



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

FORSKNING/STUDIE

Återställning av förorenade områden efter en RN-olycka

Samhällets problem och hur bästa
kombination av långsiktiga åtgärder kan
väljas för att skydda människor i bebyggda
miljöer mot bestrålning

Återställning av förorenade områden efter en RN-olycka: Samhällets problem och hur bästa kombination av långsiktiga åtgärder kan väljas för att skydda människor i bebyggda miljöer mot bestrålning

Tidsperiod: 2018-2021

Utförare: Lunds universitet, Göteborgs universitet, Örebro universitet

Ansvarig: Christopher Rääf

Det övergripande syftet med projektet är att studera vilka faktorer som påverkar om storskalig sanering är berättigad som skyddsåtgärd i ett område som drabbats av nedfall från en kärnteknisk olycka. De sammanfattande resultaten av projektet är att sanering kan möjliggöra tidigare återflytt till utrymda områden, och att kostnader förknippade med psykosociala faktorer i högre grad avgör berättigandet av sanering än avstyrd stråldos.

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

MSB:s Kontaktpersoner: Pelle Postgård, 010-2405900 Cecilia Möller, 010-2405900

Text: Christopher Rääf, Johan Martinsson, Robert Finck

Tryck: DanagårdLiTHO

Publ. nr: MSB1936 – februari 2022

ISBN: 978-91-7927-249-4

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport (alt. studierapport). Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll.

Förord

Detta projekt har syftat till att ge svenska myndigheter och beslutsfattare en beskrivning av samhällets problem efter ett kraftigt nedfall av långlivade radioaktiva ämnen och hur den bästa kombinationen av åtgärder kan väljas för att skydda människor mot bestrålning med hänsyn till ekonomiska, sociala och samhälleliga faktorer. Arbetet med att återställning av ett tätortsområde som berörts av en omfattande radioaktiv beläggning från en kärnteknisk olycka är en process som kan ta många år i anspråk. Initial krishantering av myndigheterna kommer successivt behöva övergå till långsiktig kontinuerlig riskhantering av de personer som väljer att stanna kvar eller flytta tillbaka till det drabbade området. Denna långsiktiga riskhantering kommer också beröra de utrymda personer som väljer att inte återvända till det sanerade området.

I projektet har berättigandet av saneringsåtgärder, samt vilka faktorer som styr hur åtgärderna ska optimeras, studerats utifrån ett flervetenskapligt perspektiv. Slutsatserna är att marksanering av bebyggda områden kan vara berättigade ur ett samhällsperspektiv trots de mycket höga monetära kostnaderna som åtgärderna kräver i relation till de avstyrda stråldoser och cancerfall som kan uppkomma.

Möjlighet till återflytt av ett utrymt område styrs i hög grad av de dosvärden som myndigheternas skyddsåtgärder syftar till att underskrida (s.k. referensnivåer) och som finns angivna i svensk myndighetsvägledning (SSM, 2017). Genom marksanering kan stråldoser minskas så att dessa referensnivåer underskrids och därmed möjliggöra återflytt till nedfallsdrabbade områden betydligt tidigare än om bara utrymning görs, förutsatt att saneringsåtgärderna görs enligt internationellt rekommenderade metoder.

Sanering kan också utgöra en tydlig milstolpe i den långsiktiga riskhanteringen för boende i ett område som berörts av radioaktiv beläggning och utgöra ett planeringsunderlag för de drabbade individernas fortsatta livsval och bearbetning av olyckan.

Malmö, 2022-02-23

Christopher L. Rääf

Professor, Medicinsk strålningsfysik, ITM, Lunds universitet

Innehållsförteckning

BAKGRUND	5
RESULTAT	6
Avstyrd stråldos med sanering och utrymning	6
Optimerad sanering med hjälp av isodoskonceptet	6
Avstyrd stråldos och livstidsrisk för olika åtgärder	7
Markborttagningens dosbesparande effekt	8
Allmänhetens reaktioner på RN-risker och motåtgärder	9
Kvinnor, yngre vuxna och föräldrar uttrycker större oro och större benägenhet att lämna ett sanerat område	9
Högre inkomst medför mindre oro men större benägenhet att permanent lämna ett sanerat område	10
Större oro och riskundvikande medför större behov av dialogiska kommunikationssätt	10
Ekonomiska aspekter av sanering, utrymning och kompensation.....	11
Optimeringsmodell.....	11
Saneringskostnader	12
Kompensation	13
SLUTSATSER.....	13
REFERENSER.....	16

Bakgrund

Tre stora kärnkraftsolyckor som har lett till vitt skilda konsekvenser i omgivningen har inträffat det senaste halvsekle. TMI-olyckan 1979 i Harrisburg (USA) ledde endast till ett mindre utsläpp av radioaktiva ädelgaser och jod. Tjernobylolyckan 1986 i Ukraina ledde däremot till ett mycket stort utsläpp av reaktorns innehåll som spreds till både Sverige och stora delar av Europa. Den stora jordbävningen 2011 i Stilla Havet öster om Japan ledde till stora okontrollerade utsläpp från kärnkraftverket Fukushima Daiichi. Genom dessa olyckor vet vi idag vad konsekvenserna av ett utsläpp från en skadad kärnreaktor kan bli, och att skyddsåtgärder och riskhantering kan ta decennier i anspråk.

Inom EU-kommissionens projekt för integrering av Europeiska länders förmåga att återställa samhället efter en radiologisk eller nukleär nödsituation, EURANOS, har en handbok sammanställts om sanering av kontaminerad mark i händelse av en omfattande radioaktiv beläggning (Nisbet et al., 2010). EURANOS delar in metoder för sanering och återställande av nedfallsdrabbade områden i tre olika kategorier; i.) metoder baserade på skärmning av kontaminerade ytor, ii.) metoder baserade avlägsnande av de radioaktiva ämnena och lagring på annan plats., samt iii.) information och hjälp till boende om hur de kan bete sig för att minska sin bestrålning. Av dessa är den vanligaste metoden att gräva upp och fysiskt förflytta kontaminerade massor av jord, mark, byggnadsytor och vegetation.

Metodtester med bortforslande av radioaktivt material i väl kontrollerade försök har visat att det går att uppnå högre effektivitet, ca 70-90 procent minskning inom begränsade områden. Noggranna mätningar måste då göras före, under och efter åtgärderna för att kontrollera genomförande och resultat i form av minskning av externdos (Roed et al., 1996). Riktade saneringsåtgärder i Ukraina, Ryssland och Belarus efter kärnkraftsolyckan i Tjernobyl och motsvarande storskaliga insatser i Japan efter Fukushima har däremot visat att effekten i form av minskad externbestrålning från radionukliden ^{137}Cs endast är ca 50 procent och i många fall lägre (Samuelsson et al., 2019).

För att åstadkomma bästa möjliga återställning efter en omfattande markbeläggning med ^{137}Cs måste saneringsinsatserna optimeras för de områden där det är möjligt att erhålla en sådan minskning av dosnivån att boende i området är förenligt med svenska myndigheters vägledning (SSM, 2017). Det finns omfattande uppdaterade rekommendationer för hantering av återställande insatser av både bebyggd mark och jordbruksmark (PHE, 2015a och PHE, 2015b). Rekommendationerna består av modeller och flödesschema som ska utgöra planeringsunderlag för hur dessa åtgärder ska organiseras. Även om motsvarande svenska handböcker är på väg att tas fram så saknas forskning kring hur utfallet av olika åtgärdsstrategier i form av radiologiska, ekonomiska och sociala effekter blir för typiskt svenska förhållanden. Syftet med detta forskningsprojekt var därför att modellera fram effekter av olika skyddsåtgärder som kan ge berörda myndigheter ett underlag för specifika val av åtgärdsstrategier i händelse av ett större radioaktivt nedfall i Sverige.

Faktaruta 1. Ett radioaktivt nedfall i Sverige.

Den största omfattningen av radioaktivt nedfall i Sverige från civil användning av kärnenergi kan komma från ett luftburet ofiltrerat utsläpp av radioaktiva ämnen från ett svårt skadat kärnbränsle i någon av våra inhemska kärnreaktorer i drift (f.n. 6 st.). Vid utsläppet kommer radionukliderna ^{137}Cs , ^{134}Cs och ^{131}I att ge de största dostillskotten till boende i nedfallspåverkade områden. En olycka som leder till att 1% av det skadade reaktorbränslets innehåll av ^{137}Cs och andra medföljande nuklider släpps ut till atmosfären kan ge upphov till att ett område mer än 1000 km² (=en yta stor som Göteborgs kommun) får en markbeläggning över 1 MBq/m². Denna nivå av markbeläggning ger ett stråldosbidrag över 20 mSv under det första året efter utsläppet. Sambandet mellan arealytan som kan komma beaktas för sanering, A_{Sanering} (km²), och andelen av reaktorinnehållet som släppts ut, Q (Bq), kan grovt beskrivas med följande matematiska formel:

$$A_{\text{Sanering}} = h \cdot (Q/D_{\text{ref}})^b$$

Variabeln h är en faktor som beror på typ av radionuklid. D_{ref} (mSv) är stråldosen till oskyddad individ som används som kriterium för saneringsåtgärd i det nedfallspåverkade området (t.ex. 20 mSv per år). Exponenten b beror av radionuklidernas kemiska tillstånd som i sin tur påverkar hur långt utsläppet sprids i atmosfären. Ur formeln framgår att för en given andel utsläpp av ett reaktorinnehåll så kommer ytan som behöver saneras att öka, ju lägre dosnivå, D_{ref} , som används som kriterium för sanering. Med andra ord, ju mindre tolerans samhället har för stråldoser till de berörda boende, desto större areal måste beaktas för sanering. Markanvändningen (t.ex. jordbruk), växtsäsong och befolkningstäthet på nedfallsplatsen kommer också att starkt påverka nedfallets stråldoser till de boende och behovet av marksanering.

Resultat

Avstyrd stråldos med sanering och utrymning

Optimerad sanering med hjälp av isodoskonceptet

I återställningsfasen efter ett omfattande nedfall av radioaktiva ämnen är sanering av kontaminerade marklager nära bostadshus en av de åtgärder som mest påverkar sänkningen av stråldoser till boende. I en av de inledande studierna i detta projekt tillämpades det nyutvecklade konceptet med s.k. isodoslinjer på områden runt typiska svenska bostäder för att identifiera vilka närliggande ytor som till störst del bidrar till boendes externa stråldos. Isodoslinjer har definierats i en tidigare studie (Hinrichsen et al., 2018) och syftar till att avgränsa ett visst kontaminerat område runt en byggnad som bidrar till en angiven andel av stråldosen till boende inomhus. Konceptet togs fram som en metod att optimera minskad stråldos per mängden bortforslad mark och genererat avfall. I studien gjordes en datormodell av två olika svenska bostadshus (trä resp. tegelbyggnad). Ett radioaktivt nedfall av radionukliden ^{137}Cs simulerades med olika marknedträngning i intilliggande trädgårdsytor. En demonstration gjordes 2019 av hur isodoslinjerna påverkades av strålningens dämpning i de två typerna av hus, och betydelsen av positionerna för dörrar och fönster för olika vistelseplatser inne i husen (Hinrichsen et al., 2019). Vidare tillämpades s.k. uppehållsfaktorer för olika typer av rum (badrum, kök, sovrum, mm), och en karta över isodoslinjer för intilliggande ytors stråldosbidrag kunde tas fram.

Beräkningarna visade att isodoslinjerna uppvisar oregelbundna ytor kring byggnaderna. Om man vid marksanering kring ett enskilt bostadshus vill uppnå en

i förväg angiven dosreduktion från intilliggande markbeläggning, t.ex. 50%, så kan denna uppnås med mindre mängd borttagen jord om man följer isodoslinjerna, än om regelbundna ytor med visst givet avstånd från husväggarna tillämpats.

I en fortsatt studie kring motsvarande stråldosbidrag för ett bostadsområde, bestående av en samling av de båda byggnadstyperna som togs fram i 2019 (Hinrichsen et al., 2019), simuleras ett ytligt nedfall av ^{137}Cs för att studera stråldosbidrag från bostadsområdet in till enskilda hus och hustomter (Hinrichsen et al., 2020). Simuleringen visade att intilliggande tomters stråldosbidrag är väsentligt. För svenska tomtstorlekar, 1000–1500 m², kommer stråldosbidraget inomhus från de intilliggande tomterna att bli 27–31 % av hela externa stråldosbidraget. Dessutom kan 16–18 % av extern dosen inomhus komma från områden utanför det modellerade kvarteret. Därmed har sanering av enskilda tomter en begränsad effekt om marksanering inte görs för hela bostadsområdet.

Faktaruta 2. Väderförhållandens inverkan på ett radioaktivt nedfall.

Vid ett ofiltrerat atmosfäriskt utsläpp av radionuklider i samband med en olycka i en kärnteknisk anläggning kommer det alltid finnas risk för höga nivåer av markbeläggning nära anläggningen. Vindriktning och vindhastighet påverkar både vilken del (eller sektor) av omgivningen som blir drabbad samt över vilket geografiskt avstånd utsläppet kommer sträcka sig. Utsläppshöjden från anläggningen i kombination med atmosfärens stabilitet kommer påverka hur stark spädningen av de radioaktiva partiklarna i utsläppsplymen blir under dess passage i luften. Ett hett reaktorutsläpp kan stiga till höga höjder och färdas tusentals km från utsläppspunkten. Kraftigt regn kommer att bidra till att en s.k. urskölningseffekt, där de radioaktiva ämnena i plymen deponeras på marken i snabbare takt än under torr väderlek. Detta innebär också att om den radioaktiva plymen kommer in i ett nederbördsområde även på ett mycket långt avstånd (>1000 km) från utsläppspunkten, kan urskölningseffekten medföra att den lokala markbeläggningen av radioaktiva ämnen blir upp till 100 ggr högre än vid torr väderlek. Ett exempel på en sådan effekt såg man bl.a. från Tjernobylnedfallet i Gävle med starkt förhöjd markbeläggning jämfört med andra kommuner i Sverige.

Avstyrd stråldos och livstidsrisk för olika åtgärder

Radioaktivt nedfall av atmosfäriska utsläpp från kärntekniska anläggningar kommer att ge stora stråldosbidrag till boende i det nedfallsdrabbade området. Under det radioaktiva molnets passage av bostadsområdet utsätts människor för stråldos genom inandning av luftburna radioaktiva partiklar, om inte befolkningen skyndsamt utryms eller stannar inomhus i lokaler med avstängd ventilation. När molnet passerar kommer det dessutom att ge stråldosbidrag från gammastrålning med lång räckvidd till de boende. Detta stråldosbidrag kan avstyra i olika hög grad genom att vistas i skydd i inomhus, helst i byggnader med hög skärningsförmåga. Skärningsförmågan hos byggnader varierar kraftigt. Enfamiljshus på regelverksstomme i trä utan fasadtegel har lägst skärningsförmåga med en dosreducerande effekt på ca 60%, medan motsvarande hus av tegel kan ha en dosreducerande effekt på 80% eller högre. Flerfamiljshus av betong har en skärmande förmåga på upp till 95% eller högre, och äldre flerfamiljshus med tjocka tegelväggar, oftast byggda före 1940, kan skärma ändå upp till 99% (Finck, 1992).

Markdeponeringen av radioaktiva partiklar från utsläppet kommer att ge en kvardröjande strålningssituation som leder till dosbidrag både externt från

markbeläggning och internt (via kontaminerade livsmedel) till befolkningen över flera decennier. Besträlning från markbeläggning och intern bestrålning via kontaminerade livsmedel är de dominerande sätten att bestrålas under lång tid i ett nedfallsdrabbat område. Skyddsåtgärder för att avstyra stråldoser och risker för utveckling av strålningsframkallad cancer innefattar i) permanent eller tillfällig utrymning, ii) livsmedelsrestriktioner för lokalproducerade livsmedel, samt iii) sanering av markbeläggning.

Det över tiden summerade stråldosbidraget från markbeläggningen till boende kommer främst att påverkas av den fysikaliska halveringstiden hos cesiumisotopen ^{137}Cs (30,0 år), och den s.k. ekologiska halveringstiden av cesium i marken. Pga. dessa ekologiska processer kommer stråldoshastigheten till boende att sjunka i snabbare takt än den fysikaliska halveringstiden. I ett av projektets delarbeten (Räaf et al., 2020) modellerades stråldosbidrag till boende, både som tidsintegrerad effektiv dos till en referensperson och som tidsintegrerad livstidsrisk för strålningsframkallad cancer över en 70-årsperiod efter ett nedfall. Teoretiskt skulle typiska stråldoser till befolkningen i ett nedfallsdrabbat område uppgå till mellan 175 och 375 mSv per MBq/m² ^{137}Cs -nedfall från en typiskt svensk reaktor, beroende på omfattningen av livsmedelsrestriktioner, kostvanor och ekologisk halveringstid för cesium i marknedträngningen. För den mest känsliga kohorten, nyfödda flickor, kommer en 70-års exponering att teoretiskt motsvara en individuell sannolikhet för strålningsframkallad cancer under en livstid på 7–12% per MBq/m² ^{137}Cs -nedfall.

Markborttagningens dosbesparande effekt

Matematiska beräkningar av teoretiskt maximal saneringseffektivitet av externdosbidrag från markbeläggning genom markborttagning har gjorts baserat på en s.k. nedträngningsmodell som ofta använts inom radioekologi för att beskriva hur radioaktivt cesium transporteras i marken (Almgren och Isaksson, 2006). Marknerträngningsmodellen bygger på kunskap om den ekologiska halveringstiden för cesium i ett område, och ger det summerade externdosbidraget över tid från en markbeläggning.

För att uppskatta markborttagningens dosbesparande effekter över tid (upp till 70 år) har ett förenklat antagande gjorts att migrationsprocessen fortlöper ohindrat efter bortschaktning av topplaget. Mer uppföljande studier av markprofiler och externdos i områden efter bortschaktning av övre topplager behövs för att bättre förstå hur migrationen påverkas, och därmed hur den framtida stråldosen påverkas.

För ett bostadskvarter på ca 16.000 m² bestående av enfamiljshus, omgivet av områden som inte är sanerade kommer, enligt (Hinrichsen et al., 2021), borttagning av mark till ett djup av 5 cm att som högst minska den externa stråldosen med 85–90%. Vidare visade denna studie att momentan doshastighetsminskning genom markborttagning högre än 80% kan vara svår att uppnå om intilliggande områden utanför det aktuella bostadsområdet inte ingår i saneringen. Med andra ord får en

saneringseffektivitet kring 90% ses som ett teoretiskt värde som i praktiken är svår att uppnå.

För det modellerade bostadsområdet kommer 5 cm markborttagning att ge upphov till cirka $30 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ markavfall per km^2 . En saneringsinsats där hela bostadsområden av trähus genomgår markborttagning kommer att resultera i en avstyrd individuell tidsintegrerad effektiv dos över 70 år för en vuxen person på 37-97 $\text{mSv}/(\text{MBq}/\text{m}^2)$, om åtgärderna utförs ett år efter nedfallet. Motsvarande värde för ett kvarter med tegelhus kommer att vara 19-48 $\text{mSv}/(\text{MBq}/\text{m}^2)$. Antas 2,8 invånare per byggnad kommer det modellerade enfamiljshusområdet att bebos av ca 2140 individer per km^2 . Den kollektiva avstyrda dosen för 5 cm markborttagning kommer att då att ligga på 79-207 manSv/km^2 per (MBq/m^2 ^{137}Cs) för trähuskvarter och 40–104 manSv/km^2 per (MBq/m^2 ^{137}Cs) för tegelhuskvarter om saneringen genomförs ett år efter nedfallet.

Om marksanering utförs med högsta teoretiska effektivitet (mer än 90%), antingen genom att den utförs inom ett par år efter nedfallet då det mesta av det radioaktiva cesiumet ligger i de översta 5 cm lagren, eller genom att vid senare tillfälle schakta bort djupare marklager, kan avsevärda relativa stråldossänkningar åstadkommas. I **Tabell 1** beskrivs den tidigaste återflyttstiden vid vilken det årliga dosbidraget från kvarvarande delar av nedfallet kommer att understiga 1 mSv per år. 1 mSv per år är ungefär den dos alla människor får från naturlig bakgrundsstrålning i omgivningen.

Tabell 1. Kortaste tid (år) till återflytt vid vilken årlig effektiv dos understiger 1 mSv .

Markdeponering av ^{137}Cs (kBq m^{-2})	Utan sanering	Med medel-effektiv sanering (50%)	Med högeffektiv sanering (90%)
5000	37	26	7
2500	27	15	3,5
1000	12	7	1,2
250	3,5	1,5	2 veckor

Allmänhetens reaktioner på RN-risker och motåtgärder

Kvinnor, yngre vuxna och föräldrar uttrycker större oro och större benägenhet att lämna ett sanerat område

En enkät skickades ut som presenterade ett realistiskt scenario innehållande en radiologisk olycka, evakuering, sanering och möjligheten till återflytt, som respondenterna fick ta ställning till (Rasmussen et al., 2020). Enkäten som besvarades av 2 291 vuxna svenskar (60.3%), visar att en majoritet av urvalsgruppen (som är utformad för att representera en normalbefolkning) är tveksam till att bo i ett nedfallsdrabbat men sanerat område efter en kärnkraftsolycka. Kvinnor uttrycker högre riskuppfattning än genomsnittet. De är också mer skeptiska än genomsnittet till att bo i ett nedfallsdrabbat område. Respondentgrupper som är 60 år och äldre

uttrycker både mindre oro och mindre benägenhet att flytta än andra åldersgrupper. Dessa resultat påminner om de gällande medborgargruppernas riskuppfattning och flyttbenägenhet efter kärnkraftsolyckan i Fukushima (Morita et al., 2018 och Murakami et al., 2015). Till skillnad från Olofsson och Rashid (2011) finner vi signifikanta skillnader mellan mäns och kvinnors riskuppfattning i Sverige. Skillnader i riskperception mellan män och kvinnor har förklarats både med sociologiska argument (att män på gruppnivå är mindre utsatta för hot och innehar högre grad av kontroll över teknologin i samhället) och evolutionsbiologiska argument (att kvinnor är utrustade med lägre tolerans för risk för att skydda foster och små barn). Om man utgår från att kunskapsläget är bristfälligt i Sverige, men att dessa data är de bästa som finns för tillfället, kan man anta att färre än hälften av de boende skulle stanna i ett nedfallsdrabbat men sanerat område, och att demografin efter saneringen skulle bestå av jämförelsevis få kvinnor och unga, med effekter på områdets återbyggnad. Med tanke på att befintliga beredskapsplaner är inriktade på s.k. återställning, är det angeläget att utveckla beredskap och planera stöd för den stora grupp som sannolikt kommer att föredra att flytta från det nedfallsdrabbade området.

Högre inkomst medför mindre oro men större benägenhet att permanent lämna ett sanerat område

Denna studie fördjupar analysen av enkätdata och undersöker sambandet mellan socioekonomisk status (SES) och grad av oro för joniserande strålning och önskan att flytta från ett nedfallsdrabbat och sanerat område. Studien bekräftar hypotesen att inkomst är negativt förknippad med oro över risken med exponering för joniserande strålning. Höginkomstgruppen visar statistiskt signifikanta lägre nivåer av oro för strålning än lägre inkomstgrupper. Skillnaden kvarstår när man kontrollerar för andra demografiska faktorer. Studien visar vidare att gruppen med låg utbildning uppvisar lägre preferensnivåer för att flytta och därmed undvika potentiell risk gällande joniserande strålning än den mellersta och högsta utbildningsnivågruppen gjorde. Vår analys visar också att den högsta inkomstgruppen rapporterar det högsta medelvärdet gällande preferens att undvika potentiell risk från joniserande strålning genom att flytta. Till sist är det värt att notera att våra resultat i stor utsträckning bekräftar den senaste forskningen som gjorts i Japan efter Fukushima Daiichi-olyckan (Fukasawa et al., 2017 och Kusama et al., 2018) genom att vi också finner en negativ korrelation mellan inkomst och oro för strålningsrisk. Vi ser också att de med högst hushållsinkomst per månad (75tkr och mer) önskar att flytta i något större omfattning än andra.

Större oro och riskundvikande medför större behov av dialogiska kommunikationssätt

Denna studie undersöker hur individers olika riskattityder (oro, tilltro till sanering och flyttbenägenhet) till ett saneringsscenario relaterar till individers bedömning av sina egna informations/kommunikationsbehov. Den kvantitativa analysen visar att ett behov av dialog (kunna komma med synpunkter och få svar på frågor) gällande

sanering korrelerar med oro, och riskundvikande beteendeintentioner (att flytta), och korrelerar negativt med tillit till saneringsprocessen. Alla tre indikatorerna på riskattityd tyder alltså på att mindre gynnsamma attityder till saneringsscenarioet förutsäger ett större behov av riskkommunikation med möjlighet till dialog. Den statistiska analysens resultat kan preliminärt tolkas som att ett mer dialogiskt riskkommunikationsarbete är viktigt att planera för i återställningsprogram, inte minst för att möta behoven hos grupper av individer som upplever stark oro, har starka flyttintentioner, samt grupper med hög misstro kring ett dylikt scenario.

När det gäller förmodat önskemål av information/kommunikation bedömer sig många respondenter vilja ha en mer frekvent information från myndigheterna i ett inledningsskede av ett saneringsscenario. Likväl förväntar sig flertalet respondentgrupper en kontinuerlig information löpande under processen, i lämpliga tidsintervall.

Ekonomiska aspekter av sanering, utrymning och kompensation

Optimeringsmodell

Strålning kan orsaka människor skada genom olika mekanismer. En exponeringsväg är extern exponering för gammastrålning från kontamination på marken eller på ytor som väggar, tak, etc. Andra exponeringsvägar är internt via kost och inandning där även alfa- och betastrålning kan orsaka skada. Höga stråldoser kan orsaka allvarliga deterministiska hälsoeffekter med påverkan på olika organs funktioner och vara dödliga, livshotande eller resultera i en skada som försämrar livskvaliteten. Erfarenheten från tidigare kärntekniska olyckor som medfört radioaktiv beläggning visar dock att de flesta exponeringar ligger under 250 mSv extra livstidsdos (UNSCEAR, 2008), där de potentiella skadeeffekterna av strålning domineras av s.k. sena effekter, som främst berör cancerinduktion. Risken för cancer kommer att vara en funktion av exponeringen över tid. Det tar det ofta lång tid efter bestrålningen innan skadan framträder. Därför är det relevant att också beakta våra tidspreferenser i detta sammanhang – hur vi väljer att ge ett lägre värde till de skador som uppkommer i framtiden. Vi tänker oss en skadefunktion där ett saneringsprogram som slutförs vid en given tid som för varje tidsenhet avlägsnar en andel av skadan från kontaminationen. När vi analyserar resultaten från vår modell fokuserar vi på tre nivåer av åtgärdsstrategier som är tänkbara vid en kärnteknisk olycka: i.) Sanering, ii.) Tillfällig utrymning, iii.) Överge området och kompensera de drabbade ekonomiskt.

Onekligen så skulle kostnaden för sanering bero på många faktorer, men en aspekt kommer att vara kapacitetsbegränsningar och utbildning av personal. Detta innebär att kostnaderna för själva saneringsinsatsen kommer att bli lägre om saneringen tillåts ta längre tid, men öka om saneringen ämnas utföras mer heltäckande och noggrant, vilket i sin tur påverkar åtgärdens dosreducerande effekt. Utöver detta kommer typ och omfattning av olyckan, omfattningen av skadorna, andelen

jordbruk, industri och bostadsanvändning av mark samt många andra faktorer att vara mycket viktiga.

Med de beräkningsmodeller för avstyrd dos och återstående dos (s.k. residualdos) som tagits fram i projektet kan vissa förutsägelser göras för samhällsekonomiskt optimala åtgärdsstrategier för olika nivåer av markbeläggning. Intuitivt kommer resultaten från modellen att visa att om ett område drabbas av så kraftigt nedfall att myndigheterna bedömer att det måste överges, är det onekligen bäst att göra det så fort som möjligt. Om myndigheterna beslutar om tillfällig utrymning och sanering och det först i ett senare skede tas beslut att området skall överges har de initiala kostnaderna varit i onödan. Detta är en av anledningarna till att beslutsplaner är viktiga.

Om tillfällig utrymning skall användas som åtgärd, är det mest lämpligt i scenarion där skadan av strålningen är hög men faller snabbt över tid vilket är fallet med de flesta tänkbara kärnkraftsutsläpp. De höga kostnaderna för utrymning kan vara motiverade för att få fördelarna av att fullständigt undvika områden med markbeläggning över rekommenderade nivåer och avstyra framtida cancerfall.

Enligt vissa författare, vars beräkningar grundar sig på IAEA:s föreslagna kalkylmodeller, är den optimala tiden för sanering och återflytt någonstans mellan 2 till 10 år (Munro, 2013). Andra arbeten (Yanovsky et al., 2020) pekar dock på att utrymning utöver stora direkta kostnader också medför stora psykosociala effekter som resulterar i sena effekter i form av förkortad livslängd. I ljuset av detta är slutsatsen att både utrymning och återflyttning kommer att medföra risker och problem med psykosociala effekter. Det är viktigt att drabbade människor dels involveras och har individuell frihet i sitt val, dels får tillräcklig kompensation för att kunna återstarta sina liv, antingen där de en gång bodde (efter sanering) eller på annan ort om de väljer att flytta.

Saneringskostnader

Direkta kostnader av ett fiktivt saneringsprojekt har beräknats. Det gjordes för tre olika områden (en enskild fastighet, samtliga fastigheter längs en viss gata, samt en hel stadsdel). Kostnaderna uppskattades genom offertförfrågan till en saneringsentreprenör och gällde schaktning av 5 cm översta marklager, våtsanering av takyta, fasadtvätt, beskärning av vegetation, rengöring av hårdditor, etc. Kostnaden för att totalsanera en villatomt uppskattades till 810 tusen kr inkl. risktillägg, vilket för ett helt villaområde blir ca 765 miljoner kr per km². Den direkta kostnaden för återställning uppgår därmed till ca 25-50% av marknadsvärdet för ett svenskt enfamiljshus. Om hänsyn tas till kostnader för utbildning och träning av saneringspersonal samt att arbetet kommer att klassas som radiologiskt arbete vilket fordrar dosimetri, blir det uppåt avrundade värdet på kostnaden ca 1000 miljoner kr per km², vilket är i samma storlek som rapporterats från Japan (Kanamori och Käberger, 2019).

Kompensation

För att minska stråldosen är det kanske mest verkningsfulla att utrymma. Dock medför utrymning kostnader för samhället för fastigheter, företag och enskilda medborgare, som är svåra att överblicka. Det kan vara mycket svårt att få invånare att återvända och de näringar som funnits kan i vissa fall gå förlorade. Om vissa människor (som barnfamiljer och unga kvinnor) inte vill återvända kan hela samhällsstrukturen påverkas. Sanering bör implementeras mycket fort och helst parallellt med en evalueringsprocess för att bli effektiv. Krav kan resas på kompensation och somliga kan välja kompensation och flyttning framför sanering. En förutsättning är att de har råd med detta vilket generellt betyder att de måste få tillräcklig kompensation. Ett möjligt problem med individuell kompensation är att invånare som flyttar kan riskera att fastna i ett ekonomiskt beroende där de är försörjda så länge de får ersättning. I alla dessa sammanhang samverkar en rad dynamiska och sociala aspekter på ett komplicerat sätt, men kompensation kan ändå vara ett komplement till andra skyddsåtgärder för att ge berörda individer ett större upplevt handlingsutrymme.

Faktaruta 3. Ekonomisk kompensation vid storskaliga radiologiska olyckor.

I dagsläget finns en summa pengar avsatt av svensk kärnkraftsindustri för konsekvenslindrande kollektiva åtgärder (med belopp på ca 3,3 miljarder kr) om en olycka sker. Utöver detta belopp kommer staten att garantera en summa upp till 6 miljarder kr. Dessa summor kommer enligt erfarenheter från Östeuropa och Japan bli otillräckliga för att täcka saneringskostnader och annan återställning i händelse av ett större inhemskt utsläpp (se Faktaruta 1). Vilka ytterligare medel som ska avsättas för mildrande insatser och eventuell kompensation till enskilda individer kommer att bli ett politiskt beslut. I förordning 2008:1002, §7 anges att Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) ska stödja samordningen av berörda myndigheters åtgärder och är den aktör som i händelse av olyckor och kriser bistår Regeringskansliet med underlag som stöd för vidare beslut om resurser. Frågan om skadeståndskrav och kompensation till enskilda individer som drabbats är dock mer komplex, särskilt om utsläppet orsakats av externa händelser, som till exempel en naturkatastrof. I princip kommer dock syftet med riktad kompensation vara att mildra konsekvenserna för de värst drabbade.

Slutsatser

Enbart kärnenergiolyckor där kärnbränslet och skyddsbarriärerna skadas så mycket att radioaktivt cesium (^{134}Cs , $T_{1/2}=2$ år och ^{137}Cs , $T_{1/2}=30$ år) frigörs och sprids till omgivningen kan leda till behov av sanering av markbeläggning. Sanering för att minska risken för strålningsframkallade skador i människan är berättigad om markbeläggningen av radioaktivt cesium överskrider ett visst tröskelvärde, som kan vara olika för olika typer av områden. Strålsäkerhetsmyndigheten rekommenderar sanering om stråldosen från markbeläggningen överskrider referensnivån 20 mSv/år vid normal vistelse i området. Det motsvarar att åtgärder behöver vidtas vid ungefär 1 MBq/m² av ^{137}Cs på marken räknat på ett typiskt svenskt kärnkraftsinventarium med en $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ -kvot på 1,47. Om man utrymmer området under ett år och flyttar tillbaka utan att sanera blir framtida dosen över 70 år upp till 105 mSv beroende på boendeform, vilket svarar mot en 3% livstidsrisk för strålningsframkallad cancer för nyfödda flickor (den känsligaste gruppen) och

0,5% för vuxna i medeltal. Våra beräkningar visar också att om markbeläggningen är 5 MBq/m² och om området utryms och noggrant saneras kan redan efter 7 år den extra årliga stråldosen bli lägre än 1 mSv/år vid en återflytt.

Vid en markbeläggning av 1 MBq/m² ¹³⁷Cs (vilket motsvarar beläggningen i de sanerade områdena i Japan), kan saneringsåtgärder som blir färdigställda inom ett år efter nedfallet avstyra kollektivdosen 25-140 manSv/km² beroende på typ av bostadshus. Den direkta kostnaden uppskattas till 1 miljard kronor/km². Åtgärderna alstrar minst 30 000 m³ avfall/km² sanerat område i form av bortforslad kontaminerad mark och avlägsnat takmaterial. För att avstyra dessa kollektivdoser måste saneringen genomföras enligt metoder beskrivna i internationella handböcker, där marksanering inom begränsade områden kan ge upp till 90% dosminskning. I verkligheten är det emellertid mycket svårt och kostsamt att uppnå så hög effektivitet över större områden eftersom strålningens räckvidd alltid ger ett tillskott från strukturer på avstånd (byggnadsverk, träd, buskar mm) som är svåra att sanera till hög renhet. För en lägre mer realistiskt antagen dosminskning (som t.ex. 58% i Japan) blir de avstyrda doserna i motsvarande grad lägre.

För att uppnå hög effektivitet bör sanering genomföras snarast. Fördröjs sanering och återflyttning kommer de ovan angivna avstyrda kollektivdoserna att sjunka till ca hälften efter 5 år, eftersom doshastigheten från markbeläggningen avklingar med tiden. Det blir dessutom svårare att få bort ¹³⁷Cs från ett område i ett senare skede då ämnet med tiden tränger djupare ner i marken. Den ekonomiskt beräknade positiva effekten av diskontering, dvs att skjuta kostnader till framtiden leder efter ca 10 år inte till någon positiv effekt när det gäller sanering av ¹³⁷Cs i omgivningen [21].

Begränsade för hur *snabbt* storskalig sanering kan genomföras är förmågan att effektivt kartlägga nedfallet, hur stor yta som berörs av markbeläggning över åtgärdsnivån, var det finns bostäder och viktig infrastruktur av olika slag, tillgång till platser för deponier, möjlighet till snabb upphandling enligt gällande regler av maskinkapacitet och kompetent personal samt färdiga handlingsplaner.

Projektets studier av svenskars förväntade beteende visar emellertid att viljan att återvända varierar beroende på demografiska och socioekonomiska faktorer. Barnfamiljer, unga individer, kvinnor, högutbildade och höginkomsttagare kommer troligen inte att flytta tillbaka i samma utsträckning som övriga grupper till ett sanerat nedfallsdrabbat område. Detta påverkar förutsättningarna att återställa områdets grundläggande uppbyggnad och befolkningsfördelning.

Med sanering eftersträvas en förbättring i livskvalitet för människor som bor och lever i det nedfallsdrabbade området. Trots detta kommer vissa att drabbas hårdare av situationen än andra. En traditionell metod inom ekonomisk teori är att kompensera dem som förlorar mest, vilket kräver politiska beslut. Ytterligare en komplikation är att det finns många olika ägare till den berörda marken som kan ha skilda intressen. Lagstiftningen kan behöva kompletteras för att lösa kompensationsfrågan.

Vi har sammanfattat våra resultat i form av zonindelning utgående från hur markbeläggningen av radioaktivt cesium kan leda till strålningsframkallade skador på människor inom nedfallsområdet. Fyra fall kan förekomma:

- 1 Inga, eller mycket begränsade, saneringsåtgärder behövs
- 2 Kvarboende medan sanering genomförs, eventuellt med restriktioner
- 3 Utrymning medan sanering genomförs, därefter återflyttning
- 4 Överge boende inom området, restriktioner för tillträde

Zonindelningen beskriver skyddsåtgärder i form av utrymning och sanering, samt vissa tidsaspekter för åtgärderna. I zon 1 är beläggningsnivån under tröskelvärdet för sanering, men några få lokala åtgärder kan vara berättigade. I zon 2 blir stråldosen på lång sikt för hög vid kvarboende om sanering inte genomförs, dock inte så hög att utrymning behöver ske omedelbart. Då kan sanering utföras medan människor bor kvar i området, vilket har fördelen att infrastrukturen blir i stort sett orörd och att kostnadskrävande nybyggnad av bostäder och infrastruktur på annan plats inte behövs. Är beläggningsnivån så hög att stråldosen blir oacceptabel vid kvarboende innan sanering genomförts behöver området utrymmas (zon 3 och 4) och boende anordnas på annan plats. Av hänsyn till de drabbade bör beslut samtidigt tas om området kan användas för boende och verksamhet efter sanering (zon 3) och när återflyttning kan ske eller om det ska överges (zon 4). För zon 4 är bedömningsgrunden att en maximal livstidsdos (t.ex. 100 mSv under 70 år) inte kan underskridas genom utrymning, sanering och återflyttning inom 5 år. I samtliga fall där människor drabbats av den radioaktiva markbeläggningen (zon 2-4) behöver besked ges till de drabbade vilket stöd (ekonomiskt, fysiskt och psykiskt) de erbjuds för att återfå en tillfredsställande livssituation. Är nivåerna sådana att sanering gör det möjligt att återflytta inom 5 år (zon 3), bedömer vi att ett i tiden begränsat tillträde för enskilda ur allmänheten är berättigat för att underlätta underhåll av bostäder och infrastruktur och skapa gynnsammare förutsättningar för områdets återställning.

Erfarenheter från Japan har visat hur viktigt det är att snabbt informera alla berörda om situationen, vilka åtgärder som planeras, när de ska ske och vilken hjälp de drabbade kan få. Grundläggande är dialogisk kommunikation, där alla berörda får komma till tals så att deras problem, synpunkter och förslag till lösningar uppmärksammas. I kommunikationen mellan myndigheter och berörda bör tydligt framgå att riskhanteringen för en radiologisk olycka är uppdelad i olika skeden, där kartläggning av nedfallet, utrymning, sanering, återflyttning och friklassning av områden utgör flera led i tiden. Det går inte att få ett nedfallsdrabbat område helt rent genom sanering. Den kvarvarande beläggningen fortsätter att ge stråldos under lång tid. Dosen kan hållas låg genom att följa rekommenderade begränsningar för vistelse i icke-sanerade grönområden och hur man bör göra med trädgårdsodling, insjöfiske, jakt, svamp och bär. Den återstående riskhanteringen kommer att bygga på den enskildes val och prioriteringar, där möjlighet till självmonitorering av stråldosen från omgivningen och regelbunden kontroll av dosen från radioaktiva ämnen i kroppen genom helkoppsmätning är viktiga verktyg för den enskilde personens och hushållets beslut kring vanor i vardagen.

Referenser

- Almgren, S. Isaksson, M. 2006. *Vertical migration studies of ¹³⁷Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident*. Journal of environmental radioactivity 91(1-2): 90-102.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.08.008>
- Finck, R. Field Gamma Spectrometry. (1992) Thesis Paper 6 - Shielding Factors for Gamma Radiation - Experiments and Calculations for Swedish Dwellings.
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/281207266_Robert_Finck_-_Field_Gamma_Spectrometry_Thesis_Paper_6_-_Shielding_Factors_for_Gamma_Radiation_-_Experiments_and_Calculations_for_Swedish_Dwellings
- Fukasawa, M., Kawakami, N., Umeda, M., Miyamoto, K., Akiyama, T., Horikoshi, N., Bromet, E. J. 2017. *Environmental radiation level, radiation anxiety, and psychological distress of non-evacuee residents in Fukushima five years after the Great East Japan Earthquake: Multilevel analyses*. SSM - Population Health, 3, 740-748.
<https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2017.09.002>
- Hinrichsen, Y., Finck, R., Rääf, C., & Andersson, K. G. 2018. *Introducing the concept of the isodose for optimisation of decontamination activities in a radioactive fallout scenario*. Journal of Radiological Protection, 38(4), 1293-1310.
<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aadd24>
- Hinrichsen, Y., Finck, R., Martinsson, J., Rääf, C., & Andersson, K. G. 2019. *Influence of the migration of radioactive contaminants in soil, resident occupancy, and variability in contamination on isodose lines for typical Northern European houses*. Scientific Reports, 9(1), 7876. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44392>
- Hinrichsen, Y., Finck, R., Martinsson, J., & Rääf, C. 2020. *Monte-Carlo simulations of external dose contributions from the surrounding ground areas of residential homes in a typical Northern European suburban area after a radioactive fallout scenario*. Scientific Reports.10(1), 14764. (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71446-4>
- Hinrichsen, Y., Finck, R., Martinsson, J., & Rääf, C. 2021. *Maximizing avertable doses with a minimum amount of waste for remediation of land areas around typical single family houses after radioactive fallout based on Monte Carlo simulations*. Scientific Reports.
<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-84103-1>
- Kanamori, E., Käberger, T. 2019. *Distribution the Cost of Nuclear Core Melts – Japan’s Experience after 7 Years*. R. Haas et al. (Eds.), The Technological and Economic Future of Nuclear Power, Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection, https://doi.org/10.1007/978-3-658-25987-7_17
- Kusama, T., Aida, J., Tsuboya, T., Sugiyama, K., Yamamoto, T., Igarashi, A., & Osaka, K. 2018. *The association between socioeconomic status and reactions to radiation exposure: A cross-sectional study after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident*. PloS one, 13(10), e0205531. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205531>
- Morita, T., Nomura, S., Furutani, T., Leppold, C., Tsubokura, M., Ozaki, A., Oikawa, T. 2018. *Demographic transition and factors associated with remaining in place after the 2011 Fukushima nuclear disaster and related evacuation orders*. PloS one, 13(3), e0194134-e0194134. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194134>

- Munro, A. 2013. The economics of nuclear decontamination: assessing policy options for the management of land around Fukushima dai-ichi. *Environmental Science & Policy* 33, 63-75, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.04.008>
- Murakami, M., Ono, K., & Nakatani, J. 2015. *Perception of radiation risk and willingness to return home following decontamination*. *Environmental Science*, 28(3), 193-210. <https://doi.org/10.11353/esej.28.193>.
- Nisbet, A. F., Brown, J., Cabianca, T., Jones, A. L., Andersson, K. G., Hänninen, R., Ikäheimonen, T., Kirchner, G., Bertsch, V., Heite, M. 2010. *Generic handbook for assisting in the management of contaminated inhabited areas in Europe following a radiological emergency*. EURANOS(CAT1)-TN(09)-03.
- Olofsson, A., & Rashid, S. 2011. *The white (male) effect and risk perception: Can equality make a difference?* *Risk Analysis*, 31(6), 1016-1032. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01566.x>
- Public Health England (PHE). 2015a. *UK Recovery Handbooks for Radiation Incidents 2015, Food production systems handbook, Version 4*.
- Public Health England (PHE). 2015b. *UK Recovery Handbooks for Radiation Incidents 2015 Inhabited areas handbook, Version 4*.
- Rasmussen, J., Ewald, J., & Sterner, T. 2020. *Gender and life-stage dependent reactions to the risk of radioactive contamination: A survey experiment in Sweden*. *PloS one*, 15(4), e0232259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232259>
- Roed, J.C., Lange, C., Andersson, K.G., Prip, H., Olsen, S., Ramzaev, V.E., Ponamarjov, A.V., Barkovsky, A.N., Mishine, A.S., Vorobiev, B.F., Chesnokov, A.V., Potapov, V.N., Shcherbak, S.B. 1996. *Decontamination in a Russian Settlement*. Report Risö-R-870 (EN), DTU, Risö, Danmark.
- Rääf, C., Finck, R., Martinsson, J., Hinrichsen, Y., & Isaksson, M. 2020. *Averting cumulative lifetime attributable risk (LAR) of cancer by decontamination of residential areas affected by a large-scale nuclear power plant fallout: Time aspects of radiological benefits for newborns and adults*. *Journal of Radiological Protection*, 40(3), 790-814. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab993a>
- Samuelsson, C., Finck, R., Martinsson, J., & Rääf, C. 2019. *Decontamination after a nuclear fallout: A condensed review of case studies, methods and key references up to 2014*. Medical Radiation Physics, Lund University. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22055.60321>
- Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) 2017. *Översyn av beredskapszoner, Bilaga 1 – Referensnivåer, doskriterier, och åtgärdsnivåer*. SSM2017:27.
- United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2008. UNSCEAR; Annex D of 2008 UNSCEAR Report.
- Yanovskyi, M., Levi, O.N., Shaki, Y.Y., Socol, Y. 2020. *Consequences of a large-scale nuclear accident and guidelines for evacuation: a cost-effectiveness analysis*. *Int. J. Radiation Biology* 96, 1382-1389. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1779962>



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

I samarbete med:



LUNDS
UNIVERSITET



GÖTEBORGS
UNIVERSITET

