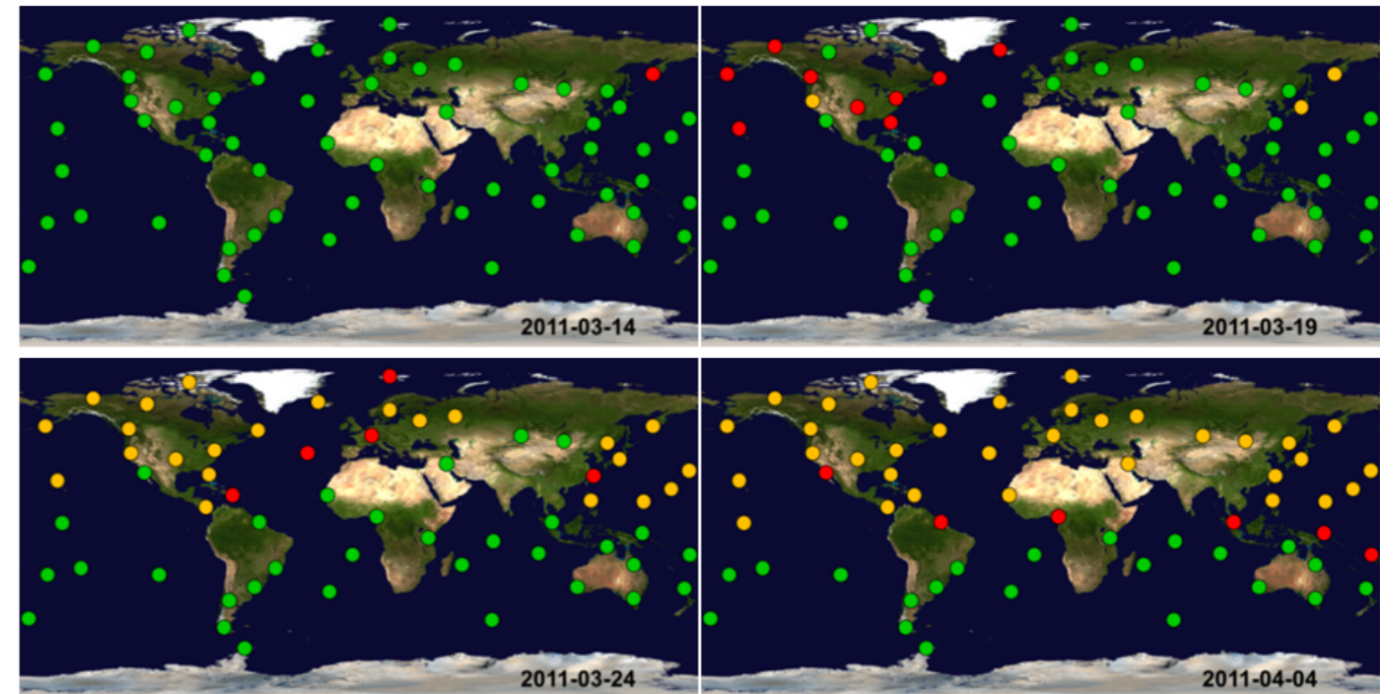


SÖDERSTRÖM C, KASTLANDER J, MEISTER M, TOOLOUTALAI N, BAN S, BERGKVIST N-O,
DE GEER L-E, DURING C, ELMGREN K, FRITIOFF T, RAMEBÄCK H, TOVEDAL A



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

Söderström C, Kastlander J, Meister M, Tooloutalaie N,
Ban S, Bergkvist N-O, De Geer L-E, During C, Elmgren
K, Fritioff T, Ramebäck H, Tovedal A

Radioaktiva utsläpp från kärnkraftsolyckan i Fukushima Daiichi

Radionuklider detekterade i Sverige och globalt

Titel	Radioaktiva utsläpp från kärnkraftsolyckan i Fukushima Daiichi.
Title	Radioactive emissions from the nuclear accident at Fukushima Daiichi.
Rapportnr/Report no	FOI-R--3458--SE
Månad/Month	Juli/July
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	47 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	SSM
FoT område	
Projektnr/Project no	E28136
Godkänd av/Approved by	Torgny Carlsson
Ansvarig avdelning	Försvars- och säkerhetssystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Denna rapport presenterar en sammanfattning av de detektioner som skedde inom det internationella nätverket av övervakningssystem, IMS (International Monitoring System) som drivs av organisationen för det fullständiga provstoppsavtalet (CTBTO), i samband med kärnkraftsolyckan i Fukushima Daiichi den 11 mars 2011. I huvudsak berörs endast mätningar utanför Japan. I rapporten presenteras också detektioner inom det svenska nätverket för mätning av radioaktivitet i luft.

Resultat från mätningarna visar en initial östlig spridning av radioaktiviteten över Stilla havet, till den nordamerikanska kontinenten och vidare över Atlanten, Europa och Asien. Senare utsläpp från reaktorerna tog en sydligare bana över Stilla havet. Efter ca tre veckor var aktiviteten av xenon jämnt spridd över hela det norra halvklotet och avtog sedan med den fysikaliska halveringstiden. Koncentrationen av partikulärt bunden radioaktivitet avtog snabbare än den fysikaliska halveringstiden, beroende på deposition av partiklarna. Detektionerna av partikulär radioaktivitet dominerades av radioaktivt jod. Genom de mätningar av gasformigt jod som gjordes bl.a. i Sverige kunde påvisas att det partikulära jodet endast uppgick till ca 25% av totalt jod. Förutom jod uppmättes även partikulärt tellur samt cesium, aktivitetskoncentrationerna av dessa var dock lägre.

Radioaktiviteten från reaktorerna nådde Sverige ca 10 dagar efter olyckan och den uppmätta aktiviteten dominerades helt av ^{131}I . De maximala koncentrationer av ^{131}I uppmättes i landet under perioden 28 mars – 2 april. I mitten av maj hade koncentrationerna sjunkit under detekterbar nivå. De uppmätta koncentrationerna och deposition i Sverige låg på enbart en bråkdel av vad som uppmättes i Sverige efter Tjernobylolyckan 1986 och olyckan i Fukushima kommer sålunda inte att ge några långtgående konsekvenser i Sverige.

Nyckelord:

Fukushima, radioaktiva utsläpp, global spridning, ^{133}Xe , ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs

Summary

This report presents a short summary of detections within the international monitoring system (IMS) operated by the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) after the nuclear accident at the nuclear power plant in Fukushima Daiichi, Japan on 11 March, 2011. The analysis presented in this report mainly covers measurements outside of Japan. Detections within the Swedish national network for particulate radioactivity in ground level air are also presented.

The measurements indicate an initial eastbound spread of radioactivity from Fukushima, over the Pacific Ocean to North America and then passing the Atlantic Ocean to Europe and Asia. Later releases passed on a more southward route over the Pacific Ocean. About three weeks after the accident radioactive xenon was homogeneously spread over the northern hemisphere, and the activity concentration decreased with the rate of the physical half-life. The particulate radioactivity in the atmosphere decreased faster than the physical half-life of the radionuclides due to deposition. The particulate radioactivity from the accident was dominated by radioactive iodine. The results of the gaseous iodine measurements in Sweden indicate that the particulate fraction of the total iodine was only about 25 %. Apart from iodine, cesium and tellurium were also detected, however at lower activity concentrations.

The activity reached Sweden about 10 days after the accident and measured radioactivity was dominated by ^{131}I . Maximum concentration levels in Sweden were measured during 28 March – 2 April and the concentrations of ^{131}I were below detection limits in the middle of May. In Sweden, measured radioactivity concentrations in air and deposition were only a fraction of measured activity levels after the Chernobyl accident in 1986. The accident at Fukushima will therefore not give any long term consequences in Sweden.

Keywords: Fukushima, radioactive release, global spread, ^{133}Xe , ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
2	Bakgrund	3
2.1	Jordskalvet och efterföljande tsunami	3
2.2	Haveri som följd av kylmedelsförlust.....	4
2.3	Tsunamin och de efterföljande händelserna vid Fukushima Daiichi	6
3	Global spridning och detektioner inom IMS nätverket	9
3.1	Radionuklidstationer i det globala nätverket	9
3.2	Detektioner vid IMS-stationen i Takasaki, Japan.....	10
3.3	Global spridning av utsläppet från Fukushima.....	11
4	Detekterade radionuklider inom IMS-nätverket	14
4.1	Detekterade xenonisotoper	15
4.2	Detekterade jodisotoper	16
4.3	Detekterade tellurisotoper	17
4.4	Detekterade cesiumisotoper	18
4.5	Övriga detekterade nuklider.....	18
4.6	Sammanställning av maximala aktivitetskoncentrationer detekterade i IMS-nätverket.....	19
5	Det nationella nätverket i Sverige	20
5.1	Insamling och analys	20
5.2	Mätprocedur i samband med Fukushimaolyckan	20
5.3	Rapportering	21
6	Resultat av nationella mätningar i Sverige	22
6.1	Detektion av partikulärt och gasformigt jod i luft.....	22
6.2	Detekterade tellurisotoper i luft	23
6.3	Detekterade cesiumisotoper i luft.....	23
6.4	Sammanställning av maximala luftkoncentrationer i det svenska nätverket	24
6.5	Detekterade nuklider i nederbörd.....	26
7	Diskussion	28
7.1	Global spridning och meteorologiska modeller.....	28
7.2	Detekterade radionuklider i förhållande till reaktorinventarier	29

7.3	Jämförelse av olyckorna i Tjernobyl och Fukushima	30
7.4	Mätsystemen och begränsningar	32
7.5	Slutsatser	34
8	Referenser	36
	Bilaga 1. Reaktordata för Fukushima Daiichi.	38
	Bilaga 2. Data för väsentliga radionuklider.	39
	Bilaga 3. Radionuklidstationer inom IMS.	40

1 Inledning

Den 9 mars 2011 inträffade ett relativt kraftigt jordskalv (magnitud 7,2 på Richterskalan¹) under havssockeln elva mil öster om den japanska huvudön Honshu. Två dygn senare, den 11 mars kl. 05:46 UTC², inträffade ett ännu större skalv under havssockeln lite närmare, 7 mil öster om Honshu och ca 13 mil utanför staden Sendai på nordöstra Honshu. Styrkan på jordbävningen har bestämts till magnitud 9,0 och är en av de kraftigaste i modern tid. På grund av jordbävningens styrka och läge samt dess vertikala dislokation genererades ett flertal tsunamivågor som främst drabbade den japanska östkusten. Den sammanlagda effekten av jordbävningen och i högsta grad tsunamivågorna innebar förödande konsekvenser för människor och infrastruktur i det drabbade området, inklusive kärnkraftverket i Fukushima Daiichi.

Vid kärnkraftverket i Fukushima Daiichi slog tsunamivågorna över skyddsvallarna och slog ut yttre kraftnät samt reservkraft vid verket. Kylningen till reaktorerna kunde inte upprätthållas vilket ledde till haveri vid tre av de sex reaktorerna. Under loppet av några dagar efter jordskalvet försämrades läget vid kärnkraftverket kraftigt vilket resulterade i stora utsläpp av radioaktiva ämnen. Det tog drygt två veckor innan situationen stabiliserades. Olyckan har i Japan fått stora konsekvenser med bland annat kontaminering av landområden, speciellt i ett område nordväst om verket. Förutom de omedelbara konsekvenserna i närliggande områden fick haverierna även global uppmärksamhet då utsläppen kunde följas och mätas över stora delar av världen, främst på det norra halvklotet. De mängder som spreds ut över den befolkade världen utanför Japan var dock så pass små att de inte kommer att medföra några hälsoeffekter globalt.

För att verifiera efterlevnaden av det internationella kärnvapenprovstoppavtalet (CTBT) när det har trätt i kraft finns ett nätverk av mätsystem (*International Monitoring System*, IMS). Nätverket omfattar stationer för mätning av seismo-, infraljud-, hydroakustik- och radionuklidsignaturer. Systemet är under uppbyggnad och kommer att omfatta totalt 321 stationer. Idag finns över 270 operativa stationer varav de flesta kontinuerligt mäter och skickar data till det Internationella Data Centret (IDC) vid CTBTO³ i Wien, där data analyseras och görs tillgängliga för de stater som anslutit sig till avtalet. Analysen innefattar även meteorologiska spridningsberäkningar med hjälp av atmosfäriska transportmodeller. FOI driver i Sverige ett nationellt datacenter (NDC) som hanterar mätdata från IMS-nätverket och gör kompletterande analyser av data och händelser på uppdrag av Utrikesdepartementet. Vidare driver FOI de två svenska stationer som ingår i IMS, en seismisk station i Hagfors, Värmland, och en radionuklidstation i Stockholm för partikelbunden aktivitet samt för ädelgasen xenon. FOI har också möjlighet att göra egna meteorologiska spridningsberäkningar.

Genom IMS-systemet fanns härmed möjlighet att följa och analysera jordbävningen och dess efterskalv med hjälp av data från de seismiska stationerna, samt att följa och analysera de radioaktiva utsläppens spridning över världen via data från radionuklidstationerna.

I Sverige finns dessutom ett nationellt nätverk för mätning av radioaktiva ämnen i marknära luft och i nederbörd. Nätverket består av totalt sex stationer spridda över landet och drivs av FOI på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). Huvudsyftet med nätverket är att bidra till en god svensk strålskyddsberedskap för upptäckt och analys av radioaktiva utsläpp. Mätdata från nätverket lagras i NDC:et som fungerar som en samlad plattform för att analysera händelser både nationellt och internationellt. Även i Sverige uppmättes radioaktivitet från olyckan i Fukushima, och för att få en uppfattning om spridningen inom Sverige så utfördes mätningarna med förhöjd tidsupplösning under de

¹ De magnituder, som angetts här, har rapporterats av US Geological Survey.

² UTC – Coordinated Universal Time, alla tidsangivelser i rapporten är i detta tidsformat.

³ Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, <http://www.ctbto.org>.

cirka två månader efter olyckan då radionuklider relaterade till utsläppet i Japan kunde detekteras i landet.

Efter olyckan i Fukushima detekterades både radioaktiva partiklar, främst de lättflyktiga⁴ grundämnena jod (I), tellur (Te) och cesium (Cs), samt gasformigt jod och xenon (Xe). Ämnena återfanns lokalt i Japan och globalt, främst på det norra halvklotet. Även ett flertal andra radionuklider detekterades, främst lokalt i Japan, dock i lägre koncentrationer. Andra ädelgaser, såsom krypton, släpptes också ut vid olyckan men inom IMS-nätverket saknas möjlighet att mäta dessa. Det kan antas att ytterligare radionuklider släpptes ut vid olyckan, men dessa detekterades inte på grund av korta halveringstider eller låg koncentration i reaktorhårdarna.

Denna rapport omfattar en kortfattad beskrivning av händelserna vid kärnkraftverket i Fukushima Daiichi samt en övergripande (men på inget sätt fullständig) presentation och analys av de detektioner som gjorts inom det internationella nätverket. De mätningar som gjordes i Sverige under perioden från olyckan och fram till den 30 juni 2011 presenteras också. Rapporten behandlar inte nedfall, mätningar eller andra radiologiska konsekvenser i Japan (med undantag av ett avsnitt om den internationella mätstationen i Takasaki).

I kapitel 2 redogörs kortfattat för jordskalvet och händelseutvecklingen vid kärnkraftverket Fukushima Daiichi samt ges en generell beskrivning av ett haveriförlopp och de processer som kan leda till utsläpp av radioaktiva ämnen. I kapitel 3 beskrivs det internationella övervakningssystemet som utnyttjades för att följa den globala spridningen av utsläppen. I kapitel 4 följer en genomgång av uppmätta nuklider och koncentrationer av dessa globalt. Kapitel 5 beskriver det svenska nätverket och kapitel 6 resultat från mätningarna inom detsamma. I kapitel 7 diskuteras uppmätta koncentrationer och relationer mellan olika isotoper och nuklider, och en kort jämförelse med olyckan i Tjernobyl 1986 görs. I kapitel 7 diskuteras även de olika mätsystemens känslighet och begränsningar.

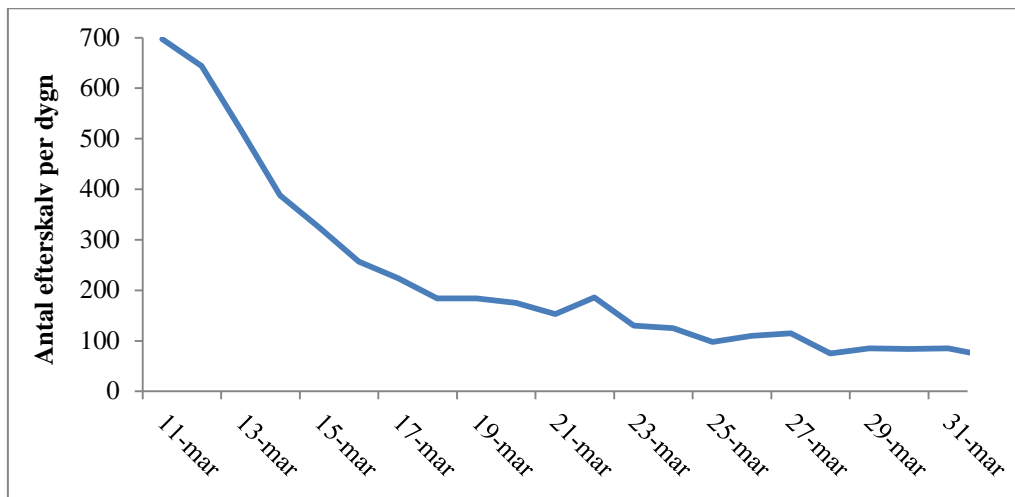
⁴ Här definierat som ett element med kokpunkt under 1000 grader Celsius.

2 Bakgrund

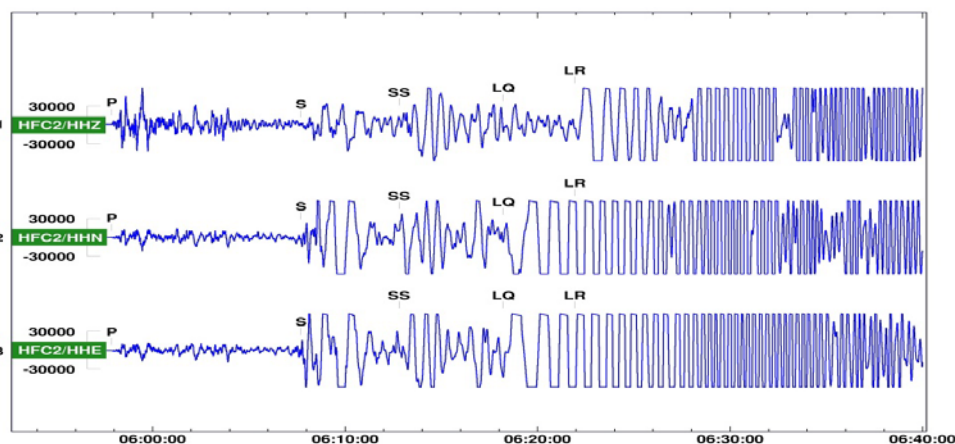
2.1 Jordskalvet och efterföljande tsunami

Den 11 mars 2011 klockan 05:46 UTC (14:46 japansk tid) inträffade den stora Tohoku-oki jordbävningen öster om ön Honshu utanför Japans östkust⁵. Skalvet varade i hela 150 sekunder och uppmättes till magnituden 9,0 på Richterskalan⁶. De extrema vertikala rörelserna vid skalvet skapade ett flertal tsunamivågor som svepte in över den japanska östkusten, den högsta har uppskattats till nästan 40 meter vid Aneyoshi Miyako [1].

Den förödande jordbävningen genererade en hög frekvens av efterskalv, från knappt 700 det första dygnet ned till en tiondel av detta i slutet på mars. Figur 1 visar antalet efterskalv per dygn för perioden 11 - 31 mars, 2011. Fler än 40 av efterskalven var av magnituden 6 och däröver. De två största efterskalven inträffade inom en timme efter huvudskalvet och hade magnituder på 7,9 respektive 7,7.



Figur 1. Antal efterskalv per dygn under perioden 11- 31 mars, 2011. Antalet efterskalv baseras på data från CTBTO:s internationella övervakningssystem (IMS).



Figur 2. Seismologiska registreringar med början kl. 05:57 UTC den 11 mars 2011 vid FOI:s mätstation i Hagfors från huvudskalvet i Japan. Notera att signalen är klippt (överstyrning). P, S och SS markerar seismiska vågor som fortplantat sig genom jordens mantel. LQ och LR betecknar seismiska vågor, som gått längs jordytan.

⁵ Epicentrum låg 38,1° N och 142,9° Ö på 24 km djup, ca 13 mil öster om Sendai.

⁶ Den utlösta spänningenergin i skalvet motsvarar en sprängladdning på ungefär 100 megaton.

De seismiska signalerna från huvudskalvet nådde FOI:s mätstation i Hagfors cirka 10 minuter efter skalvet och var så kraftiga att en del av de seismiska instrumenten blev överstyrda, se Figur 2. Detta indikerar att jordbävningen i Japan orsakade en vertikal markrörelse i Hagfors av flera centimeter.

Vid tidpunkten för skalvet var elva kärnkraftsreaktorer vid fyra olika anläggningar i området i drift (Fukushima Daiichi 1, 2 och 3, Fukushima Daini 1, 2, 3 och 4, Onagawa 1, 2 och 3 och Tokai) och fyra reaktorer var avställda (Fukushima Daiichi 4, 5 och 6 och Higashi Dori), se Figur 3. Skalvet medförde att samtliga reaktorer i drift automatiskt snabbstoppades. Kärnkraftverket i Fukushima Daiichi klarade jordbävningen utan, för anläggningen, allvarliga skador, men den efterföljande tsunamin medförde att den nödvändiga kylningen av reaktorerna helt slogs ut och orsakade haverier med stora utsläpp av radioaktiva ämnen som följd. Händelsen fick mycket stor massmedial uppmärksamhet och det har publicerats en mängd omfattande och detaljerade tekniska rapporter om händelseförloppet vid de drabbade verken i området, se t.ex. Ref [2-5].

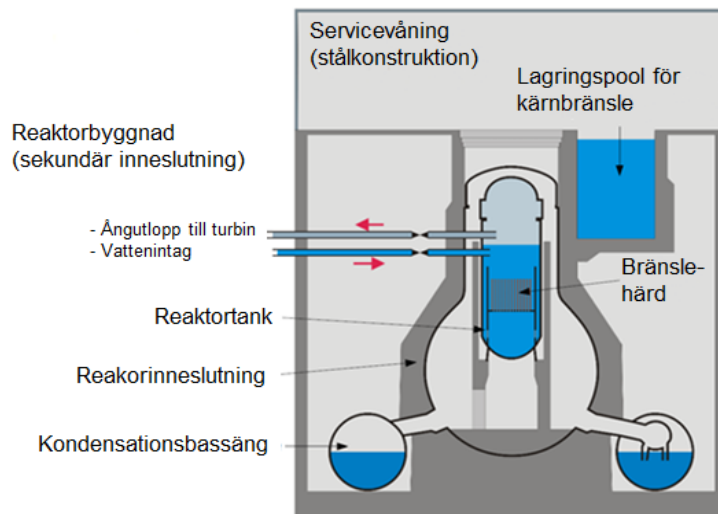


Figur 3. Skalvets epicentrum och de fem kärnkraftverken i området.

2.2 Haveri som följd av kylmedelsförlust

En typisk reaktorhård är uppbyggd av bränslestavar (3-4 meter långa, 2-3 cm i diameter) i vilka bränslekutsar är staplade. Bränslekutsarna består till största del av urandioxid i keramisk form som är mycket svårösliga i vatten. Bränslestavarna omsluts av en kapsling av zircaloy (millimetertjock), huvudsakligen bestående av zirkonium, som håller kvar de bildade fissionsprodukterna och transuranerna i bränslestavarna. Bränslestavarna sammanfogas i sin tur till bränsleelement av vilka det kan finnas flera hundra i hårdens⁷. Bränslehården innesluts i en reaktortank av stål (4-5 m i diameter, ca 15-20 cm väggjocklek) som i sin tur befinner sig i en reaktorinneslutning av metertjock betong, se Figur 4.

⁷ Vid Fukushima Daiichi var antalet bränsleelement i hårdens 400 för enhet 1 och 548 för enhet 2-4, se Bilaga 1 där även andra data för av data för de sex reaktorerna vid verket finns sammanställda.



Figur 4. Schematisk illustration av reaktorerna i Fukushima Daiichi. I reaktor 4 var reaktorhärden tom och bränslet förvarades i lagringspoolen för kärnbränsle.

Efter att en reaktor stängts av eller snabbstoppats och fissionsprocessen upphört fortsätter bränslet att producera värme. Denna kvarvarande värmeutveckling kallas resteffekt och härrör från sönderfallet av de fissionsprodukter och transuraner som bildats under drift. Resteffekten är vid avstängning ca 5-7 % av reaktorns termiska drifteffekt och minskar initialt snabbt men bränslet måste ändå kylas aktivt flera år efter att reaktorn ställts av. Nedan följer en generell beskrivning av ett haveriförlopp, för en reaktortyp liknande den i Fukushima, där den nödvändiga kylningen av bränslet inte kan upprätthållas⁸, samt en beskrivning av de processer som kan leda till ett utsläpp av radioaktiva ämnen.

Härden hålls kyld av ett cirkulerande kylmedel, oftast vatten. Förlust av cirkulation av kylvattnet gör att temperaturen i härden ökar och kylvattnet förångas. Vattennivån i tanken sjunker då snabbt och den bildade vattenången gör att trycket i tanken ökar varför ångan eventuellt måste släppas ut. Vattenången leds till en vattenbassäng i reaktorinneslutningen för att kondenseras, se Figur 4. Om mer vattenånga bildas än vad kondensationsbassängen klarar av att kondensera börjar vattnet i bassängen att koka vilket i sin tur medför att inneslutningens tryck och temperatur ökar. Högt tryck innebär ökad risk för sprickskador på både reaktortank och inneslutning. Trycket i inneslutningen kan avsiktligt minskas genom att släppa ut ånga till atmosfären, så kallad tryckavlastning⁹.

Ifall vattennivån i reaktortanken sjunker så mycket att bränslehärden friläggs stiger temperaturen i härden snabbt. Vid temperaturer mellan ca 800 och 1300 °C kan den skyddande kapslingen till bränslet brista, varvid en stor del av de gasformiga fissionsprodukterna (ädelgaser såsom exempelvis krypton och xenon samt halogener såsom jod) och viss andel av cesium frigörs. Dessa ämnen sprids då i reaktortanken. Vid temperaturer över ca 900 °C kan vätgas bildas genom att zirkoniumlegeringen i bränslekapslingen oxideras¹⁰ vilket medför ytterligare stegrad temperatur och tryckökning. En eventuell tryckavlastning kommer nu att innebära att både fissionsprodukter och vätgas

⁸ Notera att det finns en mängd tänkbara scenarier och haveriförlopp med andra utfall som inte får så allvarliga följder som detta.

⁹ Vid samtliga svenska reaktorer finns möjlighet att göra detta via speciella haverifilteranläggningar som filtrerar bort partikelburna radioaktiva ämnen. Filtrena är konstruerade så att högst 0,1% av inventariet (avser en reaktor på 1800 MWt) förutom ädelgaser tillåts släppas ut. Några sådana haverifilter fanns inte vid Fukushima Daiichi.

¹⁰ Via reaktionen: $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$.

släpps ut tillsammans med vattenånga. En komplikation i sammanhanget är att vätgas kan bilda knallgas när den kommer i kontakt med syret i luften.

Om kylningen fortfarande inte är tillräcklig kommer temperaturen i bränslet att fortsätta öka och risken för partiell smältning blir överhängande. Vid temperaturer mellan ca 1300 och 1900 °C överhettas bränslet på grund av resteffekten och värmeutvecklingen från den fortsatta oxideringen av bränslekapslingen. Frigörelsen av zirkoniumoxid och vätgas kommer att fortgå och fler radioaktiva ämnen (såsom exempelvis alkalimetallen cesium och kalkogenen tellur) frigörs från bränslekapslingarna.

Vid ca 1900 °C smälter zirkoniumkapslingen och bränslet kan börja lösas upp varvid ytterligare radioaktiva ämnen frigörs (alkaliska jordartsmetaller såsom strontium och barium samt lantanider såsom lantan och cerium). Alla ädelgaser samt jod och cesium har frigjorts under en temperatur av 2800 °C som är smältpunkten för urandioxid. Om delar av härden smälter kan den sjunka ner i botten på reaktortanken, och på grund av den höga temperaturen på smältan skulle den kunna smälta igenom tanken. Temperaturen på härds smältan gör att den även skulle kunna smälta igenom reaktorinneslutningen om ingen kylning tillförs.

Som beskrivits ovan finns ett temperaturberoende för när olika ämnen kan frigöras från härden vid ett haveri. Olika radioaktiva ämnen släpps generellt ut vid olika skeenden och genom att detektera och kvantifiera dessa kan en förståelse för händelseutvecklingen fås och ett eventuellt fortsatt olycksförlopp förutsägas. Nuklidsammansättningen kan ge information om bränslets beskaffenhet, när fissionsprocessen i härden avstannade och rådande temperaturförhållanden i härden.

För att få en uppfattning om vilka nuklider som kan frigöras och när, delas de radioaktiva nukliderna ofta in efter flyktighetsbenägenhet; en grov indelning ges i Tabell 1. En sammanställning av aktuella radionuklider ges även i Bilaga 2.

Tabell 1: Flyktighetsbenägenhet för några, ur radiologiskt och spridningshänseende, väsentliga radioaktiva aktinider samt fissions- och aktiveringsprodukter i reaktorhärden. Till viss del omarbetad, från Ref [6].

Ädelgaser	^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , $^{131\text{m}}\text{Xe}$, ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe
Lättflyktiga	^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{86}Rb , ^{88}Rb , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs ^{127}Sb , ^{129}Sb , $^{129\text{m}}\text{Te}$, $^{131\text{m}}\text{Te}$, ^{132}Te
Svårflyktiga	^{58}Co , ^{60}Co , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr , $^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{140}Ba
Mycket svårflyktiga	^{95}Zr , ^{97}Zr , ^{95}Nb , ^{97}Nb , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{143}Ce , ^{144}Ce , ^{143}Pr , ^{144}Pr , ^{147}Pm , ^{147}Nd , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Cm , ^{244}Cm

2.3 Tsunamin och de efterföljande händelserna vid Fukushima Daiichi

Vid kärnkraftverket i Fukushima Daiichi var de högsta tsunamivågorna 10-15 meter höga och slog över skyddsvallarna¹¹. Den ordinarie elförsörjningen från yttre nät slutade fungera och dieselgeneratorerna som skall användas som reservkraft för kylning av härdarna slogs ut. Därmed fungerade inte den nödvändiga kylningen i de tre reaktorerna

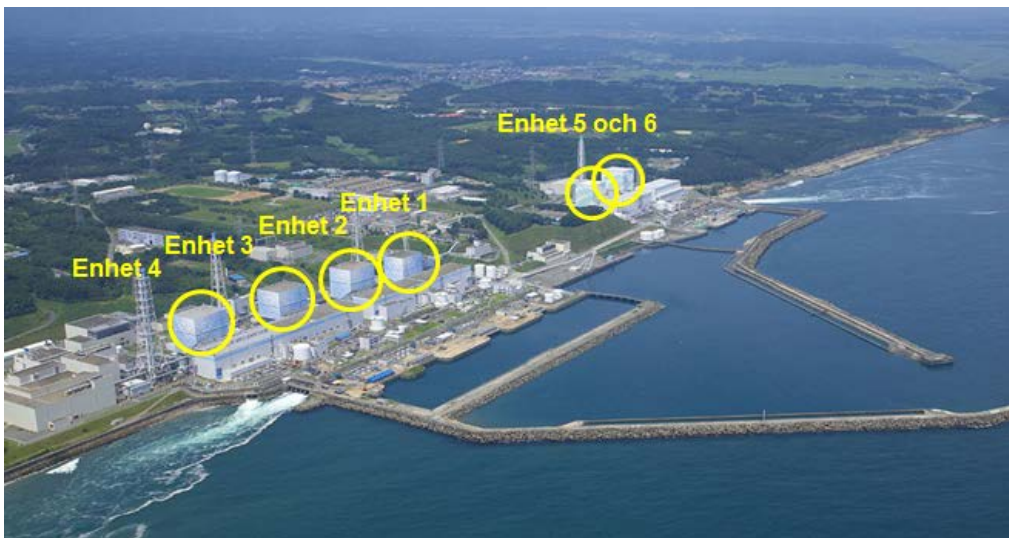
¹¹ Anläggningen var konstruerad för en maximal våghöjd på 5,7 meter. Reaktorerna 1-4 ligger ca 10 meter över havsnivån, reaktorerna 5 och 6 ligger ytterligare några meter högre varför de klarade sig bättre

som automatstoppats vid skalvet och inte heller kylningen till den bränslebassäng där allt bränsle från den avställda reaktor 4 förvarades, se Figur 4 och 5. Reaktorerna 5 och 6 var avställda sedan tidigare, dessa är dessutom belägna på en högre nivå över havsytan varför skadorna på dessa blev mindre och kylning kunde här upprätthållas med hjälp av ett fungerande reservaggregat.

Stora insatser gjordes för att försöka kyla bränslet i de andra reaktorerna, inklusive nyttjande av havsvatten. En mängd komplikationer gjorde emellertid att olycksförloppet blev omfattande, bland annat ventilerades vätgas¹² ut i reaktorbyggnaderna med knallgasexplosioner som följd.

Efter ungefär två veckor återställdes yttre kraftnät på anläggningen och kylningen kunde därefter utföras under mer kontrollerade förhållanden.

Tabell 2 beskriver i grova drag händelseutvecklingen vid anläggningen de första dagarna efter skalvet. Sammanställt från Ref. [3,4,7,8].



Figur 5. Fukushima Daiichi före katastrofen. Foto: Tokyo Electric Power Company (TEPCO).

Det kommer att ta lång tid innan hela händelseförloppet är analyserat och klarlagt i detalj och de fullständiga skadorna på härdar och reaktortankar är ännu okända. Det kan idag dock konstateras att ansevärd mängder av härdarna smält vid samtliga tre reaktorer som var i drift då jordbävningen inträffade, men att bränslet till stor del fortfarande finns kvar i inneslutningarna. Alla reaktorer är nu, drygt ett år efter olyckan, under kontroll, kylvattnet renas och återanvänds och skadorna på bränslebassängen vid reaktor 4 har visat sig vara måttliga. På grund av tryckavlastningarna och de efterföljande knallgasexplosionerna släpptes avsevärda mängder av reaktorernas härdinventarier av ädelgaser, jod, tellur och cesium ut och dessa ämnen spreds upp i atmosfären.

Olyckan har graderats till 7 på den sjugradiga INES-skalan¹³ p.g.a. den stora mängd radioaktiva gaser och partiklar som spreds till omgivningen¹⁴. Bortsett från det primära problemet att hålla härdarna kylda har efterarbetet varit fokuserat på att förhindra

¹² NISA (Nuclear and Industrial Safety Agency, Japans tillsynsmyndighet för kärn- och industrisäkerhet) har uppskattat vätgas-produktionen till mellan 800-1000 kg i respektive enhet.

¹³ IAEA INES "The International Nuclear and radiological Event Scale" <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>.

¹⁴ Generell beskrivning av påverkan på människor och miljö vid INES 7: "Major release of radioactive material with widespread health and environmental effects requiring implementation of planned and extended countermeasures".

spridning av radioaktivt material, partikel- och vätskeburet, till omgivningen, framför allt för att förhindra kontaminerat vatten från att läcka ut i havet från de tre reaktorerna.

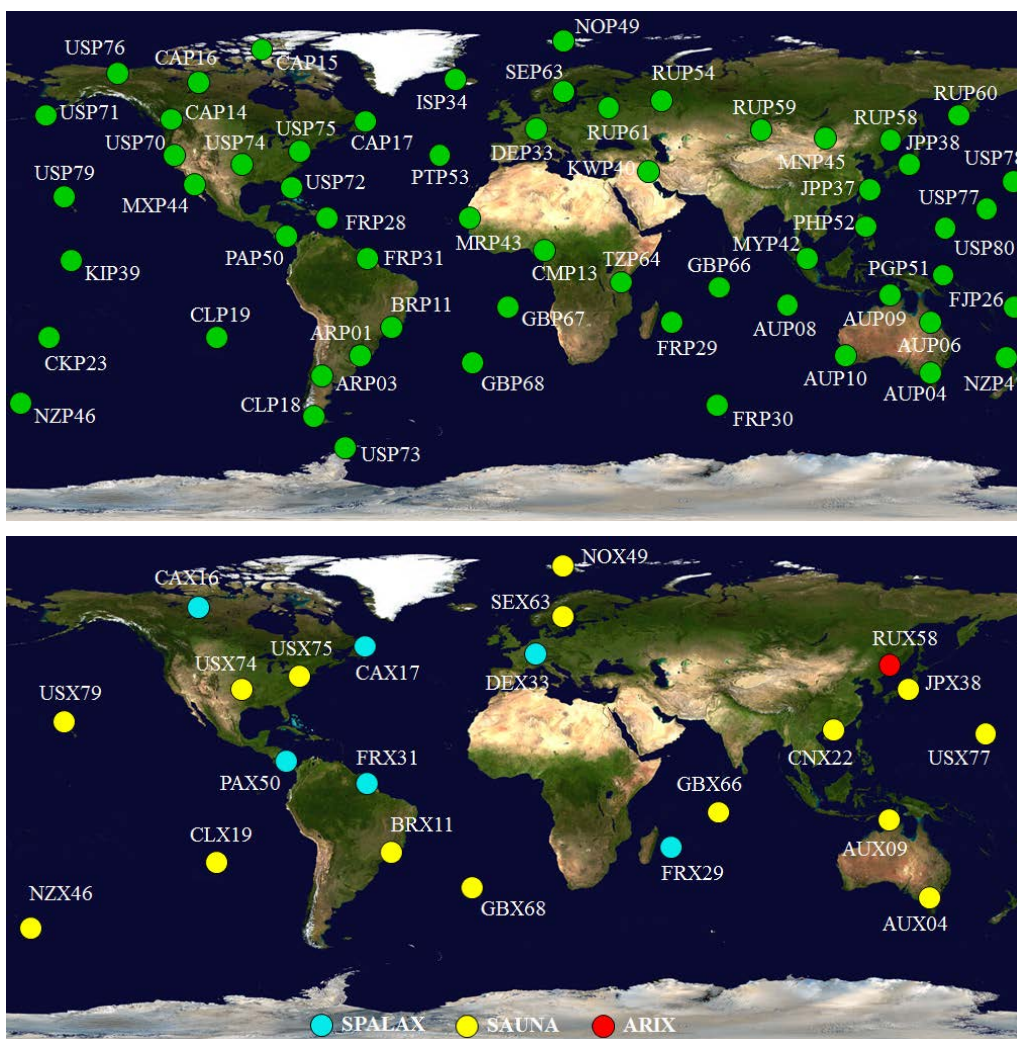
Tabell 2. Kortfattad redogörelse för händelseutvecklingen vid Fukushima Daiichi.

Datum	Ungefärlig tid i UTC	Händelse
2011-03-09	02:45:15	Magnitud 7,3 förskälv ca 15 mil öster om Sendais kustlinje.
2011-03-11	05:46:20	Magnitud 9,0 skalv ca 11 mil öster om Sendais kustlinje.
	05:46:35	Seismiska vågen når Honshus östkust [~ 8 km/s].
	05:47	Reaktorerna snabbstoppar.
	06:00	Tsunami träffar kusten utanför Sendai. Fortgår cirka 30 min.
	06:15	Första tsunamivågen träffar Fukushima Daiichi [~500 km/h]
2011-03-12	06:40	Totalt elbortfall (reaktorer 1-4) .
	08:00	Härden börjar friläggas i reaktor 1 och haverilarm utlyses.
	02:00	Ventilering till andra inneslutning i reaktor 1.
	06:36	Vätgasexplosion reaktor 1. Stora skador på reaktorbyggnaden.
	15:00	Ventilering till andra inneslutning i reaktor 2.
2011-03-14	17:30	Härden börjar friläggas i reaktor 3.
	24:00	Ventilering till andra inneslutning i reaktor 3.
	02:00	Vätgasexplosion reaktor 3. Stora skador på reaktorbyggnaden.
	08:00	Härden börjar friläggas i reaktor 2.
2011-03-15	21:00	Explosion reaktor 2 (oklart om denna var vätgasrelaterad). Stora skador på reaktorbyggnaden.
	21:00	Explosion vid bränslebassäng vid reaktor 4.
	00:40	Brand reaktor 4 bränslebassäng.
	03:00	Brand reaktor 4 bränslebassäng släckt.

3 Global spridning och detektioner inom IMS nätverket

3.1 Radionuklidstationer i det globala nätverket

Övervakningssystemet för radioaktivitet i luft för det internationella monitoreringssystemet (IMS) inom CTBT ska enligt avtalet bestå av 80 stationer för mätning av partikulär radioaktivitet och 40 stationer för mätning av radioaktivt xenon. Vid tiden för olyckan i Japan var 59 partikelstationer samt 22 stationer med möjlighet att detektera radioaktivt xenon operativa inom nätverket, se Figur 6. De två stationstyperna är samlokaliserade, en fullständig lista över alla stationer finns i avtalet¹⁵, i Bilaga 3 listas de stationer från vilka data används i denna rapport med dess beteckning, position och landtillhörighet.



Figur 6. Karta över aktiva stationer inom det globala nätverket vid olyckstillfället, överst partikelstationer och nederst xenonstationer. SPALAX, SAUNA och ARIX är beteckningarna på de fransk-, svensk- respektive ryskbyggda mätsystemen för detektion av radioaktivt xenon. (Bakgrundsbilden är från NASA, <http://visibleearth.nasa.gov>)

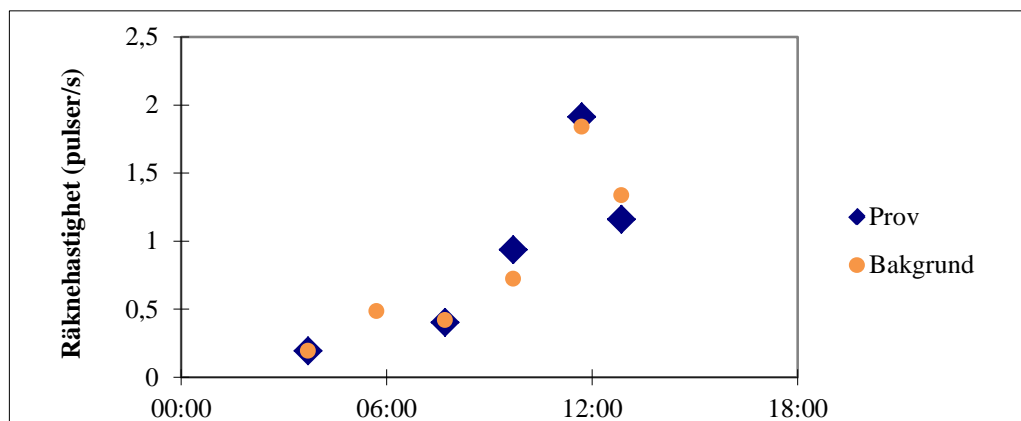
¹⁵ Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization, <http://www.ctbto.org>.

Inom nätverket finns ett antal olika typer av stationer för detektion av partikulär radioaktivitet, manuella såväl som automatiska. Generellt filtreras luft genom ett filter under 24 timmar ($>500 \text{ m}^3/\text{timme}$), varefter det vilar 24 timmar och mäts därefter med hjälp av högupplösande gammaspektroskopi under 24 timmar. Tillvägagångssättet medför att det tar 3 dygn från insamlingens start till ett slutligt mätresultat. När en mätning av ett filter startats skickas dock preliminära data varannan timme och vid mätningens slut skickas sedan fullständiga data till det internationella datacentret (IDC). Mätresultatet analyseras automatiskt vid IDC och en analysrapport skapas, analysen granskas av radionuklidanalytiker vid CTBTO och en reviderad resultatrapport skapas. Båda rapporterna samt obearbetade mätdata görs tillgängliga för medlemsstaterna via deras respektive NDC:er.

Mätstationerna för gasformigt radioaktivt xenon är automatiska och insamlings- och mättiden är 12 eller 24 timmar beroende på systemtyp. Totalt samlas $15\text{-}30 \text{ m}^3$ luft in och innan mätning kan utföras måste provet koncentreras under ca 6-7 timmar. Fördröjningen mellan start av insamling och mätresultat blir därför något kortare för dessa system än för partikelsystemen. Analysproceduren för xenondata är fortfarande under uppbyggnad vid IDC och vid tidpunkten för olyckan distribuerades därför endast obearbetade mätdata till medlemsländerna. I denna rapport presenteras enbart resultat från mätstationer med SAUNA-system¹⁶, se Figur 6.

3.2 Detektioner vid IMS-stationen i Takasaki, Japan

Den 15 mars skedde den första detektionen vid IMS-stationen i Takasaki, Japan¹⁷, 215 km sydväst om de havererade reaktorerna vid Fukushima. Analys av preliminära data från stationen visade en kraftig ökning av räknehastigheten både vid partikelstationen och vid xenonstationen. Detta måste tolkas som att den uppmätta aktiviteten mycket litet eller inte alls härrörde från det insamlade provet utan från aktivitet i luften runt detektorn som ökade under mätningens gång. Figur 7 visar hur räknehastigheten för xenonsystemet ökade under mättiden. För partikelstationen uppmättes liknande fenomen, här kunde förekomst av ett antal olika nuklider, främst jod- och cesiumisotoper påvisas. Meteorologiska spridningsberäkningar visade en nordöstlig vindriktning för perioden och att aktiviteten sålunda kom från Fukushima. Den ordinarie provmätningen som följde visade kraftigt förhöjda koncentrationer av ett flertal nuklider, på nivåer 10 000 gånger över vad som tidigare uppmätts inom IMS-nätverket.



Figur 7. Räknehastigheten för de två detektorerna i xenonsystemet vid stationen i Takasaki under den 15 mars, 2011. Den ena detektorn mäter ett prov och den andra mäter bakgrund. Räknehastigheten ökar kraftigt trots att ingen ny aktivitet tillförts provet.

¹⁶ SAUNA – Swedish Automatic Unit for Noble gas Acquisition.

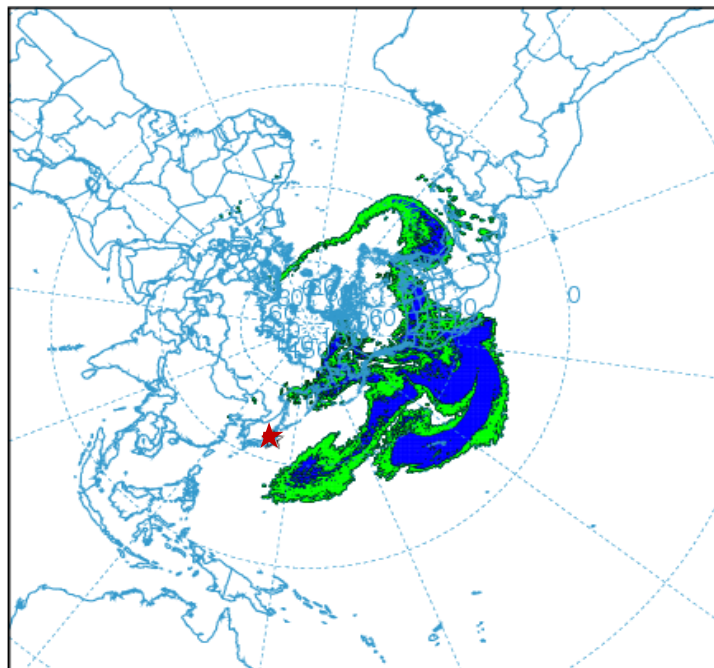
¹⁷ Stationsbeteckning JPP38 och JPX38 (Lat: 36,3°N Long: 139,0°Ö) i Figur 6.

Efter olyckan detekterades vid denna station ytterligare ett flertal typiska radionuklider¹⁸; främst ädelgasisotoperna $^{131m,133}\text{Xe}$ samt de partikelbunda nukliderna $^{134,136,137}\text{Cs}$, $^{131,133}\text{I}$ och $^{129m,132}\text{Te}$. Lägre koncentrationer av ^{110m}Ag , ^{140}La , ^{140}Ba , ^{95}Nb och ^{99}Mo detekterades också.

Höga luftkoncentrationer de första dagarna och ett förhållandevis stort nedfall i regionen gjorde att uppmätta koncentrationer i Takasaki kraftigt översteg koncentrationerna i övriga världen under hela den rapporterade perioden. På grund av de höga luftkoncentrationerna de första dagarna blev båda stationerna kontaminerade vilket ledde till en hel del mättekniska svårigheter. Stationerna hade initialt även tekniska problem då strömförsörjningen var osäker på grund av generellt stora problem med strömförsörjningen i landet. Sammanfattningsvis gör detta att det är svårt att göra noggranna bestämningar av koncentrationerna vid denna station och data därifrån är därför exkluderade från denna rapport¹⁹.

3.3 Global spridning av utsläppet från Fukushima

FOI gjorde tidigt spridningsberäkningar med programvaran HYSPLIT²⁰ för ett förmodat utsläpp från reaktorerna. Figur 8 visar spridningen över norra halvklotet den 21 mars efter ett beräknat utsläpp under den 15 mars. Beräkningen stämmer väl med de spridningsberäkningar som utfördes av SMHI vid samma tillfälle.



Figur 8. Initiala spridningsberäkningar för ett utsläpp från Fukushima Daiichi (markerad med en stjärna) under de första dagarna efter olyckan. Bilden visar spridningen den 21 mars, 2011 efter utsläpp den 15 mars och visar norra halvklotet med nordpolen i centrum. Beräkningen är gjord med programmet HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

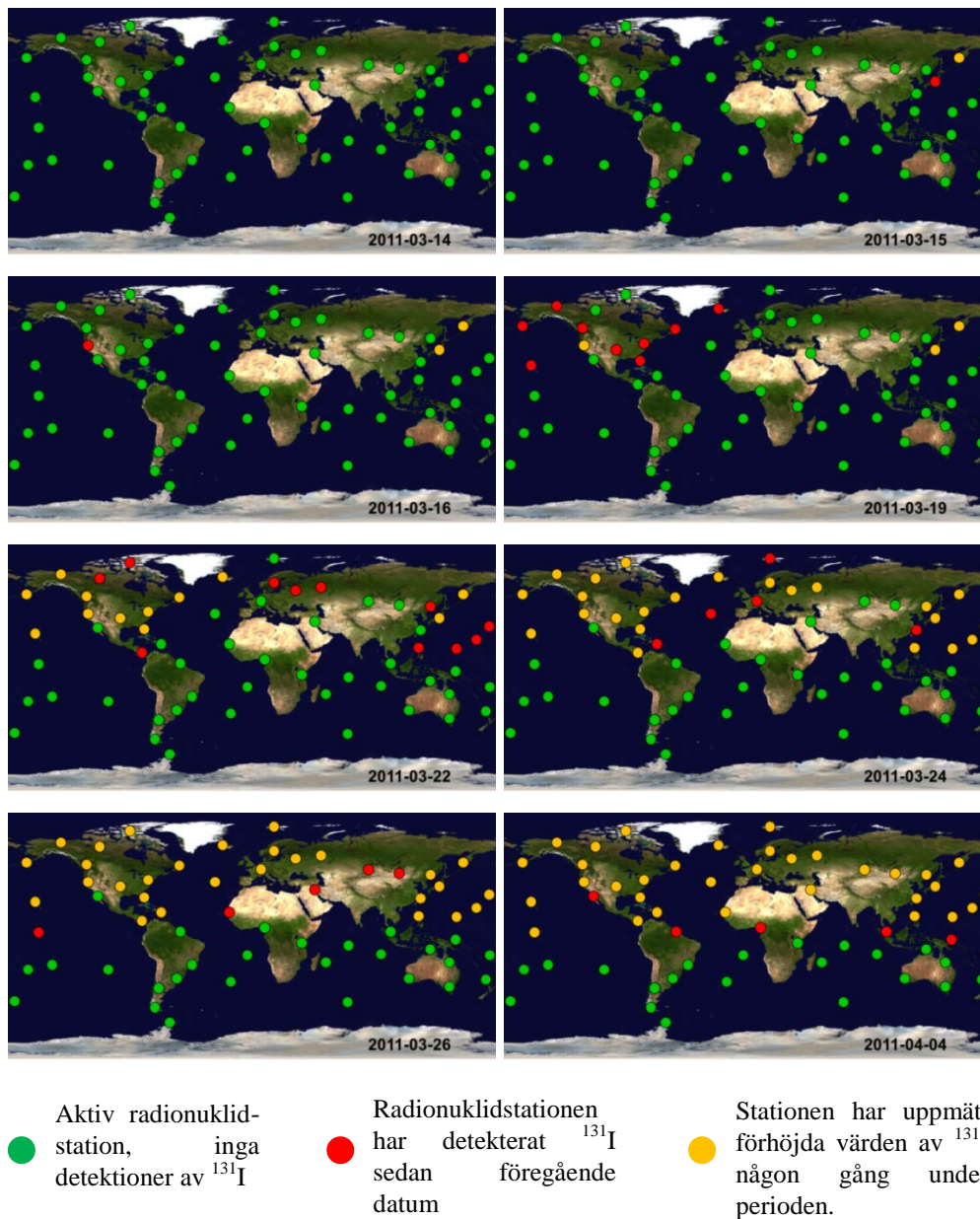
¹⁸ I denna rapport presenteras enbart nuklider vilkas halveringstider är tillräckligt långa för att nukliderna kan härröra från olyckan i Fukushima. Detta innebär att enbart detektioner av livslängdsrelevanta modernuklider rapporteras och inte dess dotternuklider, som i detta sammanhang enbart utgör sönderfallsprodukter och har producerats genom radioaktivt sönderfall efter att modernukliderna har släppts ut från de skadade reaktorerna. T.ex. rapporteras enbart ^{99}Mo , ^{129m}Te och ^{132}Te och inte dotternukliderna ^{99m}Tc , ^{129}Te samt ^{132}I .

¹⁹ CTBTO:s IDC har dock i sin analys av mätdata från IMS nätverket valt att inkludera Takasakistationen, se Ref. [9].

²⁰ HYSPLIT - Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, från <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

Under de första dagarna efter olyckan råde till största del väst- till sydvästliga vindar över Fukushima. Detta ledde till att utsläppet från reaktorerna transporterades österut över Stilla havet och endast de närliggande områdena runt kärnkraftverket drabbades av nedfall de första dagarna. Förhöjda koncentrationer av radioaktiva partiklar i IMS-nätverket detekterades först tre dagar efter jordbävningen på Kamchatka-halvön, Ryssland (drygt 2000 km nordost om Japan), se Figur 9. Detta följdes av de tidigare nämnda detektionerna i Takasaki, Japan. Den 16 mars, fem dagar efter jordbävningen, detekterades förhöjda koncentrationer av radionuklider på västkusten av den nordamerikanska kontinenten i Sacramento, USA och dagen därpå i Sidney, Kanada, samt Sand Point, Alaska. Både radioaktiva partiklar, främst i form av radioaktivt jod, samt gasformigt radioaktivt xenon detekterades på hela den nordamerikanska kontinenten inom ytterligare något dygn. En dryg vecka efter jordbävningen, den 19 mars, detekterades radioaktivt jod vid stationen på Island tätt följd av detektioner i övriga Europa och i Ryssland dagarna efter. Första detektionen av radioaktivt xenon i Europa skedde i Stockholm den 22 mars, följt av en detektion på Svalbard den 23 mars. Efter cirka två veckor hade aktiviteten färdats runt norra halvklotet och nådde åter Japan.

Under den 20-22 mars vände vindriktningen från Fukushima något och fortsatta utsläpp från reaktorerna tog en sydligare bana över Stilla havet och aktivitet detekterades bland annat på Wakeöarna, Filippinerna, Okinawa i södra Japan och även i Guangzhou i sydöstra Kina. Cirka tre veckor efter olyckan var aktiviteten från Fukushima spridd över hela norra halvklotet. Luftutbytet mellan norra och södra halvklotet är normalt mycket litet, men i början av april detekterades även små mängder radioaktiva ämnen från olyckan vid några mätstationer på det södra halvklotet, bl.a. i Nadi, Fiji, och Darwin, Australien.

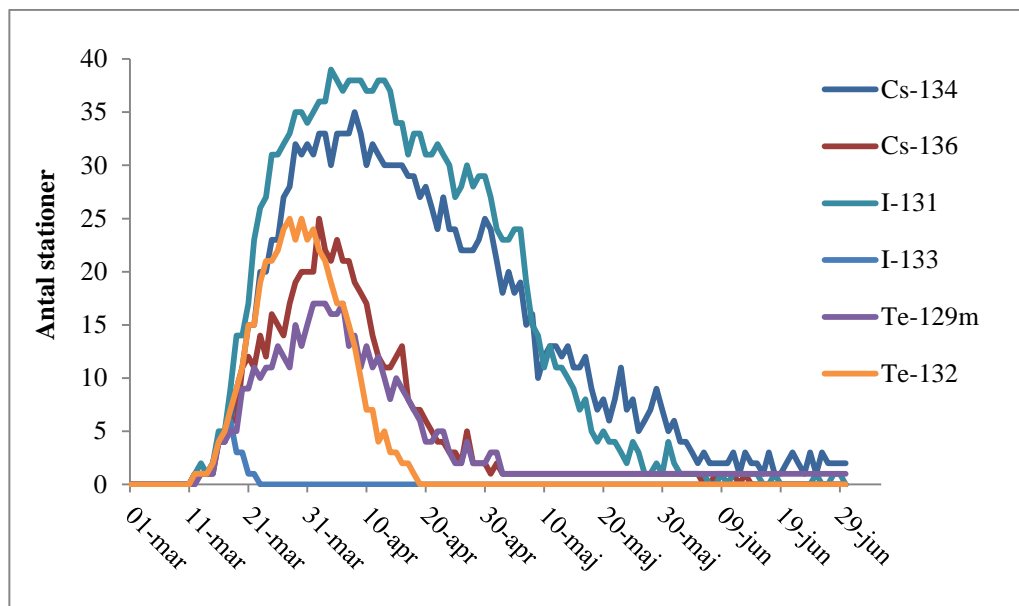


Figur 9. Figurerna visar spridningen av partikulärt jod (^{131}I) under perioden 14 mars - 4 april. Radionuklidstationerna inom IMS-nätverket är markerade med grönt innan de uppmätt något partikulärt jod, första detektionen vid en station är markerad med rött och de gula markeringarna visar vilka stationer som någon gång tidigare under perioden uppmätt förhöjda värden av partikulärt jod. (Bakgrundsbilden är från NASA, <http://visibleearth.nasa.gov>)

4 Detekterade radionuklider inom IMS-nätverket

I början av april hade samtliga aktiva mätstationer i nätverket på norra halvklotet detekterat förhöjda värden av radioaktivitet i luften²¹. Förhöjda aktivitetskoncentrationer uppmättes främst för ädelgasisotoperna $^{131m,133}\text{Xe}$ samt de lättflyktiga partikelbundna radionukliderna $^{131,133}\text{I}$, $^{129m,132}\text{Te}$ och $^{134,136,137}\text{Cs}$, men även andra mindre lättflyktiga ämnen detekterades främst i Japan och över Stilla havet och den nordamerikanska kontinenten (bl.a. ^{99}Mo , ^{140}La , ^{140}Ba).

Den fjärde april nåddes ett maximum i antalet detektioner i nätverket då ^{131}I detekterades vid 39 stationer (Figur 10). Isotoper med kort halveringstid (mindre än några dygn) hann sönderfalla innan de spreds över världen och detekterades därför vid färre stationer än de mera långlivade isotoperna. Detta gäller särskilt ^{133}I med en halveringstid på 21 timmar. Denna nuklid detekterades bara i området runt Japan och delar av den nordamerikanska kontinenten, men inte alls i Europa. I slutet av juni 2011 detekterade enbart ett fåtal stationer radioaktivitet relaterad till olyckan (främst stationen i Takasaki).



Figur 10. Antal IMS-stationer som detekterade några utvalda radionuklider efter utsläppet i Japan. Radionuklider med kort halveringstid (se Bilaga 2) hinner sönderfalla till icke detekterbara nivåer innan de har spridits över världen och detekterades därför endast vid ett fåtal stationer.

Nedan redovisas data för de nuklider som har uppmätts i nätverket under perioden 11 mars - 30 juni 2011. Aktiviteter som anges avser medelaktiviteten under insamlingstiden och är sönderfallskorrigerade till tidpunkten för start av insamlingen. Maximala aktivitetskoncentrationer av de viktigaste nukliderna under samma tidsperiod är sammanställda i kapitel 4.6, Tabellerna 3-6. Uppdelning av stationerna per världsdel finns i Bilaga 3. Resultaten för partikulära aktivitetskoncentrationer baseras på IDC:s analyser med verifierande analyser utförda av NDC medan resultaten för xenon baseras på NDC:s egna analyser²².

Några av nukliderna förekommer normalt i luften och härrör från annan industriell och medicinsk verksamhet (nivåerna skiljer sig dock åt mellan olika stationer).

²¹ Här rapporteras enbart livslängdsrelevanta modernuklider, se fotnot 18.

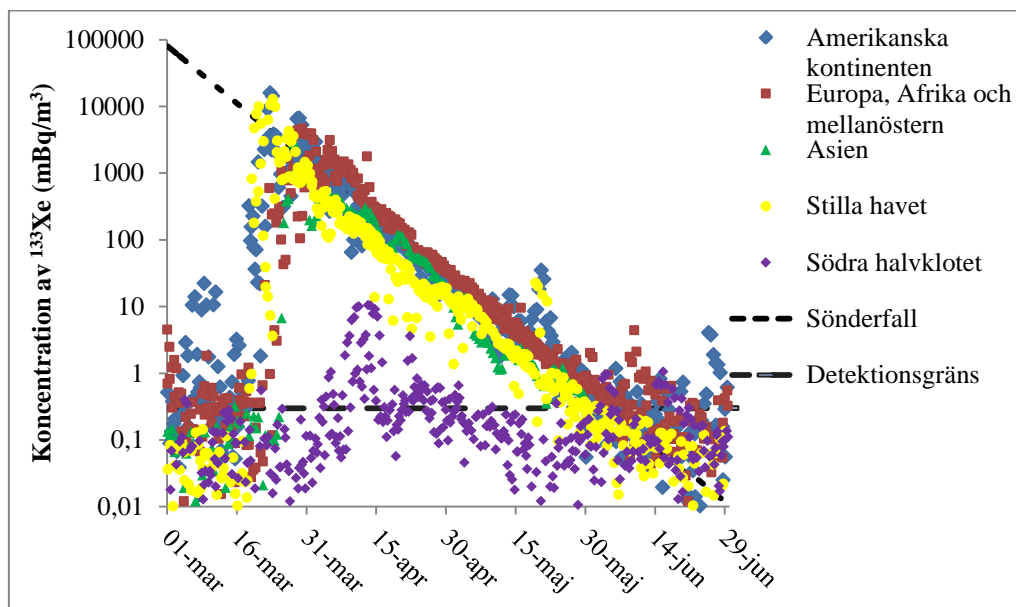
²² Xenonanalyserna har gjorts med programvaran Xecon [10].

Nuklid- och detektorspecifika korrekationer²³ är ännu inte fullständigt implementerade i de analyser som CTBTO:s IDC distribuerar till medlemsstaterna. Detta innebär att aktivitetskoncentrationerna kan felskattas med upp till cirka 50%. I denna rapport gäller detta främst nukliderna ¹³⁴Cs och ¹³⁶Cs.

4.1 Detekterade xenonisotoper

SAUNA-systemen kan identifiera och kvantifiera fyra olika xenonisotoper: ^{131m}Xe, ^{133m}Xe, ¹³³Xe och ¹³⁵Xe. Spridningen av xenon har visat sig homogen över norra halvklotet och det kan därför antas att samtliga IMS-stationer där har detekterat xenon härrörande från Fukushima.

Utsläppen från Fukushima dominerades av ¹³³Xe, och i slutet av mars 2011 uppmättes aktivitetskoncentrationer i storleksordningen Bq/m³ över en stor del av norra halvklotet, vilket är cirka 100-1000 gånger högre än vad som vanligtvis uppmäts. Efter de första veckorna var aktiviteten jämnt spridd över det norra halvklotet varefter ¹³³Xe-koncentrationen i atmosfären avtog med halveringstiden för ¹³³Xe (5,2 dygn). I början av juni var koncentrationen av ¹³³Xe nere på normal nivå, se Figur 11. Maximala aktivitetskoncentrationer, uppdelat på världsdel, för de olika xenonisotoperna ges i Tabell 3.



Figur 11. ¹³³Xe-koncentrationen uppmätt vid SAUNA-stationerna inom IMS-nätverket. Förteckning över vilka stationer som ingår i de olika grupperna ges i Bilaga 3. Cirka en vecka efter utsläppet hade xenonet fördelats jämnt över norra halvklotet och efter cirka tre veckor detekterades små mängder xenon även på södra halvklotet.

Isotopen ^{131m}Xe detekterades vid samtliga SAUNA stationer på norra halvklotet, men däremot inte alls på södra halvklotet. Uppmätta aktivitetskoncentrationer var cirka 100-150 gånger lägre än för ¹³³Xe, och förväntade nivåer på södra halvklotet låg under detektionsgränsen. Variationerna i aktivitetskoncentration följde samma mönster som för ¹³³Xe.

Isotoperna ^{133m}Xe och ¹³⁵Xe detekterades inte inom IMS-nätverket. Utgående från uppmätta ¹³³Xe-koncentrationer och förväntad ^{133m}Xe/¹³³Xe kvot och detektionsgränser borde ^{133m}Xe vara detekterbart i Stilla havet och nordamerikanska kontinenten. De höga aktivitetskoncentrationerna av ¹³³Xe och det faktum att nivåerna av ^{133m}Xe förväntas ligga

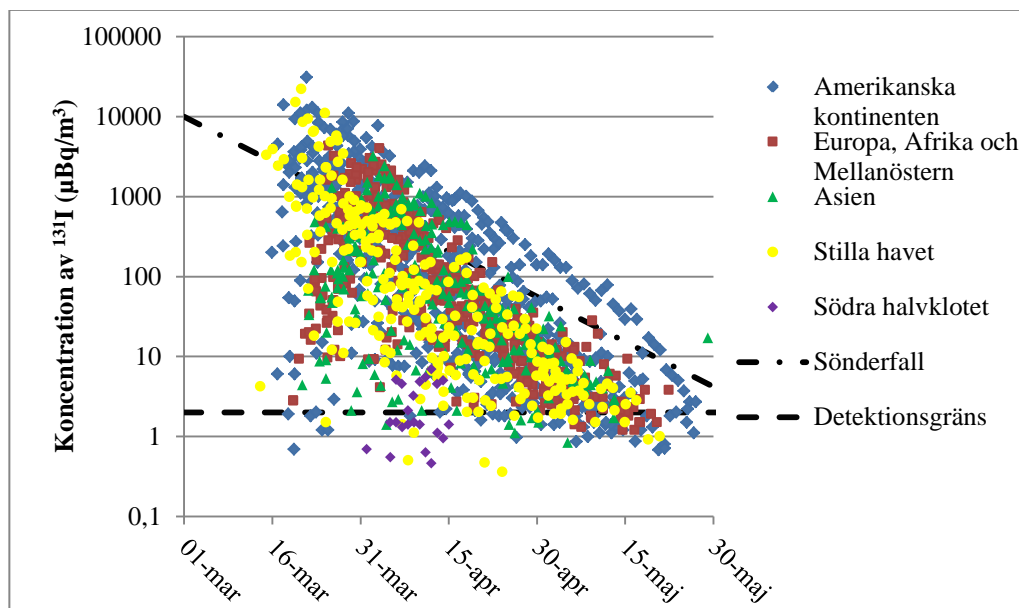
²³ Här avses främst s.k. summationseffekter, se avsnitt 7.4.

nära detektionsgränsen försvårar dock analysen avsevärt. ^{135}Xe har en så kort halveringstid (9,2 timmar) att den hunnit sönderfalla till nivåer under detektionsgränsen innan utsläppet nådde stationerna utanför Japan.

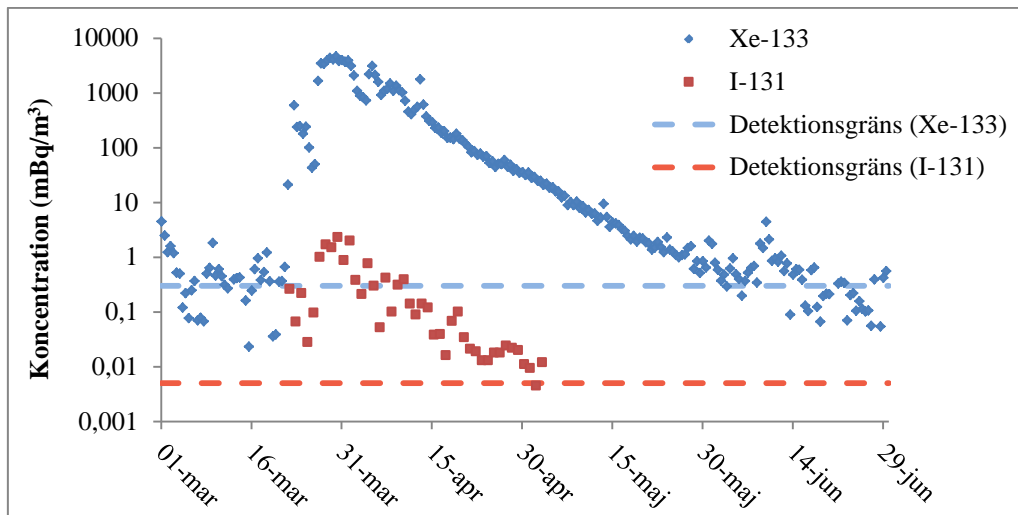
4.2 Detekterade jodisotoper

Den dominerande detekterade partikelbundna isotopen var ^{131}I och denna uppmättes i aktivitetskoncentrationer av storleksordningen ett tiotal mBq/m^3 över Stilla havet och den nordamerikanska kontinenten och sedan ungefär 10 gånger lägre i Europa och Asien (se Figur 12 och Tabell 4). Aktivitetskoncentrationen avtog något snabbare än halveringstiden och för större delen av världen nåddes normala bakgrunds nivåer ($<10 \mu\text{Bq/m}^3$) under början av maj. Som en jämförelse visas i Figur 13 aktivitetskoncentrationerna för ^{131}I och ^{133}Xe för IMS-stationerna i Stockholm. De båda radionukliderna når maximal aktivitetskoncentration ungefär samtidigt, koncentrationerna av ^{133}Xe var dock cirka tusen gånger högre än koncentrationen av ^{131}I . För ^{131}I minskar aktivitetskoncentrationen snabbare än den fysikaliska halveringstiden, se även kapitel 7.1. I början på maj respektive juni hade koncentrationerna av jod och xenon sjunkit under detekterbar nivå.

^{133}I detekterades vid enbart sju stationer i nätverket (på Kamchatkahalvön och den västra delen av den nordamerikanska kontinenten), p.g.a. dess relativt korta halveringstid på 20,8 timmar. Isotopen detekterades under perioden 14 - 20 mars. Maximala aktivitetskoncentrationer, uppdelat på världsdel, för de olika jodisotoperna ges i Tabell 4.



Figur 12. Aktivitetskoncentrationen av partikulärt ^{131}I uppmätt i atmosfären efter reaktorhaveriet i Japan. Förteckning över vilka stationer som ingår i de olika grupperna ges i Bilaga 3. Mätosäkerheterna är i regel mindre än 10 % för värden över detektionsgränsen (MDC).



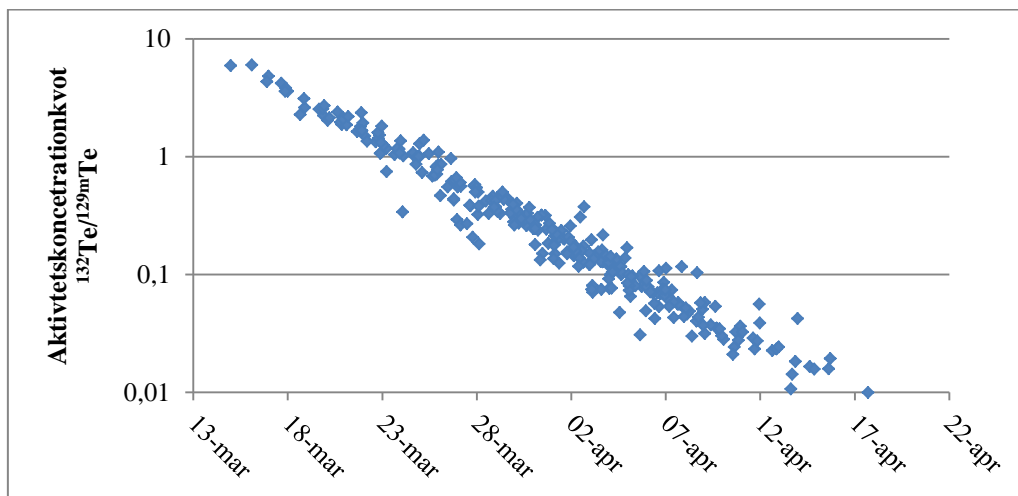
Figur 13. Aktivitetskoncentrationerna för ädelgasen ^{133}Xe och partikulärt ^{131}I visas för IMS-stationerna i Stockholm (SEP63 och SEX63 i Figur 6). Angivna detektionsgränser motsvarar MDC.

4.3 Detekterade tellurisotoper

Tellurisotoperna, $^{129\text{m}}\text{Te}$ och ^{132}Te , detekterades i regel tillsammans med jod men i något lägre aktivitetskoncentrationer, maximum för nukliderna sammanföll dock tidsmässigt. ^{132}Te detekterades vid de flesta stationerna på norra halvklotet och $^{129\text{m}}\text{Te}$ detekterades vid något färre stationer. Enstaka detektioner av ^{132}Te förekom på södra halvklotet. Tellur detekteras normalt inte i nätverket.

I Stilla havet detekterades tellur under perioden 14 mars - 9 april och på den amerikanska kontinenten under perioden 16 mars – 18 april. I Europa detekterades tellur först ca 10 dygn efter olyckan, med början den 23 mars och sista detektionen var den 10 april. Maximala uppmätta aktivitetskoncentrationer, uppdelat på världsdel presenteras i Tabell 5.

Variationen i det uppmätta förhållandet mellan de två olika tellurisotoperna domineras av skillnaden i de olika isotopernas halveringstid, som är 33,6 dygn för $^{129\text{m}}\text{Te}$ och 3,2 dygn för ^{132}Te . För de första detektionerna är aktivitetskoncentrationen av ^{132}Te ca fem gånger högre än aktivitetskoncentrationen av $^{129\text{m}}\text{Te}$. Kvoten mellan aktivitetskoncentrationerna av ^{132}Te och $^{129\text{m}}\text{Te}$ sjunker sedan linjärt och är för de sista detektionerna, i mitten av april, nere på ca 0,01, se Figur 14.



Figur 14. Kvoten mellan uppmätt aktivitetskoncentration för tellurisotoperna ^{132}Te och $^{129\text{m}}\text{Te}$.

4.4 Detekterade cesiumisotoper

Tre cesiumisotoper, $^{134,136,137}\text{Cs}$, detekterades som regel tillsammans med jod, men i lägre aktivitetskoncentrationer. Isotoperna ^{134}Cs och ^{137}Cs detekterades av samtliga stationer på norra halvklotet och ^{136}Cs vid de flesta stationerna. Enstaka detektioner på södra halvklotet av isotoperna ^{134}Cs och ^{137}Cs förekom. Uppskattningen av koncentrationen av ^{137}Cs som härrör från utsläppet vid Fukushima försvåras i slutet av mätperioden av den bakgrund (normalt 1-10 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) som finns på grund av resuspension av tidigare nedfall från Tjernobylyolyckan och kärnvapenprovsprängningar.

I Stilla havet och på den amerikanska kontinenten detekterades cesiumisotoperna från den 16 mars. ^{136}Cs detekterades under en dryg månad, de andra två isotoperna detekterades i Stilla havet ända fram till slutet på juni och på den amerikanska kontinenten till mitten av maj. I Europa, Mellanöstern, Afrika och Asien detekterades cesium från den 22 mars till mitten på juni för ^{137}Cs och till tredje veckan i april för ^{136}Cs .

Isotoperna ^{134}Cs och ^{137}Cs förekom i samma storleksordning och aktivitetskoncentrationen av ^{136}Cs var för de första detektionerna i storleksordningen 10 % av denna. Maximala uppmätta aktivitetskoncentrationer, uppdelat på världsdel presenteras i Tabell 6. På samma sätt som för tellur sjunker andelen ^{136}Cs i förhållande till ^{137}Cs och är nere på någon procent i slutet av april. Förändringen beror till största del på ^{136}Cs korta halveringstid på 13,2 dygn mot ^{137}Cs halveringstid på 30,1 år. Förhållandet mellan ^{134}Cs och ^{137}Cs är konstant under perioden.

4.5 Övriga detekterade nuklider

Radioaktivt silver ($^{110\text{m}}\text{Ag}$) detekterades vid ett fåtal tillfällen. En vecka efter olyckan detekterades låga nivåer (storlekordningen 5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) vid Kamchatkahalvön och Sand Point, Alaska och första veckorna i april detekterades åter låga nivåer, men denna gång i Okinawa, Japan; Midwayöarna, Stilla havet och Sacramento, Nordamerika.

Isotopen ^{95}Nb detekterades vid fem stationer under de tre första veckorna i april 2011. Detektionerna skedde i Okinawa, Japan; Quezon City, Filippinerna; Kamchatka, Ryssland samt stationerna Sacramento och Charlottesville på den nordamerikanska kontinenten. Aktivitetskoncentrationerna var i storleksordningen 1-100 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Detektioner av ^{99}Mo över förekommande bakgrunds nivåer skedde vid 12 stationer på norra halvklotet, stationerna är lokaliserade i Stilla havet och på den nordamerikanska kontinenten. Uppmätta värden varierade från hundratals till tusentals $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Isotoperna ^{140}La och ^{140}Ba , detekterades tillsammans vid sju stationer, medan ^{140}La detekterades enskilt vid ytterligare 11 stationer på norra halvklotet, främst i Stilla havet och på den nordamerikanska kontinenten. Aktivitetskoncentrationerna varierade mellan 1 och 100 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ för ^{140}La och 1-50 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ för ^{140}Ba . Detektionerna skedde i huvudsak från mitten av mars till mitten av april.

4.6 Sammanställning av maximala aktivitetskoncentrationer detekterade i IMS-nätverket

Tabell 3. Maximala ^{133}Xe och $^{131\text{m}}\text{Xe}$ -koncentrationer (enbart SAUNA stationer har beaktats). Mätosäkerheten är approximativt 10%.

Område	Start av insamling	^{133}Xe (mBq/m ³)	$^{131\text{m}}\text{Xe}$ (mBq/m ³)
Asien	2011-03-28 16:00	2800	45
Stilla havet	2011-02-23 19:24	13000	260
Amerikanska kontinenten	2011-03-23 04:46	16000	25
	2011-03-28 23:57	6500 ^a	140
Europa, Afrika, Mellanöstern	2011-03-30 02:24	4600	~40 ^b
Södra halvklotet	2011-04-11 07:02	11	< 1
	2011-04-14 19:00	9	1

^a Värden med kursiv stil markerar att det angivna mätvärdet ej är det maximalt uppmätta värdet.

^b Koncentrationen är uppskattad genom att extrapolera från befintliga mätdata till maximum för ^{133}Xe .

Tabell 4. Maximala jodkoncentrationer. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Område	Start av insamling	^{131}I ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{133}I ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Asien	2011-04-02 03:26	3200 \pm 450	< 11
Stilla havet	2011-03-20 22:25	22000 \pm 660	< 40
	2011-03-14 23:32	3300 \pm 50	280 \pm 10
Amerikanska kontinenten	2011-03-21 18:54	31000 \pm 930	< 40
	2011-03-17 21:40	14000 \pm 250	160 \pm 8
Europa, Afrika, Mellanöstern	2011-03-25 11:29	4300 \pm 90	< 11
Södra halvklotet	2011-04-05 01:12	1,5 \pm 0,2	< 3

Tabell 5. Maximala tellurkoncentrationer. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Område	Start av insamling	$^{129\text{m}}\text{Te}$ ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{132}Te ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Asien	2011-04-05 00:24	1200 \pm 440	120 \pm 60
Stilla havet	2011-03-24 22:25	1500 \pm 60	1500 \pm 560
	2011-03-18 00:13	750 \pm 280	2700 \pm 120
Amerikanska kontinenten	2011-03-21 20:35	9400 \pm 350	17000 \pm 1000
Europa, Afrika, Mellanöstern	2011-04-03 04:50	700 \pm 260	95 \pm 5
	2011-03-25 11:29	160 \pm 60	170 \pm 14
Södra halvklotet	-	-	< 1

Tabell 6. Maximala cesiumkoncentrationer. Koncentrationer för ^{134}Cs och ^{136}Cs är angivna utan nuklid- och detektorspecifika korrektioner (summationskorrektioner). Dessa effekter leder till en underskattning av koncentrationen av storleksordningen 20-40%. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Område	Start av insamling	^{134}Cs ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{136}Cs ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{137}Cs ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Asien	2011-04-05 00:24	2800 \pm 80	99 \pm 3	3000 \pm 90
Stilla havet	2011-03-20 22:25	2600 \pm 40	400 \pm 6	3100 \pm 30
Amerikanska kontinenten	2011-03-21 20:35	8100 \pm 240	1200 \pm 40	9800 \pm 200
Europa, Afrika, Mellanöstern	2011-04-03 04:51	770 \pm 8	55 \pm 11	1000 \pm 4
	2011-04-01 13:32	700 \pm 50	59 \pm 2	870 \pm 20
Södra halvklotet	-	< 1	< 1	< 1

5 Det nationella nätverket i Sverige

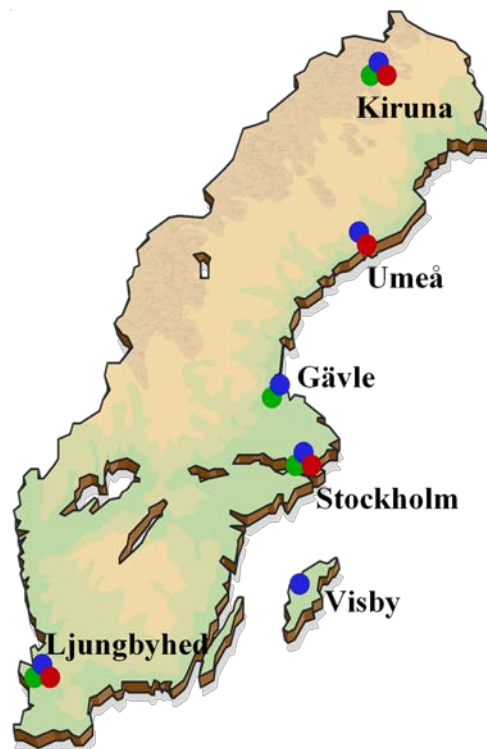
5.1 Insamling och analys

I Sverige finns sex fasta stationer för mätning av luftburen partikulär radioaktivitet. Dessa är placerade i Kiruna, Umeå, Gävle, Stockholm, Visby och Ljungbyhed, se Figur 15. Luft filtreras genom glasfiberfilter, ca 1000 m³/timme, förutom i Stockholm där flödet är nästan det dubbla. Filter för en vecka läggs samman och mäts som ett veckoprov.

Vid stationerna i Kiruna, Umeå, Stockholm och Ljungbyhed sker insamling av gasformigt jod genom att låta en del av luften passera en kapsel med aktivt kol.

Vid stationerna i Kiruna, Gävle, Stockholm och Ljungbyhed sker också insamling av nedfall via nederbörd och torrdeposition. Nederbörden leds genom en filterförsedd jonbytarkolonn där partiklar och joner fastnar. Nederbördsproven analyseras normalt månadsvis.

Exponerade filter och jonbytarkolonner skickas för analys till FOI:s laboratorium i Stockholm. Proven mäts med högupplösande gamma-spektroskopi. Normalt får provet vila några dygn varefter mätning sker under 3-4 dygn.



Figur 15. Placeringen av de nationella övervakningsstationerna i Sverige. Luftfilter är markerade med blå cirkel, insamling av gasformigt jod med röd cirkel och insamling av nederbörd med grön cirkel.

5.2 Mätprocedur i samband med Fukushimaolyckan

Den 21 mars 2011 anmodade Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, att FOI:s ordinarie mätningar av radioaktivitet i luft skulle utföras med tätare intervall. Detta med anledning av att man förmodade att radioaktiva ämnen från reaktorhaverierna i Japan skulle nå Sverige. Dagligt filterbyte vid alla nationella luftfilterstationer samt omgående mätning, analys och rapportering av data till SSM efterfrågades.

Under perioden 21 mars – 6 april genomfördes sålunda filterbyte dagligen vid samtliga stationer. Under perioden 6 – 18 april utfördes byten måndag, onsdag och fredag vid alla stationer utom i Stockholm där byten fortfarande skedde dagligen, därefter återgick stationerna till normala rutiner. Filtren mättes i de flesta fall samma dag som de inkom till laboriet. Filter från Umeå mättes direkt vid FOI Umeå. Mättiden var kortare än normalt, under de första veckorna ca 24 timmar per prov. Vartefter insamlingstiderna blev längre ökades också mättiden. Från den 2 maj mättes alla prover återigen som veckoprov.

För att kunna bedöma nivåerna av gasformigt jod mättes även veckovisa kolkapslar från stationerna i Stockholm och Ljungbyhed²⁴ under perioden 21 mars -16 maj.

Nederbördsprover mättes veckovis med start den 21 mars och 6-8 veckor framöver, beroende på station.

5.3 Rapportering

Mätresultaten sammanställdes löpande och rapporterades till SSM:s ledningscentral via e-post och fax. Initialt rapporterades data endast på detta sätt eftersom rutiner för elektronisk rapportering vid förändrade rutiner saknades. Från mitten av april rapporterades data för vissa nuklider (¹³¹I och ¹³⁷Cs) också elektroniskt till *EU Radiological Data Exchange Platform*, EURDEP²⁵.

²⁴ För att optimera mätkapaciteten valdes tre stationer för mätning av kolkapslarna. Tyvärr hade stationen i Umeå en del tekniska problem under perioden varför data därifrån saknas.

²⁵ EURDEP – <http://eurdep.jrc.ec.europa.eu>.

6 Resultat av nationella mätningar i Sverige

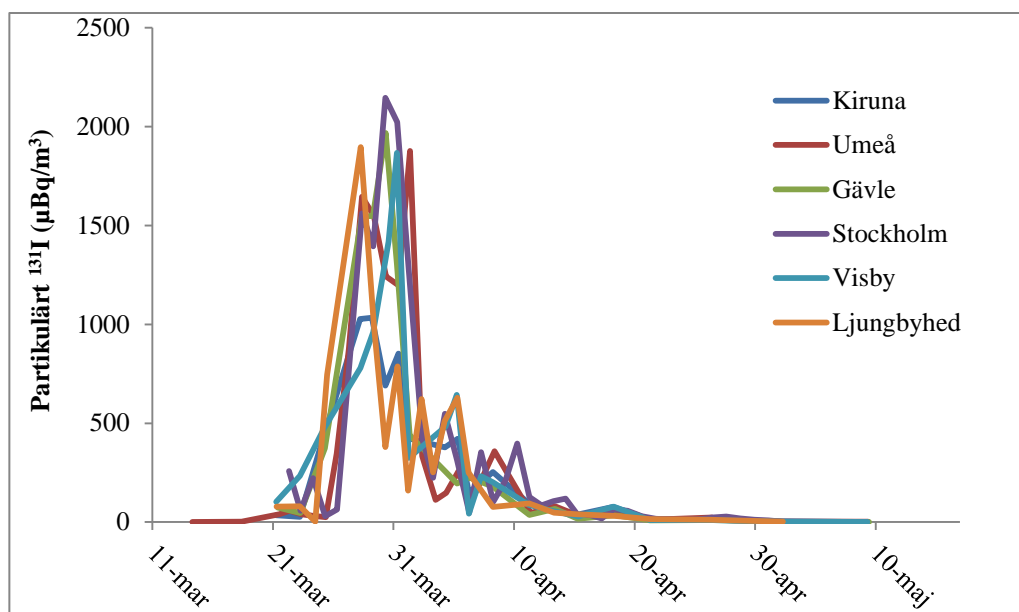
I detta kapitel redovisas data för de nuklider som har uppmätts i luft och nederbörd i Sverige under perioden 18 mars - 30 juni 2011. Aktiviteten bestäms som ett medelvärde över insamlingstiden för provet, sönderfallskorrigerad till starttid för insamlingen. Värderna är givna med ett mätstatistiskt fel på 1σ . Nuklid- och detektorspecifika korrektionsfaktorer har tagits fram med hjälp av programvaran VGSL²⁶. Maxvärdena för detekterade nuklider ges i kapitel 6.4. En fullständig sammanställning av uppmätta aktivitetskoncentrationer finns i årsrapporten för 2011 [11].

I Sverige detekterades enbart lättflyktiga ämnen (se Tabell 1) och därav endast de ämnen som fanns i höga halter i reaktorerna och dessutom med tillräckligt långa halveringstider för att finnas kvar i mätbar mängd när utsläppet nådde Sverige, ca 10 dygn efter olyckan. De radioaktiva nuklider som detekterades i Sverige var²⁷: ^{131}I , $^{129\text{m},132}\text{Te}$ samt $^{134,136,137}\text{Cs}$. Av dessa var koncentrationerna av ^{131}I ojämförligt störst, ca 10 gånger högre än halterna av $^{134,137}\text{Cs}$. Speciellt för ^{131}I är att det förekommer både som partiklar och i gasform.

6.1 Detektion av partikulärt och gasformigt jod i luft

I norra Sverige (Kiruna och Umeå) detekterades ^{131}I i filter från perioden 18 - 21 mars, men i mycket låga nivåer, ca $2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ luft. För övriga stationer detekterades ^{131}I först i filtren från 22 - 23 mars, med högsta detekterade aktivitetskoncentrationen i Stockholm, $258 \pm 4 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

Under de följande dagarna steg nivåerna av ^{131}I i hela landet och perioden 29 mars - 1 april nåddes de högsta koncentrationerna (Tabell 6), varefter de avtog och sjönk till icke detekterbara nivåer i mitten av maj månad. Uppmätta aktivitetskoncentrationer av partikulärt ^{131}I i luftfilter under perioden 11 mars - 10 maj presenteras i Figur 16 och Tabell 7.



Figur 16. Uppmätta koncentrationer av partikulärt ^{131}I i Sverige under perioden 11 mars - 10 maj 2011.

²⁶ VGSL – Virtual Gamma Spectroscopy Laboratory, en programvara utvecklad av CTBTO för att simulera spektra och beräkna korrektionsfaktorer bl.a. för summationseffekter.

²⁷ Här rapporteras enbart livslängdsrelevanta modernuklider, se fotnot 18.

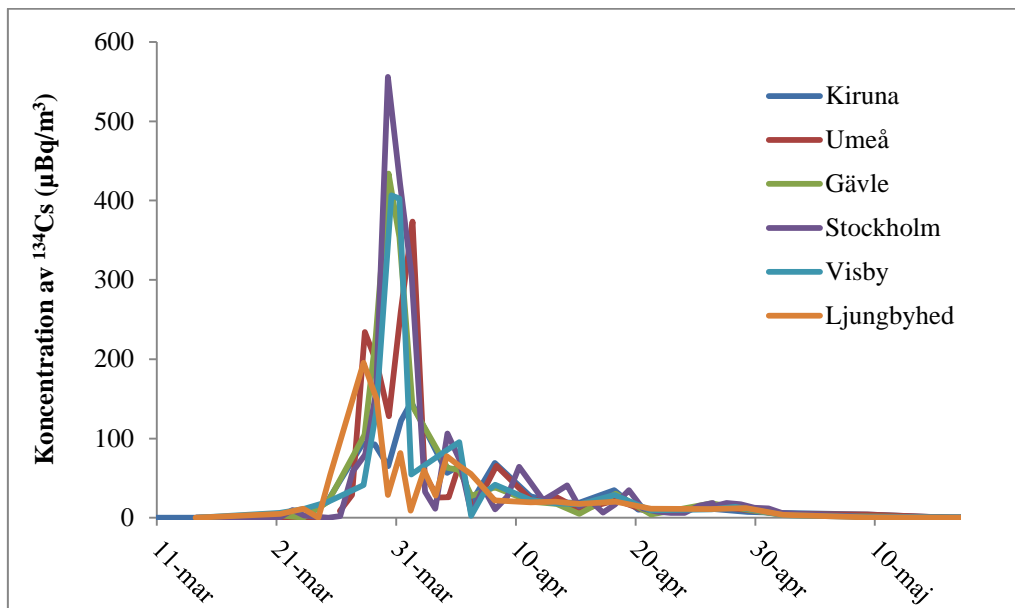
Maximalt uppmättes aktivitetskoncentrationen av gasformigt jod i Stockholm till $4210 \pm 70 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ under perioden 28 mars – 4 april, att jämföra med medelvärdet för partikulärt jod under samma period på $1570 \pm 50 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. För Ljungbyhed uppmättes under samma period $2110 \pm 190 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ gasformigt jod mot $870 \pm 40 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ partikulärt jod. Andelen gasformigt jod låg under hela perioden mellan 70 och 85 % av den totala mängden jod i luften, se Tabell 8.

6.2 Detekterade tellurisotoper i luft

Tellurisotoperna $^{129\text{m}}\text{Te}$ och ^{132}Te detekterades vid samtliga stationer i Sverige, i huvudsak sammanföll dessa detektioner med den period då ^{131}I -koncentrationerna var som högst. Sammanställning av uppmätta maxkoncentrationer för dessa isotoper visas i Tabell 9. Båda tellurisotoperna detekterades under ca 2 veckor, en betydligt kortare period än ^{131}I .

6.3 Detekterade cesiumisotoper i luft

Tre olika cesiumisotoper detekterades efter olyckan, dessa var ^{134}Cs , ^{136}Cs och ^{137}Cs . Även för cesium sammanföll de maximalt uppmätta aktivitetskoncentrationerna generellt med maximum för jod. ^{136}Cs detekteras huvudsakligen under perioden 25 mars – 10 april, de båda andra cesiumisotoperna ända fram till mitten av maj. Figur 17 visar uppmätta aktivitetskoncentrationer av ^{134}Cs i luftfilter under perioden 11 mars - 16 maj, maxvärden under perioden presenteras i Tabell 10.



Figur 17. Uppmätta aktivitetskoncentrationer av ^{134}Cs i Sverige under perioden 11 mars - 16 maj 2011.

6.4 Sammanställning av maximala luftkoncentrationer i det svenska nätverket

Tabell 7. Maxvärden för uppmätta aktivitetskoncentrationer av partikulärt ^{131}I i Sverige. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Station	Start av insamling	Stopp av insamling	Partikulärt ^{131}I ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Kiruna	2011-03-29 05:15	2011-03-30 08:05	1030 \pm 12
Umeå	2011-04-01 09:00	2011-04-02 09:09	1880 \pm 56
Gävle	2011-03-30 08:20	2011-03-31 06:40	1970 \pm 22
Stockholm	2011-03-30 07:31	2011-03-31 07:31	2140 \pm 21
Visby	2011-03-31 06:25	2011-04-01 06:15	1870 \pm 21
Ljungbyhed	2011-03-28 06:30	2011-03-29 08:50	1900 \pm 23

Tabell 8. Veckomedelvärden för aktivitetskoncentrationer av partikulärt och gasformigt ^{131}I i Stockholm och Ljungbyhed under perioden 21 mars – 16 maj 2011. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Station	Start av insamling	Stopp av insamling	^{131}I part. ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{131}I gas ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	Gas/Totalt (%)
Stockholm	2011-03-21 05:38	2011-03-28 05:40	310 \pm 20	810 \pm 30	72
	2011-03-28 07:00	2011-04-04 07:00	1570 \pm 50	4210 \pm 70	73
	2011-04-04 09:40	2011-04-11 07:55	360 \pm 20	1440 \pm 60	80
	2011-04-11 07:50	2011-04-18 08:00	91 \pm 8	290 \pm 30	76
	2011-04-18 08:00	2011-04-25 09:50	38 \pm 5	100 \pm 20	73
	2011-04-25 09:50	2011-05-02 06:20	22 \pm 4	saknas	-
	2011-05-02 06:20	2011-05-09 08:50	3,2 \pm 0,2	19 \pm 9	85
	2011-05-09 08:50	2011-05-16 05:10	1,2 \pm 0,2	<57	-
	Ljungbyhed	2011-03-28 06:40	2011-04-04 05:35	870 \pm 40	2100 \pm 190
2011-04-04 05:35		2011-04-11 05:40	400 \pm 30	1420 \pm 130	78
2011-04-11 05:40		2011-04-18 08:30	69 \pm 15	saknas	-
2011-04-18 08:30		2011-04-26 06:35	25 \pm 3	140 \pm 40	85
2011-04-26 06:35		2011-05-02 06:30	10 \pm 2	<152	-
2011-05-02 06:20		2011-05-09 08:50	2,7 \pm 0,2	<155	-
2011-05-09 06:15		2011-05-16 07:10	<2,7	<241	-

Tabell 9. Maxvärden för uppmätta aktivitetskoncentrationer av ^{129m}Te och ^{132}Te i Sverige. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Station	Start av insamling	Stopp av insamling	^{129m}Te max ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{132}Te max ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Kiruna	2011-03-28 05:16	2011-03-29 05:15	81 ± 14^a	42 ± 4
	2011-04-01 06:25	2011-04-04 06:10	109 ± 7	18 ± 1
Umeå	2011-03-28 09:00	2011-03-29 09:00	220 ± 40	124 ± 4
Gävle	2011-03-30 08:20	2011-03-31 06:40	360 ± 30	116 ± 2
Stockholm	2011-03-30 07:31	2011-03-31 07:31	490 ± 20	154 ± 2
Visby	2011-03-30 14:21	2011-03-31 06:25	311 ± 30	101 ± 2
	2011-03-31 06:25	2011-04-01 06:15	330 ± 20	74 ± 2
Ljungbyhed	2011-03-28 06:30	2011-03-29 08:50	120 ± 50	65 ± 2

^a Värdet med kursiv stil markerar att det angivna mätvärdet ej är det maximalt uppmätta värdet.

Tabell 10. Maxvärden för uppmätta aktivitetskoncentrationer av ^{134}Cs , ^{136}Cs och ^{137}Cs i Sverige. Data för ^{134}Cs och ^{136}Cs har korrigerats för summationseffekter. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Station	Start av insamling	Stopp av insamling	^{134}Cs ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{136}Cs ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)	^{137}Cs ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)
Kiruna	2011-04-01 06:25	2011-04-04 06:10	146 ± 1	11 ± 1	152 ± 2
	2011-04-01 09:00	2011-04-02 09:09	370 ± 20	37 ± 3	370 ± 10
Gävle	2011-03-30 08:20	2011-03-31 06:40	434 ± 4	43 ± 2	447 ± 6
Stockholm	2011-03-30 07:31	2011-03-31 07:31	556 ± 4	53 ± 2	557 ± 7
Visby	2011-03-30 14:21	2011-03-31 06:25	407 ± 4	38 ± 2	420 ± 6
	2011-03-31 06:25	2011-04-01 06:15	403 ± 3	40 ± 2	422 ± 6
Ljungbyhed	2011-03-28 06:30	2011-03-29 08:50	195 ± 3	23 ± 2	194 ± 4

6.5 Detekterade nuklider i nederbörd

Nederbördsprover mättes veckovis under perioden mars – maj 2011. Nederbördsproverna mättes senare än luftfilterproverna varför kortlivade nuklider, förutom ^{131}I , inte detekterades i dessa prover. Uppmätt deposition av ^{131}I , ^{134}Cs och ^{137}Cs från mars till slutet av juni 2011 presenteras i Tabell 11. Som väntat uppmättes de högsta nivåerna av ^{131}I under de veckor då luftkoncentrationen var högst. Depositionen var högre i södra Sverige än i norra, men nederbördsmängden var mycket låg i Kiruna under perioden, endast 17 mm nederbörd att jämföra med 110 mm i Ljungbyhed. Sedan Tjernobylyoluckyan 1986 finns en bakgrund av ^{137}Cs i Sverige, denna är som är högst i Gävletrakten vilket förklarar att halterna av ^{137}Cs där ligger kvar på höga nivåer trots att halterna av ^{134}Cs sjunker.

Tabell 11. Uppmätt deposition av ^{131}I , ^{134}Cs och ^{137}Cs i Sverige under perioden mars – juni 2011. Notera att insamlingstiderna för proven ökar mot slutet av perioden. Data för ^{134}Cs har korrigerats för summationseffekter. Angivna mätosäkerheter avser ett statistiskt fel på 1σ .

Station	Start av insamling	Stopp av insamling	^{131}I (mBq/m ²)	^{134}Cs (mBq/m ²)	^{137}Cs (mBq/m ²)
Kiruna	2011-03-21 05:05	2011-03-28 05:16	680 ± 10	< 6	< 6
	2011-03-28 05:16	2011-04-04 06:10	286 ± 7	< 7	< 7
	2011-04-04 06:10	2011-04-11 05:11	400 ± 40	< 12	< 12
	2011-04-11 05:11	2011-04-18 05:15	530 ± 10	13 ± 1	15 ± 1
	2011-04-18 05:15	2011-04-26 05:18	134 ± 9	< 11	4 ± 1
	2011-04-26 05:18	2011-05-02 06:10	50 ± 8	< 14	5 ± 3
	2011-05-02 06:10	2011-05-30 06:10	< 88	60 ± 2	70 ± 2
	2011-05-30 06:15	2011-06-27 08:02	< 69	15 ± 1	36 ± 2
	2011-06-27 08:02	2011-07-25 11:00	< 77	< 10	22 ± 2
Gävle	2011-02-28 09:40	2011-03-28 08:20	85 ± 20	< 12	23 ± 1
	2011-03-28 08:20	2011-04-04 06:55	6280 ± 80	279 ± 3	288 ± 5
	2011-04-04 06:55	2011-04-11 06:25	3400 ± 60	197 ± 4	216 ± 5
	2011-04-11 06:25	2011-04-18 08:30	1280 ± 20	15 ± 2	14 ± 2
	2011-04-18 09:30	2011-04-25 09:00	100 ± 10	69 ± 4	97 ± 8
	2011-04-26 09:00	2011-05-23 07:25	< 57	43 ± 1	198 ± 3
	2011-05-23 06:25	2011-06-20 06:15	< 34	31 ± 1	417 ± 7
	2011-06-20 06:15	2011-07-15 06:45	< 75	< 11	121 ± 4

Station	Start av insamling	Stopp av insamling	¹³¹ I (mBq/m ²)	¹³⁴ Cs (mBq/m ²)	¹³⁷ Cs (mBq/m ²)
Stockholm	2011-03-21 06:40	2011-03-28 07:20	2240 ± 50	< 12	< 12
	2011-03-28 07:20	2011-04-04 09:38	8150 ± 150	213 ± 6	200 ± 10
	2011-04-04 09:38	2011-04-11 07:50	920 ± 30	25 ± 2	31 ± 6
	2011-04-11 07:50	2011-04-18 07:50	45 ± 20	< 13	5 ± 1
	2011-04-18 06:00	2011-04-25 07:50	30 ± 3	10 ± 1	12 ± 1
	2011-04-25 07:50	2011-05-02 06:20	30 ± 4	12 ± 1	15 ± 1
	2011-05-02 06:20	2011-05-09 08:50	43 ± 7	33 ± 2	32 ± 4
	2011-05-09 08:50	2011-05-16 05:50	< 57	32 ± 3	36 ± 5
	2011-05-16 05:00	2011-06-13 05:00	< 49	25 ± 1	36 ± 2
	2011-06-13 05:10	2011-07-11 08:50	< 53	11 ± 1	23 ± 1
Station	Start av insamling	Stopp av insamling	¹³¹ I (mBq/m ²)	¹³⁴ Cs (mBq/m ²)	¹³⁷ Cs (mBq/m ²)
Ljungbyhed	2011-03-14 05:15	2011-03-21 07:15	< 170	< 12	< 12
	2011-03-21 07:15	2011-03-28 06:40	290 ± 80	< 21	< 21
	2011-03-28 06:40	2011-04-04 05:35	7750 ± 140	248 ± 7	260 ± 10
	2011-04-04 05:35	2011-04-11 05:40	1890 ± 30	64 ± 2	69 ± 3
	2011-04-11 05:40	2011-04-18 08:25	1060 ± 20	126 ± 3	133 ± 5
	2011-04-18 08:25	2011-04-26 06:25	< 24	< 11	< 11
	2011-04-26 06:35	2011-05-02 06:15	33 ± 9	7 ± 2	18 ± 7
	2011-05-02 06:15	2011-05-09 06:15	< 51	5 ± 2	13 ± 2
	2011-05-09 05:15	2011-06-07 05:20	< 76	58 ± 2	82 ± 2
	2011-06-07 05:50	2011-07-04 06:15	< 52	9 ± 1	16 ± 1

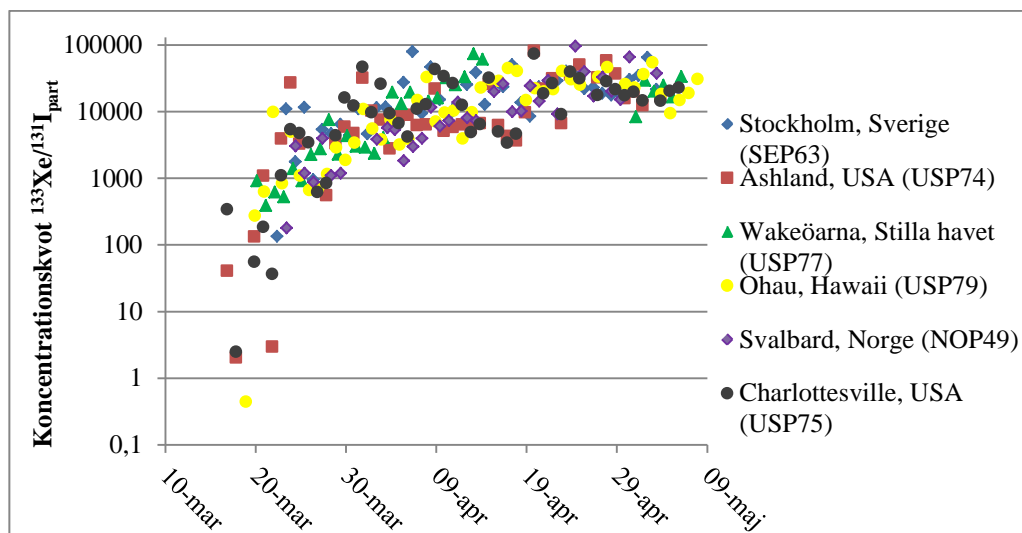
7 Diskussion

7.1 Global spridning och meteorologiska modeller

Den svåra situationen i Japan med stora skador på infrastruktur efter jordbävning och efterföljande tsunamis bidrog till att händelseförloppet vid kärnkraftverket i Fukushima Daiichi blev komplicerat och utdraget. De första dagarna efter jordbävningen förvärrades förhållandena vid verket stegvis trots alla försök att rädda situationen och det tog drygt två veckor innan kylningen av reaktorerna vid verket var förhållandevis kontrollerbar.

Uppgifter om när utsläpp av radioaktivitet skedde under de inledande dagarna är osäkra, både vad gäller mängd, tidpunkt och utsläppsväg. Tre reaktorer var berörda och risk förelåg att utsläpp även skett från bränslebassängen vid reaktor 4. Det komplicerade utsläppsscenarioet försvårar noggranna spridningsberäkningar eftersom källtermen i stort är okänd. Under de första dagarna gjordes preliminära spridningsberäkningar för att kunna bedöma i första hand vilken väg ett utsläpp skulle ta. Detta för att kunna bedöma situationen i Japan och den globala spridningen. De preliminära beräkningar som FOI och SMHI utförde kunde trots osäkerheterna med god noggrannhet uppskatta utsläppens transportväg och när aktiviteten skulle nå Sverige. Flera studier har presenterats där uppskattningar av källtermen gjorts genom analys av mätningar som är gjorda över världen och matchat dessa mot spridningsberäkningar [12-14]. Generella slutsatser är att alla radioaktiva ädelgaser samt en betydande del av de lättflyktiga ämnena vid de tre drabbade reaktorerna släpptes ut i atmosfären vid olyckan.

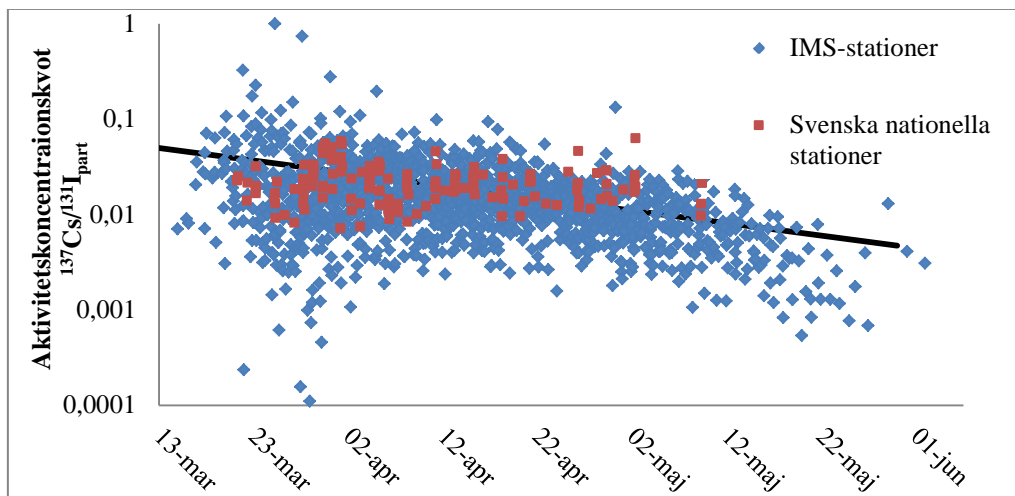
Både partikulär radioaktivitet och det radioaktiva xenonet följde som väntat samma transportvägar och kunde detekteras samtidigt vid de stationer som hade möjlighet att mäta både partiklar och xenon. Den sönderfallskorrigerade kvoten mellan aktivitetskoncentrationen för ^{133}Xe och ^{131}I (partikulärt) ökar med tiden efter olyckan och är relativt likvärdig för samtliga stationer på norra halvklotet, se Figur 18. Kvoten ökar från ca 1-100 för de första detektionerna till ca 40 000 i början på maj. Detta visar att partikulärt jod i hög grad tvättats ut ur atmosfären främst via nederbörd. Xenon är en ädelgas som inte reagerar kemiskt med andra ämnen i omgivningen och blir därmed i högre utsträckning kvar i atmosfären.



Figur 18. Kvoten $^{133}\text{Xe}/^{131}\text{I}_{\text{part}}$ för xenonstationerna av SAUNA-typ på norra halvklotet. SAUNA producerar två prover per dygn medan partikulära stationer genererar ett prov per dygn. I kvotbildningen har två SAUNA-mätningar per dygn medelvärdesbildats. Aktiviteterna har sönderfallskorrigerats tillbaka till tidpunkten för avstängning av reaktorerna (11 mars 2011, kl. 05:47). Jodkoncentrationen avser den partikulära fraktionen.

Som tidigare nämnts finns inom det nationella nätverket förutom möjlighet att detektera partikulärt jod även möjlighet att detektera gasformigt jod. Känsligheten inom det svenska nätverket för gasformigt jod är dock lägre än för partikulärt jod varför endast veckovisa mätningar utfördes, den gasformiga fraktionen varierade här mellan 71 – 85 %. Vid ett flertal nationella stationer inom Europa gjordes dygnsmätningar av gasformigt jod, och värden rapporterade från dessa visar på att den gasformiga fraktionen jod var i medeltal 77 ± 13 % av den totala mängden jod under perioden 20 mars – 12 april [15]. En viss ökning av den kvoten kunde ses under perioden, vilket återspeglar att den partikulära fraktionen tvättas ur i högre utsträckning än den gasformiga fraktionen.

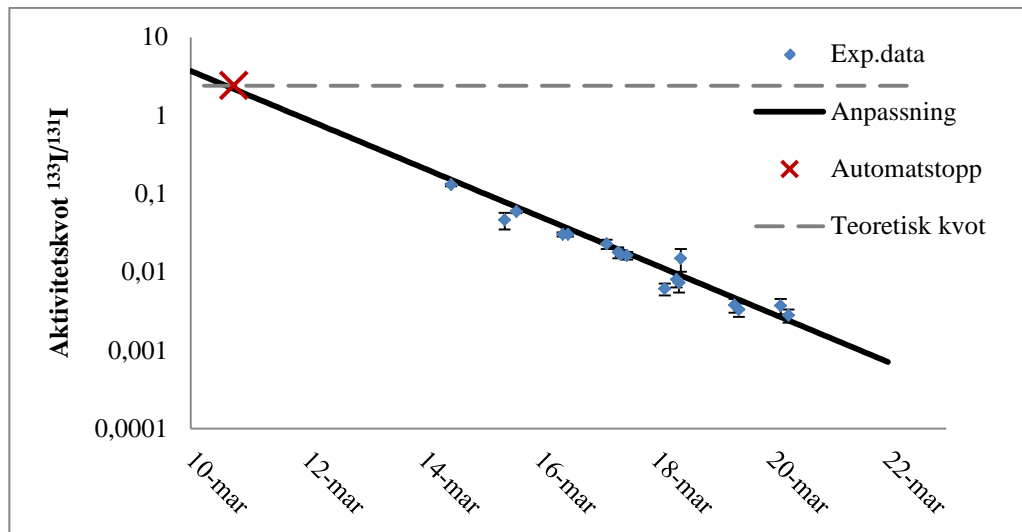
En jämförelse mellan de olika partikulära nukliderna kan också göras. I Figur 19 visas kvoten mellan ^{137}Cs och ^{131}I för samtliga IMS och svenska stationer. Spridningen är initialt stor men minskar med tiden. Den stora spridningen initialt kan bero på att de olika utsläpp som skett innehåller olika förhållanden mellan de två nukliderna. Med tiden fås en blandning av samtliga utsläpp och skillnaden mellan aktivitetskoncentrationerna vid olika stationer minskar. Spridningen i kvoter mellan olika världsdelar är generellt sett mindre än spridning mellan olika stationer i samma världsdel, denna trend kan även ses för förhållandet mellan tellurisotoperna $^{129\text{m}}\text{Te}$ och ^{132}Te och ^{131}I . Aktivitetskvoten $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}_{\text{part}}$ minskar linjärt med tiden, se Figur 19. Detta kan tolkas som att gasformigt jod sakta övergår i partikulärt jod och koncentrationen av $^{131}\text{I}_{\text{part}}$ minskar därför inte lika snabbt som koncentrationen av ^{137}Cs . Baserat på samtliga detektioner inom det internationella nätverket fås en halveringstid för omvandlingen av gasformigt till partikulärt jod på ca 23 dygn. Detta kan jämföras med rapporterade halveringstider av gasformigt jod efter Tjernobyloylyckan på 8 – 15 dygn [16] som uppskattats utifrån mätdata insamlat i norra Stilla havet.



Figur 19. Kvoten mellan ^{137}Cs och partikulärt ^{131}I för de stationer som detekterat båda isotoperna under våren 2011, både inom IMS-nätverket och det svenska nationella nätverket. Ingen korrektion har gjorts för den (i de flesta fall försumbara) bakgrund av ^{137}Cs som finns globalt. Aktiviteterna har sönderfallskorrigerats tillbaka till tidpunkten för avstängning av reaktorerna (11 mars 2011, kl. 05:47).

7.2 Detekterade radionuklider i förhållande till reaktorinventarier

Genom att studera kvoten mellan isotoperna ^{131}I och ^{133}I kan tidpunkten för när reaktorerna stoppades uppskattas. Antaget en BWR-reaktor med utbränning 38 MWd/kg vilket ger ett förhållande mellan de två främsta fissionerande isotoperna ^{235}U och ^{239}Pu på 70/30 [17] stämmer beräkningar utifrån uppmätta aktiviteter inom några timmars marginal med när reaktorerna vid Fukushima Daiichi stoppades den 11 mars, se Figur 20.



Figur 20. Skatning av tidpunkten när reaktorerna Fukushima Daiichi stoppades utifrån uppmätta aktivitetskvoter för $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$. Uppskattad tidpunkt för avstängning blir: 11 mars 2011 02:30 \pm 9 timmar. Om bränslet antas bestå enbart av uran förskjuts tidpunkten -2 timmar, antas istället enbart plutonium förskjuts tidpunkten +5 timmar.

Vid olyckan i Fukushima släpptes i huvudsak ädelgaser och lättflyktiga ämnen såsom jod, cesium och tellur ut under olycksförloppet, alla med kokpunkter under 1000°C för det rena grundämnet. De relativt höga aktivitetskoncentrationerna av tellur samt de vätgasexplosioner som inträffade indikerar att temperaturen i bränslet varit över 1000 °C. Partiell smältning av härdarna har också påvisats vilket indikerar att temperaturen delvis varit upp emot eller över 2000 °C, utsläpp av svårflyktiga ämnen till atmosfären har dock varit begränsade.

Enligt uppskattningar av reaktorinventarierna [18,19] var den totala härdaktiviteten av isotoperna ^{131}I , och ^{132}Te vid olyckstillfället av samma storleksordning, medan det totala inventarieret av ^{137}Cs var cirka 5-10 gånger mindre. Uppmätta aktivitetskoncentrationer av partikulärt ^{131}I är cirka 1-10 gånger högre än ^{132}Te -koncentrationerna, se Tabell 4 och 5, och cirka 100 gånger högre än ^{137}Cs -koncentrationerna, se Figur 19. Detta är konsistent med att jod är mera lättflyktigt än cesium och tellur. Kvoten mellan $^{129\text{m}}\text{Te}$ och ^{132}Te är i samma storleksordning som uppskattade härdinventarier.

Luftkoncentrationerna av ^{134}Cs och ^{137}Cs i Sverige uppvisade ett relativt konstant förhållande med ett medelvärde på ca 1 (se Figur 23), för ^{137}Cs halter högre än 50 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, dvs. signifikant över förekommande bakgrundsvärden. Detta överensstämmer med nationella mätningar i Europa och USA [15,20] och är även i samma storleksordning som kvoten skattad från rapporterade värden för reaktorinventarierna [18,19]. Även den i IMS-nätverket uppmätta kvoten är relativt konstant, men underskattar systematiskt det verkliga värdet p.g.a. att data inte är korrigerat för nuklid- och detektorspecifika effekter (se avsnitt 7.4).

7.3 Jämförelse av olyckorna i Tjernobyl och Fukushima

Sverige fick 1986 relativt stora mängder nedfall från reaktorolyckan i Tjernobyl, varav främst cesium fortfarande kan detekteras, varför en jämförelse med Fukushima är mycket relevant. Haveriet i Ukraina kom som en total överraskning och varken dess plats, omfattning eller tidpunkt var initialt kända. Att Sverige drabbades relativt hårt av nedfall från olyckan berodde främst på de meteorologiska förhållandena som rådde vid tillfället med sydostliga vindar kombinerat med nederbörd över de sydliga och mellersta delarna av Norrland.

I mars 2011 konfronterades Sverige med en helt annan situation. Olyckplatsen samt tiden för utsläppen var kända. Utsläppsmolnet kunde följas via mätningar inom det internationella nätverket. Källterm, spridning samt verkan i Sverige kunde uppskattas innan utsläppet först detekterades här den 21 mars.

Olyckan i Tjernobyl var en kriticitetsolycka med ett explosivt förlopp vilket medförde att ett flertal svår- eller mycket svårflyktiga nuklider spreds till atmosfären. I Stockholm uppmättes luftkoncentrationer på omkring 10 Bq/m³ av fissionsprodukter, främst lättflyktiga ämnen såsom jod, cesium och tellur men även mycket svårflyktiga ämnen såsom exempelvis, zirkonium (Zr), niob (Nb) och cerium (Ce) detekterades [21].

Olyckan i Fukushima hade ett långsammare förlopp där härdarna vid tre reaktorer blev överhettade och sedan delvis smälte. Utsläppen dominerades här helt av lättflyktiga ämnen, endast mycket små mängder av svårflyktiga nuklider uppmättes. I Stockholm uppmättes en maximal aktivitetskoncentration av lättflyktiga ämnen på omkring 2 mBq/m³, dvs. 5000 gånger lägre än 1986. En jämförelse mellan utsläppt aktivitet och vad som uppmätts i Sverige efter de atmosfäriska kärnvapenproven samt de två olyckorna ges i Tabell 11.

Tabell 11: Utsläppt aktivitet från atmosfäriska kärnvapenprover mellan 1945 – 1980 jämfört med utsläppen från olyckorna i Tjernobyl och Fukushima, samt detekterad deponerad och luftburen aktivitet i Sverige. 1 PBq = 10¹⁵ Bq. Siffror framför parentes anger medeldeposition i Sverige vid tidpunkten för maximum, siffror inom parentes anger variationen. Notera att data från kärnvapenproven samt Tjernobyl är kartlagda genom flyg- och fältmätningar, data från Fukushima är endast från de fåtal mätpunkter som redovisas i denna rapport.

Nuklid	KV-prov	Tjernobyl			Fukushima		
	Utsläppt aktivitet ²⁸ [PBq]	Utsläppt aktivitet ²⁹ [PBq]	Aktivitet i Sverige		Utsläppt aktivitet ³⁰ [PBq]	Aktivitet i Sverige ³¹	
			Deponerad ²⁸ [kBq/m ²]	Luftburen ³² [Bq/m ³]		Deponerad [kBq/m ²]	Luftburen [Bq/m ³]
¹³¹ I _{part}	675 000	~ 1800	55 (1-1000)	~ 10	100-200	≤ 0,01	~ 0,002
¹³⁷ Cs	948	~ 85	10 (0,2-200)	~ 1	10-20	≤ 0,0002	≤ 0,0005
¹³³ Xe	~ 2 000 000 ³³	~ 6500	-	-	~ 15 300 ³⁴	-	~ 4

Vid båda olyckorna uppskattas att i stort sett hela inventarierna av xenon har släppts ut. Detta innebär att utsläppet från Fukushima är större, eftersom haveriet omfattade tre reaktorer. 1986 fanns mycket få stationer som kunde mäta xenon och i Sverige fanns inga sådana möjligheter. Vid Tjernobylolyckan 1986 uppskattas vidare att 55 % av jodinventariet (¹³¹I), 33 % av cesiumet (¹³⁷Cs) och 25 % av telluret (¹³²Te) släpptes ut [23]. Preliminära uppskattningar från Fukushima visar att endast några få procent av det totala jodinventariet (¹³¹I) och någon procent av cesiumet (¹³⁷Cs) har släppts ut [12,18,19,25].

²⁸ Referens [22]

²⁹ Referens [23].

³⁰ Referens [24]

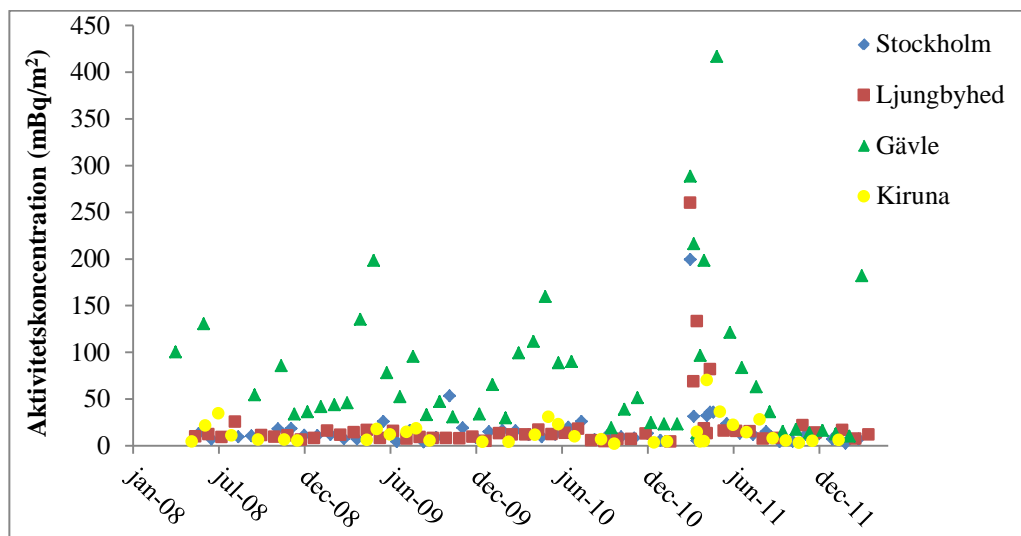
³¹ Denna rapport.

³² Referens [21].

³³ Beräknat på en total fissionsyield för atmosfäriska kärnvapenprov på 160,5 Mt (UNSCEAR 2000).

³⁴ Referens [14].

Ur strålskyddshänseende är det deponerad aktivitet som är av betydelse och speciellt nuklider med halveringstider längre än några år. Den viktigaste gammastrålande nukliden i dessa sammanhang är ^{137}Cs . I Sverige finns en bakgrund av deponerad ^{137}Cs efter både de atmosfäriska provsprängningarna och efter Tjernobyloolyckan. Den totalt deponerade aktiviteten av ^{137}Cs i Sverige efter de atmosfäriska kärnvapenproven under perioden 1945 – 1980 ligger på 3 kBq/m^2 och denna aktivitet är relativt jämnt spridd över landet. Efter Tjernobyloolyckan varierade den deponerade aktiviteten i Sverige mycket beroende på det aktuella väderläget med nederbörd över de sydostliga och mellersta delarna av Norrland. Högst deponerad aktivitet uppmättes i Gävletrakten, där deponerad aktivitet av ^{137}Cs på vissa ställen var så hög som 200 kBq/m^2 . Efter Fukushimaolyckan är uppmätt deponerad aktivitet i Ljungbyhed av ^{137}Cs ca $0,2 \text{ Bq/m}^2$. Nederbörden i Sverige under mars-april 2011 varierade med maximal nederbörd på 10 ggr mera än vid de stationer som ingår i nätverket [26]. Då molnet med radioaktiva partiklar var någorlunda jämt fördelat över landet kan det antas att den maximala depositionen i Sverige är $< 2 \text{ Bq/m}^2$, dvs. 5000 gånger lägre än medeldeponerad aktivitet i Sverige efter Tjernobyloolyckan. Depositionen av ^{137}Cs från Fukushimaolyckan utgör sålunda en försumbar del av total mängd deponerad ^{137}Cs i Sverige och bidraget härifrån kommer inte att kunna ses i mätningar framöver, se även Figur 21.



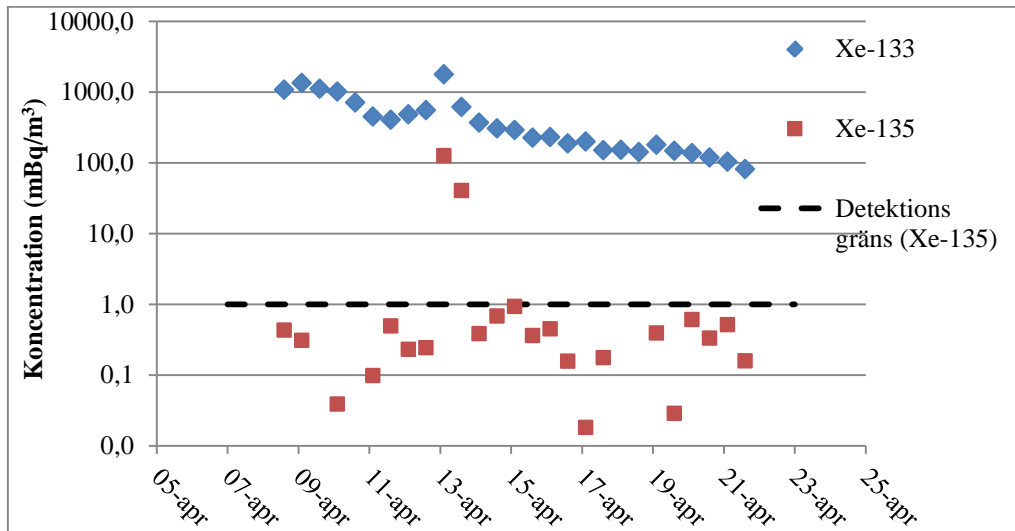
Figur 21. Uppmått deposition av ^{137}Cs i det svenska nationella nätverket under perioden mars 2008 - maj 2012. Det maximala uppmätta nedfallet från Fukushimaolyckan i Gävle motsvarar endast två gånger de halter som årligen uppmäts där.

7.4 Mätssystemen och begränsningar

Koncentrationerna av isotopen $^{133\text{m}}\text{Xe}$ med halveringstiden 2,2 dygn och en uppskattad inventariekvot på ungefär 30 gånger mindre än ^{133}Xe [20] kunde varken identifieras eller kvantifieras med hjälp av standardanalysrutiner. Avsaknaden av detektioner beror dels på att aktivitetskoncentrationen ligger nära eller under den dynamiska detektionsgränsen, dels på att SAUNA-systemet är optimerat för att detektera läckage av xenonisotoper efter ett underjordiskt kärnvapenprov. Signaturen för ett läckage från ett underjordiskt kärnvapenprov karakteriseras av andra kvoter mellan xenonisotoperna och storleksordningar lägre koncentrationer av xenon. Höga ^{133}Xe -koncentrationer bidrar till att försvåra detektionen och kvantifieringen av isotoperna $^{133\text{m}}\text{Xe}$ och $^{131\text{m}}\text{Xe}$ eftersom dessa tre isotoper starkt interfererar med varandra i analysen av mätdata.

Aktivitetskoncentrationerna av ^{135}Xe har vid tidpunkten för utsläppen uppskattats vara av samma storleksordning som ^{133}Xe . Trots detta detekterats inte ^{135}Xe inom nätverket efter Fukushimaolyckan, detta på grund av dess korta halveringstid (9,1 timmar). Isotopen detekterades däremot av IMS-stationen i Stockholm den 13 april i kombination med en

kraftigt ökad koncentration av isotopen ^{133}Xe , se Figur 22. Denna detektion kunde senare härledas till ett planerat utsläpp i samband med ett kortstopp vid ett svenskt kärnkraftverk till följd av en bränsleskada. Notera att detta utsläpp kunde detekteras trots de höga aktivitetskoncentrationerna av ^{133}Xe efter olyckan i Fukushima.



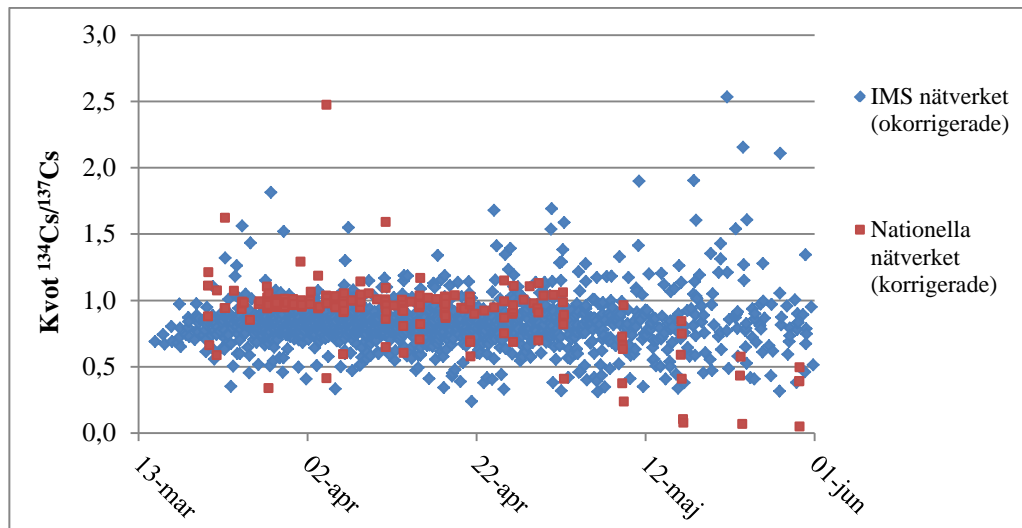
Figur 22. ^{133}Xe - och ^{135}Xe -koncentrationen uppmätt vid IMS-stationen i Stockholm. Detektionen av ^{135}Xe och ökningen av ^{133}Xe den 13 april kan härledas till ett planerat utsläpp från ett svenskt kärnkraftverk. Detta visar att SAUNA-stationerna kan detektera andra händelser (t.ex. ett kärnvapenprov) överlagrat ett stort xenonutsläpp i atmosfären.

Både IMS-systemet och det svenska övervakningssystemet är konstruerade för att detektera mycket låga halter av radioaktiva ämnen, och känsligheten är sålunda hög för dessa system. Detta innebär dessvärre att systemen inte fungerar optimalt vid höga koncentrationer av radioaktiva ämnen³⁵.

För xenonsystemen fås problem med kontamination av detektorerna p.g.a. minnes effekter där en del av xenonet absorberas av detektorn och därför ligger kvar som en bakgrund i nästkommande mätningar. En metod för att radikalt minska detta problem har utvecklats och kommer att implementeras i SAUNA-systemen [27]. Analysen av data försvåras även av att signalerna från de olika xenonisotoperna till viss del blir överlagrade.

För partikelstationerna finns motsvarande problem med att proverna blir mer aktiva än vad systemen är konstruerade för, vilket t.ex. innebär höga dödtider vid mätning. För flertalet av de isotoper som detekterades efter olyckan är det ofördelaktigt att mäta provet i den geometri som rutinemässigt används, d.v.s. med provet mycket nära detektorn. För isotoper med många olika gammaenergier finns risk för summationseffekter mellan dessa linjer vilket i sin tur kan leda till en felaktig bestämning av provets aktivitet. Dessa effekter är nuklid- och detektorberoende men korrektionsfaktorer för de berörda nukliderna kan beräknas eller uppmätas. Inom IMS-systemet är detta ännu inte implementerat och aktivitetsbestämningen för vissa nuklider, t.ex. cesium isotoperna ^{134}Cs och ^{136}Cs kan därför underskattas med 20-40 %. I Figur 23 visas kvoten $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ för aktivitetskoncentrationer uppmätta i IMS nätverket och det svenska nationella nätverket. Avvikelsen mellan aktivitetskoncentrationerna uppmätta i IMS-nätverket och det svenska nationella nätverket är konsistenta med korrektionsfaktorn som tagits fram för de detektorer som används vid FOI:s laboratorium, således kan antas att dessa faktorer kan användas som en första approximation till korrektionsfaktorerna för IMS-nätverket vid eventuella framtida händelser.

³⁵SSM driver andra nationella system som är anpassade för att mäta högre nivåer av radioaktiva ämnen vilka är mera lämpande i ett initialt skede vid en reaktorolycka eller ett annat stort utsläpp i vårt närområde.



Figur 23. Kvoten $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ för uppmätta aktivitetskoncentrationer i IMS-nätverket och det svenska nationella nätverket. Notera hur kvoten för IMS uppmätta aktivitetskoncentrationer systematiskt ligger lägre än kvoterna uppmätta i det nationella nätverket. Medelvärdet är 0,8 vilket är konsistent med beräkningar av summationseffekter för detektorer vid FOI:s laboratorium. Kvoten minskar signifikant för mätningar gjorda i Sverige i början på maj. Detta beror på att bidraget av ^{137}Cs i luften från resuspension av cesiumet från Tjernobylnedfallet inte längre är försumbart i jämförelse med mängden cesium från Fukushima.

7.5 Slutsatser

Utsläppen av gasformiga och lättflyktiga radioaktiva ämnen från kärnkraftshaveriet i Fukushima spreds globalt, i huvudsak över det norra halvklotet, och kunde följas genom mätningar inom CTBTO:s globala mätsystem för detektion av partikelbunden radioaktivitet och radioaktivt xenon. Uppmätta nuklider dominerades av radioaktiva xenon-, jod-, tellur- och cesium-isotoper, men mindre mängder av andra mer svårflyktiga nuklider detekterades också, främst i Japan och dess närområde.

Tillgång till data från IMS bidrog till att en god bild av utsläppets storlek, globala spridning och utspädning samt när utsläppet skulle nå Sverige kunde tas fram. Möjligheten inom det svenska nätverket att på kort varsel ställa om till kortare insamlingstider och även kortare mättider fungerade bra och gav en möjlighet att med god tidsupplösning följa hur radioaktiviteten spreds över Sverige och sedan avtog. Möjligheten att inom det svenska nätverket även mäta den gasformiga delen av radioaktivt jod visade också att den var så stor som 70-80 % av den totala mängden radioaktivt jod. Inom IMS-nätverket finns inte möjligheten att mäta gasformigt jod, vilket kan ge en missvisande bild av utsläppets storlek. Skillnaden mellan IMS-nätverket och det nationella nätverket är dock att syftet med nätverken är helt olika. Det svenska nationella nätverkets huvudsyfte är strålskyddsberedskap, och för att kunna göra bedömningar av det totala dosbidraget är det viktigt att ha möjlighet att mäta allt jod. För att kunna uppskatta dosbidrag är det också viktigt att mäta deponering av de olika nukliderna, vilket görs inom det svenska nätverket men inte inom IMS. Tillgång till xenondata från IMS-nätverket är dock av stor vikt för att kunna utföra källtermsberäkningar eftersom spridningen av xenon inte påverkas av deposition under transporten.

Det visade sig också vara användbart att ha tillgång till preliminära data från mätningarna. Tydligast visades detta vid stationen i Takasaki, Japan, där det på detta sätt kunde påvisas mer exakt när det radioaktiva molnet nått stationen genom att de första mätningarna registrerade aktivitet som läckte in direkt i mätkamrarna. Även för övriga stationer användes preliminära data, men då för att snabbare få information om aktiviteten för de

olika proven. Genom att analysera preliminära data kan den inneboende fördröjningen i systemen minskas från tre dygn till drygt två dygn för partikelstationerna.

De rapporter av mätdata som erhålls från IDC i Wien är i stort användbara, men om noggrannare analyser skall göras behövs även en egen kompetens att analysera mätdata, bland annat eftersom en del viktiga korrektioner, såsom t.ex. summationskorrektioner, inte är implementerade i IDC:s rapporter. För xenonsystemen är IDC:s analysrutiner inte klara och även där behövs därför en egen förmåga att analysera data. Inom det svenska NDC:et finns idag goda möjligheter att göra analyser av data, både seismiska och radionukliddata. Olyckan i Fukushima ledde också till att denna förmåga utvecklades och förbättrades då NDC:et fick en större klarhet i vilka analyser och data som behövdes.

8 Referenser

- [1] T. Lay and H. Kanamori, "Insights from the great 2011 Japan earthquake", *Physics today*, pp 33-39, Dec. 2011.
- [2] "IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami", IAEA Mission Report 24 May – 2 June 2011.
- [3] "Fukushima Accident 2011", World Nuclear Association (WNA), http://world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html (2012.03).
- [4] "Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" Institute of Nuclear Power Operations (INPO), INPO 11-005, Revision 0, Open Distribution, Nov. 2011.
- [5] F. D'Auria *et al.*, "The Fukushima Event: The Outline and the Technological Background", *Science and Technology of Nuclear Installations*, Volume 2012, Article ID 507921, 2012.
- [6] U. Bäverstam, "Stråldoser och markbeläggning i Sverige efter en stor kärnkraftolycka" SSI-rapport 95-32, 1995.
- [7] F. Tanabe, "Analyses of core melt and re-melt in the Fukushima Daiichi nuclear reactors", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 49:1, pp. 18- 36, 2012.
- [8] M. Hirano *et al.*, "Insights from review and analysis of the Fukushima Dai-ichi accident", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 49:1, pp 1- 17, 2012.
- [9] U. Stoehker, M. Nikkinen and A. Gheddou, "Detection of radionuclides emitted during the Fukushima nuclear accident with the CTBT radionuclide network", *2011 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*.
- [10] A. Ringbom, XECON, <http://www.sourceforge.net/projects/xecon>.
- [11] N. Tooloutalaie *et al.*, "Radionuclide particles in ground level air in Sweden during 2011", FOI rapport, FOI-R--3459--SE, 2012.
- [12] "Summary of the Fukushima accident's impact on the environment in Japan, one year after the accident", IRSN, France, <http://www.irsn.fr>.
- [13] M. Schöppner *et al.*, "Estimation of the time-dependent radioactive source-term from the Fukushima nuclear power plant accident using atmospheric transport modeling", *Journal of Environmental Radioactivity*, doi:10.1016/j.jenvrad.2011.11.008.
- [14] A. Stohl *et al.*, "Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion and deposition", *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, pp. 2313-2343, 2012.
- [15] O. Masson *et al.*, "Tracking of Airborne Radionuclides from Damaged Fukushima Dai-Ichi nuclear reactors by European Networks", *Env. Sci. and Tech.*, vol. 45, pp. 7670-7677, 2011.
- [16] M. Uematsu *et al.*, "Aerosol residence times and iodine gas/particle conversion over North pacific as determined from Chernobyl radioactivity", *Geochemical Journal*, vol. 22, pp. 157-163, 1988.

- [17] R. Håkansson, "Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle", Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Rapport (R-99-74), 2000.
- [18] G. Kirchner *et al.*, "Radioactivity from Fukushima Dai-ichi in air over Europe; part 2: what can it tell us about the accident?", *Journal of Environmental Radioactivity*, doi:10.1016/j.jenvrad.2011.12.016.
- [19] G. Pretzsch, V. Hannstein and M. Wehrfritz, "Radioactive Inventory at the Fukushima NPP", Eurosafe forum 2011, Paris, France. <http://www.eurosafe-forum.org/>.
- [20] T. Bowyer *et al.*, "Elevated radionuclides detected remotely following the Fukushima nuclear accident", *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 102:7, pp. 681-687, 2011.
- [21] L-E. De Geer *et al.*, "Radioactive Particulates in Air and Precipitation in Sweden. Second Quarter 1986", FOA Rapport C20629-9.2, 1986.
- [22] S. Matsson och L. Moberg, "Fallout from Chernobyl and atmospheric nuclear weapons tests – Chernobyl in perspective." L. Moberg (red), *The Chernobyl fallout in Sweden, results from a research programme on environmental radiology*, Statens strålskyddsinstitut, 1991.
- [23] UNSCEAR, 2000. "Sources and effects of ionizing radiation, United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes", United Nations, New York.
- [24] "Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations" Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, juni 2011.
- [25] INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale), "Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District off the Pacific Ocean Earthquake." <http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110412-4.pdf> (NCS).
- [26] SMHI, <http://www.smhi.se>.
- [27] L. Bläckberg *et al.*, "Investigations of surface coatings to reduce memory effects in plastic scintillator detectors used for radionuclide detection", *Nucl. Instr. and Meth. A*, vol. 656, pp. 84-91, 2011.

Bilaga 1. Reaktordata för Fukushima Daiichi.

Några utvalda designkarakteristika för Fukushima Daiichi. Från Ref [4].

	Enhet 1	Enhet 2	Enhet 3	Enhet 4	Enhet 5	Enhet 6
Reaktor typ /Inneslutning	BWR / Mark I (Inneslutningen i enhet 6 är av typen Mark II)					
Driftstart	mars-71	juli-74	mars-76	okt-78	apr-78	okt-79
Elektrisk effekt [MWe]	460	784				1100
Termisk effekt [MWt]	1380	2381				3293
Antal bränsleelement i härden under drift	400	548				764
Bränsle	Urandioxid (viss andel MOX i enhet 3)					
Metalliskt uran i härden under drift [ton]	69	94				132
Antal bränsleelement i härden vid olyckstillfället	400	548	548	0	548	764
Antal bränsleelement i bränslebassängen vid olyckstillfället använt / färskt	292 / 100	587 / 28	514 / 52	1331 / 204	946 / 48	876 / 64

Bilaga 2. Data för väsentliga radionuklider.

Halveringstider för några utvalda nuklider, osäkerheten avser 1σ .

Grundämne	Isotop	Halveringstid
Barium	^{140}Ba	12,7527 (23) d
Cesium	^{134}Cs	2,0652 (4) år
	^{136}Cs	13,16 (3) d
	^{137}Cs	30,08 (9) år
Jod	^{131}I	8,0252 (6) d
	^{132}I	2,295 (13) h
	^{133}I	20,83 (8) h
Lantan	^{140}La	1,67855 (12) d
Molybden	^{99}Mo	65,976 (24) h
Niob	^{95}Nb	34,991 (6) d
Teknetium	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,0067 (5) h
Tellur	^{129}Te	69,6 (2) m
	$^{129\text{m}}\text{Te}$	33,6 (1) d
	$^{131\text{m}}\text{Te}$	33,25 (25) h
	^{132}Te	3,204 (13) d
Xenon	$^{131\text{m}}\text{Xe}$	11,84 (4) d
	$^{133\text{m}}\text{Xe}$	2,198 (13) d
	^{133}Xe	5,2475 (5) d
	^{135}Xe	9,14 (2) h

Data från: ENSDF, Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF), <http://www.nndc.bnl.gov>, 2006.

Bilaga 3. Radionuklidstationer inom IMS.

Indelning av radionuklidstationerna efter världsdel. Endast de stationer som används i denna rapport är inkluderade.

Amerikanska kontinenten

<i>Partikelstation</i>	<i>Xenonstation</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Stad</i>	<i>Land</i>
CAP14		49,3°N	123,2°V	Vancouver, BC	Kanada
CAP15		74,7°N	94,9°V	Resolute, NWT	Kanada
CAP16		62,5°N	114,5°V	Yellowknife, NWT	Kanada
CAP17		47°N	53°V	St. John's, NL	Kanada
FRP28		17°N	62°V	Pointe-a-Pitre (Guadeloupe)	Frankrike
MXP44		28°N	113°V	Baja California	Mexiko
PAP50		8,9°N	79,6°V	Panama City	Panama
USP70		38,7°N	121,4°V	Sacramento, CA	USA
USP71		55°N	160°V	Sand Point, AK	USA
USP72		28,3°N	80,6°V	Melbourne, FL	USA
USP74	USX74	37,2°N	99,8°V	Ashland, KS	USA
USP75	USX75	38°N	78°V	Charlottesville, VA	USA
USP76		64,4°N	147,1°V	Salchaket, AK	USA

Europa, Afrika och Mellanöstern

<i>Partikelstation</i>	<i>Xenonstation</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Stad</i>	<i>Land</i>
CMP13		4,2°N	9,9°Ö	Douala	Kamerun
DEP33		47,9°N	7,9°Ö	Freiburg	Tyskland
ISP34		64°N	21,9°V	Reykjavik	Island
KWP40		29°N	48°Ö	Kuwait City	Kuwait
MRP43		18°N	17°V	Nouakchott	Mauretanien
NOP49	NOX49	78,2°N	16,4°Ö	Longyearbyen	Norge
PTP53		37,4°N	25,4°V	Ponta Delgada (Azorerna)	Portugal
RUP54		58,6°N	49,4°Ö	Kirov	Ryssland
RUP61		56,7°N	37,3°Ö	Dubna	Ryssland
SEP63	SEX63	59,4°N	17,9°Ö	Stockholm	Sverige

Asien

<i>Partikelstation</i>	<i>Xenonstation</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Stad</i>	<i>Land</i>
	CNX22	23,0°N	113,3°Ö	Guangzhou	Kina
JPP37		26,5°N	127,9°Ö	Okinawa	Japan
MYP42		2,6°N	101,5°Ö	Kuala Lumpur	Malaysia
MNP45		47,5°N	107°Ö	Ulaan Baator	Mongoliet
PHP52		14,5°N	121°Ö	Quezon City	Filippinerna
RUP58		43,7°N	131,9°Ö	Ussurijsk	Ryssland
RUP59		53,9°N	84,8°Ö	Zalesovo	Ryssland

Stilla havet

<i>Partikelstation</i>	<i>Xenonstation</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Stad</i>	<i>Land</i>
KIP39		2°N	157°V	Kiritimati	Kiribati
RUP60		53,1°N	158,8°Ö	Petropavlovsk-Kamtchatskij	Ryssland
USP77	USX77	19,3°N	166,6°Ö	Wake Island	USA
USP78		28°N	177°V	Midwayöarna	USA
USP79	USX79	21,5°N	158°V	Oahu, HI	USA
USP80		13,7°N	144,9°Ö	Upi (Guam)	USA

**Södra
halvklotet**

<i>Partikelstation</i>	<i>Xenonstation</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Stad</i>	<i>Land</i>
AUP09	AUX09	12,4°S	130,7°Ö	Darwin, NT	Australien
FJP26		18°S	177,5°Ö	Nadi	Fiji
PGP51		3°S	150°Ö	New Hanover	Papua Nya Guinea