda området som får den högsta stråldosen. Tabell 10 sammanfattar några olika utfall beroende på avståndet inom vilket utrymning eller avspärrning kan genomföras. Nästa grupp som behöver beaktas är ett oskyddat barn som vistas utomhus precis utanför området där inomhusvistelse rekommenderats. Som framgår av parenteserna i Tabell 10 blir denna grupp aldrig gränssättande.

Tabell 10. Högsta dos efter skyddsåtgärder under den första veckan för den utökade händelsen beroende på var utrymning eller avspärrning kan genomföras. Siffror inom parentes redovisar på vilket avstånd den person som får högst dos befinner sig. Värden avrundade till närmaste mSv.

Kombination av skyddsåtgärder	Effektiv dos efter skyddsåtgärder	Sköldkörteldos efter skyddsåtgärder
	1-årigt barn	
Utrymning 1 km, inomhusvistelse 10 km	75 mSv (1 km)	1000 mSv (1 km)
Utrymning 2 km, inomhusvistelse 10 km	20 mSv (2 km)	350 mSv (2 km)
Utrymning 5 km, inomhusvistelse 10 km	5 mSv (5 km)	60 mSv (5 km)
	Vuxen	
Utrymning 1 km, inomhusvistelse 5 km	44 mSv (1 km)	450 mSv (1 km)
Utrymning 2 km, inomhusvistelse 5 km	13 mSv (2 km)	140 mSv (2 km)
Utrymning 5 km	5 mSv (5 km)	47 mSv (5 km)

Även för den utökade händelsen är det sköldkörteldoser som blir gränssättande. Ett 1-årigt barn som vistas inomhus på 2 km avstånd från fartyget under hela utsläppsförloppet kan erhålla ca. 350 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln under den första veckan, medan ett barn som vistas utomhus på 10 km avstånd kan erhålla ca. 50 mSv ekvivalent dos till sköldkörteln.

Sammantaget kan referensnivån 20 mSv årlig effektiv dos underskridas även för den utökade händelsen om utrymning eller avspärrning kan genomföras ut till 2 km innan utsläpp. Detta bör därför vara ambitionsnivån i planeringen. Om ytterligare utrymning eller avspärrning är möjlig, exempelvis genom att fartyget hänvisas eller bogseras till en plats längre ut från befolkningscentra, blir möjliga stråldoser lägre. Som framgår av Tabell 10 kan 5 km då vara ett lämpligt alternativt avstånd att överväga. På detta avstånd blir effektiva doser låga och sköldkörteldoserna till 1-årigt barn i paritet med de lägre doskriterier för sköldkörteldos (50 mSv) som anges i Tabell 4.

En jämförelse mellan dos efter skyddsåtgärder för den utökade händelsen och en allvarlig kärnkraftsolycka kan vara intressant. SSM har i beslutsstödet för en svensk kärnkraftsolycka beräknat möjliga doser efter skyddsåtgärder [21]. Jämförelsen visar att möjliga effektiva doser blir lägre än efter en allvarlig kärnkraftsolycka. Förslaget till beredskapsplanering för den utökade händelsen som redovisas i avsnitt 5.2 kan leda till sköldkörteldoser efter skyddsåtgärder som är i nivå med motsvarande doser efter en kärnkraftsolycka. Med tanke på förutsättningarna för denna typ av händelse – att hantera en olycka på ett reaktordrivet fartyg där platsen är okänd på förhand – anser SSM att en liknande ambitionsnivå som för allvarliga kärnkraftsolyckor är acceptabel.

Efter den första veckan kan dosen från markbeläggning under resterande del av första året bli ca. 3-15 mSv för ett 1-årigt barn som lever normalt i det område där inomhusvistelse rekommenderats under händelsens inledning. Med beaktande av eventuella informations- och saneringsinsatser under det första året bör dessa doser gå att minska väsentligt. Tillsammans med dosen under första veckan som redovisas ovan i Tabell 10 ger detta en total stråldos över referensnivån under det första året, men givet de osäkerheter och konservativa antaganden som gjorts i beräkningarna är det rimligt att anta att referensnivån under första året ändå kan underskridas. SSM menar därför att underlaget till beredskapsplanering för den utökade händelsen som redovisas i avsnitt 5.2 utgör ett acceptabelt alternativ som är i linje med planeringen för kärnenergiberedskapen.

Referenser

[1] Förordning (2008:452) med instruktion för Strålsäkerhetsmyndigheten.

[2] Förordning (2003:789) om skydd mot olyckor.

[3] Internationella atomenergiorganet (IAEA), ”Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSR Part 7,” 2015.

[4] Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om grundläggande bestämmelser för tillståndspliktig verksamhet med joniserande strålning, SSMFS 2018:1.

[5] Strålsäkerhetsmyndigheten, ”Rapport 2020:15 Strålskydd vid radiologiska nödsituationer - Planeringsunderlag för händelser där platsen är okänd på förhand,” 2020.

[6] Strålsäkerhetsmyndigheten, ”Risk- och sårbarhetsbedömning (SSM2024-1300),” 2024.

[7] Strålsäkerhetsmyndigheten, ”Rapport 2017:27 Översyn av beredskapszoner,” 2017.

[8] Strålsäkerhetsmyndigheten, ”Rapport 2023:05 Strålskyddskonsekvenser av radioaktivt nedfall från kärnvapenexplosioner,” 2023.

[9] World Nuclear Association, ”https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx,” läst 2026-01-14.

[10] ”https://www.asa.gov.au/aukus,” Läst 2026-01-14.

[11] Internationella atomenergiorganet (IAEA), Power Reactor Information System, ”https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=531,” Läst 2026-01-14.

[12] Internationella atomenergiorganet (IAEA), Power Reactor Information System, ”https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=157,” Läst 2026-01-14.

[13] DSA m.fl., ”Arctic REIHN - Final Evaluation Report,” 2023.

[14] ARPANSA, ”The 2000 Reference Accident Used to Assess the Suitability of Australian Ports for Visits by Nuclear Powered Warships,” Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2000.

[15] N. Syed Ul och H. Mattsson, ”Determining the source term for a hypothetical nuclear submarine using “ORIGEN” and “ACCIDENT” codes, Tekniskt dokument nr. 30,” Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet, 2024.

[16] L. Soffer, S. Burson, C. Ferrell, R. Lee och J. Ridgely, ”Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants (NUREG-1465),” U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1995.

[17] H. Thørring och E. Améen, ”Konsekvensvurderinger for scenarier knyttet til anløp av reaktordrevne fartøy til Grøtsund, Teknisk dokument nr. 20,” Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet, 2021.

[18] H. Thørring, T. Gäfvert och Ø. G. Selnæs, ”Konsekvensvurdering knyttet til generisk anløp av reaktordrevet hangarskip til Oslo havn. Teknisk dokument nr. 26,” Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet, 2023.

[19] M. Voutilainen, T. Peltonen, A. Mattila och A. Tanskanen, ”Consequence assessment of nuclear-powered vessel accidents and floating nuclear power plant transit accidents in the Arctic region, STUK-A 269,” Strålsäkerhetscentralen, 2023.

[20] 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.

[21] Strålsäkerhetsmyndigheten, "Beslutsstöd vid olycka i ett svenskt kärnkraftverk, version 2.0 (SSM2022-8091)," 2022.

[22] Kunskapscentrum för Strålningsmedicin vid Katastrofer (KcRN), "Rekommendationer för medicinsk uppföljning av tyreoidea vid kärnkraftsolycka," 2025.

[23] Internationella atomenergiorganet (IAEA), "Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor," 2013.

[24] Internationella strålskyddskommissionen (ICRP), "Publication 103 - The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," 2007.

[25] Rådets förordning (Euratom) 2016/52 av den 15 januari 2016, "om gränsvärden för radioaktiva ämnen i livsmedel och foder efter en kärnenergiolycka eller annan radiologisk nödsituation och om upphävande av rådets förordning (Euratom) nr 3954/87 och kommissionens förordningar (Euratom) nr 944/89 och (Euratom) nr 770/9".

[26] Strålsäkerhetsmyndigheten, "Behov av sköldkörtelmätningar vid kärnkraftsolycka (rev 1) (SSM2024-13970-2)," 2025.

[27] Strålsäkerhetsmyndigheten, "Regionala strålningsmätningar i samband med en svensk kärnkraftsolycka (SSM2020-4331-23)," 2022.

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

Scandinavian Print Group Sweden AB, 2026