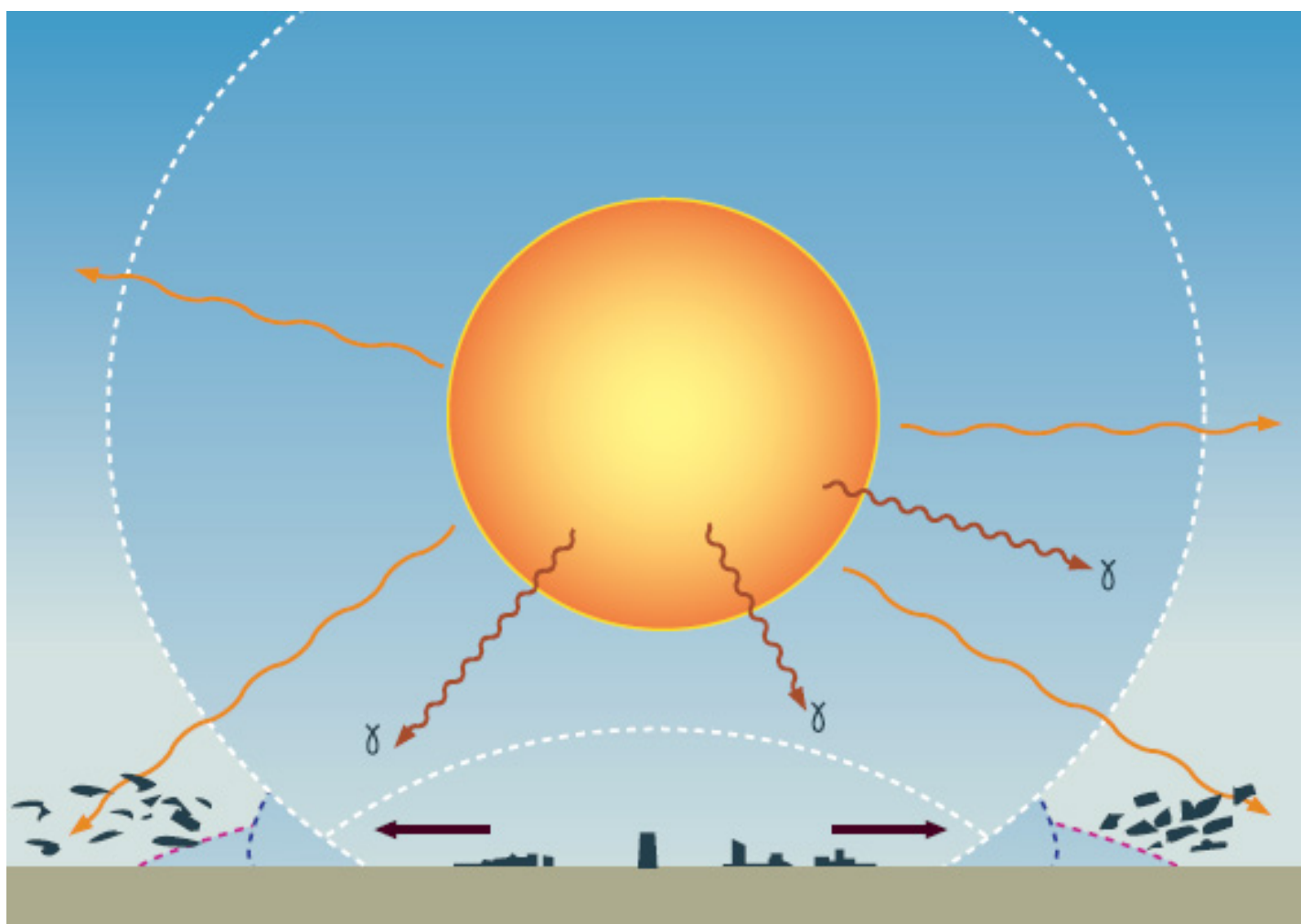


# Ett nationellt system för att upptäcka, varna och informera om kärnexplosioner och andra nukleära händelser

Bakgrund, behov, möjligheter och krav

ANDERS RINGBOM, MARTIN GOLIATH, TORBJÖRN NYLÉN



Anders Ringbom, Martin Goliath, Torbjörn Nylén

# Ett nationellt system för att upptäcka, varna och informera om kärnexplosioner och andra nukleära händelser

Bakgrund, behov, möjligheter och krav.

Titel	Ett nationellt system för att upptäcka, varna och informera om kärnexplosioner och andra nukleära händelser – Bakgrund, behov, möjligheter och krav.
Title	A national system to discover, warn, and inform on nuclear explosions and other nuclear events – background, needs, and requirements.
Rapportnr/Report no	FOI-R--5465--SE
Månad/Month	Juni
Utgivningsår/Year	2023
Antal sidor/Pages	64
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
Forskningsområde	CBRN-frågor
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	B402423
Godkänd av/Approved by	Åsa Scott
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen

Bild/Cover: FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

## Sammanfattning

Denna rapport är en första delredovisning av FOI-projektet ”*Ett nationellt mät-, analys- och rapporteringssystem för nukleära händelser - kravspecifikation och design*” finansierat av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Målet med projektet är att ta fram ett designförslag för en utökad och sammanhållen svensk nationell förmåga att upptäcka, varna och informera om nukleära händelser, med fokus på kärnexplosioner på svenskt territorium eller i svenskt närområde. Systemet ska också ha förmåga att upptäcka andra nukleära händelser, som exempelvis kärnvapenprov på större avstånd, eller mindre utsläpp från kärntekniska anläggningar. I första hand avses här ett system som består av ett antal fasta mätplatser, försedda med olika typer av sensorer kombinerat med system för kommunikation, dataanalys och rapportering.

Rapporten diskuterar behov och funktionskrav baserade på en genomförd behovsinventering och på en bedömning av tekniska möjligheter och begränsningar. Rapporten innehåller en relativt grundlig beskrivning av processerna i en kärnexplosion och vilka effekter de medför, vilka möjliga mätsignaturer som finns att tillgå, samt vilka mät- och analystekniker som skulle kunna komma ifråga. Vidare går rapporten kortfattat igenom de mät- och analysresurser som idag finns i Sverige. Dessa avsnitt kan också tjäna som kunskapsunderlag för olika aktörer inom totalförsvaret.

Nyckelord: kärnexplosion, totalförsvaret, kärnladdningsprov, mätsystem

## Summary

This report contains a first reporting of the FOI project "*A national measurement, analysis, and reporting system for nuclear events – requirements and design*", financed by the Swedish Civil Contingencies Agency (MSB). The goal of the project is to produce a design proposal for an increased and coherent Swedish national capability to detect, warn, and inform about nuclear events, with focus on nuclear explosions on Swedish territory or nearby areas. The system also should have the capability to detect other nuclear events, such as nuclear tests at larger distances, or smaller releases from nuclear facilities. Primarily, we discuss a system consisting of a number of stationary measurement sites equipped with different types of sensors combined with systems for communication, data analysis, and reporting.

The report discusses needs and functional requirements based on an inventory of needs and an assessment of technical possibilities and limitations. The report contains a relatively thorough description of the processes in a nuclear explosion, and resulting effects, as well as relevant measurement and analysis techniques. Further, current measurement and analysis capabilities in Sweden are reviewed. These sections can also serve as a knowledge base for actors in the Swedish total defence.

Keywords: nuclear explosion, nuclear test, total defence, measurement system

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Sammanfattande slutsatser .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Bakgrund och motivering .....</b>	<b>11</b>
	3.1 Ett försämrat säkerhetsläge.....	11
	3.2 Nuvarande situation och framtida behov.....	12
<b>4</b>	<b>Explosionsförlopp för kärnexplosioner.....</b>	<b>14</b>
	4.1 Luftexplosioner.....	14
	4.1.1 Eldklotets strålningstillväxt.....	14
	4.1.2 Övergången till stötvågstillväxt .....	15
	4.1.3 Stötvågens frikoppling från eldklotet.....	16
	4.1.4 Explosionens senare förlopp .....	17
	4.2 Ytexplosioner .....	21
	4.3 Underjordsexplosioner.....	22
	4.4 Undervattensexplosioner .....	23
	4.5 Höghöjdsexplosioner .....	23
<b>5</b>	<b>Kärnvapenverkan .....</b>	<b>25</b>
	5.1 Luftstötvåg .....	25
	5.2 Markstötvåg .....	26
	5.3 Värmestrålning.....	27
	5.4 Joniserande strålning.....	28
	5.5 Elektromagnetisk puls.....	31
	5.6 Jämförelse mellan verkansformer .....	33
<b>6</b>	<b>Mätsignaturer och mätmetoder .....</b>	<b>35</b>
	6.1 Kärnexplosioner i atmosfären eller rymden.....	36
	6.1.1 Elektromagnetiska signaler.....	36
	6.1.2 Infraljud .....	37
	6.1.3 Seismiska vågor.....	38
	6.1.4 Jonosfärsvågor.....	38
	6.1.5 Spridning av radioaktiva partiklar och gaser.....	38
	6.2 Underjordiska kärnexplosioner .....	41
	6.2.1 Seismiska vågor.....	41
	6.2.2 Infraljud .....	43
	6.2.3 Spridning av radioaktiva partiklar och gaser.....	43
	6.2.4 Satellitbilder.....	45
	6.3 Kärnexplosioner under vatten.....	45
	6.3.1 Hydroakustiska och seismiska vågor .....	45
	6.3.2 Spridning av radioaktiva partiklar och gaser.....	45
<b>7</b>	<b>Svensk mät- och analysförmåga.....</b>	<b>47</b>
	7.1 Inledning .....	47

7.2	Stationära mätsystem .....	47
7.2.1	Seismologiska mätsystem.....	47
7.2.2	Mätningar av infraljud.....	50
7.2.3	SMHI:s blixtkalibreringssystem.....	50
7.2.4	Mätstationer för luftburen radioaktivitet.....	50
7.3	Mobila mätningar av radioaktivitet .....	53
7.4	Tillgängliga internationella mätresurser .....	54
<b>8</b>	<b>Informationsbehov utgående från fyra scenarier .....</b>	<b>56</b>
8.1	Kärnexplosion i Sverige .....	56
8.1.1	De första timmarna.....	56
8.1.2	Det senare skedet .....	57
8.2	Kärnexplosion i Sveriges närområde.....	58
8.3	Kärnladdningsprov i omvärlden .....	58
8.4	Andra nukleära händelser.....	59
<b>9</b>	<b>Diskussion och slutsatser beträffande grundläggande krav .....</b>	<b>60</b>
	<b>Referenser .....</b>	<b>62</b>





# 1 Sammanfattande slutsatser

Det försämrade säkerhetsläget i omvärlden ökar behovet av en nationell förmåga att korrekt och tidskritiskt rapportera om allt från en eller flera kärnexplosioner på svenskt territorium eller i närområdet, kärnladdningsprov i det fördolda, till kärnteknisk verksamhet utanför Sveriges gränser. Ett system som realiserar detta behov skulle kunna ha förmågan till både generell mätteknisk omvärldsövervakning, upptäckt av kärnexplosion inklusive kvantifiering av direktverkan (stötvåg, värmevåg och joniserande strålning) och kvarvarande strålning, samt upptäckt och analys av kärnladdningsprov globalt. Varningar och annan information från ett sådant system kan behöva ha olika form beroende på mottagare. Exempel på produkter som skulle kunna levereras sträcker sig från rådata från enskilda sensorer till sammanfattande skraddarsydd rapporter, och skulle kunna förmedlas till mottagare per automatik och/eller manuellt utgående från behov.

Snabb kännedom om att ett kärnvapenangrepp mot Sverige inträffat är givetvis betydelsefullt för alltifrån regeringen, Försvarmakten och MSB, till närmast berörda räddningstjänster och länsstyrelser och andra aktörer. Baserat på en behovsinventering gör vi bedömningen att informationsbehovet för fallet kärnexplosion i Sverige inklusive närområde kan sammanfattas i tre grupper:

1. Information om *tidpunkt, koordinater, explosionshöjd och explosionsstyrka* till aktörer som använder denna information för eget agerande, respektive för produktion av förädlad information till andra aktörer (kommuner, länsstyrelser, Försvarmakten och SSM).
2. *Direktverkansbedömning* till informerande och samordnande myndigheter (regeringskansliet och MSB).
3. Initial basinformation (*att en kärnexplosion inträffat, tid och plats*) och förädlad information av varierande karaktär (inklusive prognos för radioaktiv spridning) som kan utgöra beslutsunderlag till ett större antal myndigheter och andra aktörer.

Efter den initiala fasen behöver samtliga tre grupper ovan få periodiskt uppdaterad information i form av förbättrade bedömningar, baserat på fördjupad analys och ytterligare mätningar.

För att täcka in ett bredare användningsområde än bara scenariot kärnvapenangrepp mot Sverige behöver systemet ha förmågan att *detektera, lokalisera och karaktärisera*

1. kärnexplosioner i alla media (underjords-, yt-, luft-, höghöjdsexplosion) i Europa,
2. underjordiska kärnexplosioner globalt, och
3. andra kärntekniska händelser i Europa.

Ett system som uppfyller detta skulle också ha förmågan att detektera andra händelser, som exempelvis konventionella explosioner.

Tillförlitlig information åstadkoms bäst genom att använda ett fast mätsystem som bas, med tillhörande analys- och rapporteringsfunktion som inkluderar en god kunskap om existerande och möjliga bakgrundskällor, det senare är centralt för att minimera antalet falsklarm. För att ytterligare förbättra lägesbilden är det en stor fördel om systemet har möjlighet att samla in mätningar även från externa källor (både nationella och internationella) som inte formellt ingår i systemet. Dessa data skulle dessutom kunna bidra till att förbättra tolkningen av systemets egna insamlade data.

Systemet bygger lämpligen på mätningar och kombinerad analys av seismiska signaler, infraljud, radioaktivitet i luften och på marken och elektromagnetisk puls (EMP), men kan även innefatta andra typer av registreringar. Delar av denna förmåga finns i Sverige idag spridd hos olika aktörer, men behöver utökas och samordnas till ett sammanhållet system.

## 2 Inledning

Denna rapport är en första delredovisning av FOI-projektet ”*Ett nationellt mät-, analys- och rapporteringssystem för nukleära händelser - kravspecifikation och design*”. Projektet löper under perioden 2022-2023 och är finansierat av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) och Försvarsdepartementet.

Rapporten diskuterar behov och funktionskrav för en utökad och sammanhållen svensk nationell förmåga att upptäcka, varna och informera om nukleära händelser, med fokus på kärnexplosioner på svenskt territorium eller i svenskt närområde. I första hand avses här ett system som består av ett antal fasta mätplatser försedda med olika typer av sensorer kombinerat med system för kommunikation, dataanalys och rapportering, men systemet kan också hantera andra sensordata. Med nukleära händelser avser vi här kärnexplosioner och andra kärntekniska händelser som genererar signaturer i omgivande miljö som i sin tur, med lämplig teknologi, skulle kunna registreras på avstånd. Även om kärntekniska olyckor (med reaktorolyckor som främsta exempel) räknas i in denna definition inkluderar vi inte sådana händelser som ett dimensionerande krav. Det är dock uppenbart att det finns ett stort överlapp mellan informationsbehoven vid en kärnteknisk olycka och vid andra typer av nukleära händelser, och att den kärntekniska beredskapen skulle kunna dra nytta av den förmågeökning som diskuteras här.

Typhändelser som vi i denna rapport menar ska kunna hanteras av en sådan ökad förmåga inkluderar:

1. Kärnexplosioner: speciellt på svenskt territorium eller i svenskt närområde.
2. Kärnladdningsprov var som helst i världen.
3. Utsläpp av radioaktivt material från en kärnteknisk anläggning eller annan källa, som inte nödvändigtvis utgör någon fara för allmänheten eller omgivande miljö, men kan utgöra viktig information om nukleär verksamhet eller händelser i omvärlden.

Typhändelserna ovan skiljer sig uppenbarligen väsentligt åt beträffande påverkan på samhället. En kärnexplosion i Sverige skulle påverka alla samhällsfunktioner och omedelbart leda till en stor efterfrågan på information från vitt skilda aktörer, med den kommunala räddningstjänsten som den viktigaste mottagaren i ett tidigt läge. Vid en kärnexplosion i Sverige ansvarar kommunerna för att upptäcka, utmärka och röja farliga områden. Kommunerna svarar även för indikering och sanering [1].

Ett kärnladdningsprov utfört av någon av de etablerade kärnvapenstaterna, alternativt av en ny aktör, är normalt en händelse av mer säkerhetspolitisk karaktär, med färre primära intressenter av informationen (regeringskansliet och vissa myndigheter), och ingen eller begränsad omedelbar samhällspåverkan i Sverige.

Ett utsläpp från en kärnteknisk anläggning eller annan källa i Sverige eller i närområdet kan ha en varierande samhällspåverkan, alltifrån mycket stor vid ett reaktorhaveri, till betydligt mindre eller ingen alls vid ett begränsat utsläpp orsakat av exempelvis en transportolycka eller ett rutinmässigt utsläpp från en reaktor inom tillåtna nivåer.

Anledningen till att vi diskuterar dessa tre scenarier tillsammans är att den teknologi och kompetens som används för att upptäcka och analysera dessa vitt skilda typer av nukleära händelser i stort sett är densamma, och det finns därför logistiska och ekonomiska skäl att sammanföra mät- och analysförmåga för dessa händelser i ett sammanhållet system. Dessutom kan olika typer av nukleära händelser höra samman. Exempelvis kan ett kärnladdningsprov som utförs av ett land utgöra ett eskalationssteg som i förlängningen skulle kunna leda till användning av kärnvapen, och ett system med bred upptäcksförmåga skulle därmed ge möjlighet till ökad proaktivitet. Vidare utgör ett radioaktivt utsläpp som inte härrör från en kärnexplosion en bakgrundssignal till det senare, och måste då, även

under normalfälle, kunna upptäckas och tolkas för att exempelvis reducera antalet falsklarm. Slutligen kan en detektion av ett radioaktivt utsläpp vara ett sätt att erhålla information om pågående nukleär verksamhet annan än kärnladdningsprov.

Slutmålet med projektet, vars första del redovisas här, är att ta fram ett designförslag för ett svenskt system som kan upptäckta, varna och informera olika samhällsaktörer vid en nukleär händelse. För att undvika att denna design blir "teknikdriven" i alltför hög grad är tanken att designen i så stor utsträckning som möjligt ska baseras på en kravspecifikation som tagits fram med potentiella användares informationsbehov som grund. Samtidigt är det omöjligt att producera en kravspecifikation utan ta hänsyn till de fysikaliska processerna i en kärnexplosion och andra nukleära händelser, vilka mätmetoder som existerar idag, och de mättekniska möjligheter och begränsningar som följer av detta.

Projektets första del, som redovisas här, innefattar därför dels en relativt grundlig genomgång av processerna i en kärnexplosion och vilka effekter de medför, vilka möjliga mätsignaturer som finns att tillgå, samt vilka mät- och analystekniker som skulle kunna komma ifråga. Dessa avsnitt är också avsedda som en allmän orientering samlad på en plats, något som vi bedömt kan vara lämpligt givet att detta ämne inte särskilt ofta diskuteras i ett bredare sammanhang. Vidare går rapporten kortfattat igenom de mät- och analysresurser som idag finns att tillgå i Sverige. Detta följs av en sammanfattning av en genomförd behovsinventering och ett förslag på kravspecifikation för ett system som tagits fram med inventeringen som grund. En detaljerad kravspecifikation redovisas i särskild bilaga. Ambitionen har varit att även icke-specialister skall kunna tillgodogöra sig innehållet i rapporten. I ett andra steg av projektet ska en teknisk design produceras utifrån föreliggande kravspecifikation. Designen kommer att baseras på simulerade signaturer från ett stort antal syntetiska kärnexplosioner. Behovsinventeringen har skett dels genom en workshop med ett antal deltagande myndigheter samt också genom diskussioner med enskilda myndigheter och aktörer. Utgående från fyra scenarier har huvudfrågeställningen i dessa diskussioner varit att extrahera information om "*vem som behöver veta vad, när?*". Denna information har sedan använts tillsammans med en bedömning av de mättekniska möjligheterna för att formulera en grundläggande kravspecifikation för systemets funktionalitet. Notera att denna kravspecifikation inte berör organisation och roller mellan olika myndigheter och kommuner, utan endast utgör en teknisk beskrivning av systemets önskade mät-, och rapporteringsförmåga. Denna avgränsning gäller projektet som helhet. Vi noterar dock att väldefinierade och upprättade informationsvägar mellan olika aktörer är av största vikt, och att den förmågeökning som vi beskriver här skulle bidra till att tydliggöra dessa.

Rapporten är disponerad enligt följande: Bakgrund och motivering ges i avsnitt 3, följt av en beskrivning de fysikaliska processerna i en kärnexplosion i avsnitt 4 och dess effekter i avsnitt 5. I avsnitt 6 beskrivs hur dessa effekter kan ge upphov till olika signaturer i miljön som kan låta sig mätas, och den svenska mätförmågan inom detta område beskrivs i avsnitt 7. I avsnitt 8 återges fyra olika scenarier som använts i diskussionerna med potentiella användare av information från det tänkta systemet, tillsammans med en beskrivning av det informationsbehov som vi bedömer uppstår för olika aktörer för de olika scenarierna. Rapporten avslutas med beskrivning av resulterande grundläggande krav för systemet i avsnitt 9. Avsnitt 4-6 är av relativt teknisk och generell karaktär, avsedd för den som önskar sig en något djupare orientering i ämnet. Den läsare som önskar en fortsatt diskussion mer inriktad på Svensk förmåga och ett framtida mät- och analysystem kan efter avsnitt 3 fortsätta direkt till avsnitt 7.

## 3 Bakgrund och motivering

### 3.1 Ett försämrat säkerhetsläge

De senaste åren har det försämrade säkerhetsläget i omvärlden medfört att kärnvapenfrågor åter har dykt upp på dagordningen i ökad utsträckning, både internationellt och i Sverige. I försvarsbeslutet 2020 [2] konstaterades att den försvagade respekten för internationella normer och avtal under senare år bland annat har manifesterats på massförstörelsevapnens område. Detta gäller inte minst i Sveriges närområde<sup>1</sup> och Europa, där, som en följd av Rysslands agerande, det säkerhetspolitiska läget har försämrats över tid. I ”Gemensamma grunder (grundsyn) för en sammanhängande planering för totalförsvaret” från 2016 [3] nämns att risken för användning av kärnvapen i regionala eller lokala konflikter kan komma att öka. I samma dokument görs även bedömningen att detta även gäller vid eller i anslutning till vårt närområde och att det därför måste beaktas i planering och förberedelser. I försvarsmaktens doktrin för gemensamma operationer [4] sägs att vid ett väpnat angrepp mot Sverige kan taktiska kärnvapen sättas in tidigt i konflikten. En liknande formulering finns i den senaste handlingsplanen för totalförsvaret, ”Handlingskraft” (2021) [5]. Detta understryks ytterligare av Rysslands invasion av Ukraina i februari 2022. Kärnvapen är en av grundpelarna i rysk säkerhetspolitik [6], och omvärldens oro för konsekvenserna av kärnvapenanvändning i kriget i Ukraina är påtaglig. Det pågående kriget i Ukraina har också väckt frågan om avsiktligt sabotage mot kärnkraftverk, något som exempelvis skulle kunna påverka dricksvattenförsörjning och livsmedelsproduktion [7].

För Sveriges del aktualiserar detta behovet av snabb och tillförlitlig information om en inträffad kärnexplosion och andra nukleära händelser i Europa, och vilka fysiska konsekvenser det kan innebära, även för svenskt vidkommande. Detta är en vital funktion där det innebär en stor fördel att inte behöva förlita sig på information från andra stater, och det är dessutom inte omöjligt att endast inhemsk information finns att tillgå i vissa fall. Det är uppenbart att en kärnexplosion i Sverige skulle få konsekvenser för hela samhället, och involvera de flesta, eller alla, komponenter av Sveriges totalförsvaret. En robust svensk förmåga att koordinerat rapportera data för kärnexplosioner och dess konsekvenser i Sverige till vitt skilda aktörer skulle då fylla en viktig funktion, både för centrala beslutsfattare och för aktörer på fältet.

Förutom den ökade oron för de mycket allvarliga händelser i Sverige och Europa som skisseras ovan, påverkar det försämrade säkerhetspolitiska läget även kärnvapenfrågor i ett globalt perspektiv. Framtiden för kärnavtalet med Iran (JCPOA) är osäker sedan USA drog sig ur avtalet 2018, och även om Nordkorea inte genomfört något kärnladdningsprov sedan 2017 bedöms landet fortsätta att utveckla sitt kärnvapenprogram, inklusive vapenbärare, bland annat genom sina frekventa robottester.

En fråga inom det globala nedrustningsarbetet som direkt kopplar till kärnexplosioner är statusen för det fullständiga provstoppsavtalet (CTBT – Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty), som öppnades för signatur 1996 [8]. Trots att CTBT idag skrivits under av 186 stater, och att 176 av dessa också ratificerat, har avtalet inte trätt i kraft<sup>2</sup>. Trots detta fungerar avtalet *de facto*, dels via politiska utfästelser gjorda av kärnvapenstaterna, och

<sup>1</sup> Definieras i försvarsbeslutet som Östersjöregionen, inloppet till Östersjön, Västerhavet, Nordkalotten, Barents hav, Norska havet och de norra delarna av Nordatlanten.

<sup>2</sup> För att detta skall kunna ske, måste alla 44 så kallade Annex 2-stater ratificera avtalet. Idag har endast 36 av dessa gjort så. Bland länder som inte ratificerat CTBT märks USA, Kina och Israel. Annex 2-stater som inte skrivit på, och givetvis då heller inte ratificerat, är Indien, Pakistan och Nordkorea.

dels via den avskräckande funktionen hos avtalets globala verifikationssystem. Sedan avtalet öppnades för signatur har endast Indien, Pakistan och Nordkorea genomfört kärnladdningsprov. Det försämrade säkerhetsläget, i kombination med det faktum att avtalet i strikt mening ännu inte är juridiskt bindande, har medfört en ökad oro för att någon av kärnvapenstaterna skulle kunna utföra ett kärnladdningsprov. Ett exempel på en sådan tendens är tidigare rapporter i media om att Trumpadministrationen i USA diskuterade ett sådant alternativ 2020 [9]. De flesta bedömer att ett kärnladdningsprov utfört av någon av de etablerade kärnvapenstaterna skulle verka destabiliserande och orsaka att fler stater provade, och att CTBT, inklusive dess verifikationssystem, kraftigt skulle försvagas eller falla samman. Detta pekar på vikten av en utökad nationell förmåga att kunna upptäcka kärnladdningsprov i omvärlden för att ta höjd för en sådan händelseutveckling.

Sammantaget står vi inför en hotbild där Sverige kan drabbas av allt från radioaktiva ämnen vid en explosion utanför vår territorialgräns (det så kallade åskådarfallet) till en eller flera kärnexplosioner i Sverige. I ett bredare perspektiv finns också motsvarande hotbild på andra platser i världen, samt en försämrad möjlighet till framgångsrikt nedrustningsarbete.

## 3.2 Nuvarande situation och framtida behov

Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) bedriver aktivt verksamhet inom exempelvis teknisk verifikation av det fullständiga provstoppsavtalet, samt forskning kring kärnvapenhotet och dess konsekvenser. FOI utvecklar bland annat mätsystem och analysmetoder för detektion av kärnladdningsprov som används både globalt och nationellt (se vidare 6.2.3), och driver, delvis på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), ett nätverk av mätstationer för luftburen radioaktivitet. FOI driver också Sveriges nationella datacenter (NDC) för övervakning av CTBT, där data från över 300 globalt fördelade mätstationer analyseras rutinmässigt. Två av dessa stationer (en seismologisk station och en radionuklidstation) finns i Sverige och handhas av FOI.

Annan nationell kompetens som är relevant i detta sammanhang, som bevarats eller delvis stärkts, finns inom beredskapen för civila kärntekniska olyckor. Idag har Sverige en grundförmåga hos länsstyrelser och kommuner att hantera en kärnteknisk olycka oavsett var den sker. Denna förmåga ligger under tillsyn av MSB. Mättekniskt består denna grundförmåga av handburna dosratsinstrument hos kommuner och länsstyrelser. Försvarsmakten har också egen mätförmåga som är tillgänglig i hela Sverige. Utöver detta driver SSM ett nätverk av fasta gammastationer, och i beredskapszonerna [10] närmare kärnkraftverken finns ytterligare mätresurser (se avsnitt 6). Vidare driver SSM en nationell organisation för expertstöd vid olyckor och andra allvarliga händelser med radioaktiva ämnen (se 6.3).

Till skillnad från en kärnkraftsolycka kan en kärnexplosion i Sverige i princip inträffa var som helst i landet. Detta medför att den fasta kapaciteten för strålningsmätningar behöver vara rikstäckande på ett annat sätt än dagens mätsystem, som, med undantag av kommunernas dosratsinstrument och ett relativt glest nätverk av gammastationer, är kraftsamlade runt kärnkraftverken. Strategin för strålningsmätningar efter en kärnkraftsolycka för att erhålla underlag till beslut om exempelvis in- eller utrymning bygger till stor del på manuella och/eller mobila mätningar [11]. Att upprätthålla en sådan förmåga på nationell nivå skulle bli kostnadskrävande. Den storskaliga karteringen är tänkt att främst ske med hjälp av flygmätningar, men det är osäkert om detta är möjligt att genomföra i en krigssituation. Detta skulle delvis kunna kompenseras med en utökad fast mätförmåga.

Den förändrade hotbilden aktualiserar alltså ett ökat behov av korrekt och tidskritisk rapportering om allt från kärnteknisk verksamhet utanför Sveriges gränser,

kärnladdningsprov i det fördolda och kärnvapeninsatser utanför Sveriges gränser till kärnexplosion i Sverige. Ett system som realiserar detta behov skulle kunna ha förmågan till både generell mätteknisk omvärldsövervakning, upptäckt av kärnexplosion inklusive kvantifiering av direktverkan och kvarvarande strålning, samt upptäckt och analys av kärnladdningsprov i omvärlden. Varning och information från ett sådant system kan behöva ha olika form beroende på mottagare. Exempel på produkter som skulle kunna levereras sträcker sig från rådata från enskilda sensorer till sammanfattande skraddarsydda rapporter, och skulle kunna förmedlas till mottagare per automatik och/eller manuellt utgående från behov. Vi noterar vidare att det skulle vara en uppenbar fördel om informationen kommer från en enda operatör som även har ansvaret att driva och underhålla systemet.

I syfte att sätta in allt detta i ett bredare sammanhang, och för att ge en ökad förståelse för möjligheter och begränsningar för ett system av den här typen, följer i de tre nästföljande avsnitten en allmän beskrivning av de fysikaliska processerna i en kärnexplosion, dess effekter och vilka möjligheter det finns att mäta en kärnexplosion och andra nukleära händelser.

## 4 Explosionsförlopp för kärnexplosioner

Den energi som frigörs vid en kärnexplosion kan ge upphov till flera olika effekter, även kallade verkansformer. De främsta är stötvåg i luft, markstötvåg, värmestrålning, joniserande initialstrålning och elektromagnetisk puls (EMP), vilka alla är mer eller mindre omedelbara effekter. Beroende på omständigheterna kan explosionen även ge upphov till kvarvarande effekter i form av radioaktivt nedfall, neutroninducerad radioaktivitet och jonisationsfenomen i atmosfären. Vilka av dessa effekter som är av betydelse beror av många faktorer. Till exempel påverkar det omgivande mediet (luft, vatten, etc.) vilka effekter som uppstår, och på vilka avstånd dessa ger verkan. Generellt avtar effekternas verkan med avståndet från explosionen, så att svåra skador nära explosionen innebär lättare sådana på lite längre avstånd, mätbara men icke-skadliga effekter ännu längre bort, och slutligen obefintliga effekter tillräckligt långt från explosionen. Förutom det omgivande mediet påverkar explosionsstyrkan, det vill säga mängden frigjord energi, effekternas omfattning. Den gängse enheten för explosionsstyrka är kiloton (kt), där ett kiloton ungefär motsvarar energin som frigörs när tusen ton kemiskt explosivämne exploderar.<sup>3</sup> Eftersom explosionsstyrkan är avgörande för hur stora de flesta effekterna från kärnexplosionen blir, är det betydelsefullt att kunna göra en ungefärlig uppskattning av den. En annan viktig parameter är explosionens höjd över (eller djup under) markytan. Punkten på markytan rakt under (eller över) explosionspunkten kallas *nollpunkten* (eng. *ground zero*).

Beskrivningen av effekterna från en kärnexplosion som följer nedan börjar med en detaljerad redogörelse för explosionsförloppet vid en luftexplosion, vilket innebär en kärnexplosion i atmosfären, tillräckligt högt över markytan för att markmaterial inte ska blandas med vapenresterna. Därefter beskrivs hur andra typer av explosioner skiljer sig från fallet luftexplosion. I avsnitt 4 beskrivs var och en av de huvudsakliga verkansformerna i mer detalj. Huvudsyftet är att ge en solid bakgrund för den följande diskussionen om mätsignaturer från kärnexplosioner i avsnitt 5.

### 4.1 Luftexplosioner

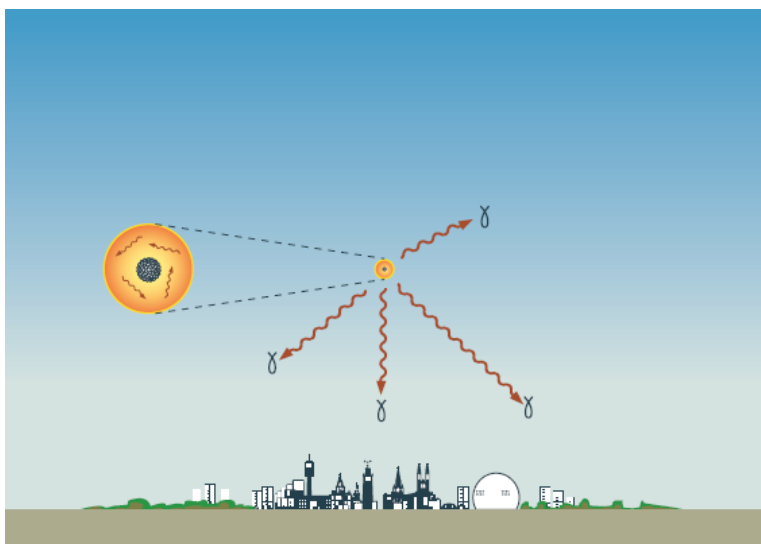
I detta avsnitt ges en översikt av explosionsförloppet vid en luftexplosion. Därvid beskrivs särskilt uppkomsten av stötvåg och värmestrålning. En bra referens i sammanhanget är [12].

#### 4.1.1 Eldklotets strålningstillväxt

Som framgår redan av enheten för explosionsstyrka – kiloton – är det oerhörda mängder energi som frigörs i en kärnexplosion. Eftersom kärnvapnet rent volymmässigt inte är stort innebär detta att energitätheten, och därmed temperaturen, initialt är mycket hög – tiotals till hundratals miljoner grader. Vapenresterna förgasas därför, och är i hög grad joniserade – ett plasma bildas. Den höga temperaturen medför att den frigjorda energin nu främst består av värmestrålning i röntgenområdet från detta plasma. I den omgivande, kalla, luften finns gott om bundna elektroner som kan joniseras av röntgenstrålning, vilket

<sup>3</sup> Detta motsvarar ungefär  $4,2 \cdot 10^{12}$  J. Kärnladdningar med så skilda styrkor som tiondels kiloton till 50 000 kt har provats. I det sistnämnda fallet kan styrkan anges som 50 megaton (Mt).

innebär att strålningen absorberas så gott som omedelbart när den tränger ut i luften. Detta medför att strålningen "äter" sig ut i den omgivande luften, och ett växande eldklot av het luft bildas, Figur 1. I det heta plasmat av joniserad luft finns inga bundna elektroner som röntgenstrålningen kan växelverka med, vilket medför att medelfrivägen för strålningen är lång, och att den rör sig tämligen obehindrat i plasmat. Temperaturen är därför utjämnad, och man brukar tala om en *isoterm sfär*. Expansionen går först mycket snabbt: hastigheten utåt är någon bråkdel av ljushastigheten de första tiondels mikrosekunderna, för att sedan sjunka när energitillförseln från kärnreaktioner avstannar. På mindre än en mikrosekund har den frigjorda energin därigenom spritt sig till en luftmassa många gånger större än laddningen. Detaljerna kring förloppen i själva kärnladdningen är därför av liten betydelse för den fortsatta utvecklingen, med undantag för den joniserande initialstrålningen, vars tidsförlopp är direkt knutet till kärnprocesserna i laddningen. Eldklotets tillväxt medför också att dess temperatur sjunker. Först när temperaturen blivit så pass låg att eldklotet avger strålning främst som synligt ljus, kommer dock värmestrålningen att vara synlig för en yttre betraktare. Det sker först i nästa fas.



Figur 1: En luftexplosion med styrkan 100 kiloton sker på femhundra meters höjd. Direkt i explosionsögonblicket frigörs initialstrålning i form av neutroner och gammafotoner. De sistnämnda rör sig med ljusets hastighet, och har efter en mikrosekund hunnit som längst 300 meter. Samtidigt har ett eldklot bildats och genom strålningstillväxt nått en radie på ca 20 meter. I centrum av eldklotet befinner sig de kraftigt upphettade resterna av vapnet (grått).

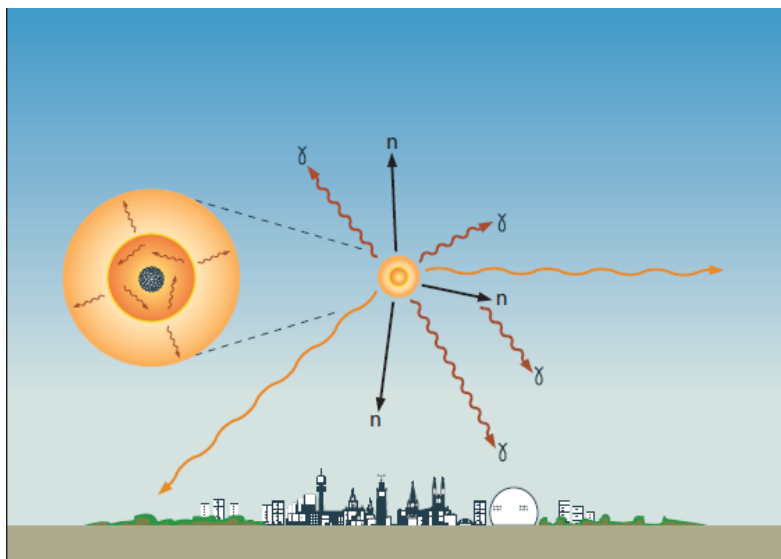
#### 4.1.2 Övergången till stötvågstillväxt

Trycket i det växande eldklotet blir mycket högt jämfört med den omgivande luften, vilket medför att en stötvåg bildas vid dess yta. I eldklotets inre har de heta vapenresterna börjat expandera, vilket också orsakar en stötvåg<sup>4</sup>, som rör sig ut genom eldklotet. Till slut hinner denna stötvåg ikapp eldklotets expanderande rand, där den förenar sig med den befintliga stötvågen i fronten. Den resulterande stötvågen rör sig ut i den omgivande luften, och eldklotet tillväxer nu genom stötvågens utbredning, Figur 2. Dess temperatur är visserligen lägre än den isoterma sfären som den lämnar bakom sig, men inledningsvis så pass hög att den strålar inom det ultravioletta området. Den fortsatta expansionen innebär dock att temperaturen snabbt sjunker, så att värmestrålningen från eldklotet nu blir synlig

<sup>4</sup> Denna stötvåg brukar på engelska benämnas *case shock*, vilket fritt översatt till svenska blir *höljstör*. I praktiken är vapnets hölje vid det här laget inget annat än de yttre delarna av det plasma som utgör vapenresterna.



för en yttre betraktare. För en explosion av storleken 100 kt sker detta knappt en millisekund efter explosionen. Under tiden som stötvågen driver expansionen av eldklotet, fortsätter den heta, centrala delen av eldklotet – isoterma sfären – att tillväxa genom strålningsdiffusion. Dess temperatur sjunker, men är betydligt hetare än stötvågsfronten.



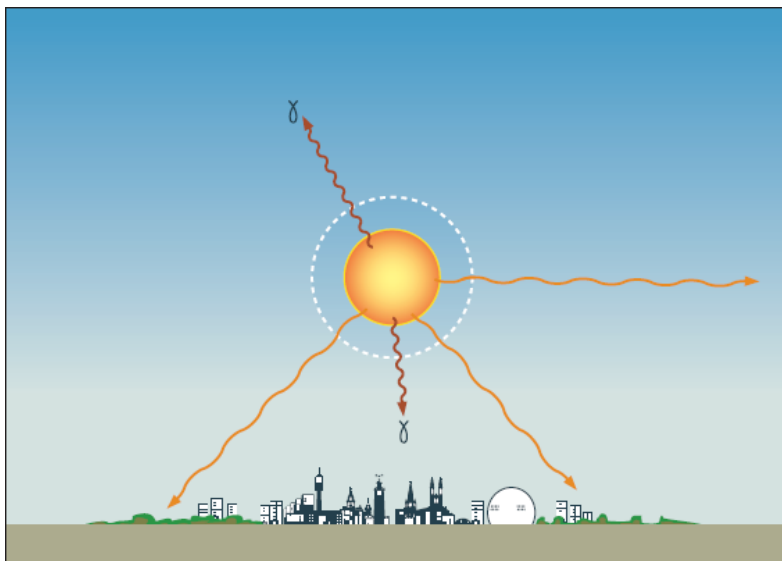
Figur 2: När knappt en millisekund har gått, tillväxer eldklotet genom stötvågens utbredning i omgivande luft. En första puls av värmestrålning tränger ut (orange, långvågig på bilden). Dessutom avges fortfarande joniserande initialstrålning i form av neutroner och neutroninducerade gammafotoner. Inuti eldklotet befinner sig den heta isoterma sfären (mörkt orange), och i centrum vapenresterna.

#### 4.1.3 Stötvågens frikoppling från eldklotet

Eldklotets snabba expansion och resulterande avsvälning gör att denna första puls av värmestrålning blir mycket kortvarig – millisekunder för låga laddningsstyrkor och upp till tiondels sekunder för stora laddningar. Eldklotets tillväxt fortsätter, och när temperaturen i stötvågsfronten sjunker till runt 2 000 grader är den inte längre varm nog att avge synligt ljus, utan blir genomskinlig. Stötvågen frikopplas alltså från eldklotet (eng. *break-away*). Därvid blottas eldklotets heta inre (den isoterma sfären) för en yttre betraktare, vilket ger upphov till en andra, mer långvarig, puls av värmestrålning, Figur 3. Varaktigheten är från en bråkdels sekund för låga laddningsstyrkor till tiotals sekunder för stora laddningar.

Det komplicerade växelspelet mellan röntgenstrålning, värmestrålning och stötvåg som beskrivits ovan resulterar alltså i att en ”dubbelpuls” med värmestrålning avges från en kärnexplosion i luft. Energin har genom dessa processer fördelats så att ungefär hälften omvandlats till luftstötvåg, medan en tredjedel avges till omgivningen som värmestrålning.<sup>5</sup> Resterande energi härrör huvudsakligen från olika former av joniserande strålning.

<sup>5</sup> Denna fördelning är beroende av explosionsstyrkan, och de angivna värdena avser ungefär 10 kt. Generellt ökar andelen värmestrålning med explosionsstyrkan.



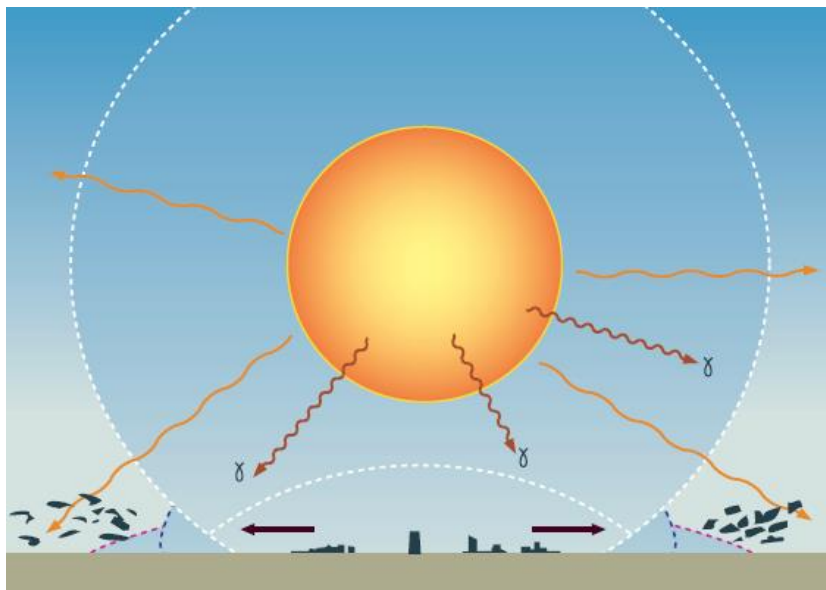
Figur 3: Efter ca 30 millisekunder (vid 100 kt styrka) har stötvågen svalnat och blivit genomskinlig. Det heta inandömet, som tidigare var dolt, blir nu successivt synligt för en betraktare. En andra, mer utdragen, puls av värmestrålning (orange) tränger ut. Initialstrålning avges i form av gammafotoner orsakade av sönderfall av kortlivade radioaktiva vapenrester.

#### 4.1.4 Explosionens senare förlopp

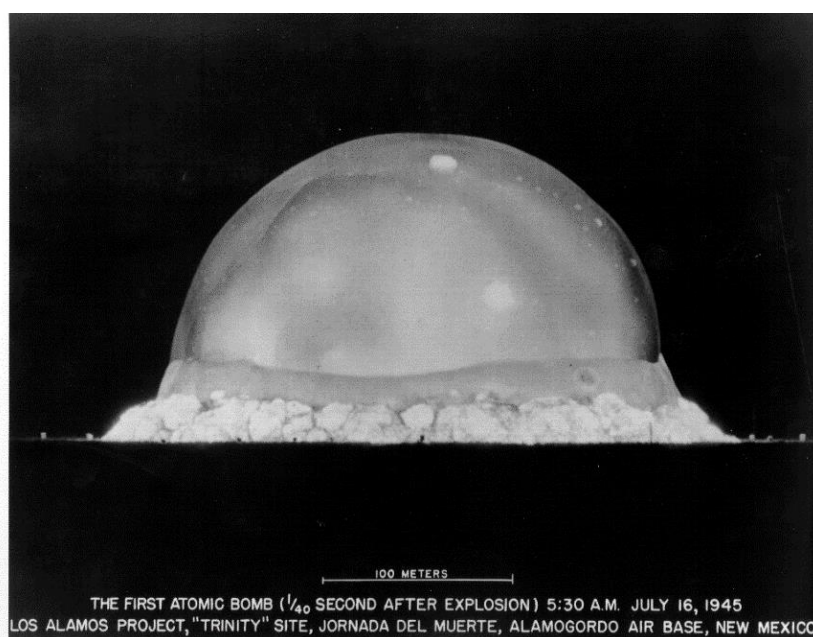
Eldklotet fortsätter att expandera med åtföljande avsvälning, samtidigt som stötvågen utbreder sig i luften. När stötvågen träffar marken reflekteras den till del, samtidigt som en del av energin överförs till marken i form av en luftstötvågsgenererad markstötvåg (eng. *air slap*). Den reflekterade stötvågen utbreder sig i luft som har värmts upp av den ursprungliga stötvågen, vilket medför att ljudhastigheten är högre än i opåverkad luft. Det innebär att utbredningshastigheten för den reflekterade stötvågen är högre än den ursprungliga stötvågens, så att reflexionen hinner ikapp den sistnämnda. Den resulterande förstärkta stötvågen rör sig nästan vertikalt längs med markytan, och benämns *Mach-fronten*.

Ett annat fenomen som kan inträffa är att värmestrålningen värmer upp markytan och luften alldeles ovanför denna. I vilken grad detta sker beror på markytans termiska egenskaper. För en termiskt ideal yta, som reflekterar bort värmestrålningen, sker det i allmänhet inte; exempel på sådana markytor är vatten, snö och andra ljusa ytor. För en markyta som är mer benägen att absorbera värmestrålningen, kan en *förlöpare* (eng. *precursor*) till stötvågen utbreda sig i det heta luftlagret längs marken, Figur 4 och 5. En sådan förlöpare medför att stötvågen försvagas, eftersom förlöparen inte bara utbreder sig längs marken, utan även upp i luften ovanför markytan. Förlöparen kan också leda till att stötvågens reflexion störs, så att Mach-fronten inte längre når ner till markytan. Detta försvagar också stötvågsverkan.

Eldklotets expansion leder till att det till slut blir så svalt att den joniserade luften rekombinerar med fria elektroner och bildar elektriskt neutrala atomer och molekyler. Detta sker under avgivande av strålning, vilket medför ytterligare energiförlust. Eldklotet slutar sedan att stråla, men fortsätter expandera. När avsvälningen tar överhanden har eldklotet nått sin maximala storlek, för att sedan börja krympa.



Figur 4: När stötvågen reflekteras mot marken, bildas en förstärkt, nästan vertikal, så kallad Mach-front (svart streckad linje). I exemplet i figuren har dessutom stötvågsfronten en förlöpare (röd streckad linje) närmast markytan. Denna uppstår eftersom luften där har hettats upp av värmestrålningen, vilket möjliggör en högre stötvågshastighet där.



Figur 5: Det första kärnladdningsprovet, Trinity, genomfört den 16 juli 1945 i Alamogordo. Explosionsstyrkan var 21 kt, och explosionen skedde i ett 30 m högt torn. Bilden är tagen 25 ms efter explosionen. Eldklotets radie är drygt 100 m. Förlöpare och begynnande Mach-front syns. Eftersom explosionshöjden är liten, blir den sistnämnda inte så påtaglig i den fortsatta utvecklingen som den hade varit för en luftexplosion. Bild: Los Alamos National Laboratory.

Expansionen innebär att eldklotet är kraftigt förtunnat i jämförelse med den omgivande luften, och den resulterande lyftkraften får eldklotet att hastigt börja stiga uppåt i atmosfären. Den snabba rörelsen innebär att eldklotet omblandas turbulent, samt att luft under eldklotet sugas uppåt. Därvid uppstår ett karakteristiskt svampmoln, Figur 6 och Figur 7. Under den fortsatta konvektiva stigningen blandas eldklotet upp med omgivande luft och löses så småningom upp.

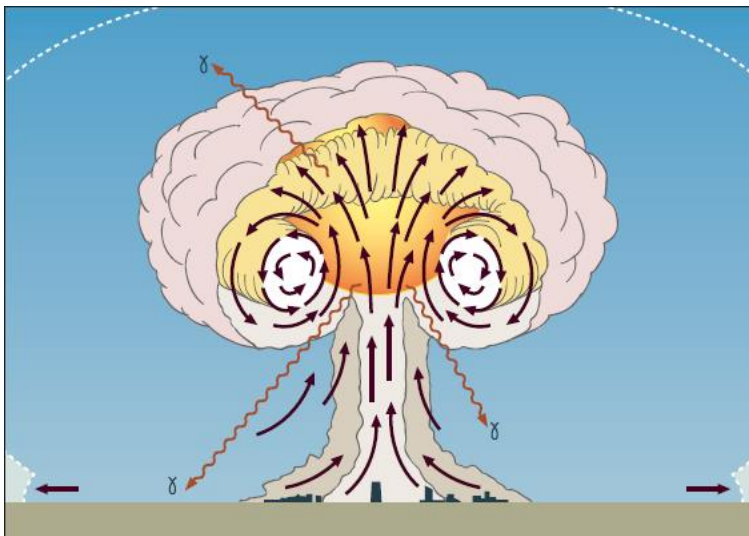
Bakom stötvågen sätts luften först i rörelse utåt, vilket ger upphov till en kraftig stötvågsvind. När eldklotet börjat stiga kommer stötvågsvinden byta riktning när luft strömmar till för att fylla tomrummet. Slutligen, när eldklotet stigit tillräckligt högt kan det uppstå ett utåtriktat vinddrag från svampmolnets bas.<sup>6</sup>

Det förlopp som beskrivits här avser en explosion i atmosfären på så pass hög höjd att eldklotet aldrig hinner bli så stort att det når ner till marken. Detta är definitionen på en luftexplosion, och har avgörande betydelse eftersom radioaktiva vapenrester då följer med i den konvektiva stigningen till hög höjd, utan att beblandas med markmaterial. Vapenresterna kondenserar därför till mycket små partiklar som följer med luftmassornas rörelse i atmosfären, samtidigt som de sakta<sup>7</sup> faller till marken som globalt nedfall. Radioaktivitet kan även föras ned till marken till exempel till följd av nederbörd, förutsatt att partiklarna befinner sig i eller under nederbördsmolnen. I nästa avsnitt beskrivs hur andra typer av kärnexplosioner skiljer sig från den beskrivna luftexplosionen.

---

<sup>6</sup> Vid underjords- och undervattensexlosioner kallas detta *basdrag* (eng. *base surge*), och är förknippat med ett radioaktivt stoft- eller dimmoln.

<sup>7</sup> Typiska partikelstorlekar är tiondels mikrometer, med falltider i storleksordningen månader och år.



Figur 6: Den kraftiga expansionen gör att eldklotet blir mycket förtunnat, och hastigt stiger uppåt.



Figur 7: Luftexplosion, Tumbler-Snapper Dog, genomförd den 1 maj 1952 på provplatsen i Nevada. Explosionshöjden var 320 m och styrkan 19 kt. Soldaterna i förgrunden står 6,4 km från nollpunkten och befann sig i skyddsgröpar vid själva explosionen. Bild: Los Alamos National Laboratory.

## 4.2 Ytexplosioner

En kärnexplosion i atmosfären, men närmare markytan eller i direkt kontakt med denna kallas för en ytexplosion eller markexplosion, Figur 8.

Ju närmare marken som en explosion sker, desto starkare blir kopplingen till marken, och den resulterande markstöt vågen blir kraftigare än vid en luftexplosion med samma explosionsstyrka. Luftstöt vågen blir däremot svagare, eftersom synergien mellan direkt och reflekterad stöt våg minskar eller uteblir. Explosionen kommer också att ge upphov till en krater.

En konsekvens av att explosionen sker nära markytan är att förutsättningarna finns för att en påtaglig (men lokal) elektromagnetisk puls genereras. Detta har att göra med den stora skillnaden i täthet mellan luft och mark, se vidare avsnitt 4.5.

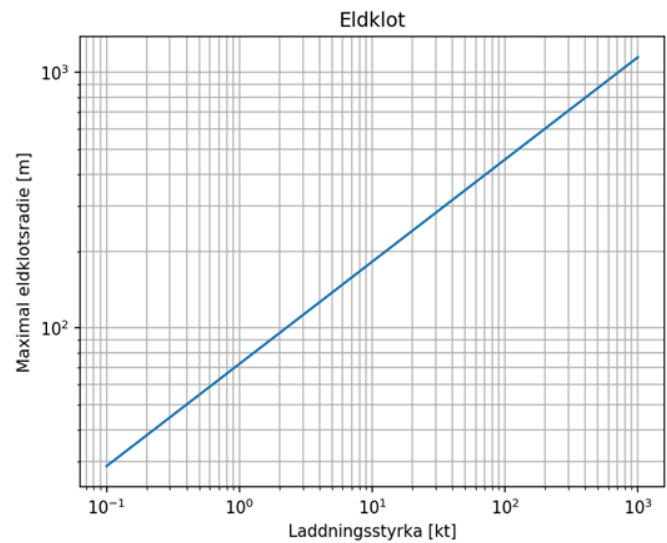


Figur 8: Ytexplosion, Plumbbob Fizeau, genomförd den 14 september 1957 på provplatsen i Nevada. Laddningen var placerad i ett 150 m högt torn och hade styrkan 11 kt. Bild: Los Alamos National Laboratory.

En viktig skillnad mellan luft- och ytexplosioner är att i det senare fallet kan vapenrester inuti eldsklotet beblandas med markmaterial, så att radioaktiva rester kondenserar på partiklar av skilda storlekar. De största av dessa partiklar slungas ballistiskt eller faller ned koncentriskt kring nollpunkten. Mindre partiklar förs i vindriktningen och faller ned över stora avstånd. Den främsta skillnaden mellan detta lokala nedfall och det globala nedfall som beskrevs i samband med diskussionen om luftexplosioner är tidsaspekten: genom att partiklarna i lokalt nedfall är större och faller till marken snabbare, kommer de att vara mer radioaktiva och partikelkoncentrationerna kommer att vara högre än vid global spridning. Nedfallet blir därmed ett mer akut problem. Närheten till marken kommer att innebära att en del av den kvarvarande radioaktiviteten härrör från neutronaktivering. De olika formerna av kvarvarande radioaktivitet diskuteras närmare i avsnitt 5.4.

Gränsdragningen mellan luft- och ytexplosioner vad gäller explosionshöjd ges grovt av eldsklotets maximala storlek. Figur 9 ger exempel på maximala eldsklotsradier.

Laddningsstyrka (kt)	Maximal eldklotsradie (m)
0,1	29
1	72
10	180
100	460
1 000	1 100

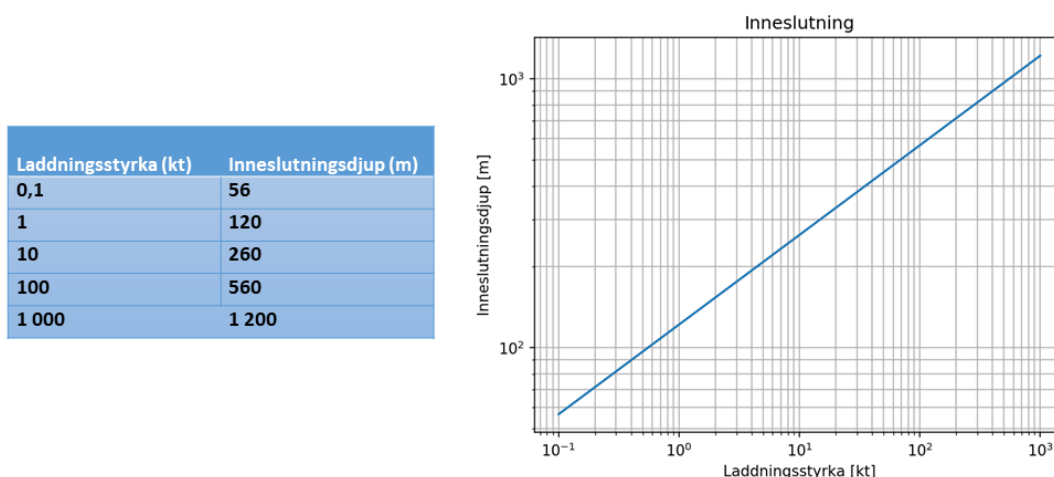


Figur 9: Maximala eldklotsradien för en ytexplosion är ett approximativt mått på den explosionshöjd ovanför vilken lokalt nedfall kan förväntas vara försumbart. Figuren visar radiens beroende av explosionsstyrkan.

### 4.3 Underjordsexplosioner

Vid en explosion under markytan kommer både joniserande initialstrålning och värmestrålning att absorberas inom några meter från explosionspunkten. Detta har att göra med att det omgivande mediet är i storleksordningen tusen gånger tätare än vid en atmosfärisk explosion, och därmed är medelfrivägen för all strålning betydligt kortare än i luft. En stor del av den absorberade energin går åt till att förångas, eller på längre avstånd spräcka sönder, det omgivande mediet. En del av den frigjorda energin kommer emellertid att bidra till markstöt vågen som utbreder sig från explosionen. När markstöt vågen träffar markytan kan en markstöt vågsinducerad luftstöt våg bildas.

Vilket djup som krävs för att hålla radioaktiva partiklar inneslutna vid ett kärnladdningsprov är bland annat beroende av markmaterialets beskaffenhet. Figur 10 är baserad på en amerikansk tumregel: ”400 fot per  $kt^{1/3}$ ”. Det finns dock stora osäkerheter, såsom bergets kvalitet, sprickbildningens omfattning, etc. Dessutom är vissa vapenrester, till exempel radioaktiva ädelgaser, flyktiga och svårare att hålla inneslutna (se avsnitt 6.2.3). På samma sätt som vid ytexplosioner kommer neutronaktivering att bidra till den kvarvarande radioaktiviteten.



Figur 10: Minsta explosionsdjup som krävs för inneslutning av en underjordsexplosion. Stor variation kan råda.

## 4.4 Undervattensexpllosioner

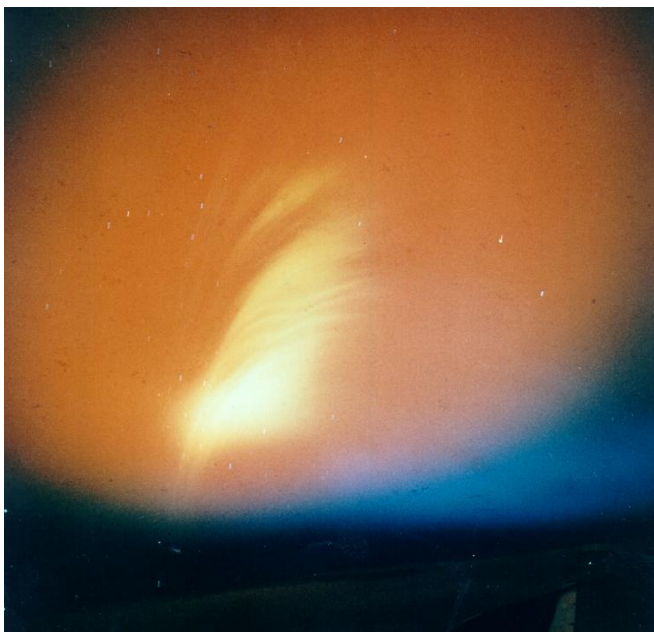
Vid en kärnexplosion under vatten gäller, som för en underjordsexplosion, att strålningen absorberas mer eller mindre omedelbart. En del av energin överförs därvid i en vattenstötvåg. Det bildas också en bubbla av vapenrester och förångat vatten. Om explosionen är tillräckligt ytnära, kan denna bubbla bryta vattenytan med ett enormt vattenuppkast som följd, och utveckla ett svampmoln likt det som uppstår vid en luftexplosion. Är explosionsdjupet stort, kommer bubblan att oscillera och lösas upp innan den når vattenytan. För att exemplifiera är, vid explosionsstyrkan 10 kt, ett djup större än 350 m att betrakta som mycket djupt. Omvänt är, vid 10 kt, ett explosionsdjup mindre än 130 m att betrakta som ytnära. Östersjön, med ett medeldjup kring 100 m, är alltså att betrakta som ett grunt hav vid laddningsstyrkor från 10 kt och uppåt.

## 4.5 Höghöjdsexpllosioner

Med höghöjdsexpllosioner menas kärnexplosioner som sker på över 30 km höjd, det vill säga i den starkt förtunnade luften i eller ovanför stratosfären. Den tunna luften leder till att eldklotet blir mycket större än för explosioner på lägre höjder, Figur 11, och värmestrålningspulsen får ett annat tidsförlopp än den "dubbelpuls" som beskrivits för atmosfäriska explosioner. Istället avges en enda puls, huvudsakligen bestående av röntgenstrålning.

Röntgen- och gammastrålningen från explosionen når inte ner till marken, men ger vid sin växelverkan med atmosfärens övre lager upphov till höghöjds-EMP. Strålningen kan också skada objekt i rymden, såsom satelliter eller stridsdelar, antingen direkt eller genom att den åstadkommer en elektromagnetisk puls, så kallad systemgenererad EMP, i objektet. Verkansradierna kan bli tusentals km (vid stora laddningsstyrkor, och höjder över 10 000 km) mot oskyddade satelliter.





Figur 11: Höghöjdsexplosion, Fishbowl Starfish Prime, utförd den 9 juli 1962 över Stilla Havet. Laddningen på 1,4 Mt exploderade på 400 km höjd. På ön Oahu i Hawaii, cirka 135 mil nordost om nollpunkten, slogs flera gatubelysningsnät ut. Bild: Los Alamos National Laboratory.

## 5 Kärnvapenverkan

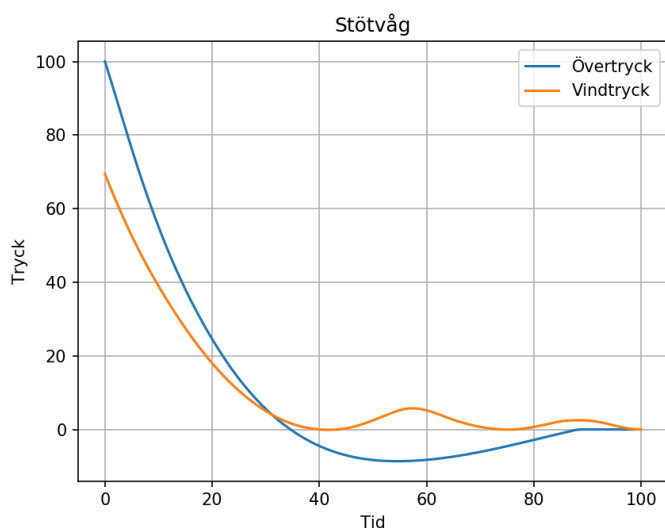
I detta avsnitt beskrivs var och en av de huvudsakliga verkansformerna i mer detalj. Några allmänna referenser kring kärnvapenverkan är [12, 13, 14, 15, 16].

### 5.1 Luftstötståg

Som vi sett i beskrivningen ovan ger en atmosfärisk kärnexplosion upphov till en stötståg som utbreder sig i alla riktningar från explosionspunkten. I början rör sig stötstågen fortare än ljudet, men på större avstånd sker dess utbredning med ljudhastigheten. När stötstågen passerar stiger trycket så gott som omedelbart, diskontinuerligt, till ett högsta värde, det maximala statiska övertrycket. Därefter sjunker övertrycket, för att så småningom förbytas till ett statiskt undertryck när eldklotet börjat stiga och lämna ett tomrum efter sig, Figur 12.

Ju större explosionsenergi, desto mer utdragen blir övertrycksfasen. Det innebär att övertrycket från en kärnexplosion har en betydligt längre varaktighet än motsvarande för konventionella explosioner. Verkan blir därför delvis annorlunda, genom att övertrycket kan tryckbelasta ett objekt under flera sekunder, och att exempelvis en byggnad samtidigt belastas i sin helhet. Den statiska impulsen, trycket integrerat över den tid som övertrycket varar, är därför också av betydelse för verkan.

Stötstågen orsakar genom de resulterande tryckskillnaderna också att luften sätts i rörelse så att en utåtriktad stötstågsvind bildas. Nära explosionen kan den vara mycket kraftig, närmast orkanartad. I undertrycksfasen kommer vinden vända, och blåsa in mot nollpunkten. Verkansmässigt brukar man tala om det dynamiska vindtrycket och den dynamiska impulsen.



Figur 12: Tidsförlopp för det statiska övertrycket och det dynamiska vindtrycket. Godtyckliga enheter på axlarna. De olika trycken har olika beroende av relevanta parametrar, såsom avståndet till explosionen. I exemplet är det dynamiska tryckets maxvärde mindre än det maximala statiska övertrycket, men förhållandet kan vara det omvända.

Det statiska övertrycket orsakar direkta övertrycksskador på både människa, materiel och byggnader. Människor är förhållandevis tåliga vad gäller direkta övertrycksskador. Vid stötvågsverkan mot människa tillkommer emellertid också sekundära skador till följd av kringflygande föremål, till exempel splitter från krossade fönster. Dessutom kan skador på människor uppstå genom att man kastas mot väggar eller liknande i omgivningen, vilket kan vara fallet för besättningen i ett i övrigt skyddat fordon. I byggnader, skyddsrum och befästningar kan stötvågen indirekt skada människor genom ras.

Samtidigt som stötvågen från ett kärnvapen kan döda eller allvarligt skada människor över ett stort område, är det viktigt att ha i beaktande att byggnader kommer att raseras över ännu större områden. Överlevande som befunnit sig mer skyddat i byggnader kan alltså finnas långt in i rasområdena.

Explosionshöjden är en parameter som angriparen skulle kunna välja för att optimera verkan mot en utvald måltyp. För de flesta mål, som byggnader och militära förband som inte är särskilt hårdgjorda, uppnås störst stötvågsverkan om explosionen sker som luftexplosion, där eldklotet gott och väl är över markytan. Orsaken är den förstärkning som den reflekterade stötvågen ger upphov till, vilket beskrivits i avsnitt 4.1.4. För bekämpning av befästningar och andra mycket hårda mål kan det krävas en ytexplosion för att uppnå de övertryck som krävs för att med tillräcklig sannolikhet slå ut målet. Detta får konsekvenser för uppkomsten av kollaterala skador, främst genom lokalt nedfall.

Om stötvågens egenskaper för en viss explosionsstyrka är kända, kan de bestämmas för andra laddningsstyrkor med hjälp av så kallade skalningslagar. Ett givet tryck uppträder på ett avstånd från explosionspunkten som är proportionellt mot kubikroten av explosionsstyrkan om explosionshöjden skalas om på samma sätt.<sup>8</sup> För att exemplifiera: en kärnexplosion om 1 kt på 150 m höjd ger ett maximalt övertryck på 200 kPa 200 m från nollpunkten. Det innebär att en 1 000 kt (=1 Mt) explosion på 1 500 m höjd ger samma övertryck, 200 kPa, 2 000 m från nollpunkten.

## 5.2 Markstötvåg

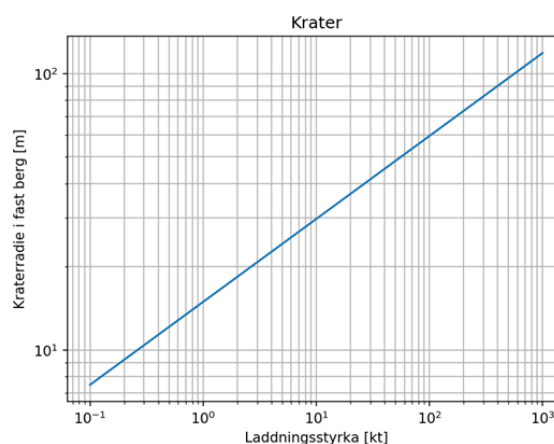
Hur en markstötvåg uppstår beror på vilken typ av explosion det är fråga om. Vid en luftexplosion kommer luftstötvågen träffa marken och därmed överföra energi som ger upphov till en markstötvåg (eng. *air slap*). På längre avstånd från nollpunkten kommer den längs marken propagerande stötvågen ge en luftstötvågsinducerad markstötvåg i marken närmast ytan. Vid ytexplosioner och underjordsexplosioner kommer värmestrålning och joniserande initialstrålning att absorberas i marken, vilket leder till att markstötvågen främst uppkommer direkt från strålningens växelverkan med det omgivande materialet.

Skadeverkan från markstötvågen uppstår dels genom markskakningar, dels genom så kallad utstötning, det vill säga att ett bergtrum eller annan kavitet i marken delvis störtar in. Markstötvågen kan ge omfattande indirekta skador på människor som vistas i skyddsrum och befästningar. Närmast nollpunkten får man också räkna med brott på nedgrävda ledningar för kommunikation, vatten, avlopp och gas. Brott på vattenledningar i bebyggelse försvårar räddningssituationen, eftersom det kan göra att vattentrycket blir för lågt för brandsläckning, samtidigt som vattenbehovet är mycket stort.

Ett ungefärligt mått på markstötvågens verkan mot underjordiska strukturer vid en ytexplosion ges av radien på den krater som bildas. En tumregel är att ordinära tunnlar på ett avstånd inom dubbla kraterradien raseras. Kraterradien i fast berg för ett antal olika laddningsstyrkor framgår i Figur 13.

<sup>8</sup> Detsamma gäller då även skalning av nollpunktsavståndet.

Laddningsstyrka (kt)	Kraterradie (m)
0,1	7,5
1	15
10	30
100	59
1 000	120

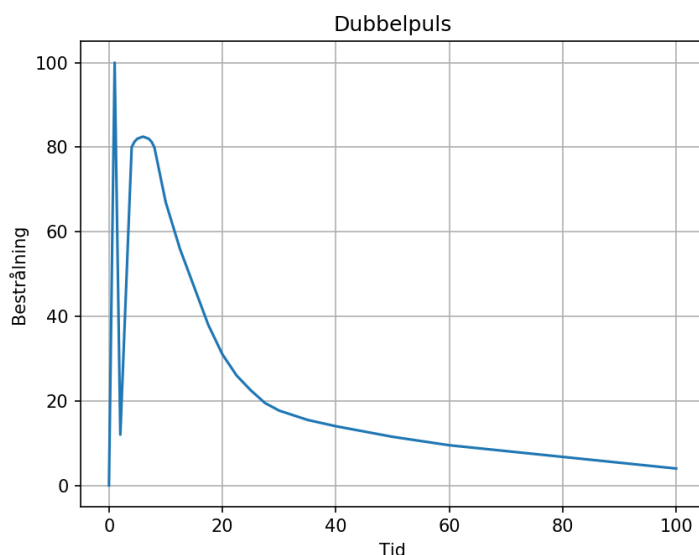


Figur 13: Kraterradier för kärnexplosioner i fast berg.

Även vattenstötvågen som uppstår vid yt- och undervattensexlosioner kan ge stötvågseffekter i till exempel ubåtar och andra fartyg. På ytfartyg kan svallvågen från en explosion i många fall ge stora skador.

### 5.3 Värmestrålning

De höga temperaturer som uppnås i en kärnexplosion medför att en stor del av energin avges som värmestrålning, som på avstånd främst består av synligt ljus och infraröd strålning. Vid en luftexplosion kommer värmestrålningen från explosionen att avges som en ”dubbelpuls”, Figur 14, och det är den andra, utdragna, pulsen som innehåller huvuddelen av strålningsenergin.



Figur 14: Tidsförlopp för värmestrålningen vid en atmosfärisk explosion. Bestrålningen är den energi per ytenhet som värmestrålningen tillför ett material. Godtyckliga enheter på axlarna.

Verkan av värmestrålningen beror på vilken bestrålning, energi per ytenhet, en yta utsätts för. Den beror främst på explosionens styrka och avståndet till explosionen. Andra viktiga

faktorer är sikten genom atmosfären, förekomsten av moln och markens reflektionsförmåga. Ljusa moln ovanför explosionspunkten och ljusa markmaterial (t.ex. snö) kan genom reflektion öka bestrålningen mot mål vid markytan. Bestrålningen är direkt proportionell mot explosionsstyrkans värmestrålningsandel och omvänt proportionell mot kvadraten på avståndet till explosionen. Värmestrålningens andel av explosionsstyrkan är ungefär en tredjedel vid 10 kt, och ökar med laddningsstyrkan. Trots viss spridning kan man i regel anse att värmestrålningen utbreder sig rätlinjigt. Detta innebär att skydd mot den direkta värmestrålningen erbjuds av varje föremål som kastar en tillräckligt stor skugga.

Värmestrålningen ger verkan främst genom brännskador på oskyddade människor, bländning, samt uppkomst av bränder. Vilken bestrålning som leder till att material antänds eller att oskyddad hud får brännskador varierar med explosionsstyrkan. Om styrkan är liten och bestrålningstiden därmed kort, räcker en mindre mängd bestrålning för att vålla en viss typ av skada än då styrkan är hög och bestrålningstiden lång. Detta beror på att värme hinner ledas bort från materialens yta. Å andra sidan ökar värmestrålningens andel med explosionsstyrkan, vilket sammantaget innebär att kärnexplosioner med stora laddningsstyrkor ger särskilt omfattande verkan från värmestrålning.

Värmestrålningen kan ge upphov till brännskador på människor som inte är skydda i förhållande till explosionspunkten. En person med svåra brännskador kan samtidigt ha i det närmaste oskadad hud, beroende på vilken sida av kroppen som var vänd mot explosionen. Eventuella reflexioner kan också medföra brännskador även om man inte står i direkta siktlinjen från explosionen. I omgivningar med lättantändligt material kan bränder uppstå. Eftersom värmestrålningen har kort varaktighet – den avges som en puls på typiskt några sekunder – är det inte givet att byggnader eller skog för den skull övertänds; detta beror i hög grad av luftfuktighet och väta i skog och mark, samt förekomsten av lättantändligt material. Luftstöt vågen kan därvid bidra genom att den slår sönder byggnader, bryter av gasledningar och förstör olje- och bensinupplag. Den brandrök som uppstår kommer att försvåra visuell sikt, och dessutom kan den vara giftig. I skyddsrum och befästningar medför röken problem med lufttillförseln både på grund av dess giftighet och genom att sotpartiklar sätter igen luftfilter.

## 5.4 Joniserande strålning

Energin i ett kärnvapen härrör från kärnreaktioner, och i samband med dessa frigörs även olika former av joniserande strålning. De viktigaste i akut skadehänseende är neutroner och gammafotoner. Hur stor andel av energin som frigörs som joniserande strålning beror på kärnladdningens utformning, men för ett typiskt kärnvapen handlar det om ungefär en sjättedel av energin.

Energifrigörelsen kan ske genom fission och fusion. Fusionsreaktioner kräver höga tryck och temperaturer, vilket rent praktiskt uppnås genom att använda en fissionsladdning som tändare, *primär*. Alla kärnexplosioner innefattar alltså en andel fission. En fusionsladdning med stor explosionsstyrka kan utformas så att fission är en mycket liten andel av energin, men förmodligen använder man ofta de högenergetiska neutronerna från fusionsreaktionerna till att klyva  $^{238}\text{U}$ , och därmed öka energiutbytet från laddningen<sup>9</sup>. En ungefärlig uppskattning är då att energin från ett fusionsvapen till hälften kommer från fission, och hälften från fusion.

Det finns flera källor till joniserande strålning från ett kärnvapen. Beroende på laddningens typ, styrka, konstruktion med mera kan de olika strålkällorna få olika relativ

<sup>9</sup> Det fissionella materialet utgörs av  $^{235}\text{U}$  eller  $^{239}\text{Pu}$  som kan fås att fissionera när det bestrålas av neutroner med relativt låg energi. För att åstadkomma fission i  $^{238}\text{U}$  krävs neutroner med högre energi, som kan bildas i fusionsreaktioner.

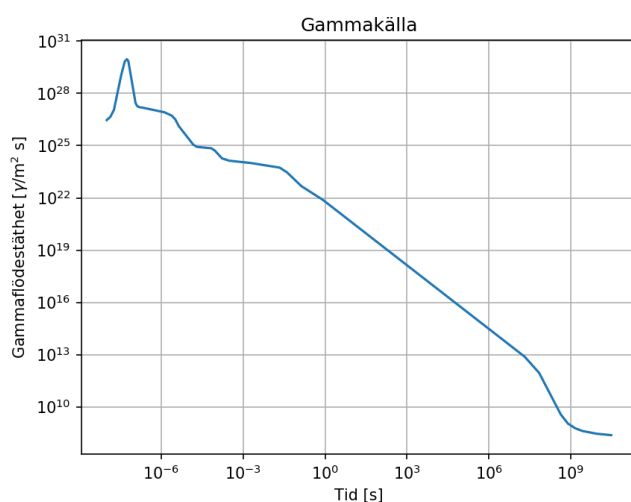
betydelse. Vilka källor till joniserande strålning som är av praktisk betydelse beror på explosionstypen (luftexplosion, etc.).

Fissionsreaktioner frigör neutroner och gammafotoner *prompt*, i direkt anslutning till reaktionerna. Vid fusion frigörs prompta neutroner med hög energi.

De fissionsprodukter som bildas vid kärnklyvningen är i allmänhet kraftigt radioaktiva, och sönderfaller under avgivande av främst gammafotoner och betapartiklar till successivt mindre aktiva kärnor.

Neutronerna från fissions- och fusionsreaktioner kommer att reagera med omgivande material, bland annat genom att de sprids inelastiskt mot atomkärnor, med avgivande av gammafotoner. De kan också absorberas av atomkärnor, vilket bildar andra ämnen, som ofta kan vara radioaktiva. Det kan handla om neutroninfångning i fissilt material i laddningen, eller i andra material i vapnet. Neutroner som tränger ut ur vapnet kommer att reagera med omgivande luft och, om markytan inte är för avlägsen, även med markmaterial och materiel och konstruktioner på marken.

Både sönderfall av fissionsprodukter och neutroninducerad aktivitet kommer att ske allt från explosionsögonblicket till långt därefter, med avtagande radioaktivitet. Man brukar dela upp denna aktivitet tidsmässigt, så att alla sönderfall som sker inom en minut från explosionen – inklusive den prompta strålningen – benämns *joniserande initialstrålning*, medan de sönderfall av fissionsprodukter och neutronaktiverat material som sker efter en minut kallas *kvarvarande strålning*. Tidsgränsen en minut är till viss del godtycklig, men är vald med viss omtanke. Vid ytexplosioner, och luftexplosioner på optimal höjd för stötvågsverkan är detta nämligen ungefär den tid det tar för eldklotet att stiga så högt att dess radioaktiva innehåll inte längre utgör en strålkälla som behöver beaktas på markytan. Detta är tämligen oberoende av explosionsstyrkan – eldklotet för större laddningar innehåller typiskt högre aktivitet, men stiger fortare och till högre höjd.



Figur 15: Exempel på flödestätheten för gammafotoner från olika källor vid en kärnexplosion. Den prompta gammastrålningen ger upphov till den tidiga toppen. Kort därefter är inelastisk neutronspredning mot omgivande material en viktig källa till gammafotoner, och vid senare tidpunkter är det radioaktivt sönderfall som successivt avtar.

Den initialstrålning som är relevant ur skadehänseende är främst neutroner och gammastrålning. Den verkar främst genom strålskador på människor och andra levande organismer, men kan även slå ut elektronisk utrustning. Strålningen dämpas när den rör sig genom ett material. Att till exempel befinna sig i en källare eller i ett hus av betong ger ett visst skydd, medan väggarna i ett trähus ger ett tämligen begränsat skydd. För gammastrålning gäller att ju högre densitet ett material har desto effektivare blir

strålningsdämpningen. För neutroner är dessutom materialets sammansättning, speciellt dess vätehalt, av betydelse. Vid passage genom luft sprids också strålningen och kan vid marken infalla från alla håll mot ett objekt. Genom spridning i luft och väggmaterial kan strålning tränga in i annars skyddade utrymmen.

När strålningen absorberas avger den energi. Effekterna från joniserande strålning brukar delas in i akuta, deterministiska skador, och stokastiska effekter som utvecklas över tid, till exempel cancer. Ekvivalent och effektiv dos anges i enheten sievert (Sv). Dos förekommer även som absorberad dos i enheten gray (Gy), vilket ofta används när risker för akuta strålskador beräknas. När det sker beräkningar av dosbidrag från gammastrålning kan enheterna gray och sievert likställas, dvs  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$ . Här går vi inte närmare in på skador vid olika doser, men för en grov uppfattning om vad en viss dos innebär kan sägas att akuta strålskador uppstår vid i storleksordningen 1 Gy, medan 0,1 Gy i allmänhet inte ger akuta effekter. Normal årsdos för en människa är ungefär 0,001 Gy, det vill säga 1 mGy.

Vilka källor till joniserande strålning som i praktiken behöver beaktas beror på explosionstyp. För en luftexplosion på hög höjd kommer strålningen absorberas till så stor del på sin väg genom luften att den är försumbar vid markytan.<sup>10</sup> Samtidigt förs vapenresterna, innehållande fissionsprodukter och neutronaktiverat material, högt upp i atmosfären och sprids globalt. I detta fall är alltså den joniserande strålningen inget akut problem. För att exemplifiera ger en kärnexplosion med styrkan 10 kt på 2 km höjd en dos i storleksordningen 0,1 Gy vid nollpunkten.

För en luftexplosion närmare markytan kommer initialstrålningen att ge höga doser inom ett cirkulärt område kring nollpunkten. Fissionsprodukter och neutronaktiverat material i vapenresterna förs dock som i det tidigare exemplet högt upp i atmosfären och sprids globalt (såvida inte nederbörd för ner dem till markytan). Neutronaktivering av markmaterial kan dock förekomma runt nollpunkten om luftexplosionen sker vid en relativt låg höjd. Det är värt att poängtera att den joniserande initialstrålningen är att betrakta som en strålkälla som verkar på avstånd, vilket betyder att strålskadade människor vid en luftexplosion förmodligen inte är radioaktivt kontaminerade, och heller inte påträffas i en kontaminerad omgivning (med reservation för eventuell neutronaktivering).

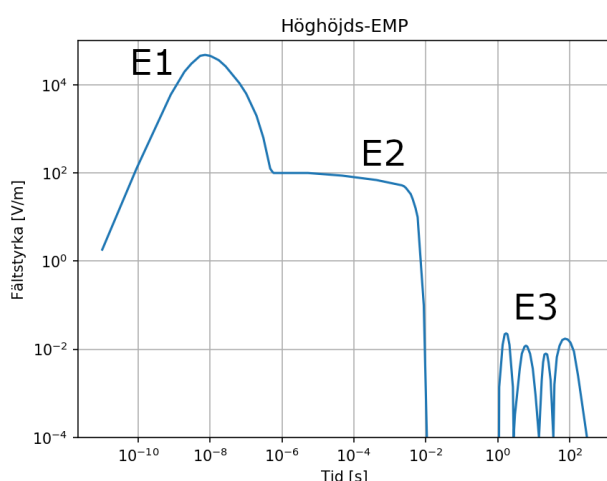
Vid en ytexplosion kommer de radioaktiva vapenresterna blandas med markmaterial, på vilka de kondenserar. Dessa markpartiklar är relativt stora, vilket leder till att de relativt snabbt faller till marken och därmed ger upphov till ett lokalt nedfall. De största faller ner koncentriskt kring nollpunkten, medan de lite mindre faller ned i vindriktningen över stora avstånd och kan kontaminera avsevärda ytor genom ett så kallat *beläggingsfält*. Detonationshöjden är alltså av största betydelse för förekomsten av lokalt nedfall. Tidigt och sent efter explosionen domineras nedfallets aktivitet helt av fissionsprodukter, men mellan tio timmar till två veckor efter explosionen kan en avsevärd del av aktiviteten härröra från neutronaktivering. Aktivitetens avklingning följer ungefär  $t^{-1,2}$ , vilket innebär att om aktiviteten är  $A$  vid en viss tidpunkt  $t$ , kommer den att vara ungefär  $0,1A$  vid tidpunkten  $7t$ ,  $0,01A$  vid  $49t$ , och så vidare; detta brukar sammanfattas i tumregeln "7/10". Vilken explosionshöjd som krävs för försumbart nedfall ges ungefär av eldklotets maximala radie, och beror därför av explosionsstyrkan, se Figur 9. Som nämndes i diskussionen om stötvåg, bestäms explosionshöjden av vilket mål som kärnvapeninsatsen genomförs mot. Mycket hårda mål kan kräva ytexplosioner för att kunna bekämpas.

---

<sup>10</sup> Det gäller förstås i ännu högre grad för en höghöjdsexplosion.

## 5.5 Elektromagnetisk puls

Gammastrålningen från en kärnexplosion slår ut elektroner ur omgivande material, vilket leder till en separation mellan positiva joner och negativa elektroner. Dessa elektroner bildar tillsammans en kraftig strömpuls, vilket alstrar ett elektromagnetiskt fält som utbreder sig som en transient elektromagnetisk våg, den så kallade elektromagnetiska pulsen, EMP, Figur 16. Dess storlek och form bestäms av intensiteten och tidsförloppet för den prompta delen av initialstrålningen. Den EMP som resulterar från den prompta strålningen benämns E1. Gammastrålning som avges från radioaktiva vapenrester och vid inelastisk spridning av neutroner ger också ett bidrag till EMP, kallat E2. Detta bidrag är mer utdraget i tiden, men fortfarande inom en sekund från explosionsögonblicket. Vid höghöjdsexplosioner kommer plasmat som utgör vapenresterna att röra sig i jordens magnetfält och inducera solstormslänkande fenomen som kan vara i uppåt en timme efter explosionen. Detta kallas E3, eller magnetohydrodynamisk EMP (MHD-EMP). Höghöjdsexplosioner kan genom denna växelverkan med atmosfärens yttre delar även ge kvarvarande effekter i form av störningar av radiokommunikationer. Signalernas frekvensinnehåll är omvänt proportionellt mot tidsskalorna för förloppen, vilket innebär att E1 genom den snabba stigtiden innehåller högfrekventa komponenter, medan E3 ger mycket lågfrekventa signaler.



Figur 16: Elektrisk fältstyrka från höghöjds-EMP. Den tidiga toppen, E1, härrör från prompta gammafotoner. Platån därefter är E2-bidraget. De sena pulserna uppstår från magnetohydrodynamisk EMP, E3.

Styrkan hos EMP blir påtaglig när det råder stora densitetsskillnader i olika riktningar kring explosionspunkten. Orsaken till detta är att det för elektromagnetisk signalgenerering krävs en avvikelse från sfärisk symmetri, så att laddningsseparationen ger upphov till en nettoström. Det är främst i två situationer som detta blir påtagligt.<sup>11</sup>

Den ena situationen är vid en höghöjdsexplosion (utanför jordens atmosfär eller i atmosfärens yttre delar), där asymmetrin uppstår genom att densiteten i atmosfären snabbt ökar under explosionspunkten. I det fallet kan EMP bli betydande över en hel kontinent, samtidigt som övriga effekter från explosionen är försumbara. Vid höghöjdsexplosioner kan strålningen även verka direkt mot satelliter och andra objekt i rymden, och även påverka dessa genom att strömmar induceras i själva objektet, så kallad systemgenererad

<sup>11</sup> I praktiken råder aldrig perfekt symmetri, vilket betyder att det ur detektionshänseende alltid kan förväntas en EMP-signal vid kärnexplosioner ovan jord.



EMP (SG-EMP). En viktig effekt vid höghöjdsexplosioner (och till viss del även vid atmosfäriska explosioner) är att de frigjorda elektronerna kommer att böjas av i det jordmagnetiska fältet, vilket i sig genererar högfrekvent elektromagnetisk strålning, så kallad *synkrotronstrålning*.

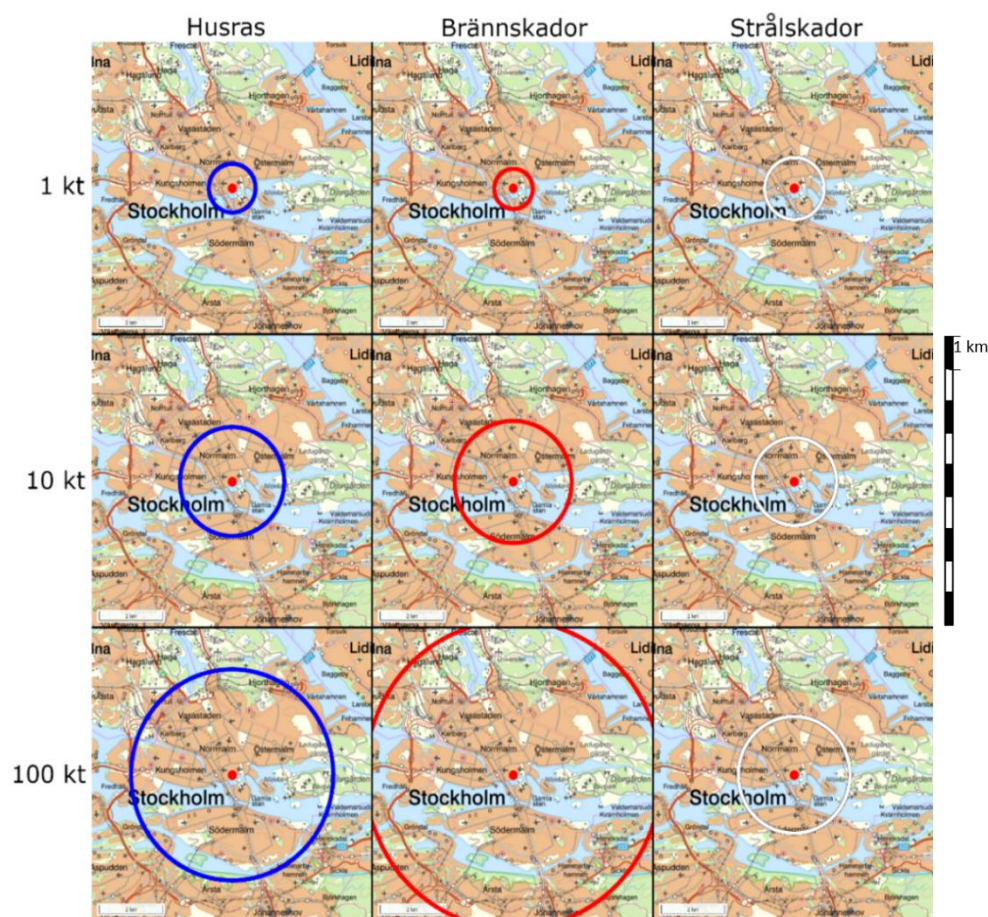
Den andra situationen är vid en ytexplosion, där markmaterialet har mycket högre densitet än luften ovanför. Eftersom marken har betydligt bättre konduktivitet än luften, kan återledning av de bortslagna elektronerna ske den vägen istället för genom luften. De resulterande strömslingorna ger då upphov till kraftiga magnetfält. EMP har betydligt kortare räckvidd för ytexplosioner än för höghöjdsexplosioner, i storleksordningen några kilometer, och är endast viktig för mål som tål de övriga verkansformerna. I luft med normal densitet har elektronernas depositionsområde en radie på ett par kilometer, vilket innebär att kärnexplosioner på lägre höjd än detta i större eller mindre grad är att betrakta som ytexplosioner ur EMP-hänseende.

Om inte anpassningar och skyddsåtgärder vidtagits kan EMP förstöra såväl vidsträckt ledningsnät, som elektronikberoende utrustning, och kan på så vis få stor påverkan på samhällsfunktioner genom exempelvis kraftbortfall, utslagna data- och kommunikationsfunktioner. Skydd mot mark-EMP blir särskilt betydelsefullt för mål som är så hårdgjorda att övriga verkansformer har begränsad effekt. För ett balanserat skydd behöver då även EMP beaktas.

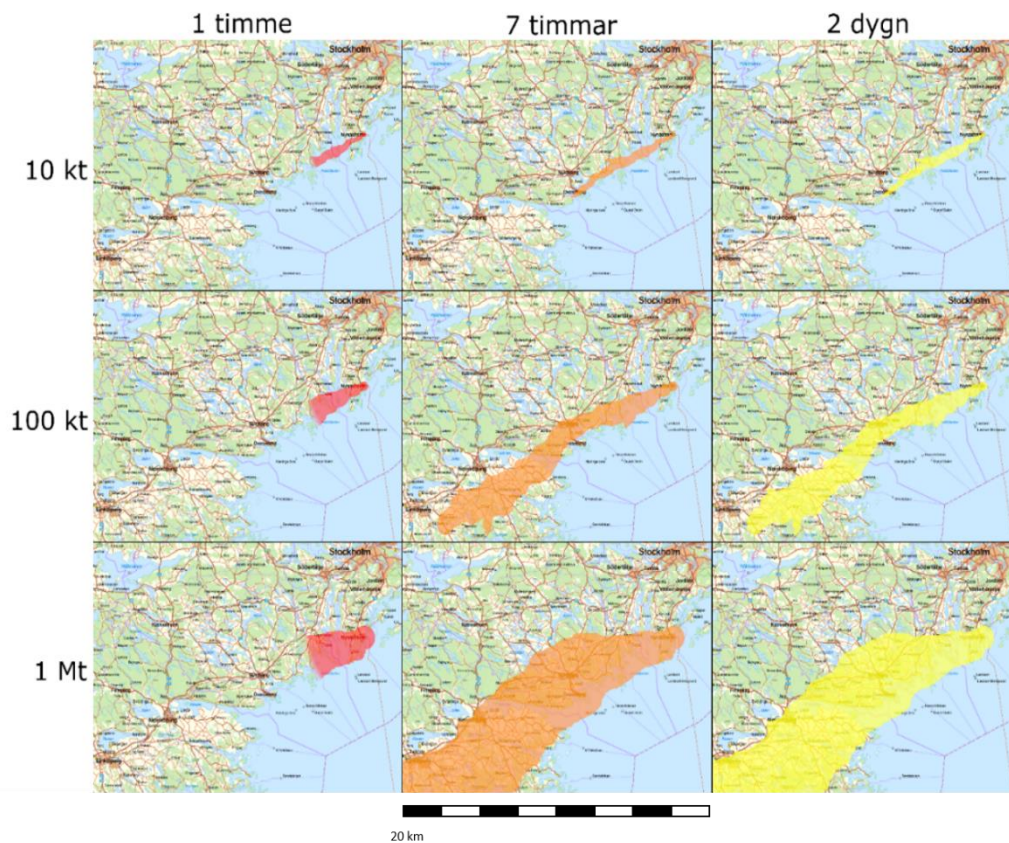
## 5.6 Jämförelse mellan verkansformer

För att sammanfatta effekterna från kärnexplosioner, exemplifieras de direkta verkansformerna för luftexplosioner med styrkorna 1, 10 och 100 kt i Figur 17. Verkansradierna beror av vilka kriterier som har valts, och för stötvåg är det avståndet inom vilket hus av betongelement raseras. Radien för värmestrålning avser tredje gradens brännskador på oskyddad hud, medan joniserande initialstrålning exemplifieras med LD50 (50 % dödlighet) för akut strålskada utan särskild vård.

Figur 18 illustrerar det lokala nedfallet från ytexplosioner vid 10 kt, 100 kt och 1 Mt vid olika tidpunkter efter explosionen. En timme efter explosionen är doshastigheten 0,3 Gy/h i det röda området. Det innebär att människor riskerar akuta strålskador om de inte befinner sig i skydd eller snabbt kan lämna området. Efter sju timmar har doshastigheten sjunkit till en tiondel, 30 mGy/h ("7/10-regeln"), orange färg; och efter två dygn har den minskat ytterligare en faktor tio till 3 mGy/h, gul färg.



Figur 17: Verkansradier för luftexplosioner med explosionsstyrka 1, 10 och 100 kt. Husras till följd av stötvåg (blått), tredje gradens brännskador (rött) och LD50 för akut strålskada (vitt).



Figur 18: Nedfall 1, 7 och 48 timmar efter en ytexplosion i Nynäshamn vid medelvindhastighet 30 km/h. Färgerna svarar mot 0,3 Gy/h (rött), 30 mGy/h (orange) och 3 mGy/h (gult). Raderna svarar mot laddningsstyrkorna 10 kt, 100 kt och 1 Mt. Efter en timme har nedfallet nått 30 km i vindens riktning. Sju timmar efter explosionen har nedfallet avslutats och belägningsfältet är etablerat. Aktiviteten avklingar ungefär enligt "7/10-regeln". Nedfall med lägre aktivitet har skett även utanför de markerade områdena, och avklingar på samma sätt.

## 6 Mätsignaturer och mätmetoder

Effekterna från en kärnexplosion som beskrivits i avsnittet ovan ger upphov till signaturer (fysikaliska förändringar i miljön) som med rätt teknologi kan mätas på stora avstånd från explosionspunkten. I likhet med effekterna beror signaturernas typ och storlek i huvudsak på tre faktorer: laddningens *styrka*, i vilken *omgivning* explosionen sker och på vilket *avstånd* från nollpunkten som signalen detekteras. Själva detektionsproblemet kan indelas i skapandet av signalen vid källan, signalens fortplantning i olika media, registrering av signalen och slutligen analys i syfte att *upptäcka*, *lokalisera* och *kategorisera* och/eller *identifiera* händelsen.

En viktig faktor för signalens mätbarhet är bakgrundens förekomst, frekvens och storlek. Med bakgrund menar vi här signaler orsakade av andra processer än det man vill upptäcka. Exempel på bakgrundskällor för kärnexplosioner är (beroende av detektionsteknik) jordskalv, vulkanutbrott, åskväder, kemiska explosioner, raketuppskjutningar och radioaktiva utsläpp från kärntechniska anläggningar. En hög bakgrund kan leda till falsklarm, och det är därför viktigt att skaffa sig god kännedom om orsaken till dessa signaler genom att kartlägga potentiella bakgrundskällor, samt att utveckla mätsystem och analysmetoder i syfte att kunna särskilja dessa signaler från det mätsystemet ska upptäcka. Detta betyder att förmågan hos ett mät- och analysystem generellt ökar med tiden i takt med att ytterligare data samlas in och analyseras. Bakgrunden kan också vara användbar i sig, eftersom den kan orsakas av annan mänsklig verksamhet som kan vara av intresse, vilket breddar systemets användningsområde. Ett system som är designat för att upptäcka kärnexplosioner kan exempelvis också användas för att detektera konventionella explosioner.

Signaturerna från en kärnexplosion kan indelas i tre huvudkategorier: omedelbar strålning i form av elektromagnetisk strålning eller partiklar, vågor genererade i olika media, som exempelvis seismiska vågor i marken eller akustiska vågor i atmosfären, samt spridning av radioaktiva partiklar eller gaser. Dessutom kan satellitbilder i olika frekvensområden ge information om förändringar vid markytan orsakade av en kärnexplosion.

Mätsignaturer karakteriseras av vitt skilda responstider (tid från generering till uppmätt signal) beroende på variationen i signalernas hastighet, avstånd till källan, och den tid det tar att genomföra mätningen. En ljusblixt kan registreras omedelbart, medan detektionen av en radioaktiv plym kan ske dagar eller veckor efter explosionen. Det går inte alltid att dra slutsatsen att det rör sig om en kärnexplosion från en enskild signatur, eftersom det kan finnas andra orsaker till signalen. Det är därför viktigt att använda sig av flera mätmetoder som kompletterar varandra för att minska osäkerheten i klassificeringen av signalen och undvika falsklarm. Ett bra exempel på detta är Nordkoreas första kärnladdningsprov 2006, där osäkerhet rådde om huruvida explosionen, som detekterats av seismiska mätinstrument, verkligen var en kärnexplosion och inte en konventionell kemisk explosion. Först efter att radioaktiva ädelgaser uppmätts av FOI i Sydkorea några dagar efter explosionen kunde slutsatsen dras att det verkligen rörde sig om ett kärnladdningsprov [17].

De relevanta signalerna för olika typer av kärnexplosioner är sammanfattade i Tabell 1 och diskuteras mer ingående i avsnitt 6.1 – 6.3. Denna diskussion inkluderar också en beskrivning av potentiella bakgrundskällor. Eftersom bakgrundskällorna till mätningar av den radioaktiva plymen från en kärnexplosion till stor del inkluderar övriga nukleära händelser diskuterar vi inte de senare separat.

Tabell 1: Mätsignaturer från olika typer av kärnexplosioner för olika typer av miljöer där explosionen inträffar.

### Uppmätt signal

Omgivning	Infraljud	Hydro-akustisk	Seismisk	Dubbel-blixt	Radioaktiva partiklar	Ädelgaser	EMP
	Hög höjd			(X)			X
	Luft	X		(X)	X	X	(X)
	Mark	X		X	X	X	X
	Under vatten		X	X		(X)	X
	Under jord	(X)		X		(X)	X

## 6.1 Kärnexplosioner i atmosfären eller rymden

### 6.1.1 Elektromagnetiska signaler

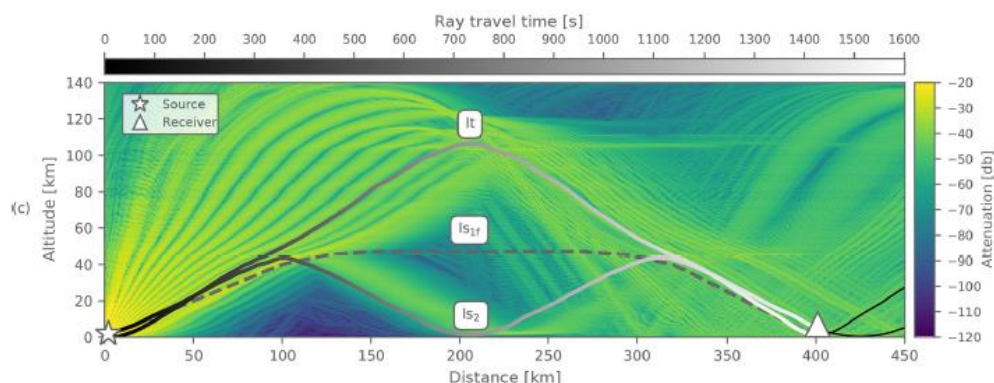
I en atmosfärisk kärnexplosion kommer den termiska energin i eldklotet delvis att omvandlas till synligt ljus eller infraröd strålning som kan detekteras på avstånd med hjälp av sensorer monterade på exempelvis satelliter eller fordon – så kallade bhangmeters. En bhangmeter är en optisk sensor som är optimerad för att detektera den karaktäristiska dubbelpulsen från en kärnladdning (se Figur 14). De två pulsernas längd beror av explosionsstyrkan, vilket gör att det finns en möjlighet att diskriminera signalen från andra ljuskällor, som exempelvis kemiska explosioner eller blixurladdningar. Vidare går det att uppskatta explosionsstyrkan om man har ett kalibrerat system. Exempelvis användes de åtta explosionerna i provserien ”Tumbler-Snapper” (se Figur 7) bland annat till att bestämma sambandet mellan ljusblixtens tidsprofil och explosionsstyrka för en viss typ av bhangmeter [18]. Ett känt exempel på en möjlig detektion av en oannonserad kärnexplosion uppmätt med hjälp av denna mätteknik är en signal lokaliserad till Sydatlanten som registrerades av en amerikansk Vela-satellit 1979. Orsaken till denna signal är inte helt klarlagd.

Den övriga strålning som avges i anslutning till explosionen (exempelvis joniserande initialstrålning i form av röntgen-, gamma- och neutronstrålning) absorberas effektivt i atmosfären. Situationen blir dock annorlunda för explosioner högre upp i atmosfären. På 15-80 kilometers höjd bildas ett stort eldklot med en tidsprofil som kan beskrivas som en enda ljuspuls, med stark intensitet i det synliga frekvensområdet. Vid ännu högre explosionshöjder kommer den optiska signalen att minska, men istället ökar intensiteten av röntgen- och gammastrålning, som kan detekteras av satelliter med sensorer för denna typ av strålning. Vela-satelliterna var exempelvis utrustade med detektorer för såväl röntgen-, gamma- och neutronstrålning för att kunna detektera kärnexplosioner i rymden.

Den EMP-signal som bildas vid atmosfäriska explosioner kan detekteras med antenner som registrerar snabba förändringar i det elektromagnetiska fältet i lämpliga frekvensområden, där E1 EMP har högst frekvens (se avsnitt 4.5). Denna typ av mätningar försvåras av att liknande signaler avges från blixurladdningar vid åskväder.

Eldklotet från en kärnexplosion kommer att innehålla joniserat material härrörande både från vapenrester och omgivande luft (se avsnitt 4.1). Eftersom radiovågor reflekteras mot joniserat material, skulle detta kunna utnyttjas för en aktiv elektromagnetisk lokaliseringmetod med hjälp av radar.

## 6.1.2 Infraljud



Figur 19: Modellering av infraljudsvågor detekterade efter Nordkoreas kärnladdningsprov 2017. Testplatsen är markerad med en stjärna, och en infraljudsstation med en triangel [19].

En atmosfärisk explosion skapar en akustisk signal som sprids i atmosfären med en hastighet av ca 300 m/s. Energin är i huvudsak koncentrerad i frekvensområdet 20 till 500 mHz. Den lägre gränsen för den mänskliga hörseln ligger vid ungefär 20 Hz, och ljud med lägre frekvenser än 16 Hz brukar benämnas infraljud. Den långa våglängden gör att dessa vågor kan transporteras och reflekteras på hög höjd i atmosfären (upp till över 100 km) och spridas på stora avstånd från källan, vilket gör att en kärnexplosion har möjlighet att detekteras på avstånd av hundratals mil eller mer. Infraljudvågors transport i atmosfären påverkas av atmosfärens temperatur och densitet. Eftersom vindhastigheten i den del av atmosfären som är intressant för spridning av infraljud (50 – 120 km över jordytan) kan vara upp till 100 m/s, det vill säga en signifikant andel av ljudhastigheten, spelar rådande vindförhållanden också en roll för vågens utbredning. Detta påverkar även precisionen hos lokaliseringen.

En utmaning inom infraljudsdetektion är det faktum att infraljud kan orsakas av en mängd naturliga och antropogena processer, som exempelvis vulkanutbrott, åskväder, jordskalv, norrsken, meteoriter, överljudsplan, gruvdrift och raketuppskjutningar. Ett flertal av dessa kan skapa infraljud i samma frekvensområde som en explosion. Detta innebär samtidigt att det är möjligt att erhålla information om sådana händelser.

System för detektion av infraljud behöver kunna mäta tryckskillnader i atmosfären ner till miljondelar av det normala atmosfärstrycket. Detta görs normalt med hjälp av mikrofoner monterade på ett visst avstånd från varandra. Genom att ett flertal mikrofoner används i en så kallad array-konfiguration kan lokalt brus, exempelvis orsakat av vind, reduceras, och riktningen till källan bestämmas med hjälp av skillnader i ankomsttid mellan de olika mikrofonerna.

För att lokalisera en infraljudskälla krävs att den är detekterad av minst tre array-stationer, varvid en triangulering kan genomföras. Osäkerheten i lokalisering beror bland annat på rådande meteorologiska förhållanden, osäkerheten i riktningbestämningen, antal stationer och deras avstånd till källan. Generellt är lokaliseringens osäkerhet minst en storleksordning större än för seismologiska mätningar, och med större spridning beroende på skillnader i väderförhållanden. Exempel på infraljudslokaliseringar med ett lokalt nätverk beskrivs i [20]. Samband mellan observerat ljudtryck och sprängstyrka för kärnexplosioner har tagits fram genom mätningar på historiska kärnladdningsprover. Exempel på sådana mätningar finns i [21].

Om både en ljus- och ljudsignal detekteras från en atmosfärisk explosion finns det möjlighet att uppskatta avståndet genom att mäta skillnaden i ankomsttid mellan ljus- och ljudsignalen (*flash-to-bang*).

### 6.1.3 Seismiska vågor

Tryckvågen från atmosfäriska explosioner som sker på eller nära markytan kan även koppla till marken och orsaka detekterbara seismiska vågor. Jämfört med infraljudssignaler har seismiska vågor en mer förutsägbar utbredning, vilket gör att lokalisering och tidsbestämning blir bättre. Seismisk detektion beskrivs närmare i avsnitt 6.2 om underjordiska prov. Kombinationen av seismisk signal och infraljud kan vara användbar för att uppskatta både styrkan hos en explosion och även hur den skedde genom att studera förhållandet mellan ljudtryck och seismisk magnitud. För luftexplosioner kommer den seismiska magnituden exempelvis att försvagas jämfört med en ytexplosion, medan ljudtrycket påverkas mindre, och vice versa för en underjordisk explosion.

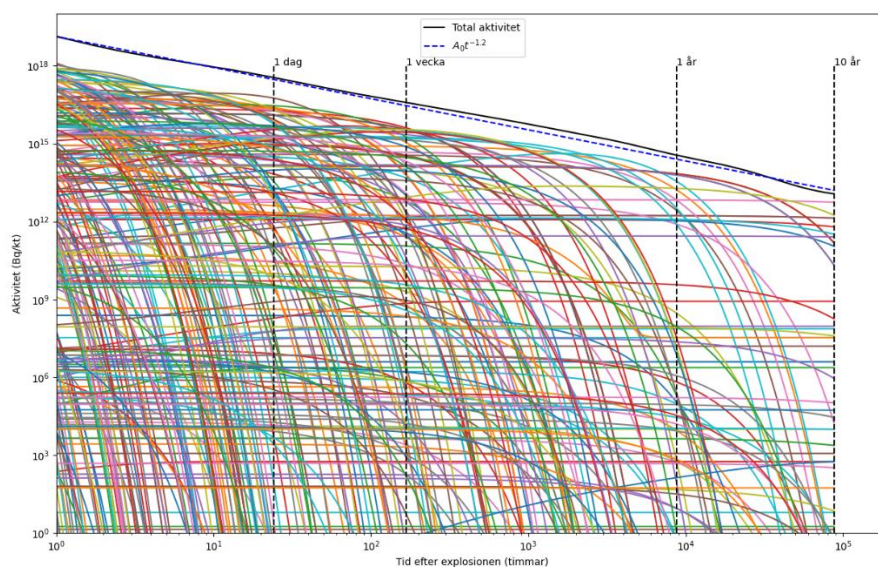
### 6.1.4 Jonosfärsvågor

En annan effekt från atmosfäriska explosioner är störningar i jonosfären – atmosfärens övre del som startar på ca 50 km:s höjd. Störningar i luftmassan orsakad av en explosion kan manifesteras sig som förändringar av den mängd elektroner som befinner sig i en viss siktlinje. Ett sätt att mäta denna effekt är med användandet av signaler från GPS-satelliter. En GPS-satellit sänder mikrovågor i det så kallade L-bandet med olika frekvenser (1.2 och 1.5 GHz) från ca 20 000 kilometers höjd. Förändringar av mängden elektroner i siktlinjen mellan en GPS-mottagare på marken och satelliten ger upphov till ett förändrat fasskift mellan dessa två signaler som kan registreras om förändringen är tillräckligt stor. Ett exempel på en sådan mätning beskrivs i [22] där vågor i jonosfären uppmättes efter den kemiska explosionen i Beirut 2020, vars styrka uppskattades till ca 1 kt.

### 6.1.5 Spridning av radioaktiva partiklar och gaser

I en kärnexplosion bildas mer än 1 200 fissionsprodukter omedelbart eller genom sönderfall (se Figur 20). Det bildas också isotoper från aktivering av material i omgivningen, både i vapnets konstruktionsmaterial och i omgivande miljö. Dessutom kan rester av oförbrukat material ( $^{235}\text{U}$  eller  $^{239}\text{Pu}$ ) eller tritium finnas kvar efter explosionen.

Som beskrivs i avsnitt 5.4, är partikelbildning och nedfall starkt beroende av explosionshöjd. För en luftexplosion på hög höjd kommer vapenresterna att spridas globalt och resultera i låga koncentrationer på marknivå. Vid en luftexplosion närmare markytan sprids också nedfallet över en stor volym, men neutronaktivering på marken kan orsaka lokal kontaminering. Störst nedfall sker vid en ytexplosion eller en grund underjordisk explosion där en krater formas, och ett beläggningsfält bildas vars utbredning och koncentration bland annat beror av vindförhållanden, nederbörd och de radioaktiva partiklarnas storleksfördelning. Ungefär 15 % av fissionsprodukterna består av radioaktiva ädelgaser (främst xenon och krypton). Dessa ämnen reagerar inte kemiskt med omgivningen och transporteras därmed inte till marken med nederbörd och kan transporteras längre sträckor än partiklar. Detektion av radioaktivt xenon spelar en särskilt viktig roll för detektion av underjordiska prov (se avsnitt 6.2).



Figur 20: Aktivitet över tid för fissionsprodukter från  $^{239}\text{Pu}$  för en explosionsstyrka på 1 kt. Den svarta linjen visar den totala aktiviteten, och den blå streckade linjen illustrerar funktionen  $A_0 t^{-1.2}$ , där  $A_0$  är aktiviteten en timme efter explosionen. Övriga linjer visar aktiviteten för enskilda nuklider.

Endast en liten del av alla isotoper som bildas i en kärnexplosion är av betydelse ur detektionssynpunkt. Många isotoper har för kort halveringstid för att kunna samlas in och mätas inom rimlig tid. En stor del bildas också i väldigt små mängder. Efter en explosion av en plutoniumladdning med styrka på 1 kt bildas det initialt 390 fissionsprodukter med en aktivitet som överstiger 1 GBq. Denna siffra sjunker till 108 efter ett dygn tack vare radioaktivt sönderfall, och efter ett år återstår endast 20 isotoper med en total aktivitet överstigande 1 GBq utspritt över ett stort område. Dessutom sönderfaller många isotoper på sätt som gör dem svåra att detektera med standardmetoder, främst för att de avger lite eller ingen gammastrålning. De mest signifikanta isotoperna i en luftexplosion ur detektionssynpunkt är  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{143}\text{Ce}$ ,  $^{132}\text{Te}$  och  $^{140}\text{La}$  [23].

Beroende på den förväntade aktiviteten hos en radioaktiv plym och syftet med mätningen används olika detektionstekniker som varierar i storleksordningar i mätnoggrannhet och responstid. Den snabbaste och enklaste formen av mätning görs med detektorer som mäter gammastrålningens intensitet, oftast med hjälp av en Geiger-Müller (GM)-detektor. Denna typ av mätning kan ge en snabb bild av doshastigheten på platsen och ge ett underlag för riskbedömning. Metoden ger dock ingen isotopspecifik information, något som behövs för att närmare kunna beräkna exempelvis inandningsdos.

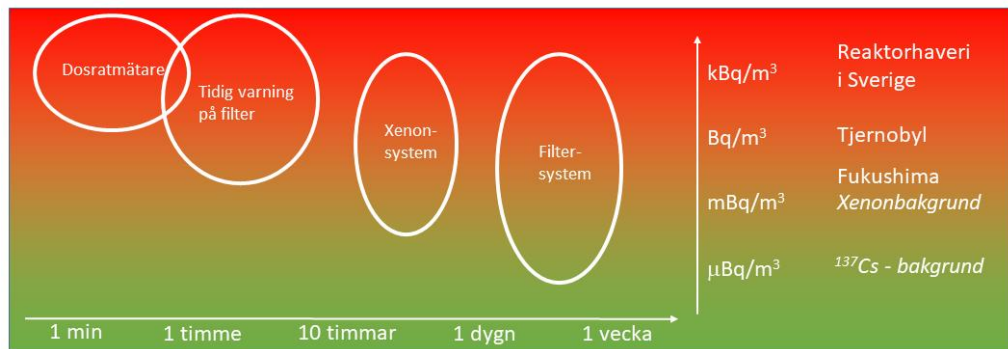
För att få information om gammastrålande isotoper i omgivningen, och dessutom erhålla högre detektionseffektivitet och mätnoggrannhet, används ofta NaI-kristaller, antingen direkt i luften eller monterade i anslutning till partikelfilter [24] (ibland benämnt "tidig varning").

Den noggrannaste mätningen av aktivitetskoncentrationen av radioaktiva partiklar i atmosfären som används rutinemässigt innefattar insamling av partiklar genom att dra stora mängder luft genom ett partikelfilter och därefter mäta filtret med hjälp av en känslig gammadetektor, normalt en HPGe (*High-Purity Germanium*) i ett laboratorium eller direkt vid insamlingsplatsen. Det finns möjlighet att erhålla ytterligare mätnoggrannhet genom att mäta filtret under lång tid i ett laboratorium med kapacitet för mätningar med mycket låg bakgrundsstrålning, exempelvis belägna under jord, och/eller med avancerade detektorer som reducerar bakgrunden med hjälp av så kallade anti-koincidensmetoder [25].



Eftersom gaser inte fastnar i ett partikelfilter måste dessa samlas in med andra metoder för att noggrant kunna mäta gasformiga radioaktiva komponenter i atmosfären. Gasformigt jod, som spelar en viktig roll, framförallt vid reaktorolyckor, kan samlas in i kapslar med aktivt kol och därefter mätas. Som tidigare nämnts spelar ädelgasen xenon en viktig roll vid detektion av underjordiska prov, och insamling och detektion av radioaktivt xenon innebär en speciell utmaning. För detta ändamål har FOI utvecklat mätsystemet SAUNA, som bland annat används i CTBT:s verifikationssystem (se avsnitt 6.2.3).

Responstid och mätnoggrannhet för olika typer av mätningar av atmosfärisk radioaktivitet sammanfattas i Figur 21. De olika mätmetodernas responstid varierar från minuter till upp till en vecka, och mätnoggrannheten varierar många storleksordningar.

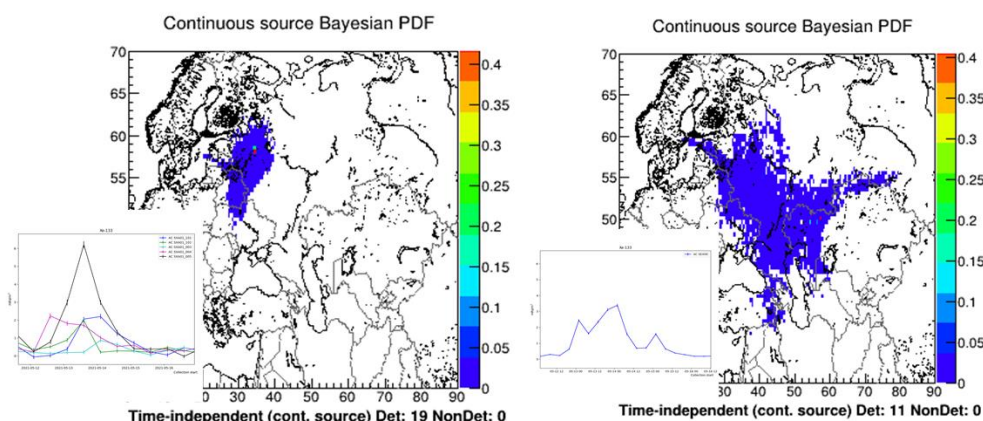


Figur 21: Responstid och ungefärlig mätnoggrannhet för olika typer av mätningar av atmosfärisk radioaktivitet.

Källor till radioaktiva partiklar i atmosfären, annat än från kärnexplosioner, inkluderar en mängd både antropogena och naturliga källor. Naturlig bakgrund inkluderar medlemmar i sönderfallsserierna från uran och torium, som till exempel <sup>212</sup>Pb, nuklider från resuspension av markmaterial som <sup>40</sup>K, och isotoper som bildas i atmosfären med hjälp av kosmisk strålning som exempelvis <sup>7</sup>Be and <sup>24</sup>Na.

Källor från mänsklig verksamhet inkluderar utsläpp från isotopproduktionsanläggningar, reaktorer och från annan civil användning av radioaktivt material. Dessutom förekommer radioaktivitet från historiska kärnladdningsprov och reaktorolyckor. <sup>137</sup>Cs från reaktorolyckan i Tjernobyl detekteras fortfarande regelbundet i Sverige. Många av de isotoper som regelbundet detekteras som bakgrund kan också förväntas produceras i en kärnexplosion. Detta gäller exempelvis de fyra isotoper som mest frekvent detekteras i det globala övervakningssystemet för CTBT (<sup>24</sup>Na, <sup>137</sup>Cs, <sup>131</sup>I och <sup>60</sup>Co). Det är således mycket viktigt att ha god kunskap både om detektionsfrekvens, isotopsammansättning och om orsaker till den uppmätta bakgrunden på en viss plats för att undvika eventuella falsklarm.

Ett sätt att öka kunskapen om bakgrundskällor till radionuklider och att kunna associera ett uppmätt utsläpp till eventuella detektioner gjorda med andra mättekniker är källlokalisering med hjälp av atmosfäriska transportmodeller. Med hjälp av väderdata kan man exempelvis beräkna var den luft som samlats in på ett partikelfilter befann sig i ett tidigare skede. På så sätt erhålls ett möjligt källområde associerat med en viss mätning. Om utsläppet detekteras i flera prov och/eller på flera platser, blir det möjliga källområdet mindre. En annan faktor som är viktig för att erhålla en bra lokalisering är insamlingstiden för luftprovet, som bör vara så kort som möjligt. De flesta av dagens partikelsystem som används inom den kärntekniska beredskapen har insamlingstider som är flera dagar. Detta beror på att de i huvudsak är avsedda för att kunna bestämma dos till befolkningen, och inte för att få fram orsaken till utsläppet. För att optimera en verifikationsprocess som innefattar detektion, lokalisering och karaktärisering skulle insamlingstiderna behöva minskas. Ett annat sätt att förbättra lokaliseringsförmågan är att öka antalet mätpunkter. Ett exempel på effekten av detta visas i Figur 22.



Figur 22: Exempel på lokalisering av en utsläppskälla med hjälp av atmosfärstransport och två olika uppsättningar mätdata. Samma radioaktiva plym uppmättes i Sverige dels med hjälp av fem system med en insamlingstid på tolv timmar (vänstra figuren), och dels med ett system med en insamlingstid på sex timmar (högra figuren). Det möjliga källområdet för de två fallen visas i blått. Mätserierna visas i nedre vänstra hörnet på varje karta. Mätningar och analyser är gjorda på FOI.

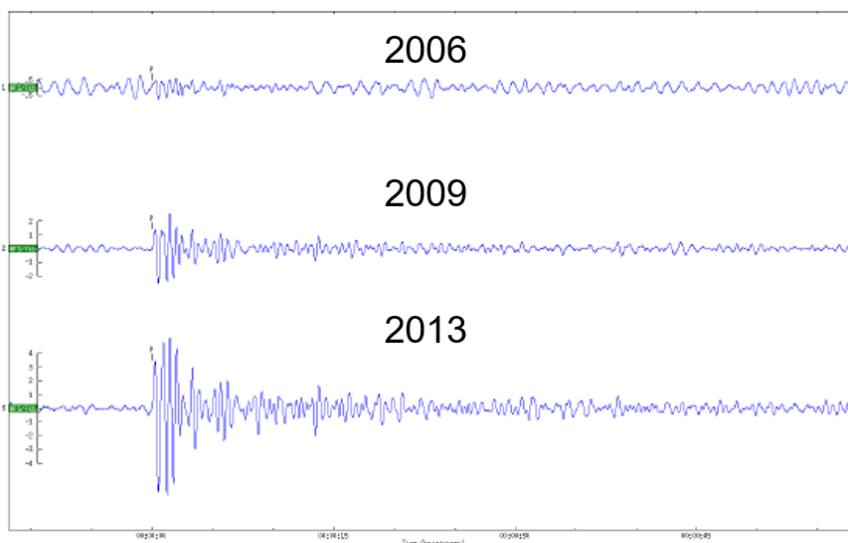
## 6.2 Underjordiska kärnexplosioner

### 6.2.1 Seismiska vågor

Som beskrivs i avsnitt 4.3, kommer den kraftiga och momentana energifrigörelsen vid ett underjordiskt prov att skapa en kavitet genom förångning av det omgivande materialet. Därefter skapas sprickor i den omgivande berggrunden, och ytterligare något senare övergår energin i elastiska vågor i jordskorpan. Mellan 1 och 5 % av explosionsenergin omvandlas till seismiska vågor vid ett underjordiskt prov. Det mesta av energin avges i form av värme i explosionens omedelbara omgivning.

Inom seismologin skiljer man på två huvudtyper av vågutbredning, primära (P) och sekundära (S) vågor. Primära vågor är longitudinella vågor där berggrunden omväxlande trycks ihop eller dras ut i vågens utbredningsriktning. S-vågor, eller skjuvningsvågor, är transversella vågor där berggrunden förflyttar sig vinkelrätt mot vågen. P-vågor fortplantas nästan dubbelt så fort som S-vågor i ett givet material. I berggrund har P-vågor en hastighet av ca 6 km/s, medan S-vågor rör sig ca 4 km/s. En explosion är en symmetrisk källa, vilket betyder att P-vågorna i regel kommer att vara större i relation till S-vågorna än för ett jordskalv. Detta faktum kan utnyttjas till att diskriminera mellan jordskalv och explosioner.

Seismiska vågor mäts med hjälp av seismometrar, som enkelt kan beskrivas som en vikt kopplad till marken och en dämpare. Viktens svängningar överförs till elektriska signaler som registreras som funktion av tid. Exempel på detektioner av Nordkoreas kärnladdningsprov visas i Figur 23.

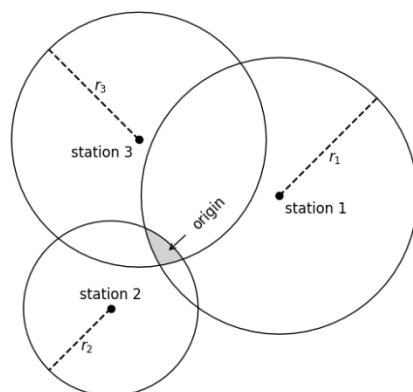


Figur 23: Seismiska detektioner av Nordkoreas första tre provsprängningar uppmätta vid FOI:s mätstation i Hagfors. Explosionsstyrkan för de tre proven bedöms vara ca 0,5-1 kt, 3-5 kt, respektive 10-30 kt.

Moderna seismometrar registrerar normalt svängningarna i tre dimensioner och kan då skilja på P- och S-vågor genom att mäta vågens polarisering. Likt infraljudsstationer är seismologiska stationer ofta designade som så kallade array-stationer med flera mätpunkter, ofta arrangerade i koncentriska cirklar. Genom att mäta skillnader i ankomsttid mellan de olika mätpunkterna kan vågens hastighet och riktning bestämmas. Med hjälp av flera seismometrar kan även bruset reduceras (bruset minskar med kvadratroten ur antalet mätpunkter).

Energien hos en seismisk händelse mäts av magnituden, som är en funktion av den uppmätta signalens amplitud, period och avståndet till källan. En ökning av magnituden en enhet motsvarar en faktor 10 i uppmätt amplitud och en faktor 32 i frigjord energi. Relationen mellan uppmätt magnitud och styrkan av ett underjordiskt kärnladdningsprov är beroende av flera faktorer, bland annat var provsprängningen sker. Detta gör att bestämningen av explosionsstyrkan kan vara behäftad med ganska stora osäkerheter. Data för sambandet mellan magnitud och explosionsstyrka finns publicerat för provplatser i USA och Ryssland.

Om en seismisk händelse registreras av minst tre stationer, eller minst två om riktningsinformation ges av stationerna, kan positionen för händelsen bestämmas. Hastighetsskillnaden mellan P- och S-vågor gör att tidsdifferensen mellan dem är ett mått på avståndet till källan, vilket betyder att om signalen uppmäts på minst tre platser kan positionen för källan bestämmas genom triangulering (se Figur 24). Till skillnad från infraljud är vågornas hastighet betydligt mer välkänd, och därför blir precisionen i trianguleringen normalt betydligt bättre än för infraljud.



Figur 24: Principen för triangulering med hjälp av tre seismiska stationer. Avståndet till källan bestäms för de tre stationerna, och händelsens koordinater kan därmed uppskattas via överlappet mellan de tre cirkelarna.

Varje år registreras hundratusentals små och stora seismiska händelser i världen. Förutom jordskalv innefattar dessa även bland annat kemiska explosioner, gruvkollaps, vulkanutbrott och blixtnedslag. Ett system specialiserat för seismisk detektering av kärnexplosioner måste kunna kategorisera dessa händelser i så hög grad som möjligt. Detta kan göras genom att analysera förhållandet mellan magnituderna för olika typer av vågor. Som nämndes ovan kommer en explosion att ha kraftigare P-vågor i förhållande till S-vågor jämfört med ett jordskalv. En annan faktor som kan användas för diskriminering är förhållandet mellan ytvågor och vågor som fortplantar sig djupare. Diskrimineringsparametrarna är positionsberoende, vilket också måste tas hänsyn till i analysen.

## 6.2.2 Infraljud

Infraljudsignaler kan även genereras av underjordiska kärnsprängningar. Exempelvis uppmättes infraljud i IMS från flertalet av Nordkoreas provsprängningar under 2006-2017 (se Figur 19). Som påpekades i avsnitt 6.1.3 kan kombinationen av seismisk signal och infraljud vara användbar för att uppskatta både styrkan hos en explosion och även hur den skedde.

## 6.2.3 Spridning av radioaktiva partiklar och gaser

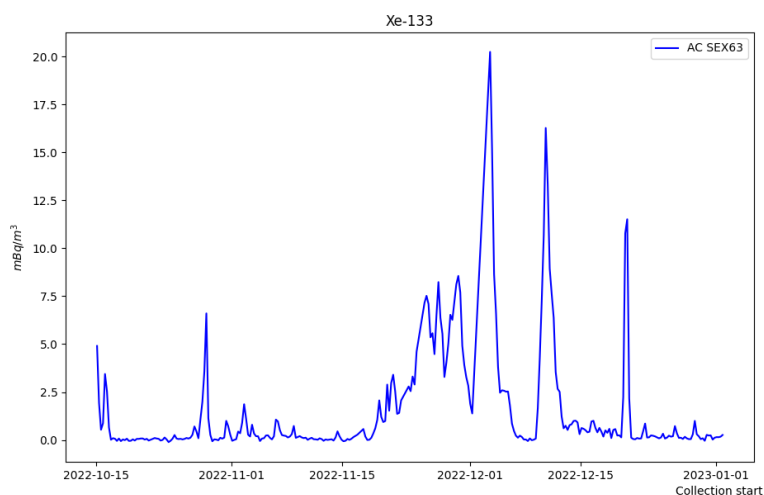
Vid en underjordisk kärnexplosion där inneslutningen inte fallerar kommer det mesta av radioaktiviteten att stanna kvar i kaviteten som formas. Det finns dock möjlighet för framförallt ädelgaser som bildas som fissionsprodukter att ta sig ut i atmosfären via sprickor som bildas i berggrunden. Detta beror på att ädelgaser inte reagerar kemiskt med omgivningen. Eftersom det inte finns något sätt att diskriminera en kemisk explosion och en kärnexplosion med hjälp av seismiska signaler, kan detektering av ädelgaser i atmosfären kopplat till en seismisk händelse vara det enda sättet att säga att en explosion är av nukleär natur.

Xenon är den ädelgas som har mest relevans i detta sammanhang. Vid fission produceras ett flertal xenonisotoper med halveringstider som är tillräckligt långa för att möjliggöra mätning på stora avstånd, men inte så långa att xenon från civila källor byggs upp i atmosfären och skapar en hög bakgrund (halveringstiderna för de relevanta

xenonisotoperna ligger mellan nio timmar och elva dagar). Dessutom kommer, till skillnad från partikelbunden radioaktivitet, radioxenon inte att transporteras till marken vid nederbörd, vilket gör att gasen kan transporteras längre sträckor än partiklar.

Radioxenon mäts främst med automatiska system som samlar in luft från atmosfären och producerar ett rent xenonprov i en gaskromatografisk process. Det rena provet mäts sedan i en detektor som kan registrera både gamma- och betastrålning. I moderna system mäts ett nytt prov var sjätte timme, vilket resulterar i en responstid för starka prov på ca 16 timmar. Detta är betydligt mindre än för partikelsystem, som ofta har en responstid på minst två dagar. FOI har utvecklat flera typer av system för detektion av radioxenon – de så kallade SAUNA-systemen [26, 27]. Dessa system används bland annat i CTBT:s internationella övervakningssystem, och har en detektionsgräns på ca 0,1 mBq per kubikmeter insamlad luft.

Radioxenon i atmosfären produceras även av andra källor än kärnexplosioner. Den största utsläppskällan är anläggningar för produktion av medicinska isotoper, som står för 95 % av den totala mängden i atmosfären. En annan viktig bakgrundskälla är kommersiella kärnkraftverk. Civila xenonutsläpp detekteras rutinmässigt globalt, men i större utsträckning på det norra halvklotet. Som exempel på detta visas resultat från en mätstation i Stockholm under delar av 2022 i Figur 25.



Figur 25: Aktivitetskoncentrationen för  $^{133}\text{Xe}$  i Stockholmsluft från mitten av oktober till sista december 2022 uppmätta vid station RN63 som ingår i CTBT:s internationella verifikationssystem. Stationen är utrustad med den senaste versionen av xenonsystemet SAUNA utvecklat av FOI [27] som rapporterar en ny mätning av de fyra xenonisotoperna  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$  och  $^{135}\text{Xe}$  var sjätte timme.

Liksom för alla andra detektionstekniker är det viktigt att kunna särskilja dessa utsläppskällor från utsläpp från kärnexplosioner genom att kartlägga bakgrundskällor och utveckla metoder för diskriminering. En metod för det senare bygger på att kvoterna mellan producerade xenonisotoper skiljer sig åt för exempelvis utsläpp från kärnkraftverk och en kärnsprängning. Till sist noterar vi att xenon är en indikation på fission som skett nyligen, vilket innebär att det inte finns i utbränt bränsle från kärnreaktorer som lagrats en tid. Om sådant material av någon anledning skulle spridas i luften skulle en förhöjd xenonsignal inte registreras på grund av detta.

## 6.2.4 Satellitbilder

Satellitbilder, såväl i det synliga området som i exempelvis mikrovågsområdet, kan användas för att hitta anomalier i miljön efter en kärnexplosion. Sådana studier kan bekräfta och förbättra lokaliseringen av explosionen, och ge ytterligare information om explosionens effekter. Ett exempel är så kallad interferometrisk syntetisk aperturradar (InSAR) där små deformationer av jordytan kan mätas med hjälp av att kombinera radarbilder producerad vid olika tidpunkter. Sådan teknik användes bland annat för att detektera centimeterstora markförskjutningar vid Nordkoreas provplats efter deras underjordiska kärnladdningsprov 2017 [19].

## 6.3 Kärnexplosioner under vatten

### 6.3.1 Hydroakustiska och seismiska vågor

Vid en explosion på stort djup i havet kommer i princip all frigjord energi att koppla till vattnet. Närmare vattenytan kan signifikanta delar av energin istället koppla till atmosfären. Omvänt kan en luftexplosion ovanför vattenytan koppla till vattnet. Vatten, och speciellt oceanerna, är ett mycket effektivt medium för transport av ljudvågor. I oceanerna existerar den så kallade SOFAR-kanalen (*Sound Fixing and Ranging*) som karaktäriseras av ett minimum i den vertikala ljudhastighetsprofilen, som vid ekvatorn ligger på ett djup av ca 1,5 km. SOFAR-kanalen verkar som en mycket effektiv vågledare för ljud med små energiförluster, vilket gör att ljudet kan färdas mycket långa sträckor. En explosion på 1 kg TNT som sker i SOFAR-kanalen kan detekteras på flera tusen kilometers avstånd. I grundare vatten, som exempelvis i Östersjön, sprider sig ljudvågen cylindriskt, och styrkan avtar linjärt med avståndet. Beroende på avståndet till botten kan hydroakustisk energi från en undervattensexpllosion koppla till jordskorpan och även ge upphov till seismiska vågor.

I en djupare undervattensexpllosion kommer de heta gaserna att forma en bubbla vars radie oscillerar när bubblan stiger mot ytan. Dessa "bubbelpulser" kommer att ge upphov till sekundära akustiska vågor som kan vara möjliga att detektera. För en explosion närmare ytan kan bubblan bryta ytan direkt och ingen bubbelpuls uppstår.

Det hydroakustiska bakgrundsbruset orsakas av en mängd naturliga och antropogena processer. Seismiska händelser, vattenturbulens, vulkanaktivitet och tidvatten orsakar signaler i det lägre frekvensområdet (< 10 Hz). Jordskalv på havsbotten kan koppla till vattnet och skapa så kallade T-fasvågor. Sådana seismiska vågor kan observeras av seismiska stationer belägna på öar och vid kuster som en tredje våg efter ett jordskalv under havsbotten, och har lägre hastighet än P- och S-vågor eftersom de delvis har fortplantats i vatten. T-fasvågor kan också observeras av hydroakustiska mätsystem, och den seismiska signalen kan användas för att lokalisera den hydroakustiska signalen. I frekvensområdet 10 till 100 Hz domineras bakgrunden av fartyg och brytande vågor, och högre frekvenser kan orsakas av exempelvis valar, blixtnedslag och konventionella undervattensexpllosioner.

### 6.3.2 Spridning av radioaktiva partiklar och gaser

Spridningen av radioaktivitet från en undervattensexpllosion till atmosfären är mindre studerat än för luftexplosioner, och relativt lite information finns att tillgå. En orsak till detta är att relativt få undervattensprov har utförts (åtminstone åtta sådana prov har gjorts, fem av USA och tre av forna Sovjetunionen). Generellt kommer spridningen att bero på explosionsdjupet och i vilken fas bubbelpulsen befinner sig i när den bryter vattenytan (se

avsnitt 4.4). I [28] sägs det att för grunda explosioner ( $< 70$  m) kommer en stor del av ädelgaserna och andra fissionsprodukter avges till atmosfären. På djup mellan 70 och 300 m kommer en signifikant del av ädelgaserna att nå atmosfären, medan övriga fissionsprodukter kommer att stanna kvar i vattnet. På djup större än 300 m kommer bubblan lösas upp innan den når vattenytan, och fissionsprodukterna kommer att sprida sig i vattnet.

## 7 Svensk mät- och analysförmåga

### 7.1 Inledning

I detta avsnitt ges en kort redovisning av svenska mätsystem som används, eller skulle kunna användas, för detektion av kärnexplosioner och radioaktiva utsläpp. Systemen drivs inte tillsammans som en del av en större organisation, utan drivs av olika aktörer för olika ändamål. Vi gör inte anspråk på att listan är fullständigt komplett. Vidare ger vi en beskrivning av de internationella mätesurser som Sverige rutinmässigt har tillgång till inom övervakningen av kärnvapenprov och luftburen radioaktivitet.

### 7.2 Stationära mätsystem

#### 7.2.1 Seismologiska mätsystem

I Sverige har mätningar av kärnexplosioner och andra kärntekniska händelser genomförts sedan 1940-talet. Det svenska nätet av seismiska stationer utökades under 1950- och 60-talet av Uppsala universitet. FOA:s verksamhet på området inleddes på 1960-talet och 1969 invigdes den seismologiska stationen i Hagfors, som har drivits av FOA (numera FOI) sedan starten. Stationen, som är en så kallad array-station (se Figur 26), har byggts ut och moderniserats i omgångar [29], och 2002 certifierades den som en del i det internationella nätverket för CTBT-verifikation (se avsnitt 7.4).

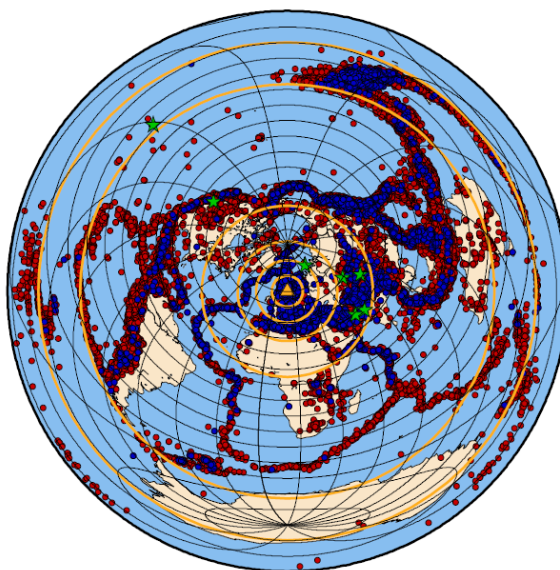


Figur 26: Hagforsstationen är en seismisk arraystation med tio mätpunkter. Diametern för den yttre ringen är 1,4 km. Alla punkter är försedda med bredbandiga trekomponentsinstrument.

Hagforsstationen har genom åren registrerat ett stort antal kärnladdningsprov genomförda av framförallt USA och forna Sovjetunionen. Även samtliga prov genomförda av Nordkorea har uppmätts av stationen.

Som nämnts ovan är Hagforsstationen idag en del av CTBT:s verifikationssystem (IMS). Den seismologiska delen av detta system består av 50 primära och 120 sekundära mätstationer.



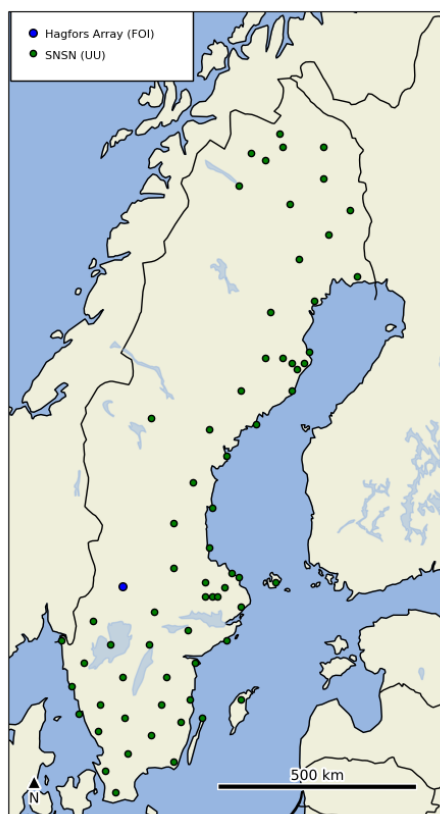


Figur 27: Seismiska händelser rapporterade av CTBTO:s övervakningssystem (IMS) mellan 1/1 2000 och 12/10 2003. Blå cirkular markerar händelser där data från Hagforsstationen inkluderats. Bilden är hämtad från [30].

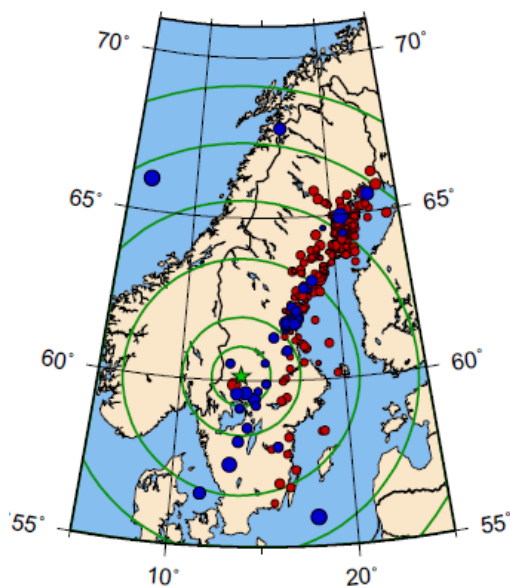
Som en generell illustration till Hagforsstationens mätförmåga visas i Figur 27 samtliga seismologiska händelser mellan 1/1 2000 och 12/10 2003 rapporterade av IMS [30]. De händelser där data från Hagforsstationen inkluderats i analysen visas som blå cirkular. Hagforsdata används här främst för händelser i Europa och Mellanöstern, men även för händelser i Centralasien och ännu längre bort.

Majoriteten av de seismiska mätstationerna i Sverige återfinns i det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) [31], som drivs av Uppsala universitet. SNSN övervakar jordbävningens aktivitet i Sverige och utomlands och består av 67 bredbandiga mätstationer uppkopplade till en central server i Uppsala. Mätstationernas placering är återgiven i Figur 28. Data från utvalda mätstationer i SNSN levereras vidare i realtid till grannländerna och data från tio stationer publiceras i ett europeiskt nätverk (ORFEUS). Tack vare det betydligt större antalet mätpunkter jämfört med Hagforsstationen kan SNSN registrera seismiska händelser med lägre magnitud i Sverige (se Figur 29).

SNSN importerar data från cirka 120 mätstationer i Norge, Danmark, Finland, Estland, Polen och Tyskland och detekterar automatiskt skalv och sprängningar i regionen. SNSN importerar också data från cirka 250 mätstationer runt om i världen och lokaliserar större jordbävningar globalt inom 5 – 10 minuter.



Figur 28: Seismografstationer i Sverige drivna av FOI (Hagforsstationen) och Uppsala universitet (SNSN). Koordinaterna för SNSN-stationerna är hämtade från SNSN:s hemsida.



Figur 29: Seismologiska händelser registrerade av det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) under perioden 2/4 2002 – 21/9 2003 (röda cirklar). Händelser registrerade av Hagforsarrayen under samma period är markerade med blå cirklar.

## 7.2.2 Mätningar av infraljud

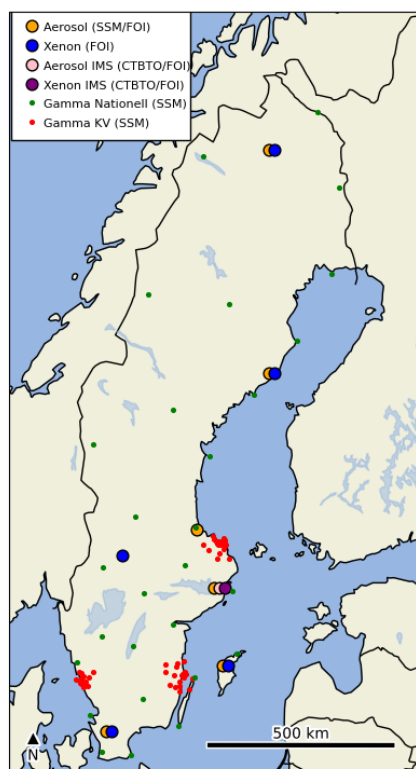
Institutet för rymdfysik (IRF) har utfört infraljudsmätningar sedan 70-talet [32]. För närvarande drivs ett nätverk med tre stationer i Sverige (Kiruna, Jämtön och Lycksele) och en i Sodankylä i Finland [33]. Varje station är en array bestående av tre mikrofoner på 75 meters avstånd från varandra placerade i form av ett "L".

## 7.2.3 SMHI:s blixtolokaliseringssystem

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) använder sig av ett internationellt nät av blixtolokaliseringstationer för att registrera blixtnedslag vid åskväder [34]. Nio mätstationer finns i Sverige. Systemet består av antenner som registrerar den elektromagnetiska pulsen som uppstår vid en blixurladdning. Blixstens position kan bestämmas genom att använda skillnaden i ankomsttid till de olika antennerna. Det finns en möjlighet att ett system av denna typ skulle kunna användas för att registrera EMP-pulsen från en kärnexplosion och därmed också bidra till lokaliseringen.

## 7.2.4 Mätstationer för luftburen radioaktivitet

I Sverige har kontinuerliga ultrakänsliga isotopspecifika mätningar av atmosfärisk radioaktivitet genom insamling av partiklar (aerosoler) på filter genomförts av FOA (numera FOI) sedan 1957 [35]. Motiveringen för denna verksamhet har varierat genom åren, från att erhålla oberoende information om kärnladdningsprov och bidra till utvecklingen av CTBT:s verifikationssystem, till att idag vara en del av beredskapen för kärntekniska olyckor. Sedan 1978 drivs denna verksamhet av FOI på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten. I dag drivs sex mätstationer, från Ljungbyhed i söder till Kiruna i norr (se Figur 30 där filterstationerna är markerade som orange cirklar).



Figur 30: Mätstationer för kontinuerliga mätningar av luftburen radioaktivitet i Sverige. SSM:s gammastationer är markerade som röda och gröna cirklar. De gröna tillhör det nationella nätverket, och de röda är placerade runt kärnkraftverken. Mätssystem på samma plats markeras med cirklar placerade i rad.

På fem av stationerna filtreras luft genom ett glasfiberfilter som byts två gånger i veckan och mäts som veckoprov på FOI:s gammallaboratorium i Kista [36]. Stationen i Kista byter filter var 28:e timme. Fem av stationerna är försedda med kolkapslar som används för mätning av radioaktivt jod, och fyra samlar dessutom in nederbörd på jonbytare som också mäts på FOI i Kista. Beta- och alfastrålande nuklider kan till exempel mätas vid FOI:s laboratorium i Umeå.

Förutom de nationella filterstationerna finansierade av SSM driver FOI dessutom en mätstation som ingår i CTBT:s internationella övervakningssystem. Stationen består av ett system för partikelmätningar [37], och ett SAUNA III-system [27] för mätningar av radioaktivt xenon. Partikelsystemet är ett automatiskt system som samlar in prover med en tidsupplösning på 24 timmar. SAUNA III-systemet mäter halten av radioaktivt xenon i atmosfären var sjätte timme. Sedan 2021 driver dessutom FOI en nationell array bestående av fem xenonstationer, baserat på ett nytt mätkoncept utvecklat av FOI – SAUNA Q<sub>B</sub> [38].

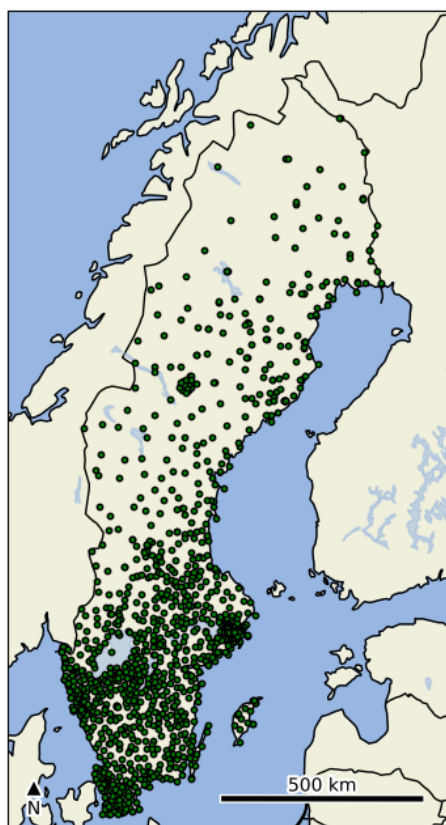
Samtliga mätsystem nämnda ovan är mycket känsliga, med detektionsgränser ner till ca 1  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  för partikelsystemen, och ca 100  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  för xenon. Detta gör att de kan detektera utsläpp som inte utgör någon fara för omgivningen, men som kan ge information om pågående nukleär verksamhet, som till exempel reaktordrift och isotopproduktion, eller i de fall väderförhållandena tillåter, utsläpp från kärnexplosioner som sker på stora avstånd från Sverige.

Den höga känsligheten för filtersystemen sker dock på bekostnad av rapporteringstiden (tid mellan start för insamling och färdig mätning). Som kortast är denna tid fyra dygn. För att snabbare kunna få isotopspecifik information för högre aktivitetsnivåer finns det planer på att installera detektorer som är monterade direkt i anslutning till filtren under insamling, och dessutom är konstant uppkopplade för att möjliggöra realtidsanalys. Detta skulle möjliggöra isotopspecifika mätningar med en responstid på ca en timme och uppåt

(beroende på önskad känslighet). Det ska dock påpekas att denna typ av mätningar aldrig kan ersätta laboriemätningar på grund av lägre känslighet.

Som beskrivs i avsnitt 5, kan en ännu kortare responstid uppnås på bekostnad av mätbarhet och genom att inte kräva att specifika isotoper ska identifieras, exempelvis genom att använda sig av gammastationer som mäter doshastigheten. Idag driver SSM fasta gammastationer utplacerade för tidig varning för större radioaktiva utsläpp. Dels finns ett nätverk av 28 stationer, geografiskt jämnt fördelade över Sverige, samt ett större antal stationer placerade med utgångspunkt från kärnkraftverkens lägen och SSM:s beredskapszoner [10] (se figur 30). Dessa system har en känslighet som är 10 000 – 100 000 gånger lägre än filtersystemen, men har en responstid på minuter.

### 7.3 Mobila mätningar av radioaktivitet



Figur 31: Mätplatser för kommunernas doshastighetsmätningar.

Det enda mobila system för mätningar av radioaktivitet som kan anses vara rikstäckande i framtid baseras på kommunernas doshastighetsinstrument, som bland annat använder sig av fasta mätplatser i varje kommun (se Figur 31). Mätinstrumenten handhas av räddningstjänsten men är inte uppkopplade, utan tas fram vid inträffad händelse och kan användas för indikering vilket också kräver någon form av förvarning om informationsbehovet är tidskritiskt. Det finns även ett antal utplaceringsbara luftprovtagare som är tänkta att användas i samband med en kärnkraftsolycka. Kärnkraftslänet har dessutom nyligen försetts med utrustning för mobila isotopspecifika mätningar som rapporterar i realtid till en databas på SSM.

Mobila resurser som använder sig av mer komplexa mättekniker finns inom den nationella organisationen för expertstöd vid olyckor och andra allvarliga händelser med radioaktiva ämnen [39]. Denna resurs drivs av SSM. I organisationen ingår bland annat sex beredskapslaboratorier som tillsammans med SSM har tre bilar och tre släpvagnar som används för mobila mätningar av radioaktivitet och insamling av miljöprover, som sedan skickas till laboratorier för mätning. Mätutrustningen inkluderar mobil gammaspektrometri där positionen registreras under mätning, bärbara spektrometrar och mätinstrument för alfa-, beta-, gamma-, och neutronstrålning. Det finns också utrustning för att samla in luft-, vatten-, jord- och gräsprover. Sveriges geologiska undersökning (SGU) i Uppsala har möjlighet att genomföra flygmätningar med gammadetektorer [40], och är också en del av SSM:s expertstöd.

Fält- och laboratorieberedskapen inom SSM:s expertstöd använder sig av avancerad mätteknik men har mycket begränsad kapacitet för landsomfattande mätningar i fält (gammastrålande nuklider), och för provtagning för laboriemätningar av alfastrålande och betastrålande nuklider. Beredskapen är stokastisk vilket innebär att om informationsbehovet är tidskritiskt krävs en förvarningstid.

## 7.4 Tillgängliga internationella mätresurser



Figur 32: Det internationella övervakningssystemet för verifikation av det fullständiga provstoppsavtalet (CTBT).

Den absolut främsta tillgängliga internationella mätresursen för detektion av kärnexplosioner är *International Monitoring System (IMS)* – det globala verifikationssystemet för det fullständiga provstoppsavtalet [41]. IMS (se Figur 32) ska i fullt utbyggt skick bestå av 50 primära och 120 sekundära seismiska mätstationer, elva stationer för hydroakustiska mätningar, 60 infraljudsstationer och 80 stationer för atmosfärisk radioaktivitet, varav 40 av de sistnämnda även skall vara utrustade med xenonssystem. För närvarande är över 80 % av systemet i drift. Som nämnts ovan bidrar Sverige till IMS med ett partikelsystem och ett xenonssystem, samt Hagforsstationen. Dessutom är det FOI-utvecklade xenonssystemet SAUNA installerat på totalt 17 stationer i nätverket.

Data från IMS:s samtliga mätsystem skickas via satellitlänk till det internationella datacentret (IDC) beläget på CTBTO:s högkvarter i Wien, där det analyseras. Både analysprodukter och rådata skickas vidare till nationella datacentra (NDC) i medlemsländerna, som därmed har möjlighet att genomföra en egen analys<sup>12</sup>. Sveriges NDC är beläget på FOI i Kista, där kontinuerlig övervakning av data från IMS sker.

IMS utgör det enda globala övervakningssystemet för mätningar av atmosfärisk radioaktivitet, hydroakustiska signaler och infraljud, och spelar därför en viktig roll, inte

<sup>12</sup> Den dataanalys som utförs på nationell nivå är en mycket viktig komponent av CTBT-verifikationen eftersom det endast är enskilda medlemsländer som kan väcka misstanke om att någon kan ha utfört ett kärnladdningsprov. Detta till skillnad från exempelvis icke-spridningsavtalets (NPT), där bedömningen utförs av verifikationsorganet självt (IAEA).

enbart inom CTBT-verifikation. Detta visade sig exempelvis efter reaktorolyckan i Fukushima, där den radioaktiva plymen kunde följas över hela norra halvklotet [42]. Systemet används också som en del av länders övervakningssystem för tsunamis [43].

Till skillnad från övriga tekniker i IMS, finns det andra internationella nätverk för seismologiska data. Exempelvis the Global Seismographic Network (GSN), med över 150 mätstationer [44].

European Radiological Data Exchange Platform (EURDEP) [44] är en plattform för utbyte av data, främst i Europa. Data från dosratsinstrument delas här av 39 länder (se Figur 33). Sverige delar här data från SSM:s nationella gammamonitorer (gröna punkter i Figur 30). Som kan ses i Figur 33 är variationen i stationstäthet mellan olika länder stor. Sverige har en relativt låg stationstäthet jämfört med de flesta europeiska länder.



Figur 33: Monitorer för gammadosrat inom EURDEP. Bilden är hämtad från EURDEP:s websida [45].

En annan internationell resurs är det så kallade ”*Ring of Five*” (Ro5) som är ett informellt nätverk av operatörer av framförallt filterstationer. Totalt driver denna grupp ca 200 filtersystem i Europa, och utbyter information med hjälp av en e-maillista i händelse av att någon detekterar något ovanligt. Sverige är med i Ro5 som en av grundarna och administrerar även maillistan.



## 8 Informationsbehov utgående från fyra scenarier

Här beskrivs ett antal scenarier som representerar händelser som förmågan hos ett mät- och analysystem för nukleära händelser kan värderas mot. Situationerna innefattar kärnexplosion både inom svenskt territorium och i Sveriges närområde. Ett annat scenario är ett kärnladdningsprov som utförs varhelst i världen, där det antas att det inte finns tillgång till mätinformation från internationella källor. Slutligen diskuterar vi fallet övriga nukleära händelser som kan vara av vitt skilda slag, och som dessutom utgör en delmängd av bakgrunden för fallet upptäckt av en kärnexplosion.

För varje scenario har vi försökt rama in vilka behov av information som olika aktörer har, och som skulle kunna tillhandahållas av ett sådant system. Denna diskussion baserar sig dels på en myndighetsgemensam workshop, dels på enskilda diskussioner och intervjuer med vissa myndigheter, och även på en generell bedömning baserat på myndigheternas ansvarsområden och roller. Urvalet av myndigheter har av praktiska skäl behövt begränsas, men är förhoppningsvis tillräckligt brett för att kunna identifiera de viktigaste informationsbehoven. Informationsinhämtningen har i första hand berört scenarierna kärnexplosion i Sverige med närområde. Frågor som togs upp inkluderade det ansvar organisationen har vid en sådan händelse, vilken information som behövs den första timmen och senare, samt hur detta är organiserat idag. I beskrivningarna nedan redovisar vi endast ett urval av det fullständiga informationsbehovet, gjort med fokus på det som vi bedömer relevant för att kunna formulera en kravspecifikation för ett mät- och rapporteringssystem.

Frågan om kärnladdningsprov i omvärlden och andra kärntekniska händelser diskuterades endast delvis, eftersom dessa fall endast berör ett fåtal aktörer. Myndigheter som deltog i workshopen var Försvarmakten, MSB, Strålsäkerhetsmyndigheten, Livsmedelsverket, Jordbruksverket och Sjöfartsverket. Enskilda diskussioner och intervjuer har genomförts med regeringskansliet, Försvarmakten, MSB, Strålsäkerhetsmyndigheten, länsstyrelser och Tullverket.

### 8.1 Kärnexplosion i Sverige

Detta scenario är baserat på en FOI-rapport [15], där ett kärnvapenangrepp sker mot färjehamnen i Nynäshamn. Angreppet sker med ytexplosion och explosionsstyrka 100 kt. De direkta effekterna kommer att bli mycket omfattande (se också avsnitt 5). Flertalet byggnader inom två kilometer från explosionen raseras, upp till två kilometer från explosionen uppstår bränder i skog och i byggnader, och människor kommer utsättas för akuta strålskador. Kärnexplosionen ger upphov till radioaktivt material som deponeras i form av lokalt nedfall runt nollpunkten och i vindens riktning. För orter i vindriktningen kommer nedfallet ankomma med en fördröjning som ungefär ges av medelvindhastigheten, som i detta fall antogs vara 30 km/h (se Figur 18).

#### 8.1.1 De första timmarna

Snabb kännedom om att ett kärnvapenangrepp skett är förstås betydelsefullt för alltifrån regeringen, Försvarmakten och MSB, till närmast berörda räddningstjänster och länsstyrelser. För samordnande myndigheter är det värdefullt att få en snabb bedömning av huruvida en händelse verkligen var en kärnvapenexplosion, och om det var det, en uppskattning av direktverkan, vilket område som påverkas och en första uppskattning av

antal döda och skadade. Dessa uppgifter är också viktiga för regionerna, som ansvarar för sjukvården.

Försvarsmakten fortsätter bedriva sin ordinarie verksamhet, och har behov av en snabb, uppskattning av parametrar för riskområdesmallar [46]. Parametrar som behövs för en sådan bedömning är framför allt kärnexplosionens tidpunkt, koordinater och höjd, samt uppskattning av explosionsstyrka.

Bland civila myndigheter är det de som är närmast händelsen som kommer att agera först, det vill säga närmast berörda räddningstjänster. Likt Försvarsmakten har dessa behov av en snabb och kvalitetssäkrad uppskattning av riskområdet för att kunna genomföra sina operativa uppgifter. Dit hör till exempel utfärdande av VMA, samt ansvar för in- och utrymning och brandbekämpning. I ett inledande skede är det viktigt att informationen kommer kommunerna till del direkt, utan omvägar. Som nämnts tidigare är det kommunernas ansvar att upptäcka, utmärka och röja farliga områden, indikera och sanera [1].

Strålsäkerhetsmyndigheten har en central uppgift när det gäller strålningsrelaterade hälsorisker för människor, och fokus vid en kärnexplosion skulle vara rekommendationer kring tidiga skyddsåtgärder, såsom inrymning. Därvid behöver man information relevant för uppskattning av nedfall (tid, plats, explosionsstyrka och höjd). Många andra myndigheter har i sin tur behov av sådana uppskattningar av nedfall för sina myndighetsuppgifter, som bland annat innefattar rådgivning till andra aktörer. Ett exempel är Jordbruksverket, som ger rekommendationer om till exempel installation av betesdjur och övertäckning av odlingar innan nedfallet sker, baserat på fastställda dosdepositionsnivåer samt rådande gränsvärden för saluföring av livsmedel och de nedfallsprognoser som de tar del av. Sjöfartsverket behöver information om riskområden för att kunna dirigera om sjöfart för att upprätthålla samhällsviktiga logistiksystem, Polisen behöver information till exempel för omdirigering av trafik och andra tvingande åtgärder.

Information som efterfrågas av dessa aktörer och andra är explosionens tid och plats, information om det var en yt- eller luftexplosion. Vidare efterfrågas realtidsinformation om plymens väg och om när nedfall upphört, samt information om nuklidinnehåll och nedfallets storlek.

### **8.1.2 Det senare skedet**

Efter den initiala upptäckten av kärnexplosionen, och första uppskattningen av explosionsstyrka, explosionshöjd med fler parametrar, vidtar arbetet med att uppdatera informationen i syfte att förbättra uppskattningen av skadeutfall, prognostisering av spridning av radioaktivt nedfall, osv. Härvid är det viktigt med verifierad information för att regeringen och andra ska kunna informera allmänheten på ett så korrekt vis som möjligt.

För Försvarsmaktens del innebär det senare skedet att egna mätresurser nyttjas för att bestämma faktisk förekomst av nedfall där de egna förbanden verkar. Successiv förbättring av situationsuppfattningen sker med tiden, vartefter mer detaljer framkommer. På liknande vis använder kommunala räddningstjänster sina mätresurser för att bestämma omfattning av eventuellt nedfall, allt utifrån närhet till explosionen.

Strålsäkerhetsmyndigheten, som svarar för att stödja andra myndigheter med strålskyddsbedömningar, behöver mätningar för att upprätta kartläggningar av nedfall och luftkoncentrationer. De mätresurser som finns inom den nationella strålskyddsberedskapen inriktas efter var behoven av mätningar bedöms som störst. En riskfaktor i detta arbete är personalens uthållighet (förf. anm.). På längre sikt vidtar mindre tidskritiska mätningar, till exempel längs med vägar, i syfte att friklassa områden dit folk ska återvända efter eventuell utrymning. Isotopspecifika mätningar är av betydelse för att uppskatta interndos

från inandning och för att kunna bedöma konsekvenser på lång sikt (exempelvis interndos från livsmedel).

## 8.2 Kärnexplosion i Sveriges närområde

Vid en kärnexplosion utanför Sveriges gränser, men i vårt närområde, kommer de direkta effekterna att vara försumbara i Sverige, såvida inte angreppet sker i omedelbar närhet till territorialgränsen. Ett undantag är EMP-effekterna från en höghöjdsexplosion utanför jordens atmosfär, vilka kan ha kontinental utbredning vid tillräckligt höga explosionshöjder.

Om det istället är fråga om en ytexplosion kan radioaktivt nedfall föras med vindarna och falla ned över Sverige inom närmsta dygnet eller senare, beroende på de meteorologiska förhållandena. Vid en luftexplosion bildas också radioaktiva partiklar, men deras storlek är betydligt mindre än när markmaterial kontamineras. Partiklarna faller därför mycket långsammare, och kan ta månader innan dessa når marken. Nederbörd kan dock föra dem med sig till marken, förutsatt att partiklarna befinner sig så lågt att de är i eller under molnen.

Vid en händelse som denna finns fortfarande behov hos flera aktörer att snabbt få kännedom om att kärnvapen har använts. Beroende på hur långt från Sverige som angreppet sker, är tidsförhållandena inte lika kritiska som vid ett angrepp på svenskt territorium, men information om händelsen behövs så fort det är möjligt. Användning av kärnvapen i direkt närhet till territorialgränsen skulle dock i praktiken beröra svenska aktörer på i stort samma sätt som i det föregående scenariot, även om det inte formellt är fråga om ett angrepp i Sverige. Likaså skulle ett kärnvapenangrepp i närhet av svensk militär trupp utomlands ställa Försvarsmakten inför en situation som i stora delar motsvarar läget vid ett kärnvapenangrepp i Sverige. Generellt är informationsbehovet stort även i detta fall, till exempel för regeringskansliet avseende situationen för svenskar och svenska intressen där angreppet skett.

Nedfallsprognos för eventuellt radioaktivt nedfall är av stor betydelse även i detta "åskådarfall", och behoven är i linje med det som redan beskrivits ovan.<sup>13</sup> Om en radioaktiv plym når Sverige är det viktigt att detta verifieras snabbt, även om det inte föreligger en omedelbar fara för hälsorisker (inte minst för att verifiera just detta). Räddningstjänst berörs förmodligen inte direkt på samma sätt, men utgör som i det tidigare fallet en viktig befintlig mätresurs. Även om påverkan i Sverige kan vara begränsad, behöver till exempel eventuella problem med livsmedelsförsörjning beaktas. Därvid är isotopspecifika mätningar för att kunna uppskatta dos från oralt intag av betydelse, som redan nämnts. Till sist är det återigen värt att lyfta fram betydelsen av snabb och korrekt information för att hjälpa till att mildra psykologiska effekter som förväntas uppstå efter en kärnexplosion, oavsett var den skett.

## 8.3 Kärnladdningsprov i omvärlden

Det troligaste scenariot för en kärnexplosion någonstans i världen är ett underjordiskt kärnladdningsprov. I detta fall är det av intresse för regeringskansliet att få information om att ett prov verkligen skett och var det skedde (vilket land är det viktigaste). Annan information som exempelvis explosionsstyrka är också av intresse. Om en luftexplosion genomförts, eller om ett underjordiskt prov av någon anledning läckt ut mycket radioaktivitet, behövs en bedömning av fysiska konsekvenser i närområdet, exempelvis en

<sup>13</sup> Det är värt att ha i åtanke att ett kärnvapenangrepp på svenskt territorium är att betrakta som ett "åskådarfall" i delar av landet som ligger på tillräckligt stort avstånd från explosionen.

prognos för nedfallet. En lämplig responstid för rapportering av kärnladdningsprov i omvärlden är inom några timmar. Rapporteringen som beskrivs här är något som redan idag görs av FOI inom ramen för det nationella datacentret för CTBT-övervakning (NDC). I ett fall då Sverige inte har tillgång till internationella mätsystem skulle det fortfarande finnas en viss förmåga att upptäcka ett kärnladdningsprov med hjälp av de svenska mätsystem som beskrivs i avsnitt 7, framförallt gäller detta underjordiska prov.

## 8.4 Andra nukleära händelser

Nukleära händelser som inte är kärnsprängningar utgör en stor grupp av möjliga händelser som kan skilja sig väsentligt åt beträffande mätsignaturer och eventuell verkan. Det är omöjligt att räkna upp alla tänkbara scenarier, vilket gör det svårt att dimensionera ett system därefter<sup>14</sup>. Man kan dock konstatera att kunskap om händelser av denna typ är viktig. Dels utgör de en viktig del av bakgrunden till fallet kärnexplosion, och dels kan en detektion av ett radioaktivt utsläpp (även ett mycket litet rutinutsläpp) ge information om andra kärntekniska aktiviteter, och utgöra en förvarning om en förändrad hotbild.

Det är svårt att ange en generell lämplig responstid för dessa händelser, det varierar från fall till fall. Men för radioaktiva utsläpp som inte kan associeras med någon annan signal (som exempelvis en seismisk händelse) kan det röra sig om flera dagar eller veckor, beroende på att plymen först måste nå Sverige och sedan mätas.

Det är relativt vanligt att det rapporteras detektioner av antropogena radionuklider i atmosfären över Sverige, och oftast är det svårt att utreda orsaken. En bidragande orsak till detta är svårigheten att lokalisera utsläppskällan med nuvarande mätsystem (se avsnitt 6.1.5). Även om dessa utsläpp i princip aldrig utgör någon fara för allmänheten finns det oftast ett allmänintresse att förklara vad som orsakat dem. Ett exempel är ett utsläpp av <sup>106</sup>Ru som uppmättes i stora delar av Europa 2017 [47]. Andra exempel är detektioner av jod i atmosfären som relativt regelbundet ses i Sverige och Europa, oftast utan att källan kan bestämmas. För att bättre kunna avgöra orsaken till en sådan händelse behövs mätsystem som möjliggör en bättre lokalisering än vad som är möjligt idag.

---

<sup>14</sup> Som nämndes redan i inledningen så är fallet kärnteknisk olycka inte ett dimensionerande scenario för det system som vi diskuterar här.

## 9 Diskussion och slutsatser beträffande grundläggande krav

Med ovan beskrivna behovsinventering som grund gör vi bedömningen att informationsbehovet för fallet kärnexplosion i Sverige inklusive närområde kan sammanfattas i tre grupper:

1. Information om *tidpunkt, koordinater, explosionshöjd* och *explosionsstyrka* till aktörer som använder denna information för eget agerande, respektive för produktion av förädlad information till andra aktörer (kommuner, länsstyrelser, Forsvarsmakten och SSM).
2. *Direktverkansbedömning* till informerande och samordnande myndigheter (regeringskansliet och MSB).
3. Initial basinformation (*att* en kärnexplosion inträffat, *tid* och *plats*) och förädlad information av varierande karaktär som kan utgöra beslutsunderlag till ett större antal myndigheter.

Initial information måste förmedlas till alla tre grupper så fort som möjligt. Givet händelsens natur är det mycket viktigt att ett mät- och analyssystem har en väl optimerad larmtröskel. Man vill inte råka ut för situationer där exempelvis en reaktorolycka eller en kraftig kemisk explosion tolkas som att en kärnexplosion inträffat. Exempelvis bedöms explosionen i ett förråd med ammoniumnitrat i Beirut ha haft en styrka på c:a 1 kt [22]. Det är därför centralt att noga tänka igenom vilka detektionskriterier som krävs för att skapa ett larm.

Vi anser att tillförlitlig information bäst åstadkoms genom att använda ett fast mätsystem som bas, med tillhörande analys- och rapporteringsfunktion som inkluderar en god kunskap om existerande och möjliga bakgrundskällor.

Efter den initiala fasen behöver samtliga tre grupper ovan få periodiskt uppdaterad information i form av förbättrade bedömningar, baserat på fördjupad analys och eventuella ytterligare mätningar. För att ytterligare förbättra lägesbilden är det en stor fördel om systemet har möjlighet att samla in mätningar från externa källor som inte formellt ingår i systemet. Detta borde gå att ordna med förberedda rapporteringsrutiner och dataformat. Dessa data skulle dessutom kunna bidra till att förbättra tolkningen av systemets egna insamlade data.

Mät- och analyssystemets förmåga bestäms av mätteknikens kapacitet, antalet sensorer och analysresurser i form av utvecklade metoder, beräkningsresurser och personal. Här behöver en avvägning göras när en kravspecifikation formuleras.

I fallet kärnladdningsprov i omvärlden kan vi konstatera att det är omöjligt att konstruera ett nationellt system som har förmågan att upptäcka kärnladdningsprov med global täckning, men som beskrivits i avsnitt 6.2.1 kan ett underjordiskt prov detekteras med en täckning som innefattar de flesta landmassor, om än med relativt begränsad lokaliseringsförmåga. Detta pekar på vikten av att systemet behöver ha möjlighet att kunna inkludera data från mätsystem utanför Sverige om så är möjligt. I ett normalläge är detta inget problem, speciellt inte vad gäller seismiska mätsystem, men situationen kan komma att vara annorlunda i ett konfliktläge. Radioaktiva utsläpp är viktiga för att bevisa att en explosion verkligen är av nukleär natur. Sannolikheten att detektera utsläpp från ett underjordiskt prov långt utanför Sveriges närområde är relativt liten, men för ett atmosfäriskt prov utfört på norra halvklotet är det möjligt, om än med tidsfördröjning.

Förmågan att kunna särskilja en kärnexplosion från andra nukleära händelser är som sagt central. Därför är det viktigt att bygga upp en kunskap om existerande och potentiella källor för radioaktiva utsläpp, och hur de bidrar till normalbilden. Förmågan till detta hos existerande mätsystem i Sverige och Europa är idag begränsad, delvis på grund av att

dessa system har ett annat syfte, där källlokalisering inte är prioriterat. Det är därför önskvärt att framtida system är försedda med ett större antal sensorer med högre tidsupplösning och använder sig av moderna tekniker för att lokalisera radioaktiva utsläpp.

På basis av allt detta bedömer vi att ett mät- och analyssystem för kärnexplosioner och andra nukleära händelser bör anpassas efter följande grundläggande dimensionerande krav:

1. Systemet ska ha förmåga att *detektera, lokalisera* och *karaktärisera*
  - a. kärnexplosioner i alla media (underjords-, undervatten-, yt-, luft-, höghöjdsexplosion) i Europa,
  - b. underjordiska kärnexplosioner globalt,
  - c. andra kärntekniska händelser i Europa.
2. Systemet ska mäta och analysera kontinuerligt.
3. Systemet ska producera både automatiska och granskade rapporter som skall kunna anpassas till olika användare.
4. I fallet kärnexplosion i Sverige inklusive närområde ska systemet snabbt leverera
  - a. information om tidpunkt, plats, explosionshöjd och explosionsstyrka
  - b. en direktverkansbedömning
  - c. en initial prognos för radioaktiv spridning (aktivitet och dos för markbeläggning och i luft).
5. För fallet i punkt 4 ska systemet efter den initiala fasen leverera periodiskt uppdaterad information i form av förbättrade bedömningar.
6. Systemet ska ha förmåga att ta emot och analysera kompletterande information till exempel i form av mätningar från andra aktörer.
7. Systemet ska kontinuerligt mäta, lokalisera och karaktärisera bakgrunden för alla ingående mättekniker på ett sätt som bidrar till att minska risken för falsklarm.
8. Systemet ska ha förmåga att kunna hantera flera nukleära händelser som inträffar en kort tid efter varandra.

En kvantifierad kravspecifikation redovisas i separat bilaga.

## Referenser

- [1] Lag (2003:778) om skydd mot olyckor, kap 8 (2003).
- [2] Regeringens proposition 2020/21:30 (2020).
- [3] Försvarsmakten och Myndigheten för samhällsskydd och beredskap: “*Sverige kommer att möta utmaningarna. Gemensamma grunder (grundsyn) för en sammanhängande planering för totalförsvaret*”, FM2016-13584:3, MSB2016-25 (2016).
- [4] Försvarsmakten: “*Doktrin för gemensamma operationer*”, DGO 20, FM2018-18369:30 (2018).
- [5] Försvarsmakten och Myndigheten för samhällsskydd och beredskap: “*Handlingskraft. Handlingsplan för att främja och utveckla en sammanhängande planering för totalförsvaret 2021-2025*”, FM2021-1 7683:2, MSB2020-16261-3 (2021).
- [6] Persson, G.: “*Rysslands kärnvapendoktrin – oförutsägbarheten stadfäst*”, FOI Memo 7332 (2020).
- [7] Strålsäkerhetsmyndigheten: “*Frågor och svar: Ukraina*”, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/om-stralning/fragor-och-svar-kopplat-till-ukraina/> (nedladdad 2023-03-10).
- [8] CTBTO Preparatory Commission: <https://www.ctbto.org/> (nedladdad 2023-03-10).
- [9] The Washington Post: “*Trump administration discussed conducting first U.S. nuclear test in decades*”, [https://www.washingtonpost.com/national-security/trump-administration-discussed-conducting-first-us-nuclear-test-in-decades/2020/05/22/a805c904-9c5b-11ea-b60c-3be060a4f8e1\\_story.html](https://www.washingtonpost.com/national-security/trump-administration-discussed-conducting-first-us-nuclear-test-in-decades/2020/05/22/a805c904-9c5b-11ea-b60c-3be060a4f8e1_story.html) (nedladdad 2023-03-10).
- [10] Strålsäkerhetsmyndigheten: “*Översyn av beredskapszoner*”, rapport 2017:27 (2017).
- [11] Strålsäkerhetsmyndigheten: “*Regionala strålningsmätningar i samband med en svensk kärnkraftsolycka*”, dnr SSM2020-4331 (2022).
- [12] Glasstone, S. och Dolan, P. J. (red.): “*The Effects of Nuclear Weapons*”, U.S. Departments of Defense and Energy (1977).
- [13] Wigg, L.: “*Handbok för kärnvapenverkan*”, FOA rapport FOA-R--96-00378-4.1--SE (1996).
- [14] Björklund, L. och Goliath, M.: “*Kärnladdningars skadeverkningar – beräkningsprogram med instruktion*”, FOI rapport FOI-R--2741--SE (2009).
- [15] Goliath, M., Lidström, K., Nylén, T. och Sivertsson, S.: “*Kärnvapenscenario för räddningstjänst*”, FOI rapport FOI-R--5131--SE (2021).
- [16] Brode, H. L.: “*Review of Nuclear Weapons Effects*”, Ann. Rev. Nucl. Sci. **18**, 153 (1968).
- [17] Ringbom, A., Elmgren, K., Lindh, K., Peterson, J., Bowyer, T. W., Hayes, J. C. McIntyre, J. I., Panisko, M. och Williams, R.: “*Measurements of radioxenon in ground level air in South Korea following the claimed nuclear test in North Korea on October 9, 2006*”, J. Radioanal. Nucl. Chem. **282**, 773 (2009).
- [18] Grier, H. E.: “*Bhangmeter mod II – Operation Tumbler-Snapper*”, rapport WT-562, Edgerton, Germeshausen & Grier, Inc. (1953).
- [19] Gaebler, P., Ceranna, L., Nooshiri, N., Barth, A., Cesca, S., Frei, M., Grünberg, I., Hartmann, G., Koch, K., Pilger, C., Ross, J. O. och Dahm, T.: “*A multi-technology analysis of the 2017 North Korean nuclear test*”, Solid Earth, **10** (1), 59 (2019).

- [20] Park, J., Arrowsmith, S. J., Hayward, C., Stump, B. W. och Blom, P.: “Automatic infrasound detection and location of sources in the western United States”, *J. Geophys. Res. Atmos.* **119**, 7773 (2014).
- [21] Posey, J. W. och Pierce A. D.: “Estimation of Nuclear Explosion Energies from Microbarograph Records”, *Nature* **232**, 253 (1971).
- [22] Kundu, B., Senapati, B., Matsushita, A. *et al.*: “Atmospheric wave energy of the 2020 August 4 explosion in Beirut, Lebanon, from ionospheric disturbances”, *Sci Rep* **11**, 2793 (2021).
- [23] Matthews, K.M.: “The CTBT Verification Significance of Particulate Radionuclides Detected by the International Monitoring System”, Ministry of Health National Radiation Lab Report, New Zealand (2005).
- [24] Kastlander, J. och Söderström, C.: “Evaluation of an early warning system for airborne radionuclides”, *Applied Radiation and Isotopes* **126**, 228 (2017).
- [25] Britton, R., Jackson, M. J. och Davies, A. V.: “Quantifying radionuclide signatures from a  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence system”, *Journal of Environmental Radioactivity* **149**, 158 (2015).
- [26] Ringbom, A., Larson, T., Axelsson, A., Elmgren, K. och Johansson, C.: “SAUNA – a system for automatic sampling, processing, and analysis of radioactive xenon”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **508** (3), 542 (2003).
- [27] Aldener, M., Axelsson, A., Fritioff, T., Kastlander, J. och Ringbom, A.: “SAUNA III - the next generation noble gas system for verification of nuclear explosions”, accepterad för publicering i *Journal of Environmental Radioactivity*, februari 2023.
- [28] US National Academy of Sciences: “Research Required to Support Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Monitoring”, National Academy Press, Washington D. C. (1997).
- [29] Nedgård, I.: “Hagforsobservatoriet, seismologisk verksamhet”, FOI rapport FOI-R--1651--SE (2005).
- [30] Lund, B. och Lennartsson, M.: “Hagfors Seismic Array Performance Analysis”, FOI rapport FOI-R--1309--SE (2005).
- [31] Lund, B., *et al.*: “The Modern Swedish National Seismic Network: Two Decades of Intraplate Microseismic Observation”, *Seismological Research Letters* **92** (3) (2021). Se även <https://snsn.se/>.
- [32] Liszka, L.: “Infrasound: A summary of 35 years of infrasound research”, IRF Scientific Report 291 (2008).
- [33] Data finns på <https://www.umea.irf.se/iltserie/>.
- [34] Upul Sonnadara, Vindu Kathriarachchi, Vernon Cooray, Raul Montano, Thomas Götschl.: “Performance of lightning locating systems in extracting lightning flash characteristics”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 112 (2014).
- [35] Vintersved, I. och De Geer, L.-E.: “The Swedish Air Monitoring Network for Particulate Radioactivity”, *IEEE Trans. Nucl. Science*, **NS-29** (1) (1982).
- [36] Söderström, C., Elmgren, K., Goliath, M., Hellesen, C., Karlkvist, L., Kastlander, J. och Olsson, H.: “Radionuclide particles in ground level air in Sweden during 2021”, FOI rapport FOI-R--5311--SE (2022).
- [37] Senya: “CINDERELLA Automated Air Sampling Station” (2022); se <https://www.senya.fi/cinderellag2.php>.



- [38] Ringbom, A., Fritioff, T., Aldener, M., Axelsson, A., Elmgren, K., Hellesen, C., Karlkvist, L., Kastlander, J., Olsson, H., Berglund, H., Hellman, B., och Pettersson, O.: “SAUNA QB - Array: The realization of a new concept in radionuclide detection”, *Journal of Environmental Radioactivity* **261**, 107136 (2023).
- [39] Strålsäkerhetsmyndigheten: “*Myndighetens krisorganisation*”, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/beredskap/myndighetens-krishantering-vid-en-radiologisk-nodsituation/myndighetens-krisorganisation/> (nedladdad 2023-03-10).
- [40] Sveriges geologiska undersökning: “*Flyggeofysisk mätning*”, <https://www.sgu.se/om-sgu/verksamhet/kartlaggning/geofysik-att-se-ner-i-berget/flyggeofysisk-matning/> (nedladdad 2023-03-10).
- [41] CTBTO Preparatory Commission: “*The International Monitoring System*”, <https://www.ctbto.org/our-work/international-monitoring-system> (nedladdad 2023-03-10).
- [42] Axelsson, A. och Ringbom, A.: “*The noble gas releases from Fukushima – Some implications and reflections*”, *CTBTO Spectrum*, July 2013 (2013).
- [43] CTBTO Preparatory Commission: “*New tsunami warning agreement signed with Chile*”, <https://www.ctbto.org/news-and-events/news/new-tsunami-warning-agreement-signed-chile> (nedladdad 2023-03-10).
- [44] Global Seismographic Network: “*GSN – Global Seismographic Network*”, <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/gsn-global-seismographic-network> (nedladdad 2023-03-10).
- [45] Europakommissionen: “*EURDEP*”, <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange> (nedladdad 2023-03-10).
- [46] Försvarsmakten: “*Handbok CBRN Stabstjänst*”, M7739-352120 (VIDAR FM2016-14380:15) (2021).
- [47] Masson, O. *et al.* “*Airborne concentrations and chemical considerations of radioactive ruthenium from an undeclared major nuclear release in 2017*”, *PNAS* **116** (34), 16750 (2019).

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

---



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)