

JAN BURMAN, JAN SJÖSTRÖM, HÅKAN GRAHN,
LEIF PERSSON, ROBERT SIGG, PONTUS VON SCHOENBERG,
LAGE JONSSON, OSCAR BJÖRNHAM, CHRISTIAN LEJON,
FREDRIK SCHÖNFELDT



Jan Burman, Jan Sjöström, Håkan Grahm,
Leif Persson, Robert Sigg, Pontus von
Schoenberg, Lage Jonsson, Oscar Björnham,
Christian Lejon, Fredrik Schönfeldt

Slutrapport 2016-2018

Spridning i luft, mark och vatten



Bild/Cover: (Jan Burman)

Titel	Årsrapport 2018 Spridning i luft, mark och vatten: 2016-2018
Title	Report 2018 Dispersion in air, soil and water 2016-2018
Rapportnr/Report no	FOI-R--4730--SE
Månad/Month	12
Utgivningsår/Year	2018
Sidor/Pages	25 p
Kund/Customer	Fö
Forskningsområde	2. CBRN-frågor och icke-spridning
FoT-område	Ej FoT
Projektnr/Project no	A403318
Godkänd av/Approved by	Åsa Scott
Ansvarig avdelning	CBRN-Skydd och säkerhet

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

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

Sammanfattning

Inom anslagsprojektet *Spridning i luft, mark och vatten* har forskning och utveckling med avseende på spridningsberäkningar av farliga ämnen i luft, mark och vatten genomförts.

Resultat från beräkningsmodellerna syftar till att ge stöd till försvarsmakten, civila myndigheter och annan forskningsverksamhet inom FOI. Stödet kan exemplifieras som beslutsunderlag genom specifika beräkningar eller som programvara som dels kan bli en del av andra system, dels utgöra fristående kunskapsstöd.

Genom att simulera spridningsförlopp kan en spridningshändelse studeras med avseende på förlopp, påverkan på omgivning och eventuella skadeverkningar på kort och lång sikt. Även faktiska händelser kan studeras i efterskott för att ge ytterligare förståelse för en viss typ av händelse.

Under perioden har forskning och utveckling genomförts för lokala, mesoskaliga och globala spridningsmodeller. Utöver dessa har utveckling av inversa spridningsmodeller bedrivits, modeller för osäkerhetsskattning och även utveckling av experimentuppställningar för spridningsförsök av B-agens i mark.

Studier av scenarier där spridning av CW-agens ingår har genomförts. Deposition på mark och vatten där transport ner till grundvattnet har studerats.

Anslaget är brett men det ger också en god förmåga att kunna hantera olika frågeställningar för olika frågeställningar som kan uppkomma för FM:s, civila myndigheters och FOI:s behov.

Nyckelord:

Spridningsberäkningar, Dispersion Engine, turbulens, ensemblemodeller, inversa modeller, källbestämning, spridning i mark.

Summary

In this project, research and development regarding dispersion calculations of hazardous substances in air, soil and water has been carried out.

Results from computational models are designed to provide support to the armed forces, civilian authorities and other research activities within the FOI. The aid may be exemplified as decision support information through specific calculations or as software that can be part of other systems, on the other hand constitute independent knowledge support. By simulating the dispersion process, a dispersion event is studied with respect to how it develops, the impact on the environment and any adverse effects in the short and long term, although actual events can be studied at a later time to give additional understanding of a particular type of event. During the project period, the research and development has been carried out for local, meso-scale and global dispersion models. In addition to these, the development of inverse scattering models is conducted, models for uncertainty estimates and also the development of experimental setups for dissemination of dispersion of B-agents in soil has been carried out. Studies of scenarios where the dispersion of CW agents included have been implemented is presented. The transport of deposited CW agents on land and water down to the groundwater has been studied. The scope is broad but it also provides an ability to deal with different questions for different issues that may arise for the Swedish Armed Forces, civilian authorities and FOI.

Keywords: Dispersion modelling, Dispersion Engine, turbulence, ensemble models, inverse modelling, source estimation, dispersion in soil.

Innehållsförteckning

1	Inledning	9
2	Återblick 2016 – 2017	10
2.1	Omvärldsanalys	10
2.2	Källmodeller	10
2.2.1	Planering av MODISAFE 2016-2017	10
2.2.2	B-källa: Faktorer att beakta vid källmodellering avseende spridning av biologiska agens.....	11
2.3	Spridning i atmosfären	11
2.3.1	LES-modeller för urban spridning	11
2.3.2	EDA-projektet MODITIC	12
2.3.3	Aerosoldynamik för långväga spridning	12
2.3.4	Snabb vindfältmodell för varierande terräng/urban miljö	12
2.3.5	Förbättring av LPELLO:s modul för konvektiva förhållanden	13
2.4	Spridning i mark och vatten.	13
2.5	Osäkerhetsberäkningar och inversmodeller	13
3	Resultat 2018	14
3.1	Omvärldsanalys	14
3.2	Källmodeller	14
3.2.1	Planering av MODISAFE 2018	14
3.3	Spridning i atmosfären	14
3.3.1	Validering av FOI:s tunggasmodeller.....	14
3.3.2	Lokal spridning CFD – LES	15
3.3.3	Regional spridning	16
3.4	Spridning i mark	17
3.4.1	RN-händelse – nedfall och spridning i infiltrationsbädd.....	17
3.5	Osäkerhetsberäkningar och inversmodeller	19
3.5.1	Invers modellering.....	19
3.5.2	Beräkningseffektiv kombination av osäkerheter i källa och spridning	20
3.6	DE - Dispersion Engine.....	21
3.6.1	Systembeskrivning.....	21
3.6.2	Arkitektur	21
4	Slutsatser	23
5	Referenser	25

1 Inledning

Farliga ämnen är skadliga först när människa, djur eller andra objekt kommer i kontakt med ämnet i fråga. Skaderisken beror på objektet samt de mängder och koncentrationer som det kan röra sig om. Frågorna; Hur mycket? Var? När? behöver besvaras för att en riskuppskattning ska kunna göras. Förmågan att hantera de beräkningar som krävs är en kompetens som är viktig vid hot och riskstudier.

En tydlig trend inom spridningsmodellering är integration av spridningsmodeller i större system, både för risk- och konsekvensanalys, samt för fusion/assimilation av sensordata för förbättrade modellresultat. En annan trend är koppling av meteorologiska modeller på flera skalor från global till lokal (även urban) skala och att detaljeringsgraden i enskilda modeller ökar. Detta gäller såväl topografi (t.ex. urban miljö) som modellering av fenomen i det atmosfäriska gränsskiktet. Källans position kan vara okänd men estimeras ur kända observationer. Inversmodellering är en metod under utveckling, där syftet är att bl.a. kunna lokalisera källpositionen för ett utsläpp av farliga ämnen. Det finns alltid ett mått av osäkerhet kring de värden som olika parametrar har, exempelvis vindstyrka och riktning samt källstyrka på de ämnen som släpps ut vid en spridningshändelse. Detta mått på osäkerhet kan ge information om hur beräkningsresultat ska hanteras. Ensemblemodellering är en sådan metod som är under utveckling.

En kedja av modeller krävs för att beskriva ett förlopp från utsläpp till effekt på människa eller miljö. Detta projekt syftar till att utveckla enskilda modeller för att kunna bidra till utsläpps- samt transportdelen av den ovan nämnda kedjan och att utveckla en plattform så att de enskilda modellerna kan nyttiggöras i andra system med behov av spridningsberäkningar. Effekter på människa och miljö hanteras i projektet *Effektmodeller*.

Rapporten beskriver verksamhet under 2018 och en del resultat från projektet presenteras. En kort återblick på hela projektiden 2016-2018 redovisas. Rapporten är huvudsakligen uppdelad i de arbetspaket som projektet övergripande är uppdelat i:

- Omvärldsbevakning
- Källmodeller
- Spridning i komplex miljö i atmosfären
- Spridning i mark och vatten
- Osäkerhetsberäkningar och inversmodeller.

2 Återblick 2016 – 2017

Här återges ett axplock ur årsrapporterna från 2016 och 2017. Mer utförlig information återfinns i respektive årsrapport, [1, 2].

2.1 Omvärldsbevakning

Konferenser och forskarmöten som besökts är bl.a. HARMO 17¹, *Jack Rabbit II* under 2016 och HARMO 18, GMU samt Metodkonferensen under 2017.

HARMO*nisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes* är en konferens som lockar deltagare från hela världen och bidrar starkt till produktiva möten och presumtiva nya projekt. Ett exempel på ett sådant projekt är *Jack Rabbit II* där ett möte på HARMO ledde till en inbjudan till ett fältexperiment, vilket i sin tur ledde till att FOI kunde delta i ett valideringsprojekt, (se vidare resultat 2018). *Transport & Dispersion modeling conference* på Annual George Mason University (GMU) är på samma sätt en konferens med goda möjligheter till att presentera sitt arbete och kunna bli inbjuden till framtida samarbeten. Metodkonferensen arrangeras av SMHI och Försvarsmakten gemensamt och riktar sig till stor del till meteorologer som verkar inom Sverige. Spridningsmeteorologi, osäkerhetsberäkningar och ensemblemetoder är mycket relevanta för denna konferens och deltagande medför därför stöd och utveckling inom dessa områden.

FM deltar i ett antal NATO-ledda grupper för utveckling av olika förmågor. Sverige deltar som Partnerskap för fred (PfP)-nation och FOI bidrar med kunskap inom spridningsberäkningar panelen JCBRND-CDG IMP² som stöd till FM. Under 2016 agerade FOI värd för mötet tillsammans med FM-SkyddC och mötet var lokaliserat i FOI:s konferenslokaler i Kista. FOI deltog under 2017 mötet i Oslo med stöd rörande bl.a. riskavstånd vid C-händelser.

2.2 Källmodeller

2.2.1 Planering av MODISAFE 2016-2017

Deltagande i internationella samarbeten är positivt då det ger ökad kunskap per insats, både i data och forskningskunskap, men även när det gäller arbetsmetoder och inblick i framtida forskning. Genom EDA har FOI deltagit i ett par projekt, nu senast MODITIC tillsammans med FFI, DGA, INERIS och ENFLO³. Konsortiet plus några intressenter är villiga att starta ett nytt projekt inriktat på deposition, resuspension och avdunstning. Tyvärr har en långsam process hos EDA förskjutit projektstart långt över önskade gränser. Positivt är dock att deltagarna fortsatt har intresse av att delta, (se vidare Resultat 2018).

Aktiviteter rörande källmodeller avvaktar start i projektet för ökad effektivitet.

¹ <https://www.harmo.org/conferences/Budapest/17harmo.asp>

² IMP(Information Management Group), NAAG(NATO ARMY ARMAMENT GROUP), JCBRND-CDG (Joint CBRN Defence Capability Development Group)

³ En del av University of Surrey, Guildford.

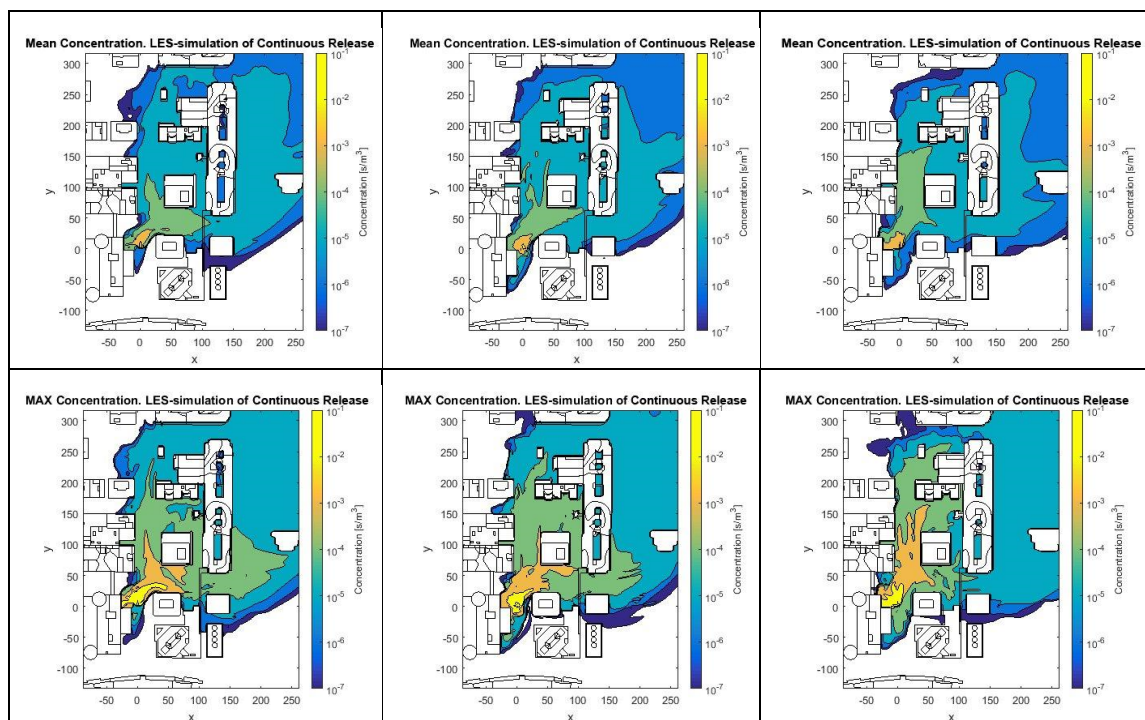
2.2.2 B-källa: Faktorer att beakta vid källmodellering avseende spridning av biologiska agens

Biologiska agens har vissa unika egenskaper som gör dem attraktiva för anpassning och användning som ett vapen i krig. De flesta biologiska vapen (BW) består av levande organismer (toxiner är undantaget) och således kan de replikera sig när de en gång spridits. I årsrapport för 2017 [2] presenterades mer i detalj vad som karaktäriserar en B-källa och vad en modell ska beskriva.

2.3 Spridning i atmosfären

2.3.1 LES-modeller för urban spridning

För att utvärdera konsekvenserna av spridning av toxiska ämnen i stadsmiljö, kan det krävas förmåga att prediktera detaljer i det turbulenta vindfältet eftersom, för många giftiga gaser, inträffar akut förgiftning redan under den första koncentrationstoppen som vanligtvis har en löptid på mindre än 1 min. På grund av vindens slumpmässiga karaktär, kan dock inte en enskild luftvirvel förutsägas. Stora lokala variationer finns och även på korta tidsintervall, dvs, mindre än ett par minuter. Därför, för att kunna analysera konsekvenserna av spridning av farliga ämnen, finns en trend att använda alltmer komplexa CFD-modeller, inklusive Large Eddy Simulation (LES). Dessa används för att beskriva oregelbundenhet och variationer i vind och koncentrationsfält. För att kunna tolka beräkningsresultaten kan det vara nödvändigt att analysera och jämföra resultat från olika LES-modeller samt att jämföra beräkningsresultat från modellerna med uppmätta resultat från experiment gjorda i t.ex. stadsmiljö.



Figur 1. Konturgrafer av predikerad normaliserad koncentration C/Q på 1,5 meters höjd vid ett kontinuerligt utsläpp i enlighet med experimentets beskrivning. Vänstra fönstren visar resultat från simulering med Smagorinsky SGS-modell med statiska randvillkor. Mellanfönstren visar resultat från simulering med SIGMA-modellen med statiska randvillkor och till höger visas SIGMA-modellen med syntetiska turbulenta randvillkor. På övre raden visas medelkoncentration och den undre, maxkoncentration över simuleringen.

I figur 1 visas att det beräknade medelvärdet av den normaliserade koncentrationen C/Q s/m³ (där C är koncentrationen och Q är källstyrkan för utsläppet) för Smagorinsky- och SIGMA-modellen är ganska lika. Den noterade skillnaden är att SIGMA-modellen ger ett område med hög koncentration närmare källan. I sin helhet publicerades arbetet i en vetenskaplig artikel [3]. Där presenteras en jämförelse mellan beräknade data och uppmätta data från JU 2003⁴. Det visar sig att simulerade maxvärden ligger närmare uppmätta maxvärden än motsvarande jämförelse med medelvärden. Det tyder på att modellen ger en bra bild av de fluktuationer som förekommer i verkligheten vilket kan ge en bra bild över aktuella riskområden.

2.3.2 EDA-projektet MODITIC

Projektet som avslutades under 2016 var inriktat på validering av CFD-modeller och beredskapsmodeller. Data från vindtunnelförsök genomförda vid ENFLO-laboratoriet vid University of Surrey under Dr Alan Robins, var den referens som modellerna jämfördes med. Exempelen inkluderade utsläpp av neutralt bojanta samt tunga gaser. Resultat från dessa studier finns i separata rapporter och har presenterats vid HARMO 17, (se ovan). Redovisning återfinns i årsrapport för 2016 [1].

2.3.3 Aerosoldynamik för långväga spridning

En aerosol påverkas av fysikaliska och kemiska processer vid sin färd genom luften. Aerosoler finns överallt omkring oss men vi är intresserade av att följa en utsläppt, potentiellt farlig, aerosol genom luften, exempelvis radioaktiva partiklar. Flera aerosoldynamiska processer, däribland deposition, våt och torr, koagulering, kondensationstillväxt, kemisk omvandling förändrar aerosolens egenskaper och dess storleksspektrum. Arbetet med aerosoldynamik har skett i samarbete med MSB 2:4 projektet *Aerosoldynamik i spridningsmodeller för långväga transport av radioaktiva partiklar*, som avslutas 2017. Arbetet med aerosoldynamik har under 2017 haft fokus på att implementera nya rutiner för våtdeposition. Dessa rutiner är implementerade i FOI:s långväga spridningsmodell PELLO och en version är implementerad för Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, i den operativa miljön på SMHI.

2.3.4 Snabb vindfältmodell för varierande terräng/urban miljö

En tidigare utvecklad modell för beräkning av vindfält i urban miljö behöver ersättas pga. prestandaskäl. En ny lösningsmetod för beräkning av vindfält i varierande terräng/urban miljö håller på att testas med initialt goda resultat. Det är en finita element-metod (FEM) som använder sig av flera olika *open source*-moduler för att bl.a. generera beräkningsgridar.

Den föregående beräkningsmodellen var baserad på finita differensmetoder. Fördelen med att gå från en formulering av problemet med finita differenser till finita element är, förutom den goda tillgängligheten till *open source*-moduler, att simuleringar av scenarier med mer komplex topografi, förenklas.

⁴JOINT URBAN 2003 - OKLAHOMA CITY

Sommaren 2003 genomfördes ett fältförsök i Oklahoma City för studier av atmosfärisk transport och spridning i en urban miljö under ledning av DTRA and DHS.

2.3.5 Förbättring av LPELLO:s modul för konvektiva förhållanden

Valideringar av den lokala spridningsmodellen LPELLO mot mätserier från Prairie Grass-projektet [4] visade att modellen kraftigt underprognosticerade (med mer än en faktor tio) marknära koncentrationer under konvektiva meteorologiska förhållanden. Syftet med denna studie var att hitta orsaken och dess lösning. Initiala hypoteser handlade om att det kunde finnas svagheter i hur den uppställda modellen beskrev verkligheten, men misstankar fanns även om att det kunde finnas något fel i programkoden.

Ett fel i programkoden visade sig vara orsaken till de dåliga valideringsresultaten för spridningsmodellen LPELLO. När dessa rättats så erhålls acceptabla resultat som ligger inom osäkerheterna hos Prairie Grass-projektet. Studien som gjordes på spridningsmodellens fysik och randformulering pekar på att inga problem finns i dessa delar; inga ändringar infördes.

Relativt få simuleringar har gjorts med LPELLO under konvektiva förhållanden eftersom att behovet varit litet. Vid de gjorda simuleringarna har det framkommit att beräkningstiderna är markant mycket längre än för motsvarande simuleringar under neutrala och stabila förhållanden; eftersom att det är viktigt för användbarheten att dessa inte är för långa vore ett förbättringsförslag att se över den konvektiva modulen i syfte att öka prestandan.

2.4 Spridning i mark och vatten.

Problematik kring transport i mark har tidigare beaktats men under 2016 studerades dessutom aspekten med kopplingen transport i mark till luft och tvärtom. Exempel på metoder presenterades 2016 [1]. Under 2017 [2] studerades ett scenario med RN-deposition med målsättningen att applicera densamma på de metoder som finns idag vad gäller bl.a. dricksvattenproduktion. Se kapitel 3, Resultat 2018 för vidare information.

2.5 Osäkerhetsberäkningar och inversmodeller

Under 2017 har den inversa metodiken utvidgats till att uppskatta position samt *tidsvariabel* källstyrka från en kontinuerlig punktkälla. Tidigare har källan antagits ha en *konstant* källstyrka. I studien har vindtunneldata från EDA-projektet MODITIC använts.

Mätdata inkluderar en kort mätperiod innan källan slås på, och en kort mätperiod efter källan slagits av. Dessa bakgrundsdata utvidgades periodiskt till sensorsignaler över en tidshorisont omfattande 150 timmar (fullskala), där utsläppet började efter ca 50 timmar och slutade efter ca 100 timmar (fullskala). På grund av att det inversa problemet är illa ställt (känsligt för små förändringar i indata) så introduceras regulariseringstermer i minstakvadratmetoden. En möjlig väg framåt kan vara att använda fullständig grid-sökning för källpositionen, där man för varje fix källposition erhåller ett kvadratisk program för källstyrkorna.

Vi har identifierat två områden som kräver vidare utveckling:

1. Test och implementation av effektivare optimeringsmetoder anpassade efter det aktuella icke-linjära minstakvadratproblemet, som är ett separabelt problem.
2. Test och implementation av *parametervalsmetoder* för det regulariserade problemet, dvs. en metod för att automatiskt, med användning av aktuella data, välja bra värden på regulariseringsparametrarna.

3 Resultat 2018

3.1 Omvärldsbevakning

NERIS Workshop Dublin 2018

Leif Persson och Håkan Grahn besökte den fjärde workshopen för NERIS, *Adapting nuclear and radiological emergency preparedness, response and recovery to a changing world* i Dublin under 2018. Syftet med resan vara att inhämta kunskap om inversmodellering för radioaktiva ämnen på den regionala skalan. Det som föranledde intresset var upptäckten av Ruthenium-106 hösten 2017 i luftfilterstationen i Kista som ingår i CTBTO-nätverket för övervakning av provsprängningsavtalet. Misstanken då var att Ruthenium-106 hade läckt ut av misstag. Ett flertal av mätstationerna i CTBTO-nätverket mätte Ruthenium-106 och utifrån dessa mätningar går det att göra inversmodellering för att lokalisera källan. Under workshopen presenterade IRSN (Frankrike), BfS (Tyskland) och SCK•CEN (Belgien) sina resultat från deras modelleringar. Av dessa presentationer var det framförallt den framförd av P. De Meutter från SCK•CEN som var intressant och han är en tänkbar samarbetspartner i framtiden.

3.2 Källmodeller

3.2.1 Planering av MODISAFE 2018

Under 2018 har inte något avtal för EDA-projektet MODISAFE tecknats.

3.3 Spridning i atmosfären

3.3.1 Validering av FOI:s tunggasmodeller

Många industriella kemikalier som är i gasform vid normala tryck och temperaturer, förvaras och transporteras i ett kondenserat tillstånd. Det betyder att trycket har höjts så mycket att gasen har kondenserats till en vätska. Om en behållare med sådan tryckkondenserad gas brister skapas ett kraftigt utsläpp av vätska som snabbt förångas som följd av tryckfallet. Denna termodynamiska process medför en snabb temperatursänkning av gasen som då får en hög densitet. Det är nu ett utsläpp av tunggas. Den specifika följden för luftspridning av tunggas är att den till stor del följer marken, upplever minskad utspädning av turbulens och därmed ger upphov till förhöjda koncentrationer. Då människor normalt sett befinner sig just i området närmast marken infinner sig i fallet med tunggasutsläpp flera faktorer som ökar skaderisken. FOI:s två modeller för lokal spridning, PUMA och LPELLO, har båda inbyggt stöd för tunggassimulering. Denna process är komplicerad att modellera både fysikaliskt och numeriskt och det är relativt okänt hur modellerna presterar med denna typ av källa. Under 2018 har en valideringsstudie genomförts där båda modellerna har jämförts mot experimentell data från omfattande fältförsök som har genomförts inom ramen för det amerikanska projektet *Jack Rabbit II* där bl.a. DHS och UvU har ingått.



Figur 2. Utsläpp av nästan 9 ton klorgas under ett av försöken inom projektet *Jack Rabbit II* på Dugway Proving Ground, Utah. Bild med tillstånd av UvU.

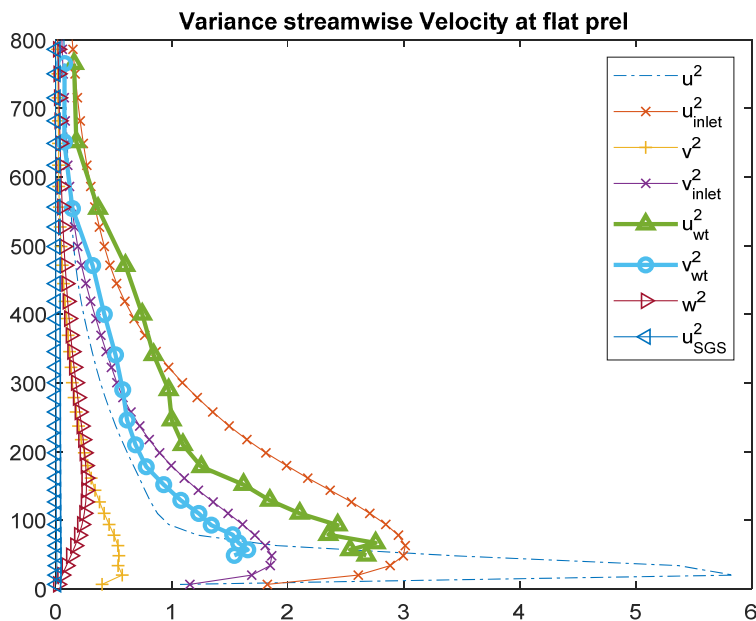
Ett omfattande nätverk av sensorer var utplacerade på avstånd från 85 m upp till 11 km. I denna studie replikeras försöket digitalt med hjälp av källtermer och meteorologisk data från organisatörerna. Genom att jämföra storheter som ankomsttider, maximala koncentrationer, plymform och temperaturer, synas respektive modells förmåga att simulera spridning av storskaliga utsläpp av tunggas. Utsläppsplatsen visas i figur 2. Studien beräknas publiceras som en fristående rapport under 2019.

3.3.2 Lokal spridning CFD – LES

För att utvärdera konsekvenserna av spridning av toxiska ämnen i stadsmiljö, kan det krävas förmåga att beräkna detaljer i det turbulenta vindfältet eftersom, för många giftiga gaser, kan akut förgiftning ske redan under den första koncentrationstoppen som vanligtvis har en varaktighet på mindre än 1 min. På grund av vindens slumpmässiga karaktär, kan dock inte en enskild luftvirvel förutsägas. Stora lokala variationer finns. För att kunna analysera konsekvenserna av spridning av farliga ämnen, finns därför en trend att använda alltmer komplexa CFD-modeller, inklusive Large Eddy Simulation (LES). Dessa används för att beskriva oregelbundenhet och variationer i vind och koncentrationsfält. Vid beräkningar med LES genomförs en komplett beräkning av det studerade vindfältet för varje tidssteg. Detta kan medföra att beräkningar tar lång tid. En simulering av ett förlopp behöver definiera hur omgivningen påverkar det förlopp man egentligen vill studera. Det kan vara meteorologiska fenomen eller omgivningsstrukturer som medför kanaliserade flöden m.m. Med andra ord, den luft som transporterar ett potentiellt farligt ämne har en historia av vindriktning och turbulens. Denna historia måste antingen beräknas under simuleringen eller skapas syntetiskt.

Genom ett samarbete med ENFLO (University of Surrey) under Prof. Alan Robins ledning genomfördes experiment i vindtunnel för att generera en databas för validering av spridningsmodeller. Detta arbete har påbörjats under 2018. Denna databas kommer att vara en av de referenser som FOI:s spridningsmodeller kommer att stödja sig på för att säkerställa att spridningsmodellerna ger ett så bra resultat som möjligt.

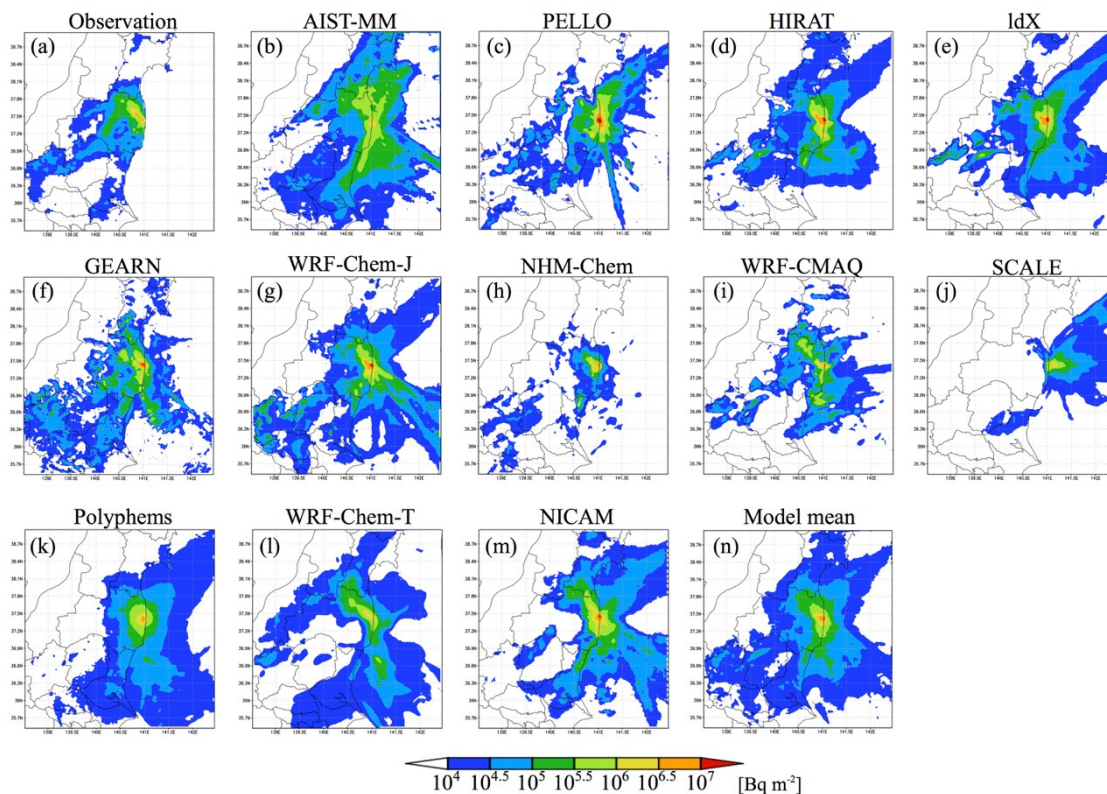
Ett exempel på data och jämförelser kan ses i figur 3. Turbulensen i luften, mätt som hastighetsvariansen i strömningsriktningen och tvärs strömningsriktning jämförs mellan simulering och experiment.



Figur 3. Experimentdata har index wt medan simulerade värden saknar index. Det uppmätta värdet från vindtunneln på u^2_{wt} verkar vara dubbelt så högt som det simulerade värdet u^2 .

3.3.3 Regional spridning

En modelljämförelse för regional spridning i Japan av cesium-137 (^{137}Cs) blev publicerad i Journal of Geophysical Research: Atmospheres, [5]. FOI deltog med spridningsmodellen PELLO [6]. Totalt jämfördes 12 modeller (inklusive varianter på modeller), både eulerska och lagranska. Alla modeller använde sig av data från samma högupplösta väderprognosmodell för de meteorologiska parametrarna och samma källterm för att jämförelsens fokus skulle ligga på spridningsmodellerna och deras inbyggda fysik. PELLO modifierades till denna studie för att kunna hantera den givna högupplösta väderinformationen. Modellerna jämfördes med observationer av deposition och luftkoncentration av ^{137}Cs . I många av de fall som studerades tillhörde PELLO de bättre modellerna, vilket framgår av de olika jämförelsetal som beräknades i studien, se [5] för noggrannare redovisning. I figur 4 visas ett exempel på depositionsfält där det observerade depositionsfältet, uppskattat från flygplansmätningar, lagts jämte alla modellberäknade fält samt ett ensemblefält där alla modeller bidrar.



Figur 4. Geografisk fördelning av depositionsfall från Observationer (flygplansmätningar), modellerna samt medelvärdet av alla modeller.

3.4 Spridning i mark

3.4.1 RN-händelse – nedfall och spridning i infiltrationsbädd

Här presenteras ett utdrag från en rapport som kommer under våren 2019.

Som beskrivits i tidigare rapportering [2] har ett scenario tagits fram i samverkan med Försvarmakten (FM, SkyddC), Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), Livsmedelsverket (nationell vattenkatastrofgrupp, VAKA) och ett antal pågående projekt vid Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). Grundupplägg har hämtats från ett befintligt scenario som bygger på eventuell användning av taktiskt kärnvapen (100 kt) mot svenskt mål. Fokus i föreliggande rapport, liksom den från 2017, ligger på belägningsproblematik och omfattar i denna kontext ej direktverkanseffekter (t.ex. tryck- och värmevåg) eller skadeutfall. Av detta skäl har nedslagsplats justerats utifrån frågeställning och syfte med modelleringen. Frågor kring radioaktivt nedfall kopplad till livsmedelskedjan studeras av Livsmedelsverket, Jordbruksverket, FOI och andra aktörer, och berörs inte i detta arbete.

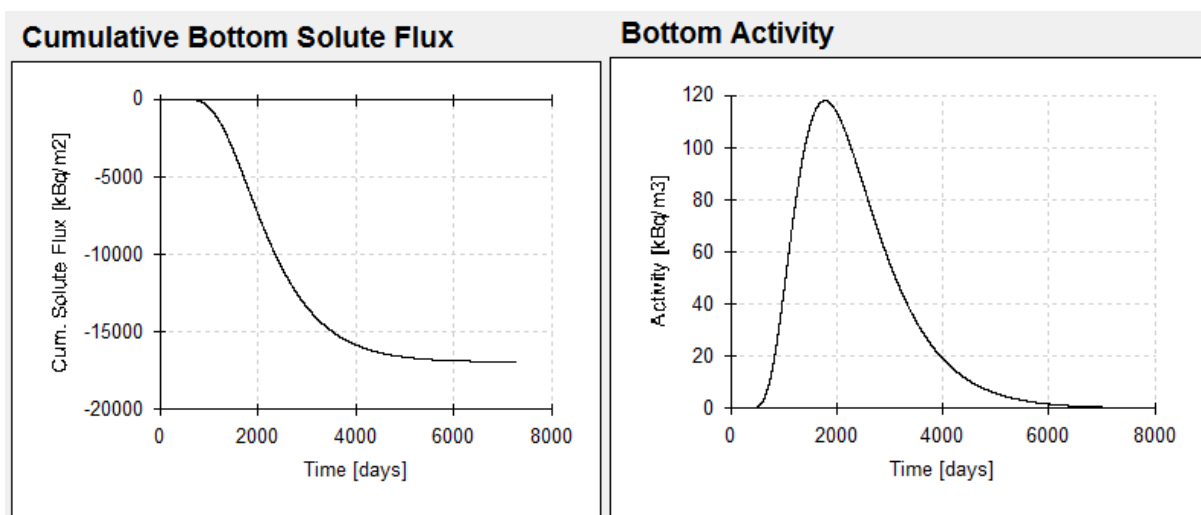
Scenariestudien fokuserar på att modellera spridning och ödet av ett radioaktivt ämne som deponerar på infiltrationsbäddar (se figur 5) och i ytvatten vid en större anläggning, där sjövattnet nyttjas som förstärkning av en naturlig grundvattenakvifär i syfte att öka tillgången på utvinningsbart vatten för konsumtion. Spridningen i den omättade zonen har beräknats med modellen HYDRUS 1D. Syftet med modelleringen är att se hur en befärad *worst case*



Figur 5. En infiltrationsdamm för dricksvatten i drift.

deposition av Sr-90 tar sig ned genom infiltrationsbassängens sandbotten (den omättade zonen) och om nukliden kan nå ned till grundvattenytan.

Den sammanlagda (kumulativa) mängden Sr-90 som transporterats ned till grundvattnet är runt 10 000 kBq/m² efter ungefär 6,5 år och efter lika lång tid till (drygt 13 år) blir tillskottet försumbart. Totalt har då lite mer än 17 000 kBq/m² kommit ner i grundvattnet. På grund av halveringstiden 28,1 år har aktiviteten från Sr-90 minskat totalt. Om man ser till koncentrationen av Sr-90 i det ytliga grundvattnet så kommer den som mest uppgå till 120 kBq/m³ efter fem år, se figur 6.



Figur 6. Den sammanlagda mängden Sr-90 som har transporterats ner till grundvattnet (bild t.v.) och koncentrationen av Sr-90 vid grundvattenytan (bild t.h.).

EU:s interimgränsvärden för radioaktivt strontium (Sr-89 + Sr-90) är 125 Bq/l för flytande livsmedel dit dricksvatten hör (EU-rådet Euratom 2016)⁵. Modellberäkningarna ovan visar att

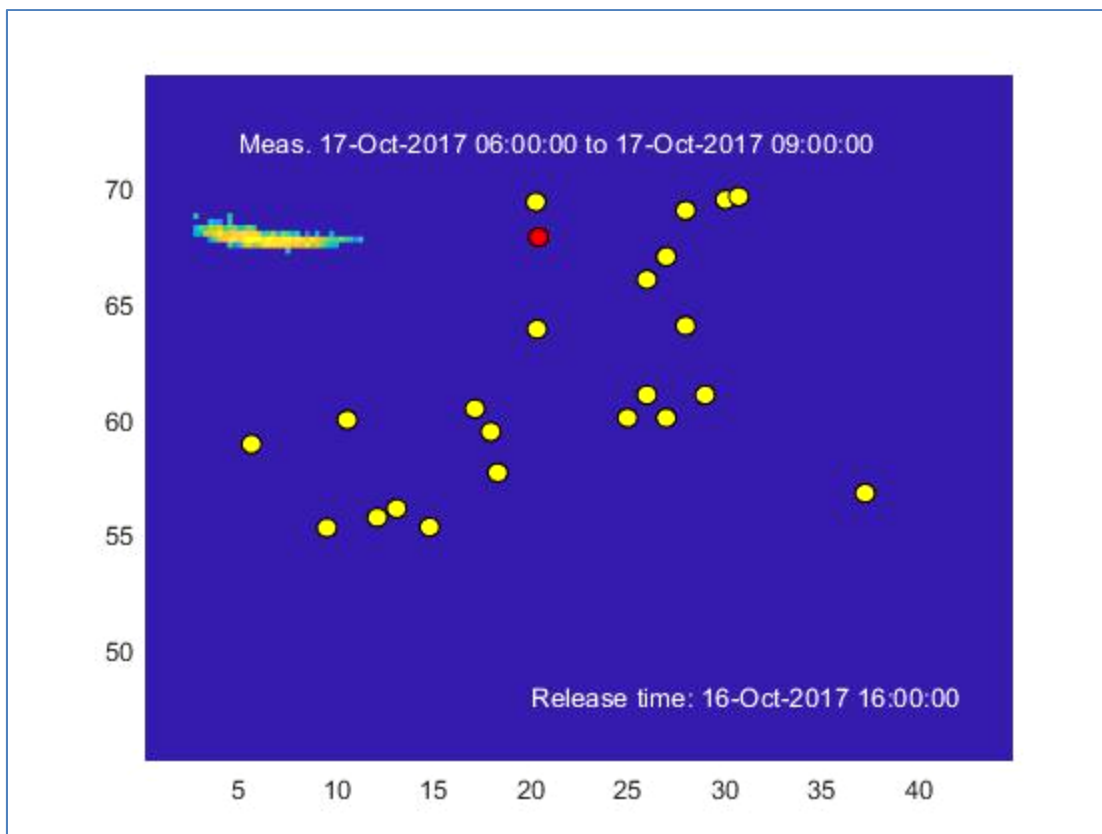
⁵ EU-rådet Euratom, 2016: Europeiska atomenergigemenskapen (Euratom) Förordning 2016/52

detta gränsvärde tangeras i det ytliga grundvattnet under bassängen fem år efter det att de radioaktiva ämnena deponerats från luften.

3.5 Osäkerhetsberäkningar och inversmodeller

3.5.1 Invers modellering

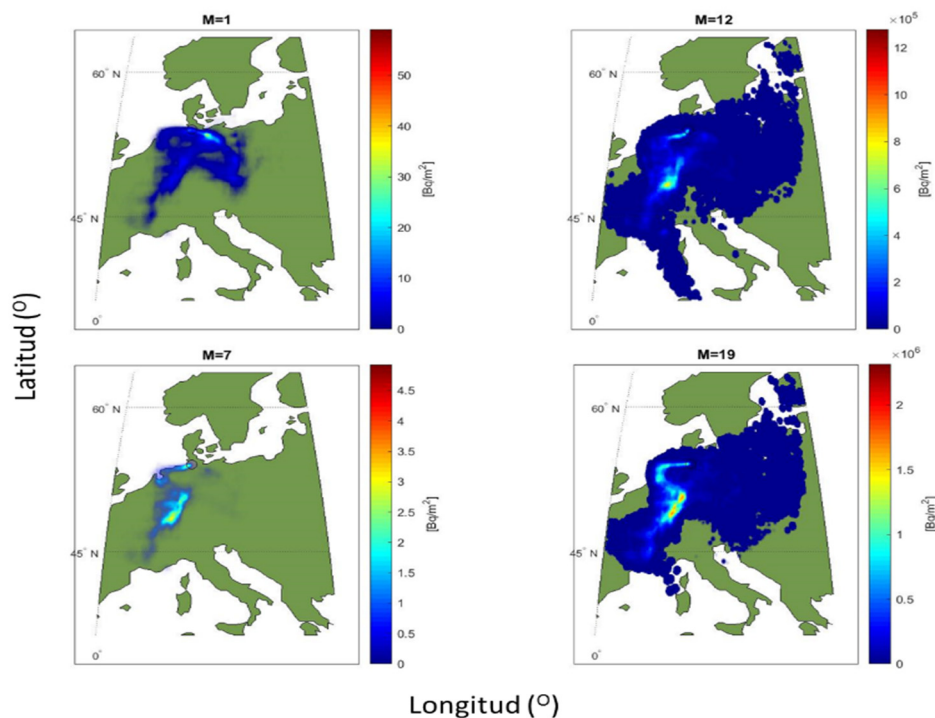
Fortsatt utveckling av metoder för att skatta en utsläppskällas egenskaper (position och tidsberoende källstyrka) från givna sensordata och meteorologiska data. Tidigare arbeten har baserats på gaussiska puffmodeller [7-9], samt CFD-modeller [10-13]. I år har det huvudsakliga arbetet inom invers modellering behandlat långväga spridning med partikelspridningsmodellen PELLO. En adjungerad variant av PELLO har utvecklats och använts för att producera adjungerade puffar, (se figur 7). En sådan anger det mätvärde (exempelvis koncentration i mg/l) som ett ögonblickligt utsläpp av en massenhet (t. ex. 1 mg) av substansen i olika geografiska positioner och olika tidpunkter skulle ge upphov till.



Figur 7. En adjungerad puff (i övre vänstra hörnet). Dess färger anger de mätvärden som skulle erhållas i den rödmärkta sensorpositionen (medelvärden uppmätta mellan 06.00 och 09.00 den 17 okt. 2017) om ett ögonblickligt utsläpp av en massenhet av substansen skulle ske den 16 okt. kl. 16.00 i respektive position i puffen. De gula punkterna anger övriga sensors positioner.

3.5.2 Beräkningseffektiv kombination av osäkerheter i källa och spridning

En metod för att lägga till radioaktiva källegenskaper efter spridningsberäkningarna är genomförda har utvecklats [14]. Denna metod passar de spridningsmodeller där man kan hålla reda på antingen puffar eller partiklar, och under förutsättningen att inga icke-linjära förändringar sker under transporten i atmosfären. Det som behöver lagras är när partikeln/puffen föds och vilken position de har vid en given tidpunkt. Då kan vi relativt enkelt i efterhand lägga på den radioaktiva egenskap som partikeln/puffen hade vid födelsetillfället och modifiera denna egenskap med den radioaktiva avklingning som den genomgått. Om vi inte kombinerar källor och möjliga spridningsförlopp på ett smart sätt



Figur 8. Depositionsfälten (Bqm^{-2}) för fyra olika källor medelvärdesbildat över fyra väderensembler med tillhörande parameterosäkerheter i utsläppshöjd, torr- och våtdeposition.

växer antalet körningar snabbt då vi vill studera osäkerheter. Vi förslår att detta angreppssätt dessutom kombineras med en samplingsmetodik som kallas Latin Hypercube Sampling (LHS) för att även kunna studera parameterosäkerheter i själva spridningsmodellen. Detta angreppssätt har genomförts på den lokala skalan [15]. Idén med LHS är att skapa tillräckligt många parameterkombinationer så det mesta av osäkerheterna representeras. Förutom antalet väderrealisationer (väderensembler) har vi inkluderat osäkerheter i utsläppshöjd, torrdepositionshastighet och i våtdepositionen. För att exemplifiera metoden har vi valt att använda väderensembler från European Center for Medium Wave Forecast (ECMWF) och ovan nämnda spridningsparametrar är satta baserat på andra osäkerhetsstudier [16] och är beskrivna med en normalfördelad sannolikhetsfördelning. Vi har initialt kört ett fall med 19 olika källor för en generisk kokvattenreaktor samt använt 4 utav 50 väderensembler för ett godtyckligt väderfall, se figur 8. Det innebär att vi endast har gjort fyra spridningsberäkningar med tillhörande kombinationer av spridningsparametrar och i efterhand lagt på källegenskaper. Vi kan således inte dra några statistiska slutsatser från dessa körningar utan de är endast till för att visa på metodiken. Våra inledande försök visar att detta skulle vara en effektiv väg framåt att studera osäkerheter men att mer studier krävs så att

parameterosäkerheterna får en tillräckligt bra parameterisering och att vi bättre förstår begränsningarna med LHS-metodiken på regional skala.

Fördelen med denna metodik är att vi kraftigt kan reducera antalet spridningsberäkningar som behövs för att uppskatta osäkerheten. Därmed möjliggörs att beslutsfattare enklare kan laborera med olika radioaktiva/nukleära scenariobeskrivningar för en bättre förståelse av konsekvenserna.

3.6 DE - Dispersion Engine

3.6.1 Systembeskrivning

Dispersion Engine är ett mjukvarupaket, som utvecklats av FOI, med syfte att vara en spridningsberäkningsleverantör i form av en insticksmodul till annan mjukvara. Exempel på sådan mjukvara är alla typer av system som hanterar scenarion med utsläpp av farliga ämnen i luften så som system för automatisk varning och rapportering (AVR), beslutsstödsystem, och verktyg för övning, träning och planering. Dispersion Engine levereras i form av ett .NET kompatibelt programvarubibliotek (dll) och kan enkelt integreras i andra system. Biblioteket ger användaren tillgång till en palett av spridningsmodeller och tillhörande verktyg.

Dispersion Engine har under 2018 anpassats för att kunna användas på både små bärbara Windowsdatorer och stora Linuxkluster. FOI:s spridningsmodell PELLO för spridning på den regionala till globala skalan har inkluderats i biblioteket och med denna modell har vi nu möjlighet att modellera radioaktivt nedfall från kärnvapen och kärnkraftsolyckor samt aska och gas från t.ex. vulkaner eller andra större utsläpp. Dessutom ger denna långväga spridningsmodell Dispersion Engine möjligheten att läsa väderdata direkt från de vanligaste väderprognosmodellerna. På den lokala skalan är arkitekturen för spridning i komplex terräng på plats med läsare för 3D-geometrier och 3D-vindfält. Med vissa begränsningar i 3D-geometrin kan de lokala modellerna använda 3D-vindfält och 3D-geometrier för att beräkna spridning i miljöer av typen böljande terräng. Utvecklingsarbetet för spridningsmodellering i stadsmiljö kommer att fortsätta liksom arbetet med modeller som beräknar turbulens och vindfält i komplex terräng.

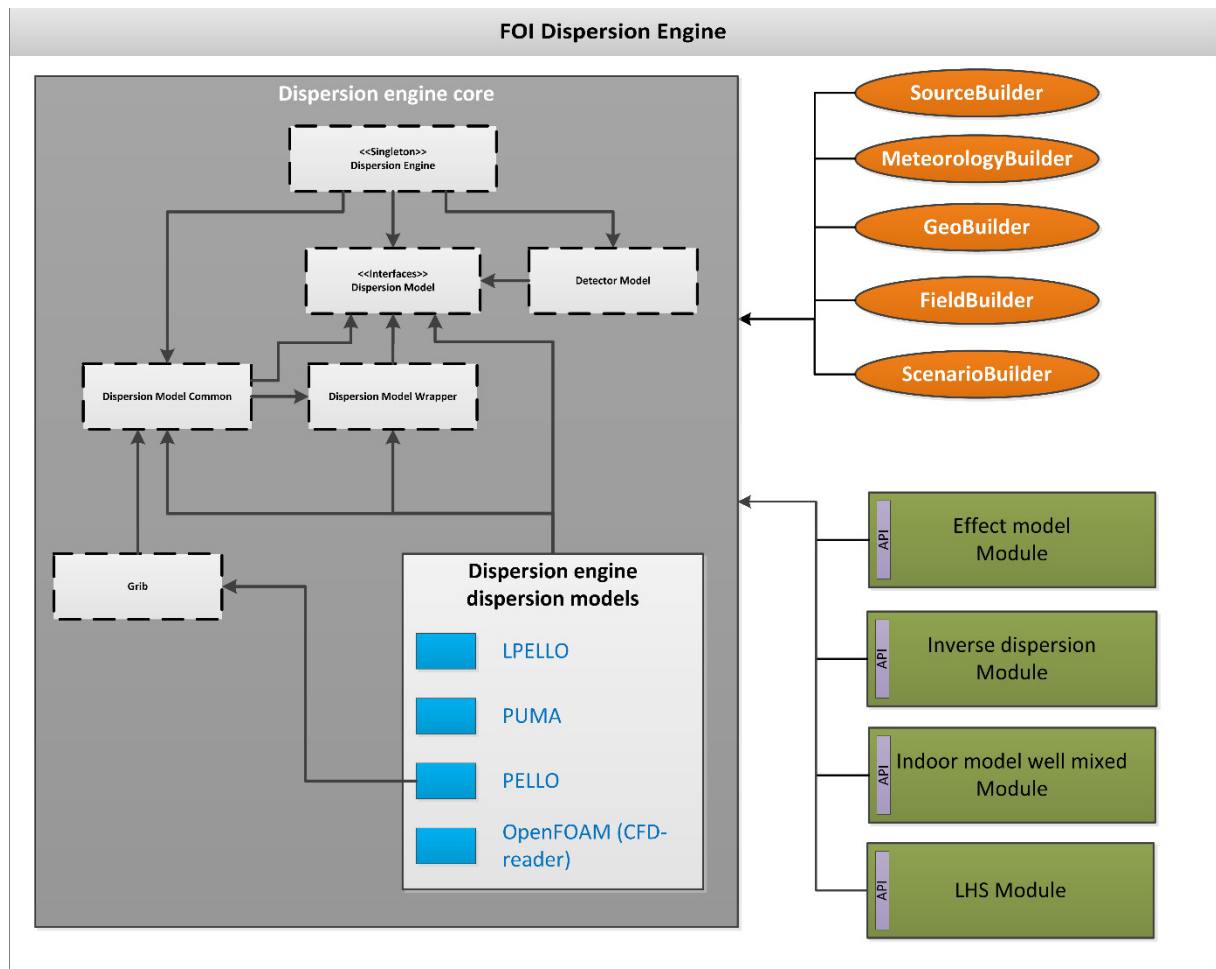
I planerna för framtiden ingår en modul för att kunna lokalisera och storleksbestämma utsläppskällan utifrån sensordata samt en modul för att beräkna osäkerheter i resultaten från spridningsmodelleringarna.

3.6.2 Arkitektur

Dispersion Engines (*DE*) övergripande arkitektur visas i figur 9. Arkitekturen bygger på en kärna (*DE core*), där själva spridningsberäkningarna utförs, till detta finns hjälpfunktioner (*Builders*), för att hjälpa användaren att skapa och hantera indata samt verktyg (*Modules*) för att förbehandla eller efterbehandla beräkningsresultaten. *Builders* kan, om så önskas, hjälpa användaren att konstruera lämpliga källor, väder med vindfält eller initiala koncentrationsfält. Så snart lämpliga indata skapats kan *DE core* anropas för att göra spridningsberäkningarna. Resultatet från dessa beräkningar levereras i form av tidsstämplade koncentrationsfält.

Dispersion Engine levererar resultaten från spridningsberäkningarna direkt till den anropande applikationen. Den anropande applikationen ansvarar sedan för fortsatt behandlingen av dessa koncentrationsdata, exempelvis för att visualisera halterna, beräkna riskområden, simulera ett

sensorutslag etc. Alternativt kan applikationen låta Dispersion Engine, genom sin effektmodul, beräkna skadeutfallet och riskområde i det givna scenariot.



Figur 9. Figuren visar en schematisk bild över Dispersion Engine-arkitekturen. Spridningsmodellerna och spridningsmotorn finns inne i den gråa ytan kallad DE core. Orangemarkerade builders är fristående enheter som kan skapa och läsa objekt som källa, väder, belägningsfält m.m. inne i DE core. De gröna modulerna är fristående beräkningsverktyg för att förbehandla eller efterbehandla beräkningsresultaten.

4 Slutsatser

Den övergripande målsättningen med projektet *Spridning i luft, mark och vatten* är att vidmakthålla och utveckla förmågan till spridningsberäkningar, som stöd till försvarsmakten, civila myndigheter och annan forskningsverksamhet inom FOI. Stödet kan exemplifieras som beslutsunderlag genom specifika beräkningar eller som programvara som dels kan bli en del av andra system, dels utgöra fristående kunskapsstöd.

Spridningsmodeller är optimerade för en viss typ av scenarier. För lokal spridning i luft kan byggnader eller lokal topografi ha betydelse för hur spridningsförloppet ser ut. För spridning på meso-skala (1 - ~10km) gäller en huvudsaklig vindriktning och byggnader och skog ses som skrovligheter. För regional till global skala kommer vädersystemens påverkan att dominera. Därför måste utvecklingen av spridningsmodeller ske för respektive modelltyp.

Under perioden 2016-2018 har utvecklingsarbete genomförts för spridningsmodeller avseende alla dessa skalor. Validering av spridningsmodeller har genomförts genom att jämföra data från experiment med resultat från spridningsmodellerna. Genom det samarbete som inleddes med EDA-projektet MODITIC, har nya experiment kunnat genomföras i vindtunnel med spridning under både neutral och stabil atmosfärisk skiktning. Dessa experimentella data kommer att vara viktiga i det framtida valideringsarbetet.

Under perioden har också nya förmågor att simulera verkligheten byggts in i spridningsmodellerna. Till exempel kan CFD-modeller använda syntetisk turbulens för att effektivisera beräkningarna, LPELLO kan numera hantera tunggaseffekter vilket har saknats för den modelltypen, PELLO har en förbättrad depositionsmodell som ökar noggrannheten vid långväga spridning. Utvecklingen av inversa modeller fortsätter med förbättrad förmåga att analysera källpositioner utifrån sensordata. Osäkerhetsanalys av de parametrar som bestämmer spridningsförloppet utvecklas genom att utnyttja ensembledata för vind och vindriktning.

Den erhållna förmågan har kunnat nyttiggöras i specifika frågeställningar från FM och civila myndigheter och genom att kunna besvara frågor i form av externa uppdrag. Ytterligare nyttiggörande sker genom specifika scenariestudier där sårbarhet, risker och påverkan kunnat studeras. Som exempelvis att via samverkande spridningsberäkning för luft-, mark och grundvatten, studera hur C- eller RN-händelser kan påverka grundvattenbaserad dricksvattenproduktion. I projektet har även bedrivits utvecklingsarbete av ett laboriebaserat försökssystem (lysimetrar) med syfte att kunna utföra spridningsförsök med B-ämnen i mark.

Ett viktigt utvecklingsspår för nyttiggörande och tillgängliggörande av spridningsmodellerna är systemutvecklingen av Dispersion Engine [DE]. DE är ett mjukvarupaket, som utvecklats av FOI, med syfte att vara en spridningsberäkningsleverantör i annan mjukvara. Exempel på sådan mjukvara är alla typer av system som hanterar scenarion med utsläpp av farliga ämnen i luften så som system för automatisk varning och rapportering (AVR), beslutsstödsystem, och verktyg för övning, träning och planering. DE finns idag hos MSB och FM. Därmed finns också möjlighet till kontinuerlig uppdatering av de delar som efterfrågas.

Sammanfattningsvis har kunskapsnivån för spridningsberäkning i luft, mark och vatten höjts under 2016-2018, vilket lett till ökad förmåga och möjlighet att nyttiggöra projektkompetensen för totalförsvar och samhället i övrigt.

Därmed är inte alla problem lösta. Då vi arbetar med numeriska metoder för att lösa ekvationerna, öppnas från och till nya dörrar för att kunna lösa dessa. Det ger också en möjlighet att lägga in mer av den fysik som ligger bakom spridningsprocesserna.

5 Referenser

- [1] J. Burman, O. Björnham, N. Brännström, H. Grahm, C. Lejon, O. Parmhed, L. Persson, P. von Schoenberg, R. Sigg, J. Sjöström, Årsrapport 2016, Spridning i luft, mark och vatten. FOI-R--4409--SE, in, 2016.
- [2] J. Burman, L. Jonsson, C. Lejon, Å.L. Persson, J. Sjöström, v.P. Schoenberg, F. Schönfeldt, Årsrapport 2017 - Spridning i luft, mark och vatten, in, 2017.
- [3] J. Burman, L. Jonsson, A. Rutgersson, On possibilities to estimate local concentration variations with CFD-LES in real urban environments, *Environ Fluid Mech*, (2018).
- [4] M.L. Barad, Project Prairie Grass: A Field Program in Diffusion, in: *Geophysical Research Paper No. 59, Vols. I and II, AFCRL-TR-58-235 (ASTIA Document No. AF-152572), Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, 1958., 1958.*
- [5] Y. Sato, M. Takigawa, T.T. Sekiyama, M. Kajino, H. Terada, H. Nagai, H. Kondo, J. Uchida, D. Goto, D. Quélo, A. Mathieu, A. Quérel, S. Fang, Y. Morino, P. Schoenberg, H. Grahm, N. Brännström, S. Hirao, H. Tsuruta, H. Yamazawa, T. Nakajima, Model Intercomparison of Atmospheric ¹³⁷Cs From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: Simulations Based on Identical Input Data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (2018) 11,748-711,765.
- [6] J. Lindqvist, En stokastisk partikelmodell i ett ickemetriskt koordinatsystem, in: FOI Report, FOI-R—99-01086-862-SE, FOI, 1999.
- [7] L. Persson, T. Önskog, Inverse dispersion modeling with a Bayesian sequential Monte Carlo method. Bilaga 5.1 i Häggström et al: Demo NBC-ledningssystem, etapp 1 Slutleverans, FOI-R-1635-SE, in, 2005.
- [8] L. Persson, Estimation of atmospheric dispersion sources from sensor data with Bayesian methods. Proceedings of NBC2009, Jyväskylä, Finland, in: NBC2009, Jyväskylä, Finland, Jyväskylä, Finland, 2009.
- [9] L. Persson, Source estimation from sensor data., in: the 10th International Symposium on Protection against Chemical and Biological Warfare Agents, Stockholm, 2010.
- [10] T. Brännvall, Source Term Estimation in the Atmospheric Boundary Layer – Using the adjoint of the Reynolds Averaged Scalar Transport Equation, in: Department of Physics, Umeå University, UmU, FOI Swedish Defence Research Agency, Division of CBRN Defence and Security, 2015.
- [11] L. Persson, J. Burman, Torr- och våtdeposition i adjungerade linjära konvektions-diffusionsmodeller, in, FOI Rapport FOI-R—4363—SE, 2016.
- [12] N. Brännström, L. Persson, Source reconstruction using a bilevel optimisation method with a smooth weighted distance function, in, ArXiv:1607.04804, 2016.
- [13] N. Brännström, L. Persson, MODITIC Inverse modelling in urban environments, in: HARMO17, the 17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Budapest, 2016.
- [14] F. Schönfeldt, Method for source uncertainty, in, FOI CBRN-skydd och säkerhet, 2017.
- [15] R. Sigg, P. Lindgren, P. von Schoenberg, L. Persson, J. Burman, H. Grahm, N. Brännström, O. Björnham, Hazmat risk area assessment by atmospheric dispersion modelling using Latin hypercube sampling with weather ensemble, *Meteorological Applications*, 25 (2018) 575-585.
- [16] A. Mathieu, I. Korsakissok, D9.1 – Guidelines ranking uncertainties for atmospheric dispersion. Ares(2018)1172146-02/03/2018, in, 2018.

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.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se