

KOSMOS

FYSIK OCH MÄNNISKAN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2024



ATT MÄTA RADIOAKTIVITET FRÅN KÄRNEXPLOSIONER

© ANDERS RINGBOM



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Anders Ringbom

är forskningschef på Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). Han disputerade i kärnfysik 1997 vid Uppsala Universitet och anställdes på FOI (dåvarande FOA) samma år. Han arbetar bland annat som teknisk expert inom verifikation av kärnvapenrelaterade avtal och har utvecklat detektionsutrustning och analysmetoder som används internationellt för att upptäcka radioaktivitet från underjordiska kärnvapenprov.

Med hjälp av avancerade fysikaliska mätmetoder är det nu möjligt att med tämligen god visshet veta om någon provsprängning av kärnvapen äger rum någonstans. I denna artikel förklarar Anders Ringbom hur dessa oumbärliga verktyg för att upprätthålla fred fungerar.

Bilden: Photo courtesy of National Nuclear Security Administration / Nevada Field Office

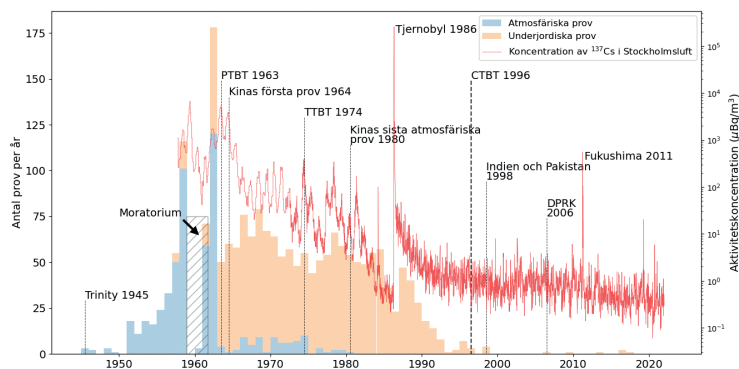
Att mäta radioaktivitet från kärnexplosioner

Mycket snart efter att den första kärnladdningen detonerat i New Mexico, USA, för nästan 80 år sedan den 16 juli 1945, följt av bombningarna av Hiroshima och Nagasaki samma år, höjdes röster för att förbjuda kärnvapenprov. De första försöken att förhandla fram ett sådant förbud misslyckades, därför att man inte lyckades komma överens om hur verifieringen skulle gå till. Hur skulle man kontrollera att parterna inte bröt mot avtalet och sprängde kärnladdningar i hemlighet? Under 1950-talet genomfördes ett ökande antal atmosfäriska¹ kärnvapenprov varje år (se figur 1) som ledde till både nedfallsincidenter och protester. År 1958 inleddes dock ett moratorium som innebar att USA och Sovjetunionen upphörde med sina kärnvapenprov. Moratoriet avbröts av Sovjetunionen i september 1961, och månaderna därefter detonerades kärnladdningar i en aldrig tidigare skådad takt. I februari 1960 hade dessutom Frankrike genomfört sitt första kärnvapenprov.

År 1963 togs ett steg närmare ett fullständigt provstopp då USA, Storbritannien och Sovjetunionen kom överens om det partiella provstoppsavtalet (PTBT — *Partial Test-Ban Treaty*), som förbjuder provsprängningar i atmosfären, yttre rymden och under vatten. Kina, som genomförde sitt första kärnvapenprov 1964, fortsatte dock att prova i atmosfären ända fram till 1980. År 1974 togs ytterligare ett kliv då USA och Sovjetunionen signerade det så kallade tröskelavtalet (TTBT — *Threshold Test-Ban Treaty*) som förbjuder kärnvapenprov med en styrka större än 150 kt².

¹Med ”atmosfäriska kärnvapenprov” menar vi här prov som inte genomförs under jord, under vatten eller i rymden.

²Den gängse enheten för explosionsstyrka är kiloton (kt), där ett kiloton motsvarar energin som frigörs när tusen ton kemiskt explosivämne exploderar. Detta motsvarar ungefär $4,2 \times 10^{12}$ J. Kärnladdningar med så skilda styrkor som tion-



Figur 1: Staplarna visar antalet genomförda kärnvapenprov per år sedan den första kärnexplosionen (Trinity) genomfördes 1945. Den röda kurvan visar koncentrationen av ^{137}Cs i Stockholmsluften som registrerats sedan 1957.

Varken PTBT eller TTBT innehåller dock något internationellt verifikationsystem, men parterna har möjlighet att var för sig kontrollera att avtalen efterlevs, med sina egna nationella mät-system. Redan 1958 hade ändå en grupp tekniska experter från öst och väst träffats i Genève med målet att utreda om det var möjligt att verifiera ett fullständigt provförbud med ett globalt, internationellt mätsystem. Detta går bland annat att läsa om i 1959 års upplaga av Kosmos, där Ulf Ericsson från Försvarets Forskningsanstalt (FOA) skrev artikeln ”Upptäckt av kärnexplosioner”. Expertgruppen kom fram till att ett provstoppsavtal skulle kunna gå att verifiera med hjälp av ett globalt sensornätverk, som bland annat skulle bestå av seismometrar, infraljudsmikrofoner och system som mäter radioaktiva mikrometerstora partiklar (aerosoler) i atmosfären. Det föreslagna nätverket är mycket likt det som sedan började byggas upp ungefär 40 år senare, efter det att ett fullständigt provstoppsavtal slutligen antogs av FN:s generalförsamling 1996 (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty* — CTBT).

Idag är huvuddelen av detta nätverk i drift och Sverige har spelat en viktig roll i dess uppbyggnad, inte minst genom att utveckla utrustning och analysmetoder för mätningar av radioaktivitet från kärnexplosioner. Innan vi diskuterar detta vidare, låt oss

dels kiloton till 50 000 kt (50 Mt) har provats.

först i stora drag gå igenom vad CTBT innebär, och hur verifikationssystemet fungerar.

CTBT och dess verifikationssystem

Det fullständiga provstoppsavtalet innebär ett totalt förbud mot kärnexplosioner. Det har idag skrivits på av 187 länder. Dock krävs det att 44 länder, namngivna i avtalet, både skriver på och ratificerar³ CTBT för att det skall träda i kraft. I dag har 35 av dessa länder gjort detta, men fortfarande återstår bland annat kärnvapenstaterna USA, Ryssland och Kina. Ryssland ratificerade CTBT redan år 2000, men tog tillbaka detta 2023. Vidare har varken Indien, Pakistan eller Nordkorea (vilka också finns med på listan över de 44 länderna) skrivit på avtalet. Trots de politiska svårigheterna att få CTBT att träda i kraft har avtalet idag en relativt stark ställning tack vare sitt omfattande verifikationssystem, vilket har en avskräckande effekt. Sedan avtalet öppnades för signatur 1996 har kärnvapenprov endast genomförts av just Indien, Pakistan och Nordkorea.

Fullt utbyggt skall det globala sensornätverket för verifikation (*International Monitoring System* — IMS) bestå av 321 mätstationer och 16 laboratorier fördelade på 89 länder (se figur 2). IMS är idag utbyggt till cirka 90 %. Förutom IMS består verifikationssystemet också av ett internationellt datacenter (*International Data Center* — IDC), placerat i genomförandeorganisationens huvudkontor (CTBTO) i Wien, Österrike, samt en funktion som skall kunna genomföra inspektioner på plats om man misstänker att ett kärnvapenprov genomförts (*On-Site Inspection* — OSI). Någon sådan inspektion kan dock inte genomföras innan avtalet trätt i kraft. Data från IMS skickas också vidare från IDC till olika nationella datacenter (NDC), där analyser görs av CTBT:s enskilda medlemsstater. De nationella datacentren har en viktig funktion, eftersom det inte är CTBTO:s uppgift att väcka misstanke om att ett land provat en kärnladdning, det åligger medlemsstaterna själva. Sveriges NDC drivs av Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) i Stockholm.

För att identifiera och lokalisera ett kärnladdningsprov utnyttjas ett flertal fysikaliska fenomen som uppträder då en laddning detonerar. Vid en kärnexplosion frigörs oerhörda mängder

³Ratificering innebär att en stat förbinder sig rättsligt till avtalet, oftast genom ett godkännande av landets parlament.



Figur 2: Det internationella nätverket för verifikation av CTBT (International Monitoring System — IMS). Systemet innehåller 321 mätstationer uppdelat på 170 seismologiska mätsystem, 11 hydroakustiska stationer, 60 för infraljud, och 80 för mätningar av atmosfärisk radioaktivitet, varav 40 också skall ha kapacitet att mäta radioaktivt xenon. Nätverket är idag utbyggt till cirka 90 % (bild: CTBTO, www.ctbto.org).

energi under en mycket kort tid (ungefär en mikrosekund). Eftersom kärnvapnet rent volymmässigt inte är stort innebär detta att energitätheten, och därmed temperaturen, initialt är mycket hög — tiotals till hundratals miljoner grader. Vapenresterna för gasas och ett växande eldklot av joniserad gas (plasma) formas. Trycket i det växande eldklotet är mycket högre än i omgivande medium, vilket medför att en stötvåg bildas. Tillsammans med stötvågen från expanderande vapenrester kommer en gemensam stötvåg skapas som sprider sig utåt. Beroende på i vilken omgivning som explosionen sker kommer stötvågen att manifesteras på olika sätt, och ge upphov till skilda signaturer som låter sig mätas på stora avstånd.

I explosionen bildas också radioaktiva aerosoler och gaser genom flera olika processer, vilka skiljer sig åt beroende på i vilken miljö explosionen sker. Radioaktiva nuklider bildas dels genom fission eller fusion av bränslet i laddningen, dels genom att neutroner, som avges både vid fission och fusion, ger upphov till ytterligare kärnreaktioner i bombmaterial och i omgivande miljö

(så kallad neutronaktivering). En atmosfärisk explosion kommer att aktivera luft och, om markytan inte är alltför långt bort, även markmaterial. De skapade nukliderna kommer att spridas vidare i miljön med väder och vind i form av aerosoler och gaser.

IMS använder sig av fyra typer av mättekniker för att spåra kärnvapenprov i atmosfären, under vatten eller under jord. Målet är att kunna identifiera en kärnexplosion med en styrka av 1 kt med minst 95 % sannolikhet. Verifikationsuppgiften kan sägas bestå av tre deluppgifter: *detektion, lokalisering och karaktärisering*. Det sistnämnda innebär att identifiera signalen som en kärnexplosion och skilja den från andra möjliga orsaker, som exempelvis jordskalv, gruvsprängningar, eller utsläpp från kärnkraftverk.

Underjordiska prov, och även prov under vatten, registreras av ett nätverk av 170 seismiska mätstationer. Den kraftiga och momentana energifrigörelsen vid en underjordisk kärnexplosion skapar en kavitet genom förångning av det omgivande materialet. Därefter skapas sprickor i omgivande berggrund, och ytterligare något senare övergår energin i elastiska vågor i jordskorpan, varvid sprickbildningen upphör. Det mesta av energin avges i form av värme i explosionens omedelbara omgivning, men mellan 1 och 5 % av explosionsenergin omvandlas till seismiska vågor.

IMS använder sig av arraystationer som består av ett antal seismometrar, vilka tillsammans bildar ett mycket känsligt mät-system där, förutom att magnitud och typ av seismisk våg kan bestämmas, också riktningen till explosionen kan uppskattas. IMS innehåller också stationer utrustade med endast en seismometer. Lokalisering av seismiska händelser åstadkoms genom att kombinera informationen från flera mätstationer. Genom att mäta skillnaden i amplitud mellan olika typer av seismiska vågor går det även att diskriminera mellan jordskalv och explosioner⁴. Sverige driver genom FOI en seismisk array i Hagfors som numera ingår i IMS. Hagforsstationen invigdes redan 1969, och har registrerat en mängd kärnvapenprov genom åren.

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

Vid en explosion på stort djup i havet kommer i princip all frigjord energi att kopplas till vattnet. Närmare vattenytan kan en betydande del av energin istället kopplas till atmosfären. Omvänt kan en luftexplosion ovanför vattenytan koppla till vattnet. Vatten, och speciellt världshaven transporterar ljudvågor mycket effektivt. I oceanerna existerar den så kallade SOFAR-kanalen (*Sound Fixing and Ranging*) som karaktäriseras av ett minimum i den vertikala ljudhastighetsprofilen, som vid ekvatorn ligger på ett djup av cirka 1,5 km. SOFAR-kanalen verkar som en mycket effektiv vågledare med små energiförluster, vilket gör att ljudet kan färdas mycket långa sträckor. En explosion på 1 kg TNT som sker i SOFAR-kanalen kan detekteras på flera tusen kilometers avstånd. Beroende på avståndet till botten kan hydroakustisk energi från en undervattensexlosion koppla till jordskorpan och även ge upphov till seismiska vågor. IMS registrerar explosioner i världshaven med hjälp av 11 hydroakustiska stationer, vilka använder hydrofoner sammankopplade med 20-200 km långa kablar. Alternativt används så kallade T-fas stationer som registrerar ljudvågor i vattnet som omvandlas till seismiska signaler och sedan registreras med hjälp av seismometrar installerade på land.

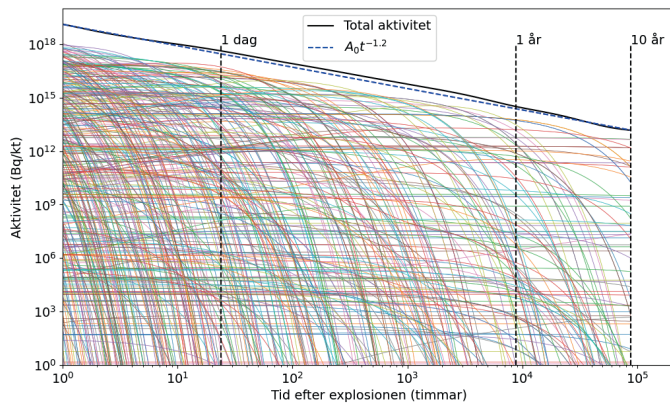
Infraljud, som brukar definieras som ljudvågor med frekvenser lägre än 16 Hz, skapas av atmosfäriska explosioner, men har även registrerats från underjordiska prov. Den långa våglängden gör att dessa vågor kan transporteras och reflekteras på hög höjd i atmosfären (upp till mer än 100 km) och spridas på stora avstånd från källan, vilket gör att ljudet från en kärnexplosion kan detekteras hundratals mil från explosionen, eller ibland på ännu längre avstånd. IMS inkluderar 60 arraystationer utrustade med så kallade mikrobarometrar som registrerar och lokaliserar infraljudshändelser. Precis som för seismiska arrayer kan signalens riktning uppskattas, och genom att kombinera signaler från flera stationer kan en lokalisering göras. En komplicerande faktor är att infraljudssignaler påverkas kraftigt av vindförhållanden på hög höjd. En analys måste därför också ta hänsyn till väderförhållanden, och lokaliseringen blir i regel inte lika precis som en seismisk sådan.

Mätningarna av seismiska vågor i jordens inre, infraljud i atmosfären och hydroakustiska vågor i världshaven kan alla ge information om när och var en explosion har ägt rum. Mätningarna säger dock ingenting om huruvida explosionen är orsakad av en kärnladdning eller om det rör sig om en konventionell explosion.

För att kunna avgöra detta krävs att man i atmosfären kan mäta radioaktivitet som kan kopplas till explosionen. IMS är därför också försett med 80 stationer avsedda för insamling och mätning av radioaktiva aerosoler. Hälften av stationerna är dessutom ämnade att förses med system för mätning av radioaktiva isotoper av xenon (radioxenon). FOI driver i Stockholm en av de IMS-stationer som är avsedda både för aerosoler och radioxenon. Som beskrivs senare spelar atmosfäriskt radioxenon en särskilt viktig roll för detektion av underjordiska prov, som man främst kan vänta sig vid ett brott mot CTBT. Innan dess följer först här en diskussion om detektion av radioaktiva aerosoler.

Detektion av aerosoler från kärnexplosioner

I en kärnexplosion bildas fler än 1200 fissionsprodukter omedelbart eller kort därefter via radioaktivt sönderfall (se figur 3). Som nämnts tidigare bildas också nuklider via neutronaktivering av material i omgivningen, både i vapnets konstruktionsmaterial och i omgivande miljö. Dessutom kan rester av uran, plutonium eller tritium finnas kvar efter explosionen.



Figur 3: Aktivitet över tid för fissionsprodukter från ^{239}Pu för en explosionsstyrka på 1 kt. Den översta svarta linjen visar den totala aktiviteten, och den blå streckade linjen illustrerar funktionen $A_0 t^{-1.2}$, där A_0 är aktiviteten en timme efter explosionen. Övriga linjer visar aktiviteten för enskilda nuklider

Mätning av radioaktiva aerosoler i IMS är främst relevant för explosioner i atmosfären och för grunda undervattens- och underjordsexplosioner. Det finns uppgifter om att mycket små mängder radioaktiva aerosoler har uppmätts i atmosfären nära provplatsen efter renodlade underjordsexplosioner, men för att detektera dessa på större avstånd krävs antagligen ännu känsligare mätsystem än de som finns idag.

Partikelbildning och nedfall är starkt beroende av explosionshöjd. För en luftexplosion på hög höjd kommer vapenresterna att spridas globalt och resultera i låga koncentrationer på marknivå. Vid en luftexplosion närmare markytan sprids också nedfallet över en stor volym, men neutronaktivering på marken kan orsaka lokal kontaminering. Störst lokalt nedfall följer efter en ytexplosion eller en grund underjordisk explosion, där en krater formas och ett belägningsfält bildas vars utbredning och koncentration bland annat beror av vindförhållanden, nederbörd och de radioaktiva partiklarnas storleksfördelning.

För IMS är det lokala nedfallet mindre viktigt, eftersom avståndet mellan mätstationerna är stort (cirka 2000 km)⁵. Den relevanta signalen utgörs istället av de aerosoler som färdats längre sträckor i atmosfären. Detta medför att endast en liten del av alla nuklider som bildas i en kärnexplosion är av betydelse ur detektionssynpunkt. Många nuklider har för kort halveringstid för att kunna samlas in och mätas inom rimlig tid och många bildas också i små mängder. Dessutom sönderfaller många nuklider på sätt som gör dem svåra att detektera med standardmetoder, främst för att de avger lite eller ingen gammastrålning. De mest signifikanta nukliderna i en luftexplosion, ur detektionssynpunkt, är ⁹⁹Mo, ¹³³I, ¹⁴³Ce, ¹³²Te och ¹⁴⁰La — alla fissionsprodukter. Aktiveringsprodukterna är i detta sammanhang av mindre betydelse.

Luftburen radioaktivitet brukar beskrivas med storheten *aktivitetskoncentration*, som har enheten Bq/m³. Den noggrannaste mätningen av aktivitetskoncentrationen från radioaktiva aerosoler i atmosfären som används rutinmässigt innefattar insamling av partiklar genom att leda stora mängder luft genom ett partikelfilter och därefter mäta gammastrålning från filtret med hjälp av en högupplösande germaniumdetektor, aningen direkt på insamlingsplatsen eller i ett laboratorium. Gammastrålningens energi

⁵Det lokala nedfallet har däremot stor betydelse om man får möjlighet att genomföra en inspektion på plats (OSI).

och intensitet används tillsammans med information om insamlad luftvolym för att beräkna aktivitetskoncentrationen för detekterade nuklider. I IMS samlas aerosoler in på ett filter under 24 timmar, med ett luftflöde på minst $500 \text{ m}^3/\text{h}$. För att minska bakgrunden orsakad av radon i atmosfären får radionukliderna i provet sönderfalla i 24 timmar innan aktiviteten mäts och resultatet rapporteras till IDC i Wien. Tack vare den stora mängden insamlad luft åstadkoms en mycket känslig mätning med en nedre gräns för detektion i området $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Som jämförelse är aktivitetskoncentrationen för radon i luften i Sverige ungefär $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$, det vill säga minst en miljon gånger högre. Det finns möjlighet att erhålla ytterligare mätnoggrannhet genom att analysera filtret under lång tid i ett laboratorium med kapacitet för mätningar med mycket låg bakgrundsstrålning, exempelvis belägna under jord, och/eller med detektorer som reducerar bakgrunden med hjälp av koincidensmetoder.

Radioaktiva partiklar i atmosfären orsakade av andra processer än kärnexplosioner inkluderar en mängd både antropogena och naturliga källor. Naturlig bakgrund inkluderar medlemmar i sönderfallsserierna från uran och torium, som till exempel ^{212}Pb , nuklider från resuspension⁶ av markmaterial som ^{40}K , och nuklider som exempelvis ^7Be and ^{24}Na , som bildas i atmosfären via kosmisk strålning. Antropogena källor inkluderar utsläpp från isotopproduktionsanläggningar, reaktorer och från annan civil användning av radioaktivt material. Dessutom förekommer radioaktivitet från historiska kärnladdningsprov och reaktorolyckor. ^{137}Cs från reaktorolyckan i Tjernobyl 1986 detekteras fortfarande i Sverige.

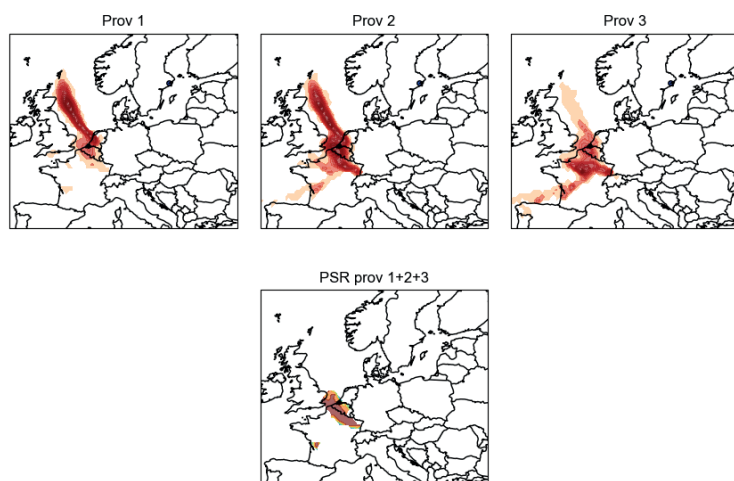
Många av de isotoper som regelbundet detekteras som bakgrund kan också förväntas produceras i en kärnexplosion. Detta gäller exempelvis de fyra isotoper som mest frekvent detekteras i IMS (^{24}Na , ^{137}Cs , ^{131}I och ^{60}Co). Det är därför viktigt att ha god kunskap såväl om detektionsfrekvens, som om isotopsammansättning och om orsaker till den uppmätta bakgrunden på en viss plats, för att undvika eventuella falsklarm.

⁶Partiklar deponerade på en yta som återförs till atmosfären, exempelvis med hjälp av vindar.

Lokalisering och datering

En viktig del av analysarbetet för identifiering av både bakgrundskällor och kärnexplosioner är lokalisering av utsläppskällan. Detta kan göras med hjälp av modellering av partikeltransport i atmosfären, med hjälp av meteorologiska data. Beräkningar kan göras såväl framåt i tiden utgående från existerande eller hypotetiska källor, som bakåt i tiden utgående från en eller flera insamlings-system. Den senare metoden används för att beräkna var den luft som samlats in i ett mätsystem tidigare befunnit sig. Om information från flera mätningar används tillsammans kan lokaliseringen förbättras genom att kombinera mätdata med spridningsberäkningar. Detta ger också en uppskattning av hur mycket aktivitet som släppts ut. Ett exempel på en sådan analys visas i figur 4.

Om fler än en nuklid observeras i ett eller flera prov kan man

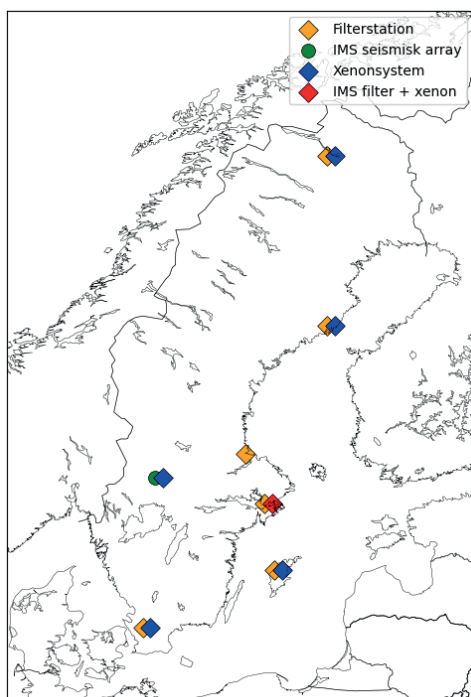


Figur 4: Exempel på lokalisering av utsläppskälla med hjälp av mätresultat i kombination med atmosfäriska spridningsberäkningar. IMS-stationen i Stockholm har uppmätt tre prov innehållande olika aktivitetskoncentrationer för samma isotop. Den övre raden visar beräkningar av var den insamlade luften befann sig vid en tidigare tidpunkt, och hur mycket den spänts ut. Genom att kombinera uppmätta aktivitetskoncentrationer med spridningsberäkningarna för de tre proven fås en bild av var data korrelerar bäst vid den givna tidpunkten. Ett troligt källområde kan då bestämmas (nedre bilden). I detta fall rör det sig om ett utsläpp från en isotopproduktionsanläggning i Belgien. Metoden ger också en uppskattning av hur mycket aktivitet som släppts ut.

dessutom ofta använda sig av kvoter mellan uppmätta aktiviteter för att erhålla ytterligare information. Vissa kombinationer av isotoper som sönderfaller tillsammans kan användas som ”klockor” och ge information om när fissionen ägde rum. Om den beräknade tidpunkten dessutom stämmer överens med tiden för seismisk händelse, och lokaliseringen av utsläppet är kompatibel med positionen för den seismiska händelsen, stärks bevisföringen betydligt. Vissa isotopkvoter kan också användas för att skilja på utsläpp från kärnsprängningar och andra källor.

Mätningar i Sverige

Nuklidspecifika mätningar av luftburen radioaktivitet har utförts i Sverige sedan 1950-talet. Ett exempel på detta ses i figur 1, där röda kurvan visar mätningar av ^{137}Cs i Stockholmsluft utförda sedan 1957. Atmosfäriskt ^{137}Cs , som har en halveringstid på 30 år, bildas inte genom naturliga processer, utan härrör endast från mänsklig verksamhet. Efter tritium är ^{137}Cs den isotop som över tid orsakat mest radioaktivitet som följd av atmosfäriska kärnvapenprov. Det är intressant att jämföra mätningarna i Stockholm med de blå staplarna i figur 1, vilka visar tidsfördelningen för de atmosfäriska proven. En tydlig minskning kan observeras som en följd av moratoriet 1958, och en motsvarande ökning syns strax efter det att provningar återupptogs. När PTBT skrevs på 1963, och alla länder utom Kina slutade prova i atmosfären, minskade aktiviteten återigen. På grund av Kinas fortsatta provverksamhet höll sig mätningarna på en relativt konstant nivå fram till 1980, då även Kina upphörde med prov i atmosfären. Därefter minskade ^{137}Cs -aktiviteten kontinuerligt fram till reaktorolyckan i Tjernobyl 1986, som gav upphov till det hittills högsta mätvärdet. Ytterligare en topp observerades efter jordskalvet och det efterföljande utsläppet från kärnkraftverket i Fukushima i Japan, 2011. De årliga variationerna i ^{137}Cs -aktivitet som observerades innan Tjernobylolyckan beror på att aktiviteten från kärnvapenproven till stor del hamnade i stratosfären, och en mindre andel i den lägre liggande troposfären. Eftersom tropopausen — gränsen mellan stratosfären och troposfären — i Sverige befinner sig på lägre höjd på våren och försommaren ökade aktiviteten under denna period. Efter Tjernobylolyckan domineras ^{137}Cs -mätningarna av aktivitet som resuspenderas från marken och åter hamnar i luften, vilket gör att årstidsberoendet inte längre observeras lika tydligt.



Figur 5: Mätstationer för luftburen radioaktivitet och seismik som drivs av FOI. Fyra system för mätning av radioaktivt xenon är samlokaliserade med nationella filterstationer, och ett xenonsystem är placerat på den seismiska stationen i Hagfors.

Idag driver FOI sex nationella system för detektion av radioaktiva aerosoler (se figur 5). Dessa stationer används inte främst för att detektera kärnvapenprov, utan är en del av den miljöövervakning som bedrivs för Strålsäkerhetsmyndighetens räkning. Kartan visar också den seismiska arrayen i Hagfors, Sveriges IMS-radionuklidstation i Stockholm, samt den nya svenska xenonarrayen som vi återkommer till.

Detektion av radioaktiva ädelgaser

Ungefär 15 % av den aktivitet som bildas vid kärnsprängningar eller i andra fissionsprocesser, som exempelvis reaktordrift, utgörs av ädelgaser som argon, krypton och xenon. Ädelgasers kemiska egenskaper gör dem speciellt intressanta i detektionssammanhang. Eftersom dessa gaser inte reagerar kemiskt med omgivning-

en läcker de lättare ut i omgivningen från kaviteten som bildas vid en underjordisk explosion. Detta kan exempelvis ske genom sprickor som bildats i berggrunden, eller i anslutning till diagnostikkablar som dras från laddningen till provkontrollplatsen. Det krävs speciella åtgärder för att förhindra att ädelgaser släpps ut i atmosfären från kärntekniska anläggningar där fissionsprodukter skapas eller hanteras. Kärnkraftverkens ventilationssystem är därför försedda med fallor av aktivt kol eller andra material som fördröjer utsläppet, så att ädelgaserna till stor del hinner sönderfalla innan luften släpps ut i atmosfären.

De flesta ädelgasisotoper är kortlivade, men xenon har fyra som i fission skapas i tillräcklig mängd för att med rätt utrustning kunna detekteras på stora avstånd från en kärnexplosion: ^{133}Xe ($t_{1/2} = 5,25$ d), $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ($t_{1/2} = 2,2$ d), $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ($t_{1/2} = 11,8$ d) och ^{135}Xe ($t_{1/2} = 9,14$ h). Halveringstiderna, givna inom parentes, är tillräckligt långa för att isotoperna inte skall sönderfalla för snabbt innan mätning, samtidigt tillräckligt korta för att inte xenon skall byggas upp i atmosfären och skapa en bakgrund som stör signalen som man försöker upptäcka⁷. Ädelgaser har dessutom egenskapen att de, till skillnad från aerosoler, inte deponeras på marken vid nederbörd, vilket gör att de kan spridas längre bort från källan. Detta innebär också att modelleringen av transporten i atmosfären blir enklare, och lokaliseringen därmed säkrare. Det visar sig också att isotopkvoterna för radioxenon skiljer sig åt mellan reaktorutsläpp och kärnexplosioner, vilket gör att det är lättare att kategorisera ett utsläpp.

Idén att använda xenon för att detektera nukleär verksamhet föddes redan under Manhattanprojektet. Den blivande nobelpristagaren i fysik, amerikanen Luis Alvarez, fick 1943 uppdraget att utveckla en metod för att avslöja om Tyskland hade byggt en kärnreaktor. Han utvecklade då ett flygburet system som samlade in xenon på en kyld fälla av aktivt kol. Om provet innehöll ^{133}Xe skulle det kunna visa att Tyskland hade en kärnreaktor i drift. Under hösten 1944 genomfördes ett antal riskfyllda flygningar över misstänkta områden i tyskt luftrum. Det insamlade xenonet separerades i ett laboratorium och aktiviteten mättes, men inget ^{133}Xe

⁷Ett exempel på en fissionsprodukt med hög bakgrund i atmosfären är ^{85}Kr , med en halveringstid på nästan 11 år. Den frigörs vid upparbetning av reaktorbränsle och har byggts upp i atmosfären sedan 1940-talet. I dag finns cirka 2 Bq/m^3 ^{85}Kr i atmosfären på norra halvklotet, vilket är ungefär 1000 gånger mer än bakgrunden av xenon.

kunde hittas i något av proven. Detta styrkte underrättelseuppgifter som sade att Tyskland inte hade någon kärnreaktor i drift.

Innan CTBTs verifikationssystem började byggas upp i slutet av 1990-talet utfördes mätningar av radioxenon i ett fåtal länder. Tyskland har exempelvis drivit ett nätverk av mätstationer sedan 70-talet, och FOA drev under 90-talet ett nätverk med tre stationer i Sverige. Det svenska nätverket byggde på ett halvautomatiskt system där luft samlades in under en vecka i en kyld kopparspiral fylld med aktivt kol. Provet extraherades från spiralen och skickades till ett laboratorium där xenon separerades från övriga gaser och det stabila xenonet kvantifierades med hjälp av gaskromatografi. Till sist mättes aktiviteten hos det separerade xenonprovet med en högupplösande gammadetektor. När IMS skulle byggas upp ställdes högre krav på xenonmätningar än vad den tidens teknologi var kapabel till, vilket satte igång utvecklingen av betydligt känsligare helautomatiska system med kortare insamlingstid, bland annat på FOA (senare FOI) i Stockholm.

SAUNA-systemet och IMS

Xenondetektionsteknikens potential att detektera radioaktivitet från underjordiska kärnvapenprov gjorde att man i förhandlingarna som ledde fram till CTBT kom fram till att 40 xenonsystem skulle ingå i IMS. Systemen behövde klara av att samla in minst ett luftprov per dygn, och kunna detektera en aktivtetskoncentration för ^{133}Xe ner till 1 mBq/m³, och även kunna detektera de övriga tre relevanta xenonisotoperna $^{133\text{m}}\text{Xe}$, $^{131\text{m}}\text{Xe}$ och ^{135}Xe . För att detta skulle bli praktiskt genomförbart behövde mätsystemen vara helt automatiska och kräva minimalt med tillsyn. Många stationer i IMS ligger på otillgängliga platser, som exempelvis Påskön utanför Chile och Chatham Island utanför Nya Zeeland — platser med små resurser i form av personal och infrastruktur.

Under slutet av 90-talet utvecklades på FOA det första så kallade SAUNA-systemet (*Swedish Unit for Noble gas Acquisition*) avsett att användas i IMS. Den första prototypversionen (SAUNA I) installerades på en station på Svalbard 2001, och den första kommersiella versionen (SAUNA II) stod färdig 2004 och installerades på Sveriges IMS-station i Stockholm året efter⁸. Parallellt med

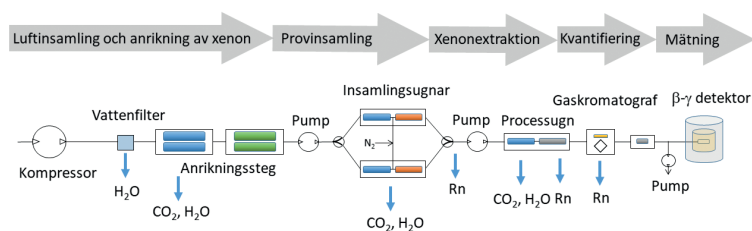
⁸FOI har även utvecklat en variant av SAUNA som är avsedd att användas för att analysera markgasprov vid en OSI, samt en systemtyp som används vid radionuklidlaboratorier som ingår i IMS.

SAUNA utvecklade kärnvapenstaterna USA, Frankrike och Ryssland egna system, men endast SAUNA och det franska systemet har än så länge installerats i större omfattning i IMS. SAUNA finns idag installerat på 17 radionuklidstationer i CTBTs verifikations-system, bland annat i USA, Mexiko, Brasilien, Japan och Australien. Dessutom driver flera länder SAUNA-system på nationell basis, inte minst på och i anslutning till koreanska halvön. För närvarande pågår en uppgradering av systemen till den senaste versionen (SAUNA III) som visas i figur 6.



Figur 6: Senaste versionen av IMS-systemet för insamling och detektion av radioaktivt xenon, som utvecklats på FOI (SAUNA III). De tre skåpen innehåller (från vänster till höger) moduler för insamling och anrikning av xenon, provberedning och kvantifiering samt datatagning och systemövervakning. Längst till höger syns de två detektorer som används för att mäta aktiviteten från det insamlade och separerade xenonet (foto: Scienta Envinet).

Funktionen för SAUNA III återges schematiskt i figur 7. En kompressor samlar in luft från atmosfären via ett partikelfilter. Luften passerar ett vattenfilter för att sedan ledas vidare till ett system som med hjälp av omväxlande högt och lågt tryck (så kallad *pressure swing adsorption*) anrikar luften med avseende på xenon med en faktor 8. Den anrikade luften flödar därefter till en av

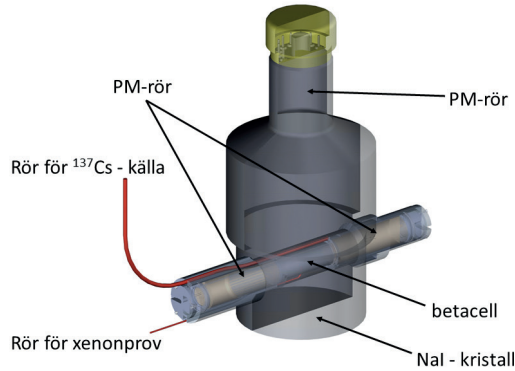


Figur 7: Schematisk beskrivning av funktionen hos xenonsystemet SAUNA III. Se texten för beskrivning.

två insamlingskolonner som innehåller silverzeolit (Ag-ETS-10) — ett relativt nyutvecklat material som mycket effektivt adsorberar xenon. För att kunna samla in kontinuerligt är systemet försett med två parallella insamlingsugnar som med en frekvens på sex timmar omväxlande samlar in och därefter värms upp, töms och görs rena. I både anriknings- och insamlingssteget separeras vatten och koldioxid. Provet förs sedan vidare till ännu en ugn med kolonner som ytterligare koncentrerar provet i tid och samtidigt separerar andra gaser. Det är viktigt att radon separeras, eftersom denna gas är radioaktiv och annars skulle ge upphov till en bakgrund i den efterföljande aktivitetsmätningen. I ett sista processteg mäts mängden stabilt xenon i provet med hjälp av en gaskromatograf. SAUNA III extraherar ungefär 3 ml stabilt xenon ur ett luftprov som samlats in under sex timmar. Eftersom luften innehåller 87 ppb stabilt xenon, eller 0,087 ml per kubikmeter luft, motsvarar detta ungefär 35 m³ insamlad luft.

Xenonprovet mäts slutligen i en detektor (figur 8) som mäter aktiviteten hos de fyra relevanta xenonisotoperna. Som beskrivs i figur 9 kommer xenonisotoperna att avge både elektroner och gammastrålning när de sönderfaller. Genom att kräva att både en elektron och en gamma- eller röntgenfoton skall registreras inom ett snävt tidsintervall (mikrosekunder) kan det mesta av bakgrundsstrålningen exkluderas. Beta-gamma tekniken i kombination med xenon från en stor luftvolym resulterar i en mycket känslig mätning. SAUNA IIIs detektionsgräns för ¹³³Xe är ungefär 0,1 mBq/m³ (det vill säga tio gånger bättre än vad som egentligen krävs i IMS), vilket betyder att det behövs ungefär 100 atomer i en kubikmeter luft för att isotopen skall upptäckas. Att metoden

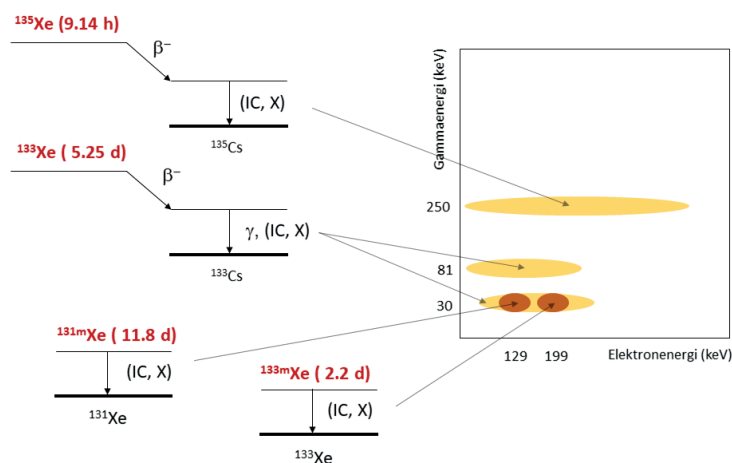
fungerar visas bland annat av att SAUNA-system har använts för att detektera utsläpp från två av Nordkoreas kärnvapenprov.



Figur 8: Detektorn som används för att mäta aktiviteten hos det insamlade och separerade xenonprovet. Provet förs in i en cylinder av scintillerande plast (betacell) som detekterar elektroner. Gammastrålning detekteras av den omgivande NaI-kristallen.

Nordkoreas provsprängningar

Den 3 oktober 2006 annonserade Nordkorea att man tänkte genomföra sitt första kärnvapenprov. Det fanns tecken på att man förberedde ett sådant test och i fall det inträffade var det viktigt att kunna visa att det verkligen var en kärnexplosion. Vid tidpunkten hade nyutvecklade xenonsystem precis börjat installeras i IMS, men det fanns inga system på eller i närheten av Koreahalvön. På FOI i Stockholm hade vi tillgång till ett nyutvecklat SAUNA-system som skulle kunna användas om man snabbt kunde transportera det till regionen. Vi hade också utvecklat ett mobilt system för insamling av luftprover avsedda att transporteras till ett laboratorium för analys. Systemet var utvecklat i syfte att kunna användas för inspektioner på plats (OSI). FOI kontaktade Sydkorea och frågade om man var intresserade av att där installera ett xenonsystem, vilket de var, och vi började förbereda en transport av SAUNA-systemet till landet. Redan natten den 9 oktober, innan systemet hunnit skeppas, registrerades dock en seismisk händelse lokaliserad till en plats där man misstänkte att Nordkorea förberedde ett prov. Analysen av den seismiska signalen visade att det kunde röra sig om en explosion med en styrka på ungefär 1 kt.

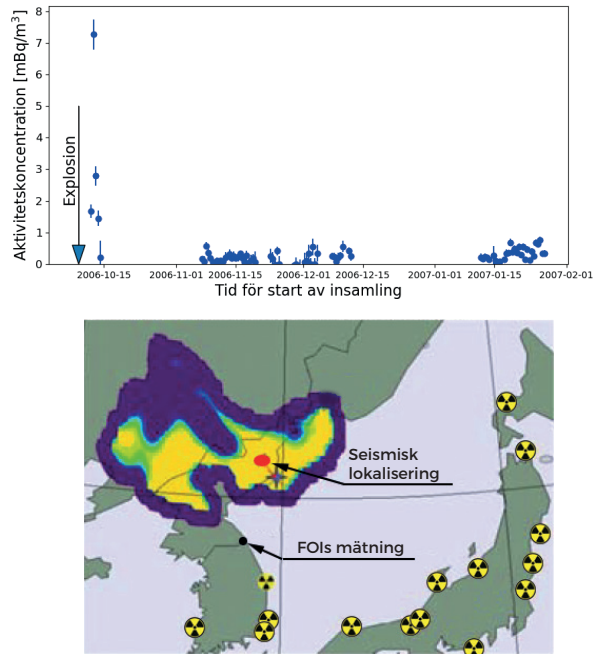


Figur 9: Principen för mätning av de viktigaste sönderfallen för de fyra xenonisotoper som mäts inom övervakning av CTBT. ^{133}Xe och ^{135}Xe betasönderfaller (β^-) till exciterade tillstånd av ^{133}Cs respektive ^{135}Cs , som sedan omedelbart sönderfaller genom att avge gammastrålning (γ) alternativt röntgenstrålning och en konversionselektron (IC, X). De metastabila isotoperna (långlivade exciterade tillstånd) ^{133m}Xe och ^{131m}Xe sönderfaller främst via röntgen och konversionselektroner. Detektorn mäter energin hos sönderfallsprodukterna och aktiviteten för de olika isotoperna kan bestämmas genom att analysera olika områden i ett tvådimensionellt energispektrum.

En sådan i sammanhanget relativt liten explosion kan dock också åstadkommas med konventionella sprängmedel, och även om Norkorea själva hävdade att man provat en kärnladdning fanns inga bevis för att så verkligen var fallet.

Fanns det fortfarande en möjlighet att göra en xenonmätning? Väderprognoser visade att ett utsläpp från platsen skulle blåsa mot Ryssland, och inte mot Sydkorea. Två dagar senare skulle dock vinden vända söderut och det skulle finnas en möjlighet att registrera en eventuell xenonplym. Vi kom överens med Sydkorea att så snabbt som möjligt organisera en transport av det mobila insamlingssystemet och installera det på en plats nära gränsen till Nordkorea. Två dagar senare, onsdagen 11 oktober, var det mobila systemet på plats i Sydkorea och samlade in luft. Totalt samlades fem luftprover à 12 timmar in, vilka så fort som möjligt skickades tillbaka till FOI i Stockholm för analys. Samtliga fem prover visa-

de sig innehålla ^{133}Xe , och mätningarna visade även på $^{133\text{m}}\text{Xe}$ i mängder relativt ^{133}Xe som man kunde förvänta sig om xenonet skapades vid fission den 9 oktober. Vidare visade lokaliseringen att den insamlade luften kunde komma från platsen för den seismiska händelsen (se figur 10). Ungefär två veckor senare rapporterade vi resultaten till vår egen och Sydkoreas regering, och strax därefter annonserade Sydkorea att deras grannar i norr verkligen provat en kärnladdning. Det visade sig också senare att USA genomfört flygmätningar i området som bekräftade FOIs mätning.



Figur 10: Mätningar av xenon, utförda av FOI, efter Nordkoreas första kärnvapenprov 2006. Den analyserade luften samlades in nära gränsen till Nordkorea. Den övre bilden visar resultat för isotopen ^{133}Xe . Pilen anger tidpunkten för explosionen enligt den seismiska mätningen, och till höger syns resultatet av analysen av de fem insamlade proverna. Övriga datapunkter visar data från ett SAUNA-system som senare transporterades till samma plats för att mäta den normala bakgrunden. Den nedre bilden visar möjligt utsläppsområde (gult och lila) beräknat med hjälp av atmosfärtransportmodellering. Den röda ellipsen visar den seismiska lokaliseringen av explosionen. De runda gul-svarta markeringarna visar kärnkraftverk i regionen som var i drift 2006. (figur från *Pure Appl. Geophys.* **167**, 581 [2010], med tillstånd från Springer Nature)

Efter provet 2006 har Nordkorea genomfört ytterligare fem kärnvapenprov, varav det senaste, som skedde 2017, var det kraftigaste (ungefär 100 kt). Xenonutsläpp har dock endast säkert knytats till det prov som genomfördes 2013, och också denna gång användes ett SAUNA-system.

Provet den 12 februari 2013 var väntat och beredskapen att ta emot och analysera mätdata var denna gång hög runt om i världen. Seismologiska mätningar från IMS gav vid handen att styrkan var 10-20 kt. Xenonsystem fanns nu installerade i regionen, bland annat ett SAUNA-system i Takasaki, Japan och ett ryskt system i Ussurijsk. Följande dagar uppfångades emellertid inga radionuklider som kunde knytas till provet. Med början den 7 april 2013, mer än två månader senare, uppmättes tre prov i Japan och fem dagar senare även två i Ryssland. Samtliga innehöll både ^{133}Xe och $^{131\text{m}}\text{Xe}$. Så lång tid efter explosionen kan endast dessa två isotoper finnas kvar i observerbara mängder — de mer kortlivade isotoperna $^{133\text{m}}\text{Xe}$ och ^{135}Xe har hunnit sönderfalla. De uppmätta aktivitetskvoterna ($^{133}\text{Xe}/^{131\text{m}}\text{Xe}$) beräknades vara kompatibla med xenon som bildats vid explosionen två månader tidigare, men de skilde sig åt mellan stationerna. En analys med hjälp av atmosfärstransportmodellering ledde till slutsatsen att det rörde sig om två separata utsläpp från provplatsen. Ett möjligt scenario är att tunneln där explosionen genomfördes öppnades i syfte att ”vädra” för att kunna ta prover, ett normalt förfarande efter ett kärnvapenprov. Detta utsläpp träffade stationen i Japan. Sedan togs prover längre in i tunneln, kanske genomfördes en så kallad ”drill-back”, där man tar prover i kaviteten. Detta orsakade det andra utsläppet, som observerades i Ryssland.

Det finns flera skäl till att inte xenon observerats efter fler av Nordkoreas prov. Dels blev Nordkorea antagligen bättre på att stänga in xenongasen, och dels är det för glesst med xenonstationer i IMS. Nätverket utvecklades under antagandet att 10 % av det xenon som bildas i en explosion skulle läcka ut, men det har visat sig att det är betydligt mindre. Dessutom är endast 40 av de 80 radionuklidstationerna utrustade med xenonsystem — ett resultat av politik när CTBT förhandlades fram.

Nya mätmetoder

Dagens xenonsystem är mycket känsliga mätinstrument, men de är stora, dyra och kräver relativt komplicerad infrastruktur. Dess-

utom spelar det ingen roll hur bra ett system mäter om det inte träffas av en xenonplym. FOI frågade sig därför om det inte vore möjligt att uppnå en liknande, eller rent av bättre, verifieringsförmåga genom att använda fler, billigare, mindre känsliga system fördelade över ett större geografiskt område och använda dessa tillsammans som ett enda mätinstrument, på liknande sätt som görs i en seismisk array. Simuleringar visade att en xenonarray med fem mindre känsliga mätenheter i många fall skulle kunna ge en minst lika bra förmåga att detektera, lokalisera, och kategorisera ett utsläpp till ungefär samma kostnad som exempelvis ett SAUNA III.

Idén har realiserats i form av världens första xenonarray som är i drift i Sverige sedan 2021 (se figur 5). Arrayen består av fem mätenheter från Ljungbyhed i söder till Kiruna i norr. Avståndet mellan dem är 200–500 km. Eftersom en xenonplym som blåser in över Sverige oftast träffar flera av mätenheterna kan en bättre lokalisering erhållas jämfört med om endast ett system träffas. Lokaliseringen förbättras ytterligare om man utnyttjar att vissa enheter inte träffas av plymen. Dessutom kommer ofta signalen att bli större jämfört med om endast ett system används, eftersom det genomsnittliga avståndet till källan minskar. Den svenska xenonarrayen har på detta sätt kunnat användas för att öka vår kunskap om xenonkällor i Europa, och därmed ökar också vår förmåga att kunna identifiera kärnexplosioner i vårt närområde.

En förvärrad hotbild

Den förvärrade hotbilden de senaste åren, inte minst orsakad av Rysslands invasion av Ukraina, har medfört ett ökat behov av nationell övervakning. Utsikterna att CTBT skall träda ikraft de närmaste åren är mörka, inte minst genom Rysslands avratificering av avtalet 2023. Det finns en ökad oro för att någon av kärnva-penstaterna skulle kunna utföra ett kärnladdningsprov. De flesta bedömer att en sådan händelse skulle verka destabiliserande och orsaka att fler stater provade, och att CTBT, inklusive dess verifieringsmekanism, kraftigt skulle försvagas eller falla samman. Detta skulle leda till en kraftigt minskad datatillgänglighet för Sverige. Tillsammans med andra faktorer, pekar detta på vikten av en ökad nationell förmåga att kunna upptäcka kärnexplosioner i omvärlden.

I Sverige skulle ett sådan förmåga kunna utgöras av redan in-

stallerade mätsystem kompletterade med nya sensorer. Förutom de mätstationer som nämnts skulle andra nätverk, som idag drivs av skilda aktörer för olika ändamål, kunna användas. Till dessa hör exempelvis det Svenska nationella seismiska nätet (SNSN) som drivs av Uppsala Universitet och de gammastationer som Strålsäkerhetsmyndigheten driver för miljöövervakning. Genom att kombinera dessa och andra system, komplettera med nya sensorer, och samordna data och analys skulle Sveriges vara bättre rustat för att kunna förse beslutsfattare och allmänhet med egna, oberoende, analyser av kärnexplosioner.



Vidare läsning

CTBTO (3024). *CTBTO Preparatory Commission*.

<https://www.ctbto.org/>.

Dahlman, O., Mackby, J., Mykkeltveit, S. och Haak, H. (2011).

Detect and Deter: Can Countries Verify the Nuclear Test Ban? Springer.

Ringbom, A., Goliath, M. och Nylén, T. (2023). *Ett nationellt system för att upptäcka, varna och informera om*

kärnexplosioner och andra nukleära händelser. FOI rapport FOI-R-5465-SE.

Ziegler, C.A. och Jacobson, D./ (1995). *Spying Without Spies:*

Origins of America's Secret Nuclear Surveillance System. Praeger.



Vinjettbilden i sin helhet.