



RAPPORT NR 311/88

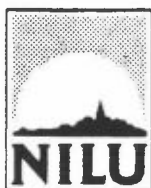
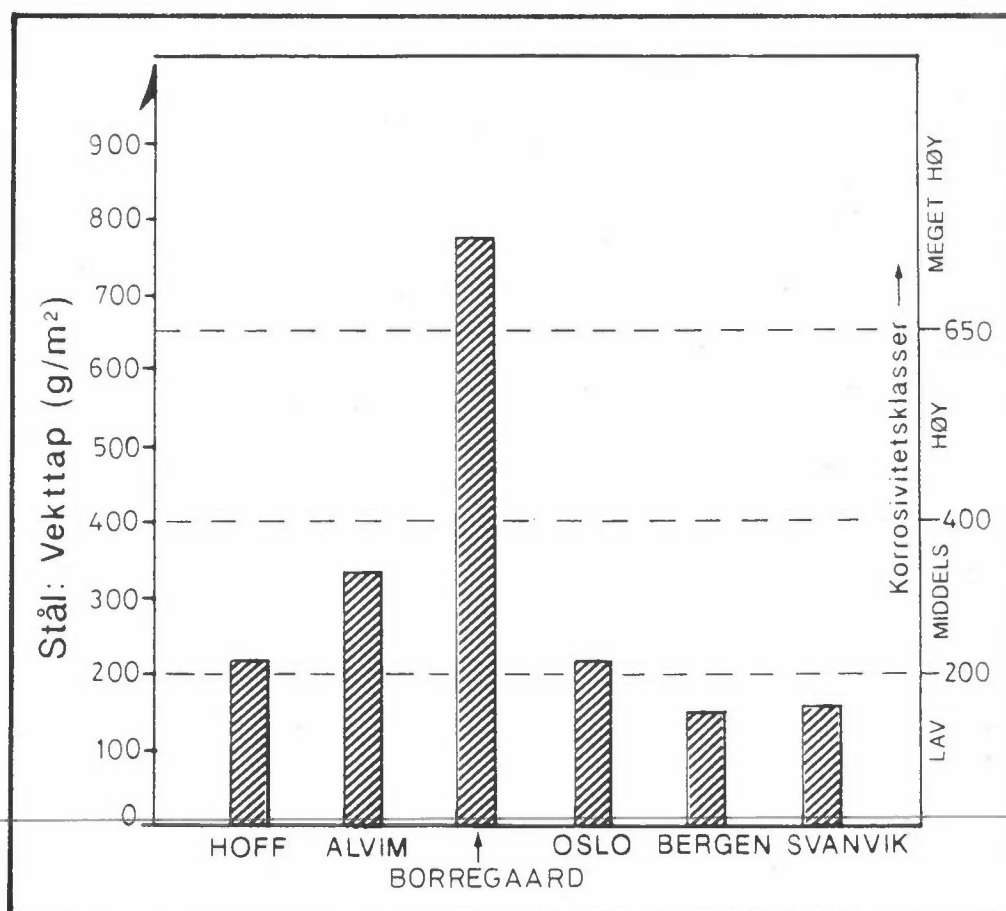
Oppdragsgiver

Statens forurensningstilsyn

Deltakende institusjoner

NILU

# OVERVÅKING AV KORROSJON 1981 - 1986





## Statlig program for forurensningsovervåking

Det statlige programmet omfatter overvåking av forurensningsforholdene i

**luft og nedbør  
grunnvann  
vassdrag og fjorder  
havområder  
skog**

Overvåkingen består i langsiktige undersøkelser av de fysiske, kjemiske og biologiske forhold.

Hovedmålsettingen med overvåkingsprogrammet er å dekke myndighetenes behov for informasjon om forurensningsforholdene med sikte på best mulig forvaltning av naturressursene.

Hovedmålet spenner over en rekke delmål der overvåkingen bl.a. skal:

**gi informasjon om tilstand og utvikling av forurensningssituasjonen på kort og lang sikt.**

**registrere virkningen av iverksatte tiltak og danne grunnlag for vurdering av nye forurensningsbegrensende tiltak.**

**påvise eventuell uheldig utvikling i resipienten på et tidlig tidspunkt. over tid gi bedre kunnskaper om de enkelte vannforekomsters naturlige forhold.**

Sammen med overvåkingen vil det føres kontroll med forurensende utslipp og andre aktiviteter.

Overvåkingsprogrammet finansieres i hovedsak over statsbudsjettet. Statens forurensningstilsyn er ansvarlig for gjennomføring av programmet.

Resultater fra de enkelte overvåkingsprosjekter publiseres i årlige rapporter.

Henvendelser vedrørende programmet kan i tillegg til de aktuelle institutter rettes til Statens forurensningstilsyn, Postboks 8100 Dep, 0032 Oslo 1, tlf. 02 - 57 34 00.

NILU OR : 32/88  
REFERANSE: O-8123  
DATO : MAI 1988  
ISBN : 82-7247-926-5

OVERVÅKING AV KORROSJON 1981-1986

Odd Anda og Jan Fr. Henriksen

---

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING  
POSTBOKS 64, 2001 LILLESTRØM  
NORGE

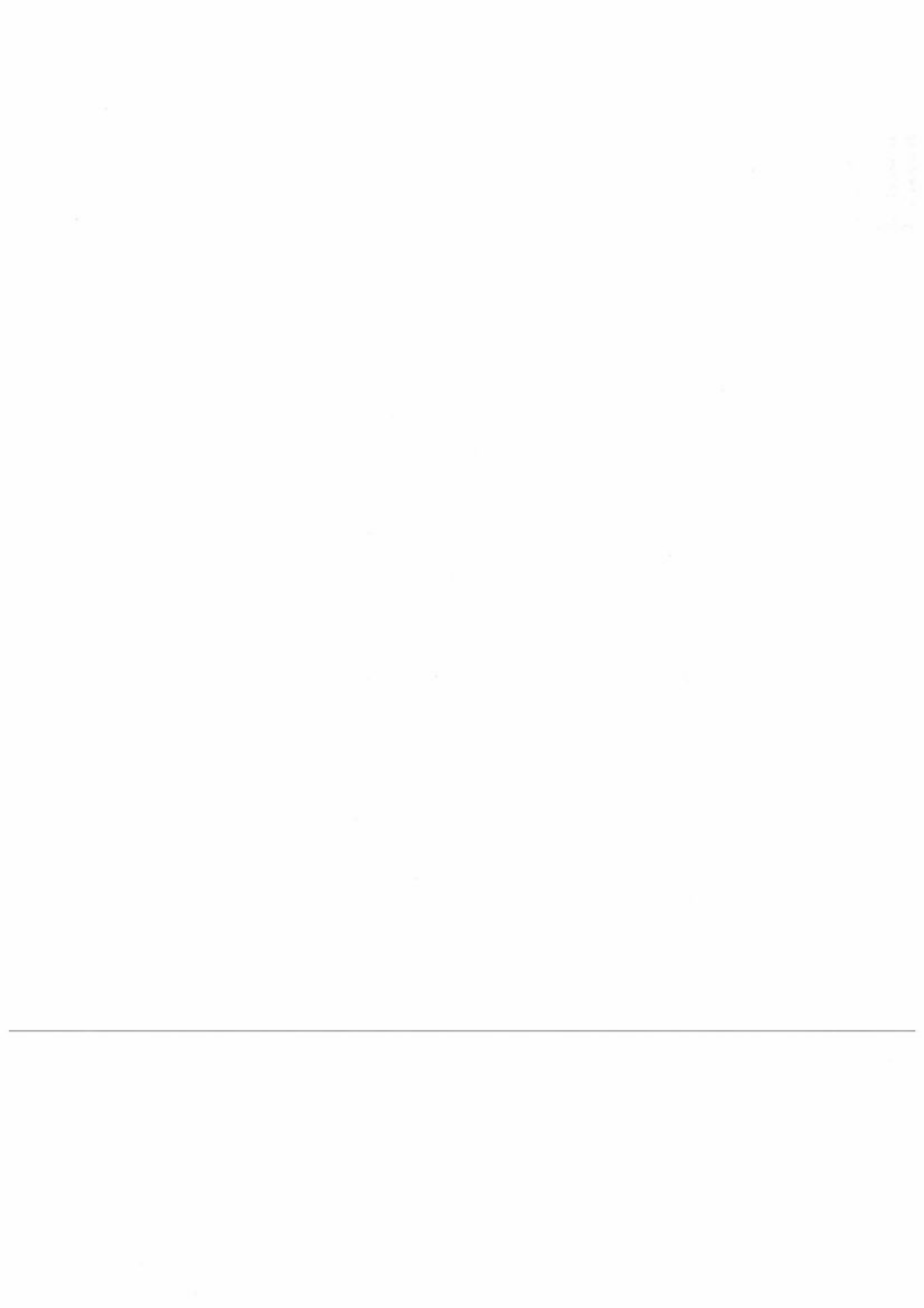
## FORORD

Overvåkingen av korrosjon utføres som oppdrag for Statens forurensningstilsyn.

Prosjektet omfatter i dag måling av korrosjon (vekttapsmålinger) og miljøparametre på 6 stasjoner, herav 4 i Østlands-området, en i Bergen og en i Finnmark.

Rapporten gir et sammendrag av data fra måleprogrammet startet i november 1981 til ut året 1986.

---



## SAMMENDRAG

Målet med dette prosjektet er å undersøke sammenhenger mellom metallers (stål, Zn, Cu og Al) korrosjon og miljøvariable. Miljøvariable er luftforurensninger og dessuten meteorologiske forhold som kan ha avgjørende betydning for forurensningenes effekt.

Korrosjonshastigheten bestemmes i første rekke av  $\text{SO}_2$  på forurenings-  
siden og fuktighet på klimasiden. Fuktighetsparameteren våttid som nå brukes mye i korrosjonssammenheng, betegnes TOW (= time of wetness). TOW er antall timer hvor luftfuktigheten er 80% eller høyere samtidig som temperaturen er  $0^\circ\text{C}$  eller mer, dvs. den del av tiden hvor betydningsfull korrosjon faktisk skjer.

Virkingen av nitrogendioksid, som idag oftest finnes i større mengder i norske byer enn svoveldioksid på grunn av biltrafikken, er mindre kjent for de metallene som omtales. Laboratorieforsøk tyder på at ved relative fuktigheter over 90% vil  $\text{NO}_2$  kunne dempe korrosjonen i  $\text{SO}_2$ -holdig atmosfære for stål og Al. Under 90% relativ fuktighet vil imidlertid  $\text{NO}_2$  kunne gi noe økning av korrosjonen. Forsøkene er utført ved bruk av forholdsvis høye konsentrasjoner av  $\text{SO}_2$  og  $\text{NO}_2$  i samme mengdeforhold. For Zn tyder de samme forsøkene på at  $\text{NO}_2$  øker korrosjonen noe.

Klorider i luft, som ofte er av marin opprinnelse, betyr lite for korrosjonen i norske byer da konsentrasjonsnivået normalt er lavt. I kystnære og værharde strøk kan klorid gi korrosjonsproblemer spesielt på stål og Al, men dette er i så fall ikke noe antropogent forureningsproblem.

Smuss kan også ha betydning for korrosjonen. Smuss er i korrosjonssammenheng ikke noe entydig begrep. Det kan således virke både korrosjonsdempende og -fremmende alt etter dets sammensetning og overflate-egenskaper.

NILU har hatt korrosjonsovervåking i Østfold på Hoff, Alvim og Borregaard siden 1981, i Oslo siden 1982 og i Bergen og Svanvik (Øst-Finnmark) siden 1984. Disse stasjonene representerer ulike korrosjonsmiljøer.

En har eksponert metallene i 3 ulike posisjoner relativt til horisontalplanet,  $45^{\circ}$ , parallelt og i vertikal posisjon under tak.

Generelt har en for alle metaller funnet størst korrosjon i horisontalposisjon og klart minst i posisjonen under tak. Et unntak her er Al som viser størst korrosjon under tak på alle stasjoner bortsett fra Bergen og Svanvik.

SO<sub>2</sub>-effekten er velegnet å studere på Østfoldstasjonene, da en her kan regne med tilnærmet samme meteorologiske forhold for de 3 stasjonene samtidig. Med Hoff som bakgrunnsstasjon kan en tegne kurver som vist nedenfor. De viser økende korrosjon med økende SO<sub>2</sub>-innhold i luften for samtlige metaller. Kurvene viser også at de forskjellige bruksmetallene har ulik "respons" på øket SO<sub>2</sub>-innhold i luften. Spredningen er angitt på figuren, og den øker med økende SO<sub>2</sub>-innhold. Dette kommer av at når SO<sub>2</sub>-verdien er høy, vil korrosjonen være særlig følsom for variasjoner i klimaparametere og da spesielt våttiden (TOW).

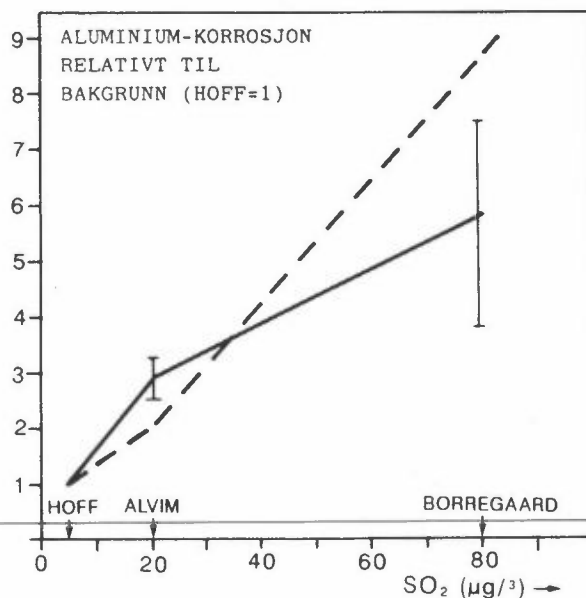
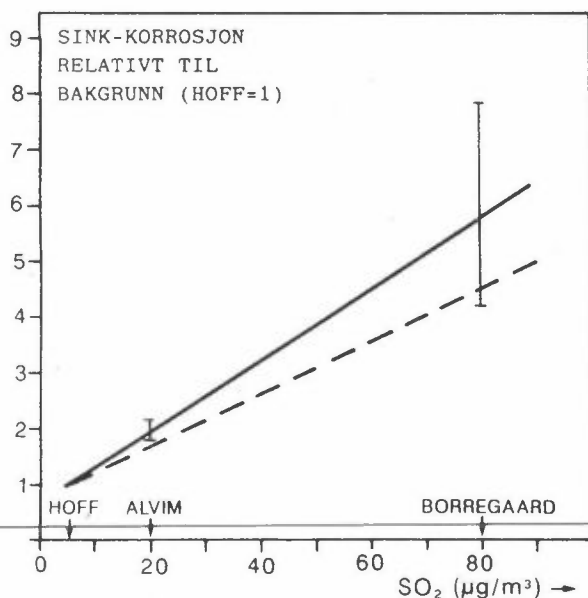
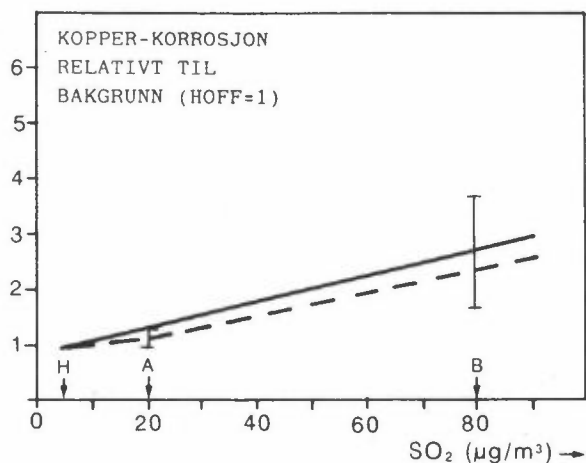
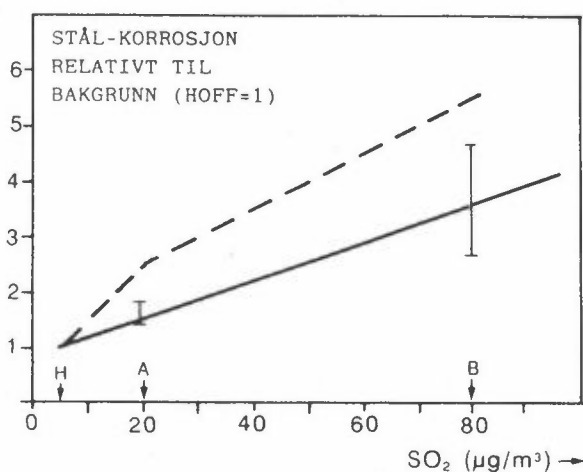
Korrosiviteten på de andre stasjonene (Oslo, Bergen (CMI) og Svanvik) var omtrent på nivå med Alvim eller lavere.

Korrosjonen i Bergen under tak var uventet lav for alle metaller unntatt for Al. Karakteristisk for stasjonen er lavt SO<sub>2</sub>- og smussnivå.

Den årlige korrosjonen av stål har endret seg lite på Østfoldstasjonene. På Borregaard var korrosjonen større i begynnelsen av 1980-årene, men var i 1986 nede på samme nivå som i 1970 årene. For de andre stasjonene er det for få data ennå til å si noe om endringer i korrosjonsnivå med tiden.

Tabellen viser midlere årsvekttap i  $\text{g/m}^2$  for de undersøkte metaller på samtlige stasjoner (i standard posisjon dvs.  $45^\circ$  relativt til horisontalplanet).

| Stasjon     | Stål | Zn   | Cu   | Al  |
|-------------|------|------|------|-----|
| Hoff        | 215  | 6.8  | 6.6  | 0.5 |
| Alvim       | 327  | 12.5 | 7.7  | 1.1 |
| Borreagaard | 770  | 41.0 | 18.5 | 1.8 |
| Oslo        | 215  | 12.5 | 4.8  | 0.7 |
| Bergen      | 148  | 16.0 | 4.6  | 0.5 |
| Svanvik     | 158  | 8.2  | 4.4  | 0.2 |



Korrosjonen av stål-, Zn-, Cu- og Al-plater på stasjonene Alvim ( $\sim 20 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ) og Borreagaard ( $\sim 80 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ) i forhold til bakgrunnsstasjonen Hoff ( $\sim 5 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ ). Heltrukket linje gjelder korrosjon i posisjon  $45^\circ$ , ubeskyttet. Stiplet linjer gjelder korrosjon under tak i vertikal posisjon. En har tatt med 1, 2 og 4 års eksponeringer. Figuren forteller ikke noe om korrosjonsvekttapet. Det er mye høyere for stål enn for de andre metallene.



Sammenhengen mellom korrosjon og miljø er komplisert, og det er viktig stadig å søke nye innfallsvinkler. NILU har arbeidet med å finne matematiske uttrykk, modeller, for korrosjon som funksjon av miljøvariable. En av svakhetene ved modellene er at en ennå ikke på samme måte som for fuktighetsparameteren TOW har koblet temperaturen med  $\text{SO}_2$ . Det er åpenbart at  $\text{SO}_2$  ikke har samme korrosive virkning ved temperaturer under  $0^\circ\text{C}$ . Beregningsmodellene har til nå ikke vært tilstrekkelig mekanismerelaterte, og de har således begrenset anvendelse.

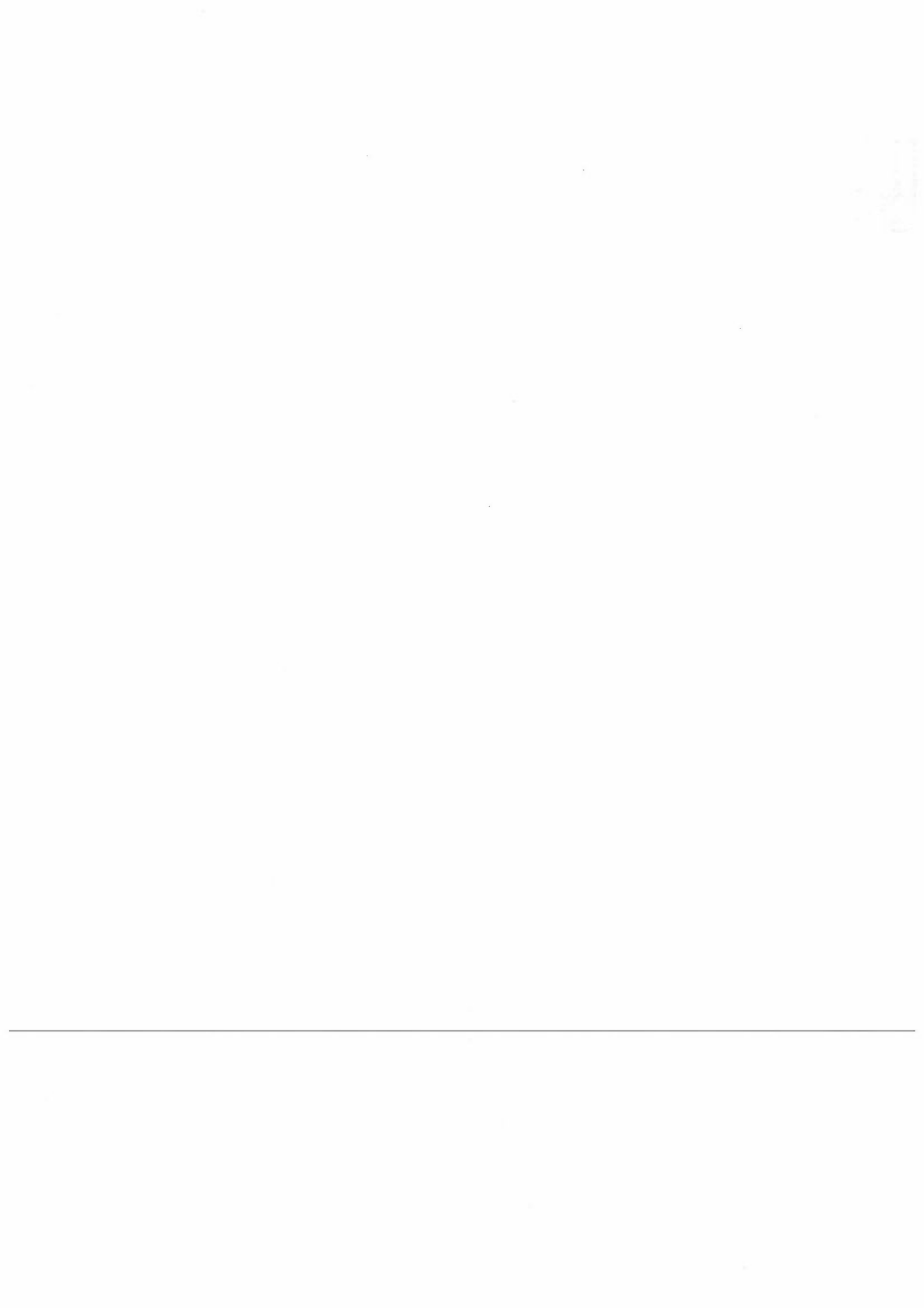
Et av hovedsiktemålene for fremtidig arbeid vil være å søke etter bedre parameterkoblinger, og om mulig også en mer relevant matematisk uttrykksform. Det er pekt på noen muligheter for å bedre modellene selv med den datamasse vi allerede har, men det er også viktig å følge stasjonene over lengre tid for å oppnå større bredde i dataene.

---

## INNHOOLD

|  | Side |
|--|------|
| FORORD .....   | 1    |
| SAMMENDRAG .....   | 3    |
| KONKLUSJON .....   | 9    |
| 1 INNLEDNING .....                                       | 10   |
| 2 STASJONSNETTET OG DETS INSTRUMENTERING .....           | 10   |
| 3 RESULTATER OG DISKUSJON .....                          | 13   |
| 3.1 Stål .....   | 13   |
| 3.1.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp .....             | 13   |
| 3.1.2 Eksponeringsposisjonenes betydning.....            | 18   |
| 3.1.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable ..... | 21   |
| 3.2 Sink .....   | 24   |
| 3.2.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp .....             | 24   |
| 3.2.2 Eksponeringsposisjonens betydning .....            | 27   |
| 3.2.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable ..... | 27   |
| 3.3 Kobber .....   | 29   |
| 3.3.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp .....             | 29   |
| 3.3.2 Eksponeringsposisjonens betydning .....            | 31   |
| 3.3.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable ..... | 32   |
| 3.4 Aluminium .....                                      | 33   |
| 3.4.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp .....             | 33   |
| 3.4.2 Eksponeringsposisjonens betydning .....            | 36   |
| 3.4.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable ..... | 36   |
| 4 BEREGNINGSMODELLER FOR KORROSJONSHASTIGHET .....       | 37   |
| 5 REFERANSER .....                                       | 43   |
| VEDLEGG A: Stasjonenes geografiske plassering .....      | 45   |
| VEDLEGG B: Årsmidler for miljøparametrene .....          | 49   |

---



## OVERVÅKING AV KORROSJON 1981-1986

## KONKLUSJON

NILU har hatt korrosjonsovervåking i Østfold på Hoff, Alvim og Borregaard siden 1981, i Oslo siden 1982 og i Bergen og Svanvik (Øst-Finnmark) siden 1984.

En har eksponert metallene stål, sink, kobber og aluminium i 3 ulike posisjoner relativt til horisontalplanet,  $45^{\circ}$ , parallelt og i vertikal posisjon under tak.

Generelt har en for alle metaller funnet størst korrosjon i horisontalposisjon og klart minst i posisjonen under tak. Et unntak her er Al som viser størst korrosjon under tak på alle stasjoner bortsett fra Bergen og Svanvik.

En fant økende korrosjon med økende  $\text{SO}_2$ -innhold i luften for samtlige metaller. Metallene viste ulik "respons" på øket  $\text{SO}_2$ -innhold i luften.

Korrosiviteten på stasjonene Oslo, Bergen (CMI) og Svanvik var omtrent på nivå med Alvim eller lavere.

Korrosjonen i Bergen under tak var uventet lav for alle metaller unntatt for Al. Karakteristisk for stasjonen er lavt  $\text{SO}_2$ - og smussnivå.

Den årlige korrosjonen av stål har endret seg lite på Østfoldstasjonene. På Borregaard var korrosjonen større i begynnelsen av 1980-årene, men var i 1986 nede på samme nivå som i 1970-årene. For de andre stasjonene er det for få data ennå til å si noe om endringer i korrosjonsnivå med tiden.

Beregningsmodellene har til nå ikke vært tilstrekkelig mekanismerelaterte, og de har således begrenset anvendelse.

## 1 INNLEDNING

Hensikten med korrosjonsundersøkelsene i "Statlig program for forurensningsovervåking" er å klargjøre sammenhengene mellom miljøvariable og korrosjonshastighet. I miljøvariable inngår også klima. Ved valg av målesteder har en derfor tatt hensyn til variasjoner i klima og forurensningsgrad. De metaller en har eksponert er stål, forkorrodert sink, kobber og aluminium. De første metalleksponeringene startet i november 1981 med 3 stasjoner i Sarpsborg/Fredrikstad-området. Siden har korrosjonsovervåkingen blitt utvidet med ytterligere 3 stasjoner: Oslo, Bergen og Svanvik.

Denne rapporten gir en samlet fremstilling av alle data fra programmet startet i november 1981 til ut året 1986, sammen med en tolkning av det foreliggende materialet.

## 2 STASJONSNETTET, INSTRUMENTERING OG PARAMETERVALG

Fra og med 1984 var seks stasjoner inkludert i overvåkingsnettets: tre stasjoner i Østfold: Hoff (tilnærmet bakgrunnsstasjon), Borregaard (industri) og Alvim (by), en stasjon i Oslo sentrum (by, Ajungilak, nær Akerselva, vest for Grønland), en stasjon i Bergen (by, ingeniørhøy skolens tak) og en stasjon i Svanvik, Øst-Finnmark (sub-arktisk, kan episodisk være påvirket av industriutslipp fra Sovjet). I vedlegg A finner en stasjonenes geografiske plassering. Figur 1 viser når eksponeringen startet på de enkelte stasjoner og hvilke eksponeringstider en har anvendt. Prosjektet er planlagt å vare i 10 år.

Stasjonene er utstyrt med nedbørmåler, termohygrograf og aerosolfeller, og på de fleste stasjoner er det også prøvetakere for SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub>.

---

| Stasjon                   |   | — Overvåkingsprogram, ... Basisundersøkelsene (NB: bare pos. 45°)        | Metaller                     |
|---------------------------|---|--|------------------------------|
| Hoff, Borregaard og Alvim | { Måned<br>{ Kvartal<br>{ 1.2 år<br>{ 1.2.4(6.10) |  | Fe<br>Fe<br>} Fe, Zn, Cu, Al |
| Oslo                      | { Kvartal<br>{ 1.2.4(6.10)                        |  | Fe<br>Fe, Zn, Cu, Al         |
| Bergen                    | { Måned<br>{ Kvartal<br>{ 1.2 år<br>{ 1.2(4.6.10) |  | Fe<br>Fe<br>} Fe, Zn, Cu, Al |
| Svanvik                   | { Kvartal<br>{ 1.2(4.6.10)                        |  | Fe<br>Fe, Zn, Cu, Al         |
|                           |   | 4 1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4<br>81 1982 1983 1984 1985 1986 |                              |

Figur 1: Oversikt over eksponeringsperiodene i basis og overvåkingsprogrammet.

De parametrene en måler nå på samtlige overvåkingsstasjoner er:

Ledningsevne ( $\mu\text{S}$ )

pH

Svovelkonsentrasjon ( $\text{mg/l}$ )

Kloridkonsentrasjon, Cl-C ( $\text{mg/l}$ )

Kloridavsetning, Cl-B ( $\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )

$\text{SO}_2$  i luft ( $\mu\text{g/m}^3$ ). Gjelder ikke Hoff hvor en har bakgrunnsverdier rundt  $5 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$

$\text{NO}_x$  i ( $\mu\text{g/m}^3$  som  $\text{NO}_2$ ). Ikke komplett målenett.

Tørravsatt klorid, Cl-B (AF)

( $\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )

Tørravsatt magnesium, Mg-B (AF)

( $\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )

Gjelder nedbør på månedsbasis. Unntak er Svanvik som er på ukeshbasis og f.o.m. nov. 1987 gjelder dette også Borregaard og Oslo.

AF = aerosolfelle

I noen tilfeller har en anvendt data fra Meteorologisk institutts stasjon på Rygge.

Metallplatene som er 7.5x10 cm er plassert i tre posisjoner: 45° / mot sør, horisontalt og under tak (i et modifisert dobbelt linkebur).

L45° / kalles standard posisjon eller normal posisjon. Den horisontale plasseringen av prøveplatene har vi valgt da den i praksis er meget vanlig og fra et korrosjonsmessig synspunkt ugunstig, da en får lengre våttider. Posisjonen "under tak" mener vi kan gi verdifulle opplysninger om virkningen av fravær av nedbør.

Eksponeringstidene har vært kvartal og 1, 2 og 4 år for stål. For de andre metallene har en ikke kvartalseksponeringer.

En har dessuten vurdert månedseksponeringsdata fra basisundersøkelser.

Det er flere grunner for å velge ulike eksponeringstider ved korrosjonsundersøkelser. I prinsippet er en interessert i å eksponere korrosjonsprøvene kortest mulig tid. Men så lenge korrosjonsmekanismene i felt ikke er helt klarlagt, vil en få tolkningsproblemer av resultatene. Disse problemene vil bli større dess kortere eksponeringstiden er fordi prøvene i startfasen er mer "følsomme" for miljøkvaliteten. Et korrosjonsvekttap fremkommet etter en gitt tid kan således ikke bare fordobles ved dobbel eksponeringstid. Dette gjør at en ofte velger lengre eksponeringstider som 1 år og mer. En får da stabilisert overflaten slik at korrosjonen blir jevnere (dog fortsatt ofte ikke lineær med tiden), og en får også inkludert alle årets måneder med de miljøvariasjoner det innebærer.

Skal en studere mekanismer kommer en imidlertid ikke utenom korte eksponeringer. En får da mye større mulighet til å studere den enkelte parameters innflytelse på korrosjonen.

---

Korrosjonen måles som middelvekttap av to parallell-prøver. Korrosjonsvekttapet er differansen mellom metallplantens vekt før og etter eksponering. Den eksponerte platen må før veining gjennom en beise-prosess hvor en fjerner korrosjonsproduktene.

### 3 DISKUSJON OG KONKLUSJONER

Grunnlagsdata for korrosjonsvekttap og miljøvariable er å finne i en separat datarapport (Anda, 1988). Oversikt over miljøvariable på årsbasis finnes i vedlegg B.

#### 3.1 STÅL

##### 3.1.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp

Tabell 1 gir middelverdier for all eksponeringsperioder og i alle tre posisjoner. En har dessuten i høyre kolonne i tabellen regnet ut forholdstallet mellom vekttapene i normal posisjon og under tak.

På figur 1 er vist årskorrosjonsvekttapene for normal posisjon. For bedre å kunne bedømme disse korrosjonsnivåene i større sammenheng er korrosivitetsklasser (C. Sjøstrøm og J. Henriksen, 1987) tatt med til høyre i figuren.

Korrosjonshastigheten er størst i startfasen av en eksponeringsperiode. Etter ca. 1 år vil den som regel stabilisere seg og forbli tilnærmet konstant.

Ut fra tallene i tabell 1 kan en lage kurver av typen vist i figur 2. De ulike kurvene representerer separate eksponeringsserier med ulike startpunkt. En ser at dersom korrosjonen er stor i startfasen, synes det å være dannet et grunnlag for høyere korrosjon også i fortsetningen. Start i sommermånedene har således gitt lavere korrosjon enn senhøstes start.

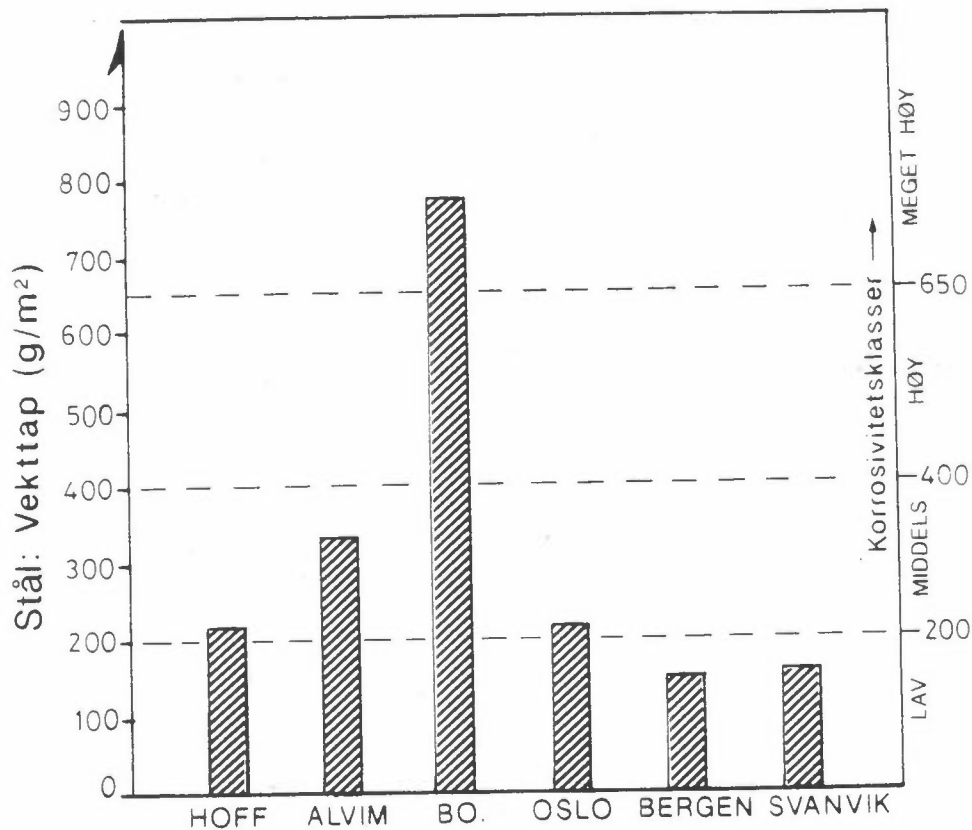
---

Siden vil naturligvis også miljøfaktorenes variasjon og vekselvirkning ha innflytelse på forløpet, men hvor viktig disse er i forhold til startfasebetingelsene, vet vi mindre om.



Tabell 1: Stålkorrosjon - Midlere vekttap for måneds-, kvartals- og årseksponeringer. Vekttap over 2 og 4 år er også tatt med.

| Stasjon      | Eksp.p.      | Vekttap ( $\text{g/m}^2$ ) |                 |      |                |      |      | A/C  |      |
|--------------|--------------|----------------------------|-----------------|------|----------------|------|------|------|------|
|              |              | Månedsmiddel               |                 |      |                |      |      |      |      |
|              |              | A<br>Normal pos.           | B<br>Horisontal |      | C<br>Under tak |      |      |      |      |
| Hoff         | 11.82-10.83  | 23                         | 25              |      | 9              |      | 2.5  |      |      |
| Alvim        | " "          | 47                         | 49              |      | 21             |      | 2.3  |      |      |
| Borregaard   | " "          | 117                        | 123             |      | 41             |      | 2.8  |      |      |
| Bergen (CMI) | 1984         | 28                         |                 |      | -              |      | -    |      |      |
|              |              | Kvartalsmiddel             |                 |      |                |      |      |      |      |
| Hoff         | 11.81-10.83  | 66                         | 68              |      | 24             |      | 2.7  |      |      |
| Alvim        | " "          | 118                        | 138             |      | 57             |      | 2.1  |      |      |
| Borregaard   | " "          | 331                        | 382             |      | 121            |      | 2.7  |      |      |
| Oslo         | 10.82-9.84   | 75                         | 85              |      | 32             |      | 2.3  |      |      |
| Bergen (CMI) | 1983 og 1984 | 61                         | 80              |      | 13             |      | 4.7  |      |      |
| Svanvik      | 8.84-12.86   | 57                         | 61              |      | 19             |      | 3.0  |      |      |
|              |              | Årsmiddel                  |                 |      |                |      |      |      |      |
| Hoff         | 1981-86      | 215                        | 227             |      | 72             |      | 3.0  |      |      |
| Alvim        | " "          | 327                        | 343             |      | 178            |      | 1.8  |      |      |
| Borregaard   | " "          | 770                        | 885             |      | 408            |      | 1.9  |      |      |
| Oslo         | 1982-86      | 215                        | 249             |      | 68             |      | 3.2  |      |      |
| Bergen (CMI) | 1984-86      | 148                        | 190             |      | 26             |      | 5.7  |      |      |
| Svanvik      | 1984-86      | 158                        | 176             |      | 60             |      | 2.6  |      |      |
|              |              | Flerårsverdier             |                 |      |                |      |      |      |      |
|              |              | 2 år                       | 4 år            | 2 år | 4 år           | 2 år | 4 år | 2 år | 4 år |
| Hoff         | 1981-85      | 273                        | 527             | 405  | 464            | 191  | 203  | 1.4  | 2.6  |
| Alvim        | " "          | 564                        | 758             | 565  | 778            | 317  | 532  | 1.8  | 1.4  |
| Borregaard   | " "          | 1509                       | 2286            | 1986 | 3356           | 771  | 1437 | 2.0  | 1.6  |
| Oslo         | 1982-86      | 311                        | 430             | 392  | 533            | 97   | 184  | 3.2  | 2.3  |
| Bergen (CMI) | 1984-86      | 217                        | -               | 291  | -              | 37   | -    | 5.9  | -    |
| Svanvik      | 1984-86      | 268                        | -               | 299  | -              | 125  | -    | 2.1  | -    |



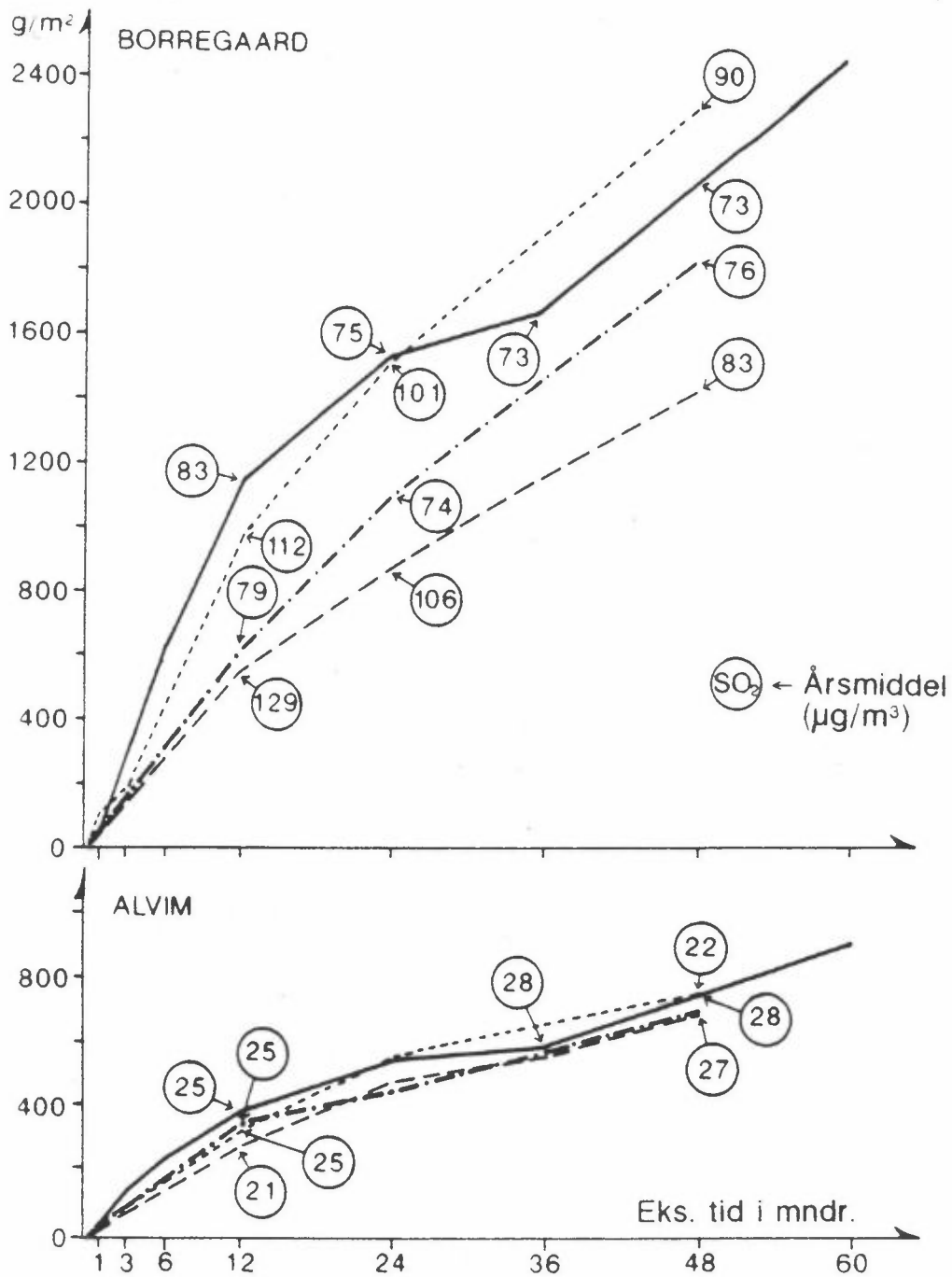
Figur 1: Middelårskorrosjonsvekttap for stål på overvåkingsstasjonene.

En ser også at på steder med moderat eller lite aggressiv atmosfære vil en få raskere kurveavflatning enn i sterkt forurenset miljø som Borregaard.

Korrosjonsforholdene på overvåkingsstasjonene har ikke endret seg vesentlig under den tid en har hatt undersøkelser i gang.

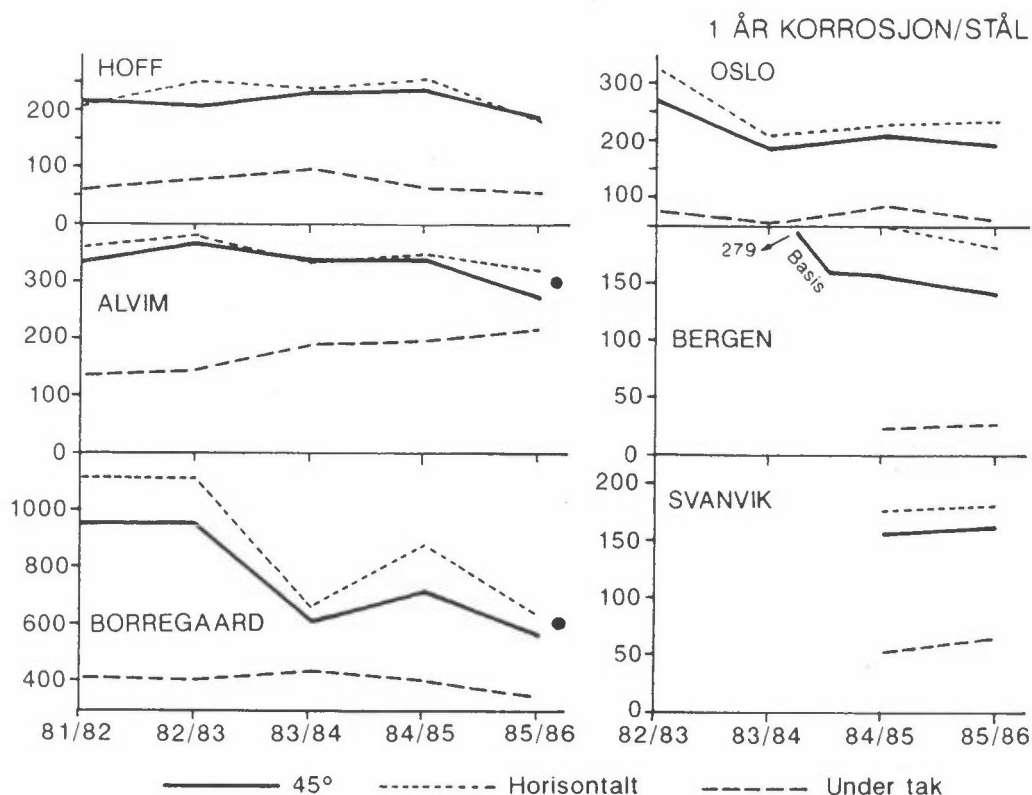
Figur 3 viser årskorrosjonen i tiden 11.81-10.86.

En ser at det er skjedd bare små forandringer som neppe kan tillegges særlig vekt. Når det gjelder Borregaard kan det av figur 3 se ut som en endring i korrosjonsnivået. En ser at korrosjonen var høyere i begynnelsen av 80-årene og at vi i midten av 80-årene er tilbake til



Figur 2: Korrosjonsforløp for stål med ulikt start-tidspunkt. Eksponeringssted er Borregaard og Alvim.

- fra 7.73-6.77, (Atteraas and Haagenrud, 1982).
- fra 10.74-9.79, (Internt NILU-program).
- .-.- fra 7.75-6.79, (Haagenrud et al., 9th Scandinavian corrosion Congress).
- ..... fra 11.81-10.85, (Overvåkingsdata).



Figur 3: Årskorrosjon av stål på alle overvåkingsstasjonene i tiden 11.81 - 10.86. Middelårskorrosjon for perioden 7.73 - 6.79 er merket ●.

nivået i midten av 70-årene. Over lengre tid har altså ikke korrosivitetet endret seg noe vesentlig i Sarpsborg. Fra Bergen og Svanvik har en foreløpig for få data til å si noe om tendenser i korrosjonsforholdene over tid.

Svanvik er den eneste av stasjonene som viste en klar variasjon i korrosjonen med årstidene.

Svanvik har liten korrosjon senhøstes og stor i overgangen vår/sommer (se fig. 4). Dette har vi ennå ingen tilfredstillende forklaring på, for så vidt som en senhøstes har både høyere middeltemperatur og høyere TOW-verdi enn vår/sommer. Begge de to sist nevnte forhold skulle normalt tilsi økt korrosjon. En har ikke funnet noen klar årstidsvariasjon for  $\text{SO}_2$ -konsentrasjonen i luft.

For Østfoldstasjonene kan en spore en tendens til noe større korrosjon på Borregaard om høsten (de 4 siste månedene av året). Dette henger sannsynligvis sammen med langvarig og høy luftfuktighet kombinert med sure svovelforbindelser. Typiske vindretninger er fra SSV og N.

Figur 4 viser vekttapet på kvartalsbasis for samtlige stasjoner i alle posisjoner.

### 3.1.2 Eksponeeringsposisjonens betydning

Det er god samvariasjon i korrosjonsvekttap mellom de tre ulike posisjoner innenfor hver stasjon.

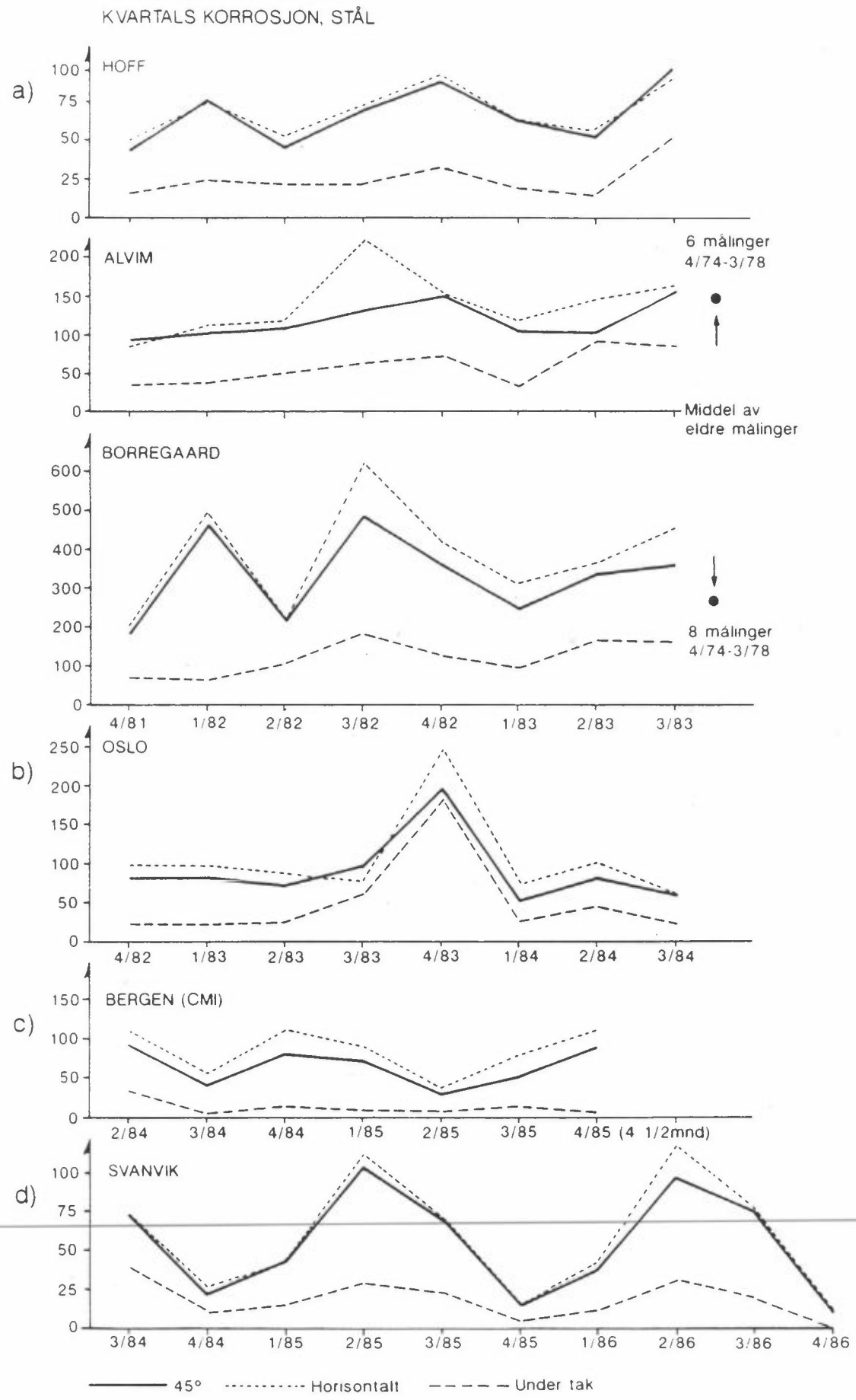
Dette går frem av figur 4. En ser imidlertid at dette ikke stemmer like godt for Alvim. Noen sikker forklaring kan vi ikke gi.

Som ventet korroderer det mest i horisontal posisjon og minst under tak.

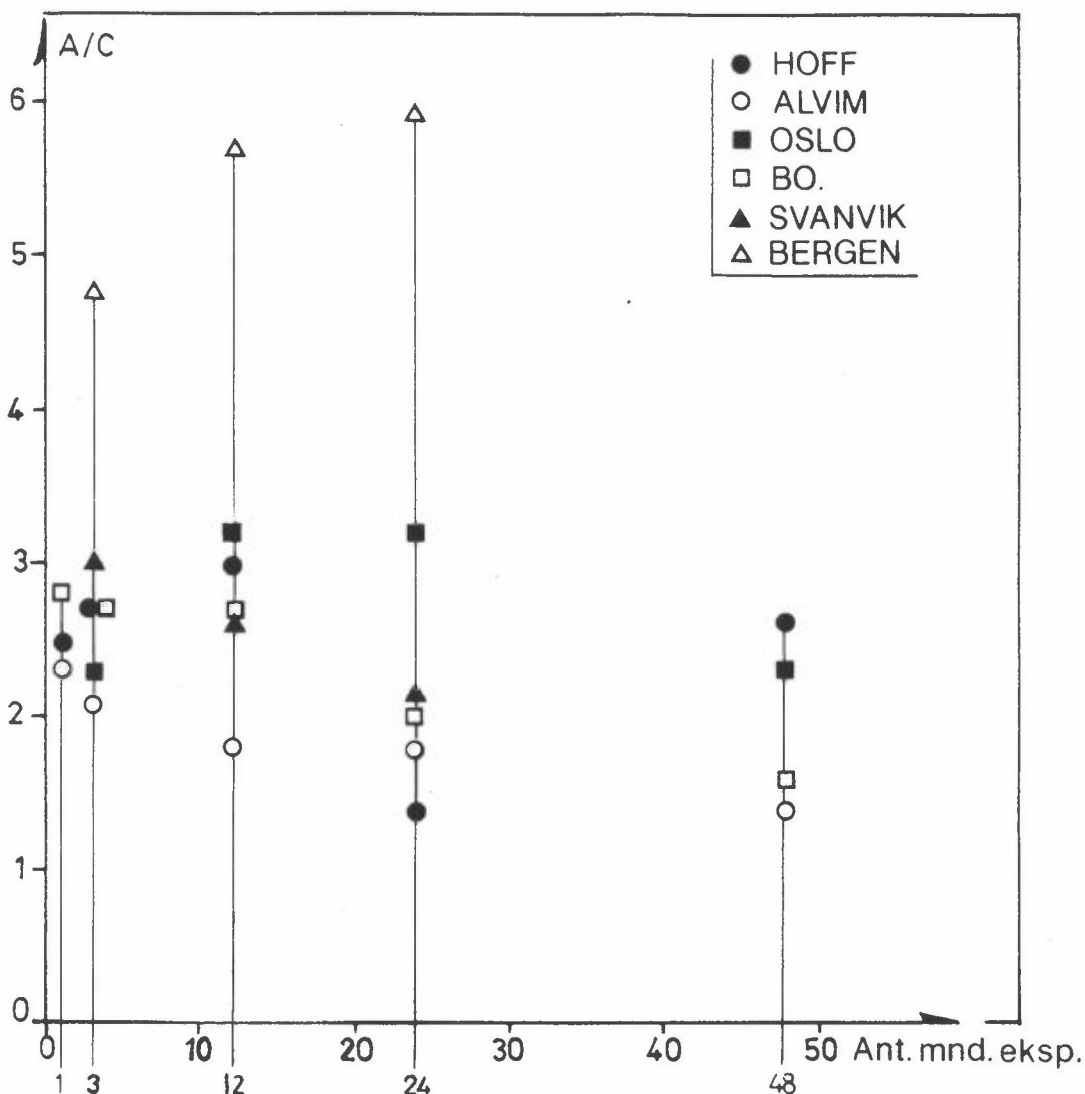
Det er vanskelig å få representativt vekttapstall for horisontal posisjon. Årsaken er hovedsakelig de kompliserte opptørkingsforholdene en har på de horisontale testplatene. Korrosjonen er som gjennomsnitt rundt 18% høyere i horisontal posisjon enn i standard posisjon. Men det er store variasjoner fra stasjon til stasjon (7-31%) og også på den enkelte stasjon (3-48%) fra periode til periode. Som ventet finner en minst korrosjon på platene under tak.

Borregaard er den eneste stasjon hvor en har en klar økning av korrosjonshastighet med eksponeringstid i horisontal posisjon relativt til standard posisjon. I Bergen øker korrosjonshastigheten spesielt mye ved overgang til horisontal posisjon.

Figur 5 viser forholdstallet mellom korrosjon i standard posisjon og under tak som funksjon av eksponeringstid. En ser at bortsett fra Bergen korroderer det fra ca. 1.5 til 3 ganger mer i standard posisjon



Figur 4: Kvartalskorrosjon av stål i alle tre aktuelle posisjoner på alle overvåkingsstasjonene.



Figur 5: Figuren viser forholdstallet mellom korrosjonsvekttap av stål i standard posisjon og under tak som funksjon av eksponeringstid.

enn under tak, og det er en tendens til at ettersom eksponeringstiden øker, blir forskjellen i korrosjonshastighet i de to posisjonene noe mindre. En forklaring på dette kan være at det etter hvert vil bygge seg opp et oksidsjikt under tak og at den derved økte evnen til å holde på forurensninger og dermed også fuktighet vil kunne medføre et mindre fordelaktig korrosjonsmiljø enn om regnvann skyller over platene fra tid til annen.

Den betydelige reduksjonen i korrosjon en får i Bergen ved å ha prøver under tak skyldes sannsynligvis det lave forurensningsnivå en har på denne stasjonen ( $\text{SO}_2$  og smuss). Dette betyr at en ikke får bygget opp noe skjikt av oksid og forurensninger. Dermed vil en heller ikke finne

at fordelene under tak blir mindre med tiden. Samme resonnement kan anvendes for Hoff (se figur 5).

Korrosjonstapsforholdet mellom standard posisjon og under tak viser ingen entydig sammenheng med SO<sub>2</sub>-nivået.

Om SO<sub>2</sub>-nivået er lavt eller høyt, så synes dette ikke å slå ut verken til fordel eller ulempe for noen av de tre posisjoner.

### 3.1.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable

Østfold-stasjonene har gitt muligheter til å studere korrosjon som funksjon av forurensninger og da spesielt SO<sub>2</sub>. Disse stasjoner, Hoff, Alvim og Borregaard har omtrent samme meteorologiske forhold samtidig og de har konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> fra omkring 5 til 80 µg/m<sup>3</sup>.

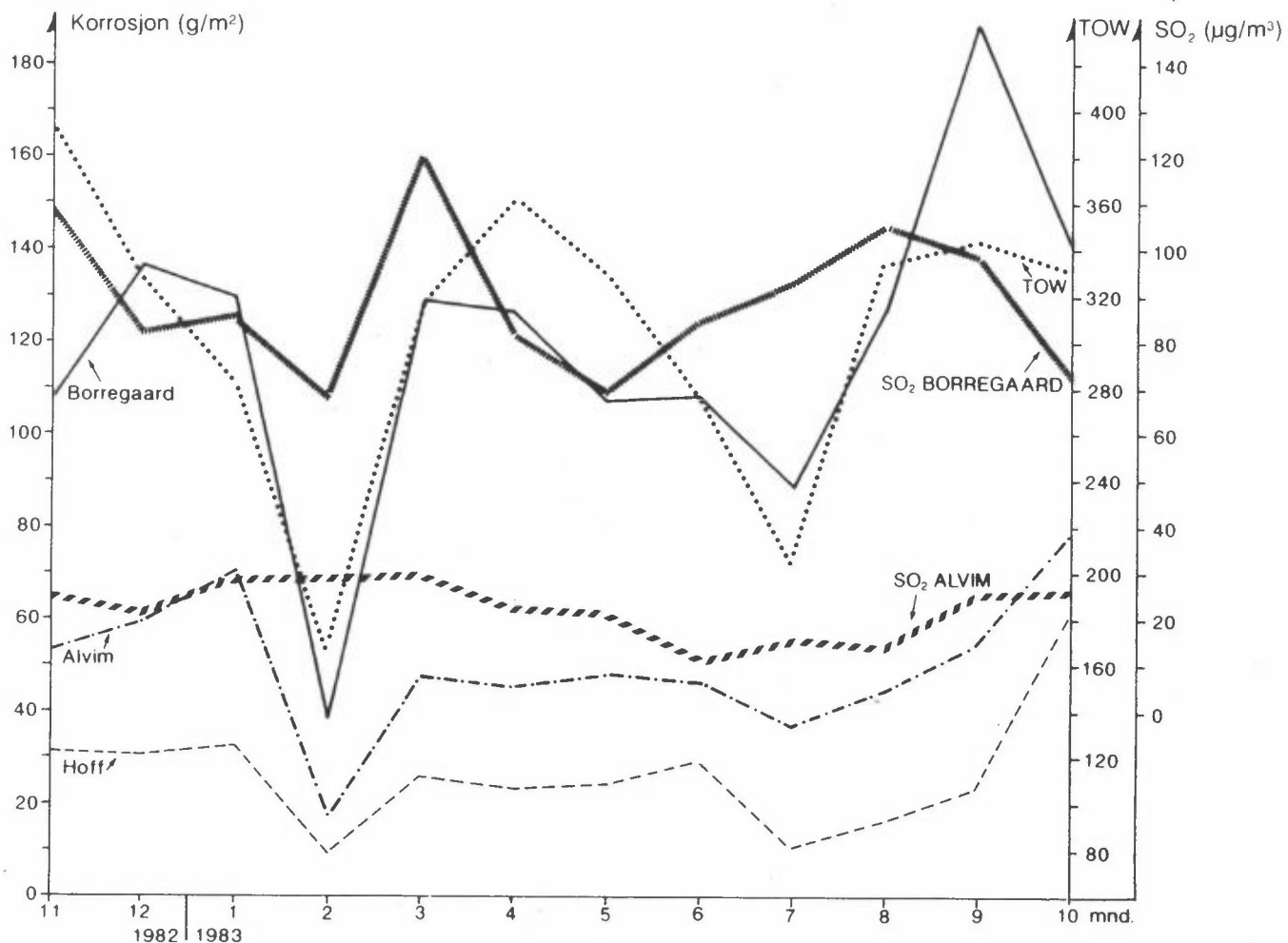
Det korroderer klart mest på Borregaard stasjonen og minst på Hoff. De meteorologiske forhold er de samme. Korrosjonen henger følgelig sammen med forurensningsnivået.

Av figurene 4 og 6 kan en se en viss likhet i korrosjonsutviklingen på stasjonene, Hoff, Alvim og endog Borregaard. Dette kan en tolke dit hen at relevante klimaparametere (TOW) i store trekk er felles for området, og det som hovedsakelig bestemmer kurvenes nivå er SO<sub>2</sub>-innholdet. At Hoff og Alvim synes å "følge" hverandre bedre skyldes at SO<sub>2</sub>-variasjonene der er mindre. Noe forenklet kan en kanskje si at for Østfold-stasjonene vil klima være bestemmende for korrosjonskurvens forløp, mens SO<sub>2</sub>-nivået er bestemmende for kurvens nivå og amplitude. En har her holdepunkter for at fuktighet og SO<sub>2</sub> er to betydningsfulle parametere som det må bli en viktig oppgave å sette inn på en riktig måte i en mekanismerelatert modell.

Alvim, Oslo og Svanvik har omtrent samme årlige SO<sub>2</sub>-middel, men viser relativt store forskjeller i korrosjon. Mens Alvim og Svanvik har tilnærmet samme SO<sub>2</sub>-nivå året rundt er nivået i Oslo noe lavere om sommeren enn de andre årstider. Alvim har størst korrosjon. Dette kan skyldes de høye TOW-tallene og muligens tilførsel av høye SO<sub>2</sub> konsentrasjoner fra Borregaard, men av så kort varighet at vi ikke kan registrere dem med den prøvetaker som anvendes. Lavest er korrosjonen



i Svanvik. Dette kan skyldes lave temperaturer og totalt sett også lave TOW-tall



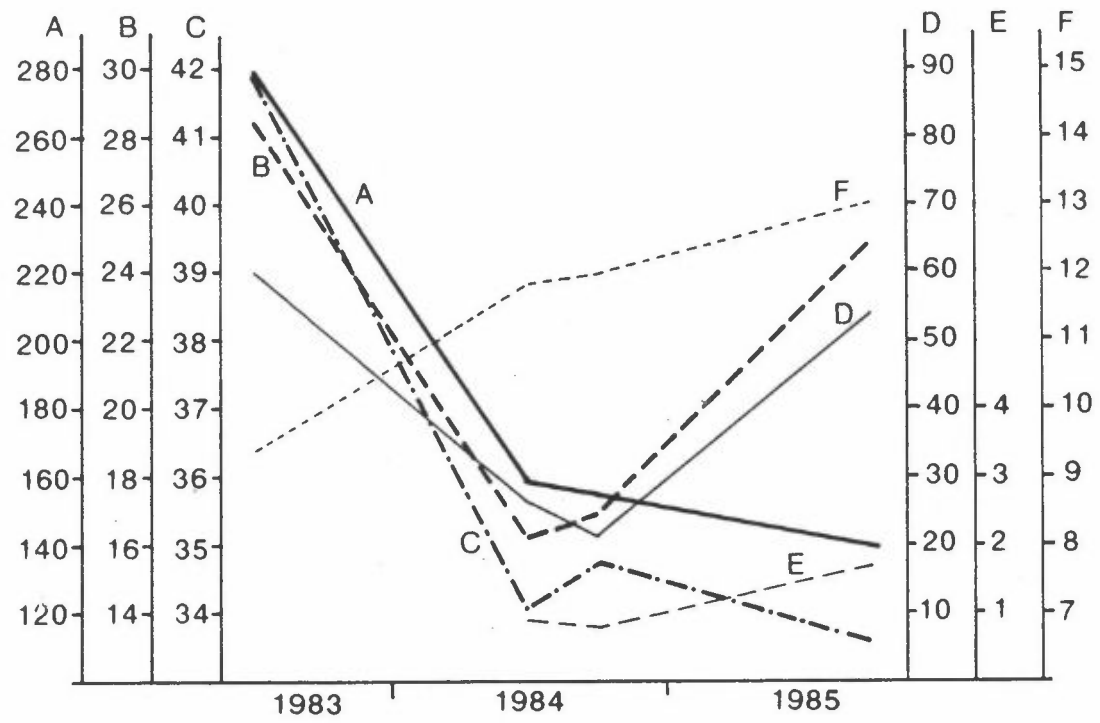
Figur 6: Månedskorrosjonen for Sarpsborg-stasjonene, samt samtidige SO<sub>2</sub> - og TOW-verdier.

I Oslo vil smuss komplisere bildet, da den kan dels maskere metallet og dels holde tilbake korrosive forurensninger.

Det er hovedsakelig de meteorologiske forhold som styrer korrosjonen i Bergen.

I basisundersøkelsen i Bergen (Haagenrud, S.E. et al., 1986) ble det anvendt 10 målesteder i byen mellom Byfjorden og Nesttun, samt en referansestasjon på Sotra.

Det er god korrelasjon mellom de ulike målestedene i Bergen, og selv med stasjonen på Sotra synes det å være en viss sammenheng. Denne blir enda bedre om en ser på kvartalskorrosjonen. Dette kan tolkes som at det først og fremst er klimaparametrene som styrer korrosjonen i Bergen, og at forurensningene har mindre generell betydning korrosjonsmessig. En kan på årsbasis ikke se noen sammenheng mellom korrosjon og SO<sub>2</sub> (figur 7).



Figur 7: Årskorrosjon og miljøparametere for Bergen (CMI).  
 A: Korrosjon (g/m<sup>2</sup>), B: Nedbør (mm), C: TOW,  
 D: Cl-B (nedbør, mg/m<sup>2</sup>·d), E: Cl-B(AF), mg/m<sup>2</sup>·d,  
 F: SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>).

Resultatene fra basisundersøkelsen viser videre at årsmiddelkorrosjonen for målestedene i Bergen generelt ligger fra omkring 20% til 30% høyere enn CMI-stasjonen (overvåkingsstasjonen). Likevel blir dette lave tall. De relativt store variasjonene innen byen kan neppe forklares ved hjelp av SO<sub>2</sub> og TOW-verdier. Sannsynligvis ligger forklaringen i tilsmussingsforholdene. Smuss vil kunne hindre tørking og avvasking av forurensningen på overflaten. CMI ligger forholdsvis skjermet til, og en får lite tilsmussing.

Klorid virker korrosivt på stål. Men selv i Bergen er kloridbelastningen fra luften for liten til å ha noen korrosjonsmessig betydning. Undersøkelser (Refsnes og Anda, 1987) viser at kloriddeposisjonen (målt med NILUs aerosolfelle) må opp i 50, kanskje 100  $\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$  (månedsmiddel) for å bli en viktig korrosjonsparameter. Dersom korrosjonsmiljøet er sterkt surt, kan en ikke se bort fra synergieffekter. Dette vil kunne redusere grensen for når klorider blir en viktig korrosjonsfaktor.

### 3.2 SINK

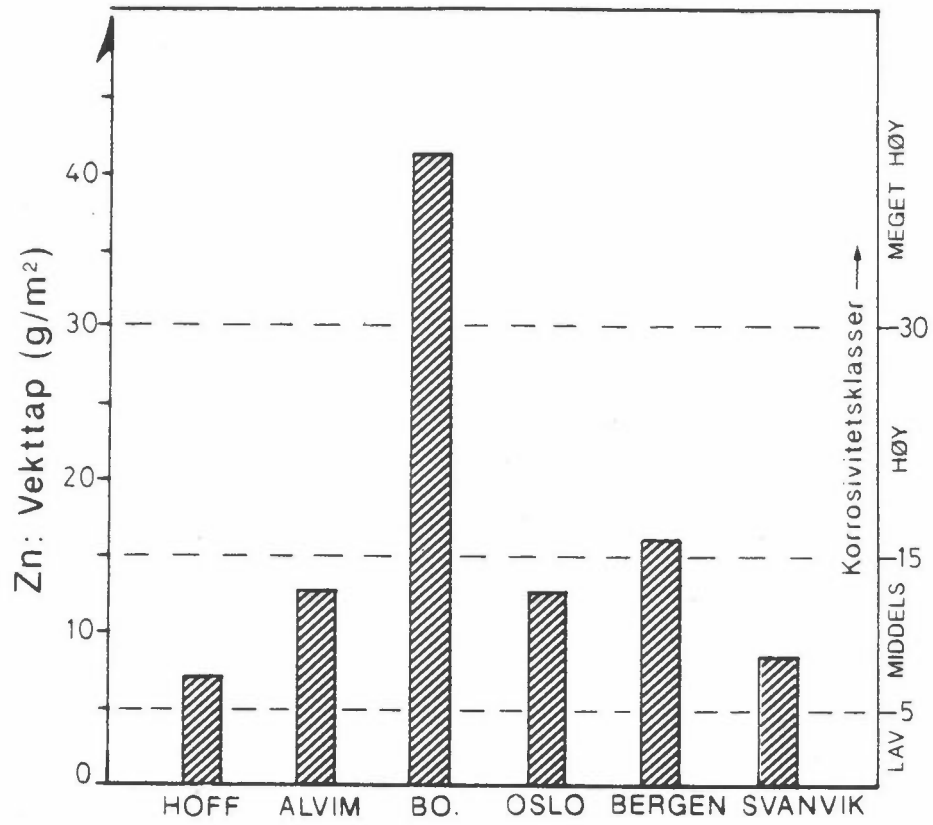
#### 3.2.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp

Tabell 2 gir vekttapsdataene for sink (Zn).

Tabell 2: Zn-korrosjon. Midlere vekttap ( $\text{g/m}^2$ ) for 1 års eksponeringer. 2 og 4 års eksponering er også tatt med.

| Stasjon    | Eksp.p.   | Arsmiddelkorrosjon |                 |                | A/C  |
|------------|-----------|--------------------|-----------------|----------------|------|
|            |           | A<br>Normal pos.   | B<br>Horisontal | C<br>Under tak |      |
| Hoff       | } 1981-83 | 6.8                | 8.3             | 4.0            | 1.7  |
| Alvim      |           | 12.5               | 14.0            | 9.15           | 1.4  |
| Borregaard |           | 41.0               | 44.5            | 20.0           | 2.05 |
| Oslo       | 1982-84   | 12.4               | 14.0            | 12.0           | ~1.0 |
| Bergen     | 1984      | 16.0               | 16.0            | 13.0           | 1.2  |
| Svanvik    | 1984-86   | 8.2                | 10.5            | 5.5            | 1.5  |
|            |           | 2-års korrosjon    |                 |                |      |
| Hoff       | } 1981-83 | 13.0               | 13.0            | 6.3            | 2.1  |
| Alvim      |           | 21.0               | 23.0            | 7.7            | 2.7  |
| Borregaard |           | 79.0               | 87.0            | 33.0           | 2.4  |
| Oslo       | 1982-84   | 23.0               | 23.0            | 14.0           | 1.6  |
| Bergen     | 1984-86   | 20.0               | 21.0            | 3.7            | 5.4  |
| Svanvik    | 1984-86   | 12.0               | 13.0            | 5.9            | 2.0  |
|            |           | 4-års korrosjon    |                 |                |      |
| Hoff       | } 1981-85 | 19.0               | 26.0            | 12.0           | 1.6  |
| Alvim      |           | 40.0               | 44.0            | 18.0           | 2.2  |
| Borregaard |           | 147.0              | 152.0           | 58.0           | 2.5  |
| Oslo       | 1982-86   | 39.0               | 42.0            | 17.0           | 2.3  |

Figur 8 viser korrosjonsnivåene for Zn på årsbasis for overvåkingsstasjonene. Korrosivitetsklasser er også tatt med.



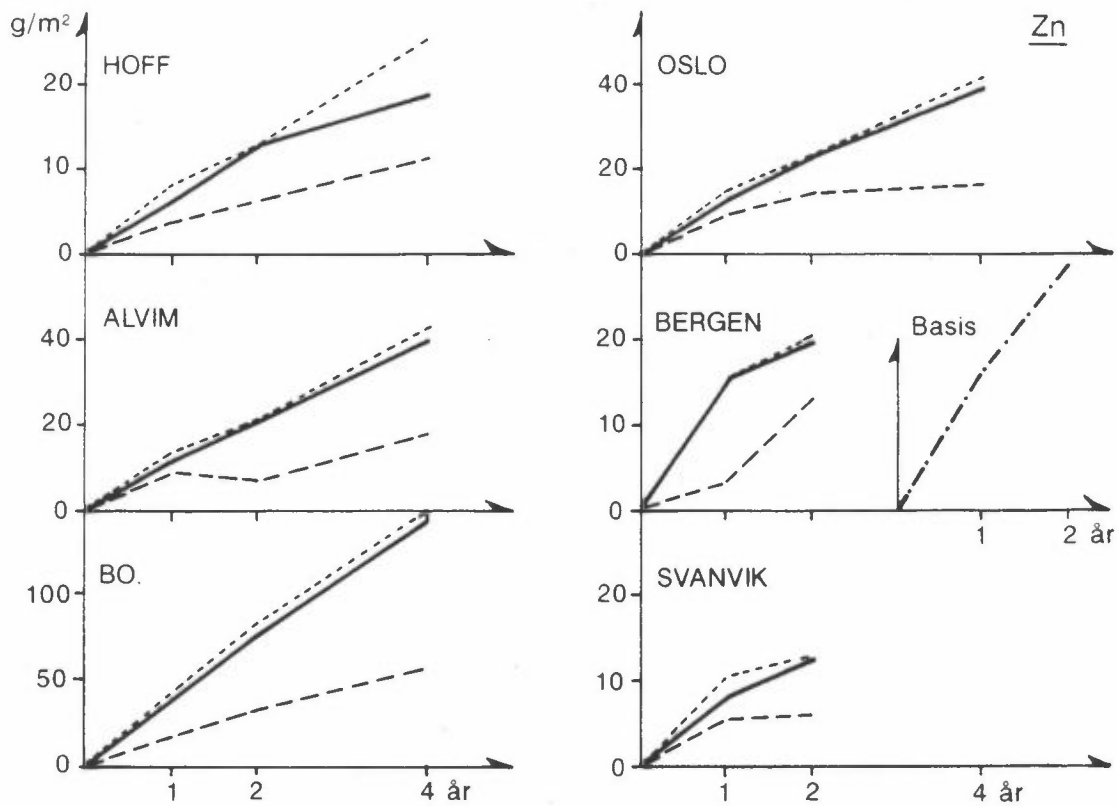
Figur 8: Årsmiddelkorrosjon for Zn.

På målestedene i Oslo og Bergen var korrosjonshastigheten av Zn ca. 1/10 av stål og for de andre stasjonene var forskjellen enda større.

For stasjonene utenom Oslo og Bergen var forholdet mellom korrosjonshastighetene av Fe og Zn nokså varierende med et middel på i overkant av 20. Denne store variasjonen kan tyde på at Zn og Fe ikke bare korroderer med ulik hastighet, men også etter ulike mekanismer.

Korrosjonshastigheten for Zn avtar noe med tiden, men har særlig i startfasen et mer lineært forløp enn for stål.

Grafisk kan en se dette fremstilt på figur 9. I litteraturen kan en finne sinkkorrosjon rapportert som en lineær funksjon av tiden (Gullman et al., 1985). Selv om dette ikke er helt i samsvar med figur 9, så er avbøyningen liten.



Figur 9: Korrosjonsforløp i opp til 4 år for Zn for overvåkingsstasjonene. For Bergen er også tatt med resultatet fra basisundersøkelsen.

Årskorrosjonen har økt i Sarpsborg for Zn fra 1970-årene til begynnelsen av 1980-årene (17% for Alvim og over 37% for Borregaard).

Det er vanskelig å finne en rimelig forklaring på en så stor økning, da SO<sub>2</sub>-nivået heller har falt noe enn steget. Nedbørvarigheten har imidlertid vært større i begynnelsen av 1980-årene, og muligens har dette hatt betydning.

### 3.2.2 Eksponeringsposisjonenes betydning

Zn vil som for stål vise høyest korrosjonshastighet i horisontal posisjon og minst under tak, men forskjellen er her adskillig mindre.

Den horisontale posisjonen ga meget variable resultater, hvilket i noen grad må tilskrives vanskeligheten med å holde det "bløte" Zn-metallet i horisontal posisjon. Men svakt forhøyede korrosjonstall kunne en konstatere. Det synes imidlertid som om det meste av denne økningen oppsto det første året av eksponeringsfasen.

Korrosjonshastigheten under tak stabiliserte seg til litt under halvparten av hastigheten i standard posisjonen etter to år. Det første året av eksponeringstiden var forskjellen mellom disse posisjoner mindre. For Bergen har en foreløpig ikke 4-års verdier. Dersom en legger 2-års verdien til grunn, er korrosjonshastighetsforholdet mellom standard posisjon og posisjon under tak i Bergen omtrent som for stål, og altså adskillig høyere enn for de andre stasjonene (se tabell 2).

### 3.2.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable

---

Forsøk i laboratoriet (klimaskap) har vist at Zn-korrosjonen øker med økende luftfuktighet, men ikke så sterkt som for stål. En finner relativt stor korrosjon ved høye SO<sub>2</sub>-konsentrasjoner, selv ved lavere fuktigheter (RH 75%). Under lab.forsøkene det her refereres til ble det brukt SO<sub>2</sub>-konsentrasjoner på ca 1200 µg/m<sup>3</sup> (Henriksen og Rode, 1988, under utarbeidelse).

Videre har feltforsøk (Ellis, 1949) tydelig gjort det klart at miljøfaktorene i startfasen for sink er meget viktige for det videre korrosjonsforløp ("memory effect"). En forsøker å dempe denne effekten ved bruk av foreksponte plater (NILU har forekspontert i klimaskap).

Andre undersøkelser i marint miljø (Refnes og Anda, 1987) viser at kloridbelastningen neppe spiller noen vesentlig rolle for Zn-korrosjon. Som tidligere antydnet vet vi ikke om dette gjelder like mye i surere miljøer.

Korrosjonshastigheten øker for Zn meget sterkt når SO<sub>2</sub>-nivået blir så høyt som på Borregaard (80 µg/m<sup>3</sup>).

En økning av SO<sub>2</sub>-konsentrasjonen fra ~20 µg/m<sup>3</sup> (Alvim) til 80 µg/m<sup>3</sup> (Borregaard), øker korrosjonshastigheten ca. 3.5 ganger. En må imidlertid være klar over at dette likevel ikke utgjør mer enn 1/15 av korrosjonshastigheten for stål.

En ser videre at Svanvik har klart lavere korrosjon enn Oslo og Alvim, selv om SO<sub>2</sub> midlet over året er det samme. Dette har nok sin forklaring i at SO<sub>2</sub> nivået tross alt er lavt og dermed får klimaparametrene TOW og temperatur større betydning. Både TOW-verdiene og middeltemperaturen er meget lavere i Svanvik enn i Oslo.

Korrosjonsovervåkingsstasjonen CMI i Bergen gir et representativt bilde av Zn-korrosjonen i byen ifølge basisundersøkelsen

Dette var ikke tilfellet for stål, hvilket antyder en mekanismeforskjell mellom disse metallene. Fra basisundersøkelsen i Bergen finner en at stasjonen Fredriksberg hadde ~14% høyere korrosjon enn CMI (Haagenrud et al., 1986). Noe av forklaringen på dette kan være den noe mer kloridholdige nedbøren på Fredriksberg kombinert med den relativt lave midlere pH i nedbøren (pH 4.3).

### 3.3 KOBBER

#### 3.3.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp

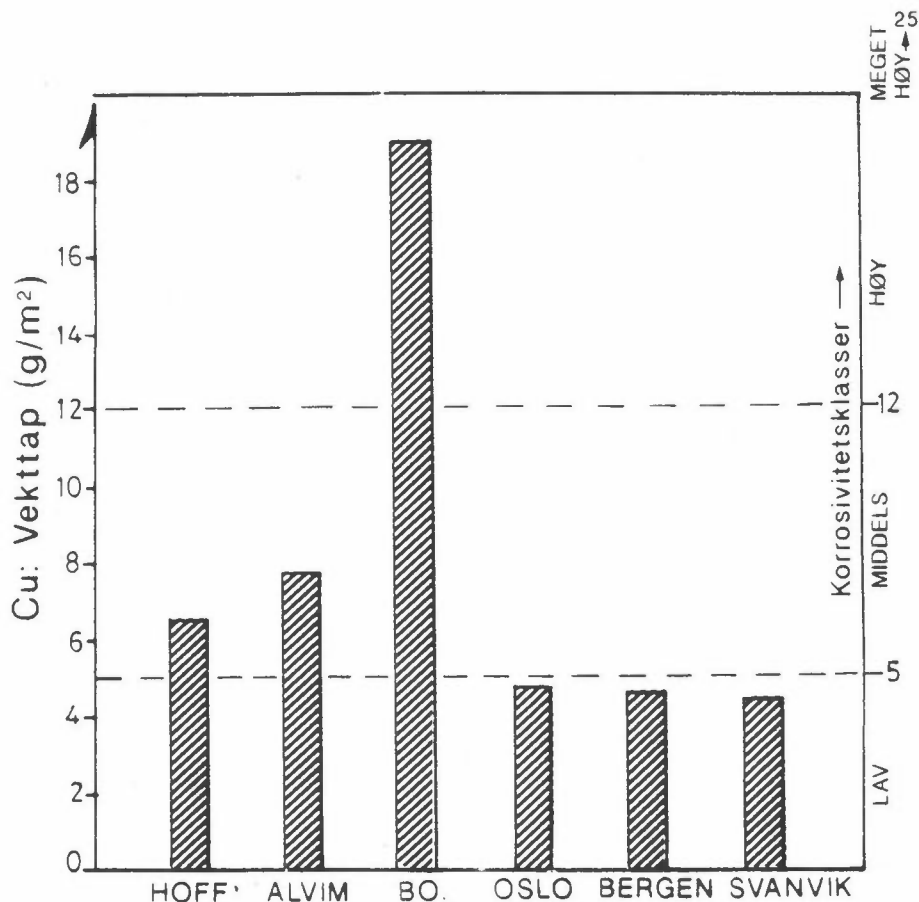
Tabell 3 gir vekttapsdataene for kobber (Cu).

Tabell 3: Cu-korrosjon. Midlere vekttap( $\text{g/m}^2$ ) for 1 års eksponeringer. 2 og 4 års eksponeringer er også tatt med.

| Stasjon    | Eksp.p. | Årsmiddelkorrosjon |                 |                | A/C  |
|------------|---------|--------------------|-----------------|----------------|------|
|            |         | A<br>Normal pos.   | B<br>Horisontal | C<br>Under tak |      |
| Hoff       | 1981-83 | 6.6                | 7.0             | 2.7            | 2.4  |
| Alvim      |         | 7.7                | 5.5             | 5.4            | 1.4  |
| Borregaard |         | 18.5               | 20.0            | 9.5            | 1.9  |
| Oslo       | 1984    | 4.8                | 5.7             | 2.6            | 1.8  |
| Bergen     | 1984    | 4.6                | 5.3             | 0.2            | 23.0 |
| Svanvik    | 1984-86 | 4.4                | 5.2             | 1.9            | 1.2  |
|            |         | 2-års korrosjon    |                 |                |      |
| Hoff       | 1981-83 | 11.0               | 11.0            | 6.7            | 1.6  |
| Alvim      |         | 14.0               | 13.0            | 7.8            | 1.8  |
| Borregaard |         | 40.0               | 41.0            | 18.0           | 2.2  |
| Oslo       | 1982-84 | 8.8                | 11.0            | 4.1            | 2.1  |
| Bergen     | 1984-86 | 10.0               | 12.0            | 1.4            | 7.1  |
| Svanvik    | 1984-86 | 8.0                | 11.0            | 4.3            | 1.9  |
|            |         | 4-års korrosjon    |                 |                |      |
| Hoff       | 1981-85 | 19.0               | 17.0            | 12.0           | 1.6  |
| Alvim      |         | 24.0               | 23.0            | 13.0           | 1.8  |
| Borregaard |         | 59.0               | 62.0            | 35.0           | 1.7  |
| Oslo       | 1982-86 | 13.0               | 18.0            | 5.0            | 2.6  |

Figur 10 viser korrosjonsnivåene for Cu på årsbasis for overvåkingsstasjonene. Korrosivitetsklasser er tatt med til høyre i figuren.





Figur 10: Årsmiddelkorrosjon for Cu.

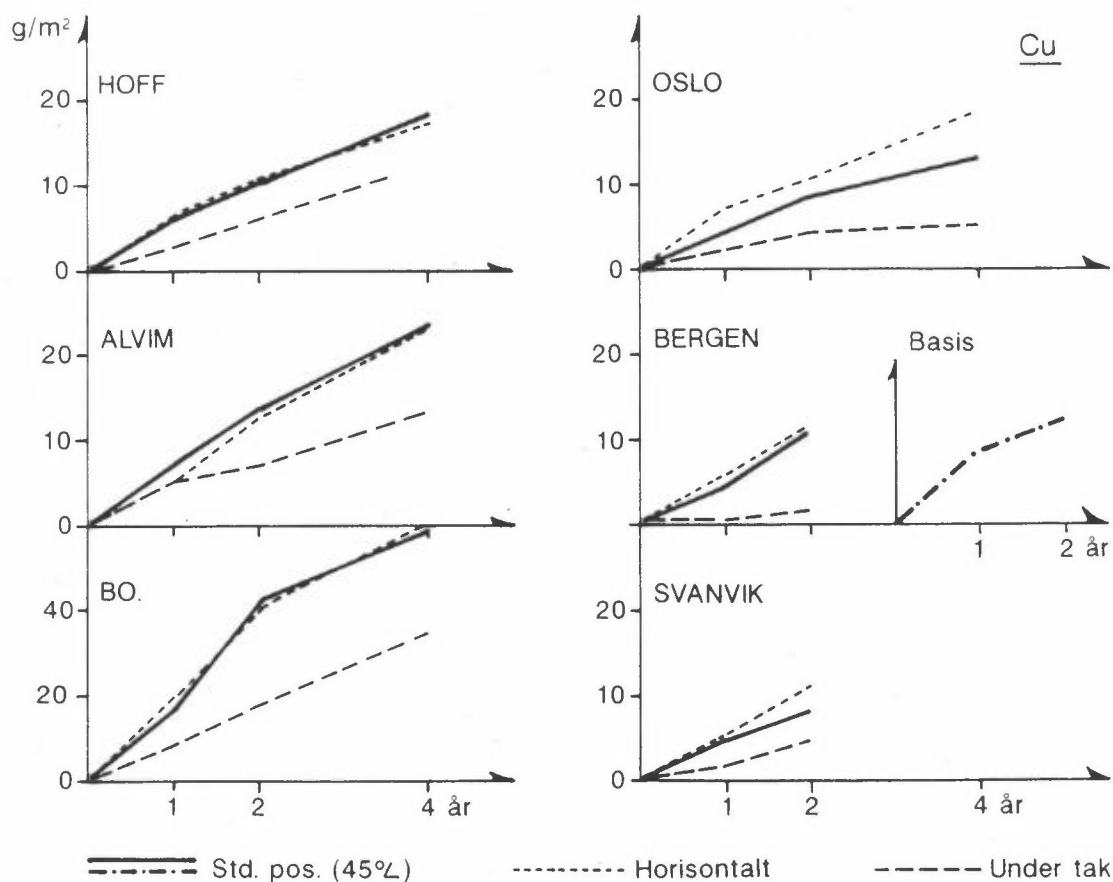
Korrosjonshastigheten på kobber er fra 1/30 til 1/40 av stål.

På Borregaard hvor forurensningsnivået er høyt, var forholdet mellom korrosjonshastighetene av stål og Cu noe høyere enn for mindre forurensede områder. Variasjonene i forholdstallet ble også større ved lav forurensningsgrad.

Korrosjonshastigheten av Cu synes bare i liten grad å avta med tiden.

~~Dette går frem av figur 11, hvor korrosjonsforløpet er fremstilt som funksjon av tiden for alle stasjonene. Alle posisjonene er tatt med.~~

Når det gjelder tendenser over tid er det ingen tydelige tegn på at korrosjonsforholdene for Cu er endret. En har imidlertid få data å holde seg til foreløpig.



Figur 11: Korrosjonsforløp for Cu i opp til 4 år for overvåkingsstasjonene. For Bergen er også tatt med resultat fra basisundersøkelsen.

### 3.3.2 Eksponeringsposisjonenes betydning

Under tak ble korrosjonshastigheten for Cu stort sett noe mer enn halvert, og i Bergen avtok korrosjonen under tak uventet mye.

I tabell 3 ser en at forholdstallet mellom korrosjonshastigheten for standard posisjonen og under tak varierer svært mye i Bergen. Vi har ennå for lite data til å si noe sikkert om forholdstallets størrelse, men sannsynligvis ligger det nær 7.

Den horisontale posisjonen gir forskjellige resultater på de ulike stasjonene.

Som tidligere nevnt er vekttapstallene fra horisontal posisjon mer usikre enn for de andre posisjonene. Med dette forbehold kan en registrere følgende for Cu:

1. Ingen forskjell mellom Hoff og Alvim.
2. Borregaard har en økning i korrosjon i horisontal posisjon på fra 1 til 3% i forhold til standard posisjon.
3. Oslo har et klart stigende vekttap etter som eksponeringstiden øker, fra ca. 18% ved 1 år til ca. 38% ved 4 års eksponering.
4. Bergen og Svanvik har omtrent samme økning som Borregaard.

### 3.3.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable

Korrosjonshastigheten for Cu økte meget sterkt når SO<sub>2</sub>-nivået ble så høyt som på Borregaard (80 µg/m<sup>3</sup>).

Av figur 10 ser en også at Oslo og Alvim avviker mye fra hverandre selv om SO<sub>2</sub>-nivået på årsbasis er det samme. Vi kan foreløpig ikke gi noen helt tilfredsstillende forklaring på hvorfor Oslo ligger så lavt i Cu-korrosjon når NO<sub>2</sub>-nivået er relativt høyt. Fra laboratorieforsøk vet vi at NO<sub>2</sub> gir et korrosjonsbidrag (Henriksen og Rode, 1988, under utarbeidelse). Det er mulig at smuss gir en beskyttende effekt på Cu i Oslo og således er med og demper korrosjonen.

---

Det forholdsvis høye korrosjonsnivået på Hoff og kanskje også på Alvim som har slakteri i umiddelbar nærhet, kan skyldes ammoniakk fra henholdsvis gårdsdrift og dyreslakt. Ammoniakk har betydning for Cu-korrosjon, men måles ikke i overvåkingsprogrammet.

Ut fra målinger i kystnære strøk er det grunn til å tro at klorid i større mengder vil øke korrosjonen (Anda, 1983). Det er imidlertid

uklart hvorvidt det er miljøets alkalitet eller kloridinnholdet som her er det viktigste.

### 3.4 ALUMINIUM

Vekttapsmålinger med Al er forbundet med større usikkerhet enn målinger med de forannevnte metaller. Det er flere grunner til det. Korrosjonshastigheten er lav. Små veiefeil kan derfor få stor betydning. Videre angripes Al i punkter ("pitting"-korrosjon) som gjør at en kan få ujevn korrosjon og lite samsvar mellom parallellprøvene. Og endelig er korrosjonsproduktene relativt vanskelige å fjerne tilfredsstillende i beisevæskene. En har således i noen tilfeller fått vektøkning i stedet for vekttap ved veiing etter beising.

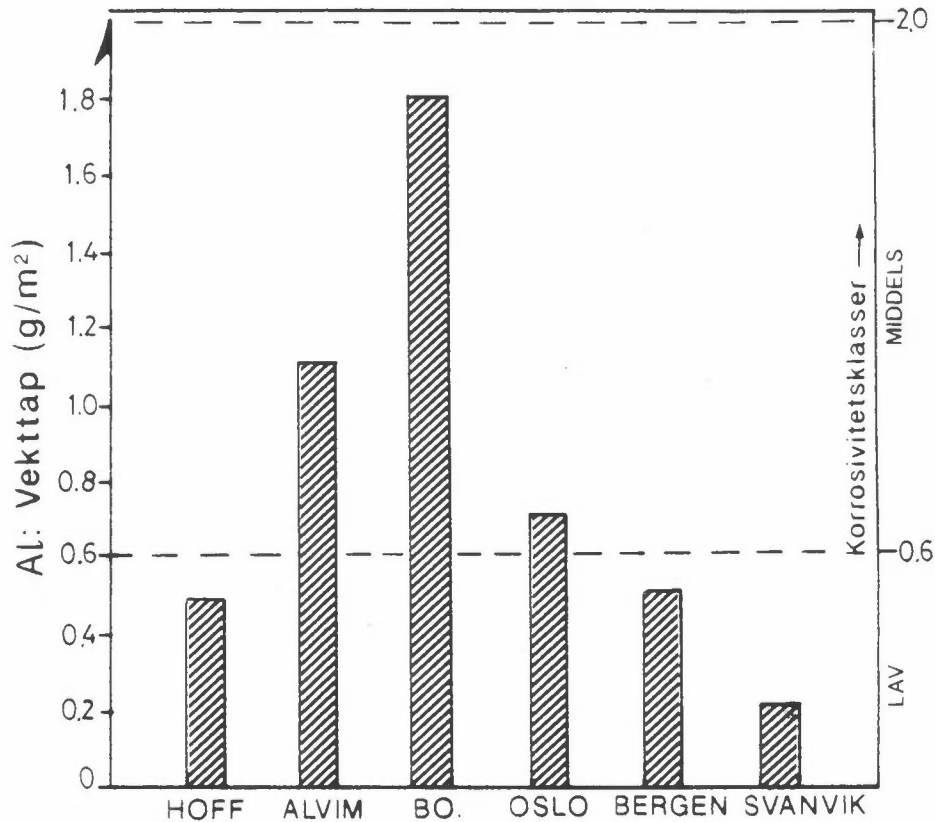
#### 3.4.1 Vekttap, størrelse og tidsforløp

Tabell 4 gir vekttapsdataene for aluminium (=Al).

Tabell 4: Al-korrosjon. Midlere vekttap( $\text{g/m}^2$ ) for 1 års eksponering. 2 og 4 års eksponeringer er også tatt med.

| Stasjon    | Eksp.p.   | Årsmiddelkorrosjon |                 |                | A/C |
|------------|-----------|--------------------|-----------------|----------------|-----|
|            |           | A<br>Normal pos.   | B<br>Horisontal | C<br>Under tak |     |
| Hoff       | ] 1981-83 | 0.5                | 0.45            | 0.5            | 1.0 |
| Alvim      |           | 1.1                | 1.2             | 0.9            | 1.2 |
| Borregaard |           | 1.8                | 3.0             | 3.4            | 0.5 |
| Oslo       | 1982-84   | 0.7                | 0.8             | 0.5            | 1.4 |
| Bergen     | 1984-85   | 0.5                | 0.4             | 0.3            | 1.7 |
| Svanvik    | 1984-86   | 0.2                | 0.2             | 0.1            | 2.0 |
|            |           | 2-års korrosjon    |                 |                |     |
| Hoff       | ] 1981-83 | 0.4                | 0.5             | 0.9            | 0.4 |
| Alvim      |           | 1.0                | 1.0             | 1.9            | 0.5 |
| Borregaard |           | 2.5                | 2.5             | 7.3            | 0.3 |
| Oslo       | 1982-84   | 1.0                | 1.6             | 1.0            | 1.0 |
| Bergen     | 1984-86   | 1.0                | 1.3             | 0.5            | 2.0 |
| Svanvik    | 1984-86   | 0.4                | 0.4             | 0.3            | 1.3 |
|            |           | 4-års korrosjon    |                 |                |     |
| Hoff       | ] 1981-85 | 0.7                | 1.0             | 2.0            | 0.4 |
| Alvim      |           | 2.2                | 2.0             | 5.1            | 0.4 |
| Borregaard |           | 5.3                | 7.9             | 22.0           | 0.2 |
| Oslo       | 1982-86   | 1.6                | 3.4             | 2.3            | 0.7 |

Figur 11 viser vekttapene for Al på årsbasis for overvåkingsstasjonene. Korrosivitetsklasser er tatt med til høyre i figuren.



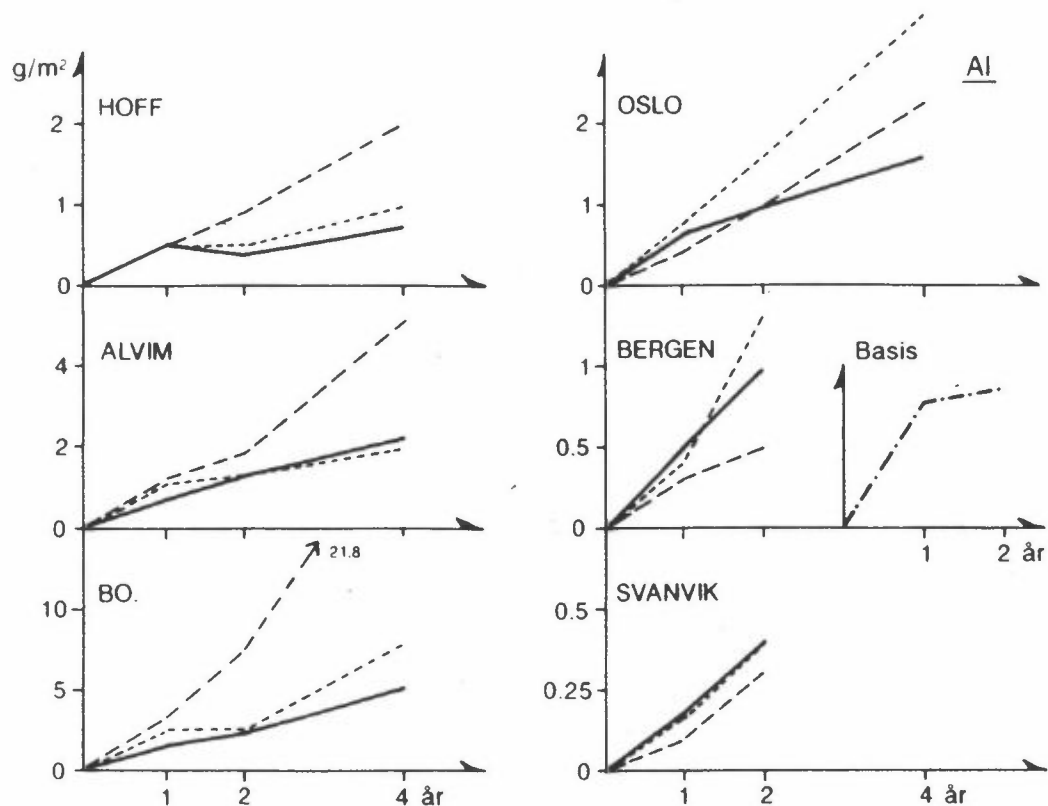
Figur 11: Årsmiddelkorrosjon for Al.

Korrosjonshastigheten for Al i g/m<sup>2</sup> er meget liten sammenlignet med de forannevnte metaller, således er f.eks. korrosjonshastigheten for stål mellom 300 og 700 ganger høyere.

Som tidligere nevnt er det imidlertid tendenser til groptøring som det er viktig å vurdere i sammenheng med Al-korrosjon. Likevel vil naturligvis vekttapmålingene si noe om korrosiviteten på målestedene.

Korrosjonshastigheten for Al synes å være tilnærmet konstant med tiden.

Figur 12 viser korrosjonsforløpet som funksjon av tiden for alle overvåkingsstasjoner. Alle tre posisjonene er tatt med. De tilsynelatende uregelmessigheter en har i kurvene skyldes for det meste de problemer en har med beising av Al, ujevn korrosjon og små vekttap.



Figur 12: Korrosjonsforløp i opp til 4 år for Al for overvåkingsstasjonene. For Bergen er også tatt med resultatet fra basisundersøkelsen.

Korrosjonsnivået for Al i Sarpsborg synes å være omtrent det samme i første del av 80-årene som 10 år tilbake i tiden da en hadde tilsvarende vekttapsmålinger.

### 3.4.2 Eksponeringsposisjonenes betydning

Korrosjonen for Al er annerledes under tak i forhold til uten tak, enn for de andre metallene. Kurvene for korrosjon under tak på Østfold-stasjonene har en nærmest progressiv stigning med tiden.

Dette går frem av figur 12. En ser også at for de andre stasjonene er ikke forandringene så dramatiske. Mens Østfold-stasjonene har korrosjon under tak som er høyere enn både standard posisjonen og horisontal posisjon allerede etter mindre enn ett år, har Oslo det samme etter 2 år.

I Bergen og Svanvik har en foreløpig ikke fått dette forløp. Der er korrosjonen fortsatt lavest under tak etter de to år en til nå har målinger for.

Vekttapstallene for horisontal posisjon er meget usikre, og vanskeligheten med å veie små vekttap kan være noe av årsaken til det. Det er derfor ikke mulig å trekke annen konklusjon enn at posisjonen i horisontal posisjon stort sett gir høyere vekttap enn standard posisjonen. For Østfold-stasjonene synes tallet å være noe over 40% med basis i 4 års data.

### 3.4.3 Sammenheng mellom korrosjon og miljøvariable

Av de undersøkte metaller er det Al som SO<sub>2</sub>-konsentrasjonen har minst effekt på.

Figur 11 viser at SO<sub>2</sub>-nivået påvirker korrosjonshastigheten for Al, men effekten er mindre enn for de øvrige metallene som inngår i undersøkelsen.

Alvim, Oslo og Svanvik som alle har SO<sub>2</sub>-konsentrasjoner rundt 20 µg/m<sup>3</sup> (månedsbasis), har nokså ulik korrosjon med størst på Alvim og klart minst i Svanvik. Svanviks lave korrosjon må tilskrives den lave TOW-verdi.

Laboratorieforsøk har vist at NO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub>-holdig atmosfære reduserer korrosjonseffekten på Al. I byer som Oslo og Bergen kan dette ha betydning for Al-korrosjonen.

Det er tidligere nevnt aluminiums tendens til å gi relativt store vekttap under tak i forhold til uten tak. Det er overveiende sannsynlig at dette skyldes egenskaper ved aluminiumens oksidasjonsprodukter, eksempelvis god oppfangningsevne for sure svovelforbindelser. Når en da ikke har avvasking, vil det bare bli et tidsspørsmål når Al-korrosjonen øker, avhengig av forurensningsnivået.

Den forholdsvis høye korrosjon under tak på Hoff har vi til nå ingen helt tilfredsstillende forklaring på, da forurensningsnivået her er antatt å være meget lavt. En mulig forklaring kan være sjøsaltakkumulering. Hoff ligger bare 1.5-2 km fra sjøen, riktignok skjermet av skog, men her er det snakk om akkumulering over tid. Det er neppe klorid alene som er virksom her, da mengden er for liten til det. En forklaring kan være at stoffer som gjødsel og gass fra gårdsdrift kan influere på alkaliteten på overflater som ikke blir avvasket av nedbør. Høy pH kan således øke korrosjonen på Al, som er mest holdbar i nøytrale omgivelser.

#### 4 BEREGNINGSMODELLER FOR KORROSJONSHASTIGHET

Et hovedmål for arbeidet med atmosfærisk korrosjon er å kunne beskrive korrosjonshastigheten som en funksjon av miljøvariable, dvs. en dose/respons-funksjon. Fra generelle kunnskaper om korrosjon er det mulig å angi hvilke miljøvariable (meteorologiske variable og luftforurensninger) som sannsynligvis vil påvirke korrosjonshastigheten. Dette er imidlertid vesentlig kvalitative kunnskaper, og de gir derfor ikke tilstrekkelig grunnlag til at en kan formulere kvantitative sammenhenger. For å kunne bestemme dose/respons-funksjoner trenger en derfor empiriske data fra forsøk under kontrollerte forhold i klimaskap eller fra eksponering i atmosfæren. Hovedtyngden av NILUs arbeid med korrosjonsmodeller er basert på eksponering i atmosfæren med samtidig registrering av relevante miljøvariable. Resultater er utnyttet fra overvåkingsprogrammet, fra basisundersøkelser og fra andre prosjekter.



Korrosjonshastigheten bestemt ved vekttap gir en middelvei over en forholdsvis lang periode (fra én måned til flere år). Samtlige miljøvariable vil variere betydelig over perioden, og dette vil lett føre til vanskeligheter når en skal bestemme empiriske sammenhenger.

Korrosjonsprosessene vil hovedsakelig pågå når det er en fuktighetsfilm på metalloverflaten. Prinsipielt er det derfor bare i perioder med fuktfilm at luftforurensninger kan påvirke korrosjonshastigheten. Dessuten vil korrosjonsprosessene gå langsommere når temperaturen faller og stoppe nesten helt opp ved temperaturer under 0°C. Viktige meteorologiske variable vil således være relativ fuktighet og temperatur. Vindstyrken har også betydning, idet denne vil påvirke hvor raskt en metalloverflate vil tørke opp. I dag er det vanlig å anta at korrosjonsprosessene pågår når relativ luftfuktighet er over 80% og lufttemperaturen samtidig er over 0°C ("time of wetness", TOW). Ved korrosjonsundersøkelser bestemmes nå denne parameteren rutinemessig ved kontinuerlig registrering av temperatur og relativ fuktighet. Konsentrasjonene av luftforurensninger bestemmes imidlertid på vanlig måte, dvs. som døgn-, ukes- eller månedsmidler uavhengig av temperatur og fuktighet. Denne "inkonsistens" skyldes dels tekniske problemer med å bestemme "riktig" konsentrasjon av luftforurensninger, men dessuten at en ønsker at modellene også skal kunne anvendes på steder hvor det ikke er utført spesielle korrosjonsundersøkelser, men hvor en har standardmålinger av luftforurensninger. Dette kan imidlertid føre til at modellene blir mindre nøyaktige.

I NILUs arbeid med korrosjonsmodeller har en brukt regresjonsanalyser til å identifisere samvariasjoner mellom korrosjonshastighet (vekttap) og miljøvariable. De funksjoner som forklarer mest av variansen er oftest av typen

$$K = a \cdot (\text{forurensningsparameter}) + b \cdot \text{våttid} + c$$

---

hvor  $K$  er vekttap og  $a$ ,  $b$  og  $c$  konstanter. Eksempler på slike lineære funksjoner fra forskjellige undersøkelser er vist i tabell 5. Disse viser at den forurensningsvariabel som vanligvis inngår er luftkonsentrasjonen av  $\text{SO}_2$ , men det finnes også eksempler hvor nedbørens surhet eller tørravsatt klorid er "beste" forklaringsvariabel. Av klimavariablene er det TOW som oftest kommer ut som den beste forklaringsvariabel.

Tabell 5: Empiriske sammenhenger mellom korrosjonshastighet (K) og miljøvariable.

$SO_2$  = konsentrasjon av  $SO_2$  i luft ( $\mu g/m^3$ ).  
 TOW = time of wetness = antall timer med temperatur  $>0^\circ C$  relativ fuktighet  $>80\%$ .  
 $H^+$  = sterk syre i nedbør ( $\mu ekv/l$ ).  
 Cl(C) = kloridkonsentrasjon i nedbør ( $mg/l$ ).  
 Cl(B) = kloridavsetning med nedbør ( $mg/m^2 \cdot d$ ).  
 DNED = antall dager med nedbør.  
 mm = nedbørmengde (mm).  
 m og kv står for henholdsvis måned og kvartal.  
 R = korrelasjonskoeffisient

Birkenes, Alvim og Borregaard (BIALBO):

$$K_{Fe}^m = 1.54 SO_2 + 2.34 DNED + 0.05 H^+ - 15.2 \quad R = 0.87$$

Sarpsborg (basisundersøkelsen):

$$K_{Fe}^m = 0.96 SO_2 + 0.13 TOW - 12.7 \quad R = 0.85$$

$$K_{Fe}^{kv} = 2.43 SO_2 + 0.11 TOW - 21.7 \quad R = 0.90$$

$$K_{Fe}^{\text{år}} = 7.6 SO_2 + 172.0 \quad R = 0.93$$

$$K_{Zn}^{\text{år}} = 0.35 SO_2 + 0.01 TOW - 21.8 \quad R = 0.94$$

$$K_{Cu}^{\text{år}} = 0.14 SO_2 + 0.007 TOW - 16.9 \quad R = 0.91$$

$$K_{Al}^{\text{år}} = 0.01 SO_2 + 0.00053 TOW - 1.2 \quad R = 0.78$$

Bergen (basisundersøkelsen):

$$K_{Fe}^m = 0.05 mm + 0.05 TOW + 0.12 H^+ + 7.1 \quad R = 0.47$$

$$K_{Fe}^{kv} = 0.06 mm + 0.004 SO_2 \cdot TOW + 28.9 \quad R = 0.62$$

$$K_{Fe}^{\text{år}} = 0.12 TOW + 0.72 SO_2 \cdot Cl(C) - 250.3 \quad R = 0.89$$

$$K_{Fe}^{\text{år}} = 0.12 TOW + 5.4 SO_2 - 310.2 \quad R = 0.88$$

$$K_{Zn}^{\text{år}} = 0.004 mm + 0.16 H^+ + 0.51 \quad R = 0.72$$

$$K_{Cu}^{\text{år}} = 0.006 TOW + 0.07 H^+ - 17.2 \quad R = 0.87$$

$$(K_{Cu}^{\text{år}} = 0.005 TOW - 11.7) \quad R = 0.82$$

$$K_{Al}^{\text{år}} = 0.008 Cl(B) + 0.21 \quad R = 0.88$$

I tabell 6 har en forsøkt å illustrere svakheten ved modellene ved å sammenlikne observerte og beregnede vekttap for stål. Dette er gjort for en rekke steder i Østfold, hvor en har hatt de fleste korrosjonsundersøkelsene. Tabellen viser beregnede verdier (i prosent av observert) for den laveste og den høyeste verdi av observert vekttap over en måned. Tabellen viser at de to modellene ofte gir betydelige forskjeller og spesielt at høye verdier generelt underestimeres og lave verdier overestimeres.

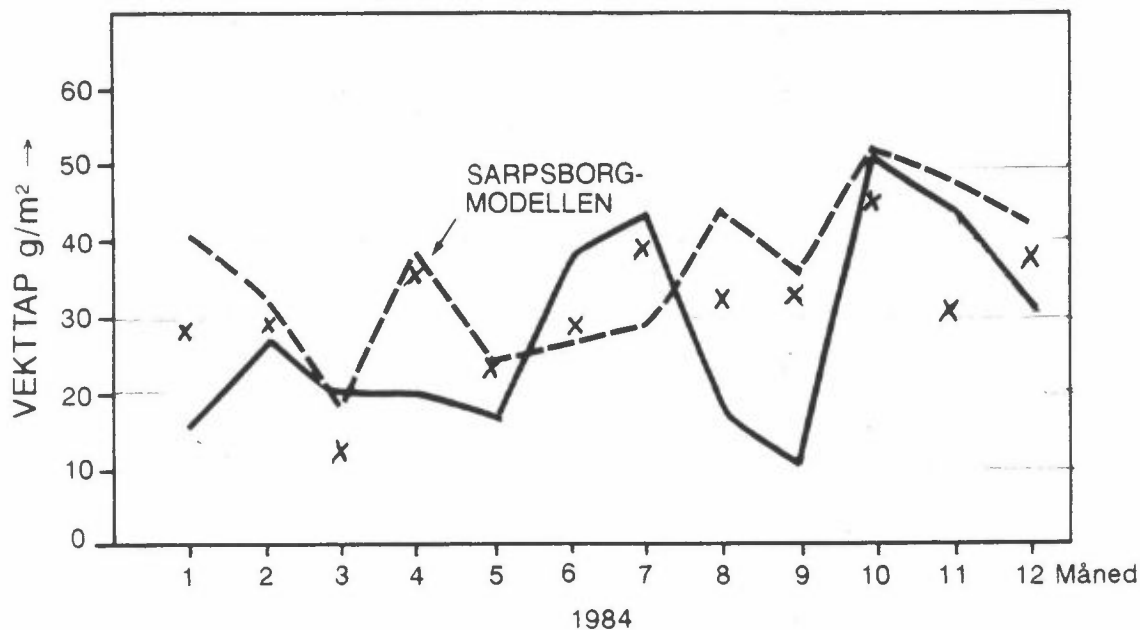
Tabell 6: Beregnede korrosjonstall for stål ut fra miljødata. Den målte korrosjonsverdi er satt lik 100. L er den laveste observerte månedsverdi, H er den høyeste. En har anvendt Sarpsborg og "BIALBO"-modellen, den siste angitt i parentes.

|                 | H2       | L         |
|-----------------|----------|-----------|
| Hafslundsøy     | 61 (77)  | 75 (131)  |
| Greåker         | 58 (69)  | 120 (205) |
| Borge           | 65 (80)  | 78 (128)  |
| City            | 59 (73)  | 171 (207) |
| Sarpsborghallen | 58 (70)  | 193 (312) |
| Fellesbanken    | 85 (116) | 148 (240) |
| Phönix          | 92 (100) | 143 (164) |
| Hoff            | 83 (87)  | 33 (56)   |
| St. Olavs v     | 67 (99)  | 161 (261) |
| Alvim           | 72 (94)  | 128 (206) |
| Adm             | 84 (108) | 155 (250) |
| Brannstasjon    | 90 (109) | 169 (275) |
| Østl.           | 49 (61)  | 109 (178) |
| Nabbetorp       | 77 (92)  | 167 (273) |
| Teglverkssvn.   | 75 (86)  | 171 (207) |
| Middel          | 72 (88)  | 135 (206) |

Sarpsborg-modellen ble også testet ved basisundersøkelsen i Drammen (Hagen et al., 1987). Modellen overestimerte det observerte vekttapet på månedsbasis betydelig, mens overensstemmelsen på årsbasis var bedre. En av årsakene til dårlig overensstemmelse kan være lave vintertemperaturer.

Da TOW-verdier i Bergen og Sarpsborg-området avviker lite, har en prøvd modellen for Sarpsborg på Bergensdata (CMI). En ser av figur 13 at modellen gir omtrent korrekt gjennomsnittsnivå, men har dårligere sammenheng i forløp og enkeltverdier. En vesentlig forskjell mellom

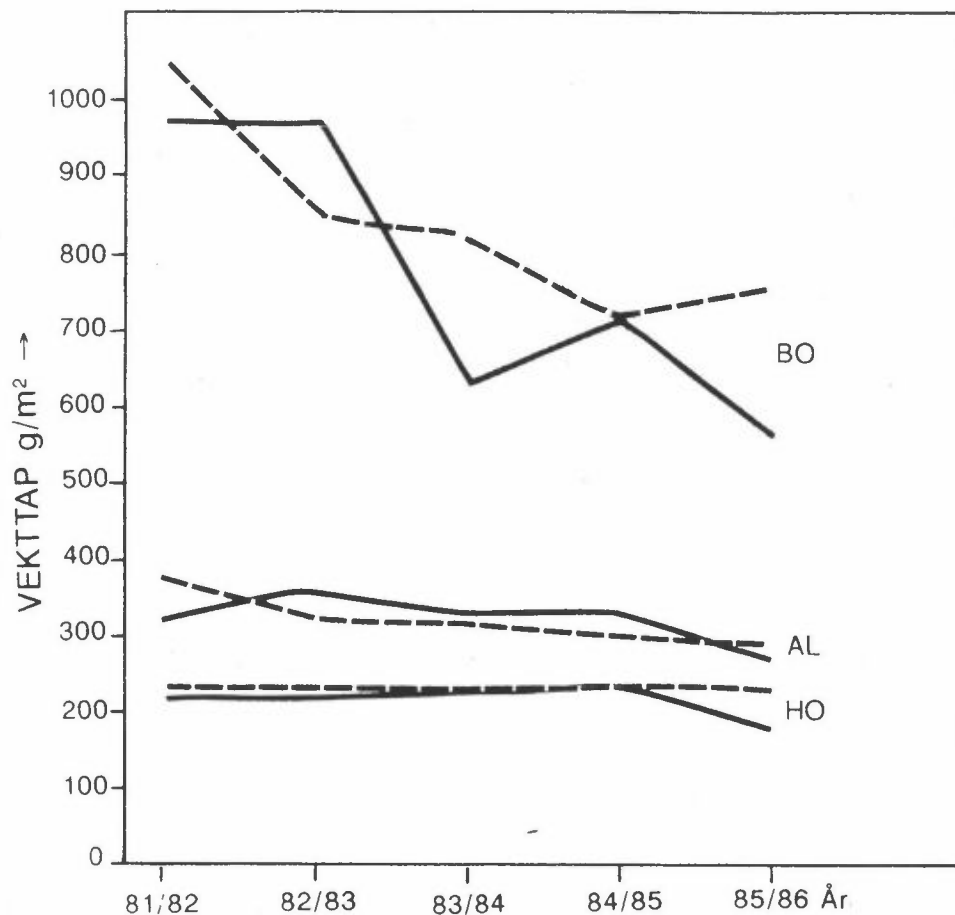
Bergen og Sarpsborg er at Bergen har fra 2 til 3 ganger så mye nedbør og 2 til 3 ganger så høy Cl-konsentrasjon i nedbøren. Det blåser også mye mer i Bergen med sannsynligvis hurtigere opptørkinger.



Figur 13: Målt (—) og beregnet (---) månedskorrosjon av stål (Sarpsborgmodellen) for 1984 i Bergen (CMI). Kryssene betegner verdiene fra Bergensmodellen.

Med tanke på bruk av korrosjonsmodellen f.eks. ved tiltaksanalyser, vil langtidskorrosjonen være mest interessant. I figur 14 har en vist beregnet og målt årskorrosjon for stål ved tre Østfold-stasjoner (modellen ble utviklet på grunnlag av målinger fra 1981 til 1983).

Forskjellen i korrosjon på de tre stedene beskrives godt, men variasjoner fra år til år på Borregaard viser at modellen er for enkel til å forklare alle de målte variasjonene.



Figur 14: Målt (—) og beregnet (----) korrosjon av stål på Borregaard, Alvim og Hoff.

Også for Zn og Cu (tabell 7) ser en at modellberegningene gir hovedtrekkene, men nøyaktigheten bør forbedres.

Tabell 7: Målte og beregnede årsverdier for korrosjon av Zn og Cu.

| Metall | Periode | Hoff     |      | Alvim    |      | Borregaard |      |
|--------|---------|----------|------|----------|------|------------|------|
|        |         | Beregnet | Målt | Beregnet | Målt | Beregnet   | Målt |
| Zn     | 1981/82 | 8.8      | 4.3  | 15.7     | 9.0  | 46.2       | 43.0 |
|        | 1982/83 | 14.4     | 9.3  | 21.5     | 16.0 | 44.9       | 39.0 |
| Cu     | 1981/82 | 4.0      | 4.4  | 6.8      | 6.3  | 19.0       | 22.0 |
|        | 1982/83 | 7.9      | 8.8  | 11.1     | 9.1  | 21.0       | 15.0 |

De eksisterende beregningsmodellene for atmosfærisk korrosjon synes å beskrive en del av hovedtrekkene i målingene. For å kunne dra full nytte av modellene, f.eks. i tiltaksanalyser, bør modellene utvikles videre. Arbeidet bør baseres både på fortsatte undersøkelser i felt, og på laboratorieforsøk hvor korrosjonsmekanismene kan studeres.

## 5 REFERANSER

Anda, O (1983) Korrosjonsmålinger i området ved Leirvåg, Mongstad. Lillestrøm (NILU OR 42/83).

Anda, O (1988) Overvåking - korrosjon 1981-1986. Datarapport. Lillestrøm (NILU TR under arbeid).

Ericsson, P. og Johansson, L-G. (1986) Atmospheric Corrosion, 10:th Scandinavian Corrosion Congress, Stockholm. pp. 43-48.

Gullman, J., Holler, P. and Knotkova, D. (1985) Evaluation of effects of climatic parameters on corrosion of steel and zinc from exposure periods of different lengths. 8th European Congress on Corrosion, 19-21 Nov 1985, Nice. Proceedings. Paris (CEFRACOR & Société Chimie Industrielle), s 36-1 - 36-8.

Haagenrud, S.E., Henriksen, J.F. og Gram, F. (1986) Basisundersøkelse av luftkvaliteten i Bergen 1983-1985. Delrapport B. Korrosjon og miljø. Lillestrøm (NILU OR 56/86).

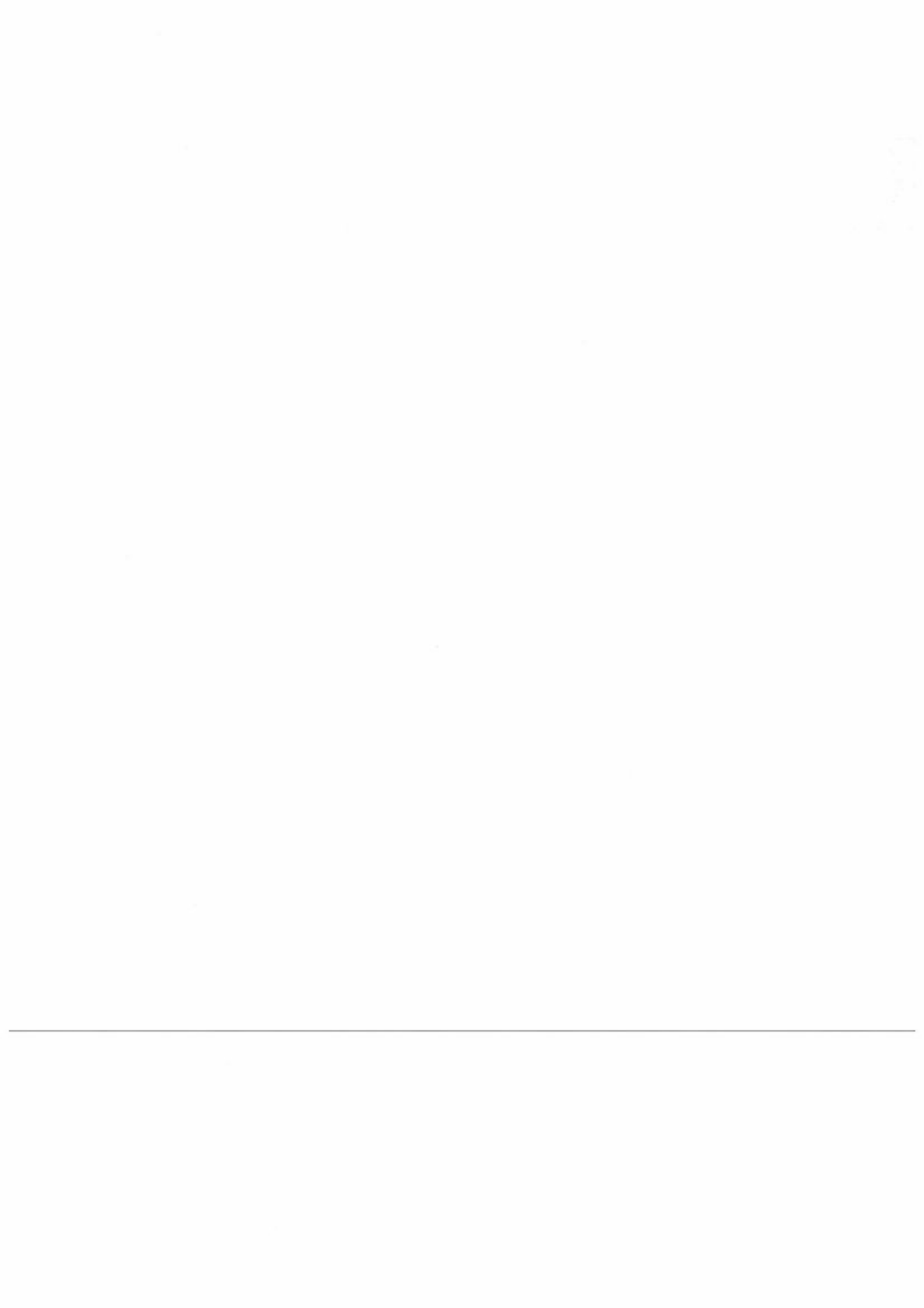
Henriksen, J.F. og Rode, A. (1986) Atmospheric Corrosion, 10:th Scandinavian Corrosion Congress, Stockholm. pp. 39-42.

Henriksen, J.F. og Rode, A. (1989) Metallkorrosjon i atmosfære med  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  og klorid (under utarbeidelse).

Refsnæs, S. og Anda, O. (1987) Korrosjon i marin atmosfære. Samarbeid Elektrisitetsforsyningens Forskningsinstitutt (EFI) og NILU. Trondheim (EFI TR 3408).

---

Sjöström, C. og Henriksen, J.F. (1987) Prosjekt fasadytor - förnyad ytbehandling. Påverkan på fasadytor från yttre miljö. SIB, Gävle.

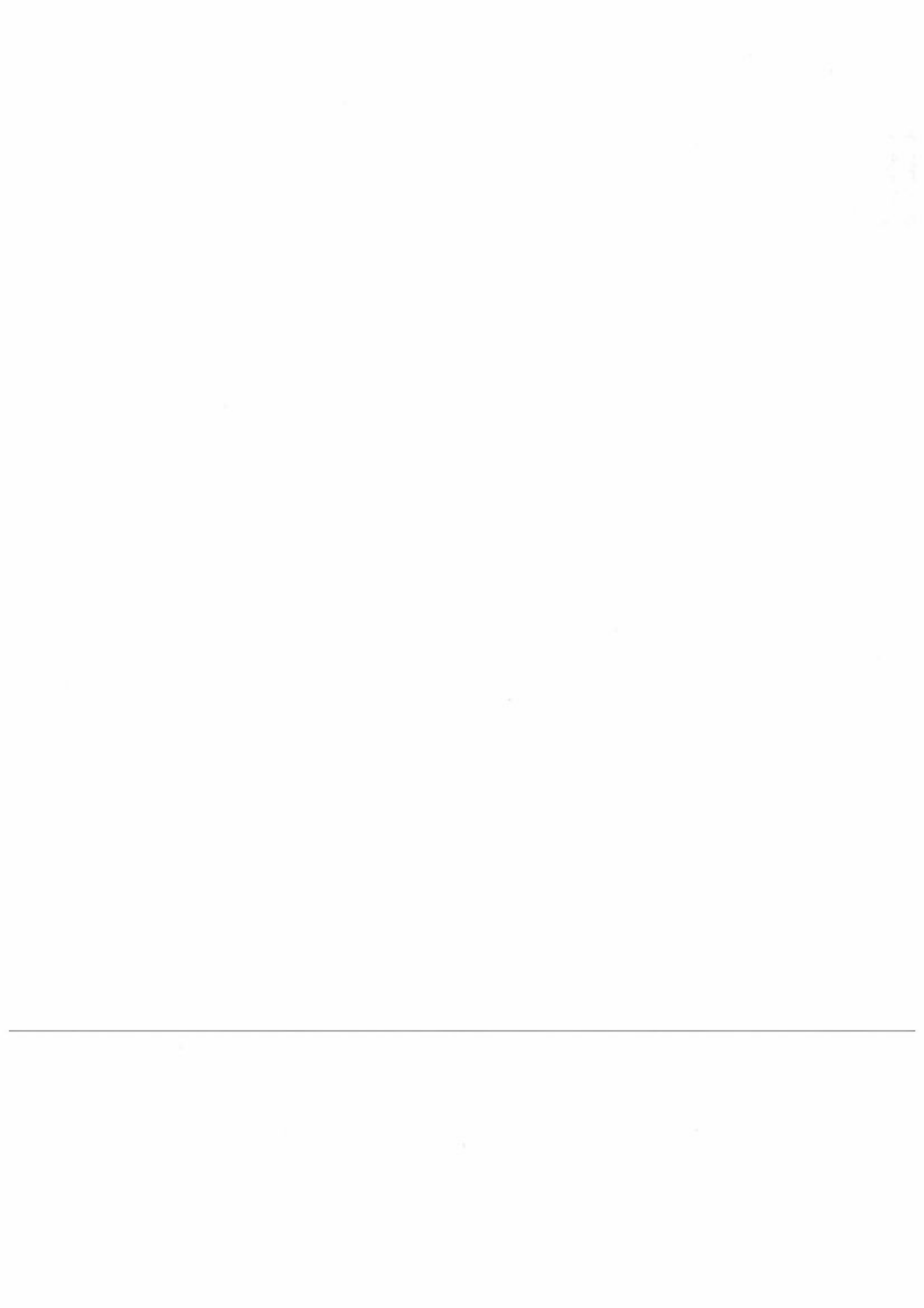


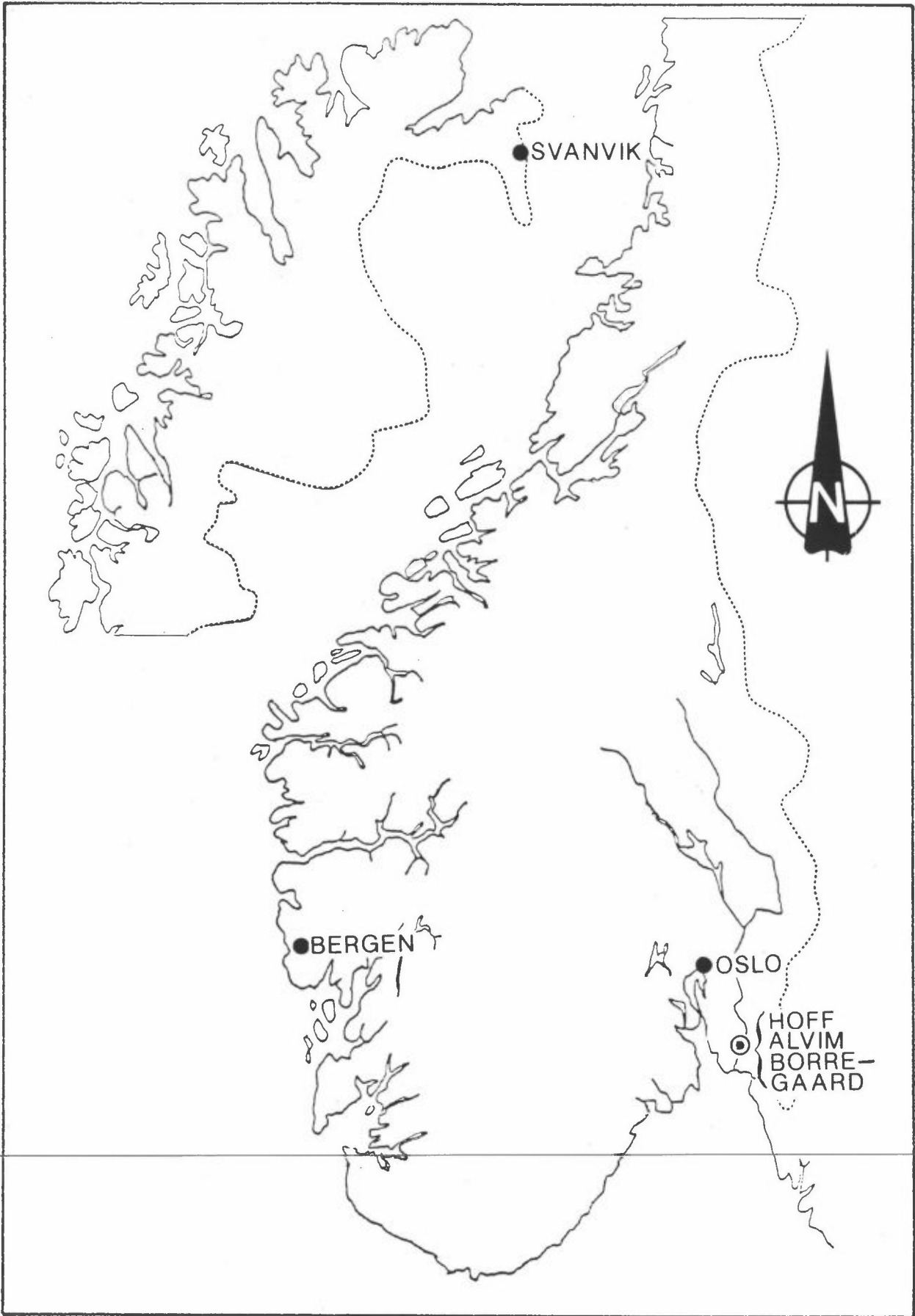
## VEDLEGG A

Stasjonenes geografiske plassering

---





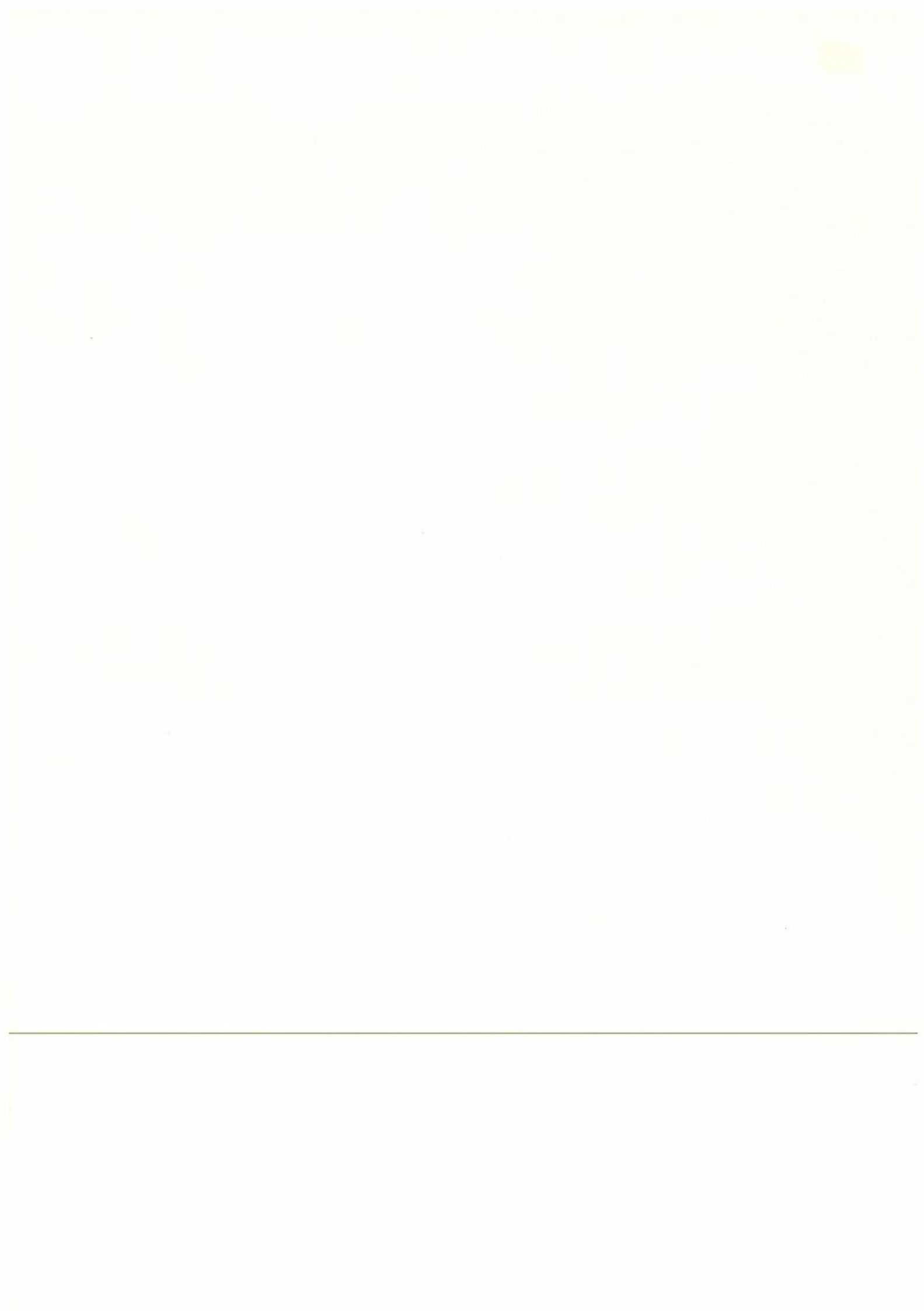




VEDLEGG B

Årsmidler for miljøparametrene

---



## Årsmidler for miljøparametrene

| Stasjon    | Periode       | mm nedbør | µS/cm | pH   | mg/l |      | mg/m <sup>2</sup> -døgn |          | TOW               | SO <sub>2</sub><br>µg/m <sup>3</sup> | NO <sub>2</sub><br>µg/m <sup>3</sup> |
|------------|---------------|-----------|-------|------|------|------|-------------------------|----------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|            |               |           |       |      | S    | Cl-C | Cl-B                    | Cl-B(AP) |                   |                                      |                                      |
| Hoff       | 11.81 - 10.82 | 758       | 36    | 4.35 | 1.3  | 2.2  | 5.1                     | 0.6      | 2884 <sup>1</sup> | } -5                                 |                                      |
|            | 82 - 83       | 785       | 55    | 4.35 | 1.6  | 7.2  | 18.8                    | 2.4      | 3447 <sup>1</sup> |                                      |                                      |
|            | 83 - 84       | 722       | 28    | 4.45 | 1.1  | 3.3  | 7.3                     | 1.3      | 3197 <sup>1</sup> |                                      |                                      |
|            | 84 - 85       | 901       | 40    | 4.35 | 1.5  | 2.7  | 6.9                     | 2.1      | 3662 <sup>1</sup> |                                      |                                      |
|            | 85 - 86       | 710       | 37    | 4.40 | 1.4  | 3.4  | 6.7                     | 1.5      | 3540 <sup>1</sup> |                                      |                                      |
| Alvim      | 11.81 - 10.82 | 645       | 45    | 4.20 | 1.7  | 2.6  | 5.1                     | 1.9      | 2879              | 25                                   |                                      |
|            | 82 - 83       | 783       | 40    | 4.30 | 1.4  | 3.9  | 10.1                    | 6.5      | 3559              | 22                                   |                                      |
|            | 83 - 84       | 837       | 37    | 4.15 | 1.9  | 3.0  | 6.9                     | 5.4      | 2955              | 21                                   |                                      |
|            | 84 - 85       | 875       | 51    | 4.15 | 2.2  | 4.0  | 9.7                     | 3.9      | 3687 <sup>2</sup> | 17 <sup>4</sup>                      |                                      |
|            | 85 - 86       | 740       | 35    | 4.30 | 1.6  | 2.5  | 6.2                     | 5.5      | 3540 <sup>2</sup> | 15 <sup>4</sup>                      |                                      |
| Borregaard | 11.81 - 10.82 | 617       | 81    | 3.85 | 3.5  | 2.7  | 4.6                     | 2.8      | 2879              | 112                                  |                                      |
|            | 82 - 83       | 639       | 77    | 3.95 | 3.5  | 4.8  | 8.6                     | 11.7     | 3559              | 89                                   |                                      |
|            | 83 - 84       | 626       | 78    | 3.85 | 3.7  | 3.5  | 6.2                     | 6.6      | 2955              | 87                                   |                                      |
|            | 84 - 85       | 817       | 70    | 3.75 | 3.2  | 2.6  | 5.9                     | 5.0      | 3687 <sup>2</sup> | 70                                   |                                      |
|            | 85 - 86       | 640       | 76    | 3.85 | 3.6  | 3.1  | 5.5                     | 5.7      | 3540 <sup>2</sup> | 77                                   |                                      |
| Oslo       | 10.82 - 9.83  | 699       | 34    | 4.70 | 2.2  | 2.4  | 4.7                     | 0.8      | 3178              | 25                                   |                                      |
|            | 83 - 84       | 637       | 26    | 4.90 | 1.6  | 1.7  | 3.0                     | 1.1      | 2750              | 17 <sup>6</sup>                      | 61 <sup>5</sup>                      |
|            | 84 - 85       | 997       | 27    | 4.45 | 1.5  | 1.2  | 3.5                     | 0.8      | 2701              | 17 <sup>6</sup>                      | 46 <sup>6</sup>                      |
|            | 85 - 86       | 504       | 30    | 4.60 | 2.0  | 1.7  | 2.6                     | 0.8      | 2241              | 20                                   | 68                                   |
| Bergen     | 4.84 - 3.85   | 1688      | -     | 4.60 | 0.3  | 4.6  | 21.5                    | 0.8      | 3474 <sup>3</sup> | 12                                   |                                      |
|            | 85 - 86       | 2486      | -     | 4.60 | 1.4  | 7.9  | 54.6                    | 1.7      | 3360 <sup>3</sup> | 13                                   |                                      |
| Svarvik    | 8.84 - 7.85   | 162       | 29    | 4.55 | 1.4  | 2.5  | 1.3                     | 0.5      | 1487              | 25                                   |                                      |
|            | 85 - 86       | 402       | 17    | 4.55 | 0.9  | 1.5  | 1.6                     | 0.8      | 2006              | 22                                   |                                      |

<sup>1</sup> Alvindata er brukt t.o.m. nov 82. Siden er brukt MI data fra Rygge frem til og med september 86. F.o.m. okt 86 har NILU egne målinger på Hoff. Rygge har hatt 8 observasjoner pr døgn til og med november 1985, deretter

<sup>2</sup> 4 observasjoner pr døgn.

<sup>3</sup> Fra og med jan 85 er MI's Rygge data anvendt. <sup>3</sup> Her brukes MI-data fra Florida.

<sup>4</sup> Mangler verdier for månedene: 1.5.7 og 8. <sup>5</sup> Måned 10.83 mangler. <sup>6</sup> Mind 12.84 mangler.

