

# Utslipp, spredning og avsetning av SO<sub>2</sub> fra Nikel og Zapoljarnij

En WRF-Chem modellstudie

Bjørg Jenny Engdahl <sup>1)</sup>, Anna von Streng Velken <sup>2)</sup>, Tore Flatlandsmo  
Berglen <sup>3)</sup>, Øivind Hodnebrog <sup>4)</sup> og Frode Stordal <sup>5)</sup>



**Oppdragsrapport**



Forfatterens tilknytning:

1) NILU, nå ved MET, 2) NILU, nå ved Miljødirektoratet, 3) NILU, 4) UiO, nå ved CICERO, 5) UiO

Forsidefoto: Espen Tangen Aarnes, Bioforsk Jord og Miljø, Svanhovd. Bildet er tatt fra Brannfjellet i Pasvikdalen 23. juli 2007, dvs. etter den såkalte sommerepisoden. Under sommerepisoden i 2007 skapte store utslipp, stabile meteorologiske forhold og dårlig spredning meget høye konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> i Nikel by.

Author affiliations: NILU, now at MET, 2) NILU, now at Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet), 3) NILU, 4) University of Oslo, now at CICERO, 5) University of Oslo. Cover photo: Espen Tangen Aarnes, Bioforsk Soil and Environment, Svanhovd. The photo is taken from Brannfjellet in the Pasvik Valley 23. July 2007, i.e. after the so-called summer episode. During the summer episode there were large emissions, stable meteorological conditions and slow dispersion that led to extremely high concentrations of SO<sub>2</sub> in the city of Nikel.



## Forord

Arbeidet som presenteres i denne rapporten er hovedsakelig utført av Bjørg Jenny Engdahl og Anna von Streng Velken. De var begge studenter på GEF2210-kurset ved Universitetet i Oslo høsten 2008. Sommeren 2009 og 2010 hadde de sommerjobb ved NILU der de programmerte og satte opp WRF-Chem-modellen for grenseområdene mellom Norge og Russland. Hensikten var å studere utslipp, spredning og tap av SO<sub>2</sub> og tungmetaller fra verkene i Nikel og Zapoljarnij. Bjørg Jenny arbeidet også deltid ved NILU i 2011 og 2012 med dette, finansiert av TEC – Trilateral cooperation on Environmental Challenges in the Joint Border Area, et prosjekt under Kolarctic ENPI<sup>1</sup>.

Hovedarbeidet med modellen er utført av Bjørg Jenny Engdahl og Anna von Streng Velken. Teksten i herværende rapport er basert på Bjørg Jennys notater fra arbeidet i 2012. Hun er derfor førsteforfatter og Anna von Streng Velken er andreforfatter. Tore Flatlandsmo Berglen er seniorforsker ved NILU og prosjektleder for måleprogrammet NILU har i grenseområdene mot Russland på oppdrag fra Miljødirektoratet og Klima- og miljødepartementet. Øyvind Hodnebrog var tidligere PhD-student ved UiO og ga uvurderlig hjelp med WRF-Chem og deltok i analysene av resultater. Frode Stordal er professor ved UiO og prosjektleder for flere prosjekter der WRF-Chem blir anvendt.

Resultatene fra dette arbeidet har vært presentert på ulike konferanser og seminarer de siste årene (bl.a. IPY-2010 i Lillestrøm og den årlige miljøkonferansen i Murmansk). Men det er også viktig å få dokumentert arbeidet som er gjort og å mangfoldiggjøre resultatene i en mer omfattende studie, derav denne rapporten. Arbeidet med WRF-Chem har likeledes vært viktig med tanke på utvikling av modeller ved NILU. Resultatene har også vært viktige innspill til norske myndigheter, blant annet som bidrag til notat for utenriksminister Jonas Gahr Støre i forbindelse med møte i Barentsrådet i 2009<sup>2</sup>.

I 2010 ble det også laget «filmer» av resultatene. Verdier for hver time ble skrevet ut fra modellen og satt sammen til en animasjon som viser spredning av utslipp fra Nikel. Disse filmene er en god illustrasjon på hvordan forurensningen spres på ulik geografisk skala. Filmene finnes fortsatt på [URL 01-04-2014]:

[http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene1\\_SO2-SO4\\_delay10.gif](http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene1_SO2-SO4_delay10.gif)

[http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene2\\_SO2-SO4\\_delay10.gif](http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene2_SO2-SO4_delay10.gif)

[http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene3\\_SO2-SO4\\_delay10.gif](http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene3_SO2-SO4_delay10.gif)

---

<sup>1</sup> Se <http://www.kolarcticenpi.info/en> [URL 02-Okt-2014] for mer informasjon.

<sup>2</sup> <http://www.aftenposten.no/nyheter/uriks/article3323240.ece#.UzweneWd3wo> [URL 01-Apr-2014]



# Innhold

	Side
<b>Forord</b> .....	<b>1</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>5</b>
<b>Summary</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>9</b>
<b>2 WRF-Chem</b> .....	<b>11</b>
2.1 Domener .....	12
2.2 Utslipp .....	13
<b>3 Værsituasjonen</b> .....	<b>15</b>
3.1 1.-8. juli 2007 .....	15
3.2 23. des 2010 - 6. jan 2011 .....	16
<b>4 Modellresultater: spredningsplott</b> .....	<b>18</b>
4.1 Sommer .....	18
4.2 Vinter.....	19
<b>5 Sammenligning med observasjoner</b> .....	<b>20</b>
5.1 Sommer .....	21
5.2 Vinter.....	21
<b>6 Våtavsetning og budsjett-plott</b> .....	<b>23</b>
<b>7 Konklusjon og videre betraktninger</b> .....	<b>26</b>
<b>8 Referanser</b> .....	<b>28</b>
<b>9 Anerkjennelse og takk</b> .....	<b>28</b>
<b>Vedlegg A Kort modellbeskrivelse WRF</b> .....	<b>29</b>





## Sammendrag

*Formålet med denne studien er å studere utslipp, spredning og avsetning av svoveldioksid (SO<sub>2</sub>) fra verkene i Nikel og Zapoljarnij. For å studere dette er WRF-Chem-modellen benyttet (Weather Research and Forecast med kjemi inkludert). To avgrensede tidsperioder er studert, 1.-14. juli 2007 (den såkalte sommerepisoden 2007) og perioden 23. desember 2010 - 7. januar 2011.*

Meteorologiske inngangsdata ble utarbeidet ved bruk av WRF. Disse dataene viser god overenstemmelse med analysedata fra ECMWF (det europeiske værserveret i Reading). Meteorologi, og da spesielt vindretning og -styrke, samt stabilitet er viktige for spredning av luftforurensning i atmosfæren. Våtavsetning/nedbør er en viktig tapsmekanisme for svovel.

Det er laget plott som viser spredning av SO<sub>2</sub> time-for-time. Konsentrasjoner og spredning av SO<sub>2</sub> samsvarer med og kan forklares ut i fra meteorologiske parametre, spesielt vind. Plott for påfølgende timer kan settes sammen til en animasjon som viser tidsutvikling av SO<sub>2</sub>. Dette er nyttig både for analysen av resultatene, men også som demonstrasjon av spredning av utslipp fra punktkilder. Utslippene fra Nikel og Zapoljarnij avsettes og tapes på lokal skala nær kildene, men kan også spres på regional og synoptisk skala flere tusen kilometer av gårde før det tapes.

Modellresultater er sammenlignet med observasjoner. Modellen underestimerer SO<sub>2</sub>-konsentrasjonene i enkeltepisoder, dvs. at modellen ikke greier å beskrive maksimumskonsentrasjonene. En mulig forklaring på dette er at i den virkelige atmosfæren er røykfanen konsentrert og lite utbredt, mens i modellen vil den fordeles jevnt i hver boks/rute. En annen forklaring er at utslippene ikke er godt nok representert i modellen. Nå er det antatt kontinuerlige utslipp uten tidsvariasjon, mens utslippene i virkeligheten varierer mye på kort tidsskala. Det er også utslipp både fra bakken (diffuse utslipp) og fra skorsteinene, uten at det foreligger mer nøyaktig informasjon om fordeling. Korrekte utslippstall er avgjørende for å få riktige modellresultater.

Som et ledd i modellutviklingen og vurderingen av våtavsetning er det også laget budsjetter for de ulike prosessene i modellen, dvs. at det er summert opp hvor mye de enkelte prosessene bidrar innenfor hele modelldomenet. For SO<sub>2</sub> er utslipp og transport inn i modelldomenet største totalbidrag/kilde. Kjemisk tap, våtavsetning og tørravsetning er største tap sommerstid (gradert etter synkende viktighet), mens tørravsetning er viktigst vinterstid fulgt av våtavsetning. Kjemisk tap er lite i den mørke årstiden grunnet lave konsentrasjoner av oksidanter (f. eks. OH).

Et viktig moment ved bruk av WRF-Chem er at den er meget regnekrevende. Beregninger slik de er utført i denne studien krever flere ukers CPU-regnetid ved bruk av flere noder. Dette gjør at modellen bare kan kjøres for avgrensede perioder. Imidlertid representerer WRF-Chem de atmosfæriske prosessene på en meget detaljert måte. Slik sett er modellen best egnet til å studere prosesser (utslipp, spredning, kjemisk tap, tørravsetning, våtavsetning etc.) mer enn å produsere felter av konsentrasjoner og avsetning på lengre tidsskala, for eksempel for år.



## Summary

*The purpose of this study is to investigate emissions, dispersion and deposition of sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) from the facilities in Nikel and Zapolyarny in the border areas between Russia and Norway. The WRF-Chem model has been applied (Weather Research and Forecast with chemistry included). Two specific episodes have been investigated, 1.-14. July 2007 (the so-called summer episode 2007) and the period 23. December 2010 - 7. January 2011.*

Meteorological input data were elaborated using WRF. These data show good agreement with data from European Centre for Medium Range Weather Forecast, ECMWF, in Reading. Meteorology, especially wind direction and wind speed, as well as stability are important parameters for dispersion of air pollution in the atmosphere. In addition, wet deposition/rainfall is an important loss process for sulphur.

Plots have been made showing dispersion of SO<sub>2</sub> with hourly intervals. Dispersion of SO<sub>2</sub> corresponds well with meteorological parameters, especially wind. These plots can be put together to make “films” showing the dispersion of SO<sub>2</sub> for three different model domains [URL 01-04-2014]:

[http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene1\\_SO2-SO4\\_delay10.gif](http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene1_SO2-SO4_delay10.gif)

[http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene2\\_SO2-SO4\\_delay10.gif](http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene2_SO2-SO4_delay10.gif)

[http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene3\\_SO2-SO4\\_delay10.gif](http://folk.uio.no/torefl/WRF-Chem/Domene3_SO2-SO4_delay10.gif)

These films are useful both to study the results, but also as a demonstration of dispersion from point sources. The pollution emitted from Nikel and Zapolyarny can be deposited at local scale close to the emission point, but can also be transported several thousand kilometers away before it is lost (regional to synoptic scale).

Model results have been compared with observations. The model underestimates concentrations in specific episodes, i.e. the model is unable to capture the maximum concentrations. A possible explanation for this is that in the real atmosphere the flue gas plume is well defined, whereas in the model it will be distributed within the grid boxes (“levelled out”). Another explanation is that the model emissions are not well represented. In the model constant emissions are assumed whereas in the real atmosphere the emissions will vary considerably on a short time scale. The flue gas is also emitted at the ground (diffusive emissions) and from the stacks, but no reliable information exists concerning the ground:stack emission ratio. Correct emission information is crucial to obtain robust model results.

As a tool in the model development, budget routines were elaborated. These routines were also helpful in the assessment of the wet deposition parameterization. The budget determines the contribution from each single process within the model grid. Concerning SO<sub>2</sub>, emissions and transport into the model domain are the two most important sources. Chemical loss (most important), wet deposition, and dry deposition are the three main loss processes in summertime, while wet and dry deposition are the main loss processes in wintertime. Chemical loss is minor in wintertime due to low levels of oxidants in the atmosphere (e.g. OH).

An important aspect regarding WRF-Chem is that the model is very computer demanding. The calculations performed in this study required several weeks of CPU time running at several nodes. This means that the model can only be run for limited, well-defined periods of time. However the WRF-Chem model does represent atmospheric processes in a very detailed way. In that respect the model is most suited to study processes (emissions, dispersion, chemical loss, dry deposition, wet deposition etc.) and to study specific episodes (e.g. summer episode 2007) rather than produce long term calculations of concentrations and deposition.

# Utslipp, spredning og avsetning av SO<sub>2</sub> fra Nikel og Zapoljarnij

## En WRF-Chem modellstudie

### 1 Introduksjon

Grenseområdene mellom Russland og Norge er rik på metaller og mineraler. Ved byene Nikel og Zapoljarnij i Russland er det gruver og smelteverk som produserer nikkell. Malmen som videreføres er selvfølgelig rik på nikkell og andre tungmetaller, men inneholder også en viss mengde svovel (~5-6 %). Dette medfører at smelteverkene slipper ut store mengder svoveldioksid (SO<sub>2</sub>) og tungmetaller. Disse utslippene påvirker luftkvaliteten og miljøet i grenseområdene.

For høye konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> i lufta kan være skadelig for flora og fauna. SO<sub>2</sub> er en gass som reagerer med vanndråper i atmosfæren og kan oksideres videre til SO<sub>4</sub>-forbindelser, både som partikkel/aerosol og som H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (svovelsyre). Dette kan regne ut som sur nedbør, noe som gjør stor skade på vegetasjon og vann. Nikel ligger i Russland, ca 7 km unna norskegrensa. Når vinden blåser fra øst og sør vil utslippene fra Nikel og Zapoljarnij bringes inn over norske områder. Dette sees tydelig på de norske målestasjonene på Svanvik og i Karpdalen (Berglen et al., 2014). Måleprogrammet i grenseområdene er finansiert av Miljødirektoratet og Klima- og miljødepartementet. Briketteringsanlegget i Zapoljarnij og smelteverket i Nikel slipper ut over 100 000 tonn SO<sub>2</sub> per år, og dette tilsvarer over fem ganger Norges samlede utslipp av SO<sub>2</sub>.

For å bedre forstå utslipp, spredning og avsetning av forurensning i grenseområdene er bruk av numeriske/matematiske modeller et viktig og nyttig verktøy. Jordas atmosfære oppfører seg i henhold til fysiske og kjemiske naturlover. Atmosfæren er både et komplekst<sup>3</sup> og komplisert system og det er mange prosesser som innvirker på atmosfærens bevegelser og kjemiske sykler. Grunntanken ved en numerisk modell er at de fysiske og kjemiske prosessene i atmosfæren kan representeres og løses matematiske. En slik modell består av et stort og komplisert sett av ligninger. Men det er likefullt nødvendig å gjøre forenklinger og tilnærmelser, såkalte parameteriseringer. Parameteriseringer er en måte å representere komplekse prosesser og småskala-prosesser ved å tilnærme dem ved variable og formler som er enkle å løse. Matematiske/numeriske atmosfæremodeller kan brukes både til å studere prosesser (som her) og til å regne seg fremover i tid (som f.eks. værvarslingsmodeller og klimamodeller).

Utgangspunktet for denne studien er to forskjellige reelle forurensningsepisoder; den såkalte sommerepisoden i 2007 og vinteren 2010/11. Under sommerepisoden i 2007 var det spesielle meteorologiske forhold med meget stabil atmosfære og lite vind kombinert med store utslipp. Dette medførte meget høye konsentrasjoner i Nikel by. NILU hadde på det tidspunktet målestasjon i Nikel by finansiert av Miljøverndepartementet. Høyeste målte timemiddelverdi av SO<sub>2</sub> (gjennomsnitt over en time) sommeren 2007 var 5062 µg/m<sup>3</sup> (juni), mens høyeste målte

---

<sup>3</sup> Man sier et system er komplekst dersom helheten har andre egenskaper enn det man skulle tro ved å se på enkeltaktørene (def. eksempelvis [www.wikipedia.no](http://www.wikipedia.no)). Komplisert: innviklet.

døgnmiddelverdi (gjennomsnitt over et døgn) var  $2390 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (juli), se Berglen et al. (2008) for detaljer. Dog var NILUs instrument ute av drift i nesten tre uker i juni 2007 grunnet instrumentfeil. For å kunne sammenligne med observasjoner er perioden studert i denne rapporten fra 1.-14. juli 2007. I den første delen av denne perioden var vær-situasjonen ganske stabil, med vind fra nord-øst og svært tørt vær, noe som gjorde at forurensningen fra smelteverket ble ført rett til Nikel by. Av tekniske årsaker ble det bare gjort simuleringer fra 1.-8. juli.

Ang. grenseverdier for luftforurensning implementerte Norge i 2002 EU-direktivene for luftkvalitet i "Forskrift om lokal luftkvalitet". Dette innebærer at EUs grense- og målesettingsverdier er et minstekrav til luftkvalitet i Norge og at overskridelser av grense- og målsettingsverdiene utløser krav om avbøtende tiltak for å bedre luftkvaliteten. Denne forskriften er fra 1.7.2004 en del av "Forskrift om begrensning av forurensning" (forurensningsforskriften<sup>4</sup>). Kommunene er delegert forurensningsmyndighet etter forurensningsforskriften om lokal luftkvalitet (kapittel 7).

Gjennom EU-direktivene for luftkvalitet, 2008/50/EF og 2004/107/EF, gir forurensningsforskriftens kapittel 7 en rekke terskelverdier i tillegg til selve grense- og målsettingsverdiene. Overskridelser av disse utløser forskjellige plikter for forurensningsmyndigheten og anleggseiere (forurenser). Gjeldende grenseverdier for  $\text{SO}_2$  i Norge er  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  som timemiddelverdi/gjennomsnitt over en time med 24 tillatte overskridelser pr kalenderår og  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  som døgnmiddelverdi/gjennomsnitt over et døgn med 3 tillatte overskridelser. For vintersesong og kalenderår er grenseverdien  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  som middel/gjennomsnitt.

Vinteren 2010/11 var spesiell med mange episoder med høye konsentrasjoner av  $\text{SO}_2$  i Karpdalen. Det forekom 102 timemiddelverdier av  $\text{SO}_2$  over  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  og 15 døgnmiddelverdier over  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , gjennomsnittet av  $\text{SO}_2$  for vinteren 2010/11 i Karpdalen var  $39,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Disse høye konsentrasjonene medførte brudd på norske grenseverdier både for 2010 og 2011 (Berglen et al., 2011). Den studerte vinterepisoden går fra 23. desember 2010 til 7. januar 2011. I første delen av denne perioden blåser vinden fra vest mot øst og fører forurensningen fra Nikel vekk fra Norge. I andre del av denne perioden får vinden en mer sørlig retning og forurensningen transporteres nordover. I løpet av denne perioden er det målt periodevis høye konsentrasjoner både på Svanvik og i Karpdalen.

Målet med denne studien er å utvikle en atmosfære/kjemimodell for bedre å forstå utslipp, spredning, kjemisk omdanning og avsetning av  $\text{SO}_2$  fra smelteverkene i grenseområdene Norge-Russland. To perioder med meget høye konsentrasjoner er valgt som eksempel («case-studie»). Til dette er det benyttet den numeriske værvarslingsmodellen **W**eather **R**esearch and **F**orecasting med kjemi inkludert (WRF-chem). Dette er en såkalt online-koblet atmosfærekjemi-modell, dvs at dynamikken/meteorologien påvirker kjemien og omvendt. WRF er ikke-

---

<sup>4</sup> FOR 2004-06-01 nr 931: <http://www.lovdatabasen.no/for/sf/md/xd-20040601-0931.html#7-6> [URL 17-nov-2014] <sup>5</sup> Hydrostatisk likevekt er tilstanden i atmosfæren når gravitasjonskraften (som virker nedover) og vertikal "trykk-kraft" (som virker oppover) er i likevekt. Antagelsen gjelder for eksempel ikke ved kraftig vertikalakselerasjon (eks. cumulonimbuskyer/amboltskyer).

hydrostatisk<sup>5</sup> og løser euler-ligninger. Eulersk modell vil si at atmosfæren deles inn i et rutenett med «bokser» der de matematiske ligningene løses for hver enkelt rute eller boks. Dette i motsetning til Lagransk modell der spredning i atmosfæren representeres matematisk ved ulike luftpakker som transporteres med vinden. For å studere utslipp fra punktkilder på en god måte i en eulersk modell, er det ofte nødvendig å bruke et oppsett der boksene eller rutenettet er gradvis finere jo nærmere utslippspunktet man befinner seg. Fysiske prosesser som ellers ikke blir løst med ligninger i modellen kan representeres ved et bredt spekter av forskjellige parameteriseringsskjemaer.

WRF-Chem er godt egnet til å studere utslipp og spredning fra punktkilder siden det kan benyttes flere domener (områder) med forskjellig oppløsning inni hverandre, hvor det også kan velges toveis-nesting, som betyr at både de indre og ytre domenene kan påvirke hverandre (informasjon sendes fra ytre til indre domener og motsatt). Se ellers Figur 1 som viser de tre domene benyttet i denne studien. For mer info om WRF kan hjemmesiden konsulteres: <http://www.acd.ucar.edu/wrf-chem/>, alternativt <http://www.pnl.gov/atmospheric/research/wrf-chem/> [begge URL 10-oktober-2014]. Modellen er åpen for alle og kan fritt lastes ned fra WRFs hjemmeside.

## 2 WRF-Chem

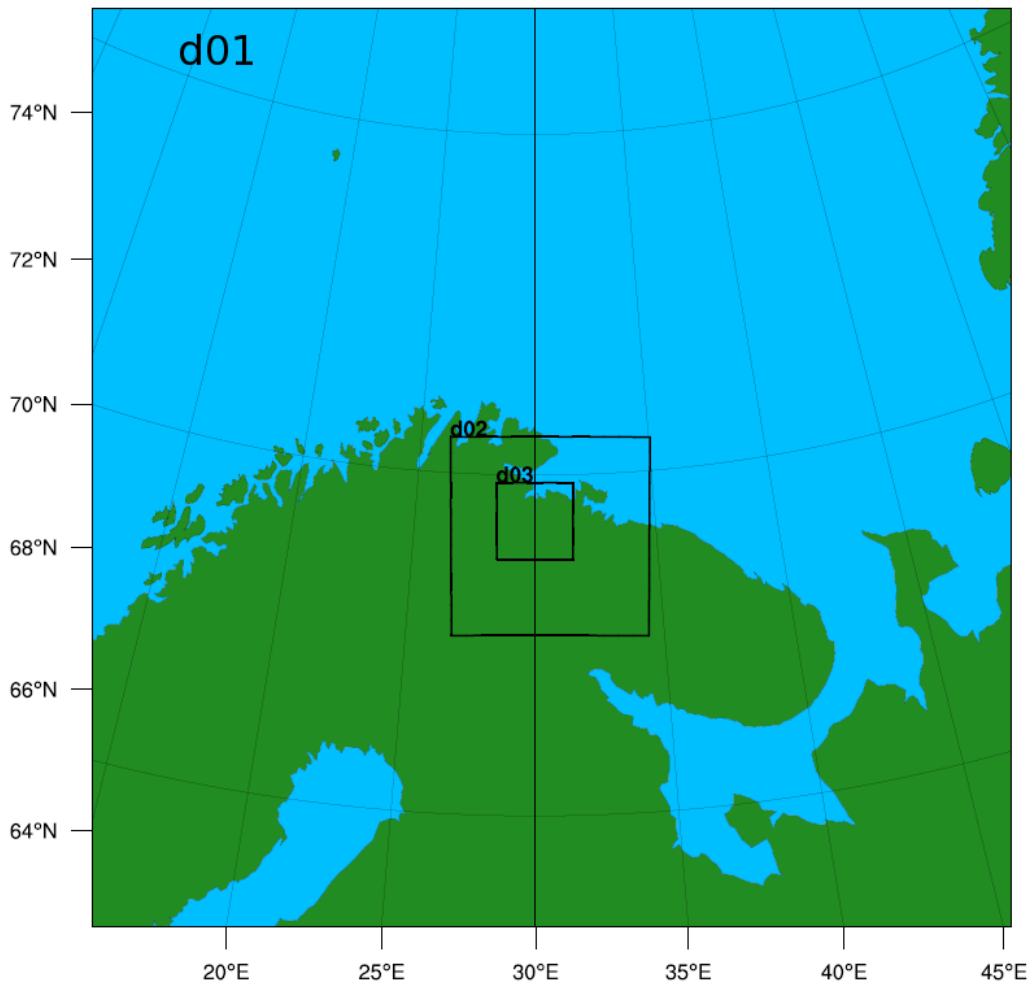
Målet med denne studien er å undersøke utslipp, spredning, kjemisk omdanning og avsetning av SO<sub>2</sub> fra Nikel og Zapoljarnij både på lokal og regional skala. Det var dermed hensiktsmessig å velge et modellområde som dekker de nordlige delene av Norge, Sverige og Finland, samt Barentshavet og NV-Russland. Modellområdet ble delt inn i tre domener med hhv 25 km, 5 km og 1 km horisontal gridavstand og 38 vertikale lag (Figur 1). I det ytre modelldomene d01 ble altså atmosfæren delt inn i bokser som var 25×25 km<sup>2</sup>, i midtre domene d02 ble atmosfæren delt inn i bokser som var 5×5 km<sup>2</sup>, mens i indre modelldomene d03 ble atmosfæren delt inn i bokser som var 1×1 km<sup>2</sup>. Vertikalt ble atmosfæren delt inn i 38 lag med tynneste lag nærmest bakken og gradvis tykkere lag oppover i høyden.

Meteorologi-dataene som ble brukt som inngangsdata til modellen er basert på analyser fra det europeiske værvarslingssenteret i Reading, ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast). Siden dette er en studie av spesifikke episoder i fortid, gir det ingen mening at kjemiske prosesser skal påvirke meteorologi. Derfor ble forhåndsutregnede meteorologiske data benyttet. På grunn av mulige problemer med toveis-nøsting når også resultater fra ytre domener benyttes ble det bestemt å kun bruke enveis-nøsting. Det vil si at informasjon fra de ytre domener ble benyttet i beregningene for domene innenfor (for forklaring av domener, se kap 2.1). For den teknisk interesserte og kjennere av WRF-Chem kan det opplyses at noen av de utvalgte parameteriseringsskjemaer inkluderte Purdue Lin mikrofysikkskjema, rrtm longwave and Goddard shortwave strålingsskjema, Monin-Obukhov (Janjic) surface-layer option, Unified Noah land-surface model, Mellor-Yamada-Janjic TKE boundary-layer option (se WRF hjemmeside for

---

<sup>5</sup> Hydrostatisk likevekt er tilstanden i atmosfæren når gravitasjonskraften (som virker nedover) og vertikal "trykk-kraft" (som virker oppover) er i likevekt. Antagelsen gjelder for eksempel ikke ved kraftig vertikalakselerasjon (eks. cumulonimbuskyer/amboltskyer).

ytterligere informasjon og referanser). Grell 3D ensemble cumulus scheme ble valgt til de to største domene, det minste trenger ikke parameteriseringskjema for konvektive skyer. For kjemien ble Radm2 kjemiske reaksjoner og MADE/SORGAM aerosolskjema med vannfase-kjemi valgt, samt tilhørende antropogene/menneskeskapte utslipp (for andre utslipp enn Nikel og Zapoljarnij).



*Figur 1: Domenene brukt i denne studien. Domene d01 er det ytterste domenet, domene d02 et midtre domene, mens domene d03 dekker området nærmest Nikel og Zapoljarnij.*

*Figure 1: The model domains applied in this study. Domain d01 is the outermost domain, domain d02 is an intermediate/regional domain while domain d03 covers the area close to Nickel and Zapoljarny.*

## 2.1 Domener

Domenene er vist i Figur 1.

Domene 1: Det ytterste domenet, domene 1, der hver enkelt boks er  $25 \times 25 \text{ km}^2$ , dekker omtrent hele det nordlige Skandinavia og Finland. En del av nordvest-



Russland er også med, men fokus er primært på Nord-Norge. Dette domenet brukes primært for å se på spredning og tap på synoptisk skala (~1000 km). Dette kan gi svar på hvor lenge og hvor langt det er det mulig å spore utslippene fra Nikel.

Domene 2: Det mellomste domenet, domene 2, der hver enkelt boks er  $5 \times 5 \text{ km}^2$ , dekker østlige deler av Finnmark, litt av Nord-Finland samt en del av Russland rundt Nikel, dvs regional til lokal skala. Domenet inneholder de områdene som forventes å merke betydelig økte konsentrasjoner av  $\text{SO}_2$  som følge av utslipp fra Nikel og Zapoljarnij.

Domene 3: Det innerste domenet, domene 3, der hver boks er  $1 \times 1 \text{ km}^2$ , dekker de aller nærmeste områdene rundt Zapoljarnij, Nikel og Svanvik. I dette domenet kan man se på den helt lokale transporten av  $\text{SO}_2$ .

## 2.2 Utslipp

Å representere utslippene riktig i en modell er meget viktig for å få et godt og troverdig modellresultat. Det er blant annet viktig å få plassert punktutslippet rett geografisk, få utslippene inn i riktig vertikallag og ha kunnskap om stabiliteten i atmosfæren i området for å kunne representere hvordan røykfanen vil spre seg. I så henseende er det visse utfordringer når det gjelder modellering av utslipp, spredning og avsetning fra smelteverkene i grenseområdene.

Bildet på forsiden er tatt like etter sommerepisoden i 2007 og viser selve smelteverket i Nikel, mens Figur 2 (neste side) viser eksempler på utslipp slik de sees fra norsk side. I 2008 ble den ene pipen delvis demontert og det er nå to høye og en kortere pipe ved verket (merk at på bildet på forsiden tatt i 2007 er det tre høye piper ved verket, mens på bildet tatt i 2008 er det kun to).

$\text{SO}_2$  er en usynlig gass og vises derfor ikke på bildene på forsiden og i Figur 2, røyken som sees er hovedsakelig vanndamp og partikler. Fargen på røyken kan variere fra tilnærmet hvit, ulike sjatteringer i grått og over mot svart. Årsaken til variasjonen er ukjent. En stor andel av utslippene er såkalte diffuse utslipp som slippes ut direkte fra selve smeltehallen og bygningene, ikke fra pipene. Dette er røyk og avgasser som slippes ut nær bakken og som forblir i bakkenivå ved stabile forhold. Diffuse utslipp bidrar til høye bakkekonsentrasjoner i smelteverkets nærområde, og utslippene driver innover Nikel by ved vind fra nord (byen ligger like sør for verket). På mange måter fungerer ikke pipene etter hensikten. Formålet med en pipe er å slippe ut forurensningen høyt oppe slik at utslippet fortynnes og konsentrasjonen blir lavere når røykfanen når bakken. Ved utslipp i bakkenivå blir konsentrasjonen meget høy nær utslippspunktet. Andelen diffuse utslipp later til å ha økt de senere årene. En mulig forklaring er at sørveggen på smelteverket er tatt ned og røyk slipper direkte ut i friluft fra smeltehallen.

Figur 2 er en god illustrasjon på utslippene og forurensningen i Nikel. Her driver utslippene sørover inn over Nikel by. En forholdsvis stor andel av utslippene kommer direkte fra bygningene. Da får utslippene intet løft, og det er svært liten fortykning før utslippet når bakken. Resultatet er høye bakkekonsentrasjoner i nærområdet. Målte time-konsentrasjoner i Nikel by i perioden da bildet ble tatt, var  $1470 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (19. juni 2008 kl. 11-12 norsk tid) og  $1527 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (kl. 12-13).

Mengden utslipp/røykgass fra smelteverket i Nikel er sterkt varierende på kort tidsskala. Med kun minutters mellomrom kan det variere fra tilnærmet intet utslipp til så å velte røyk ut av pipene/bygningene. Dette skyldes sannsynligvis produksjonsmønsteret, men det foreligger ikke detaljerte opplysninger om produksjonen eller produksjonsmetodene. De samlede, rapporterte utslippene fra begge anleggene utgjør i overkant 100 000 tonn  $\text{SO}_2$  pr år, men det foreligger ingen opplysninger om tidsvariasjonen av utslippene. I modellberegningene i denne studien antas de samlede utslippene å være på 100 000 tonn  $\text{SO}_2$  i året, hvor det videre antas at Zapoljarnij står for 40% og Nikel for 60% av dette. Se ellers Vedlegg A for omregning av utslipp i WRF-Chem. Det er ikke lagt inn døgn- eller dag-til-dagvariasjon av utslippene i modellen. Det antas at 50% slippes ut i bakkenivå (lag 1) og 50% i 160 m (over bakken).



*Figur 2: Smelteverket og Nikel by, sett fra Høyde 96 i Pasvikdalen 19. juni 2008. Pasvikvassdraget og Svanevann skiller Norge og Russland. Nordlig vind bringer utslippene inn mot Nikel by.  $\text{SO}_2$ -middelkonsentrasjonen på stasjonen i Nikel by var omlag  $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  da bildet ble tatt. Foto: Christoffer Aalerud, Fylkesmannen i Finnmark. Bildet er også gjengitt i rapporten fra måleprogrammet gjort på oppdrag fra Miljødirektoratet og Klima- og miljødepartementet.*

*Figure 2: Nikel smelter and the city of Nikel, seen from Hill 96 in the Pasvik valley 19. June 2008. The Pasvik river and Salmijärvi constitute the border between Russia and Norway. Northerly wind blows from the smelter towards the city of Nikel. Average  $\text{SO}_2$  concentrations at the NILU monitoring station in Nikel were about  $1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Photo: Christoffer Aalerud, Office of Finnmark County Governor. The photo is taken from the report from the monitoring program funded by Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet) and Ministry of Climate and Environment.*

Mengden SO<sub>2</sub> sluppet ut pr år er rimelig godt kjent (omlag 100 000 tonn SO<sub>2</sub> per år fra Nikel og Zapoljarnij). De rapporterte utslippstallene stemmer godt med uavhengige anslag. Men det vites ikke hvor mye (i %-andel) som slippes ut i bakkenivå (diffuse utslipp) og hvor mye som slippes ut fra pipene. Hvor røykgassen slippes ut har avgjørende betydning for spredningen av utslippene. I tillegg er tidsvariasjonen av utslippene ukjent og beheftet med stor usikkerhet. Disse to faktorene representerer en stor usikkerhet med tanke på modellberegninger. I beregningene antas det lik fordeling mellom bakkenivå/pipemunning, samt at det slippes ut lik mengde SO<sub>2</sub> per tidsenhet, noe observasjoner tilsier at det ikke gjør.

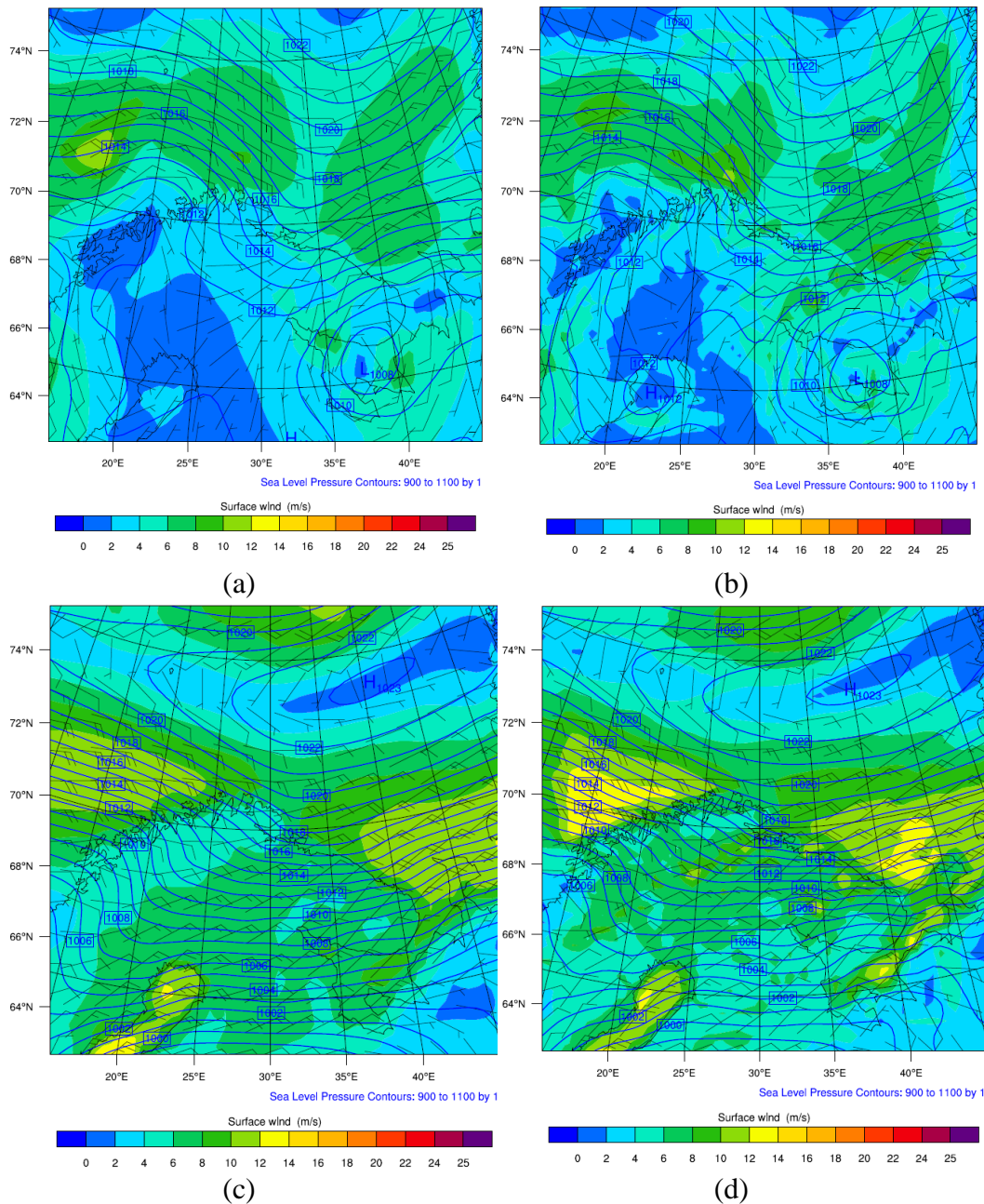
### 3 Værsituasjonen

Meteorologiske faktorer, spesielt vind og stabilitet, spiller naturlig nok en stor rolle for transporten og spredning av forurensning og derved for konsentrasjonen av SO<sub>2</sub> i nærrområdene til Nikelverket. Derfor er det viktig å gjøre en analyse av værsituasjonen for periodene som er tema i denne studien. Meteorologiske felter for kl. 12 universell tid UTC fra ECMWF er plottet for hver dag i periodene. Av disse er plott som viser bakketrykk og vindfelter for to utvalgte dager vist i Figur 3(a) og (c), samt Figur 4(a) og (c). Dette er meteorologiske felter som ECMWF utarbeider for bruk i værvarsling og analyse. Disse har også blitt sammenlignet med de tilsvarende plottene fra selve WRF-kjøringene, se Figur 3(b) og (d), samt Figur 4(b) og (d). Dette er meteorologiske felter utarbeidet spesielt for denne studien tilpasset domenene og gridoppløsningen som ble valgt for modellkjøringene.

#### 3.1 1. - 8. juli 2007

Værforholdene i sommerperioden med høye konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> i Nikel by var svært stabile med vind fra nord-øst og lite nedbør. Figur 3 viser bakketrykk og vindfelt for 3. juli 2007 kl 12 universell tid UTC. Her befinner det seg et høytrykk i Barentshavet og et lite lavtrykk sør for Kolahalvøya, som dominerer været over nordlige deler av Skandinavia og områdene rundt Nikel. Dette gir nord-østlig vind og også ganske tørt vær, uten spesielt kraftig vind. Høytrykket er relativt stabilt i den første delen av perioden, og beveger seg østover, noe som er tydelig i Figur 3(c). Her ligger høytrykket lengre sør over Barentshavet, øst for Novaja Semlja. Vinden har økt kraftig og blåser nå rett fra øst mot vest.

Sammenlignet med WRF-simuleringene som er plottet i Figur 3(b) og Figur 3(d) fremgår det at begge WRF-plottene er ganske like ECMWFs analyser. Med fokus spesielt på Nikel fremgår det at vindretningen nok er noe mer mot vest enn det analysen viser 3. juli. Dette kan bety at simuleringen gir mindre spredning av SO<sub>2</sub> til Nikel ved dette tidspunktet. For 8. juli er forholdene rundt Nikel svært like analysen. Men i hovedtrekk er den meteorologiske representasjonen i inngangsdataene til modellen god.



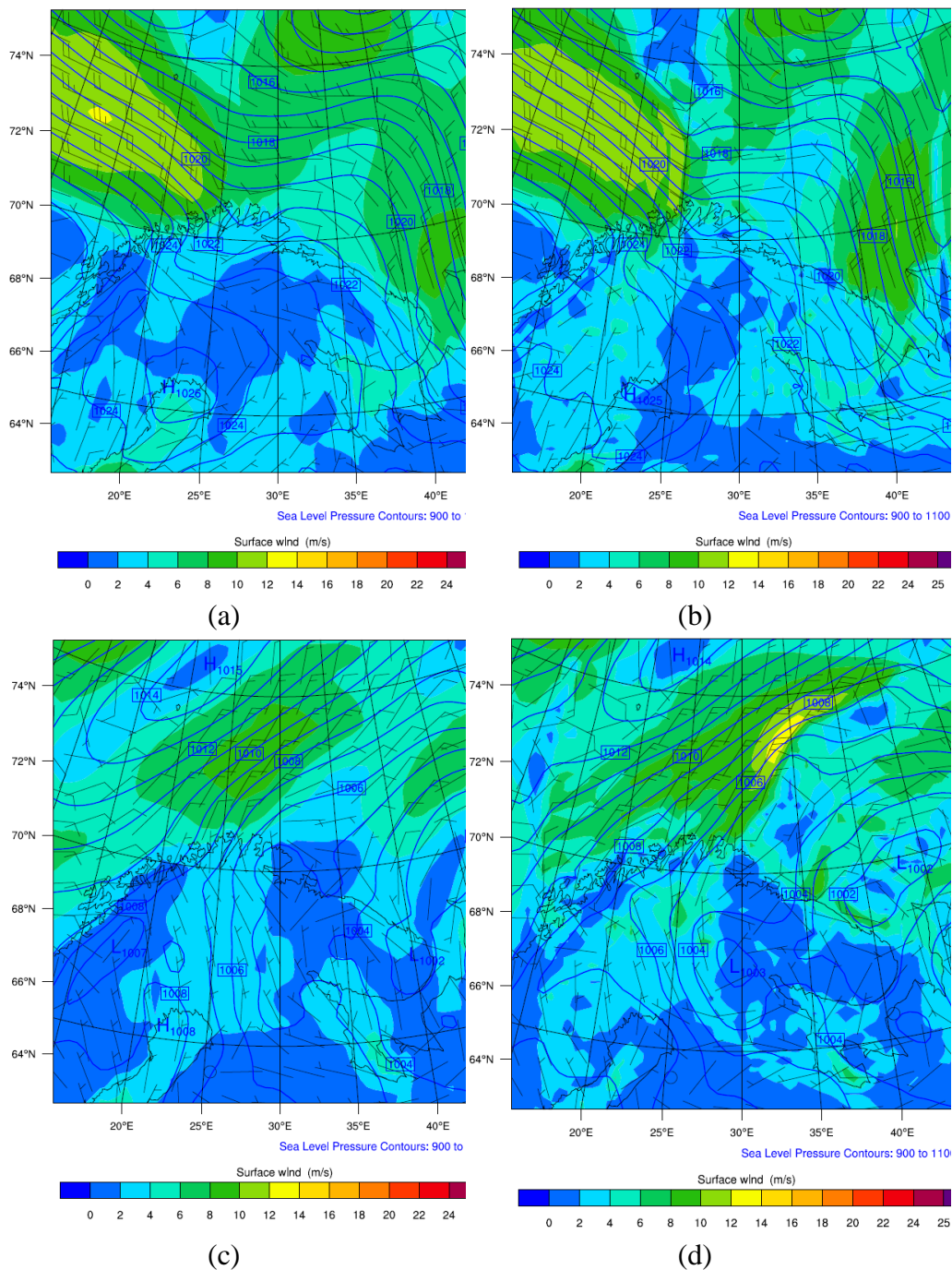
Figur 3: Bakketrykk og vindfelter for sommerperioden. (a) ECMWF-analyse og (b) WRF-simulering for 3. juli 2007 kl 12 UTC. (c) ECMWF-analyse og (d) WRF-simulering for 8. juli 2007 kl 12 UTC.

Figure 3: Surface pressure and wind fields for the summer period. (a) ECMWF-analysis and (b) WRF-simulation for 3. July 2007 at 12 UTC. (c) ECMWF-analysis and (d) WRF-simulation for 8. July 2007 at 12 UTC.

### 3.2 23. des 2010 - 6. jan 2011

I vinterperioden sto vinden for det meste fra vest til øst i den første delen av perioden, som man kan se i Figur 4(a). Det var også relativt svak vind. Rundt 29. desember sees et klart værskifte mot mer sørlig og kraftigere vind, men etter 2. januar snur det igjen mot nordlig vind. 3. januar (Figur 4 (c)) ligger Nikel like ved

et lite lavtrykk, som gjør at vindretningen endres raskt. Vindretningen endres på ny til sørlig helt i slutten av perioden.



Figur 4: Bakketrykk og vindfelter for vinterperioden. (a) ECMWF-analyse og (b) WRF-simulering for 25. des 2010 kl 12 UTC. (c) ECMWF-analyse og (d) WRF-simulering for 3. jan 2011 kl 12 UTC.

Figure 4: Surface pressure and wind fields for the winter period . (a) ECMWF-analysis and (b) WRF-simulation for 25. December 2010 at 12 UTC. (c) ECMWF-analysis and (d) WRF-simulation for 3. January 2011 at 12 UTC.

De tilsvarende plottene fra WRF-simuleringen vises i Figur 4(b) og Figur 4(d). Igjen er det ikke de helt store forskjellene, men i situasjonen fra 3. januar fremgår det at WRF-simuleringen gir en mer østlig vindretning enn det ECMWFs analyser viser. Forskjellene er imidlertid små også for denne perioden.

## 4 Modellresultater: spredningsplott

Under modellkjøringene ble det tatt ut konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> i hvert domene for hver time for begge periodene. Dette ble plottet og utvalgte plott er vist her (Figur 5 og Figur 6). Plottene viser spredningen av SO<sub>2</sub> i to dimensjoner. Konsentrasjonen er midlet over de laveste vertikale lagene hvor SO<sub>2</sub>-konsentrasjonen fra Nikelutslippene er betydelige i forhold til bakgrunnskonsentrasjonen av SO<sub>2</sub> (som opprinnelig er satt 0,1 ppbv). Fargeskalaen ble holdt konstant for hvert domene under hele perioden. Dette er gjort for lettere å kunne sammenligne plottene.

### 4.1 Sommer

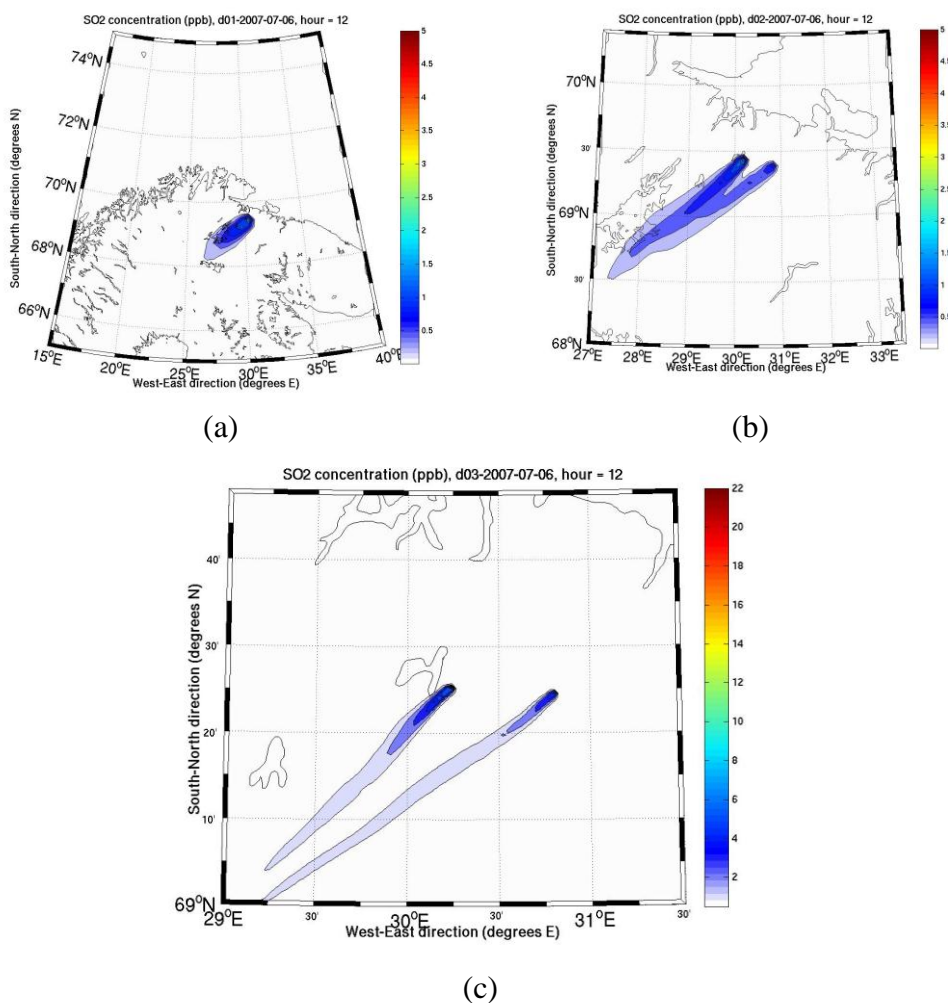
Figur 5 viser beregnet SO<sub>2</sub>-konsentrasjonen for 6. juli 2007 kl 12 universell tid UTC for alle de tre domenene. Her blåser vinden fra nordøst og fører utslippet fra Nikel og Zapoljarnij over Nikel by og også noe mot Svanvik. Merk også at Pasvikelva ikke er inkludert i plotteprogrammet som ble brukt. I plottet for det innerste domenet (Figur 5(c)) sees tydelig Svanevann og Kuetsjärvi<sup>6</sup> og utslippene fra Nikelverket like øst og nord for Kuetsjärvi. «Innsjøen» i den venstre delen av Figur 5(c) er Nordvestbukta, Vaggetem og Skrukkebukta hvor Pasvikelva fortsetter oppover mot Enaresjøen (Inarijärvi) fra den høyre/østligste delen. I plottet for domene 2 (Figur 5(b)) sees Enaresjøen til venstre/vestligste delen av domenet.

Figur 5(a) viser transporten av SO<sub>2</sub> i domene 1. Området utslippet sprer seg over er relativt stort, og kan spores langt inn i Finland. Konsentrasjonene er ikke spesielt høye, men poenget med å ha et relativt stort domene 1 er nettopp å få med transporten/spredningen på regional skala. Også i mange av de andre plottene (ikke vist her) sees forhøyede konsentrasjoner langt unna utslippspunktet, også over store deler av Nord-Norge, Nord-Sverige og Nord-Finland, før utslippet ikke lenger kan spores.

For domene 2 ser vi hvordan utslippene spres på et mer regionalt/lokalt plan (opptil 100 km). Her er det også tydelig hvordan de to kildene i Nikel og Zapoljarnij er lagt inn i modellen. Til sist ser vi den helt lokale spredningen. Her er skalaen forskjellig fra de to andre for å vise hvor de høyeste konsentrasjonene finnes.

---

<sup>6</sup> "järvi" er finsk og betyr innsjø, den tilsvarende samiske betegnelsen er "jav'ri". Järvi og jav'ri brukes tidvis om hverandre i stedsnavn i grenseområdene.

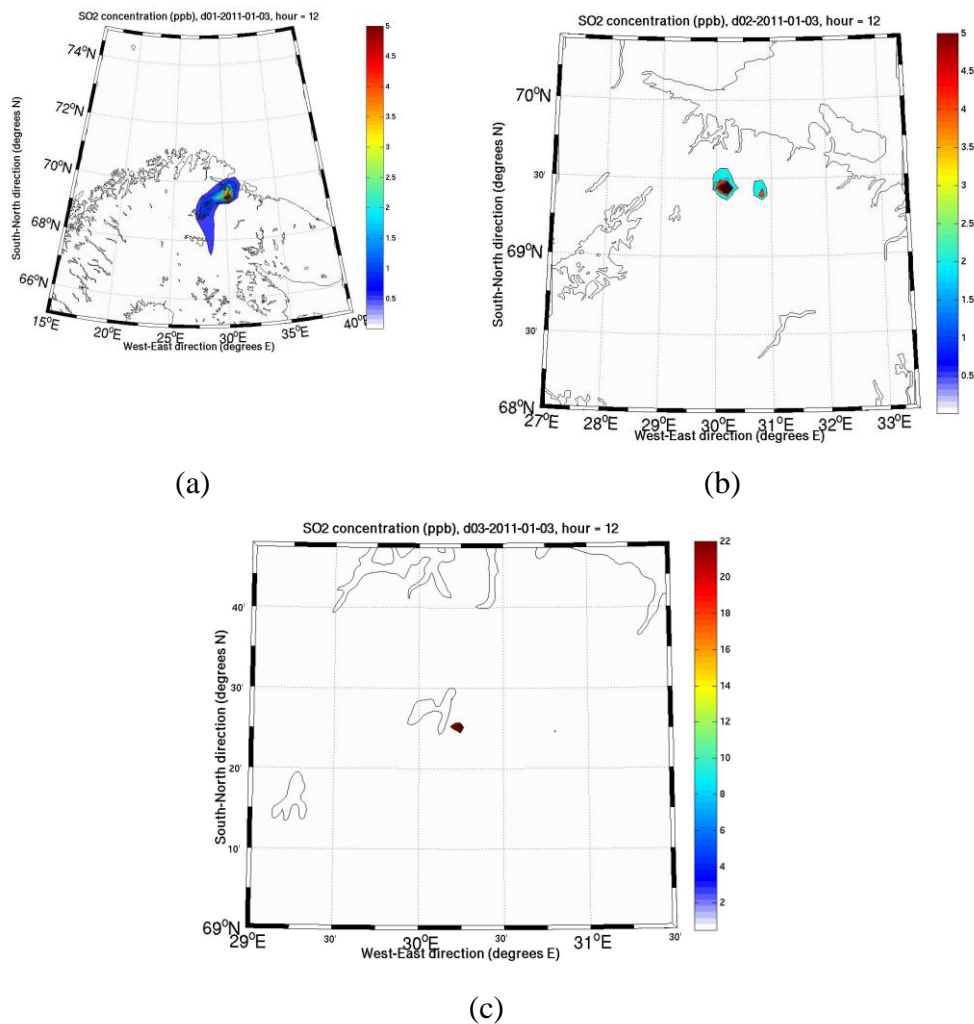


Figur 5: Spredning av  $\text{SO}_2$  for 6. juli 2007 kl 1200 UTC (a) domene 1, (b) domene 2 og (c) domene 3. Merk forskjellig skala i plott (a) og (b) vs. (c). Enhet: ppb (parts per billion,  $10^{-9}$ , blandingsforhold) midlet over de nederste lagene.

Figure 5: Dispersion of  $\text{SO}_2$  for 6. July 2007 at 12h UTC (a) model domain 1 (outermost domain), b) model domain 2 (intermediate) and (c) model domain 3 (innermost domain). Please note different scale in plots (a) and (b) compared to plot (c). Unit: ppb (parts per billion,  $10^{-9}$ , mixing ratio) as average over the lowermost model layers.

## 4.2 Vinter

Figur 6 viser tilsvarende plott for 3. januar 2011 kl 12 universell tid UTC. I størsteparten av denne perioden blåser vinden fra vest eller sør, men denne dagen ble også noe av utslippene spredt vestover (dvs. vind fra øst), noe som tydelig sees i Figur 6(a). Som vist i værplottet i Figur 4(c) er det lite vind denne dagen, dette gir langsom transport og treg spredning og utslippet av  $\text{SO}_2$  «hoper seg opp». Dette fører igjen til lokalt relativt høye konsentrasjoner, som vist i domene 2 og 3 (Figur 6(b) og Figur 6(c)).



Figur 6: Spredning av SO<sub>2</sub> for 3. januar 2011 kl 1200 UTC (a) domene 1, (b) domene 2 og (c) domene 3. Merk forskjellig skala i plott (a) og (b) vs. (c). Enhet: ppb (parts per billion, 10<sup>-9</sup>, blandingsforhold) midlet over de nederst lagene.

Figure 6: Dispersion of SO<sub>2</sub> for 3. January 2011 at 12h UTC (a) model domain 1 (outermost domain), (b) model domain 2 (intermediate) and (c) model domain 3 (innermost domain). Please note different scale in plots (a) and (b) compared to plot (c). Unit: ppb (parts per billion, 10<sup>-9</sup>, mixing ratio) as average over the lowermost model layers.

## 5 Sammenligning med observasjoner

Den beste og viktigste metode for å validere en modell er å sammenligne med observasjoner. I denne studien har de modellerte konsentrasjonene av SO<sub>2</sub> blitt sammenlignet med observasjoner fra Svanvik, Nickel (kun sommerperioden siden stasjonen ble stengt 31. august 2008 og ikke var operativ i 2010/11) og Karpdalen (kun vinterperioden siden stasjonen ble gjenåpnet 16. oktober 2008 og ikke var operativ under sommerepisoden). Mer inngående beskrivelse av observasjonene er gitt i rapportene fra det norske overvåkingsprogrammet, finansiert av SFT/Klif/Miljødirektoratet og Miljøverndepartementet/Klima- og



miljødepartementet (Berglen et al. (2008) for observasjonene for sommerepisoden 2007 og Berglen et al. (2011) for observasjonene fra vinteren 2010/11). Vindhastighet og temperatur har også blitt sammenlignet, men disse blir ikke presentert her. Figur 7 viser modellert og observert konsentrasjon av SO<sub>2</sub> både for sommer- og vinterperioden.

## 5.1 Sommer

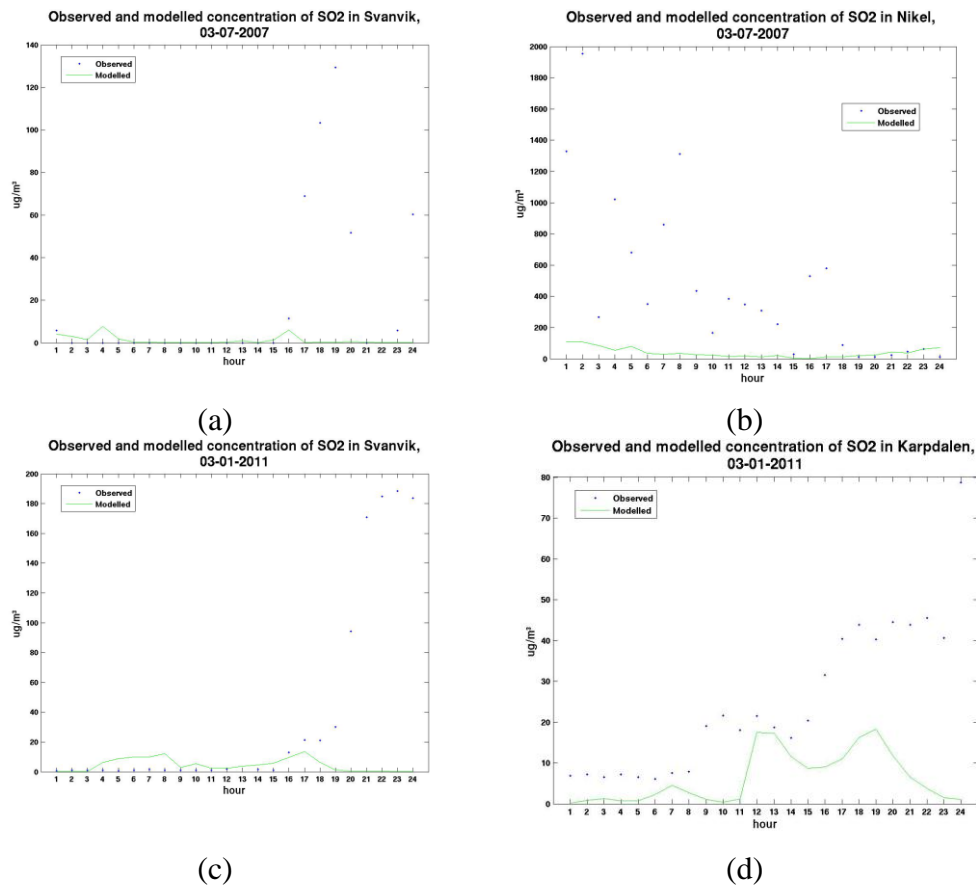
Figur 7(a) og Figur 7(b) viser modellert (grønn linje) mot observert (blå prikker) for Svanvik og Nikel 3. juli 2007. Modelldata er hentet fra de gridboksene som representerer Svanvik og Nikel i domene 3. Merk at observasjonene «forsvinner» i plottene når målt konsentrasjon er nær 0. Det som umiddelbart blir tydelig er at den modellerte konsentrasjonen ikke er i nærheten av de observerte toppene i konsentrasjonen. Man ser også at den observerte variasjonen er langt større enn den modellerte, og at toppene gjerne kommer plutselig. Dette er et typisk mønster for stasjoner som ligger nær store lokale kilder, som stasjonen i Nikel by. Hvis vinden blåser fra en annen retning enn fra utslippspunktet, er de målte konsentrasjonene lave, men når vinden snur kan målestasjonen plutselig bli eksponert. Røykfanen er veldig tydelig avgrenset nær utslippspunktet og bare noen graders forskjell i vindretning kan gjøre at stasjonen er eksponert/ikke eksponert.

Når det gjelder Nikel by, ble det målt uvanlig høye konsentrasjoner i den aktuelle perioden. Selv med en gridoppløsning på 1 km befinner ruten som dekker Nikel by seg kun en rute unna ruten som dekker smelteverket og utslippene. Dermed vil en relativt konsentrert røykfanen med utslipp fra smelteverket kunne treffe Nikel by uten å blandes så mye først, mens det modellerte utslippet uansett fordeles jevnt i boksen. Det er spesielt de diffuse utslippene i bakkenivå, dvs. rett fra selve smeltehallen som påvirker lokal luftkvalitet i Nikel by når vinden blåser fra nord.

Noe av den samme effekten gjelder også for Svanvik, som ligger under en mil unna smelteverket. Også her kan den konsentrerte røykfanen komme og gi store utslag i den observerte konsentrasjonen. De modellerte konsentrasjonene greier heller ikke her å representere de største toppene.

## 5.2 Vinter

I vinterperioden er det stort sett ikke målt så høye konsentrasjoner som i Nikel i sommerperioden, men det er fortsatt noen dager med forhøyede konsentrasjoner spesielt 3. januar, som Figur 7(c) og Figur 7(d) viser. Mye av den samme tendensen vises også her, de modellerte konsentrasjonene når ikke opp til de observerte på de høyeste toppene og varierer også mindre.



Figur 7: Modellerte og observerte konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> fra (a) Svanvik 3. juli 2007, (b) Nikel 3. juli 2007, (c) Svanvik 3. januar 2011 og (d) Karpdalen 3. januar 2011. Hvis målte konsentrasjoner er nær 0 vil ikke disse synes på plottet (blå punkter).

Figure 7: Modelled and observed concentrations of SO<sub>2</sub> from (a) Svanvik 3. July 2007, (b) Nikel 3. July 2007, (c) Svanvik 3. January 2011, and (d) Karpdalen 3. January 2011. If the observations are close to 0 they are not visible in the plot (blue dots).

Det er spesielt to faktorer som gjør at modellen vil underestimere konsentrasjonene i episodene. En faktor er at det ikke foreligger noen informasjon om utslippene, hverken fordeling i tid eller hvilke mengder som slippes ut i hvilke høyder. Episoder med høye konsentrasjoner kan delvis være forårsaket av store utslipp over kort tid, mens det i modellen antas jevne utslipp tilsvarende 100 000 tonn SO<sub>2</sub>/år. Korrekte utslippsdata er viktig og nødvendig for å modellere spredning av forurensning og forutsi konsentrasjoner korrekt, spesielt i nærheten av store punktkilder som i dette tilfellet. Den andre faktoren er at i en modell vil konsentrasjonen regnes ut for hver enkelt gridboks som i dette tilfellet er  $1 \times 1 \text{ km}^2$  nær Nikel. Dvs. at i modellen vil røykfanen fordeles utover og de høye konsentrasjonene «midles vekk», mens i den virkelige atmosfæren vil røykfanen være ganske konsentrert og avgrenset, spesielt nær utslippspunktet.

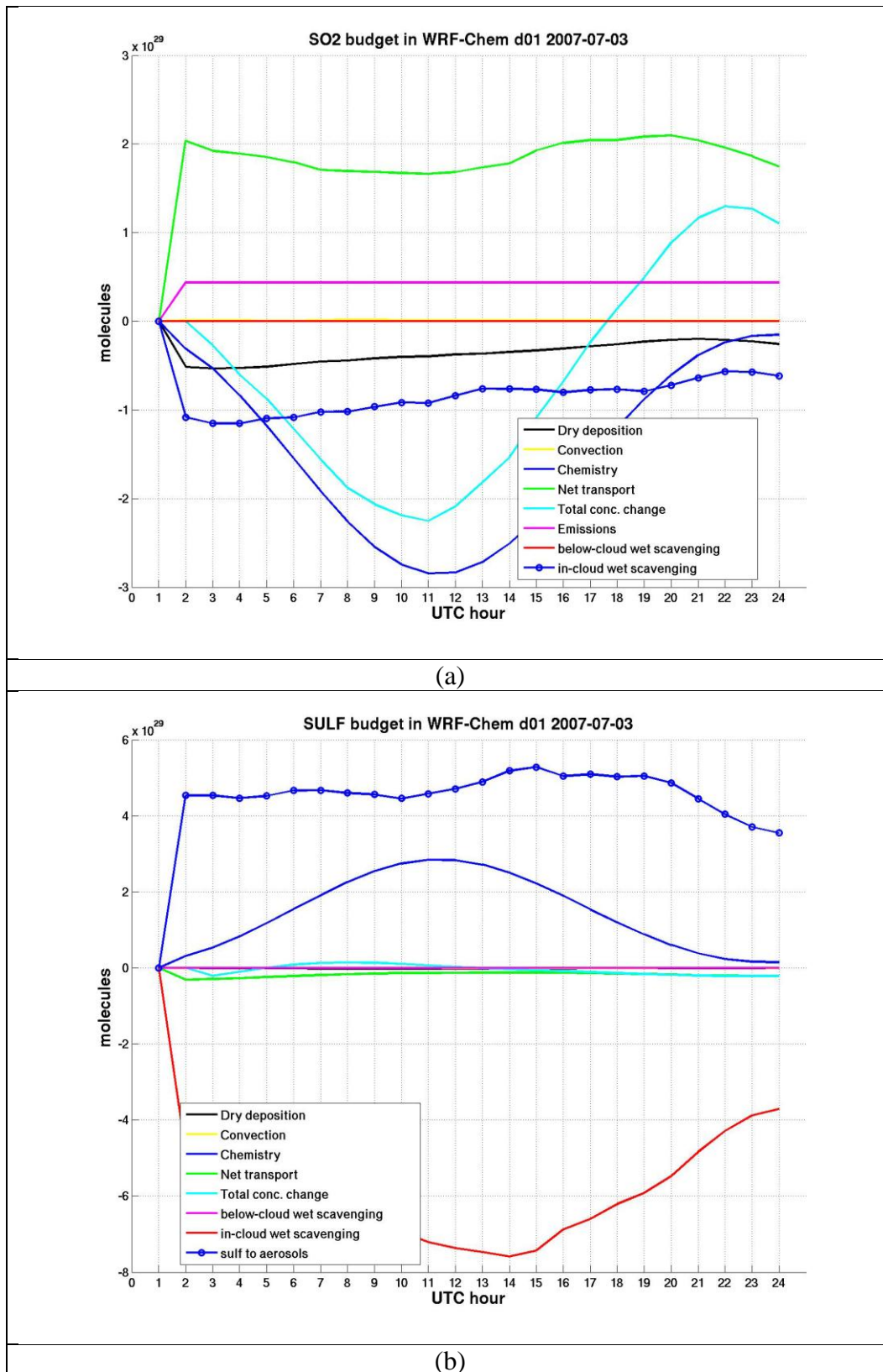
## 6 Våtavsetning og budsjett-plott

Som tidligere nevnt ble gasskjemiskjemaet RADM2 valgt i kombinasjon med MADE/SORGAM med våtavsetning aerosol-skjema. Her blir svovel vasket ut som  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  eller andre sammensetninger med  $\text{SO}_4^{2-}$ .  $\text{SO}_2$  reagerer med OH-radikalet, og blir til  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (kalt sulf i WRF-koden), som er ekstremt vannløselig. Herfra kan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reagere videre til forskjellige andre sammensetninger av  $\text{SO}_4^{2-}$ , tørke eller bli aerosolpartikler, f.eks  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Den siste reaksjonen kan også gå andre veien tilbake til sulf igjen (det eksisterer en likevekt).

Våtavsetning var ikke inkludert i modellversjonen som ble valgt som utgangspunkt for denne studien. Det medførte en del uttesting av ulike matematiske løsninger med dertil prøving og feiling og arbeidet bar preg av et visst «nybrottsarbeid». I denne prosessen ble det også benyttet observasjoner fra grenseområdene for å vurdere om avsetning var korrekt representert i modellen. Dette viser igjen hvor viktig det er med observasjoner, både av konsentrasjoner og avsetning.

Ut i fra de generelle plottene av sulf og  $\text{SO}_2$ -konsentrasjonen i domenene er det vanskelig å gi noen fullgod vurdering av metoden som ble valgt for parameterisering av våtavsetning i WRF. Våtavsetning har en meget stor betydning for beregningene av konsentrasjonene av  $\text{SO}_2$  og  $\text{H}_2\text{SO}_4$  og det ble derfor investert mye tid for å vurdere og løse dette på best mulig måte. Som en første tilnærming ble verdier for våtavsetning av  $\text{SO}_2$  og sulf skrevet ut som en egen variabel, men dette ga verdier som var langt lavere enn det som var forventet. Men siden det også her foreligger en del usikkerheter, ble løsningen å lage et såkalt budsjettplott.

Budsjettplottene viser bidraget fra de forskjellige prosessene (tørravsetning, våtavsetning, konveksjonstransport, kjemi etc.) til den totale endringen av konsentrasjonen for en kjemisk komponent. Her er bidraget fra de forskjellige prosessene summert opp over hele domenet for hver time og plottet for et døgn av gangen. Budsjettplottene ble laget for begge periodene for domene 1 (ytterste domenet).



Figur 8: SO<sub>2</sub>-budsjett for (a) 3. juli 2007 og (c, se neste side) 29. desember 2010 og sulf-budsjett for (b) 3. juli 2007 og (d, se neste side) 29. desember 2010. Enhet: molekylar innan domene 1. Merk at skalaen er forskjellig for de ulike plottene for å vise flest mulige detaljer.

(English translation next page).

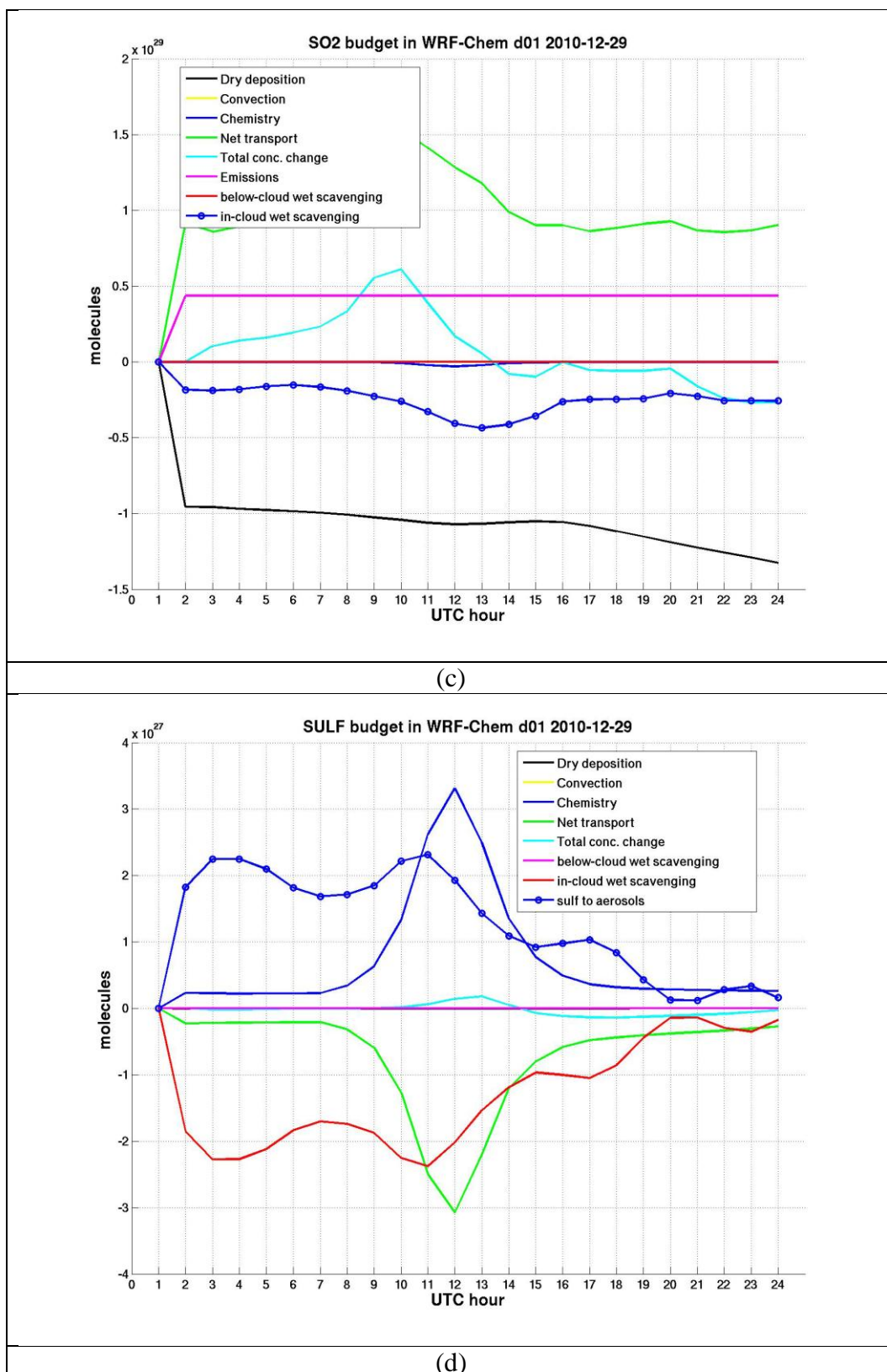


Figure 8: SO<sub>2</sub> budget for (a, see previous page) 3. July 2007 and (c) 29. December 2010 and sulf/SO<sub>4</sub> budget for (b, see previous page) 3. July 2007 and (d) 29. December 2010. Unit: molecules within domain 1. Note that the scale is different in the different plots to show maximum degree of details.

Det er stor forskjell mellom plottene for sommerperioden (Figur 8(a) og (b)) og vinterperioden (Figur 8(c) og (d)). Det er sola som driver den kjemiske syklusen i atmosfæren, og derved er det størst omdanning og raskere kjemisk tap sommerstid. Atmosfærens kjemiske syklus omtales ofte som «fotokjemi», fra gresk  $\phi\omega\tau\omicron$ - [foto-] som betyr «lys». Midtvinters er det lengre natt/kortere dag og i grenseområdene mot Russland er det mørketid, dvs. at solen er under horisonten hele døgnet og det er ingen direkte innstråling, kun blålig, spredt lys i sør midt på dagen.

I  $\text{SO}_2$ -plottet fra sommerperioden (Figur 8(a)) er overgangen til sulf det største tapsleddet (oksidasjon). Denne prosessen gir størst bidrag midt på dagen, når det er mye solinnstråling som genererer OH. Våtavsetning, av typen såkalt in-cloud scavenging, dvs at  $\text{SO}_2$  tas opp av skydråper som så faller ut som regn, og tørravsetning (avsetning på bakken) er også viktige sluk/tapsledd. Av kilder er det utslipp, samt netto transport som gjelder. Merk at ved avsetning tapes svovel fra atmosfæren, det avsettes på bakken og bidrar til forsuring, mens ved oksidasjon går svovel over til sulf/ $\text{H}_2\text{SO}_4$ , dvs. en annen form, men det tapes ikke fra atmosfæren. Transporten er tilsig fra ytterkantene i modelldomenet, altså et lite positivt bidrag som gir utslag kun når alle sluk og kilder summeres opp. For boksene som ligger nær Nikel har med andre ord dette ikke noen innvirkning. Nær Nikel dominerer utslipp som største kildeledd. Sulf har et like stort positivt bidrag fra kjemien som  $\text{SO}_2$  har tap, dette sees i plott (a) og (b) der den mørkeblå kurven i de to plottene er like store, men har motsatt fortegn. Sulf får også inn et stort bidrag fra aerosoler. Aerosol/sulf-reaksjonen er en likevektsreaksjon som kan gå begge veier. I dette tilfellet er våtavsetningen et stort sluk, så for å kompensere dannes ny sulf av aerosoler. Ved andre tidspunkt uten andre store sluk, var netto aerosol/sulf-prosessen negativ (sulf ble tapt ved at aerosoler ble dannet).

For vinterperioden (Figur 8(c)) er det kjemiske tapet/oksidasjonen av  $\text{SO}_2$  svært lite. Dette kommer av at det er lengre natt/kortere dag, i nord er det mørketid og lite OH dannes, så reaksjonen  $\text{SO}_2$  til sulf/ $\text{SO}_4$  er treg og  $\text{SO}_2$  har derved lengre levetid. Merk at skalaene i Figur 8 (a) – (c) er  $10^{29}$ , mens den i Figur 8(d) er  $10^{27}$ , altså 1/100-del. Tørr- og våtavsetning er nå de største tapsleddene. Utslipp fra Nikel og transport fra kantene er også her de høyeste kildene til mer  $\text{SO}_2$ . Etersom det dannes svært lite sulf om vinteren i domene 1 (nær utslippspunktet) er alle leddene/prosessen betydelig redusert. I Figur 8(d) sees imidlertid tydelig hvordan de enkelte bidragene kompenserer for hverandre, våtavsetning og aerosol/sulf-reaksjonen, samt  $\text{SO}_2$  til sulf og netto transport.

## 7 Konklusjon og videre betraktninger

Formålet med denne studien er å studere utslipp, spredning og avsetning av svoveldioksid ( $\text{SO}_2$ ) fra verkene i Nikel og Zapoljarnij. WRF-Chem modellen ble kjørt med tre ulike domener sentrert om grenseområdene mellom Russland og Norge. Horisontal oppløsning i de tre domene er hhv. 25, 5 og 1 km. To avgrensede tidsperioder er studert, 1.-14. juli 2007 (den såkalte sommerepisoden 2007) og perioden 23. desember 2010 - 7. januar 2011.

Meteorologiske inngangsdata ble utarbeidet ved bruk av WRF. Disse dataene viser god overenstemmelse med analysedata fra ECMWF (det europeiske værserveret i

Reading). Meteorologi, og da spesielt vindretning og –styrke, samt stabilitet er viktige for spredning av luftforurensning i atmosfæren. Våtavsetning/nedbør er en viktig tapsmekanisme for svovel.

Det er laget plott som viser spredning av SO<sub>2</sub> for de tre domene time-for-time. Konsentrasjoner og spredning av SO<sub>2</sub> samsvarer med og kan forklares utfra meteorologiske parametre, spesielt vind. Plott for påfølgende timer kan settes sammen til en animasjon som viser tidsutvikling av SO<sub>2</sub>. Dette er nyttig både for analysen av resultatene, men også som demonstrasjon av spredning av utslipp fra punktkilder. Utslippene fra Nikel og Zapoljarnij avsettes og tapes både på lokal skala nær kildene, men kan også spres på regional og synoptisk skala opptil flere tusen kilometer av gårde før det tapes.

Modellresultater er sammenlignet med observasjoner. Modellen underestimerer SO<sub>2</sub>-konsentrasjonene i enkeltepisoder, modellen greier ikke å reprodusere maksimumskonsentrasjonene. En mulig forklaring på dette er at både målestasjonen i Nikel by og målestasjonen på Svanvik ligger nær utslippspunktet slik at i den virkelige atmosfæren er røykfanen konsentrert og lite utbredt, mens i modellen vil den fordeles jevnt i hver boks/rute. En annen forklaring er at utslippene ikke er godt nok representert i modellen. Nå er det antatt konstante utslipp uten tidsvariasjon, mens utslippene i virkeligheten varierer mye på kort tidsskala. Det er også utslipp både fra bakken (diffuse utslipp) og fra skorsteinene uten at det foreligger mer nøyaktig informasjon om fordeling. Korrekte utslippstall er avgjørende for å få riktige modellresultater.

Som et ledd i modellutviklingen og vurdering av våtavsetning er det også laget budsjett for de ulike prosessene i modellen, dvs. summert opp hvor mye de enkelte prosesser bidrar som kilde og sluk for SO<sub>2</sub> og SO<sub>4</sub>/sulf innenfor hele modelldomenet (domene d01). Også sammenligning med observasjoner av avsetning ble brukt i dette modellarbeidet. For SO<sub>2</sub> er utslipp og transport inn i modelldomenet største totalbidrag/kilde. Kjemisk tap, våtavsetning og tørravsetning er største tap sommerstid (gradert etter synkende viktighet), mens tørravsetning er viktigst vinterstid fulgt av våtavsetning. Kjemisk tap er lite i den mørke årstiden på grunn av lave konsentrasjoner av oksidanter i atmosfæren (som f.eks. OH).

Et viktig moment ved bruk av WRF-Chem er at den er meget regnekrevende. Beregninger slik de er utført i denne studien krever flere ukers CPU-regnetid ved bruk av flere noder. Dette gjør at modellen kan kjøres kun for avgrensede perioder. Imidlertid representerer WRF-Chem prosesser på en meget detaljert måte. Slik sett er modellen best egnet til å studere prosesser (utslipp, spredning, kjemisk tap, tørravsetning, våtavsetning etc.) mer enn å produsere felter av konsentrasjoner og avsetning på lengre tidsskala, for eksempel for år.

## 8 Referanser

- Berglen, T.F., Sivertsen, B., Arnesen, K. (2008) Grenseområdene Norge-Russland. Luft- og nedbørkvalitet, april 2007-mars 2008. Kjeller, NILU (Statlig program for forurensningsovervåking. Rapport 1037/2008. TA-2445/2008) (NILU OR 68/2008).
- Berglen, T.F., Arnesen, K., Rode, A., Tønnesen, D. (2011) Grenseområdene Norge-Russland. Luft- og nedbørkvalitet, april 2010-mars 2011. Kjeller, NILU (Statlig program for forurensningsovervåking. Rapport 1106/2011. TA 2838/2011) (NILU OR 31/2011).
- Berglen, T.F., Dauge, F., Andresen, E., Haugsbakk, I., Nilsson, L.O., Ofstad, T., Tønnesen, D., Vadset, M., Våler, R.L. (2014) Grenseområdene Norge - Russland. Luft- og nedbørkvalitet, april 2013 - mars 2014. Kjeller, NILU (Miljødirektoratet rapport, M-204/2014) (NILU OR 33/2014).
- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B. (2005) Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmos. Environ.*, 39, 6957-6975.
- NCAR (2014) WRF-Chem (online). Boulder, National Center for Atmospheric Research. **URL:** <http://www.acd.ucar.edu/wrf-chem/>
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A description of the advanced research WRF version 3. Boulder, National Center for Atmospheric Research (NCAR Technical note. NCAR/TN-475+STR). **URL:** [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf) [Nedlastet 01-10-2014].
- WRF-Chem (2015) Weather Research and Forecasting (WRF) Model. Working Group 11: Atmospheric Chemistry. URL: <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/> [Nedlastet 30-01-2015].

## 9 Anerkjennelse og takk

NILUs arbeid i grenseområdene Norge-Russland er finansiert av Miljødirektoratet og Klima- og miljødepartementet. Bjørg Jenny Engdahl var delvis finansiert av TEC – Trilateral cooperation on Environmental Challenges in the Joint Border Area, et prosjekt under Kolarctic ENPI. Prosjektet har mottatt støtte fra Norges Forskningsråd /Tungregneanlegget ved Universitetet i Oslo gjennom en tildeling av regnetid.



**Vedlegg A**  
**Kort modellbeskrivelse WRF**



**Model name: WRF - Weather Research and Forecasting model**

Version: 3.4.1 (August 16, 2012)

Purpose: WRF is a meteorological model suitable for use in a broad range of applications across scales ranging from meters to thousands of kilometers, including regional and global applications, parameterization research, forecasting, coupled-model applications, etc.

Contact persons: NCB, SSo, TMS

Main web page: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>

Operating system: GNU/Linux, parallel computing platforms

Main external repository directory for the software:  
<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/downloads.html>

Main NILU repository directory for the software: TBD

Is source code available? : Yes

If source code is available, how is the model code compiled: Fortran 90, 95 and C compiler.

How is the model installed? : WRF is installed using the configuration files distributed with the model. The model requires also the installation of the WPS (WRF Preprocessing System), and terrestrial datasets should be available before running the model. The sources code can be downloaded from the WRF web page. Typical installation directory: WRF is installed on the NILU Linux machines (Nordre, Sudre, Austre and Vestre)

Software libraries used by the model: WRF requires netCDF library. If MPI and OpenMP compilation is desired, MPI or OpenMP libraries are required.

How is the model typically started? : After the compilation, two executables are generated: real.exe and wrf.exe. After the domain is configured and the input data is generated, using WPS, we run real.exe to generate the initial and boundary conditions (takes the data from WPS) and then wrf.exe to start the model. A comprehensive description and a tutorial on how to run the model can be found here: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/pub-doc.html>

Input files:

- 3D and surface: horizontal winds, temperature, relative humidity, geopotential height
- 3D soil: soil temperature, soil moisture (optional)
- 2D fields: surface pressure, sea-level pressure, land mask, topography elevation of input data (optional), SST (optional), sea-ice (optional), skin temperature (optional)

Output files:

- 3D and 2D meteorological parameters

Converters: WRF can be used as meteorological input for other models as for instance EMEP or FLEXPART.

Output graphics: The output of WRF are netcdf files that can be visualized on NCL, GrADS, IDL or Vis5D among others graphical packages.

**References:**

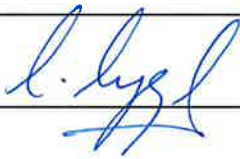
Skamarock et al. (2008).

### Omregning av utslipp

Benevningen for utslipp i WRF er mol molekyler per km<sup>2</sup> per time . Regnestykket for konverteringen av 100 000 tonn SO<sub>2</sub> per år blir da slik:

$$\frac{10^{11}g}{(365 \cdot 24t \cdot (32 + (16 \cdot 2) \frac{g}{mol}) \cdot dx \cdot dxkm^2)} = 178367 \frac{mol}{(dx \cdot dxkm^2 \cdot t)} \quad (1)$$

der dx er gridavstanden i domenet, 365 er dager pr år, 24 er timer per døgn og (32+16×2 er molvekt for SO<sub>2</sub>. Det er ikke lagt inn døgn- eller dag-til-dagvariasjon. Det antas at 50% slippes ut i bakkenivå (lag 1) og 50% i 160 m.

RAPPORTTYPE OPPDRAGSRAPPORT	RAPPORT NR. OR 57/2014	ISBN: 978-82-425-2733-2 (trykt) 978-82-425-2734-9 (elektronisk)	
		ISSN: 0807-7207 ISSN 0807-7185	
DATO 16/02/2015	ANSV. SIGN. 	ANT. SIDER 32	PRIS NOK 150,-
TITTEL Utslipp, spredning og avsetning av SO <sub>2</sub> fra Nikel og Zapolyarnij En WRF-Chem modellstudie		PROSJEKTLEDER Tore Flatlandsmo Berglen	
		NILU PROSJEKT NR. O-112064 / O-8976	
FORFATTER(E) Bjørng Jenny Engdahl <sup>1)</sup> , Anna von Streng Velken <sup>2)</sup> , Tore Flatlandsmo Berglen <sup>3)</sup> , Øivind Hodnebrog <sup>4)</sup> og Frode Stordal <sup>5)</sup>		TILGJENGELIGHET * A	
<sup>1)</sup> NILU, nå ved MET, <sup>2)</sup> NILU, nå ved Miljødirektoratet, <sup>3)</sup> NILU, <sup>4)</sup> UiO, nå ved CICERO, <sup>5)</sup> UiO		OPPDRAGSGIVERS REF.	
KVALITETSSIKRER: Sverre Solberg			
<b>OPPDRAGSGIVER</b> Denne studien er utført under prosjekt O-112064 KoArctic finansiert gjennom TEC - Trilateral cooperation on Environmental Challenges in the Joint Border Area hvor kontaktperson er Helen Andersen hos Fylkesmannen i Finnmark. NILUs arbeid i grenseområdene (prosjekt O-8976 Norge-Russland) er ellers finansiert av Miljødirektoratet og Klima- og miljødepartementet, kontaktperson hos Miljødirektoratet er Tor Johannessen.			
STIKKORD Modellering	Industriforurensning	Miljøgifter	
<b>REFERAT</b> WRF-Chem-modellen har blitt brukt for å studere to episoder med forurensning fra smelteverkene i Nikel og Zapolyarnij, sommerepisoden 2007 og vinteren 2010/11. Meteorologiske inngangsdata fra WRF stemmer bra med analyse fra ECMWF. Modellen underestimerer SO <sub>2</sub> -konsentrasjoner i episoder, en mulig forklaring er at røykfanen blir midlet ut i modellen, samt at tidsutviklingen av utslippene ikke er korrekt representert. Budsjett over kilder og sluk viser at kjemisk tap er viktigst om sommeren, fulgt av våtavsetning, men våt- og tørravsetning er viktigst om vinteren. WRF-Chem er meget regnekrevende og oppsummert er WRF-Chem best egnet til å studere prosesser og enkeltepisoder.			
<b>TITLE</b> Emissions, dispersion and deposition of SO <sub>2</sub> from Nikel and Zapolyarny. A WRF-Chem model study.			
<b>ABSTRACT</b> The WRF-Chem model has been applied to study two specific episodes of pollution from the Nikel and Zapolyarny facilities, the summer episode 2007 and winter 2010/11. Meteorological input data from WRF compare well with data from ECMWF. The model underestimates concentrations of SO <sub>2</sub> in specific episodes, a possible explanation for this is that the flue gas plume is levelled out in the model, in addition little is known about the emissions. A budget for the different processes show that chemical loss and wet deposition are most important in summer time, while wet and dry deposition are most important in winter time. WRF-Chem is computational demanding and most suited to study processes and specific episodes.			

\* Kategorier  
 A Åpen – kan bestilles fra NILU  
 B Begrenset distribusjon  
 C Kan ikke utleveres

REFERANSE: O-112064 / O-8976  
DATO: FEBRUAR 2015  
ISBN: 978-82-425-2733-2 (trykt)  
978-82-425-2734-9 (elektronisk)

NILU – Norsk institutt for luftforskning er en uavhengig stiftelse etablert i 1969. NILUs forskning har som formål å øke forståelsen for prosesser og effekter knyttet til klimaendringer, atmosfærens sammensetning, luftkvalitet og miljøgifter. På bakgrunn av forskningen leverer NILU integrerte tjenester og produkter innenfor analyse, overvåkning og rådgivning. NILU er opptatt av å opplyse og gi råd til samfunnet om klimaendringer og forurensning og konsekvensene av dette.