

KOSMOS

FYSIK OCH MÄNNISKAN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2024



ARTEMIS PROJEKTET: KÄRN- FYSIK OCH JORDBÄVNINGAR

© AYŞE ATAÇ NYBERG OCH RAMON WYSS



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

Ayşe Nyberg och Ramon Wyss ger i denna artikel ett mycket konkret exempel på hur fysik kan komma mänskligheten till nytta. Med hjälp av kärnfysikaliska metoder utvecklas och prövas instrument med vilka prognostisk för förestående jordbävningar gradvis förbättras. I förlängningen finns förhoppningar om ett varningssystem.



Ayşe Ataç Nyberg

är född i Ankara, Turkiet. Disputerade i kärnfysik 1989 vid universitet i Oslo. Postdok vid Niels Bohr Institute i Danmark, följt av arbete vid Uppsala universitet och Ankara University. Hennes forskning är inriktad mot kärnfysik, vilket innefattar utveckling av sensorsystem för studier av atomkärnan. Sedan 2015 professor vid KTH och koordinatör för projektet ArtEmis.

Bilden: De röda punkterna visar jordbävningar större än fyra på richtersskalan under tiden 1964–2015.



Ramon Wyss

disputerade 1990 i kärnfysik på Manne Siegbahn Laboratoriet/KTH. Postdoc på Oak Ridge, USA. Forskning om atomkärnans struktur och fick 'Edlundska priset' av KVA 1995. Vicerektor vid KTH för frågor kring internationalisering 2002-2015. Medgrundare av InnoEnergy; konsortium finansierat av European Institute of Innovation and Technology (EIT). Senior professor på KTH med intresse för sambandet mellan radon och jordbävningar sedan 90-talet.

ArtEmis projektet: kärnfysik och jordbävningar

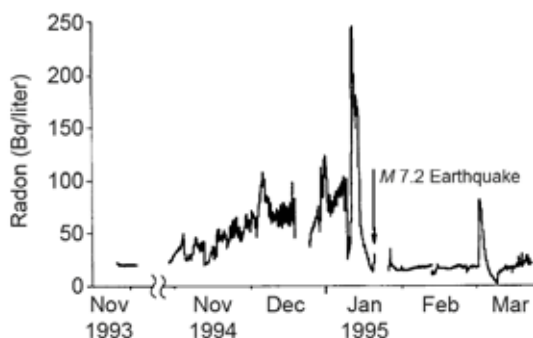
Är protonen stabil eller sönderfaller den? Det var en fråga som sysselsatte forskarna på 80-talet. För att kunna detektera ett möjligt sönderfall av protonen, byggdes i Japan en stor detektor som innehöll vatten och som utrustades med scintillatorer. Sönderfallet skulle då leda till strålning som kunde detekteras i den stora vattentanken. Mätningarna gjordes i en gruva, Kamiokande, på cirka 1000 meters djup, där det ovanliggande berget skyddade detektorn från kosmisk strålning.

Ett problem som fysikerna hade vid mätningarna var att radongas från berget kan lösas upp i vattnet, där betastrålningen från radondöttrar ger en signal som kan likna den från proton-sönderfall. För att kontrollera denna bakgrundsstrålning, byggdes en särskild detektor som kunde fånga in radonet och mäta dess sönderfall via den alfapartikeln som då emitterats. Bakgrundsstrålningen från radonsönderfallet var i stort sett konstant. Forskarlaget som arbetade med radondetektorn observerade dock plötsligt en minskning av radonnivån. Två och en halv dagar senare uppmättes en jordbävning av magnitud 3,9 på richterskalan¹ 45 km ifrån gruvan.

Detta resultat inspirerade seismologer från universitetet i Hiroshima att genomföra mätningar i Kobe. För ändamålet byggdes några detektorer för radonmätning i vatten. Detektorerna var likadant konstruerade som de från Kamiokande-experimentet. De placerades ut på olika ställen runt Kobe, bland annat i en gruva i närheten av Kobe. Mätningarna där genomfördes under en längre tid. I oktober 1994 observerades en långsam ökning av

¹I dag används en modifierad skala men vi kommer inte att beröra detta i vår framställning.

radonkoncentrationen. Ökningen var konstant under flera månader, tills den plötsligt kraftigt tilltog den sjunde januari, för att sedan falla tillbaka till den ursprungliga bakgrundsnivån, se figur 1. En vecka senare ledde en kraftfull jordbävning till stor förödelse i Kobe, med över 6000 döda.



Figur 1: Radonkoncentration mätt under tiden 1994-1995 nära Kobe. Notera den långsamma ökningen under flera månader, för att sedan ändras till en tydlig topp cirka en vecka innan jordbävningen. Från G. Igarashi et al., *Science* **269** (1995) 60.

Sambandet mellan ändringar i radonhalten och jordbävningar har undersökts i årtionden. Det finns många tydliga exempel på sådana samband, men det finns också otaliga exempel på ändringar i radonhalten utan minsta samband med jordbävningar. Vårt projekt, ArtEmis, försöker klargöra huruvida mätningar i grundvattnet av bland annat radon kan leda till bättre prognoser för kommande jordbävningar. ArtEmis använder sig av tre nya uppslag, som tillsammans ska kunna ge ett svar på frågeställningen:

1. ArtEmis-sensorn mäter gammastrålning från radondöttrar. Den har hög känslighet och placeras i grundvattnet på cirka en meters djup. Därmed reduceras kraftigt alla de atmosfärska störningar som drabbar radonmätningar i jordytan eller atmosfären. ArtEmis-sensorn mäter dessutom temperatur, tryckförändringar, ljudvågor och konduktivitet. Mätplatserna ligger längs de förkastningszoner där grundvattnet kan stå i förbindelse med djupare lager av jordskorpan.
2. ArtEmis-sensorn är billig att bygga och målsättningen är att den ska kosta cirka 2-300 euro per enhet. Projektet har då medel att placera ut över 100 sensorer i jordbävningsdrab-

bade områden i Grekland, Italien och Schweiz och därmed kunna producera en statistisk relevant datamängd. Det låga priset ska göra det attraktivt att efter provtidens slut placera ut många fler sensorer på fler områden i Europa och andra delar av världen.

3. Datamängden från de över hundra sensorerna ska analyseras med hjälp av maskininlärning och/eller artificiell intelligens. Denna form av analys ska kunna hitta samband mellan en jordbävning och ändringar av mätvärden i grundvatten.

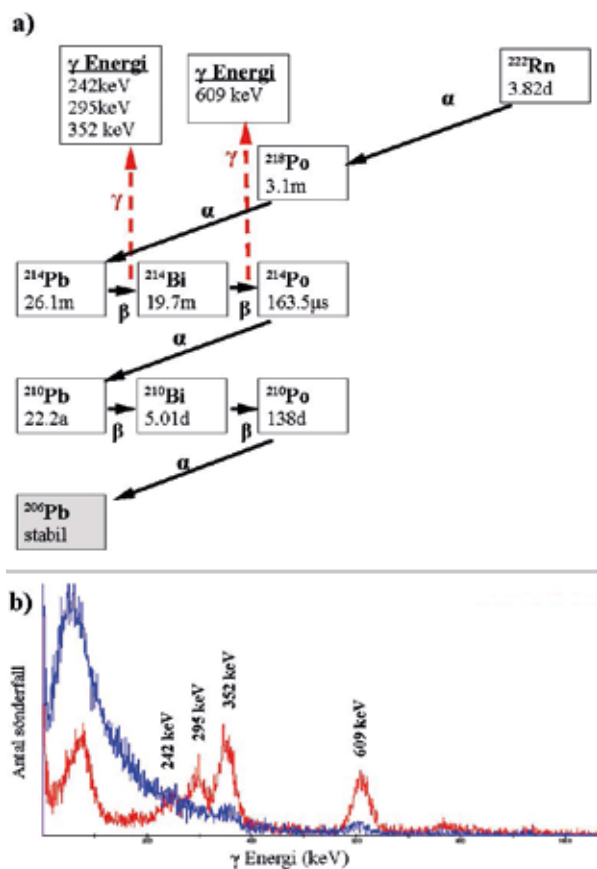
Utgångspunkt för ArtEmis-projektet är att tvärvetenskaplig forskning och avancerad teknik behövs för att förstå den komplicerade processen som korrelerar radonsönderfall och jordbävningar. ArtEmis är ett samarbete mellan 14 europeiska institutitioner i vilket det ingår experter från ämnen som kärnfysik, sensorutveckling, geofysik, seismologi, hydrologi, nätverksarkitektur, artificiell intelligens och kommunikationssystem.

ArtEmis

Artemis — *Awareness and resilience through European multi sensor system* (HORIZON-EURATOM-2021-NRT-01), finansieras av Europeiska kommissionen och samlar 14 partners från 9 länder. Projektet startade den första oktober 2022 med målet att förbättra prognosmöjligheter för jordbävningar, vilka hör till mänsklighetens värsta naturkatastrofer. ArtEmis-projektet utvecklar ett smart och billigt sensor-system med cirka 100 enheter som mäter radon (Rn), temperatur, pH-värde och andra storheter i grundvatten i realtid. Sensorerna placeras längs förkastningszoner i jordbävningsdrabbade områden i Grekland, Italien och Schweiz. Data från sensorsystemet kombineras med seismiska och geologiska data och analyseras med hjälp av maskininlärningsalgoritmer (<https://artemisproject.eu>).

Radon och tektonisk rörelse

Uran är ett grundämne som förekommer naturligt i berggrunden med masstalen ^{235}U och ^{238}U . Sönderfallet av uran går via en kedja som omfattar många isotoper där bland annat gasen radon bildas, se figur 2. De flesta sönderfall sker via emission av en alfapartikel, men det förekommer också betasönderfall och gammastrålning. Två radonisotoper bildas, ^{222}Rn och ^{219}Rn , med halveringstid av 3,8 dagar respektive 4 sekunder. Eftersom förekomsten av ^{235}U är endast 0,7 % i naturligt uran, och halveringstiden är så kort, är en-



Figur 2: a) Sönderfall av ^{222}Rn och dess döttrar. I uranets sönderfallskedja genereras ^{222}Rn genom alfasönderfallet av ^{226}Ra . De mest framträdande γ -strålarna uppträder vid 242 keV, 295 keV och 352 keV och uppstår efter β^- -sönderfall av ^{214}Po , medan 609 keV-övergången uppstår efter β^- -sönderfall av ^{214}Bi . b) Simulerade γ -spektra för ^{222}Rn . I simuleringen placeras CsI-detektorn endera i en tank fylld med vatten (blå kurva) eller i luft (röd kurva). I fallet med vattentanken domineras det intressanta energiintervallet för γ -strålning (200–700 keV) av Comptonspridning mot atomerna i mediet. Eftersom vatten har högre densitet än luft, syns betydligt färre antal händelser i topparna och fler utspridda över ett kontinuum av lägre energier.

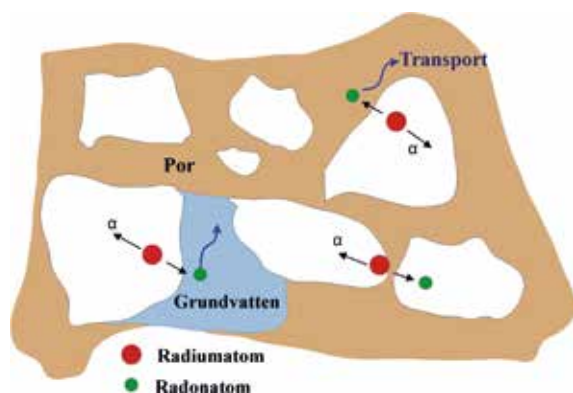
dst ^{222}Rn vanligt förekommande i naturen. Ett spektrum på gammastrålningen från radon i luft och i vatten visas i nedre delen av figur 2. I sammanhanget bör nämnas att det finns ytterligare

en radonisotop, ^{220}Rn , som uppstår genom sönderfall av ^{232}Th — ett naturligt förekommande radioaktivt grundämne. Av historiska skäl kallas det också thoron. Det har en kort halveringstid om 56 sekunder och kan under vissa omständigheter vara av intresse för radonmätningarna i samband med jordbävningar.

När uran är en komponent i ett bergmaterial blir radongasen i sönderfallsprocessen innesluten i materialet. Det är endast de uranisotoper som befinner sig på själva ytan av ett material, som kan ge upphov till utsläpp av radon. Det förklarar varför porösa berggrunder, som till exempel Brunckerbergsåsen i Stockholm släpper ifrån sig betydligt större mängder av radon än om det hade varit ett sammanhållet bergsmassiv. Eftersom sönderfallet från radium till radon går via en alfapartikel, lämnar radongasen ytan endast när rekylen från alfasönderfallet ger den en rörelsemängd riktat utåt. Att det finns radon — inte minst i gruvor och källare — är tecken på att det ändå är en vanligt förekommande process. Mängden radon inom ett visst område är således proportionell mot den yta som innehåller uran.

När ett bergmaterial utsätts för spänning uppstår först mindre sprickor som sedan kan öka i storlek om spänningen tilltar. Ett ökat antal sprickor innebär att materialets effektiva yta ökar och därmed blir det lättare för gasen att sippra ut, se den schematiska teckningen i figur 3. I de djupa lagren av berggrunden, där tektoniska plattor befinner sig i rörelse, byggs det ständigt upp spänningsfält mellan plattorna. Ändringar i spänningen i bergmaterialet som utsätts för töjning eller tryck skapar sprickor från vilka radon kan sippra ut. Ändringar i koncentration av radon vid jordens yta kan alltså vara tecken på ökad spänning och/eller ökad sprickbildning från tektoniska rörelser i djupa lager. Tilltagande spänning skapar fler sprickor som i sin tur ökar utsläppet av radon. När vi observerar skillnader i radonkoncentrationen på jordytan kan det tyda på skillnader i spänningen i berggrunden på stora djup (cirka 5–20 km, beroende på plats och omständigheter). Vår beskrivning av processen får ses som kvalitativ, eftersom vi saknar kunskap om den exakta sammansättningen av berggrunden och dess struktur på flera kilometers djup, liksom en exakt kännedom om rörelsen mellan olika plattor.

Radon är lösligt i vatten men på grund av sin tyngd har den en låg diffusionskoefficient. Diffusionen av radon från flera kilometers djup till jordytan är därför en långsam process. Eftersom



Figur 3: Schematisk bild av hur sönderfall av radium kan få radon att sippra ut till grundvattnet, eller till porer, varifrån det sedan kan transporteras till ytan. De vita ytorna presenterar bergmaterialet och de bruna ytorna öppna porer varifrån radonet kan lämna berggrunden. Endast när rörelsemängde riktas ut från materialet kan radonet komma ut. Olika fall visas schematiskt i bilden (baserad på en liknande figur i JRC Atlas, EANR, EC-JRC, 2019, Wiley).

halveringstiden är endast fyra dagar hinner radonet sönderfalla innan det kommer till ytan. Transporten behöver således ske genom att radonet följer med andra gaser, till exempel CO_2 , metan eller vattenånga, för att snabbare kunna komma till ytan. I samband med jordbävningar kan det observeras utsläpp av gaser som CO_2 , metan, svavelhydrat med flera, liksom ändringar av grundvattennivåerna. Radonet följer rörelserna av dessa gaser. Eftersom vi kan detektera radonet med en känslighet på några atomer per liter så är det en ypperlig teknik som det är lätt att tillämpa.

Det har också föreslagits andra processer som kan öka radonkoncentrationen vid jordytan. När jordens plattor viks eller trycks samman initieras kraftiga rörelser av vätskor och gaser från jordens inre. När dessa transporteras till ytan, kan de dra med sig radon som redan finns nära jordytan. I detta fall är radon således ett spårämne för andra vätskors och gasers rörelse och förekomsten är då inte orsakat av ökad sprickbildning.

I det första fallet är radonet således en sorts spännings- och sprickmätare mellan tektoniska plattor och i det senare en följeslagare av förändringar av strömmar av vätskor och gaser som uppstår på grund av förändringar i jordskorpan. I bägge fallen agerar

radon som en länk till andra processer och rörelser, eftersom den själv når jordytan med hjälp av andra gaser och vätskor. Det är tack vare radonets unika egenskaper som radioaktivt ämne, vilket möjliggör mätningar på atomär nivå, som det är den kanske mest lovande indikatorn för rörelser och spänningar i jordskorpan.

Prognoser eller förutsägelser

Det har länge varit ett uttalat mål för seismologin att kunna förutsäga jordbävningar. När vi talar om en förutsägelse av en jordbävning behöver vi dock klargöra vad som menas med det. Enligt den ledande seismologen Max Wyss behöver en förutsägelse innehålla en tidpunkt, en ort och en storleksordning på en kommande jordbävning, inom till exempel två standardavvikelser.

Det finns exempel på en lyckad förutsägelse från Kina, där man 1975 kunde evakuera staden Haichang inför en kommande jordbävning och lyckades rädda livet på många av stadens invånare. Förutsägelsen baserades på ett flertal observationer, där ändringar i radonhalten var en av dessa. Den stora jordbävningen det följande året i Tangshan kunde dock inte förutsägas och ledde till uppskattningsvis 300 000 dödsoffer. Man försökte då hitta alternativa sätt att förutsäga jordbävningar och en vanlig metod bestod i användning av tidsserier. Framgången var dock begränsad. Diskussionerna på 90-talet mynnade ut i påståendet att ”jordbävningar kan inte förutsägas eftersom deras förekomst är för komplex”. Mera optimistiska uppfattningar som pekade på kunskapsutvecklingen framfördes dock.

Frågan om förutsägelser av jordbävningar fick stor aktualitet i samband med den stora jordbävningen i Italien, i l’Aquila, 2009. En tekniker som arbetade på Gran Sasso-laboratoriet hade vid ett flertal tillfällen i början av 2009 varnat för en jordbävning i l’Aquila och dess närhet. Han hänvisade till radonmätningar han genomfört med en apparatur som han själv byggt. Det uppstod en orolig stämning i staden och för att mildra oron åkte en kommission av ledande seismologer och ansvariga från Italiens myndighet för civil beredskap till l’Aquila för att lugna befolkningen. Risken för en jordbävning tonades ned eller sades var obefintlig. Sex dagar senare drabbades l’Aquila av en jordbävning som medförde ett hundratal dödsoffer. Flera medborgare i staden tog initiativ till en rättegång mot medlemmarna i kommissionen, där 2012 sex av dessa dömdes till fängelse för dråp. Detta ledde till hetsiga diskussioner

inom det vetenskapliga samfundet där många menade att det var ett domslut som påminde om medeltiden. Efter ett överklagande friades vetenskapsmännen två år senare och den fällande domen kvarstod endast för vice presidenten för den italienska myndigheten för civil beredskap. Rättegången ledde till att den vetenskapliga frågan huruvida och på vilket sätt jordbävningar skulle kunna förutsägas blev mycket laddad, och likaså metoden att mäta radonhalt för att kunna förutsäga jordbävningar. ”Jordbävningar kan inte förutsägas” blev en vetenskaplig sanning, för att inte säga dogm, som etablerades efter och i samband med rättegången.

Det som i stället lyfts fram är begreppet ”prognoser” (i engelskan används *forecasting*, till skillnad från *predictions*). Man säger då att det finns 80 % chans för en jordbävning inom ett visst område inom de närmaste 50 åren. Förutom studier av tidsserier används GPS mätningar för att bestämma hastighetsfälten och beräkna spänningen som ackumuleras längs vikningszoner. Ett intressant exempel på framstegen inom prognosområdet kan tas från den pågående diskussionen om en möjlig jättelik jordbävning och tsunami i Japan inom de närmaste 30 åren, baserad på kännedom om de tektoniska plattornas rörelser och om vad som kan trigga en större rörelse bland dessa.

Radonmätningar för att förutse jordbävningar

En litteratursökning på KTH:s bibliotek efter artiklar som innehåller radon och förutsägelser av jordbävningar ger över 750 förslag på artiklar, vilket visar att det finns en omfattande litteratur i ämnet. De tidigaste rapporterna om sambandet mellan ökade radonnivåer och jordbävningar är från jordbävningen i Tasjkent, Uzbekistan, 1966. Därefter har följt många fler mätningar där man tidvis haft stora förhoppningar om att kunna använda denna gas som indikator för kommande jordbävningar. Det finns ett flertal systematiska sammanställningar i litteraturen över mätningar. Ett samband som har lyfts fram är diametern D , inom vilken man kan observera en föregångare till en jordbävning, som beror exponentiellt på jordbävningens storlek, mätt i Richterskalan, M . Föregångaren till en jordbävning kan observeras på större avstånd för en stor jordbävning, jämfört med en svag:

$$D = a e^M \quad , \quad a = \text{konstant} \quad .$$

Sådana samband är värdefulla när man ska relatera ändringar i radonkoncentration och andra storheter mot förekomsten av jord-

bävningar. Komplexiteten av dessa analyser framgår tydligt från de olika bidragen till litteraturen.

Jämförelser försvåras dock av att flera olika tekniker har använts för att mäta radonhalten. Många mätningar har skett i jordytan och är behäftade med tillkortakommanden: ändringar i det atmosfäriska trycket leder direkt till ändringar av radonhalt i jordytan. Detsamma gäller temperaturändringar. Således kan man följa solens rörelse genom att mäta radonhalten i jorden. Det finns dessutom indikationer att radonändringar följer ett mönster som liknar tidvattentrörelse. Regn påverkar också radonkoncentrationen väsentligt. Med andra ord påverkas radonkoncentrationen av så många faktorer att det kan vara svårt att etablera tydliga samband med jordbävningar.

Mätningar i grundvatten är mera stabila, framför allt då mätplatserna ligger vid de vikningszoner som står i förbindelse med djupare lager. Att direkt detektera en alfapartikel i vatten har sina svårigheter, eftersom dess räckvidd är mindre än en millimeter. En vanlig metod använder sig av avgasning genom till exempel en rotor som skapar luftbubblor och får radonet att blandas med luft och röra sig mot en detektor som då mäter i luft, till exempel med en jonkammare. Förutom radon finns ett flertal andra geokemiska indikatorer som har pekats ut för studier. Ett exempel är såväl ökad förekomst av helium som förhållandet mellan heliumisotoperna ^3He och ^4He .

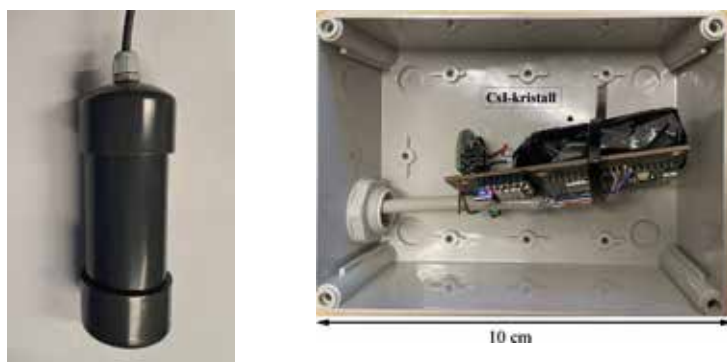
En annan mätstorhet som kan påverkas är vattentryck, där man har konstaterat att det kan ändras inför och under en jordbävning. Ljudvågor är ytterligare en signatur. I bägge fallen har signaler observerats över stora avstånd, ibland mer än tusentals kilometer. Surhetsgraden i grundvatten eller dess kemiska sammansättning kan också påverkas av rörelser i jordskorpan och därför har ArtEmis-sensorn utrustats med fler sensorer än bara detektorn för gammastrålning.

ArtEmis-sensorn

I Sverige är många bekanta med radonmätning. Uranet i berggrunden gör att radon förekommer flitigt på många platser och kan finnas i grundvattnet. Gränsvärden för radon inomhus är väletablerade. Mätningar görs genom boverkets direktiv och man använder sig av små mätidosor, så kallade spårfilmsdosor. Dosan får ligga en bestämd tid i till exempel källaren för att sedan analyseras

för radon. Det är den karakteristiska kinetiska energin av alfapartikeln när radon sönderfaller till polonium som ger upphov till spår i mätdosan. Som alla mätmetoder som använder sig av radioaktiva sönderfall är känsligheten hög, eftersom man mäter enskilda atomers sönderfall.

För att radonmätning ska kunna ge en signal innan en jordbävning, behöver radonnivån mätas kontinuerligt, exempelvis en gång i timmen, för att etablera en tidsserie som fastställer en naturlig bakgrunds nivå och eventuella naturliga avvikelser. Först därefter kan man uttala sig om eventuella extraordinära förändringar av radonkoncentrationen. Historiskt sett har det förekommit en mängd olika sensorer för att fånga in alfapartikeln och mäta dess energi. Som nämndes i inledningen kännetecknades detektorn som användas vid Kamiokande-experimentet i Japan av hög känslighet. Den avancerade instrumenteringen och därmed höga kostnaden per enhet, gör det svårare att placera ut en stor mängd detektorer. Designen av ArtEmis-sensorn har därför haft utgångspunkten att mäta γ -strålningen, vilket är betydligt lättare att genomföra. I slutändan ska varje enhet kunna produceras för en låg kostnad vilket skulle göra det möjligt att bygga ett stort nätverk med många sensorer. Det andra villkoret i designen är att uppnå en känslighet som motsvarar de bästa alfadetektorerna. Ett tredje villkor är att det finns flexibilitet i enheten, som tillåter att fler storheter kan mätas och att man kan lägga till andra sensorer vid behov. Mätdata ska dessutom överföras i realtid.



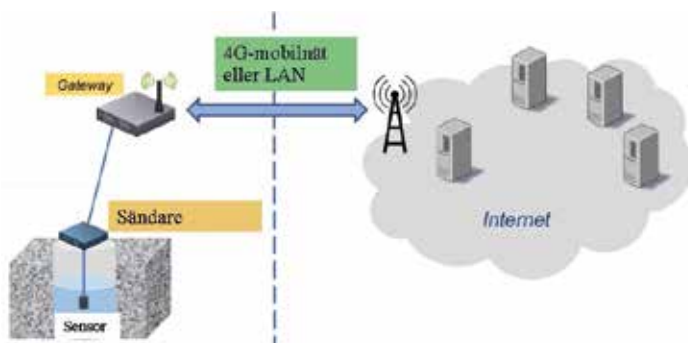
Figur 4: Bild på artEmis-sensorer i två olika upplagor: en med cylindriskt hölje, och en bild som visar komponenterna monterade på moderkortet i ett alternativt fyrkantigt hölje.

Det primära målet med ArtEmis-sensorn är att detektera den karakteristiska γ -strålningen som avges efter sönderfallet av radon i vatten, för att identifiera Ortsberoende variationen av Rn-aktivitet inom sensornätverket. Den relevanta isotopen ^{222}Rn är löslig i vatten och α -sönderfaller till ^{218}Po . Som framgår av figur 2, kommer γ -sönderfallet från dotterkärnorna i sönderfallskedjan, nämligen från betasönderfallet av ^{214}Pb och ^{214}Bi . Sönderfallskedjan genererar en serie av γ -strålning som lätt kan observeras även i stora vattenvolymer om flera kubikmeter. Även när majoriteten av γ -strålarna är Comptonspridda kan ArtEmis-sensorn samla in en tillräcklig datamängd per timme. Andra parametrar som är viktiga för tolkningen av radondata, till exempel temperatur, surhetsgrad och hydrologiskt tryck, mäts med samma sensorenhet.

Som diskuterats ovan, är en direkt mätning av α -partiklarnas kinetiska energi i vatten tekniskt svår, eftersom de har en räckvidd av endast $50\ \mu\text{m}$. I designen av ArtEmis-sensorn, finns det planer att utnyttja osmotiska processer för att extrahera radongas genom ett silikonrör. Räckvidden för α -partiklar i gas är flera centimeter, vilket skulle kunna möjliggöra mätningar av α -sönderfall med tillräcklig känslighet. Eftersom endast α -partiklar från radon kan förekomma, och ingen annan partikelbakgrund förväntas, blir en sådan mätning i det närmaste bakgrundsfri. Detta kompenserar för den lägre känsligheten jämfört med en mätning av γ -strålning. Mätning av både α - och γ -strålning i samma detektorenhet innebär en betydande ökning av den totala känsligheten och selektiviteten och utgör en nyhet inom radonmätning. En sådan utveckling av ArtEmis-sensorn kommer att testas i ett senare skede.

ArtEmis prototyp

Sex prototyper av ArtEmis-sensorn har konstruerats och tillverkats vid GSI, Darmstadt, se figur 4. Kärnan i enheten är en scintillationsdetektor för γ -strålning — en CsI(Tl)-kristall med en diameter på 2 cm och en längd av 6 cm. När γ -strålning träffar detektorn ger den ifrån sig ett scintillationsljus som avläses av en fotomultiplikator baserad på kisel (SiPM). Som helhet består enheten av en γ -detektor (CsI), PHT-sensorer (tryck, fuktighet, temperatur), accelerometer och mikrofon, samt elektronik för signalbehandling och digitalisering. Dessutom två processorer för databehandling och styrning. Hela systemet är monterat i ett vattentätt hölje och anslutet till en överföringsenhet för data- och ström-



Figur 5: Schematisk bild av kommunikationsflöden för ArtEmis. Till vänster syns sensorn i en brunn, kopplad till sändaren via en kabel. Därifrån skickas signalen vidare till bryggan (gateway), som i sin tur skickar signalen vidare via 3G/4G mobila nätet. Därifrån kan de laddas ned från molnet till lokala databaser för vidare behandling av mätdata.

överföring, som i det följande kallas för sändare (*transmitter*). När sensorenheten placeras i vattnet för mätning, är sändarenheten monterad ovanför vattnet i närheten, till exempel vid kanten av en brunn. Detta minimerar storleken på undervattensenheten och dess strömförbrukning liksom värmeproduktion.

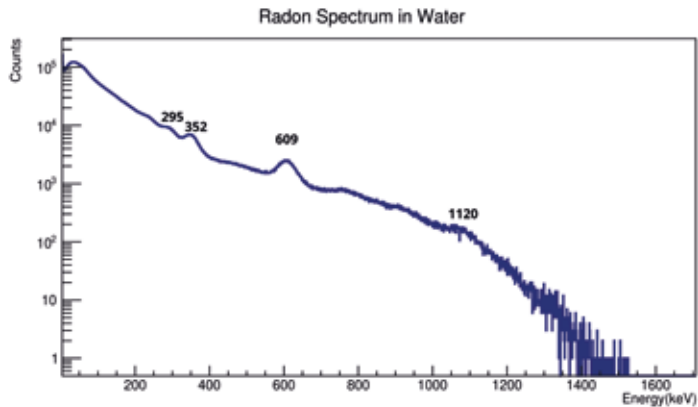


Figur 6: Testuppställning hos SURO, det tjeckiska nationella strålskydds-institutet, där ArtEmis sensorn placeras i en 1 m³ stor tank för kalibrering av sensorn och bestämning av känsligheten.

Datakommunikationen sker via en kommunikationsbrygga (i det efterföljande ”brygga”, *gateway*), kopplad till sändaren, som förser hela enheten med ström. Bryggans uppgift är att skicka data ut till ”molnet”. Anslutningen till internet sker med hjälp av trådlös kommunikation över 3G/4G-mobilnätet eller tillgängligt LAN. Kommunikationen mellan bryggan och internet-servrar baseras på ett standardprotokoll för meddelanden inom *Internet of Things*. Bryggan har utvecklats på KTH på enheten för kommunikations-system. I det nuvarande systemet behöver enheten tillgång till en extern strömkälla. Strömbehovet är litet och det finns inga hinder att göra den oberoende av det externa elnätet med hjälp av solceller och batterier. Alla enheter har utvecklats inom ArtEmis-projektet. En schematisk bild över hela sensorsystemet visas i figur 5.

Sensortest hos SURO

Den första prototypen av ArtEmis-sensorn testades vid SURO i Prag², se figur 6. Där genomfördes också en kalibrering av detektorns känslighet som visade att den är i nivå med de bästa alfadetektorerna.



Figur 7: Gammaspektrum från radondöttrar taget med ArtEmis-sensorn vid SUROs testanläggning. De mest relevanta topparna är markerade i figuren. Notera hur väl spektrumet stämmer överens med simuleringen i figur 2.

Den nuvarande sensorenheten använder sig endast av gammastrålning från radondöttrar, — se figurerna 2a och 2b om sönderfallskedjan efter radon. Resultatet från radonmätningarna på

²Tjeckiska nationella strålskyddsinstitutet (<https://www.suro.cz/en>).

SURO visas i figur 7. Som synes stämmer det väl överens med simuleringarna från figur 2. Spektrumet i figuren domineras av gammastrålning från radondöttrarna och motsvarande Compton-spridning i vattnet. Förutom de linjer som markerats i figur 2b finns också en indikation på att 1120 keV-övergången syns efter β^- -sönderfallet av ^{214}Bi . Vid en normal bakgrundsmätning i luft skulle man förvänta sig en kraftig topp runt 1460 keV, vilken härrör från den radioaktiva isotopen ^{40}K , som förekommer överallt i naturen.

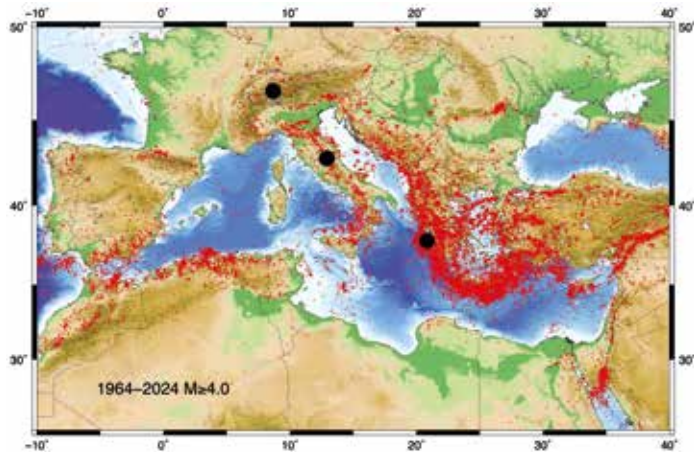
Simuleringarna som visas i bild 2a demonstrerar att gammastrålning från denna isotop reduceras kraftigt genom vattnets avskärmande effekt. Även Comptonspridningen från denna isotop reduceras kraftigt i mätuppställningen, liksom för de mätplatser där sensorn ska utplaceras. Slutsatsen är att vattnets avskärmande effekt ökar metodens känslighet, eftersom i stort sett hela spektrumet kan relateras till ändringar i radonkoncentration. Testet av prototypenheten i SURO bekräftade den uppskattade känsligheten på 1Bq/10 minuter i en volym av en liter vatten. Den mest framträdande toppen vid 609keV tjänar främst som kontroll av detektorns stabilitet och funktion.

Nr.:	Plats	Koord.	Typ	Vattendjup	Min. väggavst.	Datum för placering
1	3- dränering av SW Gran Sasso-tunneln	42,42°N, 13,52°E	bassäng	2 m varierande	0,5 m	30/01/24
2	2- NE Gran Sasso tunneldränering	42,48°N, 13,60°E	tank	0,5 m	0,4 m	31/01/24
3	8- Giardino källan	42,16°N, 13,84°E	källsprång	0,3 m	0,5 m	01/02/24
4	Brunello/Leukas	38,83°N, 20,70°E	brunn	0,5 m	>0,3 m	13/02/24
5	Komilio/Leukas	38,68°N, 20,65°E	brunn	0,5 m	>0,3 m	14/02/24
6	Bedretto	46,30°N, 08,31°E	tank	0,5 m	0,5 m	06/03/24

Tabell 1: *Platser för installation av prototyperna av ArtEmis-sensorn.*

Testmätningar på utvalda platser

Parallellt med sensorutvecklingen genomfördes geologiska, hydrologiska och tektoniska undersökningar för att finna de lämpligaste platserna i Grekland, Italien och Schweiz. Efter att ett flertal platser identifierats, besöktes dessa för att se hur sensorn bäst kunde placeras ut. Besöken omfattade brunnar, källor, gruvor och grottor med tillgång till grundvattnet. Detaljerad information samlades in, liksom tillgången till mobilnät och extern strömförsörjning. Baserat på dessa fältstudier fastställdes de första platserna för testexperimenten. Perioden januari–mars 2024 placerades sex prototyper av sensorerna: tre i regionen Abruzzo i Italien, två på den joniska ön Leukas i Grekland och en vid Bedretto-laboratoriet i Schweiz, se figur 8. En detaljerad beskrivning av platserna som har valts ut framgår av tabell 1.



Figur 8: Svarta punkter markerar ungefärlig position för de första sensorerna. De röda punkterna på kartan visar jordbävningar större än fyra på richtersskalan³ under tiden 1964–2015. Som synes förekommer ett stort antal jordbävningar i Grekland och i Apenninerna i Italien. Den sammanhållna röda bågen som sträcker sig från Grekland över Kreta till Turkiet kallas hellenic arc och är särskilt aktiv. Flera plattor möts i detta område, där den afrikanska plattan trycks under den eurasiska. I området är det den egeiska plattan som ligger huvudsakligen i havet och driver bort från den eurasiska. Dess norra spets formar de joniska öarna, där ArtEmis kommer att ha ett tätt nät av sensorer (figuren återgiven med tillstånd av: Papadimitriou Eleftheria och Karakostas Vassilis, Aristotelesuniversitetet i Thessaloniki).

Sensorinstallationer

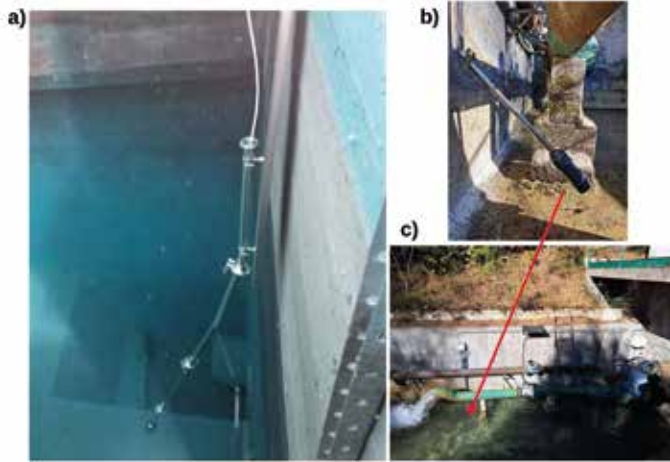
Italien

Tre platser valdes ut för de första testexperimenten, se figur 9. Platserna i Gran Sasso-tunneln är mycket intressanta, då de erbjuder förbindelsen med den stora akvifern i Gran Sasso-bassängen. Där finns också världens största laboratorium för underjordiska experiment inom partikel- och astrofysiken⁴. Den tillgängliga infrastrukturen är således utmärkt för våra mätningar. Källan i Giardino erbjuder en helt annan miljö, med rinnande vatten och förbindelse till en annan förkastningslinje. I figur 10 visas några bilder från installationen medan installationsarbetet syns i figur 11. Som framgår av dessa bilder är sensorn mycket flexibel vad beträffar urval av installationsplats.



Figur 9: *Abruzzoregionen i Italien, där de blå punkterna indikerar några lämpliga platser för sensorinstallation. Sensorenheter placerades ut på plats 2: nordöstra (NE) Gran Sasso tunnelndränring, plats 3: sydvästra (SW) Gran Sasso tunnelndränring, och plats 8: Giardino-källan. Övriga siffror markerar de platser som kommer att användas vid framtida installationer. De röda linjerna markerar förkastningar. Området drabbas av återkommande jordbävningar.*

⁴(se <https://www.lngs.infn.it/en/lngs-overview>)

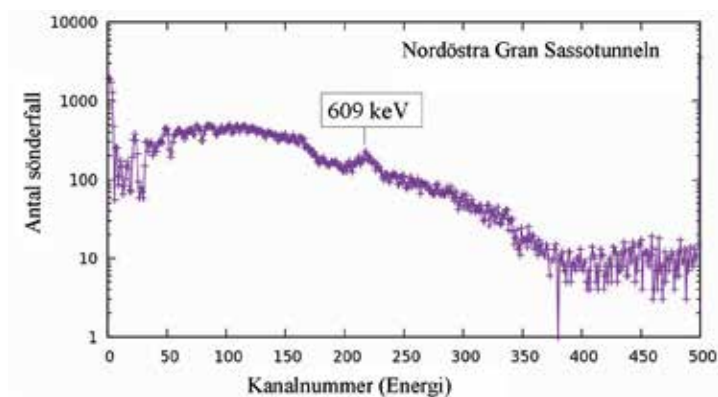


Figur 10: a) Installationen i bassängen i Gran Sasso-tunneln. Installation vid källan i Giardino innan b) och efter c) att vattnet har släppts på. Notera sensorn som placeras antingen i rinnande vatten eller i en bassäng för dricksvatten.

Den första sensorn installerades i tunneln flera hundra meter från sydvästra ingången. Den monterades i en bassäng för dricksvatten, bakom en fem meter hög vägg med en vattennivå på cirka 3,6 meter och sensordjupet var cirka två meter, se figur 10. Den totala bassängbredden var 6 m. Den mekaniska anordningen som höll sensorenheten på plats var en omvänd L-formad stålplatta där nedre änden av röret höll sensorenheten och ledde en ethernetkabel från sensorn till överföringsenheten och sedan till bryggan, se figur 5.

Den andra sensorn installerades i en station som övervakar vattenkvaliteten på den motsatta tunneländan. Sensorn placerades i en vattentank, liknande den som användes vid testmätningarna i SURO. Här finns ett kontinuerligt flöde av grundvatten till tanken, där inloppet på botten och utloppet vid ytan är justerade för att ge en flödes hastighet på 12,5 l/s. Överföringsenheten och bryggan monterades på en vägg i närheten.

Den tredje prototypen placerades i Giardinokällan, där vattnet rinner från källan till en betongbädd som tillhör ett privat vattenföretag, se fig 10. Sensorenheten fästes med hjälp av kabelbindare i nedre änden av ett stålrör. Vattenhöjden var omkring 50 cm

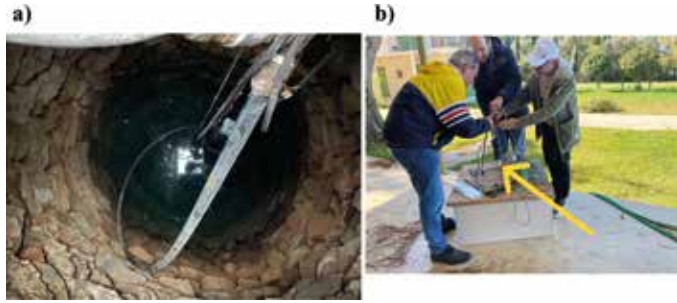


Figur 11: Uppmätt gammaspektrum vid nordöstra (NE) Gran Sassotunneln under installationen. Toppen runt kanal 230 motsvarar 609 keV-övergången som härrör från sönderfallet av ^{214}Bi . Observera att spektrumet inte är energikalibrerat och att x-skalan är icke-linjär. De totala antalet händelser i ett sådant spektrum indikerar radioaktiviteten i miljön och kan studeras som funktion av tid när man undersöker ändringar av radonkoncentration.

och sensorn placerades cirka 25 cm från botten och omkring 50 cm från väggen. Bryggan, nätaggregatet och sändaren placerades i en vattentät låda under en betongbro för bästa skydd. Direkt efter varje installation tas det fram ett gammaspektrum från ArtEmis-sensorn för att verifiera funktion och känslighet, se figur 11. Det tar endast några minuter för att få upp ett sådant spektrum. För att bestämma den totala aktiviteten, summeras alla händelser från cirka kanal 20 till kanal 450. Detta värde används sedan i analysen för att bestämma ändringar av radonkoncentrationen i vattnet. Genom att mäta den totala nivå, till exempel varje minut, bestäms en tidsserie över radonhalten på en given mätplats som sedan ligger till grund för analysen.

Grekland

Två prototypsensorer placerades i varsin brunn på den joniska ön Leukas, på norra (L11- Brunello) respektive västra (L2-Komilio) sidan, se figur 12a. I båda fallen användes ett burliknande ankare av järn med en stång för att fixera sensorenheten med hjälp av en kabelbindare, se figur 12b. Eftersom vattennivån i en brunn kan ändras hängdes buren i en boj som säkerställer att sensorn alltid



Figur 12: Bilder från installationen i Leukas, Grekland. Bilden a) visar en typisk brunn från öarna som grävdes förra eller förr-förra seklet. Sensorn är fäst i ett ankare och placeras hängande i en boj i brunnen, cirka en halv meter under vattenytan. Denna anordning säkerställer att sensorn kan följa med variationer av vattennivån. Figur b) återger montering av sensorn (utmärkt med pil) i ankaret innan den sänks ned i brunnen. Ankaret säkerställer också att sensorn inte ligger an mot en vägg, där den effektiva vattenvolymen skulle vara mindre och därmed minskar mätningens känslighet.

är cirka 50 cm under ytan. Sändarenheten monterades inuti kanten på brunnen. Bryggan är fäst på utsidan nära strömförsörjningen. Platserna visas på kartan i figur 13.

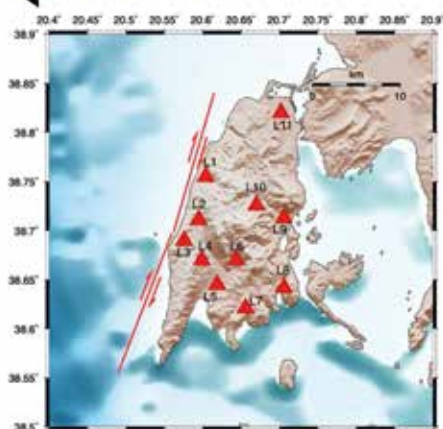
Schweiz

Bedrettolaboratoriet, som är markerat på kartan i figur 14, etablerades 2018 av ETH Zürich för forskning inom geovetenskap och geoenergi. Det ligger inne i Bedrettotunneln, nära Gotthardpasset. Tunneln fungerar som värd för olika experiment, bland annat induceras jordbävningar med låg magnitud genom djupa borrhål i berget.

En 1 m^3 vattentank som fanns tillgänglig användes för att placera ArtEmis sensorn. Det skedde genom montage på ett plaströr. Tanken var placerad framför ett av borrhålen, endast 30 meter från det område där jordbävningarna induceras hydrologiskt (genom en sorts *fracking*). Kabeln från sensorn kopplas till sändarenheten som är fäst med kabelbindare i tankens metallbur. Bryggan är placerad på ett bord i närheten. Installationen liknade den som gjordes i Gran Sasso-tunneln.



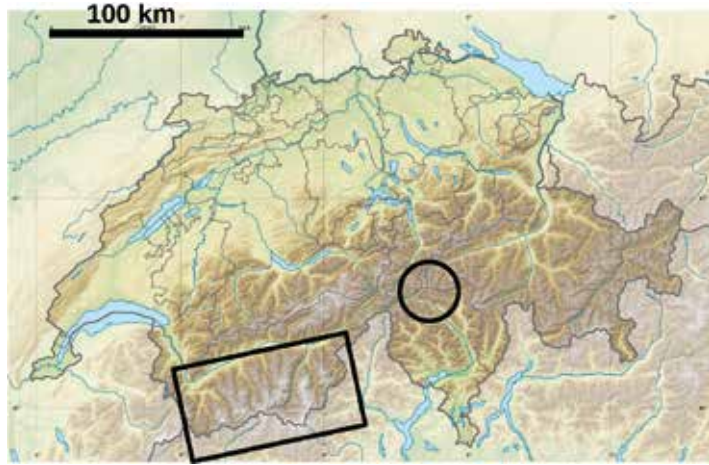
Figur 13: De joniska öarna sträcker sig längs Greklands nordvästra kust. Utklippet visar ön Leukas, där sensorerna har placerats vid de sjärnmärkta platserna, Brunello och Komilio. De röda trianglarna visar lämpliga brunnar för placering av fler sensorer. De röda linjerna visar förkastningslinjerna som löper längs ön. Pilarnas riktning indikerar den rörelse längs vilka förskjutningen sker.



Preliminära Resultat

För att kunna ta fram en tillförlitlig modell för jordbävningssprognoser utifrån ändringar i uppmätt radioaktivitet och andra storheter utvecklar och testar ArtEmis-projektet en uppsättning algoritmer (artificiell intelligens) som ska kunna finna samband mellan ändringar i mätdata och förestående jordbävningar. Det finns ett antal modeller och samband som relaterar spänningen längs tektoniska plattor till ökad koncentration av radon, men det är svårt att bedöma huruvida dessa har blivit verifierade i oberoende experiment. Ett generellt samband som verkar rimligt och kommer att användas i analysen är att signalstyrkan för en händelse avtar med jordbävningens magnitud, se beskrivningen i tidigare avsnitt. Det innebär att en större jordbävning ska kunna ge en signal på en större radie mätt från epicentret än en mindre jordbävning. Sambandet har tagits fram av ett flertal grupper under åren, och endast koefficienterna skiljer mellan olika publikationer.

Radioaktivt sönderfall varierar slumpmässigt och följer en Poissonfördelning. Medelvärdet i fördelningen är proportionellt mot radonhalten i vattnet. I ett första steg vid en analys av mätdata ska därför den underliggande fördelningen bestämmas, vilket ger



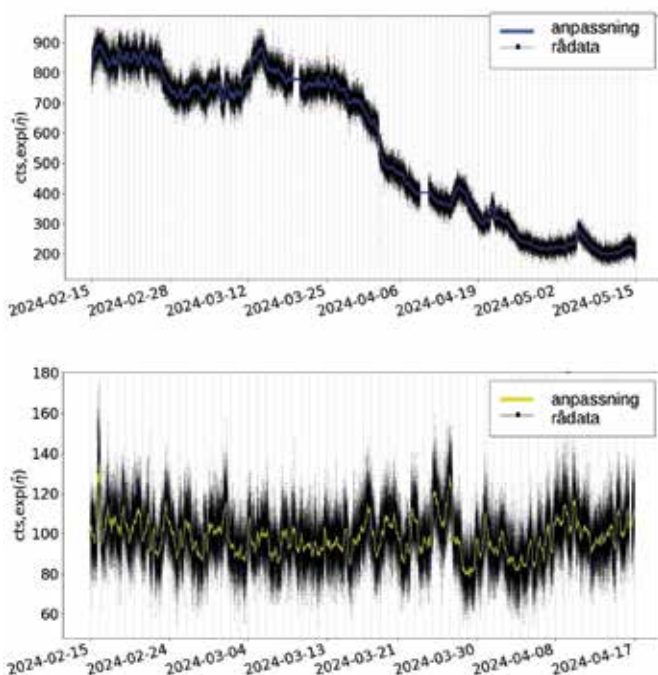
Figur 14: Cirkeln visar var Bedrettotunneln ligger, nära St. Gotthardpasset. Det rektangulära området omsluter kantonen Valais, som är den som drabbas av mindre jordbävningar och som är intressant för ArtEmisprojektet.

mer information än rådata. För att kunna anpassa mätvärden, interpoleras dessa enligt en lämplig modell. Den tillåter framtagning av en dold distribution som motsvarar den över tid varierande radonkoncentrationen i vattnet.

Modellen implementeras och tränas på mätvärden registrerade av gammadetektorerna. Våra första studier indikerar att modellen kan tillämpas väl på våra data. De verkliga förändringarna i radonnivåerna förväntas vara mer synliga från den härledda underliggande fördelningen än från rådata. Figur 15 visar den anpassade fördelningen för sensorn i Gran Sasso-tunneln, Italien och för Brunellobrunnen på Leukas, Grekland, samt underliggande data.

Om man tar Grekland som exempel, jämförs ArtEmis mätdata med seismiska data som samlas in av 142 seismiska observatorier i *Hellenic Unified Seismological Network* i Grekland. Trots att det förekom jordbävningar under perioden av de första mätningarna, är datamängden för begränsad och tiden för kort för att redan kunna utvärdera en algoritm.

Utöver radonkoncentrationen ger sensorerna ett antal andra dataparametrar, bland annat vattentemperatur, tryck och acceleration. I framtida analyser av mätdata så kommer andra variabler kunna ingå vilka skulle kunna påverka radonkoncentrationen,



Figur 15: Tidsserie av radonmätningar i Grekland (Brunello) och Italien (Gran Sasso SW). Den blå, resp. gula linjen kännetecknar anpassningen och de svarta punkterna är rådata. Underliggande distribution har genererats med hjälp av en Poisson Gaussian Random Walk-modell. Provtagnings tiden för varje mätpunkt är 10 minuter.

som till exempel regnmängd. När mätningarna kan göras över en längre tidsperiod, med många fler datapunkter, är förhoppningen att modellen ska utvecklas för analyser och prognoser för framtida jordbävningar.

Framtidsutsikter

Eftersom jordbävningar med högre magnitud är sällsynta, och man behöver stora mängder data för att träna AI-verktygen, är det viktigt att fortsätta mätningarna efter det att ArtEmis-projektet avslutats. Mätningarna i Kobe, liksom andra mätningar, visar att hydrologiska förhållanden kan skilja sig avsevärt även på platser som är endast några tiotal meter ifrån varandra. Det är således viktigt att kunna utöka antalet mätplatser, liksom den geografiska täckningen. Med tanke på risken för nära förestående stora jordbävningar

skulle det vara viktigt att kunna inkludera Turkiet och flera andra länder i Balkan till ArtEmis-systemet. En vidare global täckning är den som eftersträvas i slutändan — ett system som kan täcka flertal intressanta vikinnszoner. Då kommer forskningen kunna ge svar på många frågeställningar om rörelser i de djupa lagren och ge förutsättningar att kunna gå från prognoser till förutsägelser. *Författarna tackar sina medarbetare i ArtEmis projektet, som på olika sätt har bidragit till tillkomsten av denna artikel.*



Vidare läsning

- Baskaran, M. (2016). *Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies*. Springer.
- De Luca, G., Di Carlo, G. & Tallini, M. (2018). A record of changes in the Gran Sasso groundwater before, during and after the 2016 Amatrice earthquake, central Italy. *Scientific Reports*, 8, 15982.
- European Commission (2020). *European Atlas of Natural Radiation*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116795>.
- Morales-Simfors, N., Wyss, R.A. & Bundschuh, J. (2019). Recent progress in radon-based monitoring as seismic and volcanic precursor: A critical review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 50, 979.
- Kourouklas, C., Console, R., Papadimitriou, E., Karakostas, V. & Murru, M. (2023). Large Earthquakes Recurrence Time in the Kefalonia Transform Fault Zone (KTFZ), Greece: Results from a physics-based simulator approach, *Ann. Geophys.*, 66, 5.
- Stoulos, S., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Kourouklas, Ch., Atac-Nyberg, A., Wyss, R., Bäck, T., Tallini, M. & G. DeLuca (2024). Radon signals in soil gas associated with earthquake occurrence in Greece: review and perspective. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*
- Toutain, J.-P. & Baubron, J.C. (1999). Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 304, 1–27.