

NILU : OR 15/94  
REFERANSE : O-92112  
DATO : FEBRUAR 1994  
ISBN : 82-425-0555-1

# **Spredningsberegninger av fluorider i Sunndalen**

## **Opptak i planter og våtavsetning**

**Trond Bøhler, Mona Larsen og Arne Semb**

---

# Innhold

	Side
<b>Sammendrag .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Innledning.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Teoretisk beskrivelse av spredningsmodellen.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Opptak av fluorider i vegetasjon .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Utvasking av fluorider i nedbør .....</b>	<b>8</b>
<b>5. Meteorologiske forhold.....</b>	<b>9</b>
<b>6. Spredningsberegninger.....</b>	<b>13</b>
6.1. Utslippsdata .....	14
6.2. Biologiske inngangsparametere.....	14
6.3. Resultater.....	15
<b>7. Diskusjon.....</b>	<b>20</b>
<b>8. Referanser .....</b>	<b>23</b>
<b>Vedlegg A: Månedsmiddelverdier av konsentrasjon, opptak og våtavsetning i Sunndalen, 1991.....</b>	<b>24</b>

## Sammendrag

*Norsk institutt for luftforskning (NILU) har på oppdrag for Effektstudien utført beregninger av opptak av fluorider i planter og våtavsetning av fluorider i Sunndalen.*

Modellen som er benyttet i beregningene er en puff- trajektorie modell som er tilpasset for bruk i Sunndalen. I spredningsmodellen er det utviklet rutiner for opptak av fluorider i planter og våtavsetning av fluorider.

Opptaksmodellen er basert på en multippel resistanse modell som beskriver avsetningshastigheten for en rekke spesifiserte komponenter for varierende vegetasjonstyper.

Våtavsetningen er basert på likevektsbetraktninger for hydrogenfluorid i væske- og gassfase. I tillegg er det tatt hensyn til dissosiasjonslikevekten mellom hydrogenfluorid i væskefase (HF) og  $H^+$  og  $F^-$ .

Ett års målinger av meteorologi på Sunndalsøra og Groa er tilpasset og bearbeidet for bruk i Spredningsmodellen. Informasjon om boniteten og vegetasjonstypen er hentet fra et kart fra økonomisk kartverk.

For å gi en mest mulig naturlig døgnlig beskrivelse av aktiviteten til plantene, er det benyttet ett års målinger av solinnstrålingen på Nordmoen.

Beregningene viser at opptaksprosessene er svært følsomme for tid på året og tid på døgnet. For vegetasjon med høy bonitet varierte opptakshastigheten i juni måned mellom 0,2 og 1,6 cm/s henholdsvis midt på natten og midt på dagen. Tilsvarende variasjon for vegetasjon med lav bonitet var 0,2-0,7 cm/s. I juli måned var midlere opptakshastighet 0,9 cm/s for vegetasjon med høy bonitet og 0,4 cm/s for vegetasjon med lav bonitet. Om vinteren var det liten døgnvariasjon i opptakshastigheten og midlere opptakshastighet er ca. 0,1 cm/s for alle vegetasjonstyper. Opptaket er som ventet størst nær verket og avtar med avstanden fra utslippet.

Over året var beregnet opptak størst i juli måned, hvor opptaket varierte fra ca. 32 mg/m<sup>2</sup> mnd. for Sunndalsøra til ca. 2 mg/m<sup>2</sup> ved Gjøra. Opptaket er lavt i vinterhalvåret. For Sunndalsøra er totalt opptak i planter over året beregnet til 104 mg/m<sup>2</sup> år og våtavsetningen ble beregnet til 54 mg/m<sup>2</sup> år. Tilsvarende beregninger for Romfo gav totalt opptak av fluorider i planter lik 12 mg/m<sup>2</sup> år og våtavsetningen ble beregnet til 6 mg/m<sup>2</sup> år. Beregnet våtavsetning av fluorider ble beregnet til ca. halvparten av beregnet opptak av fluorider i planter, uavhengig av avstanden fra utslippet. Nær utslippet er det konsentrasjonene som er begrensende for opptaket. På lengre avstander fra utslippet når konsentrasjonene er lave og fordelingen homogen, er det avsetningshastigheten som er begrensende for fluoridopptaket.

De meteorologiske inngangsparametrene er en del bearbeidet. Dels på grunn av manglende data, men også fordi viktige spredningsparametre ikke var målt. Usikkerheter knyttet til de vurderinger som er gjort for å tilpasse måledatene til spredningsmodellen kan reduseres betydelig ved å måle også spredningsparametrene som for eksempel vertikal og horisontal turbulens eller stabiliteten direkte ved bruk av temperaturdifferanser.

Et terreng med betydelig topografisk styring av transporten av forurensninger som Sunndalen er vanskelig å beskrive med bare to meteorologiske målestasjoner. En vindmåler vil alltid måle hvor vinden kommer fra og ikke hvor vinden blåser til. Dette medfører at puffene i modellen transporteres ut av dalområdet. Effekten av dette er kompensert ved redusert vekst av puffene slik at puff som har beveget seg ut av dalområdet fremdeles vil ha en riktig konsentrasjonsfordeling når vinden dreier og igjen fører dem tilbake til dalen. De kvantitative usikkerhetene med disse effektene er vanskelig å estimere.

For å beregne spredning av utslipp i en dal som Sunndalen, bør det utvikles en tredimensjonal vindfeltmodell der effektene av topografien innover i Sunndalen tas med. Bare på denne måte vil det være mulig å beskrive transport og fortykning av forurensninger opp gjennom dalen uten at puffene beveger seg ut av dalområdet. Dette er en stor oppgave for framtidig utvikling av modellverktøyet.

# Spredningsberegninger av fluorider i Sunndalen

## Opptak i planter og våtavsetning

### 1. Innledning

Prosjekt for effektstudier av utslipp fra aluminiumsverk i Norge, Effektstudien, ble igangsatt i 1990 etter en konferanse i Årdal i mars 1990. Temaet var utslipp fra aluminiumsverk og naturens tålegrenser. Hydro Aluminium Årdal hadde da på noen få år oppnådd betydelige utslipps-reduksjoner, spesielt med hensyn på fluorider. Som følge av dette ble det registrert en bedring av skadebildet på vegetasjonen rundt verket i Årdal. Blant annet ble det mulig å plante furu på steder hvor trær tidligere var døde på grunn av forurensning. Det var derfor naturlig å reise spørsmål omkring industriutslipp, effekter og eventuelt tålegrenser for naturen.

Norsk institutt for luftforskning (NILU) har som et delprosjekt i effektstudien utviklet en spredningsmodell som beregner våtavsetning og opptak av fluorider i vegetasjonen rundt aluminiumverk. Effektstudien er et tverrfaglig samarbeid og er rettet mot virkninger og toleransekrav for utslipp relatert til aluminiumproduksjon. Transport av utslipp i luft har betydning for eksponeringsberegningene til alle delstudiene i undersøkelsen.

NILU har tidligere utført spredningsberegninger av fluorider i Sunndalen. Disse beregningene ble utført med en statisk gaussisk modell. Konsentrasjonene ble beregnet i sektorer basert på statistiske bearbejdede spredningsdata. Modellen tok ikke hensyn til at avsetningen, opptaket i plantene, varierer med type vegetasjon og med tid på dagen og året.

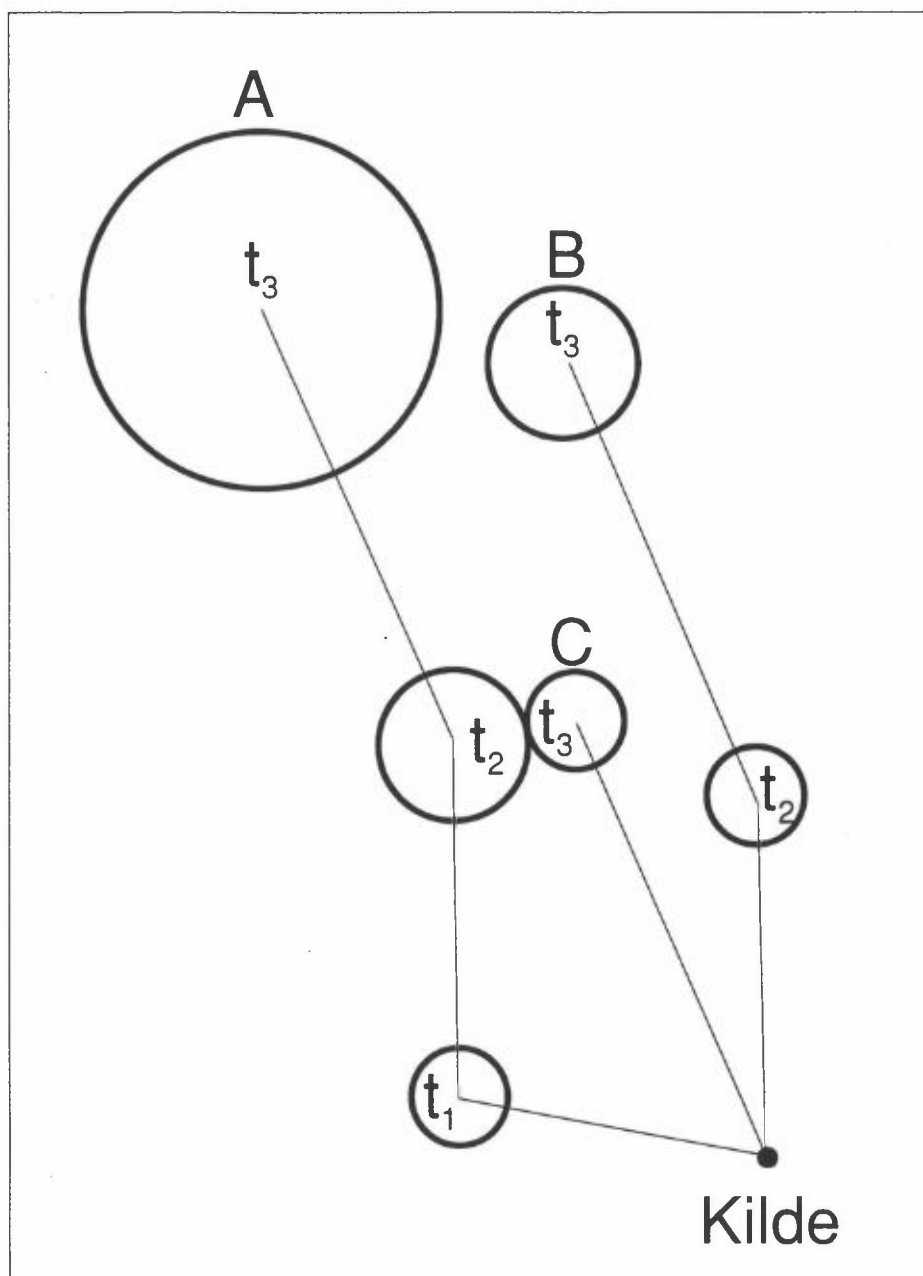
Denne rapporten beskriver resultater av spredningsberegninger for Sunndalen ved bruk av den nye modellen som tar hensyn til at opptak varierer med vegetasjonstype og tid på dagen og året. Modellen tar hensyn til den døgnlige og årlige variasjonen av meteorologiske parametre som vind, temperatur, nedbør og solinnstråling i tillegg til varierende marktype.

### 2. Teoretisk beskrivelse av spredningsmodellen

Modellen INPUFF er benyttet i beregningene. INPUFF er en gaussisk puff-trajektorie modell utviklet av EPA i USA. Beregninger kan utføres for et stort antall kilder og reseptorpunkter. Meteorologiske inngangsdata gis for hver meteorologiske periode i et visst antall punkter. Meteorologiske data ble midlet som timeverdier, for disse beregningene.

I figur 1 er det gitt en grafisk framstilling av modellen. Her var puff A først påvirket av vind fra øst-sørøst, deretter skiftet vinden til vind fra sør til sør-sørøst. Puff B ble frigjort etter at vinden hadde dreid mot sør, og puff C ble frigjort etter at vinden var skiftet til sør-sørøst. Puff A, B og C viser plasseringen av de tre puffene ved tidspunkt  $t_3$ . I INPUFF behandles utslippet fra en kilde som en serie

med puff (røykpakker) som sendes ut. Konstante meteorologiske betingelser er antatt i hver time. For hvert tidskritt beregnes plasseringen av puff senteret og fordelingen i puffet er antatt å være gaussisk. Hvert puff har derfor et senter og et volum som er bestemt av vinden, atmosfærens stabilitet og tiden som har gått siden puffet ble sluppet fra kilden. Røykløftet er beregnet ved Briggs formel.



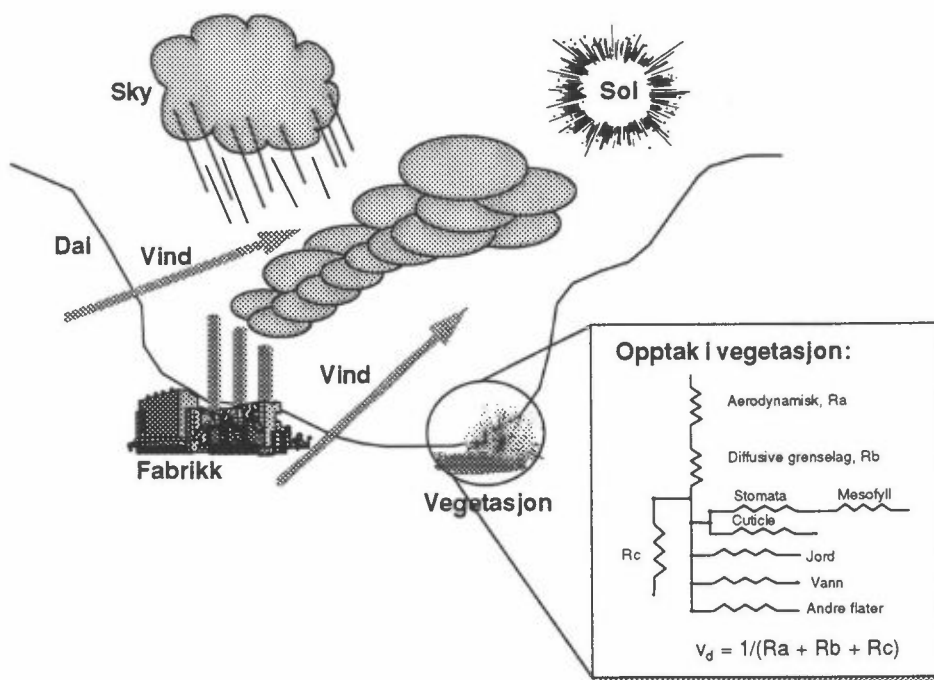
Figur 1: Grafisk framstilling av INPUFFs virkemåte.

Modellen er tilpasset for bruk i Sunndalen. Når puffene har nådd en størrelse som tilsvarer den effektive dalbredden, er veksten av puffene begrenset horisontalt. Det vil si at konsentrasjonen i puffene avtar saktere. Beskrivelse av transporten av utslippet er svært viktig og vil bli nærmere beskrevet i kapittel 5 som omhandler meteorologiske inngangsdata til modellen.

I spredningsmodellen er det lagt til rutiner for opptak av fluorider i planter, og våtavsetning av fluorider. En nærmere beskrivelse av disse rutinene er gitt i kapittel 3 og 4.

### 3. Opptak av fluorider i vegetasjon

Opptak av fluorider i vegetasjon er svært avhengig av tid på døgnet og tid på året. Hicks modell er en multippel resistanse metode som beskriver opptakshastigheten av en rekke spesifiserte komponenter for varierende vegetasjonstyper. Modellen er bygd opp som en motstandsanalogi. Viktige parametre for en riktig beskrivelse av opptakshastigheten er aerodynamisk motstand ( $R_a$ ), diffusiv grenselagsmotstand ( $R_b$ ) og motstanden som er avhengig av den biologiske aktiviteten i planten ( $R_c$ ). I figur 2 er det vist en skisse av modellen slik den er benyttet i beregningene av opptak av fluorider i vegetasjonen.



Figur 2: Skisse av modellen som er benyttet i beregningene av opptak av fluorider i planter, og våtavsetningen av fluorider i Sunndalen.

Nedenfor er det gitt en kort beskrivelse av de ulike parametre som inngår i beregningene av opptak av fluorider i planter. For en mer detaljert beskrivelse henvises det til Hicks (1987).

#### Aerodynamisk motstand (Ra):

Ra bestemmes helt av atmosfæriske egenskaper, først og fremst turbulent utveksling. Den atmosfæriske motstanden kan uttrykkes slik:

$$Ra = (1/ku_*)(\ln (z/z_0))$$

hvor:

- $u_*$  : Friksjonshastigheten
- $k$  : von Karmans konstant (0.4)
- $z_0$  : Ruhetsparameter
- $z$  : Anemometerhøyde.

#### Diffusiv grenselagsmotstand (Rb):

Rb tar hensyn til at transport av forurensning nær en overflate er påvirket av den molekylære diffusiviteten. Den diffusive grenselagsmotstanden uttrykkes slik:

$$Rb = (2/ku_*)(Sc/Pr)$$

hvor:

- $k, u_*$  : Som ovenfor
- $Sc$  : Schmidts tall
- $Pr$  : Prandtl tallet (0,72)

#### Biologisk motstand (Rc):

Rc inkluderer den stomatale motstanden, den cuticulære motstanden og mesofyllmotstanden til en total motstand for det molekylære laget rett over den biologiske flaten. Den biologiske motstanden kan uttrykkes slik:

$$Rc = 1/(1/Rs + LAI/r_{cut})$$

hvor:

- $R_s$  : Den veide stomatale motstanden, beregnet for direkte og diffust søllys.
- $LAI$  : "Leaf area index"
- $r_{cut}$  : Opptak gjennom cuticula (vokslag).



### Opptakshastighet (Vd)

Motstandene ovenfor kombineres for å beskrive den totale motstanden av transport av forurensninger gjennom grenselaget, slik at opptakshastigheten kan bestemmes. Opptakshastigheten kan uttrykkes slik:

$$Vd = 1/(Ra + Rb + Rc)$$

Den årlige variasjon med hensyn på leaf area index, nedbør, temperatur og solinnstråling er viktig.

## 4. Utvasking av fluorider i nedbør

Ut fra verdier for de termodynamiske konstantene for den frie energien ( $\Delta G_f$ ) og entalpien ( $\Delta H_f$ ) for hydrogenfluorid (HF) i henholdsvis gass- og i vandig løsning kan likevektskonstanten for likevekten:



beregnes for ulike temperaturer. I tillegg er det nødvendig å ta hensyn til dissosiasjonslikevekten:



Dissosiasjonslikevekten for denne syrebaselikevekten er  $10^{-3}$ , og varierer lite med temperaturen (ref. Sillen og Martell).

Dersom pH i nedbøren er over 4, vil altså mer enn 90% av det hydrogenfluorid (HF) som løses i nedbøren, være dissosiert til fluorid-ioner. Vi regner imidlertid med at konsentrasjonene av fluorid ikke vil påvirke pH i nedbøren nevneverdig. Løsligheten vil dermed øke med økende pH i nedbøren.

I tabell 1 er løsligheten gitt for hydrogenfluorid (HF) i vann ved varierende temperatur og pH i nedbøren.

Tabell 1: Løslighet  $\alpha$  (l/l) av hydrogenfluorid (HF) som funksjon av temperatur og pH i nedbøren.

Temperatur	Løslighet			
	pH 4,0	pH 4,3	pH 4,6	pH 4,8
T = 5 C	306	612	1 224	1 928
T = 10 C	203	406	812	1 279
T = 15 C	136	272	544	856
T = 20 C	94	188	378	595

### Våtavsetningshastighet (Vw)

Våtavsetningen blir beregnet på timesbasis basert på dissosiasjonslikevekten beskrevet ovenfor og nedbørdata fra Sunndalsøra.

Våtavsetningshastigheten er gitt ved:

$$V_w = p\alpha$$

hvor

$\alpha$ : løseligheten av fluor gitt i tabell 1

p: nedbørintensiteten.

## 5. Meteorologiske forhold

NILU har benyttet ett år med kontinuerlige data fra Sunndalsøra og Groa. De meteorologiske dataene inneholdt timesverdier av nedbør, vindstyrke, vindretning, temperatur og relativ fuktighet. I perioder med manglende data ble det generert verdier med bakgrunn i perioden før og etter ved kjennskap til typisk forekommende vær-situasjoner. I de meteorologiske dataene var det ingen spredningsparametre, verken turbulensintensitet eller stabilitet.

Standardavviket i horisontal (sigt) og vertikal (sige) vindretningsfluktusjon er viktige inngangsparametre i spredningsmodellen. For å estimere disse ble det generert en ny parameter, gustfaktoren, som er forholdet mellom høyeste 5-minutts verdi og timemiddelverdi av vindstyrken.

NILU har tidligere målt både turbulensintensitet (sigt og sige) samt vindstyrke og stabilitet på Kollsnes i Øygarden og ved Titania i Jøssingfjord.

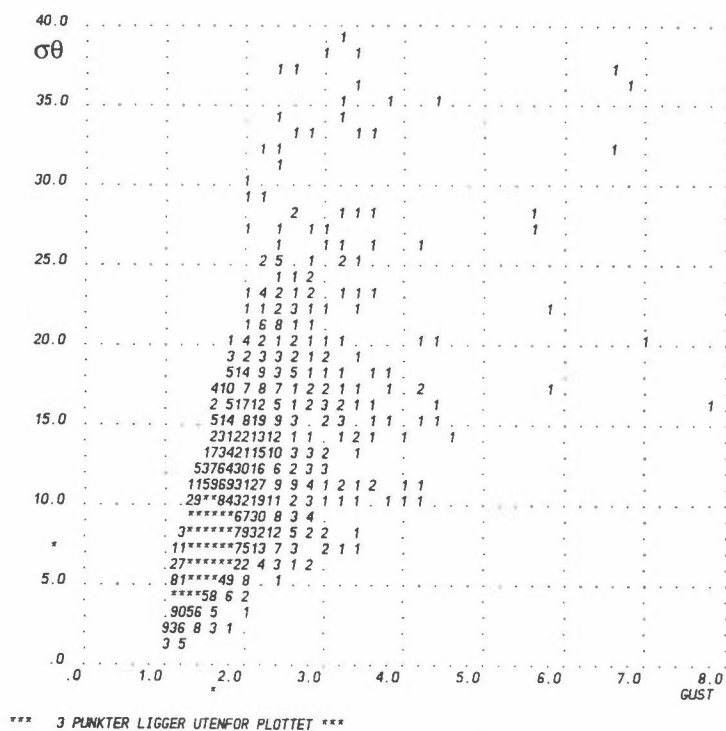
I figur 3 og 4 er det vist spredningsplott av henholdsvis sigt og sige som funksjon av gustfaktoren med data fra Kollsnes i Øygarden. Ved å ta hensyn til at bakke-ruheten på Kollsnes er relativt stor, ga den beste korrelasjonen regresjonsformlene gitt nedenfor. Tilsvarende målinger ved Titania i Jøssingfjord ga samme forhold for sigt og sige som funksjon av gustfaktoren. Regresjonsformlene er derfor trolig gyldige for flere områder.

$$\text{sigt} = 7.76 * \text{gustfaktoren} - 5,4, \quad R = 0,68$$

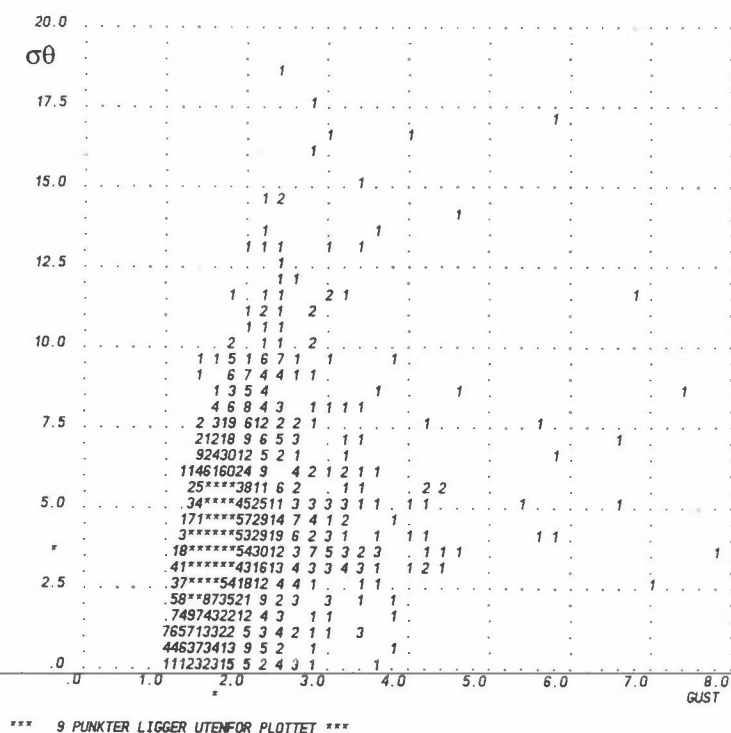
$$\text{sige} = 3.65 * \text{gustfaktoren} - 2,3, \quad R = 0,38$$

Spesielt ga formelen for horisontal turbulensintensitet (sigt) god korrelasjon, mens vertikal turbulensintensitet (sige) ga et noe dårligere samsvar med gustfaktoren.

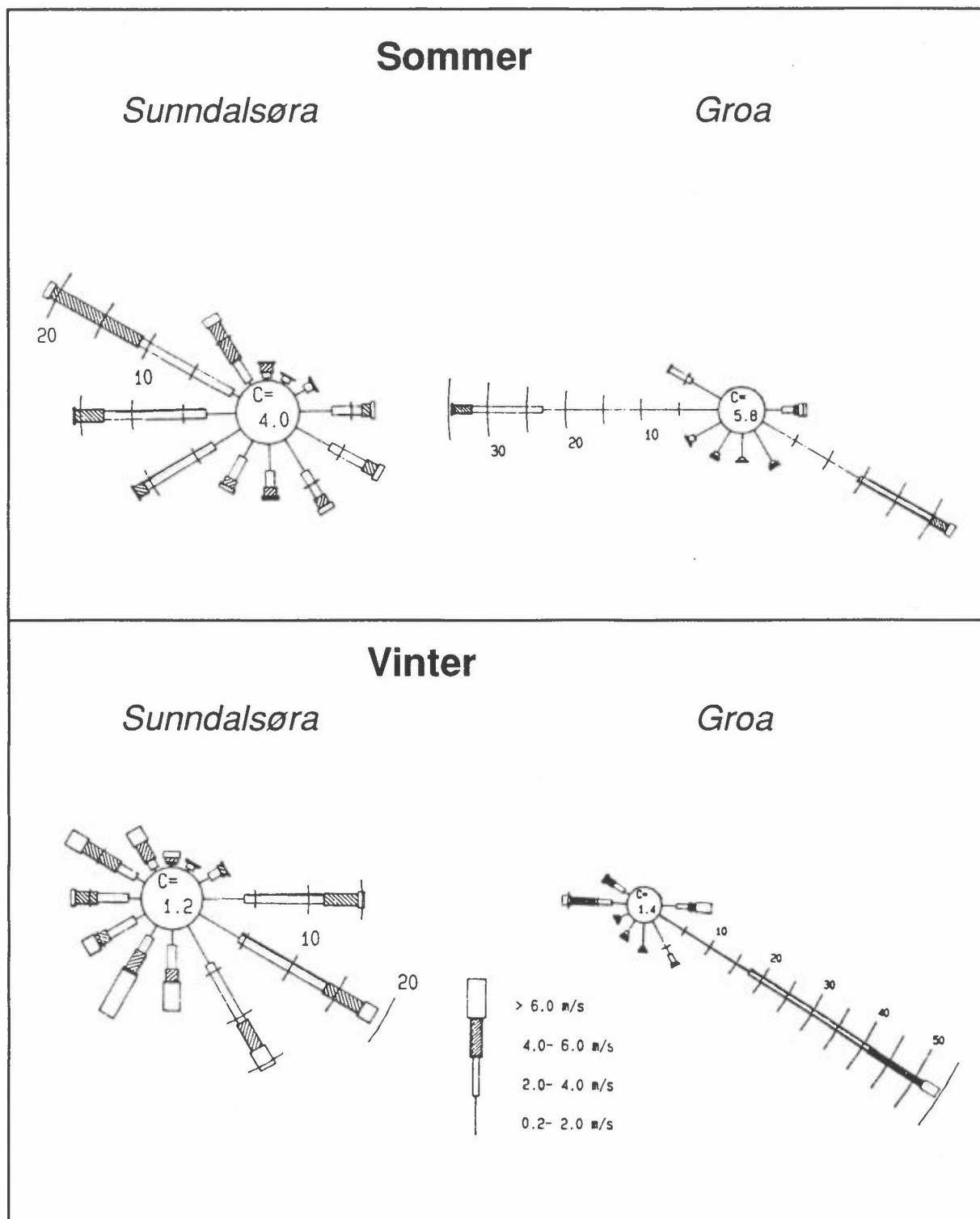
Figur 5 viser vindroser for sommerhalvåret og vinterhalvåret for Sunndalsøra og Groa. Figuren viser som ventet at vinden er vesentlig mer kanalisert ved Groa sammenlignet med Sunndalsøra. Vinddataene viser også en klar døgnlig gang av vindretningen, opp dalen på dagtid og ned dalen om natten, spesielt om sommeren. Dette mønsteret gjenspeiles også i vindrosene for sommeren og vinteren.



Figur 3: Spredningsplott av sigt som funksjon av gustfaktoren. Data fra Kollsnes i Øygarden i perioden fra 1.7.91 til 30.6.92



Figur 4: Spredningsplott av sige som funksjon av gustfaktoren. Data fra Kollsnes i Øygarden i perioden fra 1.7.91 til 30.6.92.



Figur 5: Vindroser for sommer og vinterhalvåret for Sunndalsøra og Groa for perioden 1.1.91 til 31.12.91.

Det er alltid vanskelig å beskrive transporten av utslipp opp daler med utpreget topografisk styring. Vindmåleren vil til en hver tid kun måle hvor vinden blåser fra og ikke hvor vinden blåser mot, i et gitt punkt. Da det eksisterer samtidige målinger av vindretning, vindstyrke, temperatur, relativ fuktighet og nedbørintensitet ved Sunndal og Groa, har NILU benyttet settet med meteorologiske data i forskjellige regimer.

Målingene på Sunndalsøra er benyttet for områdene nederst i Sunndalen der dalen åpner seg ut mot fjorden, og målingene på Groa er benyttet for å beskrive transporten i resten av dalen, hvor luftstrømmen er mer kanalisert. Dette gir den beste beskrivelsen av transporten av forurensninger oppover dalen med det tilgjengelige datagrunnlaget.

Stabiliteten ble bestemt ved bruk av de genererte turbulensparametrene sammen med en vurdering av tid på døgnet, vind ut eller inn dalen og temperatur. Stabiliteten er inndelt i Pasquill Giffords 7 kategorier hvor:

1. Sterkt ustabil
2. Middels ustabil
3. Litt ustabil
4. Nøytralt dag
5. Nøytralt natt
6. Lett stabil
7. Sterkt stabil

En kort beskrivelse av de tre hovedklassene i stabilitetsfordelingen er gitt nedenfor.

Ustabile atmosfæriske forhold (1, 2, 3) forekommer oftest om dagen og om sommeren, ved klarvær med sterk solinnstråling og lav vindstyrke. Da varmer solen opp bakken, og det dannes vertikale turbulente luftstrømmer som gir god vertikal spredning av røykfanen. Når kald luft fra land transporteres ut over varm sjø, vil det nederste luftlaget instabiliseres. For utslipp i bakkenivå vil disse avta raskt, mens det for skorsteinsutslipp kan forekomme høye konsentrasjoner nær utslippet på grunn av kortvarige røyknedslag.

Nøytrale atmosfæriske forhold (4, 5) forekommer ved høye til moderate vindstyrker og oftest ved overskyet vær. Høy vindstyrke og god mekanisk blanding gir moderat til god vertikal og horisontal fortykning av røykfanen.

Stabile atmosfæriske forhold (6, 7) er typiske for stille, klare netter og vintersituasjoner med avkjøling av det nederste luftlaget. Temperaturen øker med høyden over bakken, og dette gir dårlig vertikal spredning i det stabile laget. Når relativt varm luft fra sjø transporteres inn over kaldt land, vil det nederste luftlaget stabiliseres. Dette gir dårlig spredning av røykfanen både vertikalt og horisontalt. For bakkeutslipp vil denne situasjonen være kritisk, idet den vertikale fortykningen er liten. For skorsteinsutslipp vil liten vertikal spredning føre til at utslippet først når ned til bakken langt fra utslippet, eller føre til forhøyete konsentrasjoner ved innslag mot fjellsiden.

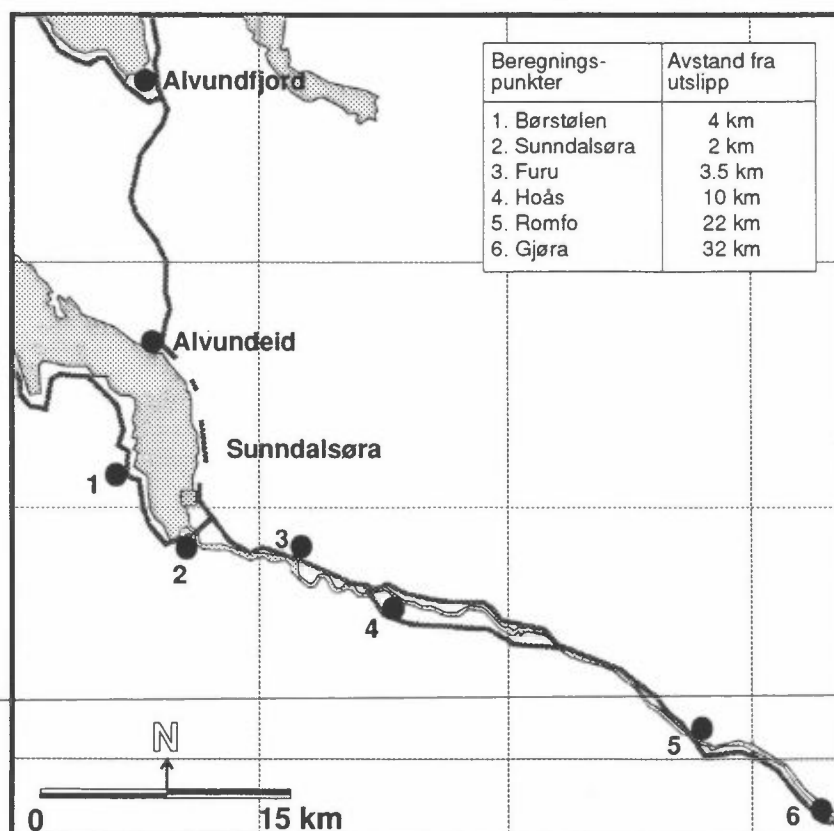
Blandingshøyden ble bestemt som en funksjon av stabiliteten på følgende måte:

Stabilitet	Blandingshøyde
Ustabil	1 000 m
Nøytral	800 m
Stabil	200 m

I tillegg til disse meteorologiske dataene krever rutinen for beregning av tørravsetningshastighet solinnstrålingen i  $W/m^2$  for hver time over døgnet over året. Solinnstrålingen ble ikke målt i Sunndalen, hverken på Sunndalsøra eller Groa. For å få realistiske verdier for solinnstrålingen ble det benyttet data fra Nordmoen. Usikkerheten forbundet med dette er vurdert som liten, sammenlignet med en alternativ beregning på bakgrunn av ukentlige data av skydekke fra meteorologisk institutt på Sunndalsøra.

## 6. Spredningsberegninger

NILU har utført beregninger av konsentrasjoner, opptak i planter og utvasking i nedbør av fluorider for seks utvalgte beregningsområder i Sunndalen. Beregningene er utført ved bruk av modellen beskrevet i kapitlene 2, 3, og 4. Figur 6 viser lokaliseringen av de seks beregningsområdene sett i forhold til hverandre. I figuren er det også angitt ca. avstander fra utslippet til reseptorene.



Figur 6: Lokalisering av reseptorene i forhold til Sunndal Verk A/S.

## 6.1. Utslippsdata

NILU har benyttet utslippsdata som gitt av oppdragsgiver i forbindelse med tidligere beregninger for Sunndal verk. (Bøhler og Larsen, 1991). Utslippstallene er gitt i tabell 2.

Tabell 2: Utslippsdata for Sunndal Verk A/S.

Enhet	Su1/11	Su 111	Anode fab.	Masse fab.
	Felles			
<b>Renseanlegg</b>				
Gassmengde (1000 Nm <sup>3</sup> /h)	1 496,28		23	49
Temperatur C	12		11	20-25
Skorsteinshøyde (kote m)	+32,5		+44	+45
Hast. skorstein, (m/s)	15,0		3,2	13,5
Antall skorsteiner	7		1	7
<b>Tak</b>				
Gassmengde (1000 Nm <sup>3</sup> /h)	10 653	9 204		
Temperatur C	20-25	20-25		
Utslippshøyde (kote m)	+22,5	+25,6		
Utslippshastighet, m/s	2,5	18,0		
Utslippspunkter, antall	Spalteåpninger på tvers	46		
<b>Utslipp, renseanlegg</b>				
F (tot), kg/h	0,7		0	0,004
F (tot), (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,44		0	spor
<b>Utslipp, tak</b>				
F (tot), kg/h	10,79	5,74		
F (tot), mg/Nm <sup>3</sup>	1,01	0,62		

## 6.2. Biologiske inngangsparametere

For å beregne opptakshastigheten og opptaket av fluorider i planter ble vegetasjonen i Sunndalen klassifisert etter et kart med markslagspesifisering etter data fra økonomisk kartverk.

Markslagene som er benyttet er klassifisert som følgende:

- Type 1: Dyrket mark
- Type 2: Lauvskog med høy bonitet
- Type 3: Lauvskog med middels bonitet
- Type 4: Lauvskog med lav bonitet + annen skog med lav bonitet

De biologiske inngangsparametere som benyttes av opptaksmodellen er gitt i tabell 3.

Tabell 3: Biologiske inngangsparametre som benyttes i opptaksmodellen.

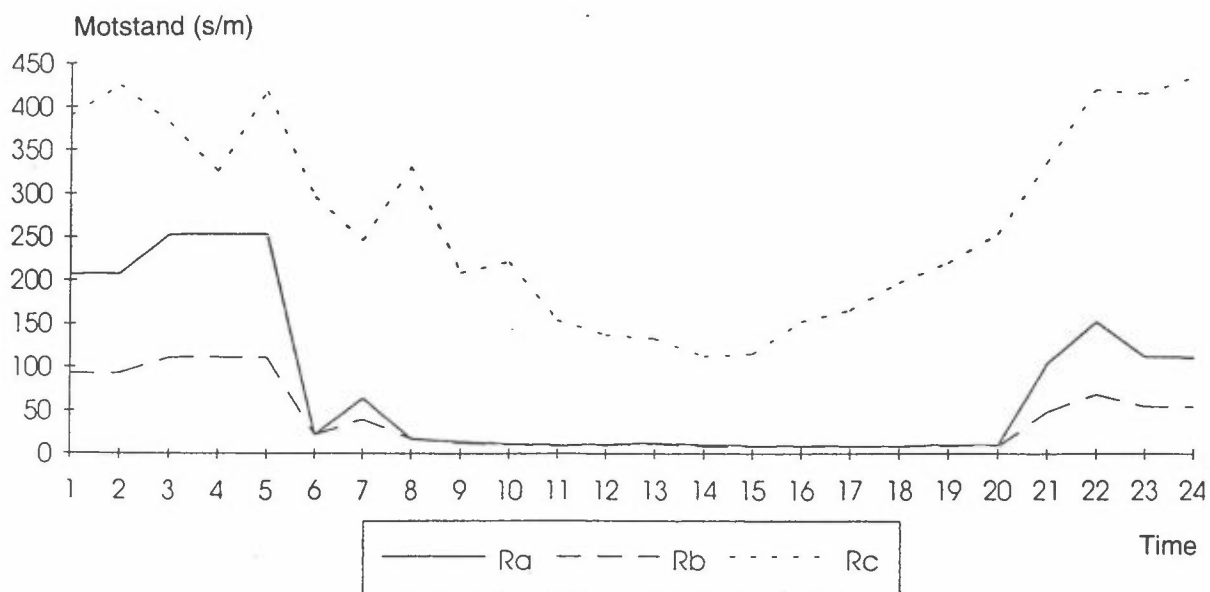
	Leaf area index		Biomasse		Ruhetsparameter	
	Vekst	Hvile	Vekst	Hvile	Vekst	Hvile
Dyrket mark	3	-	-	-	0,1	0,02
Lauvskog, høy bonitet	6	1	7 000	1 000	0,8	0,5
Lauskog, midlere bonitet	3	0,5	3 000	500	0,5	0,3
Lauvskog, lav bonitet	2	0,1	2 000	300	0,4	0,2

Dalen ble delt inn i ruter på 500\*500 meter. Rutene bestod som regel av flere markslag derfor ble verdiene i tabellen ovenfor prosentvis midlet for å gi en representativ midlere verdi i hver rute.

### 6.3. Resultater

NILU har beregnet fluoridkonsentrasjoner, opptak av fluorider i planter og våtavsetning av fluorider med nedbøren.

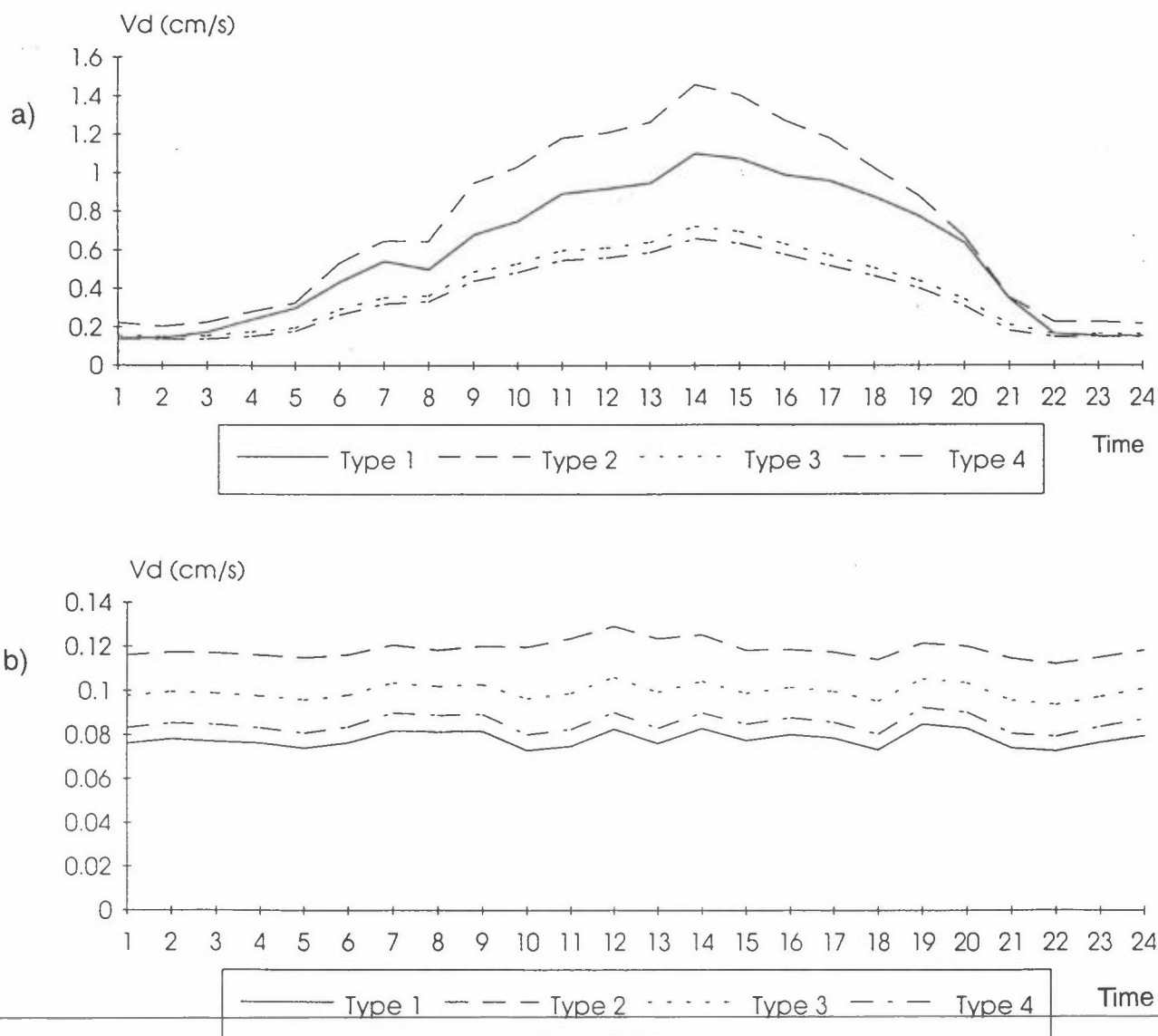
Figur 7 viser hvilke av motstandene som har størst betydning for opptaket av fluorider i planter, beregnet ved Hicks modell. Alle motstandene er størst om natten når den biologiske aktiviteten i plantene er lav. Den motstanden som betyr mest om dagen er  $R_c$ , som beskriver den biologiske aktiviteten i planten.



Figur 7: Midlere døgnlig variasjon av de ulike motstandene som er benyttet for bestemmelse av tørravsetningshastigheten.



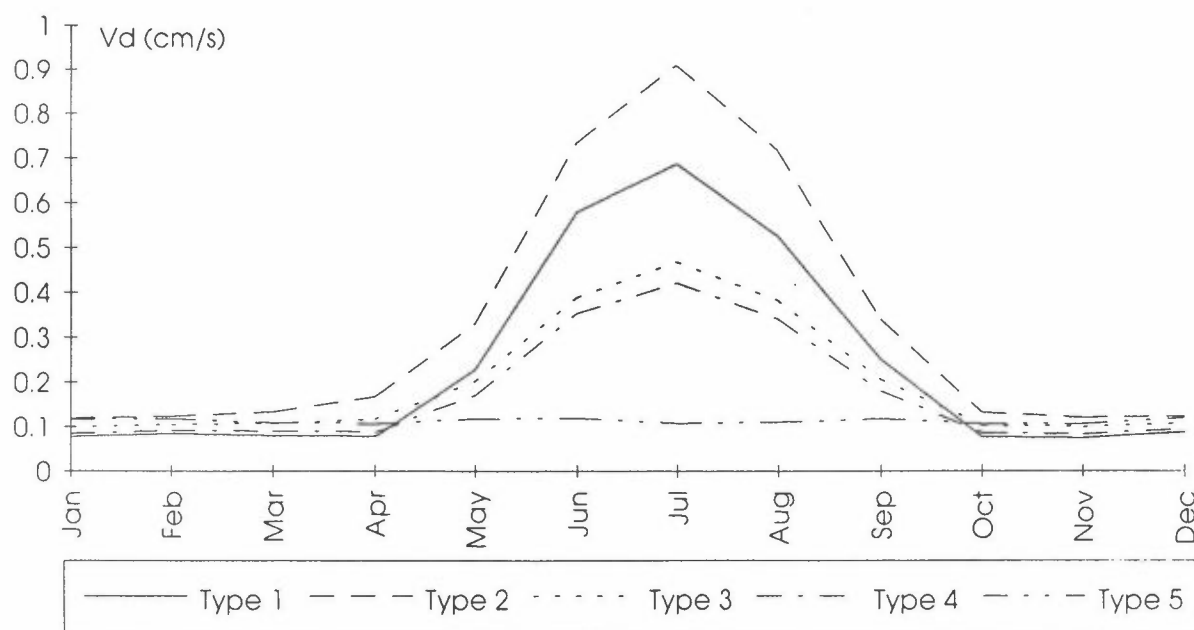
I figur 8a er det vist midlere opptakshastighet som funksjon av tid på døgnet i juni 1991 for de 4 ulike marktypene som er klassifisert i Sunndalen. Figuren viser at for vegetasjonstype 2 som har høyest bonitet varierer midlere opptakshastighet mellom 0,2-1,6 cm/s, henholdsvis midt på natten og midt på dagen når vegetasjonen er mest aktiv. Analogt for vegetasjonstype 4 som har lav bonitet varierer opptakshastigheten mellom 0,2 og 0,7 cm/s. Den døgnlige variasjonen i opptakshastigheten skyldes variasjonen i solinnstråling i løpet av døgnet. Tilsvarende beregninger for januar måned vist i figur 8b viser at det er liten døgnvariasjon i opptakshastigheten med verdier mellom 0,07-0,12 cm/s ved varierende vegetasjonstype.



Figur 8: Midlere døgnlig variasjon av opptakshastigheten i  
 a) juni måned  
 b) januar måned  
 for ulike vegetasjonstyper i Sunndalen.

Figur 9 viser midlere opptakshastighet over året for de 4 ulike vegetasjonstypene som er klassifisert i Sunndalen. Type 5 i figuren representerer fjell og stein uten vegetasjon. Om vinteren, fra oktober t.o.m. mars, er opptakshastigheten liten for alle vegetasjonstypene (ca. 0,1 cm/s). I vekstsesongen fra april t.o.m. september varierer opptakshastigheten med varierende vegetasjonstype. Vegetasjon med høyest bonitet har høyest opptakshastighet.

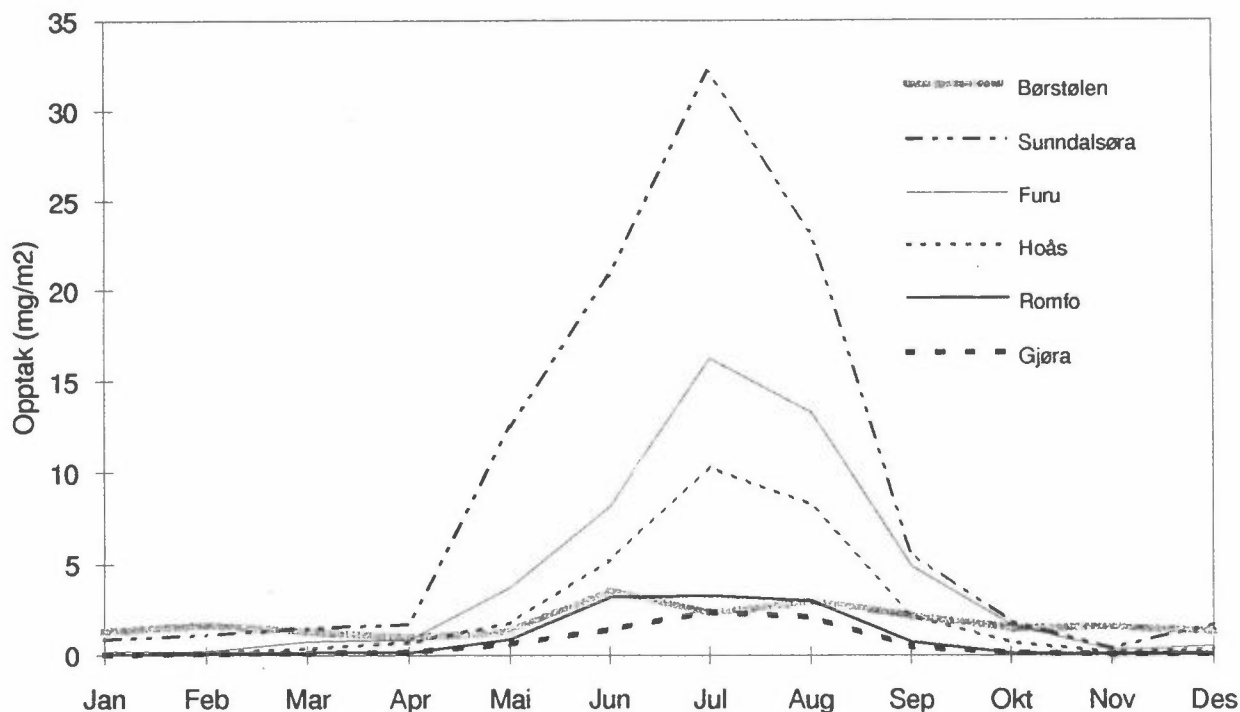
I juli måned, når plantene er mest aktive og opptakshastigheten er størst, varierer midlere opptakshastighet mellom 0,9 og 0,4 cm/s med varierende vegetasjonstype.



Figur 9: Midlere opptakshastighet pr. måned over året i 1991 for de klassifiserte vegetasjonstypene i Sunndalen.

I figur 10 er det vist kurver for opptak i planter som funksjon av tid på året. Figuren viser at opptaket er størst nær aluminiumverket og avtar med avstanden fra utslippet. Opptaket er svært avhengig av hvilken vegetasjonstype som dominerer reseptoren. Opptaket som er vist i figuren er beregnet opptak ved bruk av en prosentvis midlet marktype som er representativ for en 500\*500 m rute i dalen. Verdiene representerer derfor et midlere opptak hvor vegetasjonen har en moderat bonitet.

Opptaket av fluorider i plantene er størst i juli måned, hvor maksimalt opptak for Sunndalsøra er beregnet til 32 mg/m<sup>2</sup> mnd. Tilsvarende for Romfo er 3,3 mg/m<sup>2</sup> mnd.



Figur 10: Månedlig opptak av fluorider i planter i  $\text{mg/m}^2$  mnd i løpet av året for 6 steder i Sunndalen i 1991.

Årsvariasjonen i opptaket av fluorider ved Børstølen er liten. Dette skyldes hovedsaklig at om sommeren når plantene er mest aktive, er hovedvindretningen inn dalen. Børstølen er da i liten grad belastet med forurensninger fra verket. Om vinteren er hovedvindretningen ut dalen, og selvom aktiviteten i plantene er svært lav, er belastningen fra verket vesentlig høyere.

I tabell 4 er det vist årsmiddelerverdier av konsentrasjoner i luft, opptak og våtavsetning av fluorider for de 6 utvalgte reseptorene i Sunndalen. Verdiene for hver måned er gitt i vedlegg A.

Tabell 4: Beregnete konsentrasjoner ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), totalt opptak av fluorider i planter over året og total våtavsetning over året ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ), samt total nedbør ( $\text{mm}/\text{år}$ ) for hver av de 6 utvalgte reseptorene i Sunndalen.

Reseptor	Konsentrasjoner $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Opptak $\text{mg}/\text{m}^2$ år	Våtavsetning $\text{mg}/\text{m}^2$ år	Nedbør $\text{mm}/\text{år}$
Børstølen	0,45	22,1	9,8	988
Sundalsøra	1,07	103,6	53,7	988
Furu	0,47	51,1	24,8	988
Hoås	0,25	30,2	14,2	1324
Romfo	0,12	12,1	6,3	1324
Gjøra	0,07	7,7	3,2	1324

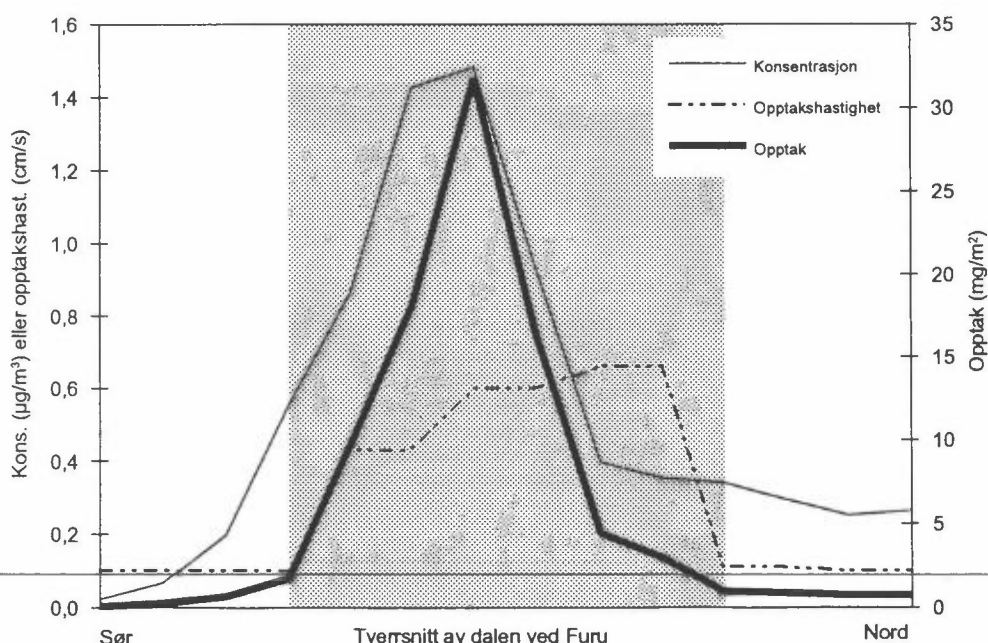
Tabellen viser at opptaket og våtavsetningen er proporsjonal med midlere konsentrasjon av fluorider. På Sunndalsøra sør for elva er midlere fluoridkonsentrasjon over året ca.  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Opptaket av fluorider i planter ble her beregnet til  $104 \text{ mg}/\text{m}^2$  år, og våtavsetningen ble beregnet til  $54 \text{ mg}/\text{m}^2$  år.

Tilsvarende ved Romfo er midlere fluoridkonsentrasjon ca.  $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  over året, og opptaket av fluorider ble beregnet til ca.  $12 \text{ mg}/\text{m}^2$  år. Våtavsetningen ble beregnet til ca.  $6 \text{ mg}/\text{m}^2$  år. Tabellen viser at beregnet våtavsetning av fluorider er ca. halvparten av beregnet opptak av fluorider i planter uavhengig av avstand fra utslippet.

I figur 11 og 12 er det vist to snitt på tvers av dalen for juli måned. Figur 11 viser konsentrasjonen, opptaket og avsetningshastigheten i ett snitt over dalen ved Furu. Figuren viser at ved Furu er fremdeles røkfanan smal, og beregningen av opptaket av fluorider i planter er klart avhengig av tilgjengelig konsentrasjon og opptakshastigheten, altså aktiviteten i plantene. Når vegetasjonen er aktiv og det samtidig er høye konsentrasjoner, blir opptaket i vegetasjonen høyt. Når konsentrasjonen er lav blir også opptaket tilsvarende lavt selvom plantene har stor evne til å ta opp fluoridene.

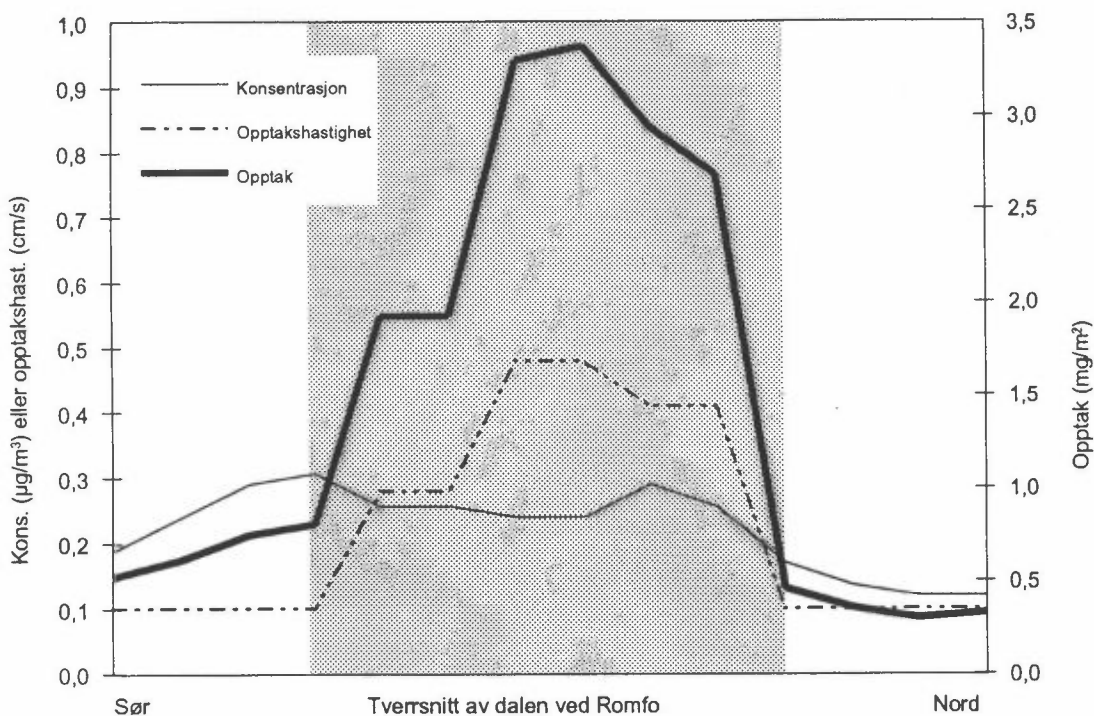
Figuren viser at ved en konsentrasjon lik ca.  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  og opptakshastighet på ca.  $0,6 \text{ cm}/\text{s}$ , gir dette et maksimalt opptak av fluorider i vegetasjonen på ca.  $32 \text{ mg}/\text{m}^2$  i juli måned. Ved en konsentrasjon på  $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , men fremdeles med en høy opptakshastighet på ca.  $0,7 \text{ cm}/\text{s}$ , blir det beregnede opptaket ca.  $4,5 \text{ mg}/\text{m}^2$  i juli måned.

Nær utslippet kan en derfor si at det er konsentrasjonene av fluorider som er begrensende for opptaket i plantene.



Figur 11: Profiler på tvers av dalen av konsentrasjon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), opptak ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) og opptakshastighet ( $\text{cm}/\text{s}$ ) ved Furu i juli måned.

Figur 12 viser ett tilsvarende snitt ved Romfo ca 23 km fra utslippet. Her viser figuren at konsentrasjonsprofilen over dalen er blitt nær homogen, på grunn av god fortykning over daltverrsnittet. Figuren viser at opptaket av fluorider i plantene er direkte avhengig av aktiviteten i plantene (avsetningshastigheten). Ved Romfo er konsentrasjonen i middel over dalen ca.  $0,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Figuren viser at med en maksimal opptakshastighet på  $0,48 \text{ cm/s}$  gir dette et månedlig opptak på ca.  $3,4 \text{ mg}/\text{m}^2$ . På lange avstander fra utslippet når konsentrasjonene er lave, kan en derfor si at det er opptakshastigheten som er begrensende for opptaket av fluorider i plantene.



Figur 12: Profiler på tvers av dalen av konsentrasjon ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), opptak ( $\text{mg}/\text{m}^2$  mnd) og opptakshastighet (m/s) ved Romfo i juli måned.

Begge figurene indikerer at modellen ikke klarer å holde alle puffene innenfor dalbredden. Spesielt for beregningsområder langt fra utslippet. For å unngå dette bør det utvikles en tredimensjonal vindfeltmodell som også tar hensyn til topografiske effekter. Dette vil medføre en bedre transportbeskrivelse av utslipp opp gjennom dalen. Dette vil være en stor utviklingsoppgave for fremtidige prosjekter.

## 7. Diskusjon

Norsk institutt for luftforskning (NILU) har på oppdrag for Effektstudien utført beregninger av opptak av fluorider i planter og våtavsetning av fluorider i Sunndalen.

Opptaksrutinen er basert på Hicks modell som beskriver opptakshastigheten for en rekke spesifiserte komponenter for varierende vegetasjonstype. De viktigste parametrene for en riktig beskrivelse av opptakshastigheten er aerodynamisk motstand, diffusiv grenselagsmotstand og motstanden som beskriver den biologiske aktiviteten i planten. Alle motstandene er størst om natten når den biologiske aktiviteten til plantene er minst. Om dagen er det motstanden som beskriver den biologiske aktiviteten til planten som har størst betydning.

Våtavsetningen av fluorider er basert på likevektsbetraktninger for hydrogenfluorid i gassfase og vandig fase. I tillegg er det tatt hensyn til dissosiasjonslikevekten mellom HF og H<sup>+</sup> og F<sup>-</sup>. I beregningene er det tatt hensyn til at løsligheten varierer med temperatur og pH i nedbøren. Vi regner med at konsentrasjonene av fluorid ikke vil påvirke pH i nedbøren nevneverdig. Løsligheten øker med økende pH i nedbøren.

I beregningene er det benyttet meteorologiske data fra Sunndalsøra og Groa i perioden 1.1.91 til 31.12.91. De meteorologiske dataene inneholdt ikke spredningsparametre som er viktige inngangsparametre til spredningsmodellen. For å generere spredningsparametre for horisontal (sigt) og vertikal (sige) turbulens ble det utført en regresjonsanalyse med bakgrunn i tidligere målinger av turbulens på Kollsnes i Øygarden. Sammenlignet med andre målinger ga disse representative omregningsformler mellom gustfaktoren og turbulensparametrene i Sunndalen. I perioder med manglende data ble det på bakgrunn av generell kjennskap til typisk forekommende meteorologiske situasjoner og kjennskap til de meteorologiske forholdene før og etter, generert meteorologiske data for å gi mest mulig representative månedsverdier for opptak og våtavsetning av fluorider i Sunndalen.

Opptaksrutinen krever i tillegg informasjon om solintensiteten og boniteten til vegetasjonen rundt beregningspunktene. Solinnstrålingen ble ikke målt i Sunndal. For å få noen typiske verdier ble det benyttet ett år med solinnstrålingsdata fra Nordmoen. Usikkerhetene forbundet med dette er ikke vurdert å være større enn om det på bakgrunn av ukemidlete skydekkeobservasjoner fra Sunndal ble beregnet ukemidlet solinnstråling. Informasjon om boniteten og vegetasjonstype ble hentet fra et kart fra økonomisk kartverk. Verdiene som er benyttet i beregningene er en prosentvis midlet marktype som er representativ for en 500\*500 m<sup>2</sup> rute i dalen.

Beregningsresultatene ga at opptaksprosessene er svært følsomme for tid på året og tid på døgnet i tillegg til varierende vegetasjonstype. Beregninger for juni måned viste at opptakshastigheten for vegetasjon med høy bonitet varierte mellom 0,2 og 1,6 cm/s, henholdsvis midt på natten og midt på dagen når vegetasjonen er mest aktiv. Analogt for vegetasjon med lav bonitet varierte opptakshastigheten mellom 0,2 og 0,7 cm/s. I januar måned var det liten døgnvariasjon, og opptakshastigheten varierte mellom 0,07 og 0,12 cm/s ved varierende vegetasjonstype.

Midlere opptakshastighet er størst i juli måned og varierer mellom 0,9 og 0,4 cm/s, avhengig av vegetasjonstype. Om vinteren er midlere opptakshastighet ca. 0,1 cm/s.

Beregnet opptak av fluor i planter er størst nær aluminiumsverket og avtar med avstanden fra utslippet. Opptaket i vegetasjonen ved Sunndalsøra ble beregnet til 32 mg/m<sup>2</sup> i juli måned. Tilsvarende ved Romfo var 3,3 mg/m<sup>2</sup>. Beregningene viser at nær utslippet er det konsentrasjonene som er begrensende for opptaket av fluorider i plantene. På lengre avstander fra utslippet når konsentrasjonene er lave, er det opptakshastigheten som er begrensende for fluoridopptaket.

Årsvariasjonen i opptaket av fluorider ved Børstølen er liten og skyldes hovedsaklig at om sommeren, når vegetasjonen er mest aktiv, er hovedvindretningen inn dalen. Børstølen er da i liten grad belastet med forurensninger fra verket.

Opptaket og våtavsetningen av fluorider er proporsjonal med midlere konsentrasjon av fluorider over året. Opptaket av fluorider på Sunndalsøra ble beregnet til ca. 104 mg/m<sup>2</sup> over året i 1991. Våtavsetningen ble beregnet til ca. 54 mg/m<sup>2</sup> over året i 1991. Tilsvarende for Romfo ble opptaket av fluorider beregnet til ca. 12 mg/m<sup>2</sup>, og våtavsetningen ble beregnet til ca. 6 mg/m<sup>2</sup> over året i 1991. Beregnet våtavsetning av fluorider er ca. halvparten av beregnet opptak av fluorider i planter, uavhengig av avstanden fra utslippet.

Et problem ved beregningene er at man kun har to meteorologiske stasjoner. Disse er benyttet optimalt for å gi en mest mulig riktig beskrivelse av spredningsforholdene opp gjennom dalen. En vindmåler måler alltid hvilken retning vinden kommer fra og ikke i hvilken retning den blåser til. Dette medfører i beregningene at noen puff beveger seg ut av området som er definert som dal, i beregningsområdet. Dette er blitt kompensert ved at puffene vokser senere når de har nådd en størrelse større enn effektiv dalbredde. Dette medfører at konsentrasjonene i puffene avtar saktere og at man bevarer puffene lengre i beregningsområdet. Dette medfører at puff som har beveget seg ut av dalen, fremdeles vil ha en riktig konsentrasjonsfordeling i puffet, når vinden dreier og fører dem tilbake til dalen.

På grunn av en del manglende data er det knyttet usikkerheter til de meteorologiske målingene som er benyttet i beregningene. Direkte sammenligninger mellom beregningsresultater og måleverdier vil trolig ikke være sammenfallende. Mer nøyaktige beregninger krever at alle meteorologiske inngangsparametre måles i beregningsperioden. De kvantitative usikkerhetene forbundet med disse effektene er vanskelig å estimere.

For å beregne spredning av utlipp i en dal som Sunndalen, bør det utvikles en vindfeltmodell der effektene av topografien innover i Sunndalen tas med. Bare på denne måte vil det være mulig å beskrive transporten av forurensninger opp igjennom dalen uten at puffene beveger seg ut av området som er definert som dal i beregningsområdet. Dette er en stor oppgave for framtidig utvikling.

## 8. Referanser

Bøhler, T. og Larsen, M. (1991) Spredningsberegninger for utslipp til luft fra aluminiumverk på Sunndalsøra. Lillestrøm (NILU OR 46/91).

Hicks et al. (1987) A preliminary multiple resistance routine for driving dry deposition velocities from measured quantities. *Water, air and soil poll.*, 36,311-330.



## **Vedlegg A**

### **Månedsmiddelverdier av konsentrasjon, opptak og våtavsetning i Sunndalen, 1991**

Tabell A1: Månedsmiddelverdier av konsentrasjoner av fluorider i luft ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) for 6 utvalgte reseptorer i Sunndalen i 1991.

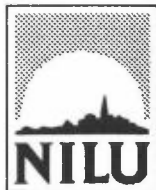
	Børstølen	Sunndalsøra	Furu	Hoås	Romfo	Gjøra
Januar	0,49	0,30	0,06	0,03	0,02	0,02
Februar	0,65	0,38	0,09	0,06	0,03	0,02
Mars	0,40	0,47	0,22	0,08	0,05	0,03
April	0,35	0,52	0,32	0,17	0,06	0,06
Mai	0,31	2,40	0,68	0,33	0,19	0,12
Juni	0,33	1,94	0,84	0,46	0,34	0,15
Juli	0,33	2,33	0,93	0,54	0,24	0,12
August	0,50	2,07	0,93	0,59	0,32	0,18
September	0,49	0,92	0,72	0,25	0,11	0,08
Oktober	0,51	0,59	0,50	0,17	0,05	0,05
November	0,59	0,12	0,10	0,05	0,02	0,02
Desember	0,47	0,76	0,19	0,11	0,03	0,02
Middel	0,45	1,07	0,47	0,25	0,12	0,07

Tabell A2: Månedlig opptak av fluorider i planter ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) for 6 utvalgte reseptorer i Sunndalen i 1991.

	Børstølen	Sunndalsøra	Furu	Hoås	Romfo	Gjøra
Januar	1,3	0,9	0,22	0,09	0,05	0,03
Februar	1,7	1,1	0,22	0,18	0,11	0,06
Mars	1,3	1,5	0,76	0,36	0,12	0,11
April	1,0	1,7	0,87	0,52	0,20	0,16
Mai	1,3	12,5	3,8	1,8	0,90	0,64
Juni	3,6	20,8	8,2	5,2	3,2	1,4
Juli	2,3	32,2	16,3	10,3	3,3	2,4
August	3,0	23,3	13,3	8,3	3,0	2,1
September	2,2	5,6	4,9	2,2	0,75	0,48
Oktober	1,5	1,9	1,7	0,72	0,15	0,14
November	1,6	0,4	0,33	0,18	0,08	0,06
Desember	1,3	1,7	0,54	0,36	0,15	0,08
Sum	22,1	103,6	51,1	30,2	12,1	7,7

Tabell A3: Månedlig våtavsetning av fluorider ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) ved 6 utvalgte reseptorer i Sunndalen i 1991.

	Børstølen	Sunndalsøra	Furu	Hoås	Romfo	Gjøra
Januar	1,3	1,0	0,24	0,12	0,05	0,05
Februar	2,0	1,7	0,47	0,33	0,17	0,08
Mars	0,9	2,5	0,47	0,12	0,07	0,01
April	0,2	2,7	0,59	0,53	0,17	0,09
Mai	0,1	6,9	2,7	1,6	0,68	0,45
Juni	0,2	12,1	7,7	4,1	1,5	1,05
Juli	0,1	3,5	1,2	0,53	0,34	0,30
August	0,4	3,2	2,4	1,9	1,4	0,50
September	1,2	6,5	5,5	2,3	1,0	0,18
Oktober	0,5	3,1	0,83	0,35	0,17	0,09
November	0,4	0,3	0,30	0,18	0,10	0,06
Desember	2,5	10,2	2,4	2,0	0,68	0,29
Sum	9,8	53,7	24,8	14,2	6,3	3,2



**Norsk institutt for luftforskning (NILU)**  
**Norwegian Institute for Air Research**  
**Postboks 64, N-2001 Lillestrøm**

RAPPORTTYPE OPPDRAKS RAPPORT	RAPPORT NR. OR 15/94	ISBN-82-425-0555-1	
DATO 23. 3. 1994	ANSV. SIGN. <i>Sednand</i>	ANT. SIDER 25	PRIS NOK 45,-
TITTEL Spredningsberegninger av fluorider i Sunndalen Opptak i planter og våtavsetning		PROSJEKTLEDER Mona Larsen	
		NILU PROSJEKT NR. O-92112	
FORFATTER(E) Trond Bøhler, Mona Larsen og Arne Semb		TILGJENGELIGHET * A	
		OPPDRAKSGIVERS REF. Cato I. Stoll	
OPPDRAKSGIVER Effektstudien v/Hydro Aluminium AS Postboks 80 1321 STABEKK			
STIKKORD Fluor	Opptak	Våtavsetning	
REFERAT NILU har beregnet opptak og avsetning av fluorider over året i Sunndalen. I beregningene er det benyttet meteorologiske data fra Sunndalsøra og Groa, som er bearbeidet og tilpasset for bruk i spredningsmodellen. Opptaket av fluorider er beregnet ved en multippel resistansrutine, og vegetasjonen er klassifisert etter et kart fra økonomisk kartverk. Våtavsetningen er beregnet ut fra likevektsbetraktninger mellom HF i gass og HF i vann. Det er tatt hensyn til at løsligheten varierer med temperatur og pH i nedbøren. Beregningene viste at opptakshastigheten varierer mellom 0,2 og 1,6 cm/s over døgnet om sommeren. Om vinteren var det liten variasjon. Opptaket og våtavsetningen av fluorider er proporsjonal med midlere konsentrasjon av fluorider over året, og opptak og våtavsetningen er størst nær verket og avtar med avstanden fra utslippet. På Sunndalsøra ble opptaket av fluorider beregnet til 104 mg/m <sup>2</sup> år over året, og våtavsetningen ble beregnet til 54 mg/m <sup>2</sup> år. Tilsvarende for Romfo ble opptaket over året beregnet til 12 mg/m <sup>2</sup> år, og våtavsetningen ble beregnet til 6 mg/m <sup>2</sup> år.			
TITLE Dispersion calculations of fluorides in Sunndalen. Uptake in vegetation and wet deposition.			
ABSTRACT			

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