FOI informerar om

Kärnvapen

FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut

Sedan slutet av andra världskriget har kärnvapen varit en viktig faktor i världspolitiken och har i olika grad präglat internationella relationer. I Sverige har Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, nationell expertkompetens när det gäller tekniska aspekter av kärnvapen.

Den här skriften är framtagen för att ge en översikt och en grundläggande förståelse, främst kring de tekniska aspekterna, och riktar sig till såväl allmänheten som beslutsfattare och andra aktörer inom totalförsvaret. Målsättningen är att därigenom bidra till att Sverige står bättre rustat vid ett eventuellt angrepp med kärnvapen.

Skriftserien ”FOI informerar om” är författad och faktagranskad av forskare och experter vid Totalförsvarets forskningsinstitut. Skrifterna erbjuder läsaren överblick och ökad kunskap inom olika områden relevanta för totalförsvaret. Besök gärna vår webbplats foi.se för att läsa mer om vår forskning.

FOI informerar om

Kärnvapen

Titel	FOI informerar om Kärnvapen
Rapportnummer	FOI-R--5960--SE
Månad	September
Utgivningsår	2026
Antal sidor	124
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	FOI
Forskningsområde	CBRN
Projektnummer	I4556
Godkänd av	Johan Kastlander
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet

Omslagsbild	Franskt kärnvapenprov vid Mururoa den 3 juli 1970 (Getty Images).
Illustrationer	FOI, Eken Bild & Animation AB
Tryck	Multiply Solutions Sweden AB, Järfälla 2026

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bland annat 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.

Innehållsförteckning

Kärnvapen – en kort historik 5
Kärnvapens funktion 11
Material till kärnvapen 21
Kärnvapenutveckling 33
Kärnvapenstrategier 41
Kärnvapenstater 49
Kärnvapenverkan 63
Upptäckt av kärnvapenexplosioner 95
Åtgärder för att bemöta kärnvapenhotet 103
Bilaga: Tabeller med verkansavstånd 111

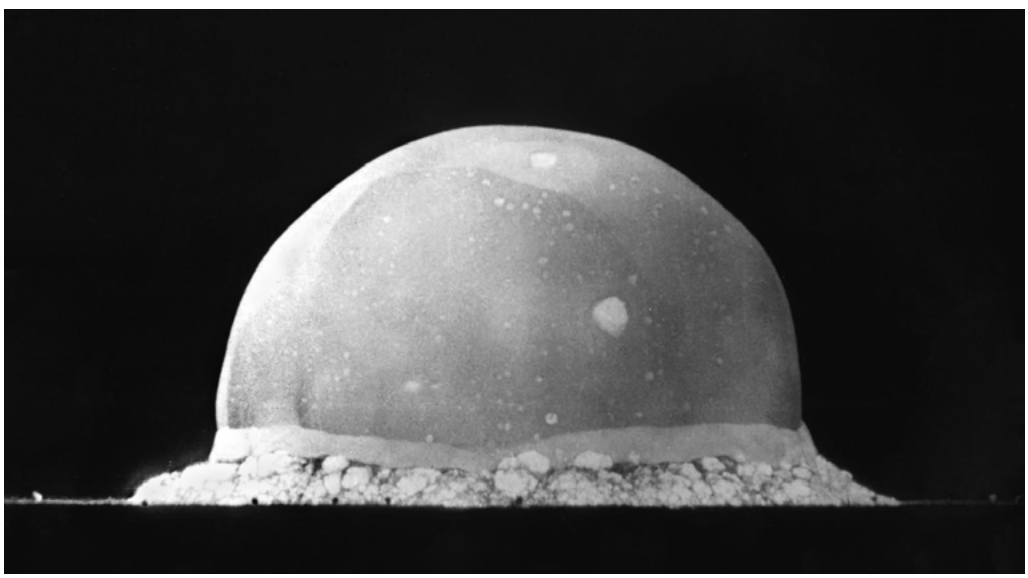
Kärnvapen – en kort historik

Redan under 1930-talet när möjligheten att klyva atomkärnor just upptäckts, kom insikten att sådana processer skulle kunna användas till att frigöra stora mängder energi. Man såg framför sig energikällor för elproduktion och framdrivning med närmast obegränsad livslängd och utan behov av stora mängder fossilt bränsle. Man eftersträvade också att kunna utnyttja kärnenergi för att åstadkomma stora explosioner för militära ändamål.

Under andra världskriget accelererade teknikutvecklingen i samhället till följd av den militära kapplöpningen att frambringa bättre vapen. Det gällde även olika tillämpningar av kärnteknik. Runt 1942 började på allvar den amerikanska insatsen att utveckla ett vapen baserat på kärnklyvning, med stöd av forskare från bland annat Storbritannien. Detta kom senare att kallas Manhattanprojektet. En viktig del var att finna en metod att starta kärnklyvningen (se kapitlet *Kärnvapens funktion*). Stora resurser lades också på att ta fram de klyvbara material, uran och plutonium, som behövdes (se kapitlet *Material till kärnvapen*). Bland drivkrafterna för Manhattanprojektet fanns en oro att Tyskland skulle lyckas tillverka kärnvapen. Det har i efterhand visat sig att den tyska forskningen kring kärnenergi främst inriktades på framdrivning av fartyg.

Den tyska kapitulationen i maj 1945 skedde innan Manhattanprojektet fullbordats. Därmed var kärnvapenanvändning i Europa inte längre på dagordningen under andra världskriget. Kriget mot Japan pågick dock fortfarande. Striderna i Stilla havet hade visat på obruten japansk försvarsvilja, trots de omfattande flygbombningarna mot Japan. Detta medförde successivt större amerikanska förluster. Efter att det första kärnvapenprovet genomförts den 16 juli 1945 blev kärnvapen ett alternativ för att försöka avsluta kriget mot Japan, utan att behöva genomföra en kostsam invasion.

Den 6 augusti angreps Hiroshima med ett kärnvapen i form av en bomb som fälldes från ett flygplan. Tre dagar senare bombades Nagasaki på samma sätt. Dessa två bombningar är de enda tillfällen hittills då kärnvapen använts i krig. Konsekvenserna av bombningarna var förödande, med raserade byggnader mer än en kilometer från explosionen och bränder inom ett lika stort område. Antalet dödade i direkt anslutning till angreppen uppskattas till uppemot 120 000 i Hiroshima och 70 000 i Nagasaki. Dödsorsakerna var främst stötvågsskador, brännskador och strålning direkt från kärnreaktionerna (se kapitlet *Kärnvapenverkan*). Eftersom explosionerna skedde på cirka 600 meters höjd över marken var kvarvarande strålning från nedfall



Den första kärnvapenexplosionen ägde rum den 16 juli 1945 i Alamogordo, New Mexico, USA. Foto: Berlyn Brixner, Los Alamos National Laboratory. United States Federal Government (public domain).

Hiroshima efter kärnvapenangreppet den 6 augusti 1945. Byggnaden med kupolen befann sig rakt under explosionen. Foto: United States Federal Government (public domain).

Första provet av ett fusionsvapen den 1 november 1952. Foto: United States Federal Government (public domain).

Sovjetiska installationer på Kuba avsedda för ballistiska robotar med räckvidd att nå USA. Detta var orsaken till den så kallade Kubakrisen 1962. Foto: United States Federal Government (public domain).

en försumbar skadeorsak. Inom en vecka kapitulerade Japan och andra världskriget var slut.

Det oerhörda med kärnvapnen var kanske inte effekterna i sig. Som jämförelse resulterade brandbombningarna av Tokyo samma år i cirka 100 000 dödade i ett enda angrepp. Snarare var det faktumet att ett enda flygplan med en enda bomb kunde orsaka förödelse i samma omfattning som hundratals bombplan vid flygangreppet mot Tokyo, som gjorde kärnvapen så speciella.

Att kärnvapen hade strategisk betydelse var uppenbart och redan under andra världskriget planerade USA hur andra länders kärnvapenutveckling, i form av provsprängningar, skulle kunna övervakas med hjälp av olika detektionstekniker (se kapitlet *Upptäckt av kärnvapenexplosioner*). Efter kriget åtnjöt USA en kort tid av kärnvapenmonopol, men redan 1949 skedde den första sovjetiska provsprängningen, mycket tack vare framgångsrikt spionage under Manhattanprojektet.

Antalet kärnvapen var till en början begränsat av tillgången till klyvbart material. I takt med att produktionskapaciteten byggdes ut kunde USA och så småningom även Sovjetunionen, utveckla och placera ut fler kärnvapen på olika bärare som robotar, flygplan och ubåtar. Samtidigt skedde också omfattande utveckling mot både mindre och mer diversifierade typer av kärnvapen, samt integrering med många olika system för vapenleverans (se kapitlet *Kärnvapenutveckling*).

En viktig teknisk utveckling var användandet av fusion i kärnvapen (se kapitlet *Kärnvapens funktion*). Det gjorde vapen med avsevärt större sprängstyrka möjliga, tusentals gånger kraftigare än Hiroshimabomben. Den första prov-

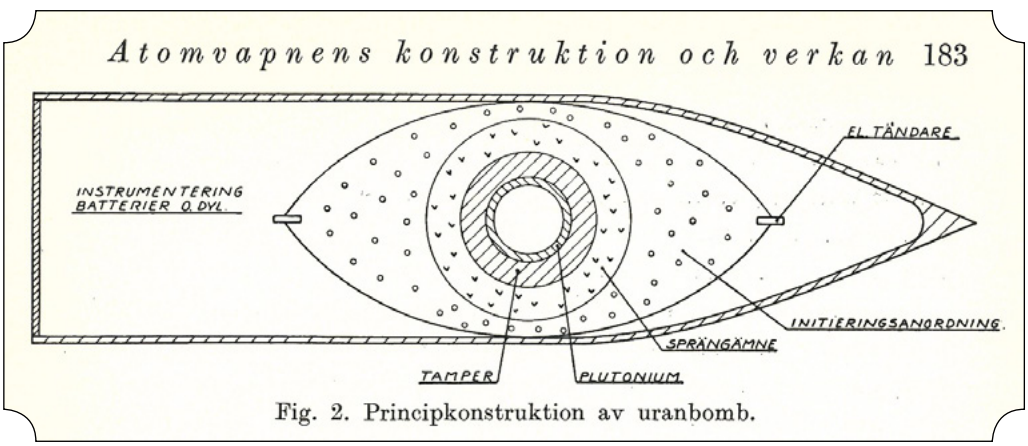
sprängningen av ett kärnvapen där huvuddelen av energin kom från fusion gjordes av USA den 1 november 1952 på Eniwetok-atollen i Stilla havet. Sovjetunionen följde efter några år senare.

Under kalla kriget, som präglade relationerna mellan stormakterna USA och Sovjetunionen under flera decennier, spelade kärnvapen en avgörande roll. Det uppstod en *terrorbalans*, eller ömsesidig avskräckning, eftersom båda parter var i besittning av diversifierade och robusta arsenaler med kärnvapen som inte kunde angripas utan att angriparen riskerade att utsättas för ett förödande motangrepp (se kapitlet *Kärnvapenstrategier*). I efterdyningarna av Kubakrisen, då en direkt militär konfrontation mellan USA och Sovjetunionen var nära, utökades dialogerna mellan stormakterna vilket ledde till avtal för rustningskontroll.

Även multilaterala avtal förhandlades, varav det främsta var Icke-spridningsavtalet kring kärnvapen (NPT) 1968, där de stater som då hade kärnvapen (USA, Sovjetunionen, Storbritannien, Kina och Frankrike) fick status som kärnvapenstater och ålades att rusta ner. Övriga avtalsparter betraktas sedan dess som icke-kärnvapenstater med åtagande att inte skaffa kärnvapen (se kapitlet *Kärnvapenstater*).

En händelse som var viktig för allmänhetens syn på kärnvapen var *Lucky Dragon*-incidenten 1954, då ett japanskt fiskefartyg råkade hamna i nedfallet efter ett amerikanskt kärnvapenprov i Stilla havet. Det ledde till att det första i raden av olika avtal för att begränsa kärnvapenprov förhandlades samt att övervakningssystem för detta utvecklades.

Efter Sovjetunionens kollaps i början av 1990-talet rådde en utbredd föreställning (åtminstone i de västerländska demokratierna) om att konflikternas tid var förbi. I samma anda betraktades kärnvapen som något som hörde till det förflutna. Samtidigt vidmakthöll och utvecklade de etablerade kärnvapenstaterna sin kärnvapenförmåga och det fanns också en farhåga att kärnvapen skulle spridas till andra stater. Indien genomförde en provsprängning redan 1974 och Pakistan provsprängde kärnvapen 1998, vilket följdes av ytterligare indiska prov. Senast i raden genomförde Nordkorea sin första provsprängning 2006 med flera efterföljande prov. Det allt tydligare försämrade omvärldsläget under 2000-talet understryker att kärnvapen aldrig varit uträknade, utan alltjämt är något vi måste förhålla oss till. ■



Fram till slutet av 1960-talet hade även Sverige ett forskningsprogram för att undersöka möjligheterna att framställa kärnvapen. Figuren visar en principskiss från 1955 på en flygfälld bomb. Den "svenska bomben" förblev dock en skrivbordsprodukt. Illustration: ur Magnusson, Atomvapnens konstruktion och verkan, Kosmos - Svenska Fysikersamfundets årsbok, 1956.

Kärnvapens funktion

Kärnvapen bygger på frigörandet av kärnenergi. Det kan ske enligt två huvudprinciper: kärnklyvning (fission) och sammanslagning av atomkärnor (fusion). Med en kärnladdning avses en sprängladdning vars huvudsakliga energifrigörelse kommer från kärnenergi baserat på dessa principer. Ett kärnvapen är en kärnladdning som iordningställts så att den kan användas som ett vapen.

Kärnvapen baserade på fusion kallas ibland för *termonukleära vapen* och en ålderdomlig benämning är ”vätebomb”. Kärnvapen baserade helt på fission kallades förr ofta för ”atombomber”. Vi kommer främst att använda oss av begreppet kärnvapen, utom i de fall där det uppenbart är fråga om en laddning och inte ett komplett vapen. Till exempel används genomgående kärnvapenprov, inte kärnladdningsprov. Där det är nödvändigt att särskilja på kärnvapen som i huvudsak baseras på fission och sådana som genererar en stor del av sin energi från fusion används begreppen fissionsvapen, respektive fusionsvapen.

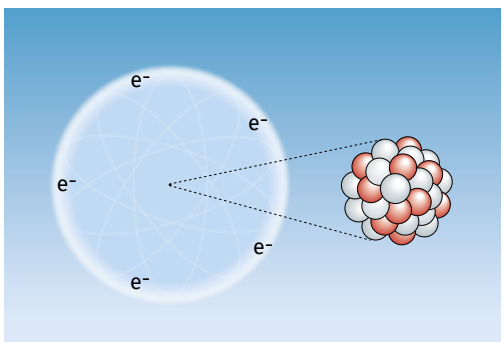
Innan vi går in på kärnvapens funktion tar vi upp en del nödvändiga begrepp om atomers uppbyggnad.

Atomers uppbyggnad

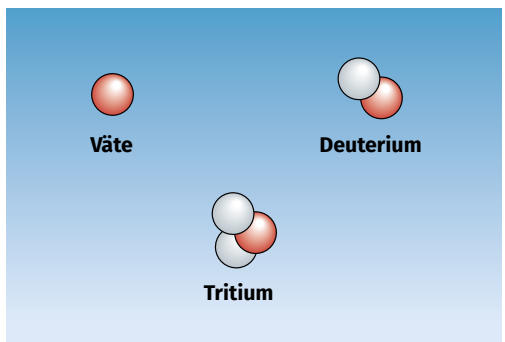
Alla ämnen är uppbyggda av atomer i olika kombinationer. Atomer i sin tur består av en atomkärna som är positivt elektriskt laddad, omgiven av elektroner vilka har negativ laddning. Ämnen som bara består av ett slags atomer kallas för grundämnen, och det som skiljer dessa åt är atomkärnans laddning. Sålunda består grundämnet väte av atomer vars atomkärnor alla har laddning +1 (uttryckt i elementarladdningar, det vill säga den minsta positiva laddning som finns i naturen). Heliums atomkärnor har laddning +2 och så vidare. Några andra grundämnen av intresse för kärnvapen är bland annat litium (+3), uran (+92) och plutonium (+94).

Atomkärnor har alltid en laddning som är ett helt antal elementarladdningar, vilket beror på deras inre struktur. Där finns nämligen ett bestämt antal protoner, vilka alla har laddning +1. Väte består alltså av atomer vars atomkärnor alltid innehåller exakt en proton, medan en heliumkärna alltid innehåller två protoner och så vidare.

Utöver protoner innehåller atomkärnor även ett antal neutroner. Atomer med ett specifikt antal protoner och neutroner i kärnan kallas en *nuklid*. Eftersom neutroner är elektriskt neutrala ändrar de inte vilket grundämne en given atom utgör. Ett grundämne kan alltså förekomma i flera olika varianter, där atomkärnorna alltid innehåller samma antal protoner, men kan ha olika antal neutroner. Sådana varianter av ett grundämne kallas *isotoper*. Dessa skiljs åt genom



En atom består av en positivt laddad atomkärna omgiven av negativt laddade elektroner. Atomkärnan består av positivt laddade protoner (röda i figuren) och elektriskt neutrala neutroner (grå).



Atomkärnor för några olika isotoper av väte. I vanligt väte består atomkärnan av en ensam proton. Kärnan i deuterium är en proton i sällskap av en neutron, och i tritium tillkommer ytterligare en neutron. I samtliga fall är den elektriska laddningen +1, vilket gäller alla isotoper av väte.

att ange summan av antalet protoner och neutroner i atomkärnan.

Det är bara ett fåtal nuklider som är stabila. En instabil nuklid är *radioaktiv* och kommer förr eller senare att sönderfalla. En given radioaktiv nuklid har en bestämd halveringstid som anger tiden inom vilken hälften av en mängd atomkärnor kommer att sönderfalla. En kort halveringstid innebär en hög radioaktivitet medan en lång halveringstid innebär att ämnet är svagt radioaktivt.

Egenskaper hos ett antal relevanta nuklider.

Nuklid	Protoner	Neutroner	Halveringstid
Väte-1	en	ingen	stabil
Väte-2 (deuterium)	en	en	stabil
Väte-3 (tritium)	en	två	12,3 år
Helium-4	två	två	stabil
Litium-6	tre	tre	stabil
Uran-235	92	143	700 miljoner år
Uran-238	92	146	4,4 miljarder år
Plutonium-239	94	145	24 000 år

Fission

Vid kärnklyvning, *fission*, klyvs atomkärnor och bildar lättare kärnor, fissionsfragment, medan energi frigörs. I ett kärnvapen är man ute efter en kedjereaktion av kärnklyvningar, som när de startas kan frigöra stora mängder energi på kort tid. Därför är atomkärnor som kan klyvas under inverkan av neutroner intressanta, särskilt eftersom en sådan klyvning frigör två eller flera nya neutroner som kan bidra till en kedjereaktion.

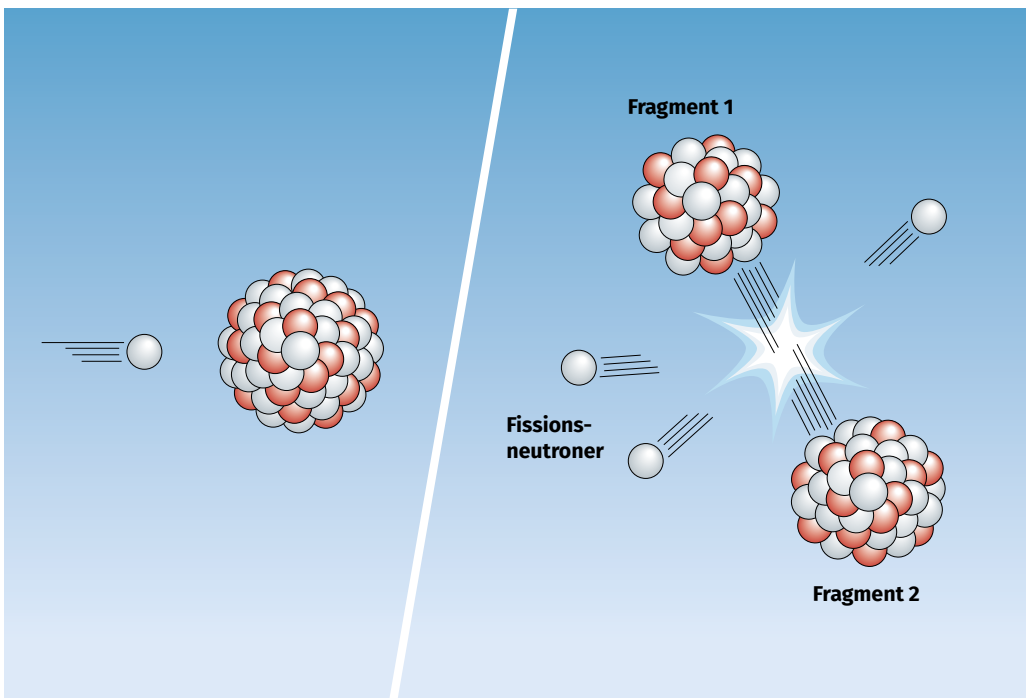
Även i kärnreaktorer vill man att kedjereaktionen sätts igång av neutroner, men där styr man mängden neutroner så att reaktionen fortgår kontrollerat och under lång tid. För att uppnå en så effektiv kärnklyvning som möjligt vill man använda nuklider som har egenskapen att de kan klyvas av alla neutroner, oberoende av deras energi. Sådana klyvbara material, till exempel uran-235 och plutonium-239, kallas *fissila*. Ett exempel på ett klyvbart material som inte är fissilt är uran-238. Det är endast uran-235 och plutonium-239 som är fissila och dessutom framställs i praktiken. Uran-233 är också fissilt, men produceras inte i några större mängder idag.

För att en kedjereaktion ska komma igång krävs ett tillräckligt stort överskott av neutroner så att varje klyvning i medeltal ger upphov till minst en ny klyvning. Det är med andra ord en fråga om neutronbudget. En kedjereaktion kan fortleva om antalet neutroner är tillräckligt stort för att kompensera för de förluster som uppstår. Förluster av neutroner sker genom att neutroner lämnar det fissila materialet eller försvinner genom att de orsakar andra reaktioner än fission. När mängden neutroner är precis så stor att en kedjereaktion kan bibehållas kallas det för *kriticitet*. Om mängden fissilt material är för liten kommer förlusterna av neutroner att vara för stora och materialet är då *underkritiskt*. Det här innebär att det krävs en minsta kritisk massa av fissilt material i en fissionsladdning. Den kritiska massan är olika för olika fissila material och beror även på geometri. Ett klot ger

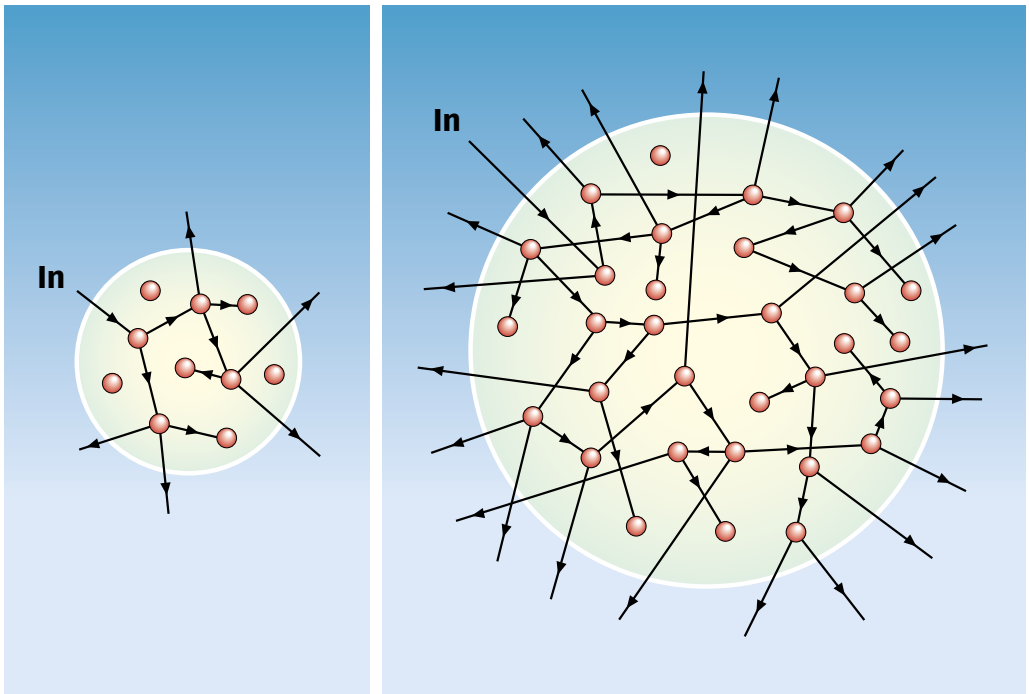
en lägre kritisk massa än ett tunt skal av samma material. Andra faktorer som ger en lägre kritisk massa är om det fissila materialet omges av annat material som kan reflektera tillbaka neutroner som lämnar materialet, samt om det fissila materialet komprimeras till en högre täthet. För ett klot av uran-235, utan omgivande material, är den kritiska massan ungefär 50 kilogram. För plutonium-239 är den betydligt mindre. Omger man det fissila ämnet med annat material minskar kritiska massan. Man brukar därför tala om den *signifikanta mängden* material som behövs för ett fissionsvapen. Den signifikanta mängden anges till 25 kilogram för uran-235, och åtta kilogram för plutonium-239.

Eftersom det finns en naturlig bakgrund av neutroner behöver en fissionsladdning utformas så att den är underkritisk i utgångsläget. Annars skulle den explodera så fort en neutron orsakar en kärnklyvning. När laddningen sedan ska explodera vill man däremot uppnå ett så *överkritiskt* system som möjligt. Behovet av ett underkritiskt utgångsläge innebär att det finns en övre gräns för hur mycket fissilt material en fissionsladdning kan innehålla, och därmed hur stor sprängstyrka ett fissionsvapen kan ha.

Övergången från under- till överkriticitet behöver ske mycket fort för att undvika för tidig tändning och därmed sämre energiutbyte. Hur fort beror på det fissila materialet. För uran-235 är det tillräckligt att dela upp det fissila materialet i två eller flera delar som var för sig är underkritiska och sedan snabbt skjuta ihop dem (kanonprincipen). Vapenmaterial av plutonium-239 innehåller däremot orenheter som är radioaktiva och avger neutroner, vilket innebär en förhöjd neutronbakgrund. Kanonprincipen är därför inte tillräckligt snabb, utan materialet måste komprimeras



Fissionsreaktion orsakad av en neutron. När en klyvbar kärna absorberar en neutron kan kärnan klyvas i två (eller flera) fragment. Dessa fissionsfragment är ofta instabila, vilket gör att de kommer att sönderfalla. Klyvningen kan också frigöra neutroner, vilket möjliggör en kedjereaktion.

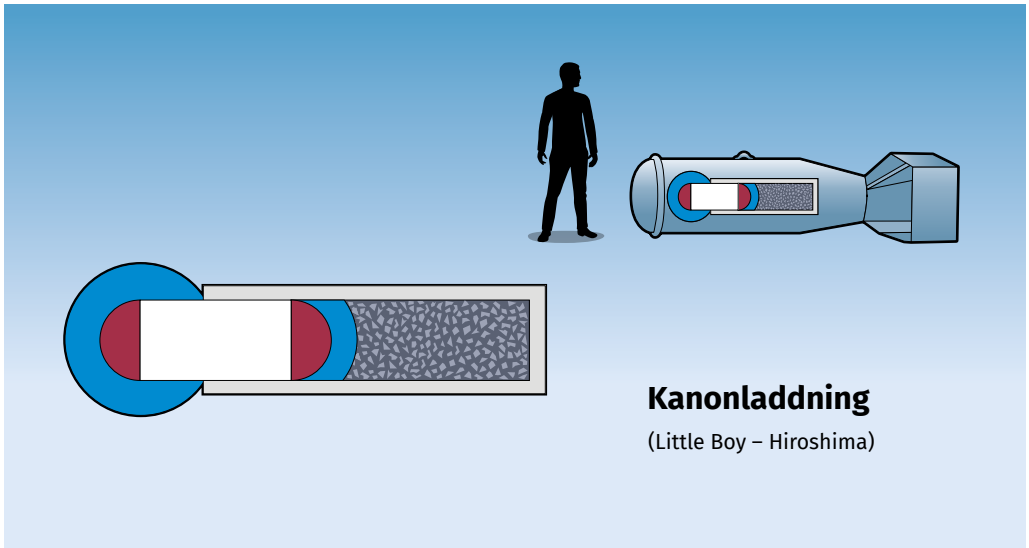


Under- och överkritisk kedjereaktion. När mängden klyvbart material är liten är sannolikheten stor att frigjorda neutroner hinner lämna materialet utan att kollidera med någon klyvbar kärna. Kedjereaktionen dör då ut. I en tillräckligt stor mängd material kommer kedjereaktionen däremot att öka lavinartat.

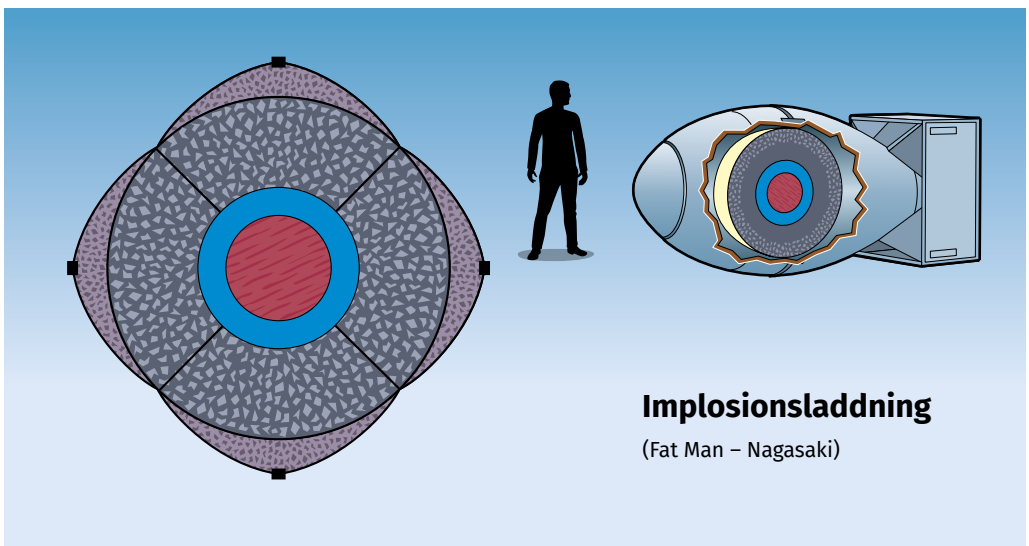
betydligt snabbare från under- till överkriticitet. Kompression som är effektiv nog även för plutonium uppnås genom att med hjälp av *implosion* komprimera ett klot eller skal av fissilt material.

Samtliga metoder behöver ett explosivämne med hög energifrigörelse, samt också någon form av neutronkälla för att försäkra sig om att det finns neutroner när maximal överkriticitet uppnåtts. Dessutom är det fördelaktigt att omge det fissila materialet med ett hölje som motverkar att det sprängs isär och även kan reflektera neutroner. Som redan nämnts ovan, minskar därmed också den mängd fissilt material som behövs. Ett exempel på material som kan fylla denna funktion är uran-238, som dessutom kan klyvas av energirika neutroner och därmed bidrar till att frigöra energi. Ett annat material är beryllium, som inte reflekterar neutroner lika bra som uran, men som är mycket lättare och dessutom frigör extra neutroner när det bestrålas med neutroner.

När en atomkärna klyvs frigörs energi, först som strålning direkt från kärnreaktionerna och rörelseenergi från fissionsfragmenten. Fissionsfragmenten bromsas emellertid snabbt upp och energin omvandlas till värme hos vapenresterna. Det leder till att vapenresterna hettas upp till tiotals miljoner grader, som i sin tur ger stötvågor och värmestrålning. En annan aspekt av fission är att fragmenten är instabila och sönderfaller, vilket ger upphov till radioaktivitet över tid. I kapitlet *Kärnvapenverkan* diskuteras detta närmare.



I kanonladdningen består det klyvbara materialet (rött) av två delar som var för sig är underkritiska, men som tillsammans blir en överkritisk mängd när de skjuts ihop genom att ett explosivämne (grått) antänds. Ett omgivande hölje (blått) bidrar till en effektivare explosion.



I implosionsladdningen utgår man från en underkritisk mängd klyvbart material (rött), som bringas till överkriticitet genom att sprängkraften riktas inåt. För att den inåtriktade explosionen ska bli så symmetrisk som möjligt, antänds explosivämnet (grått) med spränglinser (lila) som formar en sfärisk detonation. När det klyvbara materialet kläms ihop kommer atomkärnorna närmare varandra och neutronerna får därmed svårare att undgå kollision, varvid materialet blir överkritiskt.

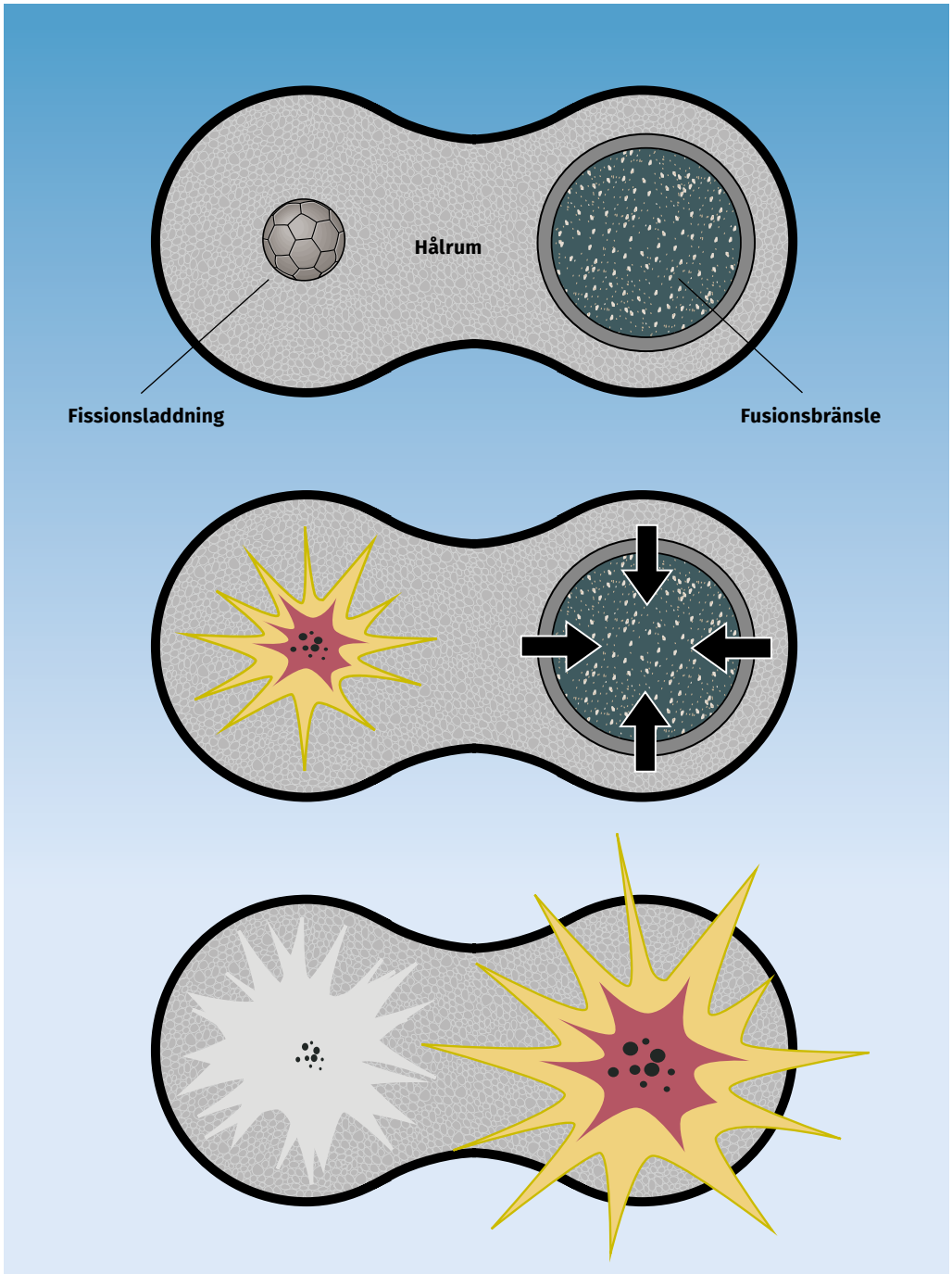
Fusion

Fusion innebär att lätta atomkärnor slås samman, varvid energi frigörs. Det är denna process som sker i solen och andra stjärnor. De ämnen som är intressanta för kärnvapen är främst de tunga väteisotoperna deuterium och tritium. Om dessa slås samman bildas en heliumkärna och en neutron. Precis som vid fission frigörs energin initialt som rörelse hos dessa reaktionsprodukter.

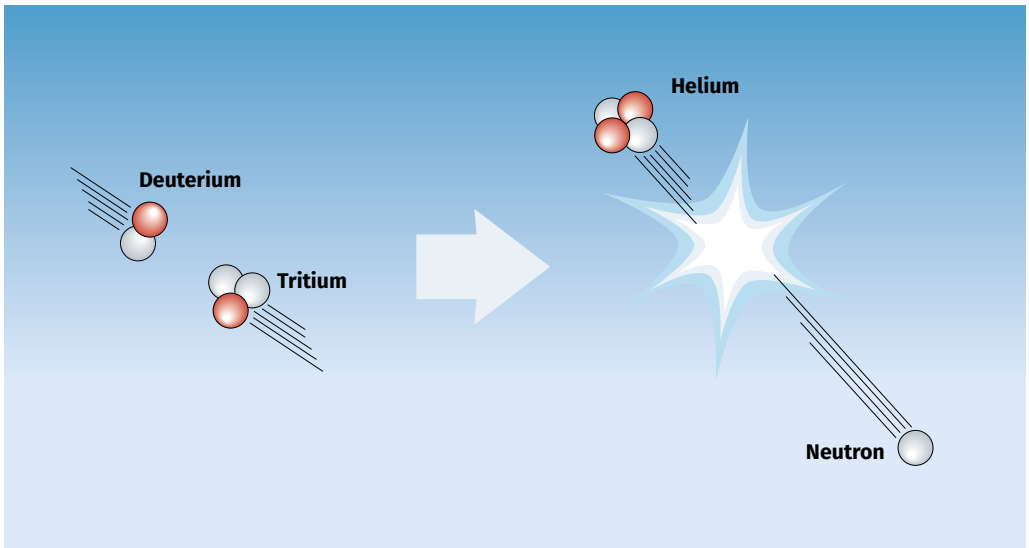
Ett praktiskt problem för fusion är att det krävs en stor mängd energi för att atomkärnor ska slås samman med varandra. Det enda kända sättet för att få tillräckligt med energi för ett fusionsvapen är att använda en fissionsladdning som ett första steg för att starta en fusion i ett andra steg som innehåller fusionsmaterial. Detta sker genom att värmestrålningen från det första steget hettar upp hålrummet mellan vapnets ytterhölje och det andra steget. Det andra steget har en mantel av något tungt material som kraftigt komprimeras av den höga värmen i hålrummet. Det åstadkommer slutligen de höga tryck och temperaturer som krävs för att sätta igång kärnreaktionerna i fusionsmaterialet som finns innanför manteln. En del av energin i en fusionsladdning kommer alltid från fission, eftersom fusionen måste startas med ett första steg. I princip kan det vara en försumbar andel, men genom att omge fusionsmaterialet med klyvbart material kan fusionsneutroner användas för att ytterligare frigöra energi genom fission. En uppskattning för ett typiskt fusionsvapen är att energin till ungefär hälften vardera kommer från fission och fusion.

Ett annat problem med fusionsladdningar är att väte, och alltså även deuterium och tritium, är gaser i rumstemperatur och därför är opraktiskt som konstruktionsmaterial. Däremot bildar väte i förening med litium ett fast ämne. Dessutom ger litium som bestrålas med neutroner upphov till tritium. Det gör litiumdeuterid till ett mer fördelaktigt fusionsmaterial än en gasblandning av deuterium och tritium (DT-gas). Eftersom det inte finns någon kritisk massa för fusion, finns det heller ingen övre gräns för hur stor sprängstyrka ett kärnvapen baserat på fusion kan ha, annat än rent praktiska begränsningar som laddningsvikt.

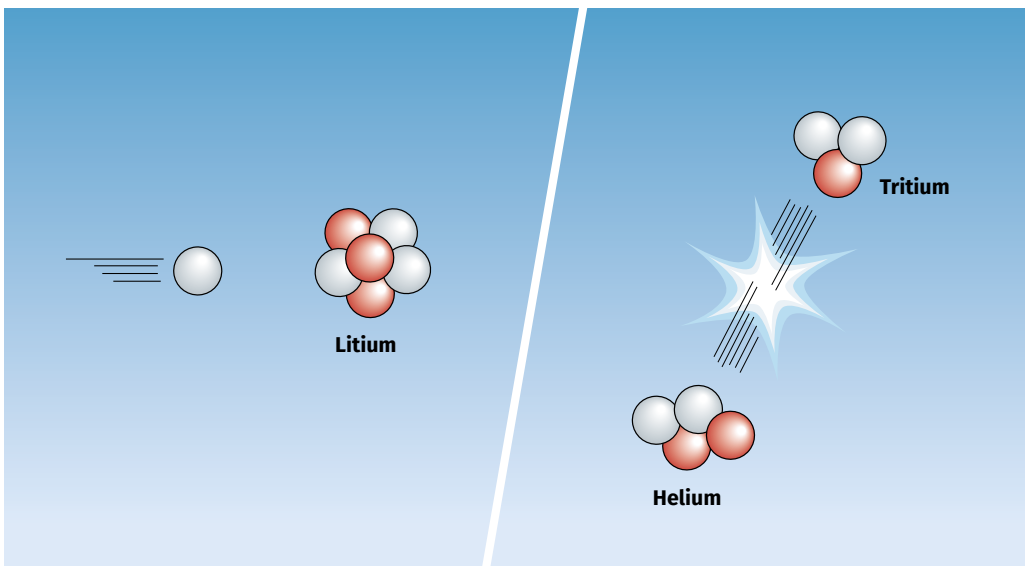
Slutligen kommer en kort beskrivning av principen för så kallad *boostring*. Detta innebär att man fyller ett hålrum i centrum av en fissionsladdning med en liten mängd DT-gas. När fissionsladdningen exploderar kommer DT-gasen att fusionera. De frigjorda fusionsneutronerna kommer att förstärka, *boosta*, fissionen så att det fissila materialet förbränns mycket effektivare. Energimässigt är fusionen försumbar i förhållande till den frigjorda fissionsenergin. Därför är en boostrad laddning fortfarande att betrakta som en fissionsladdning. Första stegen i moderna fusionsvapen är förmodligen boostrade. ■



Explosionsförloppet hos en fusionsladdning. Laddningens första steg består av en fissionsladdning (till vänster). När fissionsladdningen exploderar, hettas hålrummet innanför ytterhöljet upp, vilket komprimerar det andra steget (till höger). Fusionsmaterialet i det andra steget når då så höga tryck och temperaturer att fusion blir möjlig.



Ett exempel på fusionsreaktion är när deuterium och tritium kolliderar, och bildar helium-4 samt en neutron.



Litium-6 som neutronbestrålas kan omvandlas till tritium och helium-4.

Material till kärnvapen

För att kunna tillverka kärnvapen krävs en rad speciella material och bearbetningstekniker. Som berörts i föregående kapitel är fissilt material en vital komponent. En central del i ett kärnvapenprogram är därför anskaffning av sådant fissilt material av vapenkvalitet. I detta kapitel beskrivs olika processer för att ta fram material av betydelse för kärnvapen.

Material som används i kärnvapen

Som nämnts tidigare kommer energin som frigörs då ett kärnvapen exploderar från samma sorts kärnklyvningar som i en kärnreaktor. Kärnvapen och kärnreaktorer skiljer sig emellertid på avgörande sätt från varandra. I en kärnreaktor behövs det en stabil kedjereaktion som kan regleras så att effekten i reaktorn varken ökar eller minskar av sig själv. I en typisk reaktor kan driften pågå i ett år innan man behöver byta bränsle. I ett kärnvapen sker däremot en mycket snabb och kraftig kedjereaktion där fler och fler kärnor klyvs i ett explosivt förlopp. Därför behöver kärnreaktorer och kärnvapen olika material och det är stora skillnader i deras uppbyggnad.

Alla kärnvapen behöver fissilt material. De två mest praktiskt användbara materialen är uran och plutonium. För båda dessa gäller att det enbart är vissa isotoper som är fissila, och de som är aktuella i kärnvapen är de tidigare nämnda uran-235 och plutonium-239, även om uran-233 i princip också kan användas. Endast en liten del av naturligt förekommande uran utgörs av fissila isotoper. Plutonium förekommer naturligt endast i mycket små mängder och behöver därför tillverkas genom bestrålning av uran i en kärnreaktor. För boostring och fusionsvapen används olika fusionsmaterial, till exempel DT-gas (för boostring) och litiumdeuterid (för fusionsvapen).

Vapenuran och vapenplutonium

Naturligt uran innehåller bara 0,72 procent av den fissila isotopen uran-235. Uranet behöver därför anrikas för att öka andelen fissilt innehåll om det ska kunna användas för kärnvapen och i de flesta kärnreaktorer. Uran med en andel uran-235 på ungefär 90 procent eller högre kallas *vapenuran*. Uran med lägre (men inte alltför låg) halt uran-235 är inte oanvändbart, men är inte lika effektivt i kärnvapen.

Till skillnad från uran förekommer plutonium inte naturligt i tillräckligt stora mängder för att kunna utvinnas för tillverkning av kärnvapen. Plutonium behöver därför framställas i kärnreaktorer.

I likhet med uran är sammansättningen av isotoper avgörande för om plutonium kan användas till kärnvapen. Till exempel bör inte halten plutonium-240 (som spontant avger neutroner) vara för hög, annars blir vapnets styrka inte lika förutsägbar. Plutonium med en andel plutonium-240 under 7 procent brukar benämnas *vapenplutonium*.

Produktion av fusionsmaterial

Fusion kräver helt andra material än fission, men i likhet med fissionsmaterialen förekommer fusionsmaterialen inte naturligt i någon användbar form. Litium är ett ämne som gör det praktiskt möjligt att skapa fusionsvapen. Naturligt litium innehåller endast en liten del av den isotop som främst används för fusionsvapen, litium-6. Huvuddelen utgörs av den tyngre isotopen litium-7 som också kan användas i fusionsvapen, men med en något lägre effektivitet.

Historiskt sett har kemiska processer baserade på kvicksilver använts för att separera litiumisotoperna. Dessa processer är dock potentiellt mycket skadliga för miljön, och har därför numera ersatts av elektrokemiska processer. Litium-6 har även civila användningsområden. Därför sker omfattande kommersiellt utvecklingsarbete av separationsmetoder. Litium-6 är ett stabilt ämne och lagringstiden begränsas inte av radioaktivt sönderfall.

För att öka förbränningen i fissionsvapen används så kallad *boostergas*, som utgörs av tritium och deuterium. Deuterium förekommer naturligt, och i så kallat *tungt vatten* har deuterium ersatt vanligt väte i vattenmolekylen. Deuterium kan därför utvinnas i låga koncentrationer ur vatten. Tritium förekommer inte naturligt, utan behöver tillverkas. Detta sker typiskt genom att ett *strålmål* (ett ämne som bombarderas med partiklar) innehållande litium-6 förs in i en kärnreaktor. Neutronerna från kärnreaktionerna i reaktorn reagerar med litium-6 och ger upphov till tritium. En kärnreaktor kan användas för andra ändamål samtidigt som tritiumproduktion pågår, till skillnad från vid produktion av fissilt material i en kärnreaktor. Medan deuterium är stabilt har tritium en halveringstid på tolv år. Den korta livslängden gör att det behövs en infrastruktur för tritiumproduktion, lagerhållning och underhåll av förbandssatta kärnvapen.

Kärnbränslecykeln

Kärnbränslecykeln är de processer som det fissila materialet genomgår före, under och efter det används i en kärnreaktor eller bearbetas för att kunna användas i ett kärnvapen. Cykeln inleds med brytning av uranråvara och avslutas med deponering eller återanvändning av det använda kärnbränslet. De ingående processerna i ett militärt kärnteknikprogram är mycket lika de i ett civilt program där elproduktion är syftet, men det finns olikheter.

Skillnader mellan ett civilt och ett militärt kärnteknikprogram:

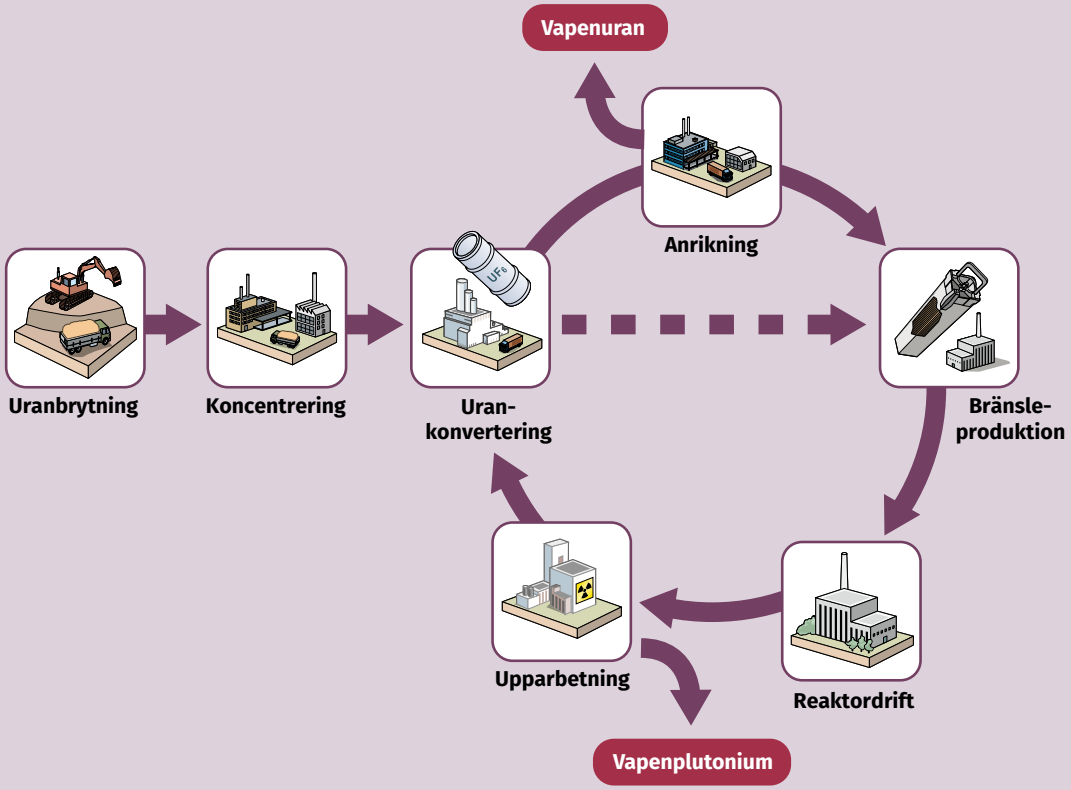
- Vissa av processerna drivs något annorlunda.
- Produktion av vapenuran kräver inte en fullständig cykel. Det räcker att man har all förmåga som krävs för att kunna anrika uran.
- Volymerna av fissilt material som krävs är betydligt mindre för produktion av vapenmaterial.
- Vid elproduktion är lönsamhet vanligtvis ett krav. Vid framställning av vapenmaterial finns inga krav på ekonomisk lönsamhet.

Uranbrytning

Råvaran uran är mycket ojämnt fördelad över jorden. Australien, Kazakstan, Kanada och Ryssland har tillsammans över hälften av världens urantillgångar. Faktorer som påverkar var det är lönsamt att bryta uran är urankoncentrationen, mängden föroreningar och tillgängligheten. Malm med hög urankoncentration som ligger nära ytan är mer lönsam att utvinna. Vissa länder har potentiell tillgång till uran, men de är inte värda att bryta med tanke på världsmarknadspriset. Som tidigare nämnts behöver emellertid inte brytningen vara ekonomiskt lönsam vid framställning av vapenmaterial. Uranbrytning skiljer sig inte nämnvärt från annan gruvdrift och uran utvinns även som biprodukt vid brytning av andra mineraler.

I Sverige finns ett antal uranfyndigheter, men hur lönsamma dessa är beror på en mängd olika faktorer och går inte att avgöra på förhand. Sedan 1 januari 2026 är det möjligt att söka tillstånd för prospektering och bearbetning av uran men det fortsätter vara till stor del en politisk fråga.

Kärnbränslecykeln är de processer som krävs för att tillverka och omhänderta bränsle till kärnreaktorer. För tillverkning av uranbaserade kärnvapen krävs alla steg fram till och med uran-anrikning. För plutoniumbaserade kärnvapen behövs alla steg fram till och med upparbetning. Vissa kärnreaktorer använder naturligt uranbränsle. Det gör att anrikningssteget kan undvikas för plutoniumbaserade kärnvapen, vilket i figuren indikeras av den streckade linjen.



Koncentrering

För att minimera transporter koncentreras uranet vanligtvis i anslutning till brytningen. Malmen krossas och mals för att underlätta efterföljande processer. Vid behov används fysikaliska metoder för separation innan de kemiska, som filtrering, siktning, flockning och magnetisk separation. Den finfördelade malmen separeras från gråberget med lakning, vanligtvis med svavelsyra. Uranet utvinns sedan genom *vätske-vätske-extraktion*, vilket bygger på att uranet löser sig i den ena av två blandade vätskor, medan de oönskade föroreningarna stannar kvar i den andra vätskan. Vid kommersiell uranutvinning görs detta även för att utvinna andra mineraler. Slutprodukten är en blandning av uranföreningar som kallas *yellowcake*. Uraninnehållet i yellowcake är 65–70 procent och det förädlas ytterligare till högrent triuranoktoxid (U_3O_8).

Yellowcake är ett urankoncentrat som fått sitt namn från den skarpa gula färgen. Färgen ges av de olika kemiska föreningar som finns i koncentratet och kan variera beroende på vilka lakningsmedel som används i reningsprocessen. Foto: United States Federal Government (public domain).

Konvertering

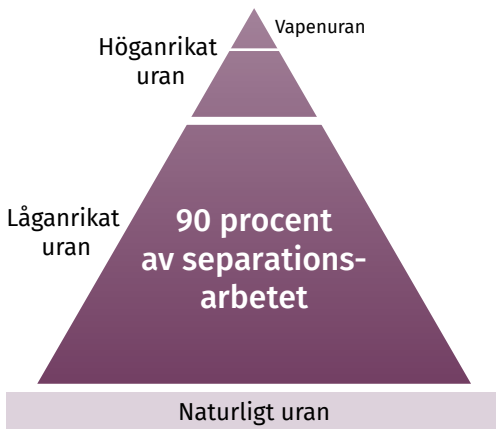
Efter att uranet har koncentrerats behöver det konverteras till en form som är användbar i de efterföljande processerna. I princip alla former av anrikning kräver att uranet är i gasform. Uranhexafluorid (UF_6) är en gas vid rumstemperatur och låga tryck, vilket gör den relativt lätt att arbeta med. Dessutom finns det bara en stabil isotop av fluor, vilket gör att alla atomer i fluorgas väger lika mycket. Den enda skillnaden i massa hos molekylen beror alltså på vilken uranisotop som ingår. Uranhexafluorid tillverkas genom att uranoxiden från koncentreringen hettas upp och sedan reagerar med fluorgas i flera steg.

Anrikning

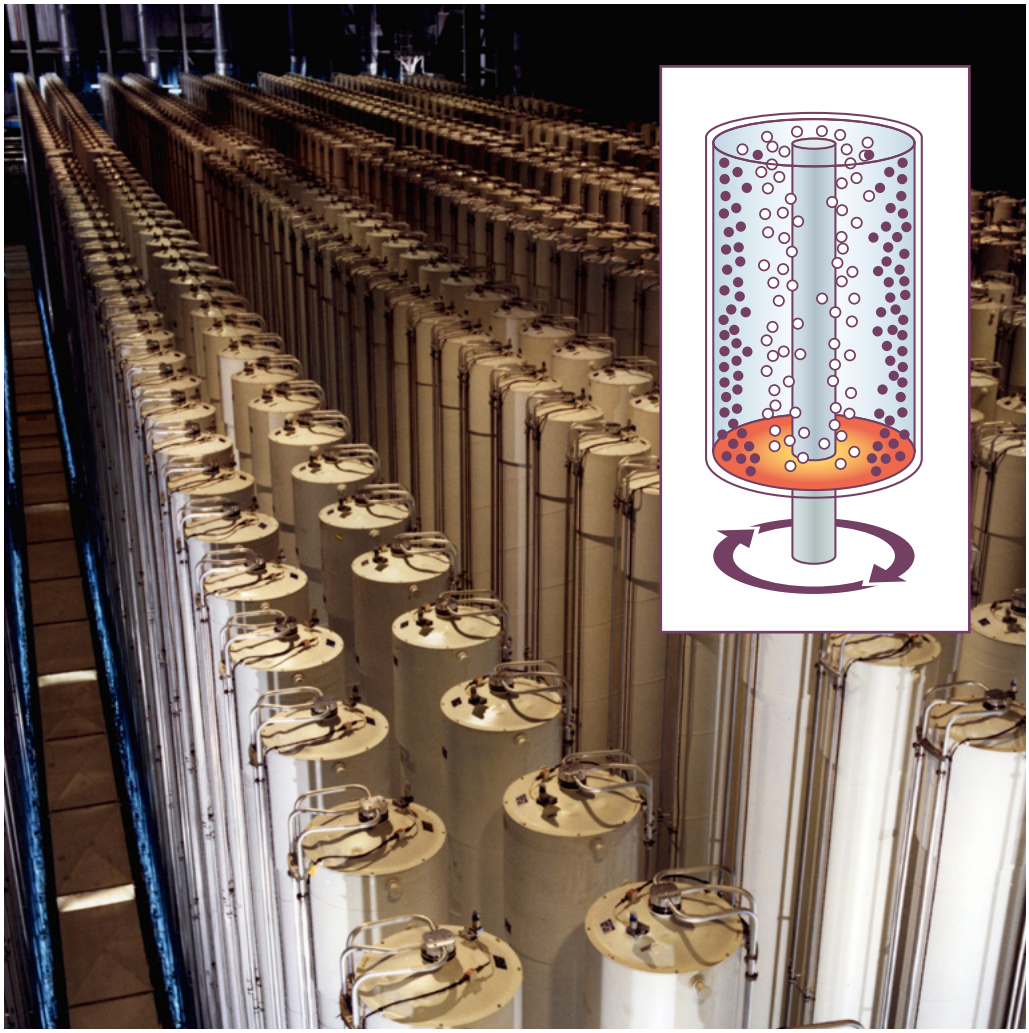
Anrikning innebär att öka andelen av den fissila isotopen uran-235 genom att icke-fissilt uran-238 tas bort. Centrifuganrikning är den process som numera fullständigt dominerar vid anrikning av uran. Metoden utnyttjar skillnaden i massa mellan de olika uranisotoperna. Uranhexafluoridgasen förs genom snabbt roterande cylindrar där den tyngre, oönskade isotopen uran-238 samlas vid kanten och avskiljs. Separationen i varje enskild centrifug är mycket liten och centrifugerna behöver seriekopplas i långa kaskader för att uppnå önskad anrikning. Dessutom kan varje centrifug bara anrika en liten mängd uran så det krävs även att centrifugkaskaderna parallellkopplas, vilket sammantaget kräver ett stort antal centrifuger för att anrika större mängder uran. Halten av anrikning avgörs av hur många centrifuger som används och hur dessa är kopplade till varandra.

För reaktorbränsle anrikas uran-235 vanligtvis till 4–5 procent medan vapenuran behöver innehålla minst 90 procent för att fungera bra i kärnvapen. Det krävs ingen särskild utrustning för att anrika till höga halter. Samma centrifuger som vid bränsleanrikning kan användas, men konfigurationen av kaskader är annorlunda. Det krävs betydligt mindre kapacitet för att tillverka vapenuran än uranbränsle. Orsakerna är dels att huvuddelen av separationen görs vid anrikning till låga halter, dels att mängden uran som behövs är betydligt lägre. En kärnreaktor kan innehålla hundratals ton uran medan ett kärnvapen innehåller några tiotal kilogram. Ett land som tänker tillverka kärnvapen som baseras på uran, men inte kärnbränsle, behöver inte delarna av kärnbränslecykeln som följer efter anrikningssteget.

Anrikning avger inte radioaktiva ämnen som kan upptäckas på avstånd. Centrifuganrikning är emellertid utrymmeskrävande och anläggningarna tenderar att vara stora. Även om en anläggning är dold under marken kan omgivande infrastruktur och transporter, som kan upptäckas med satelliter, visa att det rör sig om en anrikningsanläggning.



Separationsarbete är ett mått på hur mycket separation som krävs för att anrika till en viss halt. Vid anrikning av naturligt uran till vapenuran är huvuddelen av arbetet utfört redan då bränslet når en anrikning av 3–5 procent. Det motsvarar den anrikning som används i civilt reaktorbränsle.



Separation med hjälp av centrifug utnyttjar det faktum att molekyler som innehåller tyngre uranatomer samlas vid centrifugens rand och där kan avskiljas. Varje centrifugsteg ger en väldigt liten ökning av koncentrationen av den önskade isotopen. Därför måste centrifuger sammankopplas i stora kaskader. Foto: United States Federal Government (public domain).

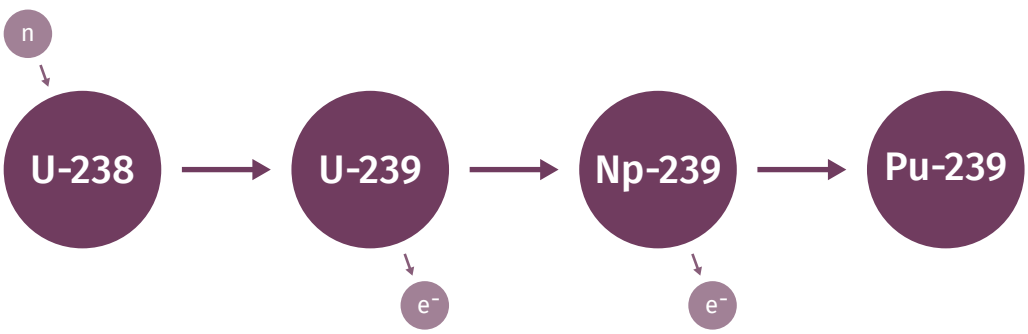
Reaktordrift

De allra flesta kärnreaktorer använder anrikat uranbränsle. Ett fåtal reaktorer använder däremot naturligt uranbränsle. Fördelen med att använda naturligt uran vägs dock upp av de krav som ställs på kärnreaktorn. Den lägre andelen fissilt material i bränslet kräver nämligen särskilda material för *moderering* av neutronerna i kärnreaktorn. Moderering innebär att neutronerna bromsas upp, vilket ökar sannolikheten för fission. I en kärnreaktor med naturligt uran som bränsle används vanligtvis tungt vatten eller grafit som moderator. Kärnreaktorer som använder anrikat uranbränsle kan däremot använda vanligt vatten som moderator, vilket som regel även fungerar som kylmedel. Kärnreaktorer som använder naturligt uranbränsle är däremot något mer effektiva vid plutoniumproduktion eftersom det är den icke-fissila isotopen uran-238 som ger upphov till plutonium.

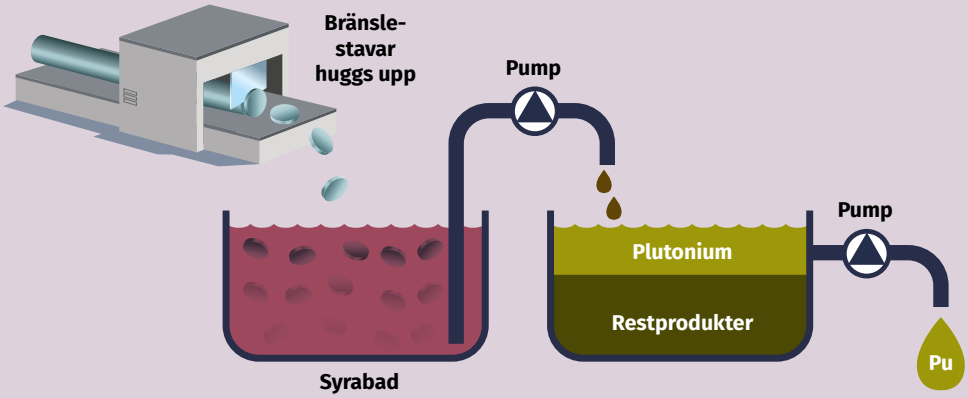
När bränsle till en kärnreaktor ska tillverkas konverteras uranhexafluorid kemiskt till urandioxid eller metalliskt uran. Urandioxid är en kemiskt stabil förening som klarar mycket höga temperaturer och används därför ofta som bränsle i kärnreaktorer. Urandioxiden bearbetas till ett fint pulver som pressas och binds samman till pellets. Dessa pellets laddas i metallrör som i sin tur monteras till bränsleknippen. Metalliskt uran används oftast i form av tunna plattor som placeras i plattformade bränsleknippen.

Kärnbränsle som laddas i en reaktor innehåller uran-235 och uran-238. Under drift klyvs uran-235 och ger upphov till att en stor mängd andra ämnen bildas. Klyvning av atomer ger upphov till fissionsprodukter, infångning av neutroner bildar aktiveringsprodukter och slutligen bildas sönderfallsprodukter, då fissionsprodukter och aktiveringsprodukter sönderfaller radioaktivt.

Plutonium-239 bildas genom att neutroner fångas in av uran-238. Ytterligare neutroninfångning hos plutonium-239 ger upphov till tyngre plutoniumisotoper. Dessa är fissila och bildas i så stor mängd att de bidrar till en väsentlig del av den totala fissionsenergin i elproducerande kärnreaktorer. Vid användning i kärnvapen ställer dock dessa tyngre plutoniumisotoper till problem. I synnerhet plutonium-240 och plutonium-242 är problematiska eftersom de genomgår *spontan fission*, det vill säga att de kan klyvas utan att träffas av neutroner. Den spontana fissionen ger upphov till nya neutroner som kan starta en kedjereaktion. Så länge det fissila materialet är underkritiskt kan inte ett kärnvapen antända oavsiktligt och spontan fission är då inget problem. Under kompressionen kan dock spontan fission leda till att kedjereaktionen startar i ett tidigare skede än avsett. Det gör vapnet otillförlitligt eftersom styrkan blir omöjlig att förutsäga. Energin som avges kan då variera från full till i princip obefintlig styrka.



Plutonium-239 bildas genom infångning av neutroner hos uran-238 och efterföljande radioaktivt sönderfall via uran-239 och neptunium-239. Ytterligare neutroninfångning hos plutonium-239 gör att plutoniumets kvalitet försämras tills det inte längre kan användas som vapenmaterial.



För vätskeextraktion finns flera tekniska lösningar. Samtliga bygger på principen att de ämnen som ska separeras har olika löslighet i två lösningsmedel, som i sin tur är lätta att separera från varandra. Kärnbränsle löses i syra som blandas med ett organiskt lösningsmedel. Uran och plutonium binder till den organiska vätskan medan fissionsprodukter och oönskade radioaktiva ämnen kvarstannar i den andra vätskan.

Andelen tyngre plutoniumisotoper behöver således hållas låg för att plutoniumet ska kunna användas i kärnvapen. Ju längre tid som bränslet bestrålas i kärnreaktorn, desto högre blir andelen oönskade plutoniumisotoper. Vid produktion av vapenplutonium krävs således tätare bränslebyten än vid elproduktion. Kärnreaktorer där det är enkelt att byta bränsle lämpar sig därför väl för plutoniumproduktion. Att en kärnreaktor drivs på ett sätt som tyder på att syftet är plutoniumproduktion, kan synas i utsläpp av gasformiga radioaktiva ämnen som sprids i atmosfären vid bränslebyte, eller genom tecken på verksamhet som syns på satellitbilder. Tiden mellan bränslebyten beror på effekttätheten i härden. Som en jämförelse genomförs bränslebyte i en typisk lättvattenreaktor en gång om året, medan bränslebyten skulle behöva ske med högst ett par månaders mellanrum om vapenplutonium ska utvinnas ur bränslet. Det finns emellertid kärnreaktorer som kan producera vapenplutonium även med längre bestrålningstider.

Upparbetning

Upparbetning är den process då det kvarvarande fissila materialet separeras från övrigt material i det använda kärnbränslet. Det används inte enbart för att utvinna vapenplutonium, utan huvudsakligen för att återanvända det kvarvarande uranet och i vissa fall även plutoniumet som kärnbränsle. Ett stort antal olika processer kan användas för att upparbeta använt kärnbränsle beroende på vilken typ av bränsle det rör sig om. Den vanligaste processen är vätskeextraktion. Bränslet löses först upp i syra. De fissila ämnena separeras från fissionsprodukter genom att de har olika löslighet i olika typer av vätskor. För att uppnå fullgod separation krävs upprepning i flera olika steg. Upparbetning kan upptäckas genom detektion av radioaktiva gaser som avges när bränslet bearbetas (se kapitlet *Upptäckt av kärnvapenexplosioner*).

Hantering av använt kärnbränsle

När det använda kärnbränslet tas ur härden är det mycket radioaktivt. Innan det behandlas vidare måste aktiviteten avklinga så pass mycket att bränslet kan hanteras utan hälsorisker. Aktiviteten minskar snabbt i början för att sedan avta i långsammare och långsammare takt. Tiden för avklingning beror på bestrålningstiden i härden – ju längre tid i härden desto högre aktivitet hos bränslet – men det rör sig om månader upp till år. Detta gör att bränslet inte kan upparbetas och användas i kärnvapen direkt efter att det tagits ur kärnreaktorn. ■

Kärnvapenutveckling

Framtagande av tillräckliga mängder fissilt material av vapenkvalitet är enbart det första steget vid tillverkning av ett kärnvapen. För att det fissila materialet ska kunna användas i ett vapen behövs ytterligare steg, varav många kräver omfattande praktiska försök innan man lär sig processerna. Detta kapitel beskriver vad som krävs för att utveckla kärnvapen när man väl har de nödvändiga materialen. För att vara användbart behöver ett kärnvapen även någon lämplig bärare, samt ledningsfunktioner för vapeninsats. Exempel på kärnvapensystem beskrivs i ett avslutande avsnitt i detta kapitel.

Redan framtagandet av materialet förutsätter god förståelse för bearbetning och analys, eftersom materialets sammansättning har stor inverkan på de fysikaliska egenskaperna. Det fissila materialet smälts samman med andra ämnen för att förbättra vissa egenskaper, till exempel formbarhet, åldersbeständighet och hur materialet reagerar på strålningen som frigörs vid en fortlöpande kedjereaktion.

För att forma det fissila materialet så att det kan utnyttjas till kärnvapen används gjutning, pressning eller svarvning. Det är en komplicerad process eftersom de fissila materialen får drastiskt annorlunda egenskaper vid olika temperaturer. Därtill är materialen, i synnerhet vad gäller plutonium, giftiga och radioaktiva. Processen måste minimera spill, såväl av hälso- och miljöskäl som ekonomiska orsaker.

Moderna kärnvapen bygger på snabb komprimering av fissilt material. Även för detta krävs god förståelse för egenskaperna hos de material som ingår. Det kan studeras genom försök med sammansprängningar av så kallade subkritiska mängder (som inte orsakar en kedjereaktion) eller andra material med liknande mekaniska egenskaper. För symmetrisk sammansprängning krävs en samtidig initiering av explosivämnet som ger kompressionen, vilket ställer mycket höga krav på den elektronik som startar tändladdningarna.

För ett fungerande kärnvapen krävs att en kärnladdning anpassats till ett lämpligt leveranssystem. Vid provsprängning finns däremot inga egentliga krav på laddningens fysiska storlek, eftersom laddningen då används på en förutbestämd försöksplats och i princip kan konstrueras på plats. För att kunna levereras med hjälp av en robot eller frifallsbomb måste laddningen emellertid göras tillräckligt liten och lätt för att rymmas och transporteras i bäraren, samt vara tillräckligt robust för att klara påfrestningar vid lagring, transport och avfyrning.

När ett fungerande kärnvapen tagits fram kan ytterligare utveckling äga rum för att förbättra vapnen. Exempel på sådana förbättringar är till exempel *boostring* för att utnyttja det fissila materialet mer effektivt, möjlighet att kunna variera laddningens styrka, samt att lägga till ett andra steg i form av fusionsmaterial för att öka laddningsstyrkan (se kapitlet *Kärnvapens funktion*).

Provsprängningar

Kärnvapenprov genomförs av flera anledningar, och syftena skiljer sig för en etablerad kärnvapenstat och en stat som just är i färd med att skaffa sig kärnvapen. Inledande försök har som huvudsakligt syfte att se till att vapnet fungerar som avsett och har förväntad laddningsstyrka. Fortsatta försök för att vidareutveckla kärnvapen kan ha samma syfte, till exempel att säkerställa att boostring och fusionssteg fungerar som förväntat. Försök kan även göras för att studera hur ett kärnvapen uppför sig under speciella förhållanden. Ett viktigt skäl att prova är att försäkra sig om att vapnet inte kan explodera oavsiktligt, till exempel om det tappas från ett flygplan. Utöver att säkerställa funktionen, kan en mängd mätningar göras för att studera de fysikaliska processer som behövs för vidare utveckling av kärnvapen. Förutom vapenutveckling är kännedom om kärnvapens verkan också ett viktigt skäl till att genomföra prov. Ytterligare ett ändamål med kärnvapenprov kan vara att demonstrera sin kapacitet i avskräckande syfte. Det ska dock påpekas att ett kärnvapenprov inte behöver betyda att man har användbara kärnvapen i sin arsenal.

Sedan det första kärnvapnet exploderade i juli 1945 i New Mexico, USA, har mer än 2 000 kärnvapenprov genomförts. Under 1950-talet genomfördes ett ökande antal, främst atmosfäriska, kärnvapenprov som både ledde till radioaktivt nedfall och protester. 1958 inleddes dock ett moratorium som innebar att USA och Sovjetunionen tillfälligt upphörde med sin provverksamhet. Moratoriet avbröts av Sovjet-

unionen i september 1961 och månaderna därefter genomfördes kärnvapenprov i en aldrig tidigare skådad takt.

Allt fler prov genomfördes under jord och 1963 kom USA, Sovjetunionen och Storbritannien överens om det partiella provstoppsavtalet (PTBT) som förbjuder provsprängningar i atmosfären, yttre rymden och under vatten. 1974 signerade USA och Sovjetunionen tröskelavtalet, som förbjuder prov med en styrka överstigande 150 kiloton. Frankrike och Kina fortsatte prova i atmosfären till mitten på 1970-talet.

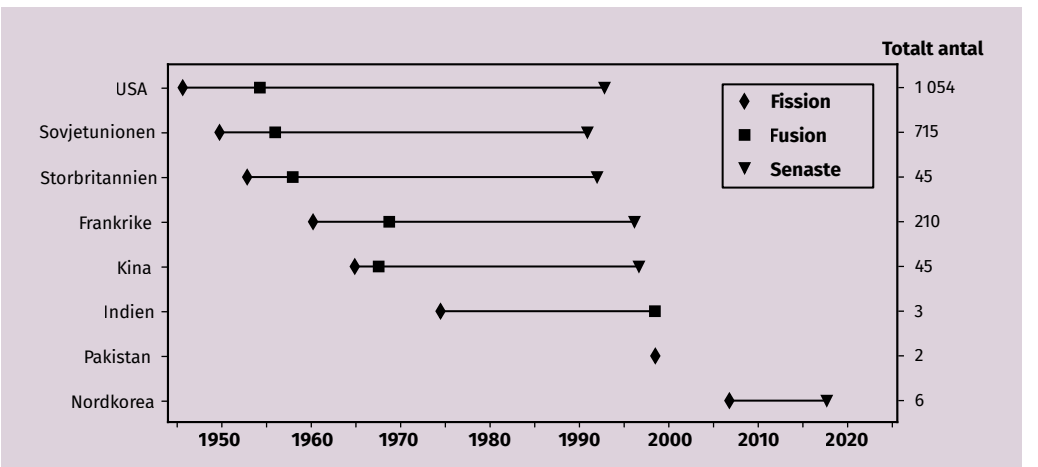
Under 1970- och 1980-talen provades i genomsnitt ett kärnvapen per vecka. Sedan det fullständiga provstoppsavtalet (CTBT) öppnades för signatur 1996 har dock endast tio kärnvapenprov skett fram till dagens datum. Dessa har genomförts av Indien, Pakistan och Nordkorea, och inget av dessa länder har anslutit sig till CTBT.

Provsprängningar av kärnvapen sker i allmänhet vid ett särskilt område avsett för kärnvapenprov. Det ställs mycket specifika krav på mätutrustningen för att göra diagnostik. Den måste till exempel hinna hantera och registrera signaler innan stora delar av utrustningen förstörs.

De minst komplicerade proven genomförs i jordens atmosfär, då kärnvapnet kan släppas från flygplan eller fixeras på en viss höjd med hjälp av ballonger eller torn. Atmosfäriska prov är dock lättare för andra länder att upptäcka och studera på håll, och det finns därmed skäl att i stället göra underjordiska prov för att enklare dölja information om sina kärnvapens utformning. Dessutom sprids inte radioaktivitet i miljön om provet görs på rätt sätt. Underjordiska prov är dock svårare och dyrare att genomföra jämfört med atmosfäriska. Laddningen sänks ner i ett djupt borrat hål, eller placeras i en tunnel, med tillhörande utrustning för diagnostik och mätningar. Ett fåtal prov har även genomförts på mycket hög höjd i atmosfären för att studera vapnets effekter i den miljön. Prov på eller under vatten har använts för att studera effekter på fartyg och ubåtar.

Vissa egenskaper hos vapnen kan studeras i så kallade *hydronukleära prov*. Dessa prov involverar konventionella explosiva ämnen och en liten mängd fissilt material som kan resultera i frigörelse av små mängder kärnenergi. Beroende på hur man väljer att tolka avtalets formuleringar, är dessa prov inte tillåtna enligt CTBT (se vidare kapitlet *Kärnvapenstater*).

Prov av explosionens förlopp och materialegenskaper bedrivs också i form av så kallade *subkritiska prov*. Dessa sätts samman så att en expo-



Tidslinje över när olika stater gjorde sitt första och senaste kärnvapenprov, samt när ett första prov av ett fusionsvapen genomförts i förekommande fall.

nentiellt ökande kedjereaktion inte skapas, men man kan ändå studera explosionsfenomen och utveckla beräkningsmodeller. En tredje typ av prov benämns *hydrodynamiska prov*, där man studerar hur material beter sig under extrema tryck och temperaturer. Både subkritiska och hydrodynamiska prov är tillåtna enligt CTBT.

I takt med ökande möjligheter att göra storskaliga och detaljerade datorsimuleringar av modeller av vapen har behovet av att genomföra praktiska prov minskat. Man kan i stället studera hur ett kärnvapen fungerar i datorsimuleringar. Studier bedrivs också i hur de material som används i konstruktionerna åldras med tiden för att säkerställa att befintliga kärnvapenarsenaler fortfarande fungerar efter år av lagring. Vid utveckling av nya kärnvapen, baserade på oprövade principer, är det förmodligen önskvärt att prova.

Exempel på kärnvapensystem

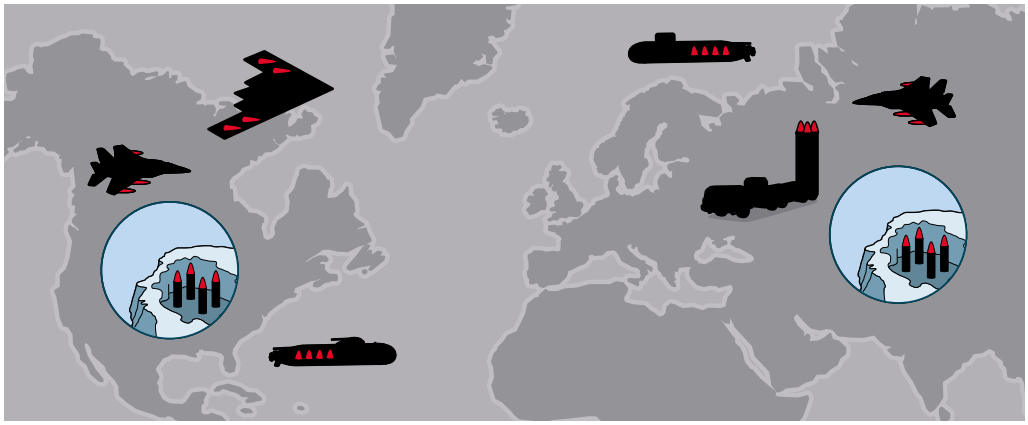
De tidigaste kärnvapnen var bomber som var så tunga och otympliga att endast de allra största bombflygplanen kunde bära dem. Utveckligen efter andra världskriget medförde dock en snabb miniatyrisering av kärnladdningar och diversifiering av tillgängliga kärnvapensystem. Genom att montera kärnvapen på *robotar* (styrbara raketer) med lång räckvidd kunde man snart nå alla delar av jorden med kärnvapen, vilket gjorde kärnvapens strategiska betydelse uppenbar. Kärnvapensystem med interkontinental räckvidd brukar därför benämnas *strategiska kärnvapen*. Förutom landbaserade interkontinentala ballistiska robotar, brukar även långräckviddigt bombflyg och robotar med lång räckvidd på ubåtar räknas som strategiska.

De kärnvapen som inte räknas som strategiska kallas *sub-strategiska kärnvapen*. Ibland förekommer även benämningar som *taktiska kärnvapen* och *slagfältskärnvapen*. Dessa är ofta knutna till bärare som även (och vanligtvis) bestyckas med konventionella laddningar. Till exempel kan en kryssningsrobot vara anpassad så att den förses antingen med konventionell laddning eller kärnladdning.

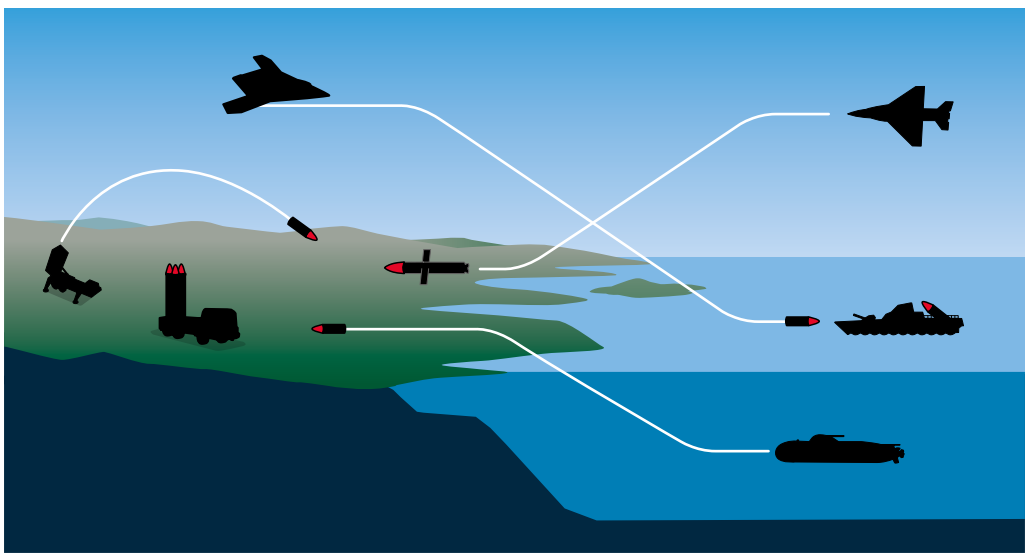
En viktig del av en kärnvapenförmåga är också ledningsfunktionerna som behövs för att till exempel lokalisera mål, besluta om insats och

Olika begrepp förknippade med vapensystem

Frifallsbomb	En bomb som faller med tyngdkraften mot målet.
Robot	Raket- eller jetdriven projektil med styrförmåga.
Ballistisk robot	Robot som bara är styrd under avfyrningsfasen, och därefter följer en ballistisk kastbana mot målet.
Kryssningsrobot	Robot som kan liknas vid ett obemannat flygplan som, ofta på låg höjd, följer en flygrutt mot målet.
Interkontinental ballistisk robot	Ballistisk robot med tillräckligt lång räckvidd för att nå från en kontinent till en annan. Mer specifikt brukar robotar med en räckvidd över 5 500 km räknas som interkontinentala.
Stridsspets	Den del av ett vapensystem som innehåller laddningen och ska säkerställa att den klarar påfrestningarna på vägen till målet. För en kärnstridsspets som skjutits upp utanför atmosfären måste till exempel stridsspetsen vara utformad så att den klarar återinträdet i atmosfären.



Olika strategiska kärnvapensystem. Landbaserade interkontinentala robotar har räckvidd att nå från en kontinent till en annan. De placeras antingen i mycket välskyddade silor i marken, eller på fordon som är svåra att lokalisera eftersom de förflyttar sig. Strategiska ubåtar är beväpnande med ballistiska robotar, och framdrivs med kärnreaktorer för att ge dem närmast obegränsad möjlighet att befinna sig i undervattensläge. Bombflygplan med lång räckvidd kan beväpnas med frifallsbomber eller kryssningsrobotar, och ger möjlighet till ”strategisk signalering” genom att motståndaren ser om flygplan flyttas fram eller sänds på patrullering.



Sub-strategiska kärnvapensystem är ofta vapensystem som även kan vara bestyckade med konventionella laddningar. I figuren ses artilleri, fordon med korträckviddiga ballistiska robotar, samt kryssningsrobotar burna av såväl stridsflyg som fartyg och ubåtar.

leda vapnet mot målet. För strategiska kärnvapen kan kapaciteten hos dessa system avgöra vilken *kärnvapenhållning* (regler för kärnvapeninsats) som är möjlig att ha för en kärnvapenstat. Om man har god förmåga att upptäcka ett kärnvapenanfall från en motståndare, kan man ha hållningen att avfyra sina egna kärnvapen redan innan motståndarens kärnvapen når fram. I förlängningen möjliggör det också att ha ett visst mått av öppenhet kring sina strategiska kärnvapen, eftersom man är trygg med att de inte kan slås ut innan de kan avfyras. Detta kan ha betydelse för vilka åtaganden man är beredd att acceptera som del av avtal med andra stater. Saknar man däremot förmåga att agera på en inkommande attack, är det rimligt att ha sina strategiska kärnvapen så dolda som möjligt för att förhoppningsvis ha åtminstone någon kapacitet kvar att slå tillbaka med. Dessa aspekter av kärnvapen berörs närmare i de två efterföljande kapitlen *Kärnvapenstrategier*, respektive *Kärnvapenstater*. ■

Kärnvapenstrategier

Av de föregående kapitlen framgår att utvecklingen av ett kärnvapenprogram är en resurskrävande satsning. Det förutsätter både kunskaperna och den industriella infrastrukturen för att tillverka både kärnvapen och lämpliga bärare för dessa. En fråga som bör ha besvarats redan innan man utvecklar förmågan är vad den ska fylla för funktion som ett säkerhetspolitiskt instrument. Hur många kärnvapen är tillräckligt många? Hur är det tänkt att dessa skulle användas? Detta kapitel belyser hur kraven på kärnvapensystem kan se ut för att de ska fylla en roll i en stats övergripande strategi.

Doktrin och strategi för kärnvapen

Olika aktörers inställning till kärnvapen som säkerhetspolitiskt instrument beror på en rad olika faktorer, till exempel det övergripande säkerhetsläget, rustningskontroll, strategisk målsättning och teknisk utveckling. Dessa faktorer förändras över tid. För att analysera hur stater kan resonera kring sina kärnvapenarsenaler utgår vi från en säkerhetspolitisk strategi baserad på tre huvudsakliga komponenter: *mål*, *medel* och *metoder*. Bevekelsegrunden för utvecklingen och upprätthållandet av en kärnvapenarsenal kan då beskrivas som relationen mellan de säkerhetspolitiska *målen*, och de *medel* och *metoder* en stat förfogar över för att uppnå dessa. I denna terminologi är kärnvapen sålunda *medel*. *Metoden* för hur man tänker sig att dessa används kan beskrivas i en *doktrin*. Ett exempel på doktrin är Försvarsmaktens militärstrategiska doktrin, där man skriver att doktrinen "beskriver hur Försvarsmakten ska använda militära maktmedel för att uppnå de säkerhetspolitiska målsättningar som regering och riksdag beslutar samt hur vi med tillgängliga resurser skall försvara Sverige".

De säkerhetspolitiska *mål* där kärnvapen kan vara *medel* hänger i allmänhet samman med situationer där statens existens eller den territoriella integriteten hotas. Under en period inte så långt efter andra världskriget fördes också resonemang om kärnvapen som en effektiv universallösning rent militärekonomiskt. Den doktrin som går under namnet *Massive Retaliation* manifesterar sig bland annat i Natos *Overall Strategic Concept for the Defense of the NATO Area* från 1957. Där beskrivs hur ett anfall från Warszawapakten skulle slås tillbaka genom att i princip alla tillgängliga kärnvapen i anslutning till fronten skulle användas så snart som möjligt.

Massive Retaliation visade sig vara en alltför trubbig metod. Det blir till exempel svårt att hantera mindre lokala konflikter när medel och metoder är anpassade efter ett storskaligt krig. Utvecklingen av doktrinerna för kärnvapen i väst, framför allt i USA, ledde fram till en mer flexibel doktrin som går under namnet *Flexible Response*, beskriven av Nato 1968.

En motsvarande beskrivning av utvecklingen av doktriner för kärnvapenanvändning i Sovjetunionen finns inte tillgänglig på samma sätt och det bör nämnas att styrkeförhållandena mellan Nato och Warszawapakten har varierat över tid. Till viss del kan strategierna för kärnvapenanvändning haft som syfte att kompensera för en faktisk eller upplevd underlägsenhet avseende konventionella vapen.

Ytterligare en aspekt av den ryska kärnvapenstrategin efter Sovjetunionens sönderfall är anpassningen – eller möjligen utvidgningen – av doktrinen, till regionala konflikter och inte bara det globala storkriget. I den ryska militära litteraturen från 1990-talet finns det exempel på hur man upplever att väst redan formerat om sina styrkor från kalla krigets dagar till att möta regionala konflikter. Hur anpassar man sina medel och metoder för att möta en regional konflikt?

I officiella ryska dokument, som till exempel *Grunderna för den Ryska federationens statliga politik inom området kärnvapenavskräckning* från 2024, uttrycker man sig i termer av *faror* och *hot*. I ett förändrat militärpolitiskt och strategiskt läge skulle faror kunna leda till militära hot mot den ryska federationen, vilka kan komma att bemötas med kärnvapenavskräckning. Här finns även andra villkor för när kärnvapen är möjliga att använda. För att kunna bedöma den faktiska ryska förmågan behöver dokumentet analyseras tillsammans med fysiska och moraliska faktorer.

Nedan kommer vi använda oss av ett alternativt händelseförlopp (kontrafaktiskt exempel) för att illustrera hur man i det sammanhanget kan använda kärnvapen som *medel* i *metoder* för att uppnå dessa *mål*. Målet man önskar uppnå påverkar inte bara kärnvapenarsenalens storlek, utan också vapenbärare, plattformar, ledningssystem och hur militära förband organiseras. Innan vi tar oss an det kontrafaktiska exemplet behöver vi dock belysa det centrala begreppet *avskräckning*.

Avskräckning

Avskräckning kan i vid mening ses som påverkan som syftar till att få motståndaren att avstå från en handling på grund av att de förväntade konsekvenserna inte skulle vara acceptabla. Med detta sagt är inte avskräckning ett universellt begrepp, utan olika aktörer ser på avskräckning genom olika prismor. Avskräckningen är en delmängd av de medel och metoder som, tillsammans med givna mål, kan sägas utgöra en strategi.

Ibland görs det gällande att avskräckning med kärnvapen är ett koncept som utesluter själva användningen av kärnvapen i någon form, men snarare är avskräckning – med eller utan användning av kärnvapen – en metod för att med tillgängliga medel söka hindra ett händelseförlopp som anses kunna leda till oacceptabla konsekvenser. Till exempel beskrev Nato i det strategiska konceptet *Flexible Response* 1968 att ”NATO should retain the initiative to use nuclear weapons under conditions where it is militarily or politically required. The use of nuclear weapons to oppose an aggression, limited in scope and area, though it should not be excluded, might involve an increased risk of escalation”. Avskräckning förutsätter inte bara förmåga, utan behöver även vara trovärdig för att fungera. Det betyder att man måste kunna genomföra avskräckningen, men också ha en politisk vilja att fatta relevanta beslut. Annars kan avskräckningen fallera och till exempel medföra en risk för eskalation, som det beskrivs i citatet ovan.

Sverige 1960 – ett tankeexperiment

Låt oss som en tankefigur betrakta Sverige runt 1960, när vi fortfarande tänkte oss en framtid som kärnvapenstat. Hur skulle ett eventuellt kärnvapen ha passat in i en övergripande militär strategi? Som ovan kan vi beskriva en strategi i termer av *mål*, *medel* och *metoder*. I det här fallet väljer vi som mål att hindra Sovjetunionen från att invadera Sverige genom en landstigningsoperation över Östersjön. *Metoden* för att uppnå detta *mål* är flygbombning av utskeppningshamnarna under pågående lastning. *Medlet* är kärnvapen i form av flygburna attackrobotar. Tanken är att om Sverige kunde övertyga Sovjetunionen att man hade denna förmåga, samt var villig att använda den, skulle Sovjet avskräckas från att ens försöka genomföra en landstigningsoperation. Resonemanget är sålunda att vi under de omständigheterna skulle tillfoga dem sådan skada att en framgångsrik operation blev omöjlig.

Det säkerhetspolitiska målet kan i praktiken beskrivas genom de medel och metoder som används, och i vilka situationer de kan bli aktuella. Detta utgör i stort sett doktrinen. Den kan formuleras i ett dokument där hela eller delar publiceras öppet, för att visa den avskräckande förmågan för motståndaren.

Faktisk avskräckning baseras på faktisk förmåga. Därför behöver man reda ut de tekniska och militära detaljerna för att operationen där Sverige med kärnvapen hindrar en Sovjetisk landstigning skulle kunna genomföras. Centrala frågor är till exempel hur många kärnvapen, och med vilka laddningsstyrkor, vi kommer att behöva. Valet av laddningsstyrka bestäms i huvudsak av målets hårdhet och vapenbärarens precision. Precisionen avser skillnaden mellan avsedd och faktisk explosionspunkt, där även den höjd över målet som vapnet exploderar på ingår.

Som ett exempel kan vi tänka oss att invasionsstyrkan i huvudsak består av soldater i pansarfordon och att vi har räknat ut att fordonen inte är stridsdugliga vid ett specifikt övertryck i den stötvåg som genereras av kärnvapenexplosionen. För en given laddningsstyrka finns det en detonationshöjd över marken som ger den största radien från nollpunkten för det givna övertrycket (se kapitlet *Kärnvapenverkan*). Om vi har genomfört en tillräcklig mängd beräkningar och försök med

För ett flyganfall mot utskeppningshamnar i Baltikum 1960 skulle attackflygplanet A 32 Lansen ha varit den aktuella vapenbäraren. Bilden visar jaktversionen J 32B. Foto: Saab AB (public domain).

Det sovjetiska marininfanteriet, specialister på amfibieoperationer, skulle sannolikt ha haft uppgiften att etablera ett brohuvud vid den landstigningsoperation som är föremål för avskräckning i textens kontrafaktiska exempel. Foto: United States Federal Government (public domain).

vårt vapensystem kan vi uppskatta hur stort felet i riktpunkt och detonationshöjden brukar vara.

För ett givet avstånd från riktpunkten går det alltså att beräkna sannolikheten för att typmålet, ett pansarfordon, faktiskt försätts ur stridbart skick. Låt oss anta att vi känner de tänkta målen tillräckligt bra för att laddningsstyrkan och detonationshöjden är kända parametrar och att vi känner de statistiska egenskaperna för vårt eget vapensystem. Utifrån målets karaktär går det då att beräkna nödvändigt antal vapen och hur anfallet ska genomföras. I en vidare mening behöver hänsyn också tas till sannolikheten för att flygplanet faktiskt når den punkt där vapnet ska avlossas.

Antalet kärnvapen som krävs beror också på antalet mål. Hur många utskeppningshamnar finns det? Om motståndaren anpassar sitt uppträdande efter våra förutsättningar kan antalet mål variera. Låt oss anta att rekognosering av de geografiska förhållandena visar att ett begränsat antal hamnar är aktuella för genomförandet av operationen. Dessa vitala platser och eventuellt delar av området som kommer att användas för anflygningen skyddas av olika typer av luftförsvar, i huvudsak luftvärn och jaktflyg. Under *medel* och *metoder* behöver vi ta hänsyn till egna åtgärder för att se till att tillräckligt många flygplan tar sig igenom försvarslinjerna och med stor sannolikhet tillfogar motståndaren den avsedda skadan.

Det visar sig alltså att det inte är tillräckligt att beväpna våra attackflygplan med kärnvapenbestyckade robotar, utan det behövs också konventionellt attackflyg för att slå ut motståndarens luftförsvar, jakteskort och möjligen förmågan att kunna sänka de fartyg som utgör en del av luftförsvaret. Här kan ett val behöva göras mellan robotar med längre räckvidd, som gör att flygplanen inte behöver komma lika nära målet, men som också har sämre precision, och robotar med kortare räckvidd som har bättre precision för bättre verkan i målet.

Det kan vara så att målets karaktär, till exempel trupp under lastning, kräver trovärdiga underrättelser i så pass god tid att avskräckning med våra kärnvapen kan genomföras i rätt ögonblick. Det är också så att det bakomliggande politiska beslutet kräver ett beslutsunderlag som med mycket hög sannolikhet slår fast att det är nödvändigt att genomföra operationen. Till exempel att trupprörelserna mot utskeppningshamnarna inte är en övning, utan avsikten är att genomföra en skarp landstigning. Den efterfrågade avskräckningen beror inte bara på att vi faktiskt har attackrobotar med kärnvapen, utan att hela processen är inövad, inklusive beslutsfattandet från den politiska ledningen.

Låt oss anta att en anflygning på låg höjd är nödvändig för att i tillräckligt hög grad kunna tränga igenom motståndarens luftförsvar, men att roboten behöver explodera på en högre höjd för att få full effekt. Flygplanet och roboten måste göra detta möjligt. Flygplanet måste också kunna manövrera så att risken minimeras att påverkas av exploderande kärnvapen, antingen det de avlossat själv eller de som avlossats av andra.

Försvarsmakten beskriver, till exempel i den Militärstrategiska doktrinen, krigföringsförmåga som en kombination av konceptuella, fysiska och moraliska faktorer. I det kontrafaktiska exemplet ovan är kärnvapen, vapenbärare, plattformar, personal och övrig materiel exempel på fysiska faktorer, medan de konceptuella bland annat består av den ovan skissade doktrinen. De moraliska aspekterna avser mänskliga egenskaper, till exempel vilja och ledarskap för att fatta nödvändiga beslut, men också utbildning och övning av militära förband. Även inom kärnvapenområdet behöver alla dessa aspekter beaktas vid en analys av förmåga.

Om strategin skulle utvidgas för att inkludera förmåga att hindra en markinvasion i norra Sverige kan resonemangen bli annorlunda. Det kan till exempel bli för komplicerat för attackflyg att ta sig genom fientligt luftrum för att nå vissa mål som kräver kärnvapen, till exempel platser för högre ledning eller truppkoncentrationer. Dessa kan vara belägna på ett så stort djup att det antingen behövs andra vapensystem med den erforderliga räckvidden eller en ändring av metoder och medel för att finna lämpliga mål på

kortare avstånd. Samma uppskattningar och kalkyler som nämnts ovan behöver utföras även i det fallet. Varje enskilt kärnvapensystem har sina egna förmågor, förutsättningar och begränsningar och hur de utformas beror på den uppgift som man försöker lösa.

Vapensystem och förmåga

Det kontrafaktiska exemplet ovan illustrerar några generella problem för den som valt kärnvapen som ett säkerhetspolitiskt verktyg.

Vapensystemet behöver kunna nå och bekämpa målet med tillräckligt god precision på det sätt som avses. En drivkraft för den militärtekniska utvecklingen av framför allt strategiska, men också andra, kärnvapensystem i Ryssland har varit deras uppfattning om hur starkt ett framtida västligt robotförsvar kan bli. Det dimensionerande hotet i dag är alltså i allmänhet antaganden om motståndarens framtida offensiva och defensiva förmågor.

Den övervägande delen av Rysslands och USA:s strategiska kärnvapen har ballistiska robotar med interkontinental räckvidd som vapenbärare. De startar från skyddade platser, så kallade silor, eller från mobila plattformar som är baserade på fordon på land eller på ubåtar till sjöss för att minska risken för ett oväntat angrepp. Robotens raketmotorer brinner under några minuter och är då relativt lätt att identifiera från exempelvis satelliter med infraröda kameror, men avfyrningsplatserna befinner sig i allmänhet långt från motståndarens defensiva förmågor. Med detta sagt har det skett en utveckling mot robotar med kortare brinntid.

Roboten med en eller flera stridsspetsar befinner sig i fritt fall i rymden efter att motorerna har brunnit klart. Det betyder att de rör sig i en elliptisk bana som efter ett tag kommer att återvända till jorden. En robot med flera stridsspetsar samlade är ett attraktivt mål enligt principen om alla ägg i en korg. Tiden till separationen bör därför vara så kort som möjligt, utan att precisionen äventyras. Utöver stridsspetsar går det att bära med olika typer av skenmål som liknar riktiga stridsspetsar, vilket gör det svårare för den som blir angripen att bekämpa hotet. Med så kallad MIRV-förmåga (*Multiple Independently-targetable Re-entry Vehicle*) är varje stridsspets riktad mot ett eget mål och en robot kan alltså angripa flera mål, om än inom ett begränsat område.

Stridsspetsarna återinträder i atmosfären med *hypersonisk* hastighet (hastighet större än fem gånger ljudhastigheten), vilket lämnar ett spår av glödande luft. Det gör dem relativt lätta att upptäcka, men den höga hastigheten gör dem samtidigt svåra att bekämpa med någon form av motmedel. Genom att bära med sig skenmål, som är svåra att skilja från stridsspetsarna, försvåras eventuella motmedels uppgift ytterligare. Skenmål med låg vikt färdas med samma hastighet som stridsspetsarna när de befinner sig i rymden, men bromsar hastigt in vid återinträdet och fyller då inte längre någon vilseledande funktion. Skenmål med en liknande massa som stridsspetsen kommer däremot att fungera även i atmosfären, men tar å andra sidan upp lika mycket av robotens begränsade lastkapacitet som en skarp stridsspets.

Ett effektivt robotförsvar behöver generellt ha olika förmågor och vara baserat på lämpliga platser längs rutten för att kunna bekämpa robotens olika flygfaser. Skydd av ett specifikt mål sker oftast genom att man försvarar omgivningen runt målet för att stoppa stridsspetsen när den är på väg in.

Flera av de vapensystem som president Putin presenterade i ett linjetal 2018 kan relateras till ambitionen att skapa förmåga att ta sig igenom en motståndares robotförsvar. Ett exempel är den *aeroballistiska* roboten *Kinzjal*, en ballistisk robot som avlossas från ett flygplan som befinner sig på hög höjd. Ett annat exempel är *Avangard* med en *hypersonisk glidfarkost*. Det är i praktiken

en vanlig interkontinental ballistisk robot, men stridsspetsen kan manövrera, till skillnad från vanliga stridsspetsar som också har hypersoniska hastigheter när de återinträder i atmosfären.

I skrivande stund utvecklar Ryssland också en kryssningsrobot och en torped med framdrift baserad på kärnreaktorer som kraftkälla. *Burevestnik* och *Poseidon*, som också presenterades i samma linjetal, kommer i praktiken ha global räckvidd eftersom de i teorin kan färdas i veckor. De faktiska gränserna för räckvidden beror dock sannolikt på hur fel fortplantas i navigationssystemen samt de fysiska påfrestningarna på farkosterna. De skiljer sig dock från andra strategiska vapensystem med global räckvidd, framför allt interkontinentala ballistiska robotar, genom att de färdas relativt långsamt. Deras roll, såväl militärt som politiskt, är dock höljd i dunkel.

Vad gäller den övervägande delen av andra vapensystem för kärnvapenbruk har de samma förmåga att tränga igenom motmedel som motsvarande konventionella vapen. En lärdom av kriget i Ukraina är att ballistiska robotar med relativt kort räckvidd har större chans att tränga igenom ett robot- och luftförsvar än traditionella kryssningsrobotar, eftersom de flyger med betydligt högre hastigheter.

Sammanfattningsvis avgör tillgängliga medel och metoder kärnvapnens roll i att uppnå militärstrategiska mål. Relationen kan uttryckas på olika sätt i doktrinär kommunikation med syfte att avskräcka de tänkta motståndarna. Syftet är att övertyga motståndaren om att kärnvapen kommer att användas med förväntad effektivitet om förhållandena är de som beskrivs i doktrinen. ■

Kärnvapenstater

I detta kapitel diskuteras vilka kärnvapenstaterna är och hur deras kärnvapenarsenaler är tänkta att bidra till säkerheten i olika stater. Kapitlet tar även upp olika typer av internationella avtal som reglerar kärnvapen och vad dessa regleringar innebär. Sådana avtal har inte enbart bäring på kärnvapenstaterna, utan påverkar i vissa fall också icke-kärnvapenstaters åtaganden.

Ickespridningsavtalet

Globalt finns det ett internationellt avtal som på ett grundläggande sätt reglerar kärnvapen och påverkar både kärnvapenstater och icke-kärnvapenstater, nämligen Icke-spridningsavtalet, *The Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*, NPT.

NPT tillkom år 1968 och trädde i kraft två år senare. Avtalet speglar den oro som fanns vid den här tiden för att många fler stater skulle skaffa kärnvapen samtidigt som det var tydligt att användande av kärnteknik för fredliga ändamål skulle bidra positivt till många staters utveckling. Man ville därför begränsa det första utan att hindra det andra. Dessutom framstod det som orealistiskt att enbart förbjuda fler stater att skaffa kärnvapen eftersom det redan fanns stater med kärnvapenarsenaler.

Resultatet av dessa avvägningar blev NPT, som är ett tredelat avtal för såväl kärnvapenstater som icke-kärnvapenstater med olika kategorier av åtaganden. De tre delarna består av icke-spridning av kärnvapen, nedrustning av existerande kärnvapenarsenaler, samt oinskränkt rätt till fredlig användning av kärnteknik. Avtalet täcker dessa tre områden med tio paragrafer, eller artiklar. Det är värt att notera att avtalet inte generellt förbjuder kärnvapen.

Som *kärnvapenstat* räknas i avtalet alla stater som har genomfört en provsprängning av kärnvapen före den 1 januari 1967. Med denna definition är enbart USA, Ryssland (tidigare Sovjetunionen), Storbritannien, Frankrike och Kina erkända som kärnvapenstater, vilket gäller oavsett när man som stat faktiskt går in i avtalet (Kina och Frankrike blev inte statsparter till NPT förrän 1992).

Kärnvapenstaternas åtaganden i NPT är dels att inte överlämna sina kärnvapen eller assistera andra länder i framställningen av kärnvapen (artikel I), dels att som avtalet uttrycker det *i god tro* förhandla om nedrustning av sina kärnvapen och i förlängningen generell och fullständig nedrustning (artikel VI). Det ska dock noteras att det inte anges några tidsramar för dessa nedrustningsförhandlingar.

Alla andra stater som ingår i NPT gör det som *icke-kärnvapenstater*. Sverige är statspart till NPT som icke-kärnvapenstat. Det innebär att Sveriges viktigaste åtaganden, liksom övriga icke-kärnvapenstater, för det första är att inte ta emot kärnvapen eller söka assistans för ett eget kärnvapenprogram (artikel II). För det andra, att acceptera att det internationella atomenergiorganet IAEA (*International Atomic Energy Agency*) genomför fullständig kärnämneskontroll (*safeguards*) av alla fredliga tillämpningar av kärnteknik inom landet (artikel III).

Samtidigt understryker NPT att avtalet inte ska inverka på staters oinskränkta rätt till fredlig kärnteknik (artikel IV). Det är en rimlig princip, men som diskuterats i tidigare kapitel finns ett överlapp mellan fredlig och eventuell militär användning inom stora delar av kärnbränslecykeln. Det medför att denna oinskränkta fredliga rätt kan utnyttjas för att öka den tekniska förmågan inom de delar av kärntekniken som också krävs för ett kärnvapenprogram, speciellt framställning av fissilt material.

NPT har varit ett framgångsrikt avtal i så måtto att nästan alla världens länder är statsparter och att antalet kärnvapenstater i världen fortfarande är ensiffrigt mer än femtio år efter avtalet trädde i kraft.

Endast fem stater står utanför NPT, varav fyra länder inte anslutit sig (Indien, Pakistan, Israel och Sydsudan), och ett land anser sig ha utträtt från avtalet (Nordkorea). Att Sydsudan inte har blivit statspart ännu kan förmodas ha orsaker orelaterade till avtalet. De övriga fyra staterna har kärnvapen, men de uppfyller inte kravet i NPT om när den första provsprängningen ska ha skett.

Indien, Pakistan och Israel är som nämnts de tre stater, förutom Sydsudan, som inte har tillträtt NPT. Indien provsprängde sitt första kärnvapen 1974, även om landet beskrev det provet som ”fredligt”, och Pakistan provsprängde 1998, som en direkt följd av ytterligare indisk provsprängning det året. Israel varken erkänner eller förnekar innehav av kärnvapen, men om man utgår

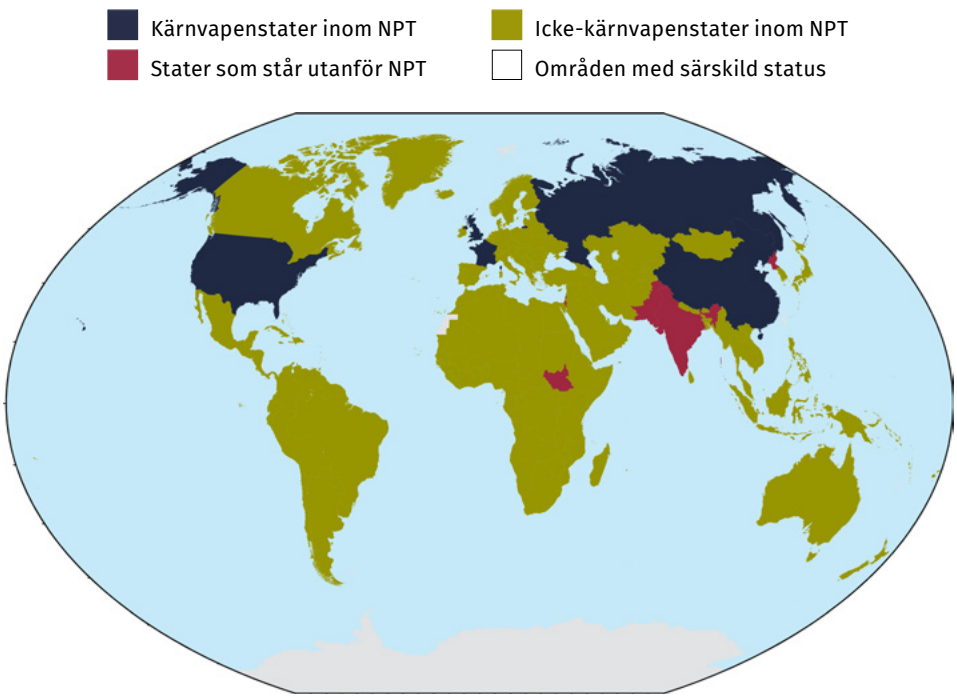
från olika indikationer på kärnteknisk verksamhet utanför *safeguards* antas landet ha kärnvapen. Dessa tre stater benämns *de facto* kärnvapenstater för att skilja dem från de erkända (*de jure*) kärnvapenstaterna under NPT. Indien, Pakistan och Israel kan enbart gå med i NPT som icke-kärnvapenstater, vilket uppenbarligen är oförenligt med ländernas kärnvapenprogram. Å andra sidan har de genom att stå utanför NPT inte heller den oinskränkta rätten till fredlig kärnteknik som alla statsparter till NPT åtnjuter. Det påverkar deras möjligheter till internationellt utbyte av sådan teknik och kunskap.

Nordkorea är den enda stat som anser sig ha utträtt ur NPT. Landets utträde följde dock inte den utträdesprocedur som NPT stipulerar i artikel X. Motståndet till att inkludera Nordkorea som en ytterligare *de facto* kärnvapenstat beror främst på oron för det prejudikat som då skulle etableras och vad det skulle kunna innebära för NPT som grundbulten i det globala ramverket för nedrustning och icke-spridning. Samtidigt är det uppenbart att Nordkorea med sina hittills sex provsprängningar är ett land som har någon form av kärnvapenförmåga.

Övergripande utmaningar för NPT

Ovan konstaterades att NPT har varit en framgång. Samtidigt finns det utmaningar när det gäller avtalets implementering, vilket inte förbättras av rådande omvärldsläge.

NPT hade när det trädde i kraft en stipulerad livslängd om 25 år och således var dess vidare existens den stora frågan vid avtalets konferens 1995. Till slut kunde avtalet förlängas på obestämd (i princip oändlig) tid genom att samtidigt anta ett krav från stora delar av länderna i Mellanöstern om att arbeta för en zon i Mellanöstern fri från massförstörelsevapen och dess bärare. Israel var inte delaktig i beslutet eftersom man inte är statspart i NPT, och en sådan zon ter sig omöjlig att införa utan landets medverkan. Varken 1995 eller senare har det funnits förutsättningar för att få zonen till stånd



Status avseende Icke-spridningsavtalet (NPT) för världens stater 2026.

och frågan är fortfarande utestående. Det har skapat frustration över NPT hos delar av det så kallade globala syd (Latinamerika, Afrika, Oceanien och delar av Asien).

Frustrationen och missnöjet över frånvaron av denna mellanösternzon har parallellt förstärkts av en uppfattning om att de fem kärnvapenstaterna inte har implementerat sina åtaganden vad gäller nedrustning av kärnvapen. Även om antalet kärnvapen har minskat drastiskt sedan kalla kriget kvarstår fortfarande kärnvapen som en central del av kärnvapenstaternas avskräckning och försvar. Frasen ”den obestämda förlängningen av avtalet innebär inte ett obestämt innehav av kärnvapen” är ett typiskt uttryck som symboliserar frustration över utebliven nedrustning.

En annan kritik gäller hur Nato fördelar bördan av kärnvapen (*nuclear sharing*). Det innebär att det finns ett antal amerikanska flygburna kärnvapen utplacerade på vissa europeiska allierades territorier; stater som är icke-kärnvapenstater under NPT. Kritiken baseras på att det är piloter från dessa europeiska icke-kärnvapenstater som till sist avgör om kärnvapnet ska släppas från flygplanet och att det därmed bryter mot artikel I i NPT. Kritiken bortser dock från att det endast är USA som kan avgöra om landets kärnvapen ska kunna explodera, liksom det historiska faktum att fördelningen av bördor redan fanns och accepterades när texten i NPT förhandlades fram. Det finns därför inte någon artikel som nämner ett förbud mot utplacering av egna kärnvapen på andra territorier, även om det finns andra avtal som förbjuder utplacering av kärnvapen i andra domäner; ett exempel är Rymdfördraget (*The Outer Space Treaty*) som förbjuder massförstörelsevapen i omloppsbana runt jorden eller utplacering på andra himlakroppar. Kritiken mot Natos bördefördelning av kärnvapen saknar alltså legal grund, och ska snarare ses som politiskt motiverad kritik. Det är också värt att notera att det finns en liknande bördefördelning av ryska kärnvapen mellan Ryssland och Belarus.

Som tidigare nämnts finns ett överlapp mellan fredlig användning och militär tillämpning för vissa kärntekniker. Det har resulterat i en oro för att icke-kärnvapenstater ska utveckla kärnvapen och använda fredlig användning av kärnteknik som en täckmantel. Det ska i sammanhanget understrykas att det inte finns några ramar för hur den fredliga användningen inom NPT i praktiken ska utformas, så länge den rapporteras till IAEA och är underställd IAEA *safeguards*. Inom ramen för dessa villkor går det till exempel att framställa *höganrikat* uran (uran med en halt uran-235 över 20 procent, vilket även innefattar vapenuran) i stora mängder, utan att det finns några trovärdiga civila tillämpningar. Samtidigt som mängderna höganrikat uran med i princip väldigt kort förvarning skulle kunna användas för framställning av kärnvapen. Det finns också flera fall där icke-kärnvapenstater har ägnat sig åt fördold utveckling av kärnvapen. Tre konkreta exempel är Irak, Iran och Syrien.

Oron har medfört att stater som tillverkar utrustning och material för kärnteknik, eller andra produkter av relevans för framställning av kärnvapen, har infört gemensam exportkontroll av dessa produkter och material för att säkerställa att mottagarens användning verkligen syftar till fredliga ändamål. Detta har samtidigt lett till kritik mot att exportkontrollen därmed begränsar den oinskränkta rätten till fredlig användning och således står i strid mot NPT.

Sammantaget finns utmaningar för NPT vad gäller implementeringen av alla tre delar av avtalet; nedrustningsåtagandet, förhindrandet av kärnvapenspridning och synen på den fredliga användningen. Med det sagt ser statsparterna fortfarande NPT som ett ovärderligt avtal. Samtidigt har många staters uppfattning om utebliven kärnvapennedrustning drivit fram ett annat avtal som förbjuder utveckling och innehav av kärnvapen, det så kallade ”förbudsavtalet”, *Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons* (TPNW). Avtalet växte fram ur ett etiskt och moraliskt perspektiv på konsekvenserna av användning av kärnvapen och förhandlades fram inom ramen för FN år 2017. Avtalet trädde i kraft 2021. Även om inga kärnvapenstater har visat någon vilja att ansluta sig till TPNW är avtalet ett faktum och något som måste tas hänsyn till, särskilt i relation till NPT.

Förmåga och doktrin – relationer mellan kärnvapenstater

En stats kärnvapendoktrin är de syften och militära uppdrag som landets kärnvapen har. Bland syftena kan särskilt nämnas avskräckning visavi antagonistiska stater, försäkran till allierade (speciellt icke-kärnvapenstater) och en gardering mot en osäker framtid. De militära uppdragen inbegriper hur och när kärnvapen kan sättas in samt val av mål.

Som diskuterats i tidigare kapitel ligger staters tekniska förmågor till kärnvapen som grundval för de doktriner som står till buds. Samtidigt är den valda kärnvapendoktrinen också ett resultat av både de egna och andra staters samlade förmågor. Med samlad förmåga avses både icke-militära förmågor, till exempel ekonomiska eller diplomatiska, och militära förmågor, såväl konventionella som kärnvapen, i alla domäner där en konflikt kan uppstå och/eller eskalera. Med domän avses något förenklat ett specifikt område där en konflikt kan äga rum. Det kan till exempel vara till lands, till sjöss eller i luften, och i dag räknas även rymden och cybervärlden som domäner.

Syften och militära uppdrag är överlappande och förstärker varandra. En trovärdig avskräckning kräver att det finns militära uppdrag och system för implementering. Samtidigt behöver de militära uppdragen utformas i linje med syftet ifall avskräckningen fallerar.

Samtidigt finns det en fara med en alltför precis eller (över)tydlig kärnvapendoktrin, eftersom det kan inbjuda motståndare att använda militära medel i en konflikt så att skadan som orsakas är precis under konfliktnivån där kärnvapen kan användas. Det finns därför ett behov av en viss avsiktlig otydlighet i kärnvapenavskräckningen.

Konflikter kan beskrivas utifrån konfliktnivå. De låga konfliktnivåerna innefattar till exempel ekonomiska handelshinder (som sanktioner) eller påverkansoperationer. En konflikt som eskalerar till högre nivåer inkluderar användande av militära medel. Sådana militära medel inbegriper både konventionella och icke-konventionella vapensystem. Till den senare kategorin hör olika massförstörelsevapen, i det här sammanhanget speciellt kärnvapen.

Synen på kärnvapen präglas av bilden att de är reserverade för konflikter där väsentliga eller kritiska värden för en kärnvapenstat står på spel. Det betyder inte att de nödvändigtvis endast kan användas sent i en militär konflikt, när alla andra militära möjligheter är fullständigt uttömda. Kärnvapen kan användas redan innan faktum har fullbordats om en konflikt eskalerar till en nivå där någon part uppfattar att det fortsatta förloppet med all sannolikhet kommer att sätta fundamentala säkerhetsintressen på spel.

Kärnvapen skiljer sig ändå från övriga vapensystem eftersom sprängkraften är mycket större än för konventionella vapen. Om medlen vida överstiger målet – vad som finns att vinna – finns risken att svaret från den attackerade parten överstiger vad attackerande part självt är beredd att betala. Om mål och medel inte är i samklang minskar också kärnvapenavskräckningens trovärdighet. Det finns således skäl till att inte hota med kärnvapenanvändning vid varje låg konfliktnivå, då är risken snarare att det underminerar avskräckningen även på högre konfliktnivåer. Beträffande användning av kärnvapen finns också en osäkerhet i hur en militär konflikt skulle utvecklas om den så kallade kärnvapentröskeln överstigs. Risken för att en första användning av kärnvapen skulle eskalera konflikten till ett globalt kärnvapenkrig har sannolikt bidragit till en återhållsamhet kring användande av kärnvapen. Det har också gett upphov till begreppet kärnvapentabu som hävdar att återhållsamheten även har moraliska och normativa grunder. Som diskuterats ovan var detta synsätt drivande för tillkomsten av TPNW.

Ubåtar som drivs med kärnreaktorer och är bestyckade med kärnvapen är en viktig komponent i alla de erkända kärnvapenstaternas avskräckningsförmåga. Här den amerikanska ubåten USS Tennessee. Foto: United States Federal Government (public domain).

Nuvarande kärnvapenstater

I detta avsnitt beskrivs översiktligt stater som innehar kärnvapen, såväl de som erkänts enligt NPT som de som står utanför NPT – och därför har kunnat utveckla kärnvapen utan att bryta mot några formella åtaganden – och Nordkorea.

USA

USA var det land som först utvecklade kärnvapen. De amerikanska kärnvapnen har under lång tid inte bara varit avsedda för att försvara det egna landet, även om det har varit det primära motivet. Landets kärnvapen har också ingått i försvaret av andra stater, till exempel allierade i Nato och vissa stater i västra Stilla havet som Sydkorea. Skyddet av andra länder går under namnet *utökad avskräckning* eller mer vardagligt att länderna är under USA:s *kärnvapenparaply*.

För en trovärdig avskräckning såväl av det egna landets behov som i den utökade bemärkelsen har USA utvecklat en diversifierad kärnvapenarsenal. De amerikanska kärnvapnen kan förenklat beskrivas som bestående av två delar; en med global och en med regional räckvidd.

Systemen med global räckvidd brukar benämnas strategiska kärnvapen. I USA:s fall består den strategiska kärnvapenarsenalen av tre komponenter, en *triad*. I triaden ingår stationära, landbaserade robotar som är placerade i underjordiska silor, robotar på kärnkraftsdrivna ubåtar och kärnvapenbestyckade bombflygplan med lång räckvidd.

Den andra delen av kärnvapenarsenalen med regional räckvidd kallas sub-strategiska eller taktiska kärnvapen. De har historiskt varit placerade på olika vapenbärare som typiskt också har kunnat ha konventionell bestyckning. På senare tid har dock de enda sub-strategiska kärnvapnen i den amerikanska arsenalen varit olika varianter av frifallsbomber.

Det totala antalet kärnvapen i USA:s arsenal har minskat drastiskt sedan kalla kriget. För att ge ett exempel var det maximala antalet kärnvapen i USA:s arsenal över 31 000 (åren 1965–1967), medan år 2020 var arsenalen under 4 000. Även om den minskningen inte varit direkt knuten till förhandlingar inom ramen för NPT är det otvivelaktigt i linje med vad USA åtagit sig enligt artikel VI i NPT.

Ryssland

Liksom USA har Ryssland en kärnvapenarsenal som består av såväl strategiska som sub-strategiska kärnvapen.

Både Rysslands och USA:s kärnvapenarsenaler har präglats av kärnvapen som ansågs nödvändiga under kalla kriget. Efter Sovjetunionens sönderfall ärvde Ryssland Sovjetunionens alla kärnvapen. Övriga sovjetiska delrepubliker, som bröt sig loss och blev självständiga länder, återförde de kärnvapen som befunnit sig på respektive territorium till Ryssland. Särskilt värt att nämna är den så kallade Budapestuppgörelsen, där Belarus, Kazakstan och Ukraina utlovades säkerhetsgarantier i utbyte mot att de gav upp sina kärnvapen.

Rysslands strategiska kärnvapen består, liksom USA:s, av en triad: markbaserade interkontinentala robotar, kärnkraftsdrivna ubåtar bestyckade med robotar och bombflygplan med lång räckvidd. En skillnad mellan länderna är dock att Ryssland, utöver stationära landbaserade robotar, även innehar mobila, landbaserade system. De mobila kärnvapnen på land, liksom ubåtarna, anses ha en högre sannolikhet att överleva en attack. Att kunna slå tillbaka med kraft, trots att man blivit angripen brukar kallas för *andraslagsförmåga*. Det är tänkt att öka avskräckningens trovärdighet och minska risken för att en motståndare ska starta en attack.

Rysslands sub-strategiska kärnvapen består, till skillnad från USA:s, fortfarande av en mängd olika typer av vapenbärare för olika ändamål. På ett övergripande plan beror Rysslands omfattande sub-strategiska kärnvapenarsenal på hur landet uppfattar hotet mot landet och vilka övriga medel man förfogar över.

Det är i sammanhanget värt att nämna de unilaterala men ömsesidiga utfästelser som USA och Sovjetunionen/Ryssland åtog sig avseende sub-strategiska kärnvapen under de så kallade

Presidential Nuclear Initiatives, PNI. Kortfattat bestod PNI av ett antal politiska åtaganden för att eliminera, minska och dra tillbaka olika typer av sub-strategiska kärnvapen. Ryssland har, till skillnad från USA, sannolikt inte uppfyllt sina åtaganden kring PNI, men precis som USA har Ryssland markant minskat sin kärnvapenarsenal sedan kalla krigets slut.

Kina

Idag är Kina en av de största stormakterna oavsett måttstock. Det skiljer sig från tiden under kalla kriget och har påverkat, och påverkar, Kinas kärnvapenarsenal.

Historiskt har Kinas kärnvapenarsenal bestått av en begränsad mängd landbaserade interkontinentala robotar med relativt dålig precision, men bestyckade med kärnvapen med väldigt höga laddningsstyrkor. Den konfigurationen hade sin grund i att Kina inte hade förmågan att delta i USA:s och Sovjetunionens kapprustning. Det medförde i sin tur att Kina formulerade sin doktrin i termer av minimal avskräckning. Fokus var inte kärnvapenbekämpning av en motståndares militära mål, utan de egna kärnvapnen var snarare tänkta som ren vedergällning mot civila mål, även kallat *värdemål*. Samtidigt uttalade Kina att man aldrig skulle vara först med att använda kärnvapen (*no first use*-policy).

Sedan Kina öppnade upp sin ekonomi efter kalla krigets slut har landets ökande ambitioner också medfört en förändrad kärnvapenarsenal, både kvalitativt och kvantitativt. Ökningen är kvalitativ i meningen att antalet olika kärnvapenbärare ökar med införandet av en kärnvapentriad, dock med de landbaserade styrkorna som den starkaste delen. Därtill kommer utvecklingen av viktiga förmågor såsom robotar med flera stridsspetsar och robotar med kortare räckvidder för regionalt bruk. Ökningen är också rent kvantitativ eftersom Kinas antal kärnvapen ökar. Kina anses i dag inneha den tredje största kärnvapenarsenalen i världen efter Ryssland och USA, och den fortsätter att expandera.

Kinas expanderande kärnvapenarsenal reser ett antal frågor. Dessa blir mer trängande i ljuset av Kinas brist på transparens och ovilja att ens erkänna att en sådan uppbyggnad pågår. Det Kina *kan* erkänna är sin egen modernisering av system för tidig varning, ökande möjligheter för landets robotar att agera snabbt, penetrera försvar och att arsenalen har ökat sin förmåga till överlevnad.

Givet Kinas förbättringar och uppbyggnad av arsenalen finns det en diskrepans mellan den deklarerade inställningen och vad Kina egentligen anser vara en *minimal avskräckning* samt vad de anser krävs för att delta i en kapprustning. Det uppstår tvivel när deklarationerna och den faktiska förmågan inte helt överensstämmer. Även om Kina också fortfarande förfäktar sin *no first use*-policy och även föreslår att alla andra kärnvapenstater ska följa Kinas exempel saknar en sådan hållning förutsägbarhet och beständighet, då den bara är giltig fram till att ett annat beslut fattas.

Storbritannien

Storbritanniens kärnvapenarsenal har under lång tid präglats av samarbetet med USA på området, som en del av *den speciella relationen* länderna emellan.

Sedan kalla krigets slut har landet minskat sina kärnvapenförmågor och arsenalen består i dag av strategiska kärnvapen på kärnkraftsdrivna ubåtar. Det typiska är att endast en ubåt i taget är ute på patrull.

Även om beslut om användning av brittiska kärnvapen tas nationellt är Storbritanniens kärnvapen också en del av Natos avskräckning och försvar. Kalkylen kompliceras för en motståndare eftersom de brittiska kärnvapnen kompletterar USA:s utökade avskräckning inom Nato. Det gör att det i princip är två oberoende beslut för kärnvapenanvändning att ta hänsyn till.

Frankrike

Frankrikes kärnvapenprogram växte fram med erfarenheterna av de två världskrigen och de prekära situationer landet då befann sig i, vilket medförde att landet inte litade på att de amerikanska kärnvapnen skulle fungera som avskräckning i Västeuropa.

Denna inställning har också lett till att de franska kärnvapnen står utanför Natos struktu-

rer. Samtidigt uttrycker Frankrike att det finns en europeisk dimension, även om landets kärnvapen är till för att skydda det egna landet och dess vitala intressen. Det är inte helt klart vad som ingår i denna europeiska dimension och under vilka förhållanden de franska kärnvapnen skulle användas. Som redan diskuterats är det dock en typisk avsiktlig otydlighet för att komplicera en motståndares kalkyl. För konflikter med eller i Västeuropa behöver en motståndare ta hänsyn till beslut såväl i Washington som i London och Paris.

Frankrikes kärnvapenarsenal består, liksom Storbritanniens, av strategiska kärnvapen på ubåtar, men Frankrike har även flygbaserade kärnvapen.

Som två europeiska kärnvapenstater med stor samsyn, men samtidigt begränsade resurser, har Storbritannien och Frankrike på senare år inlett samarbeten på kärnvapenområdet. Det gäller dels rent tekniska samarbeten kring säkerhet, certifiering och fysikaliska studier av kärnvapen, dels koordinering av kärnvapenavskräckningen.

För både Frankrike och Storbritannien är antalet kärnvapen i respektive land färre än vad till exempel USA har. Det betyder att Frankrike och Storbritannien inte kan ha samma kärnvapenhållning som USA har, nämligen att framför allt använda kärnvapenarsenalen till att bekämpa en motståndares militära mål. I stället är staternas mål med kärnvapen att tillfoga en motståndare oacceptabel skada om avskräckningen fallerar. Det kan inkludera militära mål, men även politiska och ekonomiska centrum kan vara måltavlor.

Övriga stater

De fem kärnvapenstater som hittills har diskuterats är de enda erkända enligt NPT. Utöver dessa fem stater finns ytterligare några som innehar kärnvapen, som har valt att stå utanför avtalet.

I Indiens fall är kärnvapenprogrammet delvis en fråga om ett nationellt, vetenskapligt och tekniskt framåtskridande. Till detta kommer misstänksamheten mot grannlandet och kärnvapenstaten Kina, vilket har drivit utvecklingen av robotar med längre räckvidd. En annan faktor är gränskonflikterna med grannlandet Pakistan, som också har kärnvapen.

För Pakistan är å andra sidan kärnvapen en militär förmåga för att avskräcka och försvara sig mot Indien. Kärnvapen är attraktiva för Pakistan eftersom Indien har överlägsna konventionella förmågor samtidigt som Pakistan geografiskt saknar ett strategiskt djup om de skulle bli anfallna.

Israels geografiska läge och storlek gör landet utsatt för militära konflikter med länder och militanta rörelser i regionen. Kärnvapen kan i det sammanhanget fungera som avskräckning och försvar om landets existens vore hotat.

Nordkorea betraktar kärnvapenarsenalen som en garanti för regimens överlevnad. Trots årtionden av diplomatiska försök har Nordkoreas arsenal kontinuerligt vuxit, om än från väldigt låga nivåer. Nordkorea är det enda land som på 2000-talet har provsprängt kärnvapen. Landet har satsat betydande resurser på att utveckla en relativt diversifierad arsenal med robotar som har kort, medellång och lång räckvidd. Möjligen förfogar Nordkorea även över fusionsvapen.

Rustningskontroll

I kapitlet *Kärnvapenstrategier* beskrevs att avskräckning och försvar är medel och metoder som kan ingå i en stats strategi. De kan ses som verktyg för att uppnå stabilitet gentemot en motståndare. Samtidigt kan ett alltför stort fokus på avskräckning i själva verket bidra till instabiliteter. Avskräckningen kan till exempel bidra till en fortsatt kapprustning om motståndaren upplever att deras avskräckande förmåga då också måste öka. Om de militära förmågorna upplevs som alltför obalanserade kan det dessutom skapas drivkrafter att vara först med att antingen använda militärt våld eller eskalera konflikten.

Sovjetunionens ledare Leonid Brezjnev och USA:s president Richard Nixon vid förhandlingsbordet under Washington Summit 1973. Foto: United States Federal Government (public domain).

Ett annat verktyg som bidrar till stabilitet är *rustningskontroll*, vilket typiskt är ett formellt bindande avtal som reglerar vissa slags militära förmågor mellan två eller fler parter. Samtidigt är det värt att hålla i minnet att andra överenskommelser, som skapar förtroende eller minskar risker, kan understödja och förstärka värdet av rustningskontrollen.

Stabilitet uppnås genom att kombinera å ena sidan avskräckning och å andra sidan rustningskontroll. Det är två verktyg som kompletterar, inte ersätter, varandra för ett gemensamt mål. Kombinationen är inte statisk över tid, utan behöver utformas efter såväl den säkerhetspolitiska situationen som den tekniska utvecklingen. Det betyder också att den måste ta hänsyn till eventuella regionala skillnader.

Både avskräckning och rustningskontroll måste ta hänsyn till det säkerhetspolitiska läget, inte bara hur de fungerar tillsammans utan också var för sig. Att avtal för rustningskontroll inte är statiska betyder till exempel att de recept som var framgångsrika under kalla kriget eller under perioden just därefter inte nödvändigtvis är det längre. Med den brasklappen är det trots allt av intresse att diskutera några tidigare avtal för rustningskontroll.

ABM

ABM-avtalet, *Treaty on the Limitation of Anti-Ballistic Missile Systems*, ingicks mellan USA och Sovjetunionen 1972 och var en del av andra, parallella diskussioner om en begränsning av kärnvapenkapprustningen. Avtalet begränsade parternas system för att försvara sig mot inkommande ballistiska robotar. ABM-avtalet hade som uttalat syfte att minska incitamenten för upprustning av offensiva strategiska kärnvapen genom att sänka nivån som krävdes för att övervinna motåtgärder mot ett strategiskt anfall.

Begränsningarna i robotförsvar sker alltså på bekostnad av minskade möjligheter att skydda sig. Å andra sidan gör avtalet avskräckning mer trovärdig och bidrar till strategisk stabilitet eftersom det minskar problemen som nämns ovan.

ABM-avtalet var också helt i linje med den övergripande doktrinen om ömsesidig garanterad förstörelse, MAD (*Mutually Assured Destruction*). Den hade växt fram mellan USA och Sovjetunionen i takt med ökande kärnvapenarsenaler och möjligheten att avfyra robotar mellan kontinenter.

USA lämnade avtalet 2001, då den amerikanska utvecklingen kring robotförsvar börjat nå en nivå vars fortsättning krävde aktiviteter som inte längre var förenliga med avtalet. Det var också under en tidsperiod efter kalla kriget när USA:s fokus istället för stormaktsrivalitet låg på bekämpning av så kallade ”skurkstater” och icke-statliga aktörer.

INF

När avtalet *Intermediate range Nuclear Forces* (INF) trädde i kraft 1 juni 1988 präglades Europa av de så kallade *euromissilerna*. Utvecklingen började med att Sovjetunionen ersatte åldrade medeldistansrobotar, vilket betydligt höjde deras förmåga. Natos svar blev det så kallade *dubbelbeslutet* i december 1979. Det gick ut på att Nato placerade ut medeldistansrobotar i Västeuropa samtidigt som man ville förhandla om dessa.

Syftet med avtalet kan sägas ha varit att i någon mån ta bort Europaperspektivet från den strategiska ekvationen mellan USA och Sovjetunionen. Avtalet ansågs leda till att risken för kärnvapenkrig i Europa inte längre var lika överhängande. INF-avtalet gjorde avståndet större mellan en väpnad konventionell konflikt i Europa och strategiskt kärnvapenkrig genom att ta bort många sub-strategiska kärnvapen.

Avtalet förbjöd markbaserade robotar med en räckvidd om 500 till 5 500 kilometer och samtliga sådana amerikanska och sovjetiska system nedrustades. Även om avtalets namn förefaller att syfta på kärnvapenbestyckade medeldistansrobotar omfattade rustningskontrollen även konventionella markbaserade system med dessa räckvidder.

När USA gick ifrån ABM-avtalet och förde fram planer på ett robotförsvar i Europa ansåg Ryssland att de behövde nya markbaserade robotar med eller utan kärnvapen. Därför bröt de mot avtalet och började åter igen utveckla robotsystem inom den räckvidd som INF förbjöd. Trots flera års ansträngningar av USA för att få Ryssland att åter följa avtalet fortsatte den ryska utvecklingen av robotar som bröt mot INF. Det ledde till att USA till slut gick ifrån avtalet i början av 2019.

Start och Nya Start

Start-avtalen utgjordes av flera olika delar som förhandlades under olika tidsperioder, men endast Start I och Nya Start *ratificerades* (godkändes formellt av avtalsparterna) och implementerades. Båda avtalen var bilaterala och begränsade USA:s och Rysslands strategiska kärnvapen. Start I-avtalet trädde i kraft 1994 och löpte under 15 år med en möjlighet att förlänga avtalet i 5 år. Start I löpte dock ut i december 2009 eftersom förhandlingar pågick om Nya Start. Det undertecknades våren 2010 och löpte, efter en femårig förlängning, i sin tur ut i februari 2026.

Båda avtalen definierade vad som menas med *strategiska kärnvapen*. Det inkluderar interkontinentala ballistiska robotar, ballistiska robotar avfyrade från kärnkraftsdrivna ubåtar och bombflyg med lång räckvidd. I Nya Start fanns bara en begränsning som bygger på totala antalet system medan Start I också innehöll begränsningar för de olika systemen, till exempel maximala antalet stridsspetsar på land, inklusive antalet mobila system, och ubåtsbaserade ballistiska robotar.

Tillsammans med INF innehöll de båda Start-avtalen mekanismer för att verifiera att motparten efterlevde avtalet. I Start-avtalen fanns regler om när och hur den ena avtalsparten skulle informera den andra om förändringar, som förflyttningar av objekt. Det skiljer sig från INF, som inriktade sig på nedrustning, där en hel klass av robotar förstördes.

Sammanfattningsvis var både Start I och Nya Start avtal för rustningskontroll av strategiska kärnvapen som också bidrog till stabilitet. Samtidigt finns några skillnader mellan de två avtalen som visar att uppfattningen om vad som utgör stabilitet inte behöver vara statisk över tid. Åtminstone kan flexibiliteten vara större över tid än vad som förmodades från början. Det gäller till exempel synen på begränsningar av olika strategiska delsystem i arsenalen.

CTBT

Det fullständiga provstoppsavtalet, *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty* (CTBT) tillkom 1996 och förbjuder alla provsprängningar av kärnvapen. Tidigare hade det förvisso funnits avtal som förbjöd vissa typer av provsprängningar, till exempel det partiella provstoppsavtalet *Partial Test Ban Treaty* (PTBT) från 1963 som förbjöd alla prov utom de som genomfördes under jord samt det efterföljande bilaterala avtalet *Threshold Test Ban Treaty* (TTBT) mellan USA och Sovjetunionen. Det förbjöd också underjordiska provsprängningar med en laddningsstyrka över 150 kiloton. CTBT är dock heltäckande och medger inga undantag.

Ett av motiven för tillkomsten av CTBT är att försvåra utvecklingen av helt nya modeller av kärnvapen eftersom de då inte kan verifieras genom att provsprängas. I den meningen fungerar avtalet som ett hinder för utvecklingen av kärnvapenförmågan, om än inte som formell rustningskontroll.

Även om CTBT inte nödvändigtvis omöjliggör små ändringar av existerande kärnvapen har de fem kärnvapenstaterna i praktiken behövt fortsätta använda de stridsspetsar som redan utvecklats och provats. CTBT förbjuder inte att ett kärnvapens olika komponenter provas, till exempel så kallade subkritiska prov av fissilt material, utan att själva fissionskedjorna blir självuppehållande. Tillsammans med datormodelleringar har subkritiska prov blivit viktiga verktyg för att försäkra sig om att arsenalen fortsätter att vara funktionsduglig, vilket förstärker avskräckningens trovärdighet.

Det är i sammanhanget viktigt att understryka att CTBT endast handlar om stridsspetsen. Det finns ingenting i CTBT som hindrar utveckling av nya vapenbärare, till exempel robotar med bättre precision.

Det finns några speciella komponenter i avtalets konstruktion. Till att börja med innehåller inte avtalet någon definition av vad som rent tekniskt avses med ett kärnvapenprov. Det ledde till att USA, Storbritannien och Frankrike definierade all frigjord kärnenergi från kritiska massor (självuppehållande fissionskedjor), som en provsprängning. Det kallas för *zero yield*-standarden, medan Ryssland och Kina inte explicit uttryckt det så. Detta har medfört anklagelser om att Kina och Ryssland har utfört prov av olika komponenter, där det frigörs (en förhållandevis väldigt liten mängd) kärnenergi. Det skulle i så fall bryta mot CTBT om man anammar *zero yield*.

En annan egenhet med avtalet är mekanismen för att det ska träda i kraft. Det kräver att 44 stater (annex II-staterna) med tillräckligt omfattande kärnteknisk verksamhet skriver under och ratificerar avtalet. Där ingår Sverige, men av större intresse är förstås kärnvapenstaterna. Storbritannien och Frankrike har skrivit under och ratificerat. USA, Kina och Israel har skrivit under, men inte ratificerat, medan Ryssland har ratificerat, men sedan dragit tillbaka denna ratificering. Indien, Pakistan och Nordkorea har inte ens skrivit under.

Trots att CTBT således inte trätt i kraft har ingen av de fem enligt NPT erkända kärnvapenstaterna utfört en fullskalig provsprängning sedan mitten av 1990-talet. Som nämnts tidigare är det endast Nordkorea som har gjort det under 2000-talet. Avtalet har därmed lyckats höja den politiska kostnaden för provsprängningar och i mångt och mycket lyckats etablera en norm mot provsprängningar av kärnvapen.

Slutligen finns det ett omfattande verifikationssystem till CTBT för att upptäcka och lokalisera provsprängningar med olika fysikaliska metoder. Detta diskuteras närmare i kapitlet *Upptäckt av kärnvapenexplosioner.* ■

Kärnvapenverkan

Vapenverkan är den effekt ett vapen har för att skada eller på annat sätt påverka ett mål och innefattar till exempel stötvågsverkan och splitter för konventionella stridsdelar. En kärnvapenexplosion ger upphov till flera fysikaliska fenomen och verkansformer som inte förekommer vid konventionella explosioner. Dessa verkansformer beror både på kärnreaktionerna och på den frigjorda energins växelverkan med omgivningen. Verkansformerna för ett kärnvapen beror därför till viss del på var explosionen sker. I till exempel luft ger den extremt höga temperaturen upphov till ett hastigt växande klot av mycket het och lysande luft, det så kallade eldklotet.

Kärnvapenexplosioner kan delas in i *markexplosioner*, som sker direkt på eller nära markytan, *luftexplosioner* som sker på sådan höjd att eldklotet inte når markytan, och *höghöjdsexplosioner* som sker på mycket hög höjd i eller ovanför stratosfären. Dessutom tillkommer kärnvapenexplosioner i vatten, medan inneslutna underjordsexplosioner förekommer vid kärnvapenprov. Viktiga skillnader mellan luft- och markexplosioner är att en markexplosion också skapar en direkt stötvåg i marken, en krater och omfattande radioaktivt nedfall.

Laddningsstyrka är den mängd energi som frigörs vid en explosion. För kärnvapen mäts laddningsstyrkan vanligen i enheten kiloton (kt). Ett kiloton är den mängd energi som avges av 1 000 ton av explosivämnet trotyl (TNT). För stora laddningsstyrkor används även enheten megaton (Mt), där 1 megaton är 1 000 kiloton. Laddningsstyrkan hos de kärnvapen som användes mot Japan i slutet av andra världskriget var cirka 15–20 kiloton, men kärnvapen med styrkor mindre än 0,1 kiloton och större än 50 megaton har provsprängts. Ett annat centralt begrepp inom kärnvapenverkan är *nollpunkt*, vilket är punkten på mark- eller vattenytan rakt under en explosion (rakt över för en explosion under ytan). För en explosion direkt på marken sammanfaller således nollpunkten med explosionspunkten.

Verkansformer som kan uppstå vid kärnvapenexplosioner

- Värmestrålning
- Luftstötvåg
- Markstötvåg
- Joniserande initialstrålning
- Elektromagnetisk puls
- Radioaktivt nedfall och andra kvarvarande effekter

Explosionsförloppet

Det övergripande explosionsförloppet är oberoende av om energin frigörs via ren fission eller både fission och fusion. Frigörelsen av energi är så kraftig och sker så hastigt att hela vapnet förgasas innan omgivningen över huvud taget hinner påverkas. Vapnets material slås sönder till fria atomer som joniseras och bildar ett plasma. Kärnreaktionerna ger också upphov till en skur av neutroner och gammafotoner. Dessa bildar en stark, omedelbar strålning: den *prompta* joniserande initialstrålningen. Tillsammans med det mycket heta plasmat som bildas vid explosionen är det källan till kärnvapnets *verkansformer* (effekter).

Vapenresternas temperatur beror på kärnvapnets laddningsstyrka och utformning, men en typisk temperatur är tiotals miljoner grader celsius. Den extremt höga temperaturen medför att en betydande andel av energin avges i form av röntgenstrålning från vapenresterna innan de hinner expandera ut i omgivningen. Medan de heta vapenresterna släpper igenom röntgenstrålningen, absorberas den i den kalla omgivande luften. Vid en luftexplosion absorberas således röntgenstrålningen nästan direkt av den omgivande luften och ger upphov till ett lager av mycket het luft. Röntgenstrålningen från vapenresterna fortsätter att flöda ut i den omgivande luften, som blir så upphettad att den i sin tur avger röntgenstrålning. Resultatet blir ett mycket snabbt växande strålningsklot av het luft som utgör den inledande fasen av eldklotets tillväxt. Hastigheten utåt är någon bråkdel av ljushastigheten och för en laddningsstyrka på 100 kiloton har strålningsklotet nått en radie på cirka 20 meter efter en mikrosekund (miljondels sekund).

Parallellt med strålningsklotets tillväxt leder det mycket höga trycket i vapenresterna till att de börjar expandera. Vapenresterna pressar luften

utåt och en sfärisk luftstötvåg bildas som liknar den vid en konventionell explosion. Stötvågen hinner ikapp strålningsklotets front och har då ett tryck på tiotusentals atmosfärer (tusentals megapascal). Den extremt kraftiga stöten gör att luften blir så upphettad att den börjar lysa. Värmestrålningen från vapenresterna innanför stötvågen blockeras tillfälligt av stötvågsfronten. För en betraktare på avstånd från explosionen når nu värmestrålningens intensitet ett första maximum. Eldklotet övergår från att växa på grund av strålning, till att växa av stötvågens upphettning. För en laddningsstyrka på 100 kiloton sker denna övergång efter knappt en millisekund (tusendels sekund). Eldklotets yta utgörs nu av stötvågsfronten.

Den lysande stötvågsfronten sänder ut ljus och värmestrålning i omgivningen samtidigt som den absorberar värmestrålningen som kommer från det mycket heta området innanför. I takt med att energin går åt till att komprimera och hetta upp den omgivande luften avtar stötvågen i styrka. Stötvågsfrontens temperatur sänks och luften vid fronten släpper till slut igenom merparten av värmestrålningen från det fortfarande mycket heta området innanför. Detta kallas att luftstötvågen frikopplar från eldklotet. Det är först nu som större delen av värmestrålningen från eldklotet kan stråla ut och verka på längre avstånd i omgivningen – värmestrålningen når ett andra maximum.

I takt med att värmestrålningen flödar ut sjunker eldklotets temperatur. Till slut har eldklotet svalnat så pass mycket att det blir helt genomskinligt ända in till de förtunnade vapenresterna. Den varma luften och vapenresterna fortsätter att expandera och eldklotet blir så förtunnat att det stiger upp i atmosfären. Fissionsprodukterna i vapenresterna är i detta skede fortfarande mycket radioaktiva och fortsätter att avge joniserande initialstrålning, främst gammastrålning.

När eldklotet stiger i atmosfären för det med sig fissionsprodukterna som tillsammans med övriga vapenrester kyls ner, kondenserar och bildar små radioaktiva partiklar. Dessa partiklar utgör källan till kvarvarande strålning och eventuellt radioaktivt nedfall. Eldklotet löses upp efter cirka tio sekunder och explosionsmolnet blandas via turbulens med den omgivande luften, vilket i sin tur bildar det karaktäristiska svampmolnet. Efter runt tio minuter stannar svampmolnets tillväxt av, men molnet kan beroende på väder ses någon timme efter explosionen.

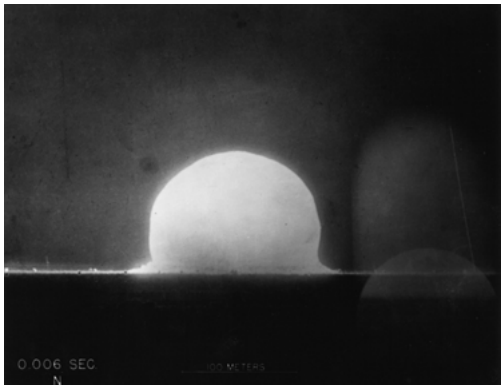
Direkta verkansformer

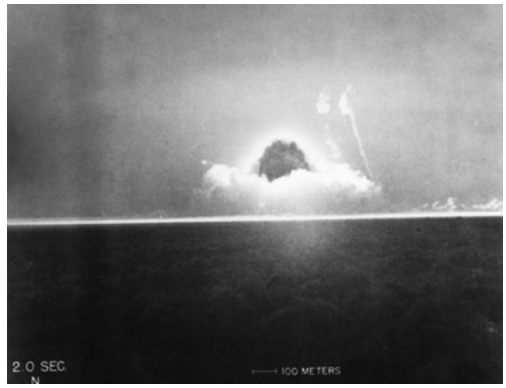
Eldklotet bildas och sänder ett intensivt bländande ljussken under några sekunder som, beroende på laddningsstyrka och väderförhållanden, kan ses på flera mils avstånd. **Värmestrålningen** från eldklotet kan tända bränder och ge direkta brännskador på människa.

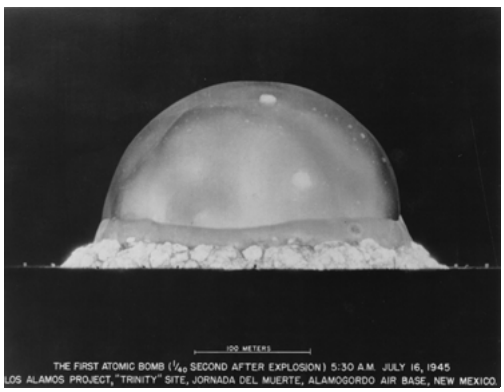
Stötvågen ger en mycket våldsam vindstöt som kan rasera byggnader och dra med sig stora mängder löst flygande material. På närmare avstånd kastar stötvågen omkull människor och kan uppfattas som en skarp knall. På längre avstånd hörs stötvågen som ett dovt muller.

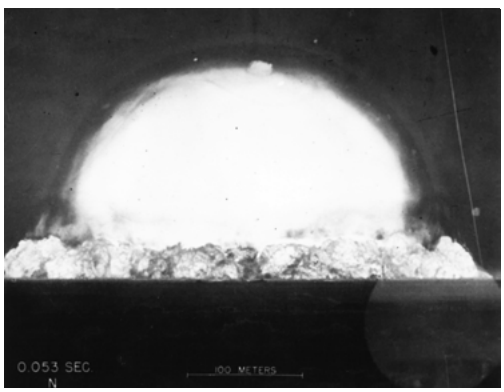
En intensiv **joniserande initialstrålning** sänds omedelbart ut vid explosionsögonblicket samt från de radioaktiva vapenresterna och ger framför allt akuta strålskador på människa. Initialstrålningen har stor genomträngningsförmåga och definieras som den joniserande strålning som sänds ut under den första minuten av explosionen.

Gammastrålningen som sänds ut omedelbart (prompta gammafotoner) växelverkar med omgivningen och ger upphov till en **elektromagnetisk puls** (EMP) som kan skada elnät och elektronik. EMP är den dominerande verkansformen vid en höghöjdsexplosion medan effekten är mer begränsad i andra fall. EMP vid markexplosion är en viktig verkansform mot särskilt välskyddade anläggningar.





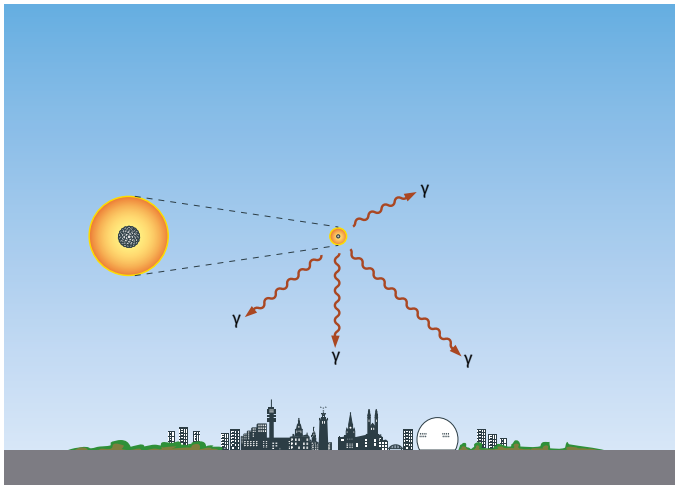




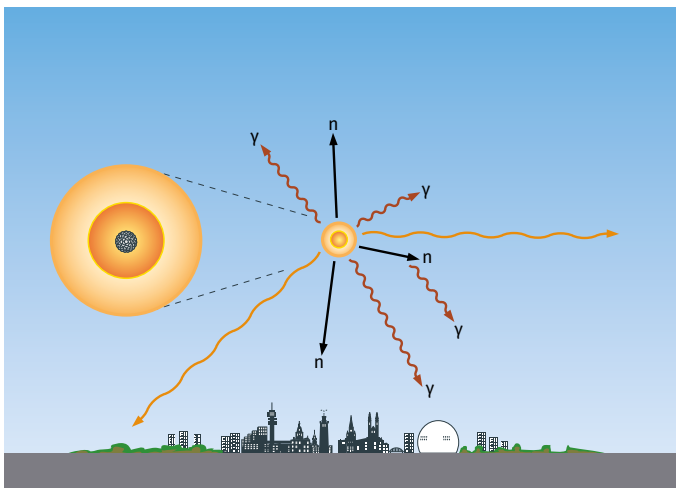
Bildsekvensen är tagen i samband med det första kärnvapenprovet Trinity den 16 juli 1945 och illustrerar eldklotets och stötvågens tillväxt samt eldklotets upplösning.

Foto: Berlyn Brixner, Los Alamos National Laboratory. United States Federal Government (public domain).

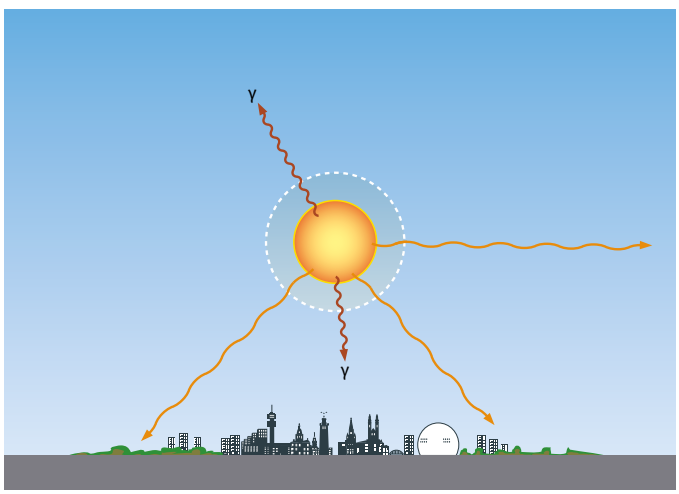
Utöver de direkta verkansformerna tillkommer kvarvarande strålning i form av eventuellt nedfall och neutronaktiverat material. Vid en luftexplosion kondenserar de radioaktiva ämnena till mycket små partiklar, som följer med det stigande molnet högt upp i atmosfären. Om explosionen däremot sker tillräckligt nära marken blandas markmaterial antingen direkt med de heta vapenresterna eller sugs upp i svampmolnet, där de blandas med fissionsprodukterna. Det ger upphov till betydande radioaktivt nedfall. Neutronaktiverat material bildas när ämnen i marken eller andra föremål tar upp neutroner från strålningen och blir radioaktiva.



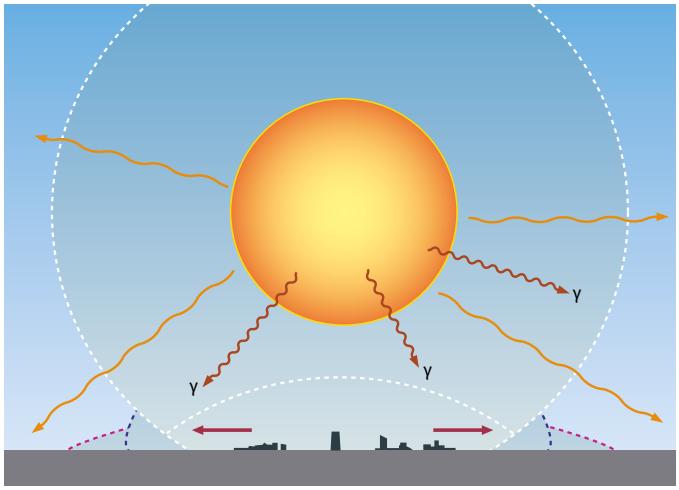
Eldklotet växer genom att värmestrålning tränger ut i den omgivande luften. Joniserande initialstrålning i form av gammafotoner strålar ut från eldklotet (röda vågiga linjer). I förstoringen syns eldklotet av luft (orange) upphettat av värmestrålning från vapenresterna (grått) i centrum.



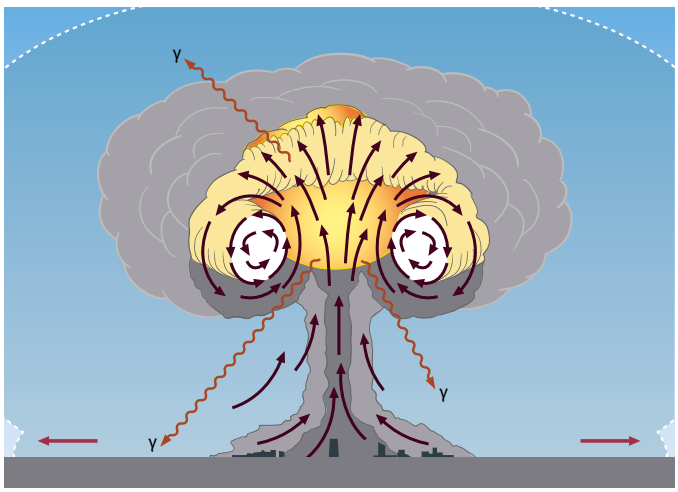
Eldklotet växer genom att en stötvåg rör sig utåt. Utöver gammafotoner (röda vågiga linjer), strålar även neutroner (svarta linjer) och värmestrålning (orange vågiga linjer) ut. I förstoringen syns eldklotet, som ytterst (gult) är luft upphettad av stötvågen. Innanför detta (orange) finns luft upphettad av värmestrålning från vapenresterna (grått) i centrum.



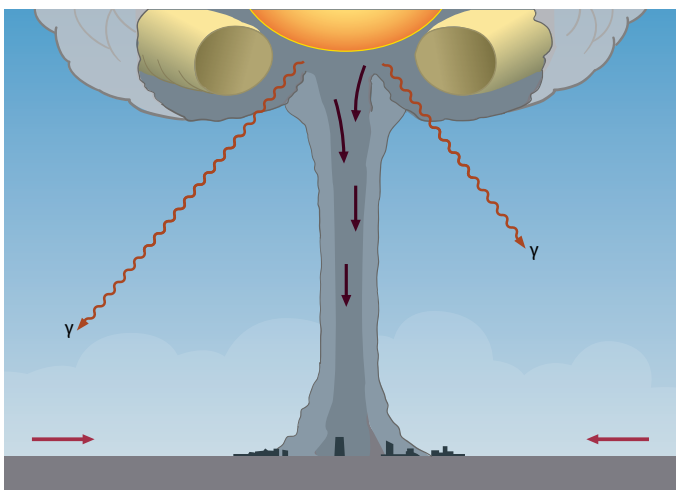
Stötvågens frikoppling sker när dess energi avtar (vit streckad linje). Då förmår stötvågen inte längre hetta upp luften till en temperatur där den strålar i synligt ljus. Däremot är de inre delarna av eldklotet fortfarande mycket heta, vilket resulterar i en värmepuls (orange vågiga linjer) som avger större delen av värmestrålningen från explosionen. Vapenresterna i eldklotet avger fortfarande gammastrålning (röda vågiga linjer).



Stötvågen reflekteras när den når markytan. Den reflekterade stötvågen går samman med den direkta stötvågen och ger en förstärkt stötvåg (blå streckad linje) längs markytan. Denna kallas för Mach-fronten. Under vissa omständigheter gör värmestrålningens upphettning att stötvågen kan röra sig snabbare nära marken (röd streckad linje). Denna förlöpare gör att stötvågen blir något svagare eftersom energin sprids över en större mängd luft.



Svampmolnet uppkommer eftersom den upphettade luften, inklusive vapenresterna, blir förtunnade av eldklotets expansion. Den varma förtunnade luften börjar snabbt stiga upp i atmosfären under kraftig omblandning och ett svampliknande moln bildas. En kraftig vind (röda raka pilar) blåser utåt längs marken, bakom stötvågen.



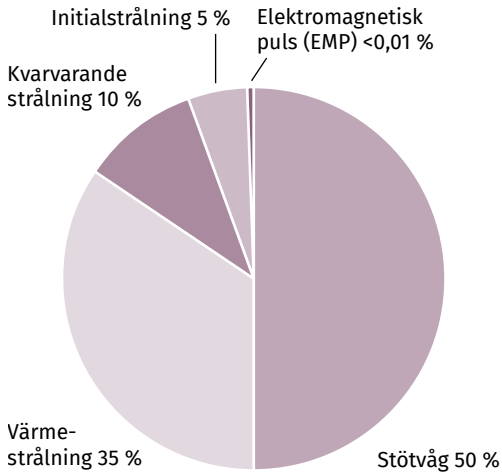
När eldklotet stiger upp i atmosfären bildas ett undertryck vid nollpunkten. Den utåtgående vinden från stötvågen avstannar och vänder in mot nollpunkten. Tyngre markmaterial som sugits upp i svampmolnets stam faller tillbaka mot marken.

Energifördelning mellan verkansformer

Hur energin fördelas mellan verkansformer beror på miljön där explosionen sker. Vid till exempel en kärnvapenexplosion under vatten absorberas både den joniserande initialstrålningen och värmestrålningen inom bara några meter. Dessa verkansformer uteblir helt om inte explosionen sker mycket nära vattenytan. Vid en kärnvapenexplosion i rymden uppkommer ingen stötvåg eftersom explosionen sker i ett vakuum.

Hur energin fördelas mellan värmestrålning och stötvåg bestäms för en luftexplosion av luftens fysikaliska egenskaper. Sammansättningen hos luft avgör hur värmestrålningen absorberas vid olika temperaturer och därmed vid vilken temperatur stötvågsfronten släpper igenom merparten av värmestrålningen. Den komplexa växelverkan mellan gammastrålning, värmestrålning och stötvågsfront leder i slutändan till att stötvågen innehåller ungefär en och en halv gånger så mycket energi som värmestrålningen. Detta gäller vid en luftexplosion; för en kärnvapenexplosion nära eller direkt på marken blir förhållandet något annorlunda. Strålningens växelverkan med marken, tillsammans med andra processer inuti eldklotet, påverkar händelseförloppet och ger upphov till en direkt markstötvåg. Utbredningen av eldklotet blir också förhållandevis större vid en markexplosion jämfört med en luftexplosion.

Hur stor andel av den totala energin som utgörs av joniserande strålning beror till stor del på kärnvapnets konstruktion. En tumregel för fissionsvapen är att joniserande initialstrålning utgör cirka fem procent av den totala energin, medan cirka tio procent frigörs i form av kvarvarande strålning från radioaktiva fissionsprodukter. För ett fusionvapen, där merparten av laddningsstyrkan kommer från fusion, är andelen gammastrålning från fission och fissionsprodukter avsevärt mindre. Men fusionen ger upphov till fler fria neutroner med hög kinetisk energi. Dessa ger i sin tur upphov till gammastrålning genom absorption och spridning i omgivande vapenmaterial och luft. Figuren illustrerar energifördelningen för luftexplosion av ett fissionsvapen.



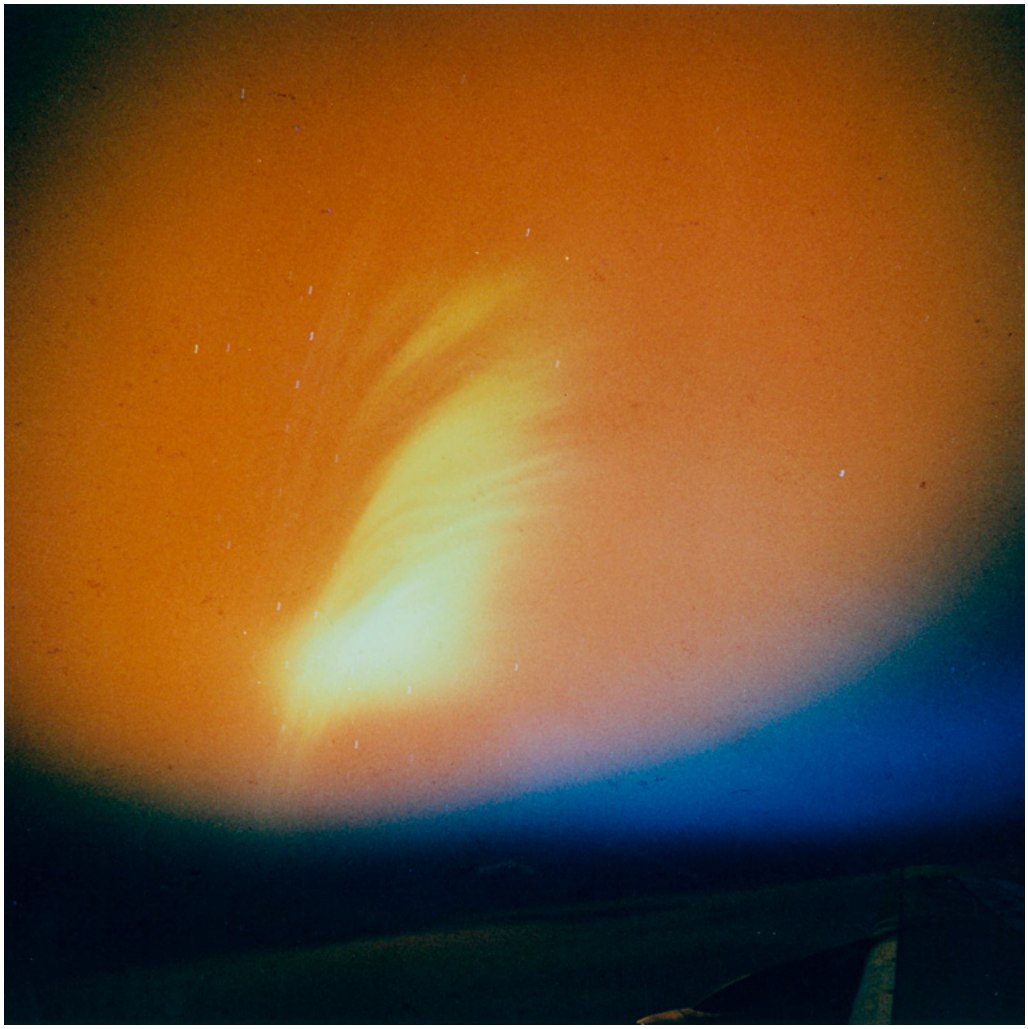
Energins fördelning mellan verkansformer för luftexplosion av ett fissionsvapen med styrkan tio kiloton.

Explosionstyper

Som nämnts tidigare kan kärnvapenexplosioner delas in i:

- markexplosioner direkt på eller nära markytan
- luftexplosioner som sker på sådan höjd att eldklotet inte når markytan
- höghöjdsexplosioner som sker i eller ovanför stratosfären
- vattenexplosioner, under vattenytan eller nära vattenytan
- underjordsexplosioner vid kärnvapenprov.

En avgörande skillnad mellan luft- och markexplosioner är att en markexplosion, utöver luftstötvågen, även ger upphov till en direkt markstötvåg och en krater bildas. En stor mängd markmaterial kastas upp och blandas med de radioaktiva vapenresterna, vilket leder till stora mängder lokalt radioaktivt nedfall. Nedfallet är generellt sett försumbart för explosioner som inte sker nära markytan, till exempel luftexplosioner som sker på sådan höjd att luftstötvågens verkan mot bebyggelse maximeras. Uppkomna bränder för dock med sig stora mängder sot upp i atmosfären och kan utlösa regn. Det kan sin



Höghöjdsexplosion med laddningsstyrka 1,4 megaton på 400 km höjd. På denna höjd sker explosionen utanför atmosfären, och eldklotets form påverkas främst av jordens magnetfält. Foto: United States Federal Government (public domain).

tur göra att radioaktiva partiklar faller ner till marken lokalt, även vid luftexplosioner.

Strålningsklotet och det omgivande stötvågsdrivna eldklotet blir större än vid en vanlig luftexplosion när explosioner sker högt uppe i atmosfären där luften är tunn. Värmestrålningen kommer också ha ett tydligt maximum, snarare än två distinkta pulser. För explosioner på hög höjd i, eller ovanför, stratosfären är effekterna av både luftstötvåg och värmestrålning försumbara vid jordytan. Verkan domineras i stället helt av den elektromagnetiska pulsen, så kallad höghöjds-EMP. Vid kärnvapenexplosioner på mycket höga höjder kan gamma- och röntgenstrålning skada satelliter eller stridsdelar, till exempel på inkommande ballistiska robotar.

Vid en kärnvapenexplosion under vatten absorberas både den direkta strålningen från kärnreaktionerna och röntgenstrålningen från vapenresterna inom några meter i det omgi-

Marknära explosion med laddningsstyrka 11 kiloton på 150 meters höjd. Notera att hela svampmolnet är brunaktigt, vilket indikerar att markmaterial beblandats med eldklotet. Foto: United States Federal Government (public domain).

vande vattnet. Värmestrålningen och stötvågen hettar upp, komprimerar och trycker ut vattnet. Det resulterar i en gasbubbla av vapenrester och expanderande vattenånga. Samtidigt breder stötvågen ut sig i den omgivande vattenmassan. Verkansförloppet är komplext och beror på både laddningsstyrka, explosionsdjup, vattendjup och bottens topografi. Stötvågen från explosionen kan ge upphov till ett vattenuppkast. Om explosionen sker förhållandevis nära vattenytan bryter gasbubblan ytan och ger upphov till ett enormt vattenuppkast där de radioaktiva vapenresterna sprids ut i luften. Jämfört med markexplosioner sprids då det lokala nedfallet generellt sett över en mindre yta men har en högre radioaktivitet. Det beror delvis på aktivering av olika salter i vattnet. Medan verkan av värmestrålning generellt sett är försumbar vid kärnvapenexplosioner

Luftexplosion med laddningsstyrka 19 kiloton på 300 meters höjd. Notera att markmaterialet (svampmolnets bruna ”stam”) inte når upp till eldklotsresterna (svampmolnets vita ”hatt”), vilket kännetecknar en luftexplosion. Foto: United States Federal Government (public domain).

under vatten kan vattenstötvågen ge stora skador på både fartyg på ytan och ubåtar. Stötvågen kan deformera skrovet eller lyfta fartyg, som då riskerar att knäckas.

Vid kärnvapenprov som sker under jord ger explosionen upphov till ett sfäriskt hålrum och en mycket kraftig markstötvåg. Stötvågen kan upptäckas på mycket långa avstånd och därmed användas för att upptäcka underjordiska provsprängningar (se kapitlet *Upptäckt av kärnvapenexplosioner*). När trycket sjunker efter explosionen störtar taket i regel in och fyller hålrummet, vilket i många fall ger upphov till en insjunken krater på markytan. För provsprängningar som sker i tunnlar i bergsmassiv bildas normalt ingen insjunkningskrater, men markskakningen är så kraftig att marken lokalt ofta förskjuts, vilket kan upptäckas med satellitmätningar.

Explosionstyp	Värme-verkan	Joniserande initialstrålning	Stötvåg i mark eller vatten	Luft-stötvåg	Radioaktiv beläggning	Elektro-magnetisk puls
Höghöjdsexplosion	◇◇◇◇	◇◇◇◇	◇◇◇◇	◇◇◇◇	◇◇◇◇	◆◆◆◆
Luftexplosion	◆◆◆◆	◆◆◆◆	◆◇◇◇	◆◆◆◆	◆*◇◇◇	◆◇◇◇
Ytexplosion på mark	◆◆◆◇	◆◆◆◇	◆◆◇◇	◆◆◆◇	◆◆◆◆	◆◆◇◇
Ytexplosion på vatten	◆◆◆◇	◆◆◆◇	◆◆◇◇	◆◆◆◇	◆◆◆◆	◆◆◇◇
Undermarks- eller undervattensexplosion	◇◇◇◇	◇◇◇◇	◆◆◆◆	◇◇◇◇	◇◇◇◇	◇◇◇◇

* Nedfall uteblir vanligtvis vid luftexplosion, men nederbörd kan föra ner radioaktivitet till marken.

Översikt över vilka verkansformer som förekommer vid olika explosionstyper. Ju fler ifyllda markeringar, desto viktigare är en verkansform vid den givna explosionstypen.

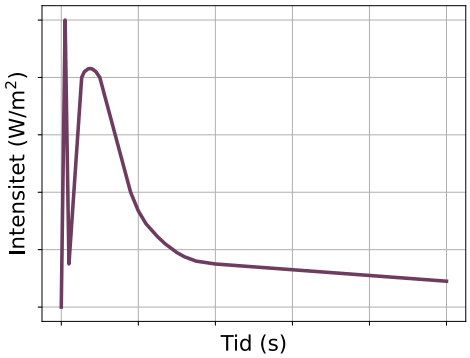
Värmestrålning

Värmestrålning är elektromagnetisk strålning som sänds ut från ett föremål på grund av dess temperatur. Strålningens spektrum är temperaturberoende, ju högre temperatur desto mer domineras värmestrålningen av korta våglängder. Till exempel är värmestrålningen från ett vanligt värmeelement inte synlig för ögat, medan en glödande bit järn har en synlig komponent. Som nämnts ovan är vapenresterna först så heta att deras värmestrålning domineras av röntgenstrålning. Sett på längre avstånd från explosionen är värmestrålningen från eldklotet till ungefär hälften synligt ljus, hälften infraröd strålning och mindre än en procent ultraviolett ljus.

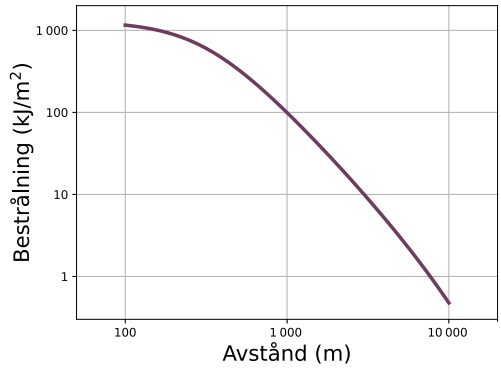
Man skulle kunna tro att en observatör på avstånd tydligast ser ljuset och värmestrålningen från eldklotet precis i början av en kärnvapenexplosion och att det sedan gradvis avtar. Luftens optiska egenskaper påverkas dock av den joniserande initialstrålningen och röntgenstrålningen. Som tidigare nämnts släpper den lysande stötvågsfronten inte igenom värmestrålningen inifrån eldklotet. Det gör dels att värmestrålningen initialt inte kan flöda på samma sätt som i kall luft, dels att värmestrålningen avtar direkt när stötvågsfronten passerar strålningsklotets yta. Resultatet blir att värmestrålningen först ökar i takt med strålningsklotets tillväxt, men når ett första maximum redan under den första millisekunden.

När temperaturen i stötvågsfronten har sjunkit till cirka 2 000 °C är den inte längre tillräckligt het för att avge synligt ljus och stötvågens värmestrålning är försumbar. Luftmassan innanför stötvågen avsvalnar inåt så att den hetare luften i eldklotet blir synlig, och värmestrålningen utanför ökar igen. När avsvalningen når det heta strålningsklotet har värmestrålningen sitt andra maximum, vilket sker efter en tiondels sekund vid tio kiloton. Detta andra maximum, tillsammans med värmestrålningens första tidiga maximum, ger upphov till en dubbelblixt som är karaktäristisk för kärnvapenexplosioner i luft. Värmestrålningen varar från någon sekund vid laddningsstyrkor på något kiloton, upp till närmare en minut vid laddningsstyrkor på flera megaton.

Avgörande för värmestrålningens verkan är den mängd energi som träffar ett objekt per ytenhet (*bestrålning*). Bestrålningen från en kärnvapenexplosion beror främst på laddningsstyrkan och avståndet till explosionen, men även vädret och markens reflektionsförmåga påverkar utbredningen. Strålningens intensitet, särskilt i det ultravioletta och infraröda området, försvagas också av absorption i luften. Bestrålningen från en explosion avtar generellt sett på samma sätt som ljuset från en lampa, det vill säga med kvadraten på avståndet till explosionen. Reflexionen av värmestrålningen, till exempel mot ljusa moln eller snö på marken, kan öka bestrålningen mot mål på marken. Vidare sprids värmestrålningen både av luftens molekyler och av dammpartiklar i luften, vilket innebär att det



Värmestrålningens karakteristiska utseende vid atmosfäriska explosioner – den så kallade dubbelblixten eller dubbelpulsen. Axlarna saknar avsiktligt siffervärden eftersom värmestrålningens varaktighet beror på laddningsstyrkan och strålningens intensitet beror på bland annat sikten och vilket avstånd från explosionen man befinner sig.



Värmestrålningen avtar snabbt med avståndet. Exemplet visar bestrålningen (den totala värmeenergin per ytenhet) vid god sikt för en luftexplosion med styrkan ett kiloton.

inte finns någon total skugga. I huvudsak utbreder sig dock värmestrålningen rätlinjigt från explosionspunkten och både människor och material skyddas genom skugga från omgivningen, till exempel byggnader, träd och andra ojämnheter i terrängen.

Antändning och verkan på materiel

Egenskaperna hos olika material är avgörande för verkan av värmestrålning. Optiska egenskaper har stor betydelse för hur mycket värme som absorberas respektive reflekteras. Reflektionsförmågan kan vara mycket olika för synligt respektive infrarött ljus, men mörka material absorberar generellt sett mer värme än ljusa. Vidare avgör ett materials värmeledningsegenskaper hur snabbt värmen leds in i materialet och en låg värmeledning kan göra att yttemperaturen blir hög. Värmeledning gör också att tjocka brännbara material generellt sett är mer svårantändliga än tunna delar av samma material. Om materialet är tjockt fördelas värmen in i materialet och minskar risken för att ytan blir tillräckligt varm för att antändas. Det är till exempel mycket svårare att antända en pocketbok jämfört med ett fritt pappersark. Fukt minskar också risken för antändning.

Den huvudsakliga verkan av värmestrålning på materiel är antändning, både direkt antändning i enskilda komponenter och uppkomst av brand i större skala. För att bränder ska komma igång krävs tillgång till lättantändliga material. I stadsmiljö är det framför allt papper, plast och tyg som antänds och leder till större bränder, medan brand i terräng främst uppkommer när torra löv och kvistar eller torrt gräs antänds. Väderförhållanden som vind, luftfuktighet och tidigare nederbörd spelar naturligtvis stor roll både för antändning och i vilken utsträckning en brand sprider sig utomhus.

Det är inte bara mängden bestrålning som avgör antändning, utan även bestrålningstiden. Eftersom värmen som absorberas till viss grad leds bort från ytan in i materialet behövs olika långa bestrålningstider för olika stora bestrålningsmängder. Den bestrålning som krävs för antändning beror därför i praktiken på laddningsstyrkan, eftersom värmestrålningens intensitet och varaktighet varierar med explosionens storlek. Utöver att börja brinna kan materialet skadas genom att det smälter, spricker, förkolnas eller påverkas av andra kemiska reaktioner. Upphettning av metall kan också påverka dess hållfasthet.

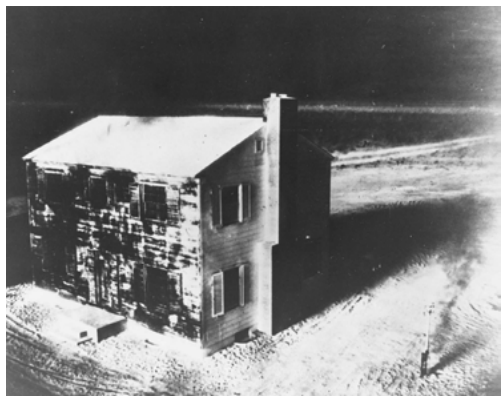
Bränder

Vid en kärnvapenexplosion över bebyggelse antänder värmestrålningen brännbara material inom ett stort område. Framför allt antänds lösa föremål inomhus som papper, gardiner och möbler via instrålning genom fönster. Antändningspunkterna är vitt utspridda och i vilken utsträckning elden blir till storskaliga bränder beror på var explosionen sker och typ av bebyggelse.

Avgörande för brandförloppet är också luftstötvågens verkningar. Bränder inomhus blir kraftigare genom att sönderslagna fönster och dörrar ger elden mer syre. Ventilationen tillsammans med mängden splittrat material ökar brandförloppets hastighet jämfört med när det brinner i oskadad bebyggelse. Ytan runt nollpunkten och andra områden med totalt raserade byggnader hindrar dock delvis spridningen av stora bränder. Husfasader i brännbart material som till exempel trä kan också sättas i brand av värmestrålningen, men slocknar ofta. Dels eftersom värmestrålningen ofta bara hinner värma upp ytan av materialet, dels eftersom luftstötvågen även kan blåsa ut eld.

Uppkomst och spridning av storskaliga bränder vid kärnvapenexplosioner är mycket komplexa att modellera, men börjar med att ett större antal utspridda byggnader sätts i brand samtidigt. Branden sprider sig dels genom direkta flammor och hetta mot närliggande byggnader och rasmassor, dels genom flygbränder där glödande och brinnande material bärs iväg av vinden och ger upphov till nya bränder. Bränderna i byggnader växer samman och bildar områdesbränder. Vid blåst förvärras spridningen och branden sprider sig i vindens riktning.

Vid en kärnvapenexplosion över terräng sker antändningen också över stora områden, främst i torra och tunna växtdelar. Som tidigare nämnt spelar väderförhållandena stor roll för både antändningen och brandens spridning. Till exempel dör branden snart ut i snö, medan torrt och blåsigt väder i en barrskog kan sprida branden någon kilometer per timme i vindriktningen. Brand i terräng varierar kraftigt med typ av vegetation. Lövskog brinner generellt sett betydligt långsammare än barrskog.



Foton från ett amerikanskt kärnvapenprov visar hur värmestrålningen får fasaden på ett hus att börja ryka, men inte förmår att antända huset. Foto: ur Glasstone & Dolan, The Effects of Nuclear Weapons (1977). United States Federal Government (public domain).

Under kraftiga bränder över stora ytor kan själva branden ge upphov till mycket höga vindstyrkor vid markytan. Det tillför ytterligare luft och därmed syre till förbränningen och bildar en *eldstorm* (även kallat *brandstorm*). Under andra världskriget uppkom eldstormar under bombningar, till exempel av Dresden, Hamburg och Hiroshima. Eldstormar kan även uppkomma vid kraftiga skogsbränder. Inom eldstormens område blir branden nästan total och chansen att överleva är mycket liten. Risken för att en eldstorm utvecklas i modern bebyggelse anses dock vara mindre än under andra världskriget.

Brännskador och verkan på människa

Värmestrålning ger upphov till brännskador både genom direkt bestrålning av oskyddad hud och genom att kläder sätts i brand eller smälter. Hur allvarlig en brännskada på huden är beror dels på vilken del av kroppen som skadats, dels på skadans djup och hur stor yta som är drabbad. Brännskador kring halsen innebär att andningsvägarna påverkas. Skador från brand i klädsel är ofta särskilt allvarliga eftersom de tenderar att ge stora brännskador på huden, vilket kan vara direkt livshotande. Om det blir direkta brännskador på huden beror både på hur stark värmestrålningen är och hur länge den varar.

Klädsel kan både öka och minska risken för brännskador. Skyddet från ett tunt lager tyg är begränsat, även om ljusa tyger kan reflektera bort en del av värmestrålningen. Tyger som innehåller plaster, vilket är vanligt i moderna textilier, kan smälta och ge upphov till djupa brännskador. Bäst skydd ger klädsel i flera lager med luft emellan och ett lager med svårantändligt material på ytan, till exempel ylle.

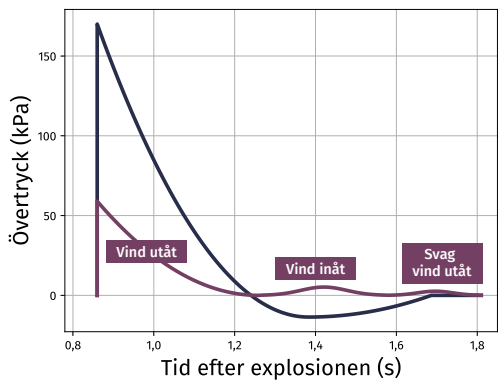
Slutligen kan den mycket intensiva ljusblixten från eldklotet även orsaka bländning eftersom ögat inte reagerar tillräckligt snabbt för att undvika att en stor ljusmängd träffar näthinnan. Även människor med ryggen vänd mot explosionen kan bländas till följd av reflektioner och ljusets spridning i atmosfären. Bländningen dagtid kan vara från några sekunder till minuter och från några minuter till timmar under natten. Bestående skador på ögonen kan också inträffa, till exempel genom brännskador på näthinnan.

Stötvåg

En stötvåg är en typ av vågutbredning som rör sig snabbare än ljudets hastighet i ett material. Medan en vanlig ljudvåg motsvarar små förändringar i tryck och densitet innebär en stötvåg en abrupt och i princip ögonblicklig förändring i tryck, temperatur och densitet. Hur stötvågen uppkommer från ett kärnvapen beskrivs i avsnittet om explosionsförloppet ovan. På tillräckligt avstånd från explosionspunkten har luftstötvågen samma generella egenskaper som en konventionell explosion. Stötvågen från ett kärnvapen är dock betydligt kraftigare och har en längre varaktighet än för en konventionell explosion. Luftstötvågen utbreder sig till en början flerfaldigt snabbare än ljudet, men i takt med att energin går åt för att komprimera och hetta upp den omgivande luften så minskar hastigheten.

Luftstötvåg

Luften komprimeras omedelbart när stötvågen passerar och det statiska trycket höjs maximalt för att återgå till atmosfärstryck med en efterföljande undertrycksfas. Undertrycksfasen varar något längre än övertrycksfasen, men undertrycket är mindre än övertrycket. Tryckskill-



Stötvågens profil när en given plats träffas. Exemplet visar det statiska (mörkblå) och dynamiska (lila) trycket 500 meter från en luftexplosion med styrkan tio kiloton. Stötvågen anländer 0,86 sekunder efter explosionen då statiska övertrycket når sitt maximala värde. Därefter sjunker övertrycket och övergår efter 0,38 sekunder i ett undertryck. Det utåtriktade dynamiska trycket motsvarar initialt en vind med hastigheten 260 m/s. Efter en stunds undertryck vänder vinden och blir inåtriktad. Till sist uppstår en svagare vind när varm luft rör sig utåt.

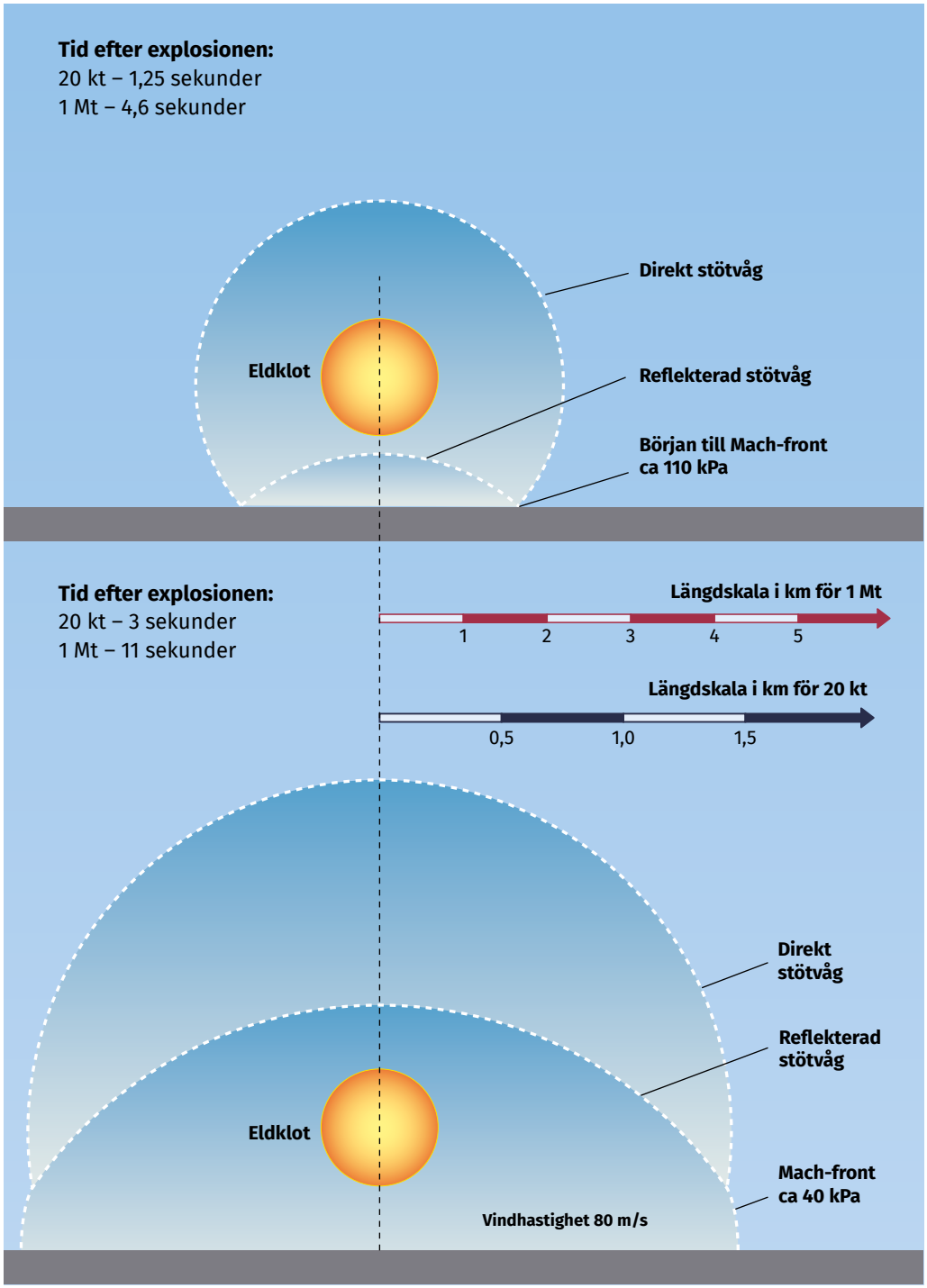


Illustration av Mach-frontens uppkomst. Mach-fronten sträcker sig upp till den cirkel som utgörs av ”skärningen” mellan den reflekterade och den direkta stötvågen.

naderna leder till en kraftig vindrörelse i luftmassan, vilket ger upphov till ett dynamiskt tryck som kan överstiga det statiska trycket. Det dynamiska trycket ut från explosionspunkten kan jämföras med en kraftig orkanvind, följd av en svagare vind i motsatt riktning. Stötvågen når avståndet 100 meter från nollpunkten efter ca 0,7 sekunder om en luftexplosion på 100 kiloton sker på en höjd där verkan av luftstötvåg mot bebyggelse maximeras. Stötvågen har då ett maximalt statiskt övertryck på cirka 700 kPa (100 kPa motsvarar atmosfärens normala lufttryck vid jordytan). På 1 kilometers avstånd anländer stötvågen efter cirka 1,7 sekunder och ger ett maximalt statiskt övertryck på cirka 200 kPa. Medan det statiska trycket avtar med avståndet från explosionspunkten blir det maximala dynamiska trycket som störst när en större del av luftmassan har satts i rörelse. För exemplet ovan är det maximala dynamiska trycket cirka 400 kPa, vilket uppnås cirka 700 meter från nollpunkten.

En viktig effekt vid verkan av en luftstötvåg är uppkomsten av en så kallad *Mach-front*. Luftstötvågen reflekteras när den når marken eller en vattenyta. Den reflekterade stötvågen rör sig genom luft som redan har komprimerats och värmts upp av den direkta stötvågen och får därför en högre utbredningshastighet. När den reflekterade stötvågen kommer ikapp den direkta stötvågen går de samman till en i princip vertikal stötvågsfront nära markytan, en Mach-front.

Toppen på Mach-fronten är den punkt, där den reflekterade och direkta stötvågen möts. Fenomenet benämns Mach-reflektion och uppkommer på olika avstånd beroende på laddningsstyrka och explosionshöjd. Jämfört med den ostörda stötvågen ger Mach-fronten ett högre tryck, vilket innebär betydligt kraftigare verkan på byggnader och andra vertikala konstruktioner.

En annan effekt vid kärnvapenexplosioner är den ”förlöpare” till stötvågen som kan uppstå närmast markytan. Stötvågen får en högre hastighet där jämfört med i resten av luften eftersom värmestrålningen hettar upp markytan och också luftlagret närmast marken. Luftstötvågens utbredning påverkas naturligtvis också av den lokala terrängen. Trycket ökar till exempel relativt sett om stötvågen möter en hög kulle eller bergssida. Reflektioner kan också förstärka verkan i vissa områden.

Markstötvåg och krater

Vid en kärnvapenexplosion direkt på eller nära markytan genererar en stor del av den frigjorda energin en stötvåg direkt ner i marken. Både värmestrålningen och vapenresternas expansion bidrar till markstötvågens uppkomst. Marken trycks ner och ut från explosionspunkten medan delar förångas, krossas och kastas upp. En krater bildas omgiven av en rand av lösgjort material och stötvågen fortplantas utåt i den omgivande marken. Markstötvågen gör att marken skakar och orsakar bestående förskjutningar under markytan. Stötvågens utbredning är snabbare än luftstötvågen, bortsett från nära explosionspunkten, och beror i stor utsträckning på markens och berggrundens sammansättning och struktur.

Den direkta markstötvågen är tillräckligt kraftig för att krossa berg och ger en krosszon i marken som omger kratern. För markexplosioner på fast berg sker omfattande sprickbildning inom en halvsfär med en radie som grovt sett är dubbelt så stor som kraterradien.

För luftexplosioner, där eldklotet inte når markytan, uppstår ingen direkt markstötvåg. Luftstötvågen kan dock ge en markstötvåg när den träffar markytan, en så kallad *luftstötvågsinducerad markstötvåg*. Inducerade markstötvågor är mindre kraftiga än direkta markstötvågor. Det betyder dock inte att deras effekter är försumbara. Inducerade markstötvågor kan även uppkomma vid undervattensexplosioner nära land, när stötvågen överförs från vattnet till botten och landmassa. För underjordsexplosioner vid kärnvapenprov bildas ingen luftstötvåg, utan merparten av den frigjorda energin övergår i den direkta markstötvågen.

Stötvågsverkan

Stötvågsverkan från kärnvapen skiljer sig från konventionella explosioner, eftersom luftstötvågen varar betydligt längre och därför påverkar hela byggnader samtidigt. Impulsen, som är trycket summerat över tid, blir högre även på avstånd där det maximala trycket är jämförbart med en konventionell explosion. Det bör understrykas att den optimala explosionshöjden för stötvågsverkan är beroende av målet som ska slås ut. För särskilt tåliga eller hårdgjorda mål krävs en mycket låg explosionshöjd, direkt markexplosion eller till och med *markpenetration*, vilket innebär att stridsspetsen får tränga ner en bit i marken innan den exploderar. Explosionshöjden kan ökas för att maximera den yta där ett visst övertryck uppstår om målet är bebyggelse och liknande. Då går ingen energi åt till att skapa en direkt markstötvåg och stötvågens förstärkning via Mach-reflektion sker över största möjliga yta. Konventionella explosioner är inte tillräckligt kraftiga för att ge en betydande Mach-reflektion.

Luftstötvågen ger en kraftig verkan mot byggnader, broar, master och liknande konstruktioner. Träd bryts sönder och fälls. Skadorna som uppkommer på byggnader och andra konstruktioner är ofta en kombination av effekterna från det statiska och dynamiska trycket. Den långvariga statiska belastningen försvagar olika strukturer som slits sönder av det dynamiska vindtrycket om de inte brister direkt. Förloppet varar under flera sekunder och den kraftiga stötvågsvinden drar med sig stora mängder rasmassor, till exempel tegel och betongplattor samt trädgrenar och krossat fönsterglas.

Bortsett från skador på broar är den direkta verkan av luftstötvågen mot gator och vägar i huvudsak försumbar, även om marken kan sätta sig något. I stadsmiljö kommer dock framkomligheten att vara mycket begränsad inom ett stort område kring nollpunkten, eftersom gator och vägar blockeras av rasmassor och annat löst material. I området nära nollpunkten kan den inducerade markstötvågen orsaka brott på nedgrävda rörledningar, till exempel för vatten, olja och gas. Brott på vattenledningar är särskilt problematiska eftersom tryckfallet kan ge upphov till vattenbrist när räddningstjänsten ska släcka bränder. Utöver bränder som orsakas av värmestrålningen kan bränder även uppkomma till exempel av stötvågsverkan mot värmeverk, oljeupplag och liknande anläggningar.

Den krater som bildas vid en markexplosion kan nyttjas för att förstöra särskilt tåliga mål, till exempel landningsbanor, kajer och anläggningar under mark. Verkan av en markstötvåg på byggnader ovan mark är generellt sett inte relevant eftersom den inte når utanför det område där byggnader totalförstörs av luftstötvågen. Både inducerad och direkt markstötvåg kan dock ge upphov till omfattande skador på skyddsrum och andra underjordiska anläggningar.

Stötvågsverkan på människa

Människan är relativt tålig mot tryckbelastning och de indirekta skadorna av en luftstötvåg är betydligt mer omfattande än de direkta. Vid stort övertryck (flera hundra kPa) kan det statiska trycket orsaka inre blödningar. Lungskador kan uppkomma vid lägre övertryck (under hundra kPa). Stötvågsverkan på människa domineras dock av indirekta skador redan vid lägre tryck.

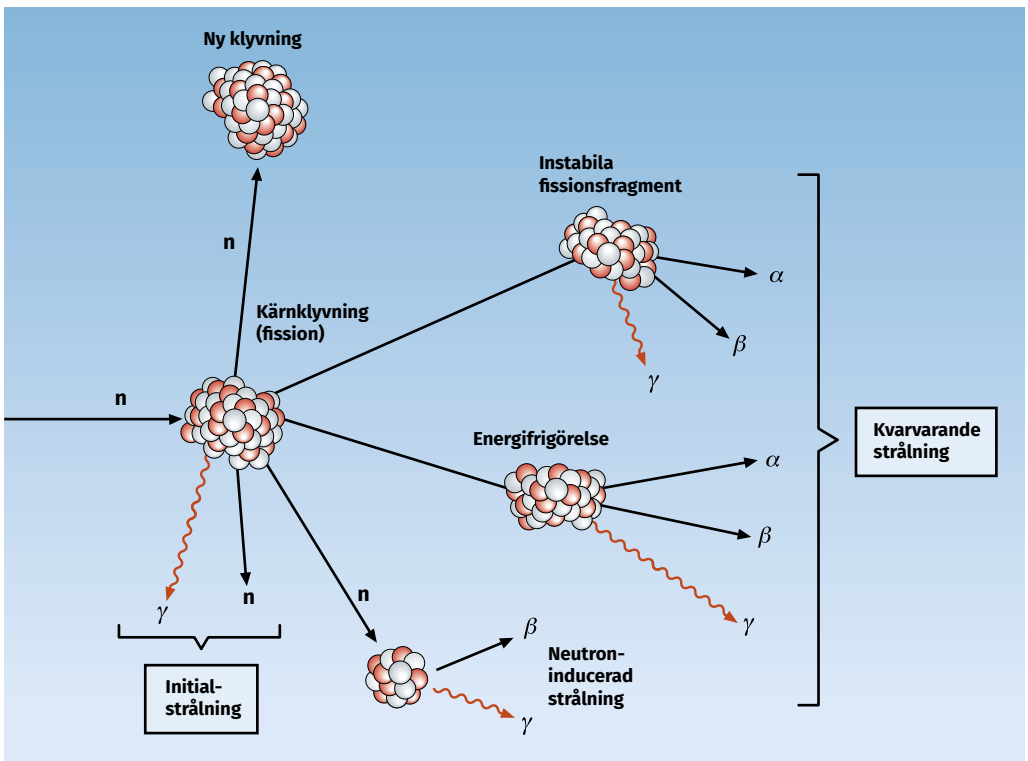
Människor utomhus kommer att träffas av stora mängder kringflygande föremål som följer med stötvågsvinden. Stötvågsvinden gör också att människor skadas när de kastas mot byggnader och träd, eller dras med i vinden och tumlar längs marken. Det är stor risk för splitterskador, benbrott och skallfrakturer.

Inomhus kan ras ge människor kross- och klämskador. Kringflygande föremål slungas in och splittrar fönsterglas, vilket kan ge upphov till allvarliga skador. Det sker även på längre avstånd när luftstötvågen inte ger några större skador på övriga delar av byggnaden.

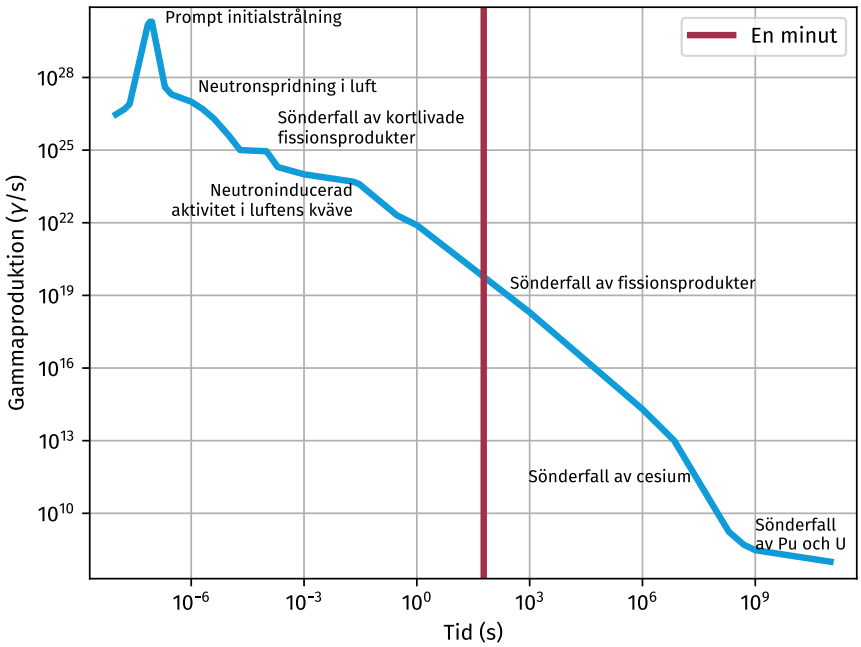
Joniserande initialstrålning

Joniserande strålning är ett samlingsnamn för strålning som har tillräckligt med energi för att slå ut elektroner från en atom, det vill säga jonisera atomen. Joniserande strålning från en kärnvapenexplosion kan delas in i *initialstrålning* och *kvarvarande strålning*. Initialstrålning är den strålning som genereras i olika processer under den första minuten. Med *prompt* initialstrålning menas den joniserande strålning som frigörs av fissions- och fusionsprocesser under den första mikrosekunden. Strålning som sänds ut efter den första minuten kategoriseras som kvarvarande strålning. Verkan från joniserande initialstrålning vid luft- och markexplosioner domineras helt av gamma- och neutronstrålning, eftersom övrig joniserande strålning har mycket kortare räckvidd i luft.

Den prompta gammastrålningen breder ut sig med ljusets hastighet och når inom några enstaka mikrosekunder merparten av omgivningen kring explosionen. De mest högenergetiska neutronerna har bara en sjättedel av denna hastighet, men når omgivningen inom en millisekund. Den prompta delen av initialstrålningen



Kärnprocesser i samband med fission. Strålningen direkt från kärnklyvningen samt sönderfall den första minuten kallas för joniserande initialstrålning. Sönderfall från och med en minut efter explosionen ger upphov till kvarvarande strålning. Orsaken till uppdelningen i tid är att vid en luftexplosion nära marken har eldklotet efter ungefär en minut nått så högt upp att de radioaktiva vapenresterna inte längre ger någon strålning vid marken. I figuren syns, förutom neutron- och gammastrålning, även alfa- och betastrålning. Dessa strålningsslag har mycket begränsad räckvidd, och är endast av betydelse vid lokalt nedfall.



Gammastrålningens intensitet som funktion av tid för ett fissionsvapen med laddningsstyrkan ett kiloton. Intensiteten ökar snabbt till ett maximum, för att därefter avta. Den strålning som avges under den första minuten räknas som initialstrålning, medan den därefter kallas kvarvarande strålning. Texten i figuren anger vilka processer som är viktigast vid olika tidpunkter efter explosionen.

utgör dock endast en mindre del av den totala mängden initialstrålning. Neutronernas spridning och absorption i luft ger upphov till ytterligare gammastrålning, som tillsammans med gammastrålningen från radioaktivt sönderfall av fissionsprodukter utgör merparten av den joniserande initialstrålningen.

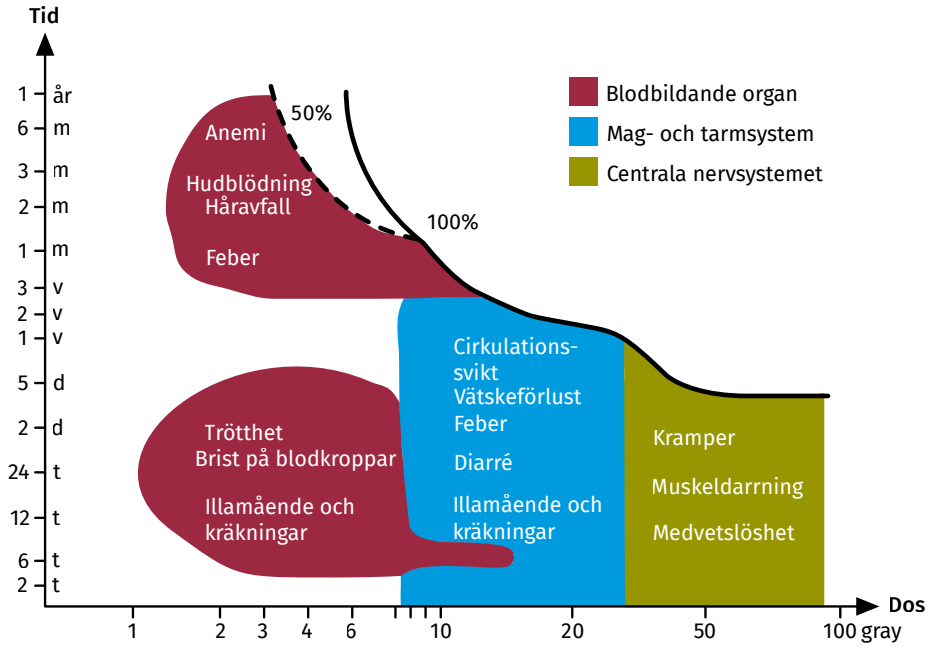
Den prompta initialstrålningen kan även ge upphov till en elektromagnetisk puls (EMP) och kan påverka elektronik, men oftast är det den efterföljande gammastrålningen som står för den största effekten av joniserande initialstrålning. Strålningens intensitet vid markytan styrs därför både av fissionsprodukternas sönderfall och av hur dessa stiger upp i atmosfären.

Strålskador på materiel

Den joniserande initialstrålningen slår främst mot elektronik och vissa optiska material, till exempel kan ledningsförmågan i optisk fiber skadas. Integrerade kretsar och andra halvledarbaserade komponenter är känsliga både för gamma- och neutronstrålning. Gammastrålningen ger i första hand upphov till jonisation, vilket kan leda till strömpulser, överslag och förändring av egenskaperna hos isolerande material. Neutronstrålning orsakar inte bara jonisation, utan kan också flytta atomer i materialet. Det skadar kristallstrukturer och kan därför påverka egenskaperna hos halvledare och andra material negativt.

Strålskador på människa

Människor får strålskador genom att joniserande strålning kommer in i vävnad och slår ut elektroner. Det ger en mängd reaktioner och bildar så kallade fria radikaler. Fria radikaler är oftast neutrala atomer och molekyler som är mycket reaktiva och ger upphov till kemiska reaktioner som påverkar olika biologiska makromolekyler, inklusive DNA, i kroppens celler. Den biolo-



Symtom av olika nivåer av helkroppsdos över tid. Kurvorna visar 50 procents, respektive 100 procents dödlighet. Illustration: Baserad på Källström & Runesson, Räddningstjänst vid olyckor med radioaktiva ämnen (2012).

giska konsekvensen är att cellen dör eller förändras, vilket ger ökad risk för cancer eller genetiska effekter på sikt. Joniserande strålning kan också verka direkt på DNA och andra särskilt viktiga molekyler. Känsligheten för strålning varierar mellan olika typer av celler och de mest känsliga organen är benmärg och tarm, samt bröst- och lungvävnad.

Verkan av joniserande strålning på människa är komplex och vi fokuserar här på akuta skador orsakade av joniserande strålning. Stråldos är den totala mängd strålningsenergi som absorberas per kilogram vävnad och mäts i enheten gray (1 Gy = 1 J/kg). Stråldosen är avgörande för akuta skador från joniserande initialstrålning. Den biologiska effekten varierar dock även med typen av joniserande strålning. För att väga in den så kallade *relativa biologiska effektiviteten* (RBE) multipliceras den absorberade dosen för olika partiklar med en faktor. Den viktade stråldosen benämns ibland gray-ekvivalent. Att bestämma RBE-faktorn för olika strålningstyper är svårt, eftersom både partiklarnas energifördelning och egenskaper hos den biologiska vävnaden spelar in.

RBE-faktorn för gammastrålning sätts ofta per definition till 1. För de neutronenergier som förväntas vid en kärnvapenexplosion är RBE-faktorn generellt sett cirka 1 för akuta skador. Undantag är till exempel grumling av ögonlins där faktorn är betydligt högre på grund av linsvävnadens känslighet. Det ska understrykas att faktorn fungerar annorlunda om man bedömer långsiktiga, slumpmässiga (stokastiska) effekter, till exempel risk för cancer. Den viktade stråldosen vid stokastiska effekter benämns ofta *ekvivalent dos* och utvärderas i enheten sievert (Sv). Det innebär att långsiktiga biologiska effekter har vägts in. För den initiala neutronstrålningens långsiktiga effekter anges ofta RBE-faktorn 2, men studier indikerar att det kan finnas stor variation.

Akuta strålskador uppkommer vid doser på över cirka 1 Gy, vilket ger betydande effekter på blodbildande organ. Omedelbara symtom är illamående och kräkningar, som följs av några veckor utan symtom. Sedan uppstår feber, frossa, trötthet och infektioner. Nybildningen av celler stannar av och en människa, som fått en helkroppsdos runt 4 Gy, kan dö inom några veckor utan behandling. För riktigt höga doser, över 50 Gy, påverkas det centrala nervsystemet och personen blir medvetslös och dör inom de närmsta dygnen. En försvårande omständighet vid kärnvapenexplosioner är att sår- och brännskador tar längre tid att läka om personen även utsatts för joniserande strålning. Brännskador är särskilt kritiska och gör att även lägre doser på 1–2 Gy kan vara dödliga om brännskadan täcker mer än 10 till 30 procent av kroppen.

Elektromagnetisk puls

Uppkomst

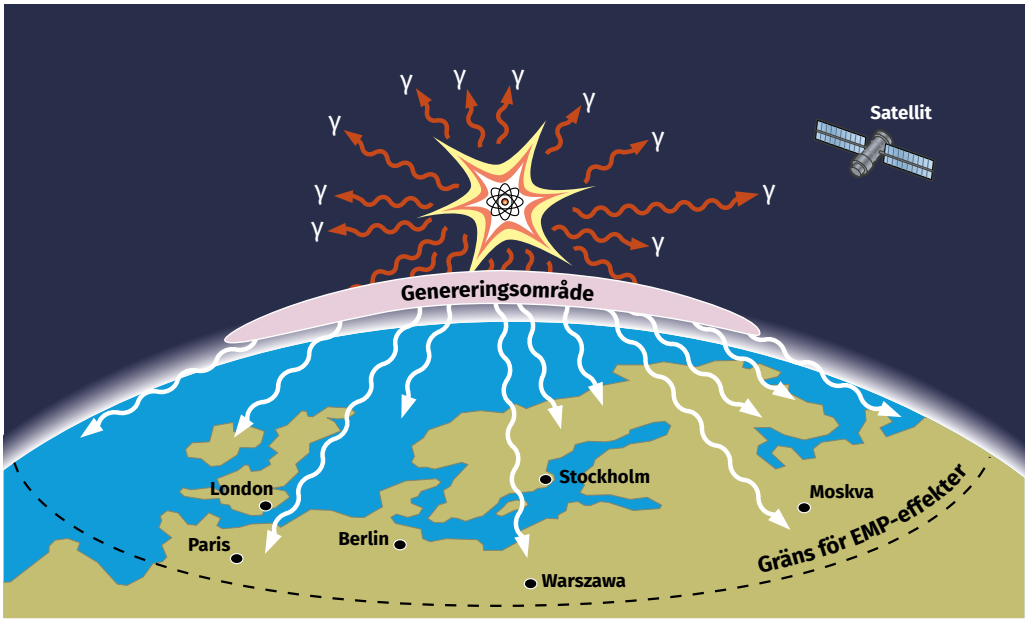
Den elektromagnetiska pulsen (EMP) skiljer sig från övriga verkansformer vad gäller uppkomst och utbredning. När den första gammastrålningen träffar luften runtomkring slås elektroner loss, varvid ett elektromagnetiskt fält byggs upp mycket snabbt. Utbredningen begränsas inte av atmosfären på samma sätt som övriga verkansformer och följer heller inga enkla skalningslagar. Bland annat beror fältstyrkan på det jordmagnetiska fältets utbredning.

Även verkan av EMP skiljer sig från andra former av verkan. Den elektromagnetiska pulsen påverkar varken människor eller material direkt, förutom elektriska komponenter som kan vara mycket sårbara. Den elektromagnetiska pulsens utbredning kan vara mycket stor, men optimal explosionshöjd för störst EMP-effekt skiljer sig från den optimala höjden för stötvågen. Ett kärnvapen med en laddningsstyrka på 100 kiloton har en optimal explosionshöjd för stötvågsverkan på omkring en kilometer. För att maximera verkan av EMP används stora laddningsstyrkor och – framför allt – mycket höga explosionshöjder.

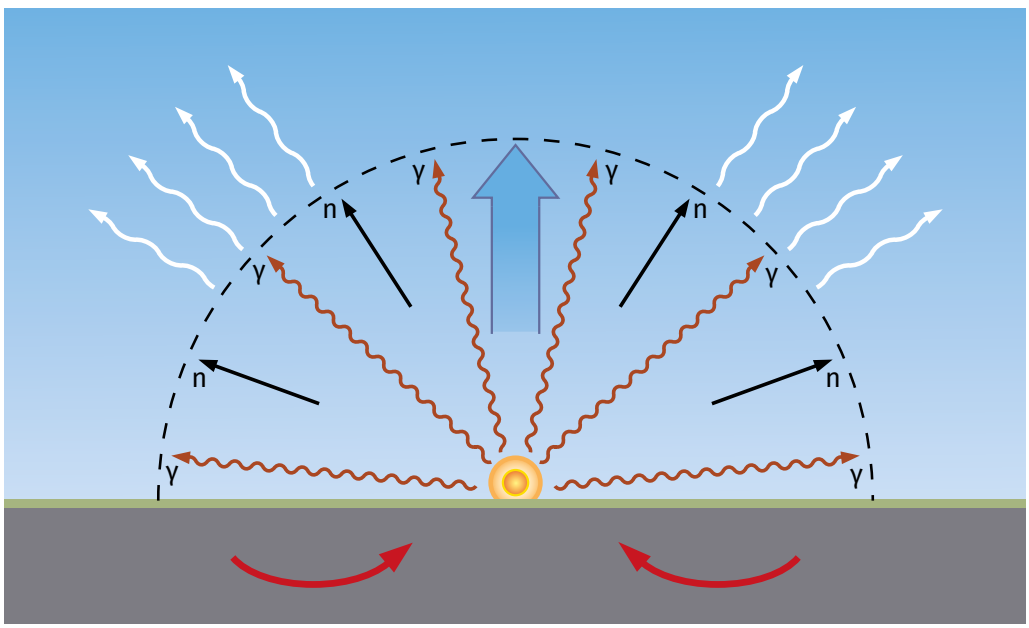
Genom att explosionen äger rum utanför atmosfären kommer den gammastrålning som avges uppåt från explosionen kunna röra sig tusentals kilometer i den förtunnade gas som finns där, och slå loss elektroner längs sin väg. Den gammastrålning som rör sig nedåt från explosionen kommer däremot absorberas relativt tvärt när atmosfären snabbt blir tätare på mellan 30 och 50 kilometers höjd över jordytan, så att elektroner slås loss i ett mer distinkt skikt i atmosfären. Det är denna asymmetriska fördelning av elektroner som gör EMP-effekten så kraftig vid höghöjdsexplosioner. Dessutom blir utbredningsområdet mycket stort då det i princip enbart begränsas av siktlinjen för gammastrålningen. Den höga explosionshöjden gör att markytan inte påverkas av några andra verkansformer, vilket innebär att EMP är den enda relevanta effekten där.

Omvänt kan en markexplosion användas för att maximera EMP-effekten mot hårdgjorda underjordiska mål. I detta fall är det asymmetrin mellan mark och luft som förstärker effekten och orsakar pulser som kan skada mål som klarar stötvågsverkan. Till skillnad från höghöjds-EMP har EMP från en markexplosion en mer lokal effekt.

Den elektromagnetiska pulsen ger strömmar och spänningar i elektronik och elektrisk infrastruktur som elnät och järnvägsnät. Komponenter och kablar fungerar som antenner för de relevanta frekvenserna och riskerar att förstöras av de inducerade strömmarna. Effekten av EMP beror på hur starkt fältet är, hur snabbt det byggs upp och vilka frekvenser det innehåller. Dessa parametrar beror i sin tur på laddningsstyrka, vapentyp, explosionshöjd och placering i jordens magnetfält, samt avstånd och riktning från explosionen. Verkan blir således inte nödvändigtvis mindre vid längre avstånd. EMP-verkan



Vid explosionshöjder långt utanför atmosfären kan gammastrålningen från explosionen täcka stora ytor av jordklotet. Närmare jordytan, på cirka 30 till 50 kilometers höjd, är atmosfären så tät att strålningen absorberas varvid höghöjds-EMP genereras.



Mark-EMP. När strålningen tränger ut i luften slår den loss elektroner vid kollisioner med luftens atomer. I marken absorberas däremot strålningen ganska snabbt. Det gör att laddningar fördelas asymmetriskt, vilket skapar elektromagnetisk puls (EMP).

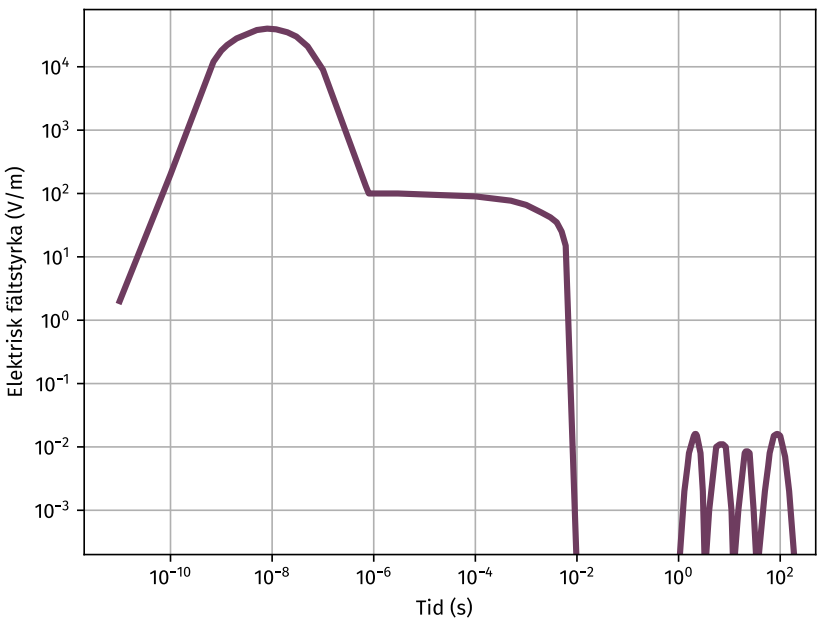
är typiskt störst för stora laddningsstyrkor och hög explosionshöjd. På norra halvklotet uppstår den maximala fältstyrkan vid jordytan söder om explosionspunkten. Sker explosionen på södra halvklotet blir fältstyrkan istället maximal norr om explosionen.

Verkan av EMP

Elektrisk utrustning kan skadas genom direkt påverkan. Det går inte att generellt säga vilka störningar och skador som uppstår i komponenter till följd av en viss fältstyrka. Det beror på hur mottagligt och sårbart objektet är för inducerade strömmar. Huruvida utrustning är sårbar beror på utrustningens storlek och vilka frekvenser pulsen innehåller. Elektromagnetiska pulser orsakade av kärnvapen innehåller frekvenser som inte fångas upp av mindre föremål som mobiltelefoner och bärbara datorer. Komponenter som är anslutna till ett nätverk är emellertid mycket sårbara då ledningar kan fungera som antenner. Det har ingen större betydelse om en komponent är påslagen eller inte, utan beror på om den kan fånga upp den elektromagnetiska pulsen eller är sammankopplad med något som kan göra det. Även friliggande kablar fungerar i detta avseende som antenner. Skadeverkan uppstår genom att en elektrisk ström induceras och ger överslag. Verkan spänner från driftsstörningar till att utrustning blir permanent förstörd.

Skydd mot EMP

För att skapa ett tillfredsställande skydd mot EMP krävs en kombination av åtgärder, till exempel systemavgränsning, elektrisk isolering och transientskydd. Systemavgränsning medför att exempelvis antenner som används för kommunikation inte kan sända och ta emot signaler. Det är svårt att skydda ett system enbart genom att avgränsa det, eftersom kablar går igenom gränserna. Utrustning och anläggningar kan skyddas genom att isoleras från elnätet. Kommunikation kräver då signaler som inte använ-



Fältstyrka från höghöjds-EMP som funktion av tid. Den tidiga, snabbt ökande pulsen ger upphov till högfrekventa signaler som kan skada elektronik om den fångas upp av antenner. De sena, långsamma svängningarna ger upphov till lågfrekvent EMP som kan orsaka överbelastningar, till exempel i elnät. Dessa liknar effekterna av så kallade solstormar.

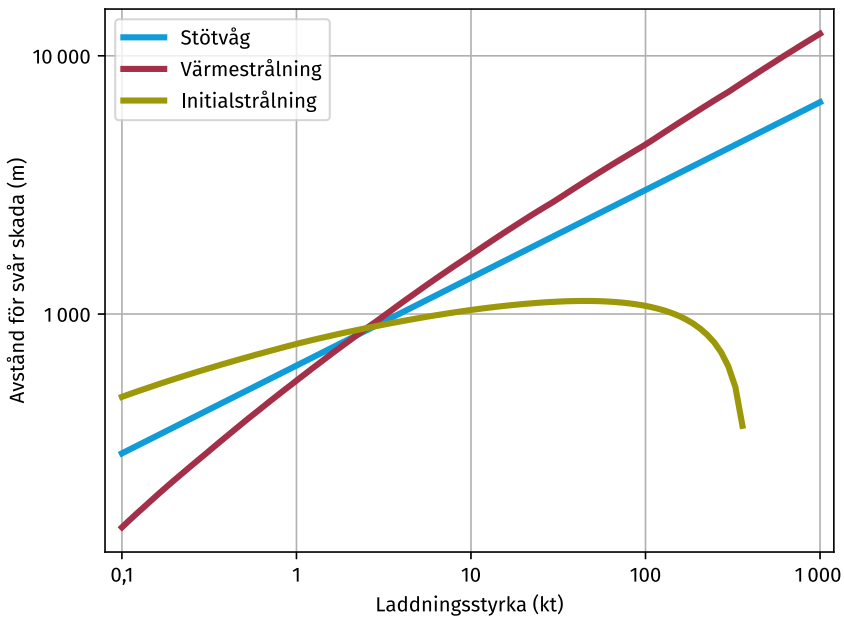
der elektriska ledningar, till exempel trådlös eller fiberoptisk kommunikation. För att skydda elledningar mot snabba förändringar av ström eller spänning kan olika former av transientskydd användas.

Utöver dessa åtgärder kan man välja komponenter med hög motståndskraft. Elektriska komponenter kan bytas ut mot icke-elektriska, till exempel optiska fibrer, och elektriska ledningar dras så att de minimerar mottagligheten för induktion. Hög beredskap för driftsstörningar och förstörd utrustning (till exempel genom redunanta system) ger dessutom minskad sårbarhet.

Kort om verkansavstånd

Vilken verkansform som har störst effekt beror, förutom på var explosionen sker, också på laddningsstyrkan samt på hur känsligt ett specifikt mål är för olika verkansformer. Eldklotets utbredning i luft ökar med laddningsstyrkan, medan räckvidden för joniserande initialstrålning begränsas främst av luftens egenskaper, oavsett laddningsstyrka. För låga laddningsstyrkor har den joniserande initialstrålningen relativt sett en större påverkan medan värmestrålning dominerar för stora laddningsstyrkor. Det betyder dock inte att man kan ignorera andra typer av effekter. Stötvågen i luft är mycket kraftig oavsett laddningsstyrka. Man måste därför ta hänsyn till samtliga verkansformer för att göra en sammanvägd bedömning. För anläggningar som ska skyddas mot kärnvapen är så kallat *balanserat skydd* ett centralt begrepp.

I kapitlet *Åtgärder för att bemöta kärnvapenhotet* illustreras betydelsen av skydd.



Effekten av stötvågor, värmestrålning och initialstrålning varierar med kärnvapnets laddningsstyrka. Figuren visar verkan mot oskyddade människor vid luftexplosioner där explosionshöjden har anpassats för att maximera stötvågsverkan mot bebyggelse. Denna explosionshöjd ökar med laddningsstyrkan, och för stora laddningsstyrkor sker explosionen så högt upp att initialstrålningen blir försumbar vid marken.

Luftstötvågsverkan på byggnader

Luftstötvågdata och nollpunktsavstånd för angivna skador avser laddningsstyrkan 20 kt (respektive 1 Mt inom parentes) vid luftexplosion på höjden 600 meter (respektive 2 000 meter).

Vind-hastighet m/s	Övertryckets varaktighet sekunder	Stötvågs-övertryck kPa	Nollpunkts-avstånd km	
36 (210)	1,0 (2,2)	16 (130)	3,0 km:	Måttliga skador på byggnader i betongelement: 3,1 km (11,6 km)
				Måttliga skador på trähus: 2,7 km (9,8 km)
47	0,95	21	2,5 km:	
				Svåra skador på byggnader i betong-element: 2,2 km (8,2 km)
59	0,87	28	2,0 km:	Svåra skador på trähus: 2,0 km (7,2 km)
				Måttliga skador på gjutna byggnader i armerad betong: 1,9 km (8,0 km)
93 (280)	0,78 (1,7)	46 (190)	1,5 km:	Måttliga skador på betongbro: 1,6 km (8,3 km)
				Svåra skador på gjutna byggnader i armerad betong: 1,2 km (5,2 km)
180	0,67	100	1,0 km:	
220	0,55	135	0,5 km:	De flesta konstruktioner ovan jord förstörda: 0,5 km (3,4 km)

Verkan av luftstötvåg vid luftexplosion med laddningsstyrka 20 kiloton samt med laddningsstyrka 1 megaton (inom parentes).

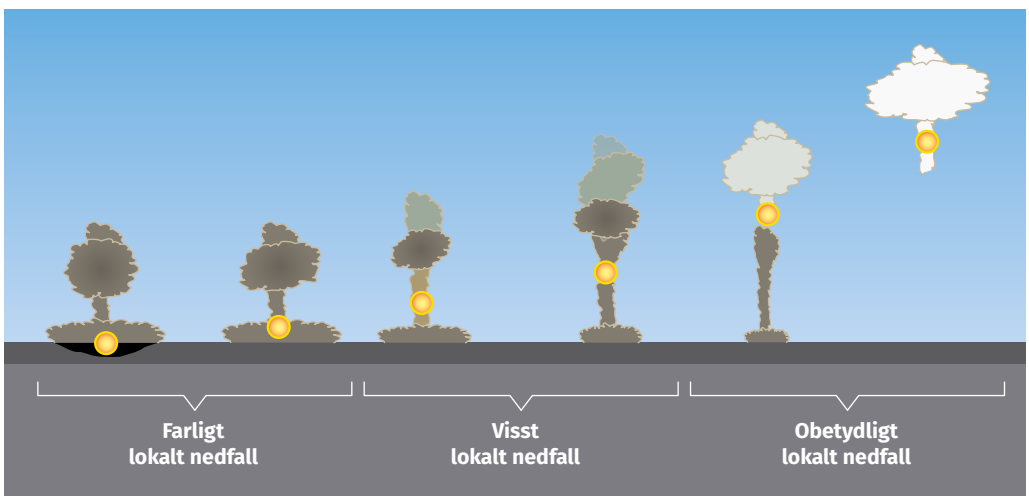
Radioaktivt nedfall och andra kvarvarande effekter

Det mesta av effekterna av en kärnvapenexplosion sker med omedelbar verkan, till exempel värmestrålning, initial joniserande strålning och stötvågsutbredning. Det är oftast dessa verkningar som är målet med att använda kärnvapen, men kärnvapen kan också ge olika kvarvarande effekter. Ett exempel på detta är joniserande strålning från radioaktiva ämnen som bildas i samband med explosionen. Höghöjdsexplosioner i rymden kan också ge kvarvarande effekter som är relaterade till EMP.

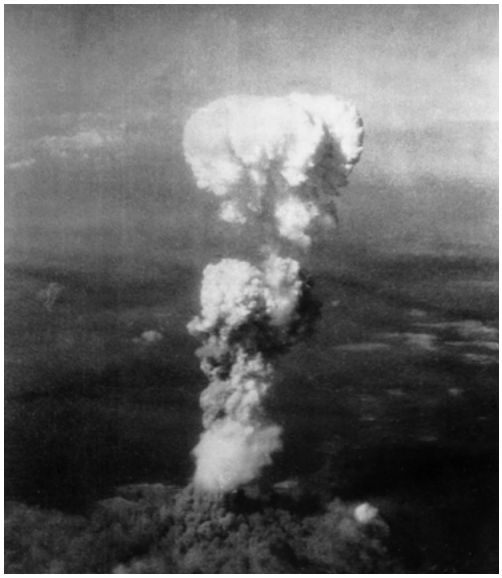
Radioaktivt nedfall

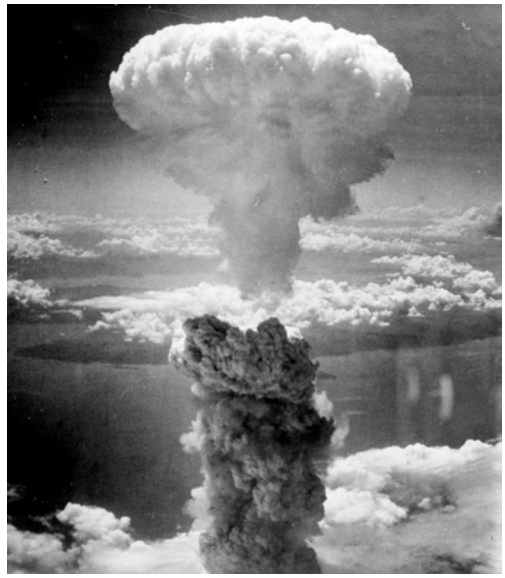
Som beskrivits i avsnittet om kärnvapens funktion kommer energin i kärnvapenexplosioner åtminstone till viss del från fission (kärnklyvning) även för fusionsvapen. Därför uppstår alltid stora mängder radioaktiva fissionsprodukter. Hur dessa sprids i omgivningen beror i huvudsak på explosionshöjden och rådande väderförhållanden. Vid en luftexplosion kommer vapenresterna, som innehåller radioaktiva fissionsprodukter, att kondensera till mycket små partiklar. Dessa partiklar förs högt upp i atmosfären när eldklotet rusar uppåt och sprids därför globalt. Radioaktiviteten försvinner alltså inte, men sprids över stora luftvolymer och det tar lång tid innan den når marken. Därför sker inte en akut kontamination (förorening) vid explosionsplatsen och dess närmaste omgivningar.

Vid explosioner på marken eller på låg höjd i luften sugs däremot markmaterial upp, vilket blandas med vapenresterna och faller ner kring nollpunkten och i vindriktningen. Det ger en omfattande lokal kontamination på marken. En tumregel är att om eldklotet når marken blir lokalt nedfall ett akut problem. Utöver fissionsprodukter kan kvarvarande strålning också

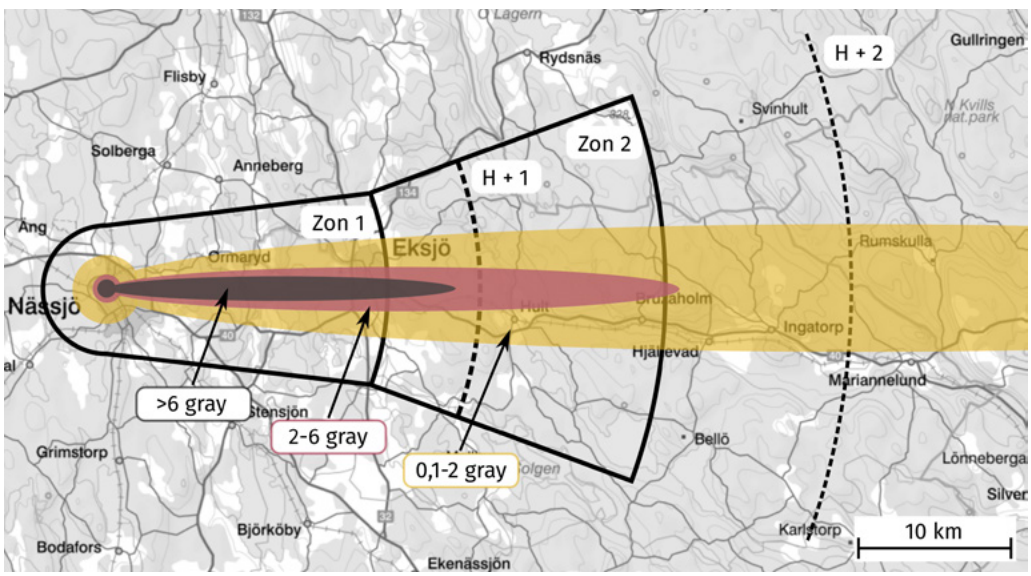


Hur explosionens höjd inverkar på uppkomsten av lokalt radioaktivt nedfall och hur svampmolnet visar på typ av explosion. Höga explosionshöjder medför att de radioaktiva vapenresterna (vitt eller ljusgrått moln) lyfts högt upp i luften, där de kondenserar till mycket små partiklar och inte blandar sig med material från marken. Bombningarna av Hiroshima och Nagasaki hör till denna kategori. För låga explosioner blandas vapenresterna i stället med material från omgivningen och ger större partiklar, vilket ger ett brunaktigt moln. Dessa faller ner nära explosionen samt sprids i vindriktningen, vilket ger upphov till en allvarlig radiologisk fara.





Kärnvapenexplosionerna i Hiroshima (vänster) och Nagasaki (höger) var båda luftexplosioner. Viss kontamination uppstod ändå lokalt eftersom den höga luftfuktigheten i kombination med sotpartiklar från bränder gav upphov till nederbörd, så kallat svart regn, som förde ner radioaktivitet till marken. Foto: George Caron/Charles Levy. United States Federal Government (public domain).



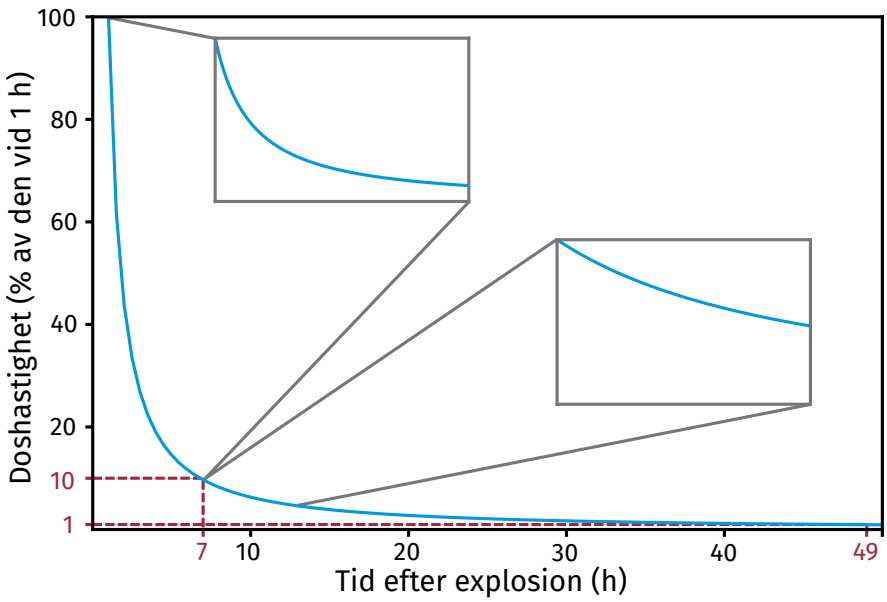
Totala stråldosen för de första 48 timmarna representerat av ett förenklat nedfall vid stabil västlig vind om 24 kilometer i timmen, samt riskområde enligt Försvarsmaktens mall. Nedfallsområdet är smalare än riskområdet, vilket antyder att aktiviteten inte behöver vara hög inom hela riskområdet. Nedfallets uppskattade ankomsttid i timmar ges i figuren av H+1 och så vidare.
Kartunderlag: Lantmäteriet

uppstå genom neutronaktivering av vapenrester eller markmaterial vid marknära explosioner (se avsnittet *Neutroninducerad aktivitet*).

Med en luftexplosion menas en explosion som sker så pass högt över jordytan att lokalt nedfall kan förväntas vara försumbart. Vilken höjd som krävs beror på laddningsstyrkan. För en kärnvapenexplosion med styrkan 1 kiloton räcker en explosionshöjd över 100 meter med god marginal. En explosion som sker under markytan är mer eller mindre innesluten, beroende på laddningsstyrka och djup. Det har betydelse för om radioaktivitet kan läcka ut från explosionen eller inte. För en väl förseglad explosion med styrkan 1 kiloton krävs ett djup runt 120 meter för att innesluta explosionen.

Med ingående kännedom om relevanta data är det i princip möjligt att förutsäga nedfallets aktivitet och utbredning. I praktiken råder dock stora osäkerheter, särskilt i det inledande skedet efter en kärnvapenexplosion. Det går inte att ha en noggrann kännedom kring nedfallet förrän omfattande mätningar hunnit genomföras. Enkla mallar för riskområde får i stället användas för att göra grova uppskattningar av nedfallet. Dessa kompletteras sedan successivt med faktiska mätningar och mer avancerade spridningsberäkningar. Här väljer vi därför att exemplifiera nedfallet med hjälp av ett förenklat nedfallsområde, där vinden antas vara konstant både i tid och i höjdled.

När fission har skett nyligen, är många av fissionsprodukterna som nyss har skapats mycket instabila. Det gör att det radioaktiva nedfallets aktivitet är mycket hög per kilogram aktivt material direkt efter en kärnvapenexplosion. Den höga aktiviteten innebär också korta halveringstider, så att aktiviteten avklingar snabbt. En förenklad tumregel för avklingning hos nedfallet är *sju/tio-regeln*. Den innebär att aktiviteten sju timmar efter explosionen är en tiondel av aktiviteten en timme efter explosionen, och efter 49 timmar har den avtagit till en hundradel. Strålningens intensitet, även kallat doshastigheten, är



Ungefärlig doshastighet från nedfallspartiklar upp till 50 timmar efter en explosion. Röda linjer indikerar tidpunkterna där doshastigheten når 10 respektive 1 procent av den som råder en timme efter explosionen (vilket sker kring 7 och 49 timmar efter explosionen). Paneler visar ändringen i doshastighet mellan timme 1 och 7, samt mellan timme 7 och 13.

Fakta rörande radioaktivt nedfall

- Nedfallspartiklar är ofta relativt stora och molnet med det kommande nedfallet syns troligen. Att borsta av sig, så kallad torr dekontaminering, räcker ofta. Under en räddningsinsats är det dock viktigt med mätningar och att göra en kartläggning av nedfall.
- Aktiviteten klingar snabbt av (mycket snabbare än vid en kärnteknisk olycka) och skydd är som viktigast under de första timmarna.
- Joniserande strålning kan upptäckas ner till väldigt låga nivåer och finns naturligt i vår omgivning. Låga doshastigheter bedöms inte vara farliga.
- Den främsta faran är nedfall som ligger på marken. De doser som erhålls genom att andas in partiklar är låga (enstaka procent av totala dosen) och ännu mindre om man är inomhus. Andningsskydd kan vara bra, men inte absolut nödvändigt.
- Mat, dryck (till en början också vatten i kran) och mediciner som inte varit i direktkontakt med nedfall kan användas.
- Jodtabletter fyller ingen praktisk funktion vid nedfall från kärnvapen.
- Symtom på strålskador kan komma senare (dygn till veckor) eller återkomma efter en period där den drabbade varit symtomfri. Detta gäller dock inte för högre stråldoser.
- Skydd är generellt att föredra framför evakuering, särskilt innan eventuella nedfallsområden har identifierats.
- Dekontaminering av drabbade har en lägre prioritet än livräddande vård eller insatser.

ett mått på hur snabbt dosen ökar om man vistas i en radioaktiv omgivning. Den mäts i enheten gray per timme (Gy/h).

Neutroninducerad aktivitet

Den joniserande initialstrålningen från kärnvapen innehåller bland annat neutroner. När de kolliderar med vapenresterna och material i omgivningen kring explosionen kan de absorberas och bilda radioaktiva ämnen. Detta kallas *neutroninducerad aktivitet*.

Ett exempel på aktivering av vapenmaterial är när neutroner absorberas i uran-238 som finns i vapnet och bildar tyngre ämnen, så kallade *transuraner*, som är radioaktiva. Vid explosioner i atmosfären kolliderar neutroner med atomkärnor i den omgivande luften, vilket medför att kol-14 bildas. De omfattande atmosfäriska kärnvapenproven på 1950- och 1960-talet medförde en mätbar höjning av mängden kol-14. Den långa halveringstiden för kol-14 (5 730 år) innebär dock att tillskottet av radioaktivt material har marginell betydelse. Det är i stället neutroninducerad aktivitet med kortare halveringstider som kan ha mer akut betydelse. Material i marken kan aktiveras av neutronerna om en kärnvapenexplosion sker i form av en luftexplosion nära marken. Det blir ännu påtagligare vid en markexplosion.

De ämnen som är mest problematiska är de som lever kvar med påtaglig aktivitet timmarna efter explosionen, samtidigt som de är tillräckligt kortlivade för att vara en fara för hälsan. Farligast är gammastrålande nuklider eftersom de är energirika nog att penetrera huden och ge stråldos i kroppens vävnader. Exempel på dessa ämnen i naturen, eller i konstruktionsmaterial, är mangan, natrium och aluminium. Mangan finns i varierande grad i jordarter, men innebär främst problem om det ingår i hög halt i vissa stållegeringar. Aluminium ingår också i jordarter och i konstruktionsmaterial. Natrium ingår i salt, till exempel i havsvatten.

Neutroninducerad aktivitet avklingar generellt snabbare än aktiviteten från fissionsprodukter. Därmed är det främst ett problem i det tidiga skedet efter en markexplosion. Det är dess-

utom värt att påpeka att en luftexplosion, som inte ger något radioaktivt nedfall, fortfarande genom neutroninducerad aktivitet kan ge kvarvarande strålning på marken inom ett tämligen begränsat område runt nollpunkten.

Sot från bränder

En annan möjlig effekt av kärnvapenexplosioner är att stora mängder sot tillförs atmosfären från bränder som uppstår. Det kan jämföras med omfattande skogsbränder och större vulkanutbrott. Båda är naturkatastrofer som åtminstone i sistnämnda fallet har kunnat kopplas till globala temperaturförändringar åren efter händelserna. Om ett omfattande kärnvapenkrig skulle ge klimateffekter över lång tid – en så kallad *atomvinter* – var omdebatterat under 1970-talet i ljuset av kalla krigets konfrontation mellan USA och Sovjetunionen.

Trots att vi har blivit bättre på att förutsäga klimatförändringar är det svårt att förutsäga hur klimatet påverkas av kärnvapen. Det beror bland annat på i vilken omfattning det börjar brinna och hur mycket sot som bildas, vilket varierar kraftigt från fall till fall. Om brand uppstår eller inte beror på mängden brännbart material i omgivningen kring kärnvapenexplosionen. I en stad finns troligen mer lättantändligt material (tyger, tidningspapper) än i terräng. Dessutom påverkar sikt och luftfuktighet om värmepulsen kan antända material. Om kärnvapen användes i en sådan omfattning att de skulle leda till klimatförändringar kommer det också leda till mer akuta effekter på samhället.

Kvardröjande effekter från EMP

Den mest påtagliga effekten av en EMP är den nästan omedelbara förändringen i elektrisk fältstyrka som kan störa och slå ut elektronik. Men en EMP kan också ge upphov till kvardröjande effekter. Den ena orsakas av elektroner som lämnas kvar i atmosfären och inrättar sig efter linjerna i jordens magnetfält. Detta kan orsaka att radio- och radarsignaler sprids eller störs ut upp till flera timmar efter explosionen.

Den andra effekten är att kärnvapenexplosionen förvränger det jordmagnetiska fältet. Effekten påminner om kraftiga solstormar och ger till skillnad från den tidiga pulsen bara upphov till mycket låga frekvenser. Det har inte någon direkt verkan på elektriska komponenter, utan påverkar enbart infrastruktur som högspänningsledningar. Effekten kan till exempel slå ut transformatorer och ställverk samt orsaka långvariga och mycket omfattande skador på infrastrukturen.

Kärnvapenverkan i rymden

Kärnvapen kan användas för att slå mot vapen i rymden, som satelliter och ballistiska robotar. Verkansformerna i rymden skiljer sig väsentligt från verkan nära marken. Den mest påtagliga skillnaden är att stötvågen nästan helt uteblir. Satelliter påverkas däremot av den joniserande strålningen från en kärnvapenexplosion. Satelliter är i varierande grad hårdgjorda, till exempel genom skärmning och användning av robusta komponenter, för att klara av de naturliga påfrestningar de utsätts för.

Röntgen- och gammastrålning från en kärnvapenexplosion kan hetta upp komponenter så att de förstörs. Röntgenstrålning har mycket kort räckvidd i metall och även ett tunt hölje ger ett bra skydd. Gammastrålning kan ha motsatt problem genom att de flesta gammafotoner passerar igenom en satellit utan att avsätta sin energi i dess komponenter. Neutronstrålningens främsta skadeverkan är inte upphettning, utan att den orsakar förändringar i materialet som kan förstöra komponenter. I likhet med gammastrålning passerar emellertid huvuddelen av neutronerna genom en satellit utan att orsaka några skador. Verkansavståndet för alla tre strålningstyper blir således mycket kort.

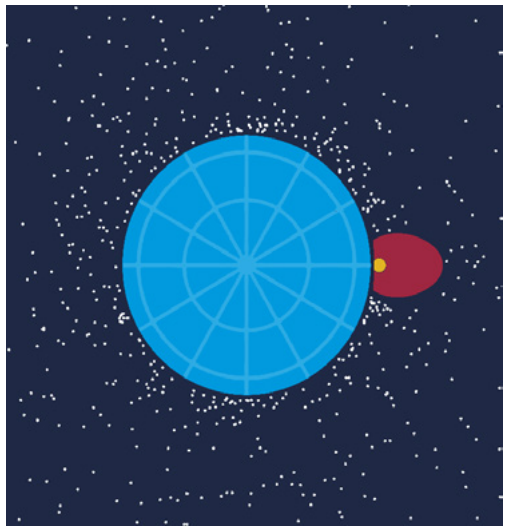
Vid kärnvapenexplosioner i rymden finns ingen atmosfär för gammafotoner att interagera

med och inget elektromagnetiskt fält genereras. Satelliter påverkas däremot av systemgenerad EMP, där gammaflödet från kärnvapenexplosionen genererar elektriska fält i själva satelliten. De gammastråldoser som krävs för att slå ut en satellit är emellertid så höga att explosionen måste ske förhållandevis nära målet.

Den mekaniska stöten från vapenresternas expansion kan påverka en satellits bana. I avsaknad av atmosfär utgörs stötvågen enbart av de expanderande vapenresterna, vilket medför att verkansradierna även här är mycket korta. Sammantaget innebär detta att inte ens kraftfulla kärnvapen kan användas för att slå ut flera satelliter, utan de är precisionsvapen som används för att slå ut en enskild satellit. Detta medför att kärnvapen är ett ineffektivt sätt, jämfört med kinetiska vapensystem, för att bekämpa enskilda satelliter.

Ett effektivare sätt att använda kärnvapen för att slå ut satelliter är att generera artificiella strålningsbälten. Runt jorden förekommer naturliga strålningsbälten av laddade partiklar, som har en skadlig effekt på satelliternas förväntade livslängd i den strålningsmiljö som råder i omloppsbanan. En kärnvapenexplosion i rymden tillför högenergetiska elektroner som skapar ett artificiellt strålningsbälte. Effekten är inte omedelbar, men medför att satelliter som passerar genom det artificiella strålningsbältet får försämrad funktionsförmåga över tid. Detta kan förkorta livslängden till några veckor och påverka tusentals satelliter. De artificiella strålningsbältenas styrka och livslängd beror till stor del på var explosionen sker i magnetfältet och effekten beror på var strålningsbältet befinner sig i förhållande till satellitbanorna. Metoden är potentiellt mycket effektiv, men inte ett precisionsvapen eftersom den drabbar såväl tredje parts som egna satelliter som passerar genom strålningsbältet.

Om EMP är den önskade verkansformen av kärnvapenanvändning mot markmål är den optimala explosionshöjden högt upp i atmosfären (60–100 kilometer beroende på laddningsstyrka). Vid ännu högre höjder avtar effekten vid marken. Låga omloppsbanor är från 160 kilometer ovan-



En kärnvapenexplosion i rymden orsakar en stor region med högenergetiska elektroner (rött). Detta kan påverka satelliter (vita) över tid, så att deras livslängd förkortas avsevärt. Jorden är blå i figuren.

för jordytan och sträcker sig upp till 2 000 kilometer. Kärnvapenexplosioner i områdets nedre del ger fortfarande kännbara effekter på jordytan, även om verkan är betydligt lägre än vid optimal explosionshöjd. Ju högre upp explosionen äger rum, desto mindre påtaglig blir effekten vid marken. Effekten blir försumbar eller uteblir helt vid de höjder som är optimala för verkan mot satelliter.

Interkontinentala ballistiska robotar färdas högt över jordytan med mycket hög hastighet och är således svåra att bekämpa med luftförsvar, men kärnvapen skulle kunna användas för att slå ut dessa robotar i rymden. Gammastrålningens upphettande effekt verkar med längst räckvidd. Explosionen måste därför ske inom ett avstånd av ungefär hundra meter för att gammastrålningen ska hetta upp den ballistiska roboten tillräckligt mycket för att vitala delar ska förstöras. Förutom ett markbaserat luftvärnssystem runt Moskva, finns i dagsläget inga sådana system för bekämpning av interkontinentala ballistiska robotar. ■

Upptäckt av kärnvapenexplosioner

Det förra kapitlet gick igenom de olika verkansformerna från kärnvapen. Dessa effekter ligger till grund för olika metoder för att upptäcka att kärnvapenexplosioner har skett. Det är av stor betydelse om man vill upptäcka att kärnvapen har använts. Det är också viktigt om man vill verifiera att ett avtal som begränsar möjligheterna att prova kärnvapen efterföljs.

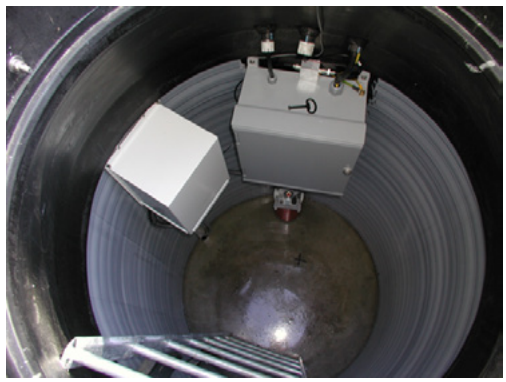
De flesta av verkansformerna från en kärnvapenexplosion orsakar signaler som kan registreras på stora avstånd. Beroende på i vilket medium explosionen sker, kommer olika typer av signaturer att dominera, vilket gör det nödvändigt att använda sig av flera olika mättekniker.

Seismiska vågor

Ett underjordiskt prov är ett troligt scenario om ett land vill prova ett kärnvapen så obemärkt som möjligt. Den mycket kraftiga och omedelbara energin som frigörs vid underjordisk explosion skapar ett hålrum (*kavitet*) när det omgivande materialet förångas. Närmast hålrummet skapas sprickor i berggrunden. På större avstånd övergår energin i elastiska vågor i jordskorpan och sprickbildningen avstannar. Mellan 1 och 5 procent av energin omvandlas till seismiska vågor som kan detekteras på stora avstånd. Seismiska vågor kan även orsakas av atmosfäriska explosioner, där tryckvågen kopplar till marken. Även explosioner under vatten kan registreras genom att energin överförs via vattnet till jordskorpan.

Seismiska vågor detekteras av seismometrar som kan registrera mycket små rörelser i jordskorpan i en eller flera riktningar. Det är fördelaktigt att samordna flera samlokaliserade seismometrar till så kallade *arraystationer*. Sådana mätstationer kombinerar informationen från de enskilda seismometrarna och kan därmed reducera bakgrundsbrus. Det ökar detektionsförmågan och det möjliggör även att bestämma vågens hastighet, typ och riktning. Genom att kombinera informationen från ett flertal mätstationer kan explosionen lokaliseras.

Seismiska händelser skapar flera typer av seismiska vågor. *P-vågor* är *longitudinella* vågor där berggrunden omväxlande trycks ihop och dras isär, medan *S-vågor* är *transversella* där berggrunden förflyttar sig vinkelrätt mot vågen. P-vågor rör sig med en hastighet av cirka 6 kilometer/sekund och kommer att anlända till en mätstation före S-vågen, som har en hastighet av cirka 4 kilometer/sekund. Genom att studera skillnaden mellan olika typer av seismiska vågor kan man skilja på explosioner och jordskalv. Vid en explosion, som är en symmetrisk källa, kommer nämligen P-vågor i regel att vara större än S-vågorna.

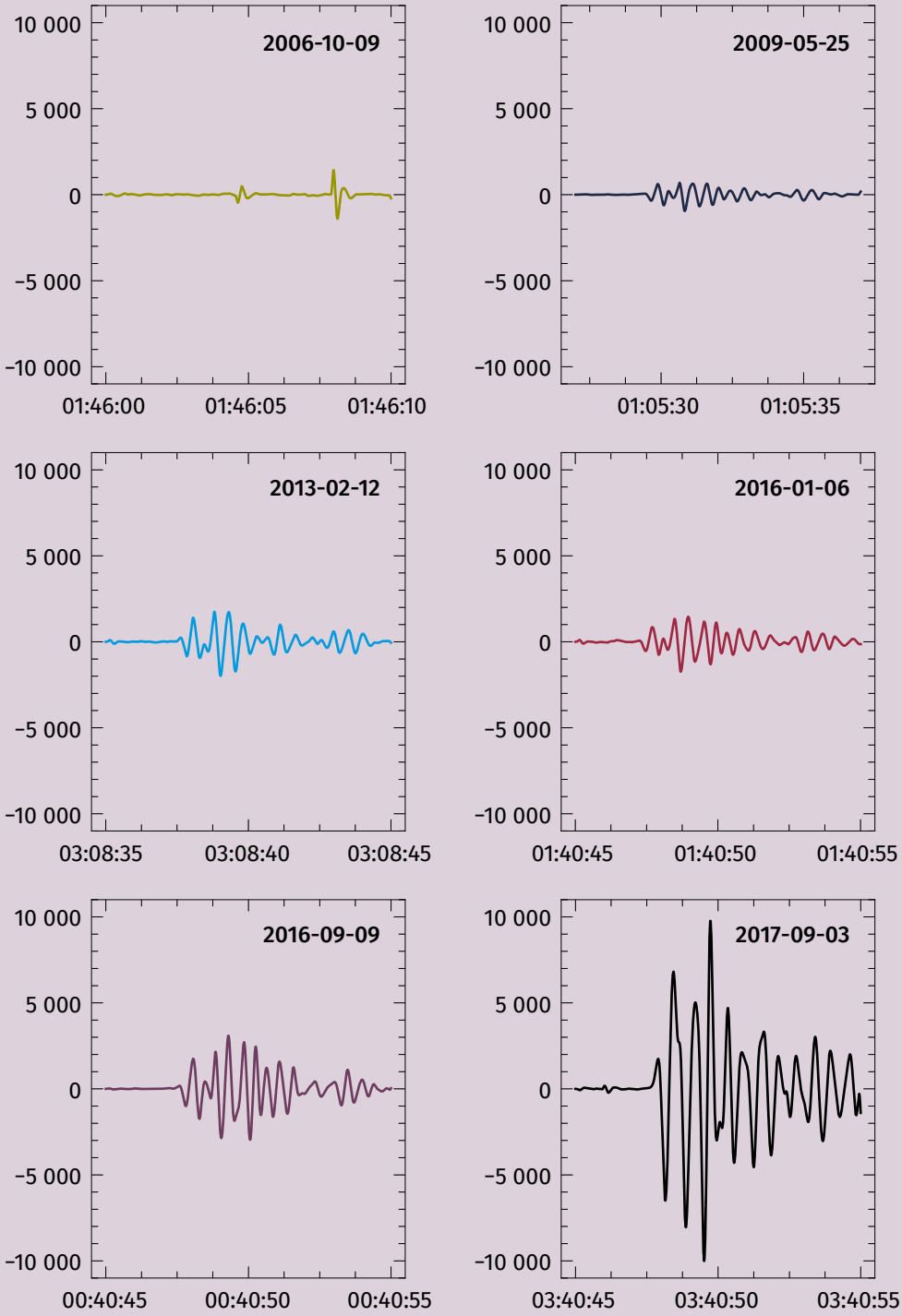


Sedan 1969 driver FOI en seismisk arraystation i Hagfors som har registrerat ett stort antal kärnvapenprov. Hagforsstationen är i dag en del av CTBT:s globala verifikationssystem. Figuren visar en av stationens seismometerbrunnar.

Hydroakustiska vågor

Vid en explosion på ett stort havsdjup kopplar en mycket stor del av energin till vattnet. Närmare vattenytan kommer en del av energin att överföras till atmosfären. Omvänt kan en atmosfärisk explosion överföra en del av sin energi till vattnet.

Vatten transporterar ljudvågor mycket effektivt. I världshaven kan vågorna transporteras



Samtliga prov genomförda av Nordkorea har detekterats vid den seismiska stationen i Hagfors.

mycket långt med små energiförluster i den så kallade SOFAR-kanalen (*sound fixing and ranging*). Vid ekvatorn befinner sig SOFAR-kanalen på cirka 1,5 kilometers djup. Stationer för mätning av hydroakustiska signaler kan bestå av sammankopplade hydrofoner. En annan teknik är att använda seismiska stationer på land som registrerar ljudvågor i havet, vilka omvandlas till seismiska vågor när de träffar kustlinjen (så kallade *T-vågor*).

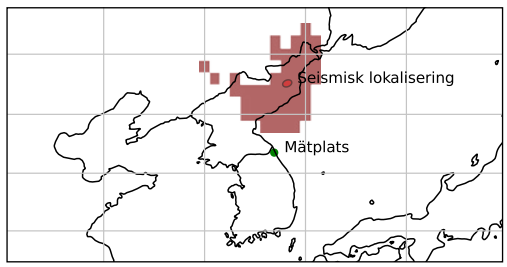
Infraljud

En effektiv metod för att upptäcka atmosfäriska explosioner är att registrera *infraljud*. Det är lågfrekventa och för människan ohörbara ljudvågor som kan transporteras långa sträckor i atmosfären med en hastighet av cirka 300 meter per sekund. Ljudvågor med frekvenser lägre än 16 Hz brukar benämnas infraljud. Den långa våglängden gör att vågorna kan reflekteras på hög höjd i atmosfären (upp till mer än 100 kilometer), vilket gör att en kärnvapenexplosion kan detekteras på avstånd av tusentals kilometer. Vindförhållanden spelar stor roll och på hög höjd kan vindhastigheten vara upp till 100 meter per sekund, vilket kan ha stor påverkan på ljudvågors utbredning.

Infraljud kan detekteras med hjälp av arraystationer utrustade med mikrobarometrar, vilka kan registrera mycket små förändringar i lufttrycket och användas för detektion och lokalisering. Generellt sett är det svårare att lokalisera explosionen med infraljud jämfört med seismiska mätningar. Det beror främst på osäkerheter kring hur signalen transporteras och hur den påverkas av vädret. Å andra sidan kan infraljud användas för att upptäcka atmosfäriska explosioner på betydligt längre avstånd än vad som är möjligt med seismiska metoder. Ofta används infraljudssignaler och seismiska signaler tillsammans för att analysera en explosion.

Radioaktiva partiklar och gaser

Alla detektionsmetoder som hittills har diskuterats – seismik, infraljud och hydroakustik – kan användas för att upptäcka explosioner. De kan dock inte skilja på en kärnvapenexplosion och en kemisk explosion. Om man uppskattar att laddningsstyrkan är hög, till exempel 100 kiloton, kan man vara säker på att det rör sig om en kärnvapenexplosion. Den styrkan är mycket svår att åstadkomma med konventionella medel. Vid lägre styrkor, exempelvis några kiloton, är det dock svårare. Då är det enda säkra beviset på att det verkligen var en kärnvapenexplosion att knyta utsläpp av radioaktivitet till explosionen. Detta sätt användes efter Nordkoreas första kärnvapenprov 2006. Den uppskattade explosionsstyrkan var då 0,5–2 kiloton, och det var först efter att radioaktivitet upptäckts som det fanns tillräckligt med bevis för att säga att det rörde sig om ett kärnvapen.



Dagarna efter Nordkoreas första kärnvapenprov den 10 oktober 2006 genomförde FOI en mätning i samarbete med Sydkorea där luftprover samlades in nära gränsen till Nordkorea. Analysen visade att proverna innehöll radioaktivt xenon som kunde ha producerats och släppts ut vid explosionsplatsen. Det bruna fältet visar möjligt utsläppsområde beräknat med hjälp av simuleringar av den insamlade luftens transport i atmosfären. Mätningen användes för att visa att explosionen verkligen var en kärnvapenexplosion.

Tre processer bidrar till bildandet av radioaktiva nuklider när ett kärnvapen exploderar. Omedelbart eller kort efter explosionen bildas mer än 1 200 olika fissionsprodukter. Neutroner aktiverar material i vapnet och i omgivande miljö. Dessutom kan rester av plutonium, uran och tritium finnas kvar efter explosionen. Det radioaktiva materialet visar sig i form av små partiklar (*aerosoler*) eller gaser. Om partiklarna eller gaserna tar sig ut i atmosfären kan de spridas med vindar och går ofta att detektera på stora avstånd.

Partikelstationer kan användas för att upptäcka explosioner i atmosfären eller grunda explosioner under vatten eller mark. Partiklar samlas in genom att stora mängder luft pumpas genom ett filter där partiklarna fastnar. Efter en viss tids insamling avlägsnas filtret och radioaktiviteten och nuklidinnehållet mäts med hjälp av en detektor som registrerar gammastrålning. Ibland kan explosionstiden bestämmas genom att aktivitetskvoter mellan olika isotoper fungerar som klockor. Dessutom kan kvoterna också användas för att beskriva källan och skilja kärnvapenexplosioner från andra möjliga utsläpp. Metoder baserade på aktivitetskvoter förutsätter att tillräckligt mycket aktivitet detekteras för de relevanta isotoperna. Normalt kan dock inte en underjordisk explosion upptäckas på större avstånd med den här tekniken, eftersom det inte finns tillräckligt med partikelburen radioaktivitet på grund av att partiklarna stannar kvar i hålrummet och omgivande berggrund.

Till skillnad från partiklar kan gaser och speciellt ädelgaser, som inte reagerar kemiskt med omgivningen, med större sannolikhet ta sig ut i atmosfären från en underjordisk explosion, till exempel via sprickor i berggrunden. Dessutom regnar inte ädelgaser ner på marken vid nederbörd, vilket gör att de generellt sprids längre sträckor än partiklar. Därför finns system som samlar in luft och med hjälp av kromatografiska metoder separerar ut ädelgasen xenon. En känslig detektor kan sedan identifiera fyra relevanta isotoper som bildas i kärnvapenexplosioner, och lever tillräckligt länge för att låta sig detekteras. Med hjälp av aktivitetskvoterna mellan de olika isotoperna är det ofta möjligt att skilja på kärnvapenexplosioner och andra källor till radioaktivt xenon, till exempel kärnkraftverk.

FOI har i decennier arbetat med att utveckla ultrakänslig teknik för insamling och mätning av radioaktiva ädelgaser i atmosfären. Det har resulterat i mätsystemet SAUNA, som i dag finns på 17 platser i CTBT:s övervakningssystem och även används nationellt i många länder.

Man använder datorsimuleringar av hur partiklar och gaser transporteras i atmosfären för att hitta källan till ett radioaktivt utsläpp och med större sannolikhet kunna knyta upptäckten till exempelvis en seismisk lokalisering. Med hjälp av väderdata och transportmodeller kan man spåra var luften, som samlats in på en mätstation, tidigare befann sig. Beräkningarna kan i sin tur användas, tillsammans med de uppmätta aktiviteterna, för att uppskatta var källan är och när utsläppet skedde.

Det fullständiga provstoppsavtalet

Det fullständiga provstoppsavtalet, CTBT, som innebär ett fullständigt förbud mot kärnvapenexplosioner, öppnades för signatur 1996 och har i dag skrivits på av 187 länder. Arbetet med avtalet sker inom organisationen CTBTO, *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Oraganization*. Trots

att det fortfarande formellt inte har trätt i kraft har avtalet inneburit en norm att inte genomföra kärnvapenprov. En starkt bidragande orsak är den avskräckande effekten av det omfattande verifikationssystemet som har införts och att en provspräning därmed inte ska kunna gå obemärkt förbi. Bland annat finns över 300 mätstationer för att upptäcka kärnvapenexplosioner under jord, under vatten och i atmosfären.

De första försöken att få fram ett provstoppsavtal misslyckades. Ofta på grund av att man inte kunde komma överens om hur man skulle kontrollera om någon avtalspart provade i hemlighet. Under slutet av femtiotalet började man skissa på ett globalt sensorsystem, men det dröjde ända till 1996 innan systemet – *International Monitoring System* (IMS) – kunde börja realiseras.

IMS ska med minst 95 procent sannolikhet kunna identifiera en kärnvapenexplosion med en styrka av 1 kiloton. Förutom att upptäckas, måste kärnvapenexplosionen också kunna lokaliseras med tillräcklig precision samt kunna skiljas från andra händelser som kan ge upphov till liknande signaturer. Sådana händelser kan till exempel vara jordskalv, konventionella sprängningar eller radioaktiva utsläpp från kärnkraftverk.

Alla de tidigare beskrivna detektionsmetoderna används i IMS. Totalt ingår 170 seismiska mätstationer, elva stationer för mätning av hydroakustiska signaler och 60 stationer för detektion av infraljud. Mätsystemen för luftburen radioaktivitet utgörs dels av 80 system för insamling av luftburna partiklar, dels av 40

Det globala sensorsystemet International Monitoring System (IMS) är planerat att bestå av 321 mätstationer och 16 laboratorier i 89 länder. Systemet är färdigt till över 90 procent och består av sensorer för seismiska och hydroakustiska vågor, infraljud och luftburen radioaktivitet. Data skickas till det internationella datacentret i Wien och distribueras till alla CTBT:s medlemsländer. Illustration: CTBTO Preparatory Commission.

system för insamling av xenon. Alla radioaktiva nuklider är inte relevanta i detta sammanhang. Många har för kort halveringstid eller sönderfaller på ett sätt som inte lämpar sig för detektion i IMS. I CTBT har man fastställt en lista på 88 nuklider som är extra relevanta för att upptäcka kärnvapenexplosioner på de avstånd som är aktuella för IMS.

Till verifikationsregimen hör också ett internationellt datacenter (IDC) beläget i Wien, Österrike. En ytterligare komponent i verifikationsregimen är de nationella datacenter (NDC:er) där analyser av IMS-data utförs på nationell basis. FOI driver Sveriges NDC. Dessa NDC:er har en viktig funktion, eftersom det endast är medlemsländerna själva som kan väcka misstanke om att ett land har provat ett kärnvapen.

Slutligen innehåller CTBT även en inspektionsmekanism – *On-Site Inspection* (OSI) – som ska kunna genomföra inspektioner på plats om man misstänker att ett land utfört en kärnvapenexplosion. Om analyser av data från CTBTO:s globala sensornätverk visar på ett misstänkt kärnvapenprov ska man kunna genomföra inspektioner i det utpekade området. Ytterligare information i form av mätdata och visuella observationer ska klargöra om en kärnvapenexplosion ägt rum eller inte. Som nämnts tidigare kan detta endast genomföras i praktiken när CTBT trätt i kraft, men redan i dag byggs en organisation upp. En inspektion består av 40 inspektörer som med hjälp av olika mätmetoder söker av en yta på maximalt 1 000 kvadratkilometer. ■

On-Site Inspection-övningen IFE14 genomfördes 2014 i Jordanien. Övningen syftade till att samla in information för att kunna avgöra om en kärnvapenexplosion ägt rum eller inte. Bilderna visar inspektörsteamets operationsbas. Foto: CTBTO Preparatory Commission.

Åtgärder för att bemöta kärnvapenhotet

I tidigare kapitel framgår att kärnvapen och dess konsekvenser är ett hot som måste tas på allvar. I det avslutande kapitlet tar vi oss an hur konsekvenserna från kärnvapenexplosioner trots allt kan begränsas. Det innebär att upptäcka vad som har hänt, skydda sig mot effekterna samt agera ändamålsenligt som överlevande, inom räddningstjänst och med avseende på vård och omhändertagande.

Snabb upptäckt av kärnvapenexplosioner

En kärnvapenexplosion i Sverige skulle få konsekvenser för hela samhället och involvera de flesta, eller rent av alla delar av Sveriges totalförsvar. Det behövs en robust förmåga för att snabbt rapportera data om kärnvapenexplosioner och konsekvenserna i Sverige till regeringen, räddningstjänster och andra berörda myndigheter. Det skulle stödja dem i att kunna ta beslut om skyddsåtgärder och livräddande insatser. Explosionens plats, tidpunkt, styrka och om det rör sig om en mark- eller luftexplosion är viktig information för lägesbilden. Det sistnämnda är av extra betydelse för att kunna göra en bra bedömning av det eventuella radioaktiva nedfallet.

Det finns inget system på plats i Sverige i dag som fullt ut kan täcka det informationsbehovet. Det finns dock många komponenter på plats i form av mätsystem som används för andra ändamål. Ett varningssystem skulle till stor del använda sig av samma mättekniker som används för CTBT-verifikation, det vill säga detektion av seismiska signaler och infraljud, samt mätningar av radioaktivitet (se kapitlet *Upptäckt av kärnvapenexplosioner*). Det skulle dock ställa större krav på mätsystemet, till exempel i form av ett tätare nätverk av sensorer. Det behöver också gå kort tid mellan explosionen och den kommunicerade analysen.

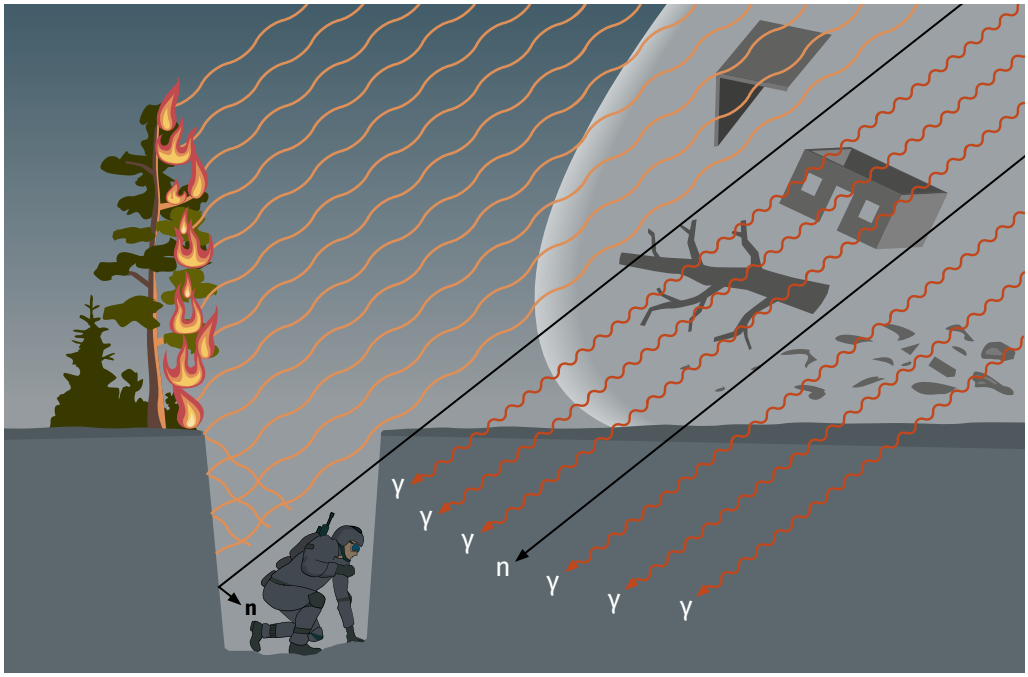
Skydd

Effekterna från kärnvapenexplosioner har beskrivits i kapitlet *Kärnvapenverkan*. I detta avsnitt illustreras genom tre exempel hur olika grad av skydd kan lindra dessa konsekvenser. Framställningen fokuserar på de direkta effekterna: stötvåg, värmestrålning och joniserande initialstrålning. I avsnittet om civilt försvar berörs vilka konsekvenser ett eventuellt nedfall får för överlevande och räddningstjänstpersonal.

Angrepp i terräng

Hur omfattande effekterna av en kärnvapenexplosion blir beror bland annat på laddningsstyrkan. Som exempel tar vi en luftexplosion med styrkan tio kiloton på 320 meters höjd. Beskrivningen i detta exempel avser militär personal, men det mesta gäller även civila. För människor i terräng ger explosionen flera direkt skadliga effekter. Stötvågen kan ge tryckskador. Man riskerar också att slungas iväg av stötvågsvinden, vilken har ännu längre räckvidd, upp till 1 600 meter. Värmestrålningen från det heta eldklotet kan orsaka brännskador på oskyddad hud på avstånd upp till 1 800 meter. Om huden är skyddad av täckande uniformsklädsel handlar det om markant kortare avstånd, men lättare klädsel ger inte lika bra skydd. Den joniserande strålning som kommer direkt från kärnreaktionerna i explosionen består främst av neutroner och gammafotoner. Denna strålning kan ge dödliga akuta strålskador på avstånd upp till 1 200 meter.

Även ett enklare skydd, till exempel en skyddsgrop, förbättrar situationen påtagligt. Skyddsgropen ger visserligen inte något nämnvärt skydd mot övertrycket, men risken att slungas i väg minskar markant. Avståndet för direkta övertrycksskador är runt 350 meter. Skyddet blockerar effektivt värmestrålningen, som reduceras till eventuella reflektioner, medan viss dämpning av den joniserande initialstrålningen gör att avståndet för dödlig akut strålskada minskar till runt 900 meter. Det är den effekt som har längst räckvidd i det här fallet. Man får ett visst skydd mot strålningen om man befinner sig i ett bepansrat fordon. En stridsvagn tål dessutom stötvågen bra. Den avgörande faktorn är snarare hur mycket besättningen i stridsvagnen tål att slungas omkring.



Även ett enklare skydd har betydelse om man inte befinner sig alltför nära explosionen.

Angrepp mot städer

Ett kärnvapenangrepp i anslutning till en stad är mer komplext än det föregående exemplet, eftersom stadsmiljön är mer varierad avseende vilket skydd som olika platser medger, samt att kringflygande föremål – inte minst glassplitter – är en större risk än i terräng. Dessutom kan civilbefolkningen inte förväntas agera lika ändamålsenligt som militär personal, till exempel när det gäller att snabbt ta skydd och att göra rätt saker tiden efter angreppet.

Stötvågen raserar byggnader, vilket även skadar eller dödar människor i eller nära byggnaderna. Människor nära fönster riskerar dessutom få svåra skador från glassplitter. Värmestrålningen kan orsaka svåra brännskador, samt ge upphov till bränder. Den joniserande initialstrålningen orsakar akut strålskada.

Kartorna visar exempel på vid vilka avstånd som svåra skador uppstår vid luftexplosioner med olika styrkor. För tio kiloton har stötvågen och värmestrålningen ungefär lika stort verkansavstånd. För tio kiloton bestäms gränsradien av värmestrålningen, men glassplitter är en fara på nästan lika långt avstånd.

Flera faktorer gör det komplicerat att uppskatta det faktiska skadeutfallet. Personer som är skymda bakom byggnader eller befinner sig inomhus påverkas inte lika mycket av värmestrålningen, utom möjligen genom reflekterat ljus och uppkomst av bränder. Å andra sidan är det stor risk att skadas svårt om man befinner sig i eller nära en byggnad som rasar. En annan stor skaderisk är kringflygande glassplitter. Personer som befinner sig i källare är relativt väl skyddade, men om bygganden ovanför rasar kan det vara svårt att ta sig därifrån; dessutom kan omfattande bränder orsaka syrebrist.

Beskrivningen gäller för laddningsstyrkan tio kiloton. Vid en lägre laddningsstyrka minskar verkansavstånden, medan de ökar vid en större laddningsstyrka. Verkansavstånden för de olika effekterna förändras i olika grad. För ett kilo-

Verkansradier vid luftexplosioner med styrkorna 1, 10 och 100 kiloton över Stockholm. Explosionshöjderna är 300, 600, respektive 1 400 meter. Blå cirkel visar ungefärliga avståndet inom vilket stötvågen raserar typiska byggnader. Svåra brännskador uppstår hos oskyddade människor ungefär inom den röda cirkeln i respektive figur, medan den vita cirkeln anger det avstånd inom vilket dödliga akuta strålskador uppträder för oskyddade. Den gröna cirkeln är gränsradien, som är det avstånd bortom vilket direkta effekter från kärnvapenexplosionen i allmänhet är försumbara. Gränsradien för 100 kiloton är över sju kilometer och därmed utanför kartan. Kartunderlag: Lantmäteriet.

ton är initialstrålningen nästan lika viktig som stötvågen, medan värmestrålningen har relativt kort räckvidd. För hundra kiloton är det istället värmestrålningen som har störst räckvidd mot oskyddade och den joniserande initialstrålningen når kortast sträcka.

Det är viktigt att notera att höjden för explosionen har betydelse för situationen i stort. Exemplen avser luftexplosioner med försumbart radioaktivt nedfall. Vid en markexplosion kommer avstånden för stötvåg och värmestrålning att minska, samtidigt som lokalt radioaktivt nedfall blir ett akut problem strax efter explosionen.

Angrepp mot fortifikatorisk anläggning

Sista exemplet kring kärnvapenverkan gäller skydd som är särskilt konstruerade för att motstå angrepp. Det kan röra sig om ledningsplatser och andra anläggningar av stor betydelse för totalförsvaret. Sådana anläggningar är typiskt placerade i bergrum under markytan och är väl skyddade från stötvåg, värmestrålning och joniserande initialstrålning som beskrivits ovan. Om en motståndare skulle försöka slå ut en sådan anläggning med kärnvapen skulle det förmodligen ske genom en markbrisad, där stötvågen i själva berget blir den effekt som kan skada anläggningen. Verkansavståndet för markstötvåg mot en anläggning kan grovt uppskattas från hur stor krater som bildas och sedan dubbla detta avstånd. I hårt berg blir till exempel kraterradien från en tio kilotons markexplosion unge-

för 30 meter, vilket ger att tunnlar och liknande raseras inom ungefär 60 meter från explosionen. Även människor och utrustning som befinner sig i bergrummet behöver klara påfrestningarna från explosionen, vilket betyder att särskilt avancerade skyddslösningar behövs.

En konsekvens av ett angrepp med markbrisad är att radioaktivt nedfall kan förväntas i omgivningarna utanför anläggningen. Klarar man effekterna från markstötvågen måste man alltså även kunna hantera att luften utanför anläggningen är kontaminerad. Det kan man göra genom att filtrera inkommande luft, eller stänga lufttillförseln och klara sig på den luft som finns i anläggningen. Som vi sett i kapitlet *Kärnvapenverkan* uppkommer det även en elektromagnetisk puls, så kallad mark-EMP. Den måste hanteras om anläggningen ska kunna fortsätta att fungera efter ett angrepp. Dessa avvägningar kan sammanfattas med att skyddet inte är bättre än sin svagaste punkt. Konceptet brukar kallas *balanserat skydd*.

Civilt försvar

Ett kärnvapenangrepp mot, eller i anslutning till, en tätort skulle medföra ett svåröverskådligt scenario med ett stort antal skadade och döda. Många drabbade skulle dock kunna hjälpas med förhållandevis enkla medel och ett korrekt agerande i det tidiga skedet efter explosionen.

Råd till överlevande

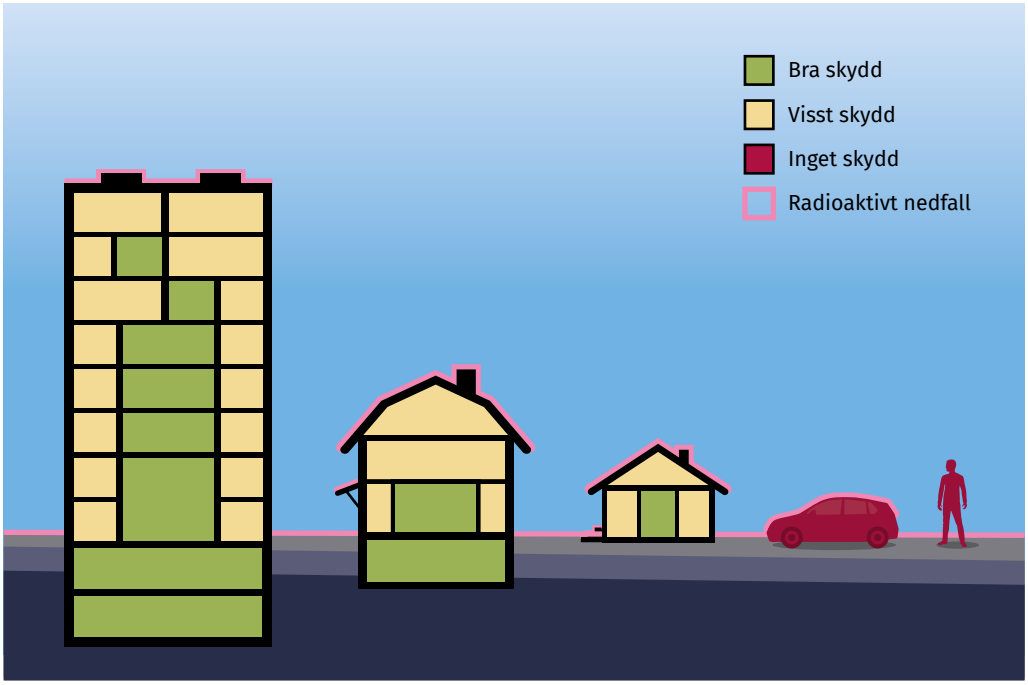
Om explosionen orsakar radioaktivt nedfall kommer det troligen att bestå av relativt stora partiklar, likt damm eller fin sand som färdas med vinden. Radioaktiviteten är först hög men avklingar snabbt. Därför är skydd under de första timmarna avgörande. Nära explosionen kan nedfallet anlända redan inom 15 minuter. Att på eget initiativ försöka ta sig långt bort från området är alltså ofta olämpligt, eftersom man då riskerar att vara helt oskyddad när ett eventuellt nedfall är som aktivast. Därför är det bättre att snabbt ta sig till någon form av skydd där man är, till exempel en källare eller inre delarna av större byggnader, än att förflytta sig långt för att nå skyddsrum. Observera att till exempel bilar ger dåligt skydd mot nedfall. Får man dammet på sig räcker det långt med avborstning och byte av kläder. Det är viktigare att det sker snabbt än att det görs noggrant.

Sök skydd!
Håll dig i skydd!
Håll dig informerad!
Hjälp till i den mån du kan!

Eftersom förekomsten av nedfall samt dess utbredning kommer att vara svår att fastställa till en början är rekommendationen att alla inom ett visst avstånd från en kärnvapenexplosion söker skydd. Till exempel har den amerikanska myndigheten *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) i sin planering använt avståndet 80 kilometer i en cirkel från explosionen. Om befolkningen kan sätta sig i skydd minskar de akuta strålskadorna betydligt vid en markexplosion. För att kunna stanna i skydd är förnödenheter för några dygn önskvärt och det är också viktigt med radio, mobiltelefon eller annan kommunikation för att hålla sig informerad om situationen. Mobiltelefoninätet kan dock förväntas ha svåra störningar eller vara utslaget närmaste tiden efter explosionen.

Genomförande av räddningsinsats

Räddningsinsatsen bör först fokusera på den måttligt byggnadsskadade zonen, där det är stor förstörelse, men de flesta byggnader fortfarande står upp. Det förväntas finnas många överlevande med skador i denna zon, samtidigt som räddningspersonalen kan arbeta utan att utsättas för oacceptabla risker. Räddningsinsatser i den zonen kan därför rädda flest liv. Om det finns



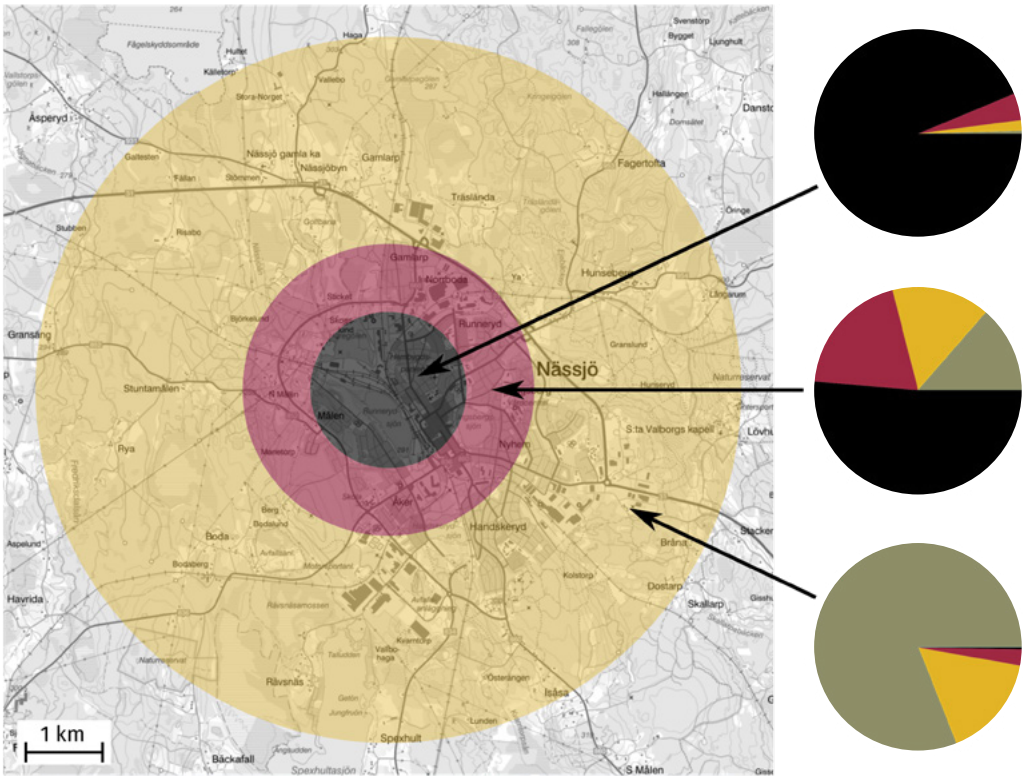
Det bästa skyddet mot strålningen från det radioaktiva nedfallet får man i skyddsrum eller källare. Har man inte tillgång till det är det bra att söka sig till mitten av byggnader, eftersom det ger ett längre avstånd från strålningens källa.

radioaktivt nedfall måste dock räddningsinsatserna planeras därefter (se vidare längre ner).

I området närmast nollpunkten förmodas de flesta vara döda eller dödligt skadade. Denna zon är också förknippad med betydligt större risker och svårare framkomlighet för räddningspersonal. Omvänt, i området utanför den måttligt byggnadsskadade zonen, finns generellt endast en mycket liten andel med livshotande skador. De flesta skadade kan hänvisas till självhjälp genom enskilt omhändertagande.

Den måttligt byggnadsskadade zonen vid en tio kilotons luftexplosion sträcker ut sig från ungefär en kilometer till knappt två kilometer från nollpunkten. Vid luftexplosion med den betydligt större laddningsstyrkan 1 000 kiloton (en megaton) breder zonen ut sig från knappt fem kilometer till knappt nio kilometer. Angrepp med markexplosion leder till mindre direkta skador och skadezonerna krymper med omkring 25 procent i radie. Angreppets karaktär (luftexplosion eller markexplosion) kan möjligen identifieras utifrån svampmolnets utseende (se kapitlet *Kärnvapenverkan*).

Nedfall kan vara ett stort problem vid en räddningsinsats, framför allt vid markexplosioner. Radioaktiva partiklar kan transporteras långt från explosionen och det är avgörande för räddningsinsatsen att kunna mäta för att följa nedfallet och ha uppsikt över de stråldoser som räddningspersonal utsätts för. Vissa områden bör helt undvikas. Nedfallet är generellt farligast nära explosionen, eftersom det anländer fort och aktiviteten är hög; längre bort är det radioaktiva dammet mer utspritt och aktiviteten har också hunnit avklinga mer. Inandning är typiskt en liten del av den totala dosen som människor utsätts för; istället utgör radioaktivt damm på marken den största risken från strålning. Mot detta skyddar inte skyddskläder eller skyddsmask nämnvärt, utan det bästa skyddet är att undvika områden med hög aktivitet.



Zonindelning baserat på byggnadsskador (svåra, måttliga, lindriga) efter en tio kilotons luftexplosion. Cirkeldiagrammen visar andelen döda (svart), svårt skadade (rött), måttligt skadade (gult), samt lindrigt skadade och oskadda (grönt). Kartunderlag: Lantmäteriet.

Andra försvårande omständigheter som påverkar räddningsinsatserna är vägar som blockerats till följd av raserade byggnader, samt uppkomsten av mer eller mindre omfattande bränder. Insatserna kan behöva anpassas efter omfattningen av bränder i den måttligt byggnadsskadade zonen.

Avvägningar för sjukvården

Sjukvården kommer att vara mycket belastad till följd av ett kärnvapenangrepp mot en stad. För att bäst nyttja begränsade resurser kommer *triagering* (sortering och prioritering) av skadade att vara väsentligt. Det innebär en strukturerad process för att snabbt bedöma, kategorisera och prioritera skadade personer utifrån deras akuta vårdbehov. Skadorna från kärnvapenangrepp innebär vårdbehov som sjukvården vanligtvis inte hanterar och som är svåra att till en början få överblick över. Vården är till exempel inte van att hantera många brännskadade samtidigt. Angående akuta strålskador tenderar dessa att visa sig först över tid och kan vara svåra att diagnostisera.

Vad gäller sannolikt strålexponerade personer krävs, efter initiala åtgärder på olycksplatsen, triagering som bygger på risken för akut strålskada. Det kan göras i tre huvudgrupper: De med sannolikt relativt låg stråldos och därmed utan behov av sjukhusvård; de med mycket höga doser med osannolik överlevnadschans och mellangruppen som kan behöva högspecialiserad sjukhusvård. Livräddande insatser bör inte försenas till förmån för noggrann dekontaminering. Slutligen är det värt att betona att akuta strålskador inte betyder att en patient är radioaktiv. ■

Bilaga: Tabeller med verkansavstånd

Tabellerna i denna bilaga ger bland annat exempel på verkansavstånd för värmestrålning, stötvåg och joniserande initialstrålning vid luft- och markexplosioner.

Avstånden för de olika verkansformerna nedan beskriver verkan av kärnvapen på längre avstånd från explosionspunkten, utanför eldklotet. Den höga träffnoggrannheten hos många moderna bärare, till exempel kryssningsrobotar, gör dock att direktträff i många fall snarare är regel än undantag. I dessa fall befinner sig det angripna målet inuti eldklotet och verkansförloppet bestäms av en komplex växelverkan mellan olika mekanismer, vilket gör att indelningen i separata verkansformer inte blir lika tydlig.

Vid en markexplosion är de fysikaliska processerna inuti eldklotet avgörande för att förstå växelverkan med marken och hur markstötvågen och kratern bildas. En detaljerad förståelse för verkan i det absoluta närområdet kring en explosion är därför nödvändig för att kunna utforma skydd mot kärnvapen för specifika mål. Detta kräver avancerade fysikaliska modeller. De modeller som ligger till grund för verkansavstånden nedan ger dock en god uppfattning om kärnvapens verkan på längre avstånd och i övergripande skala.

Explosionshöjden vid luftexplosion skiljer sig åt för olika laddningsstyrkor i tabellerna och är vald för att optimera verkan av luftstötvåg mot bebyggelse. Det medför också att eldklotet inte vidrör markytan.

Ett sätt att grovt uppskatta laddningsstyrkan vid en kärnvapenexplosion är att mäta dimensionerna på det resulterande svampmolnet. Tabellen nedan ger svampmolnets ungefärliga storlek.

Svampmolnets maximala utbredning vid markexplosioner och luftexplosioner på låg höjd för olika laddningsstyrkor. Notera att utbredningen i praktiken är väderberoende.

Laddningsstyrka	Molnets radie	Molnbasens höjd	Molntoppens höjd
1 kt	0,81 km	1,6 km	2,8 km
10 kt	1,5 km	3,1 km	5,8 km
100 kt	2,9 km	5,9 km	12 km
1 000 kt	7,7 km	11 km	19 km

Verkansavstånd för värmestrålning

Mängden värmestrålning som når ett mål utanför eldklotet är som tidigare nämnts beroende av väderförhållanden, vilka mycket förenklat kan beskrivas i termer av sikt. För laddningsstyrkor på 100 kiloton eller mer kan exempelvis verkansavståndet vara dubbelt så stort vid god sikt jämfört med vid dålig sikt. Här definieras god och dålig sikt som 20 kilometer respektive 2 kilometer. Med motsvarande klassificering av dis och dimma motsvarar fuktdis en sikt mellan 1 och 10 kilometer, medan dimma motsvarar en sikt på under 1 km.

För att bränder ska uppstå i skog och mark från eldklotets värmestrålning måste det finnas någon form av torrt bränsle. Det beror på årstid och väder om det antänds eller inte. Tabellen nedan ger exempel på avstånd inom vilka barr- och lövskog samt gräs antänds vid god och dålig sikt för olika laddningsstyrkor. Exemplen för skog förutsätter att marken inte är täckt av snö. För barrskog är också förutsättningen högst 5 millimeter nederbörd det senaste dygnet, att markvegetationen till stor del är vissen och att nedfallna barr och kvistar är så torra att de lätt bryts vid böjning. För lövskog förutsätts högst 3 millimeter nederbörd det senaste dygnet, att löven inte är mer än till hälften utslagna och att markvegetationen är vissen eller obefintlig.

Luftexplosion. Avstånd inom vilka barr- och lövskog samt gräs antänds vid 50 procents relativ luftfuktighet vid god sikt (värden för dålig sikt inom parentes). Se text ovan för villkor för antändning.

Laddningsstyrka	Barr- och lövskog	Gräs
0,1 kt	180 m (160 m)	240 m (220 m)
1 kt	580 m (470 m)	770 m (590 m)
10 kt	1 800 m (1 100 m)	2 400 m (1 400 m)
100 kt	4 600 m (2 000 m)	5 700 m (2 300 m)
1000 kt	10 000 m (3 300 m)	12 000 m (3 800 m)

Skadeverkningar på människa från värmestrålning sker både genom direkta och indirekta brännskador när kläder sätts i brand eller smälter. De två följande tabellerna ger verkansavstånd vid luft- respektive markexplosion efter exponering av värmestrålning i olika typer av klädsel. För människor med lättare klädsel och delvis bar hud motsvarar benämningen *begränsad förmåga* delhudsbrännskador på huvud och händer. Benämningen *kräver vård* motsvarar i sin tur fullhudsbrännskador. För tät klädsel motsvarar *begränsad förmåga* antändning av yttre tygskikt, medan *kräver vård* motsvarar antändning av yttre tygskikt och direkta brännskador.

Luftexplosion. Verkansavstånd för brännskador efter exponering av värmestrålning vid god sikt (värden för dålig sikt inom parentes). Gäller inte syntetklädsel.

Laddningsstyrka	Begränsad förmåga		Kräver vård	
	Delvis bar hud	Tät klädsel	Delvis bar hud	Tät klädsel
0,1 kt	250 m (220 m)	100 m (100 m)	200 m (180 m)	68 m (63 m)
1 kt	780 m (600 m)	370 m (310 m)	630 m (500 m)	270 m (230 m)
10 kt	2 300 m (1 300 m)	1 200 m (830 m)	1 900 m (1 100 m)	940 m (670 m)
100 kt	5 900 m (2 400 m)	3 600 m (1 700 m)	4 800 m (2 100 m)	2 900 m (1 500 m)
1 000 kt	13 000 m (3 900 m)	9 400 m (3 100 m)	11 000 m (3 500 m)	7 800 m (2 700 m)

Markexplosion. Verkansavstånd för brännskador efter exponering av värmestrålning vid god sikt (värden för dålig sikt inom parentes). Gäller inte syntetklädsel.

Laddningsstyrka	Begränsad förmåga		Kräver vård	
	Delvis bar hud	Tät klädsel	Delvis bar hud	Tät klädsel
0,1 kt	200 m (186 m)	98 m (95 m)	160 m (150 m)	76 m (74 m)
1 kt	610 m (500 m)	310 m (280 m)	500 m (420 m)	240 m (220 m)
10 kt	1 800 m (1 100 m)	950 m (710 m)	1 400 m (970 m)	740 m (590 m)
100 kt	4 500 m (2 100 m)	2 800 m (1 500 m)	3 700 m (1 900 m)	2 200 m (1 300 m)
1 000 kt	10 000 m (3 400 m)	7 100 m (2 800 m)	8 600 m (3 100 m)	5 900 m (2 500 m)

Eldklotets radie vid breakaway (när stötvågen separerar från eldklotet) för olika laddningsstyrkor vid luft- och markexplosion. Efter breakaway är eldklotet inte längre väldefinierat, men en approximativ uppskattning av den maximala eldklotsradien är att den är ungefär dubbelt så stor som radien vid breakaway.

Laddningsstyrka	Luftexplosion	Markexplosion
0,1 kt	13 m	18 m
1 kt	34 m	44 m
10 kt	84 m	110 m
100 kt	210 m	280 m
1 000 kt	530 m	700 m

Verkansavstånd för stötvåg

Verkan av luftstötvåg kombinerar generellt det statiska och dynamiska trycket. En viktig faktor är belastningens impuls, det vill säga trycket summerat över tid. Det avgör hur en struktur svarar, till exempel en byggnad. För enklare uppskattningar kan dock stötvågsverkan ofta relateras till kriterier för en skada i termer av ett maximalt statiskt övertryck som behöver överskridas för att en viss typ av skada ska uppstå. Följande tabell ger exempel på det maximala övertrycket på olika avstånd från nollpunkten vid en luftexplosion.

Trycket i tabellerna anges i kilopascal (kPa) där 100 kPa motsvarar cirka 1 atmosfärs övertryck.

Maximalt statiskt övertryck i kPa på olika avstånd från nollpunkten vid luftexplosion för olika laddningsstyrkor. Höjden är vald för att optimera verkan av luftstötvåg mot bebyggelse.

Laddnings-styrka	Explosions-höjd	100 m	200 m	500 m	1 000 m	2 000 m	5 000 m	10 000 m	20 000 m
0,1 kt	70 m	190 kPa	58 kPa	14 kPa	4,9 kPa				
1 kt	150 m	440 kPa	200 kPa	45 kPa	16 kPa	5,4 kPa			
10 kt	320 m	640 kPa	470 kPa	170 kPa	51 kPa	18 kPa	4,3 kPa		
100 kt	700 m	690 kPa	640 kPa	420 kPa	190 kPa	58 kPa	14 kPa	4,9 kPa	
1 000 kt	1 500 m	730 kPa	700 kPa	630 kPa	440 kPa	200 kPa	45 kPa	16 kPa	5,4 kPa

Verkan av luftstötvåg

För att bedöma skadorna av luftstötvåg görs en uppskattning av sårbarheten hos olika mål i form av kriterier för skada. Skadekriteriet kan sedan kopplas till ett visst avstånd från nollpunkten, där kriteriet överskrids och skadan uppstår. De två följande tabellerna ger exempel på verkan av luftstötvåg på olika byggnader vid luft- respektive markexplosion. Svår skada innebär att bärande element är allvarligt skadade eller att byggnaden kan ha rasat och i praktiken ej är möjlig att reparera. Måttlig skada motsvarar att lättare element är skadade eller bortslitna, medan stommen i stort sett är oskadad, och byggnaden går att reparera. Notera att verkansavstånd är större vid luftexplosion eftersom en förstärkning kan ske via Mach-reflektion.

Luftexplosion. Verkan av luftstötvåg på olika byggnader. Skadekriterier avser maximalt statiskt övertryck. Betongbyggnad avser en platsgjuten konstruktion och inte byggnader av färdiga betongelement.

Skadekriterie	0,1 kt	1 kt	10 kt	100 kt	1 000 kt
Trähus					
svår skada	300 m	650 m	1 400 m	3 100 m	6 800 m
måttlig skada	400 m	870 m	1 900 m	4 200 m	9 200 m
Murad byggnad					
svår skada	250 m	540 m	1 200 m	2 600 m	5 600 m
måttlig skada	400 m	870 m	1 900 m	4 200 m	9 200 m
Betongbyggnad					
svår skada	140 m	340 m	820 m	2 000 m	4 700 m
måttlig skada	220 m	540 m	1 300 m	3 100 m	7 400 m

Markexplosion. Verkan av luftstötvåg på olika byggnader. Skadekriterier avser maximalt statiskt övertryck. Betongbyggnad avser en platsgjuten konstruktion och inte byggnader av färdiga betongelement.

Skadekriterie	0,1 kt	1 kt	10 kt	100 kt	1 000 kt
Trähus					
svår skada	230 m	500 m	1 100 m	2 400 m	5 200 m
måttlig skada	300 m	650 m	1 400 m	3 100 m	6 800 m
Murad byggnad					
svår skada	190 m	420 m	920 m	2 000 m	4 400 m
måttlig skada	300 m	650 m	1 400 m	3 100 m	6 800 m
Betongbyggnad					
svår skada	110 m	260 m	620 m	1 500 m	3 600 m
måttlig skada	170 m	420 m	1 000 m	2 400 m	5 800 m

Tryckvågsverkan mot människa är komplext och domineras av indirekta skador. För att bedöma det totala skadeutfallet vid en kärnvapenexplosion behöver olika typer av skador från stötvågen vägas in. Dessutom behöver man även ta hänsyn till stötvågsskadornas samverkan med skador från värmestrålning och joniserande initialstrålning. De två följande tabellerna ger exempel på direkt och indirekt verkan av luftstötvåg på människa vid luft- respektive markexplosion. Även i dessa exempel är verkansavstånden större vid luftexplosion. Måttlig skada av glassplitter inkluderas ej eftersom ett etablerat skadekriterium saknas för detta fall.

Luftexplosion. Direkt och indirekt verkan av luftstötvåg på människa. Skadekriterier avser maximalt statiskt övertryck.

Skadekriterie	0,1 kt	1 kt	10 kt	100 kt	1 000 kt
Direkt övertryck					
svår skada	96 m	210 m	450 m	960 m	2 100 m
måttlig skada	170 m	370 m	800 m	1 700 m	3 700 m
Kast mot vägg					
svår skada	180 m	470 m	1 200 m	3 200 m	8 500 m
måttlig skada	250 m	650 m	1 700 m	4 500 m	12 000 m
Glassplitter					
svår skada	300 m	650 m	1 400 m	3 000 m	6 500 m

Markexplosion. Direkt och indirekt verkan av luftstötvåg på människa. Skadekriterier avser maximalt statiskt övertryck.

Skadekriterie	0,1 kt	1 kt	10 kt	100 kt	1 000 kt
Direkt övertryck					
svår skada	87 m	190 m	400 m	870 m	1 900 m
måttlig skada	130 m	280 m	610 m	1 300 m	2 800 m
Kast mot vägg					
svår skada	140 m	370 m	970 m	2 600 m	6 700 m
måttlig skada	190 m	500 m	1 300 m	3 400 m	9 000 m
Glassplitter					
svår skada	230 m	500 m	1 100 m	2 300 m	5 000 m

Markstötvåg och kraterstorlekar

Som tidigare nämnts kan kratern från en markexplosion nyttjas för att till exempel slå ut landningsbanor, kajer och andra tåliga mål. Verkan från själva markstötvågen är främst av intresse mot underjordiska anläggningar, till exempel hårdgjorda ledningsplatser.

Följande tabell visar radier och djup för kratrar som bildas av markexplosioner på olika typer av mark. En grov uppskattning av markstötens verkansavstånd (verkansdjup) mot tunnelkonstruktioner i berg är att dubbla kraterradien ger omfattande skador. På längre avstånd utanför krosszonen kan skador uppkomma dels genom att stötvågen slår ut delar av väggar och tak i tunnlar och bergrum (utstötning), som då riskerar att rasa in, dels genom markskakning. Både direktöverförd och luftstötvågsöverförd markskakning kan skada en underjordisk anläggning. Vid en markexplosion på fast berg uppkommer förskjutningar i berget på några centimeter för 1 kiloton respektive flera decimeter för 100 kiloton, strax utanför krosszonen.

Kraterradier och kraterdjup vid markexplosion för olika marktyper. Kraterns storlek är definierad i förhållande till den ursprungliga markytan. Måtten för kraterradier och kraterdjup innefattar således inte kraterranden av lösgjort material som omger urgröpningen i markytan (värden för kraterdjup inom parentes).

Laddningsstyrka	Våt mark	Torr mark	Fast berg
0,1 kt	13 m (4,7 m)	9,3 m (4,3 m)	7,5 m (3,4 m)
1 kt	25 m (9,4 m)	19 m (8,5 m)	15 m (6,7 m)
10 kt	50 m (19 m)	37 m (17 m)	30 m (13 m)
100 kt	100 m (38 m)	74 m (34 m)	59 m (27 m)
1 000 kt	200 m (75 m)	148 m (68 m)	120 m (53 m)

Verkansavstånd för joniserande initialstrålning

Den joniserande initialstrålningen kan variera avsevärt med kärnvapnets konstruktion. Mängden och andelen av gamma- respektive neutronstrålning från ett kärnvapen beror i hög grad på om det är ett fissionsvapen eller ett fusionsvapen. Mängden joniserande initialstrålning kan även påverkas och förstärkas av andra aspekter av kärnvapnets konstruktion. Fissionsvapen har i praktiken en maximal laddningsstyrka på i storleksordningen 100 kiloton, medan laddningsstyrkan för ett fusionsvapen inte har någon egentlig övre gräns.

Hur akuta skadorna från joniserande initialstrålning blir avgörs av stråldosen som mäts i gray, det vill säga hur mycket strålningsenergi som absorberas per kilogram vävnad. Om en människa får hela kroppen utsatt för 1 Gy vid ett och samma tillfälle visar personen sannolikt symtom för akut strålskada, medan helkroppsdosen 0,1 Gy i allmänhet inte skulle märkas. Tabellen nedan listar akuta skador på människa som uppkommer vid olika helkroppsdoser.

Akuta skador på människa vid olika helkroppsdoser.

Helkroppsdos	Akut skada
0,5-2 Gy	Grumling av ögonlins
3 Gy	Tillfälligt stopp för nybildning av blodkroppar i benmärg
6 Gy	Hudrodnad
10 Gy	Stoppar nybildning av celler i tarmepitel (slemhinna)
> 40 Gy	Död inom två dagar
100 Gy	Medvetslöshet, död inom timmar

Stråldoser från joniserande initialstrålning på olika avstånd från nollpunkten för luft- och markexplosion med fissions- respektive fusionsvapen finns i följande tabeller. Notera att den underliggande modellen för joniserande initialstrålning endast är giltig för avstånd större än 300 meter.

Luftexplosion orsakad av fissionsvapen. Stråldoser (Gy) från joniserande initialstrålning på olika markavstånd från nollpunkten för olika laddningsstyrkor W. En punkt (•) markerar att avståndet är mindre än eldklotsradien för given laddningsstyrka.

W	300 m	400 m	600 m	800 m	1 000 m	1 200 m	1 400 m	1 600 m	1 800 m	2 000 m	2 200 m	2 400 m
0,1 kt	24 Gy	9,1 Gy	1,8 Gy	0,44 Gy	0,13 Gy	0,04 Gy	0,01 Gy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy
1 kt	210 Gy	87 Gy	19 Gy	4,8 Gy	1,4 Gy	0,45 Gy	0,16 Gy	0,06 Gy	0,02 Gy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy
10 kt	800 Gy	440 Gy	130 Gy	40 Gy	13 Gy	4,4 Gy	1,6 Gy	0,57 Gy	0,22 Gy	0,09 Gy	0,03 Gy	0,01 Gy
100 kt	•	640 Gy	340 Gy	160 Gy	73 Gy	33 Gy	14 Gy	6,2 Gy	2,7 Gy	1,2 Gy	0,51 Gy	0,22 Gy

Luftexplosion orsakad av fusionsvapen. Stråldoser (Gy) från joniserande initialstrålning på olika markavstånd från nollpunkten för olika laddningsstyrkor W. En punkt (•) markerar att avståndet är mindre än eldklotsradien för given laddningsstyrka.

W	300 m	400 m	600 m	800 m	1 000 m	1 200 m	1 400 m	1 600 m	1 800 m	2 000 m	2 200 m	2 400 m
10 kt	890 Gy	490 Gy	140 Gy	44 Gy	14 Gy	4,9 Gy	1,8 Gy	0,66 Gy	0,25 Gy	0,10 Gy	0,04 Gy	0,02 Gy
100 kt	•	670 Gy	340 Gy	150 Gy	67 Gy	29 Gy	12 Gy	5,3 Gy	2,3 Gy	0,98 Gy	0,43 Gy	0,19 Gy
1 000 kt	•	•	•	•	81 Gy	51 Gy	31 Gy	18 Gy	10 Gy	5,6 Gy	3,0 Gy	1,6 Gy

Markexplosion orsakad av fissionsvapen. Stråldoser (Gy) från joniserande initialstrålning på olika markavstånd från nollpunkten för olika laddningsstyrkor W. En punkt (•) markerar att avståndet är mindre än eldklotsradien för given laddningsstyrka.

W	300 m	400 m	600 m	800 m	1 000 m	1 200 m	1 400 m	1 600 m	1 800 m	2 000 m	2 200 m	2 400 m
0,1 kt	15 Gy	5,7 Gy	1,1 Gy	0,29 Gy	0,08 Gy	0,03 Gy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy
1 kt	170 Gy	64 Gy	13 Gy	3,4 Gy	1,0 Gy	0,33 Gy	0,12 Gy	0,04 Gy	0,02 Gy	<10 mGy	<10 mGy	<10 mGy
10 kt	1 800 Gy	720 Gy	160 Gy	45 Gy	14 Gy	4,7 Gy	1,6 Gy	0,58 Gy	0,22 Gy	0,08 Gy	0,03 Gy	0,01 Gy
100 kt	•	•	2 000 Gy	710 Gy	270 Gy	110 Gy	42 Gy	17 Gy	6,6 Gy	2,6 Gy	1,1 Gy	0,44 Gy

Markexplosion orsakad av fusionsvapen. Stråldoser (Gy) från joniserande initialstrålning på olika markavstånd från nollpunkten för olika laddningsstyrkor W. En punkt (•) markerar att avståndet är mindre än eldklotsradien för given laddningsstyrka.

W	300 m	400 m	600 m	800 m	1 000 m	1 200 m	1 400 m	1 600 m	1 800 m	2 000 m	2 200 m	2 400 m
10 kt	1 800 Gy	690 Gy	150 Gy	39 Gy	12 Gy	3,9 Gy	1,4 Gy	0,49 Gy	0,19 Gy	0,07 Gy	0,03 Gy	0,01 Gy
100 kt	•	•	1 700 Gy	520 Gy	180 Gy	69 Gy	27 Gy	10 Gy	4,1 Gy	1,6 Gy	0,67 Gy	0,27 Gy
1 000 kt	•	•	•	•	•	1 600 Gy	780 Gy	370 Gy	180 Gy	82 Gy	38 Gy	17 Gy

Av stor betydelse för att bedöma verkan från joniserande initialstrålning är människans eventuella skydd. Gammastrålning hindras bäst av tunga material, som exempelvis stål och bly, medan neutroner i stället dämpas av lättare material, till exempel vatten och paraffin.

Ett materials förmåga att stoppa strålning uttrycks ofta i dess halveringstjocklek. Den beror på strålningstyp, och är tjockleken som materialet behöver ha för att förhindra att hälften av strålningen tränger igenom.

Följande tabell ger exempel på halveringstjocklekar i olika material för joniserande initialstrålning, och i den efterföljande tabellen ges skyddsfaktorer för olika typer av skydd, både för initialstrålning och nedfall.

Ungefärliga halveringstjocklekar i olika material för joniserande initialstrålning.

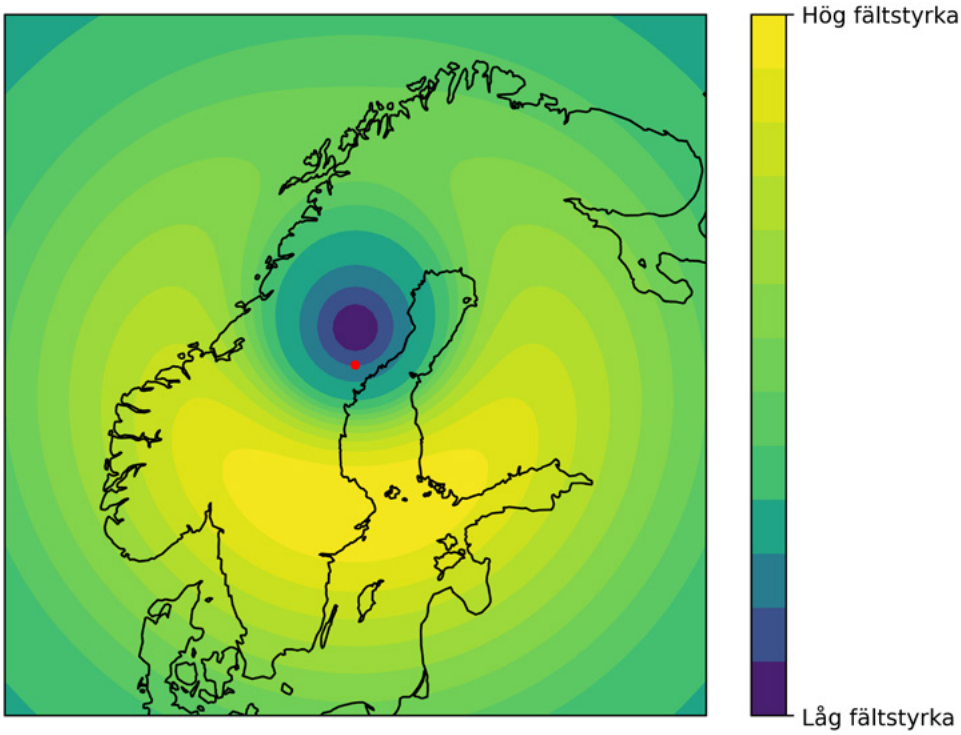
Strålslag	Vatten	Torr jord	Fuktig jord	Betong	Stål
Gamma	30 cm	20 cm	17 cm	13 cm	4 cm
Neutroner	7 cm	25 cm	17 cm	9 cm	10 cm

Skyddsfaktorer för joniserande initialstrålning och radioaktivt nedfall. Notera att skyddsfaktorn anger den andel av strålningen som direkt eller indirekt tränger igenom objektet. En skyddsfaktor på 1 betyder alltså att man är oskyddad, medan ett lågt värde innebär ett bra skydd.

Typ av skydd	Initialstrålning	Nedfall
Lastbil, flygplan	1	0,6
Pansarbandvagn	0,9	0,4
Stridsvagn	0,5	0,1
Öppet stridsvärn	0,2	0,1
Stridsvärn med splitterskydd	0,05	0,005
Fullträffsäker skyddstäckning	0,0001	< 0,0001
Småhus		
i våning	0,8	0,4
i källare	0,4	0,04
Flervåningshus		
i våning	0,3	0,04
i källare	0,1	0,01
i skyddsrum	0,05	< 0,001

Verkansavstånd för elektromagnetisk puls

Skadeverkan från EMP beror på flera faktorer, till exempel pulsens stigtid, fältstyrka och frekvensinnehåll. Därtill kan verkanskriterier för komponenter variera med flera storleksordningar för komponenter med liknande funktion. Sammantaget gör det att det är svårt att med säkerhet ange verkansavstånd för EMP.



Den elektromagnetiska pulsens utbredning beror på faktorer som atmosfärens densitetsgradient och det jordmagnetiska fältets utbredning, och kan inte beskrivas med enkla skalningslagar. I figuren exemplifieras detta med ett kärnvapen med laddningsstyrkan 100 kt på höjden 400 km över jordytan. Nollpunkten är markerad i rött. Notera att den maximala fältstyrkan uppkommer söder om nollpunkten.

Bibliografi

Kärnvapen – en kort historik
Rhodes: The Making of the Atomic Bomb (1986).

Agrell: Svenska förintelsevapen (2002).

Kärnvapens funktion
Serber: The Los Alamos Primer (1943, 1992).

Material till kärnvapen
Albright, Berkhout & Walker: Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996 World Inventories, Capabilities and Policies (1997).

Kärnvapenutveckling
FOI: ”Kärnvapenprovsprängningar – Tekniska möjligheter och genomförande”, FOI-R–5959–SE (2026).

Kärnvapenstrategier
Windsor: Strategic Thinking – An Introduction and Farewell (2002).

Kärnvapenstater
SIPRI: The SIPRI Yearbook (2025).

FOI: ”Teknikutveckling och rustningskontroll”, FOI-R–5122–SE (2021).

Kärnvapenverkan
Glasstone & Dolan: The Effects of Nuclear Weapons (1977).

FOI: ”Kärnladdningars skadeverkningar”, FOI-R–2741–SE (2009).

FOI: ”Kärnvapenscenario för räddningstjänst”, FOI-R–5131–SE (2021).

Upptäckt av kärnvapenexplosioner
Dahlman, Mackby, Mykkeltveit & Haak: Detect and Deter: Can Countries Verify the Nuclear Test Ban? (2016).

Ringbom: ”Att mäta radioaktivitet från kärnexplosioner”, Kosmos – Svenska Fysikersamfundets årsbok (2024).

Åtgärder för att bemöta kärnvapenhotet
FOI: ”Modelling the response of systems for detection of nuclear explosions and other nuclear events”, FOI-R–5626–SE (2024).

FOI: ”Masskador vid kärnvapenangrepp mot stad”, FOI-R–5884–SE (2026).

Den här skriften ger en orientering kring kärnvapens funktion och verkningar och hur detta inverkar på såväl kärnvapenstaters handlingsutrymme, som våra egna åtgärder för att bemöta kärnvapenhotet. Förhoppningen är att ge läsaren information och sammanhang till kärnvapens roll i vår värld.

FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut

FOI forskar för
en säkrare värld

FOI-R--5960--SE