NIVA

RAPPORT LNR 4592-2002

Betydningen av den nord-atlantiske svingning (NAO) for sjøsaltepisoder og forsuring i vassdrag på Vestlandet og i Trøndelag.

Norsk institutt for vannforskning

RAPPORT

Hovedkontor
Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen
Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen
Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen
Nordnesboder 5
5005 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-niva
9296 Tromsø
Telefon (47) 77 75 03 00
Telefax (47) 77 75 03 01

Tittel	Løpenr. (for bestilling)	Dato
Betydningen av den nordatlantiske svingning (NAO) for sjøsaltepisoder og forsuring i vassdrag på Vestlandet og i Trøndelag.	4592-2002	Desember 2002
	Prosjektnr. Undernr. O-21817	Sider Pris 37
Forfatter(e) Atle Hindar, *Kjetil Tørseth (NILU),* Arne Henriksen og *Yvan Orsolini (NILU)*	Fagområde Klima og sur nedbør	Distribusjon
	Geografisk område Norge	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e)	Oppdragsreferanse
Direktoratet for naturforvaltning (Naturens tålegrenser)	Kontraktene 01040658 og 02040042

Sammendrag

Bakgrunnen for dette arbeidet er sjøsaltepisoders betydning for vannkvaliteten (surhet og giftighet for fisk) i Vestlandsvassdrag og den sammenhengen det er mellom sjøsaltdeposisjon og uvær. Værforholdene i Europa og Nord-Amerika og dermed en rekke ulike effekter er koplet til den nordatlantiske svingning (NAO). Det var derfor av interesse å undersøke om det også var en sammenheng mellom dette klimatiske mønsteret og vannkvaliteten i vassdrag. Lange vannkjemiske dataserier for både nedbør og vassdrag er tilgjengelige takket være overvåkingsprogrammet for langtransportert forurenset luft og nedbør og effektene i vann og vassdrag. NAO-indekser er tilgjengelige helt tilbake til 1800-tallet. Det er påvist en klar sammenheng mellom sjøsaltdeposisjon, sjøsaltepisoder i vassdrag på Vestlandet og i Nord-Trøndelag og NAO-indeksen. Betydningen av dette for historiske episoder med fiskedød og forsuringsutviklingen framover er diskutert.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Forsuring	1. Acidification
2. Den nordatlantiske svingning (NAO)	2. North Atlantic Oscillation (NAO)
3. Sjøsaltepisoder	3. Sea salt episodes
4. Vassdrag	4. Watercourses



Atle Hindar
Prosjektleder



Brit Lisa Skjelkvåle
Forskningsleder



Nils Roar Sælthun
Forskningssjef

ISBN 82-577-4251-1

Naturens Tålegrenser

Betydningen av den nordatlantiske svingning (NAO) for sjøsaltepisoder og forsuring i vassdrag på Vestlandet og i Trøndelag

Forord

Norsk institutt for vannforskning (NIVA) og Norsk institutt for luftforskning (NILU) har lenge arbeidet med forsuringsproblematikken og hvordan ulike faktorer påvirker status og utvikling. En endring i klimaet i våre områder kan tenkes å modifisere effekten av de tiltak som gjennomføres for å redusere forsuringsproblemet. Det er derfor viktig å belyse sammenhengen mellom klima, vær og forsuring.

Det foreliggende prosjektet er finansiert med interne forskningsmidler i NIVA og NILU, og det er gitt tilskudd til prosjektet av Direktoratet for naturforvaltning (DN), dels over over programmet ”Naturens Tålegrenser”.

Grimstad, desember 2002

Atle Hindar

Innhold

Sammendrag **5**

1. Bakgrunn **7**

2. Den nordatlantiske svingning (NAO) **8**

3. Materiale og metoder **9**

4. Trender i elvenes vannkjemi **10**
4.1 Vikedalselva 11
4.2 Sæta i Gaularvassdraget 12
4.3 Nausta 12
4.4 Trodøla i Naustavassdraget 13
4.5 Øyensåa 14

5. Endringer i sjøsaltepisodenes betydning for vannkvalitet **14**

6. NAO og våtavsetning **17**

7. Sammenhenger mellom NAO, våtavsetning og sjøsaltepisoder i vassdrag **20**

8. Et historisk tilbakeblikk på fiskedødepisoder i Sør-Norge **26**

9. Diskusjon **28**

10. Referanser **29**

Sammendrag

Flere faktorer påvirker forsuringssituasjonen i norske vassdrag. I tillegg til dokumenterte endringer i utslipp av svovel og nitrogen kan også andre forhold, som hittil har vært uavklart, påvirke utviklingen. Uvær på Vestlandet med nedfall av høye konsentrasjoner av sjøsalter kan redusere vannkvaliteten i elvene og det er dokumentert fiskedød og andre negative biologiske effekter etter slike episoder. Endringer i klimaforhold, slik de er beskrevet i ulike klimascenarier, vil kunne øke frekvens og styrke av uvær på Vestlandet. Dette kan ha betydning for vannkjemiske og biologiske forhold, og det er derfor viktig å forsøke å kople vær- og klimarelaterte parametre til vannkjemiske parametre.

Det nasjonale programmet for overvåking av langtransportert forurenset luft, nedbør og elver gir forholdsvis lange dataserier som er godt egnet for dette formålet. Prosjektet har hatt som mål å undersøke sammenhengen mellom klima, deposisjon av sjøsalter, forsuringsutvikling og effekter på vannkjemi i vassdrag på Vestlandet og i Trøndelag. Vassdragene som er studert er Vikedalselva i Rogaland, Nausta, Trodøla (i Nausta) og Sæta (i Gaularvassdraget) i Sogn og Fjordane og Øyensåa i Nord-Trøndelag.

Vi har koplet variasjonen i den nordatlantiske svingning (NAO) til de omfattende datasettene fra overvåkingen av nedbør og elver. Det er en klar sammenheng mellom NAO-indeksen (NAOI), sjøsaltdeposisjon og sjøsaltepisoder i vassdragene. Høye positive verdier for NAOI gir økt sannsynlighet for sjøsaltdeposisjon og effekter i vassdragene. Det finnes avvik, der hvor mer uvanlige atmosfæriske sirkulasjonsmønstre har gitt høy sjøsalttilførsel uten at NAOI har vært spesielt høy.

Høye positive verdier for NAOI er benyttet som en indikator for et mer ekstremt klima med økt intensitet og styrke av syd-vestlig lufttransport til Norge. NAOI baseres på trykkforskjellen i et område relativt langt fra norskeskysten, og vi har benyttet ulike metoder for å vurdere hvilke indekssett som korrelerer best med data fra luft og elveovervåkingen. Også andre forhold som påvirker signifikansnivået er vurdert.

Analyser av elvedata viser at den positive forsuringsutviklingen, med redusert konsentrasjon av sulfat i vassdragene, har medført en gradvis reduksjon i toksisk aluminium, noe som er svært gunstig for fisk og andre forsuringsfølsomme organismer. Denne utviklingen er godt kjent gjennom det statlige programmet for overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør, og er registrert i alle de fem undersøkte vassdragene.

Mindre forsuringstrykk i vassdragene har videre medført at ellers like kraftige sjøsaltepisoder fører til gradvis lavere konsentrasjoner av toksisk aluminium. Det vil si at sjøsaltepisodene idag må være langt kraftigere enn f.eks. i 1990 for å frambringe like toksisk vann. I hvilken grad endringer i klimaforholdene kan opprettholde et entydig toksisk nivå under sjøsaltepisoder gjenstår å se.

Det er tidligere antydet at fiskedød på Sør-Vestlandet på 1920-tallet, dvs. i en tidlig forsuringsfase, kan være utløst av sjøsaltepisoder i vassdragene. Den koplingen av sjøsaltepisoder og NAO som er funnet her er brukt for å diskutere dette videre. En klar positiv fase av NAOI på 1920-tallet, kombinert med en syredeposisjon på nivå med dagens, sammenfaller i tid med observert fiskedød og styrker dermed denne hypotesen.

Viktige tolkninger av disse resultatene er altså: 1) at det er en klar sammenheng mellom NAO, sjøsaltdeposisjon og potensielle gifteffekter i vassdrag, 2) at sjøsaltepisodenes gifteffekt i vassdrag er redusert som følge av den generelle reduksjonen i svovelnedfall, 3) at sjøsaltepisodene må øke i styrke for å resultere i samme negative effekt på elvevannets kvalitet i framtida og 4) at kombinasjonen av forholdsvis lavt forsuringstrykk og sjøsaltepisoder kan frambringe giftig vann.

Summary

Title: The significance of the North Atlantic Oscillation (NAO) for sea salt episodes and acidification in rivers at the west-coast of Norway.
Year: 2002
Author: Atle Hindar, *Kjetil Tørseth (NILU),* Arne Henriksen og *Yvan Orsolini (NILU)*
Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-4251-1

Acidification of Norwegian waters is a result of emission and subsequent deposition of sulphur and nitrogen compounds. Sea salt deposition during severe weather-conditions, may interact with acid soils in terms of ion-exchange to increase the river water concentrations of H^+ and toxic, inorganic aluminium. Severe acidification and fish death has therefore been observed during such events. Changes in climatic conditions may increase the frequency and strength of storms along the coast thus influencing acidification effects on chemistry and biota. It may therefore be important to link weather and climate parameters to water chemistry variables in order to forsee such changes.

The aim of this project was to relate the North Atlantic Oscillation (NAO) to data for sea salt deposition, sea salt effects in rivers and the acidification trend. NAO represents much of the climatic variability in Europe and North America, and affects a long array of weather-related conditions. The extensive monitoring programme for air, deposition and river water chemistry has resulted in relatively long data sets, which are very useful for this purpose. Data for four rivers at the west-coast of Norway and one in middle Norway together with deposition data from several monitoring sttions were used.

Strong correlations were found between the NAO index (NAOI) and all these data sets, poiting at the influence of North Atlantic climate variability on acidification. High positive NAOI are assosiated with sea salt deposition, increase of chloride and sodium in the rivers and potential toxic effects (H^+ and aluminium). Deviation from this main feature was identified and explained; unusual atmospheric sirculation patterns (winds from north) may also result in storms and sea salt deposition.

75-prosentiles for magnesium deposition correlated better with NAOI than mean values and 99-prosentiles. We also tested relations for different data sets for the rivers with daily, weekly, monthly, and winterly indexvalues. Weekly sampling of the rivers gave the highest correlations with NAO. Monthly NAO indexes gave highest correlations for rivers with monthly sampling.

A part of this work was to identify acidification trends and variables that explain the main variation in pH and aluminium. We also looked for changes in sea salt effects in the rivers during the nearly 20 years of monitoring. Among the results is a clear-cut downward trend in non-marine SO_4, corresponding to reduced emissions of sulphur and nitrogen in Europe, and also a clear-cut reduction in sea salt-related reduction in pH and concentrations of inorganic aluminium during episodic events.

A historical retrospect indicates that the combination of increasing acidification and sea salt deposition may explain observation of fish death in river at the south-western part of Norway in the 1920's. This period was characterised by a positive phase of NAOI.

Important interpretations of the results are: 1) that climatic variation, represented by NAOI, significantly affects water toxicity in rivers, 2) that the potential toxic effects of sea salt deposition in rivers are reduced as the acidification in general is reduced, 3) that sea salt episodes have to increase in strength to give rise to similar water quality effects in the future, and 4) that the combination of relatively low acidification pressure and sea salt deposition has the potential of producing toxic waters.

1. Bakgrunn

Vannkjemiske data fra vassdrag på Vestlandet indikerer at sjøsalter representerer den drivende kraften for mobilisering av uorganisk aluminium fra nedbørfeltet til vann i moderat forsurede vassdrag (Hindar og Kroglund 2000). I mindre vassdrag kan dette være særlig tydelig (Hindar og Skancke 2001). Høy deposisjon av sjøsalter er et regionalt fenomen i kystnære områder, og er relatert til perioder med mye nedbør og kraftig vind, og gjør seg særlig gjeldende i milde perioder med høye vindstyrker fra desember til mai. Saltene virvles opp fra havet, fraktes langt innover fastlandet for så å falle ned med nedbør. Ionebytting i jorda og mobilisering av syre og aluminium kan gi forsuring og fiskedød (Hindar et al. 1993; 1994).

Episoder med store tilførsler av sjøsalter (sjøsaltepisoder) er et naturlig fenomen, men de negative effektene i vassdrag ser ut til å forutsette sur jord (Heath et al. 1992). Hindar et al. (1994) fant at de negative effektene (mobilisering av H^+ og aluminium) var relatert til de menneskeskapte forsuringsgradientene i Norge. Sjøsaltepisodene kan endres både i styrke og frekvens dersom klimaet i norske kystområder endres slik prognosene fra RegClim-prosjektet viser, se f.eks. Sygna og O'Brien (2001).

De lange dataseriene fra sur nedbørovervåkingen gir oss et godt grunnlag for å studere forholdene nærmere. I flere vassdrag på Vestlandet viser overvåkingsdata at år som er preget av sjøsaltepisoder avviker fra andre år om en ser på trender i forsuring (SFT 1999). I Norge gjelder dette særlig pH og syrenøytraliserende kapasitet (ANC) (lave verdier i sjøsaltårene 1989 og 1990) og labilt Al (høye konsentrasjoner i disse to årene). I Storbritannia har en funnet at beregnet konsentrasjon av ikke-marin sulfat (SO_4*) har vært svært lav disse to årene, og det forklares med at sulfat adsorberes i jordsmonnet under sjøsaltepisoder, men ved hjelp av andre mekanismer enn for natrium (Evans et al. 2001).

Den best dokumenterte sjøsaltepisoden i Norge og effektene av den er fra vinteren 1993, da det ble observert regional fiskedød langs hele Vestlandskysten (Hindar et al. 1993; 1994). Det ble også vist at områder med intensiv granskogplanting kan forsterke effektene. Episoden påvirket vannkjemien i minst to år etterpå ved at det tok så lang tid før all adsorbert Na kom ut i vassdraget (Hindar et al. 1995).

Sjøsaltdeposisjon behøver imidlertid ikke å framkalle dårlig vannkvalitet. Hindar et al. (1993; 1994) viste at i forsurede områder ble det mobilisert H^+ og Al-ioner for å kompensere for den mengden Na som ble adsorbert ved ionebytting i jorda. Men i mindre forsurede områder ble det midlertidige "tapet" av Na kompensert ved mobilisering av basekationer, særlig kalsium. Den vannkjemiske effekten bestod da i det vesentlige av fortynning pga mye vann, noe som kan redusere pH og ANC uten at vannet blir giftig.

Siden sjøsaltepisoder inntreffer i perioder med ekstremt vær (storm, orkan), og det ser ut til at klimaet er i ferd med å endres nettopp mot slike forhold på Vestlandet (se også http://www.nilu.no/regclim/), vil det være av stor betydning å vite mer om sammenhengen mellom klima, vær og effektene av sjøsaltdeposisjon.

Mengden sjøsalter tilført via atmosfæren avhenger sterkt av hyppigheten og styrken av episoder med sterke vinder fra vest og sør-vest, som typisk kan forekomme under værsituasjoner assosiert med høye NAOI (North Atlantic Oscillation Index; se Kapittel 2). Basert på foreløpige beregninger utført ved både NIVA og NILU ble en nærmere vurdering av dette forholdet foreslått.

Denne rapporten presenterer et første forsøk på å kople vannkjemiske data for nedbør (våtavsetning) og vassdrag til variasjonen i NAO i Norge. Hovedmålsettingen var å belyse i hvilken grad

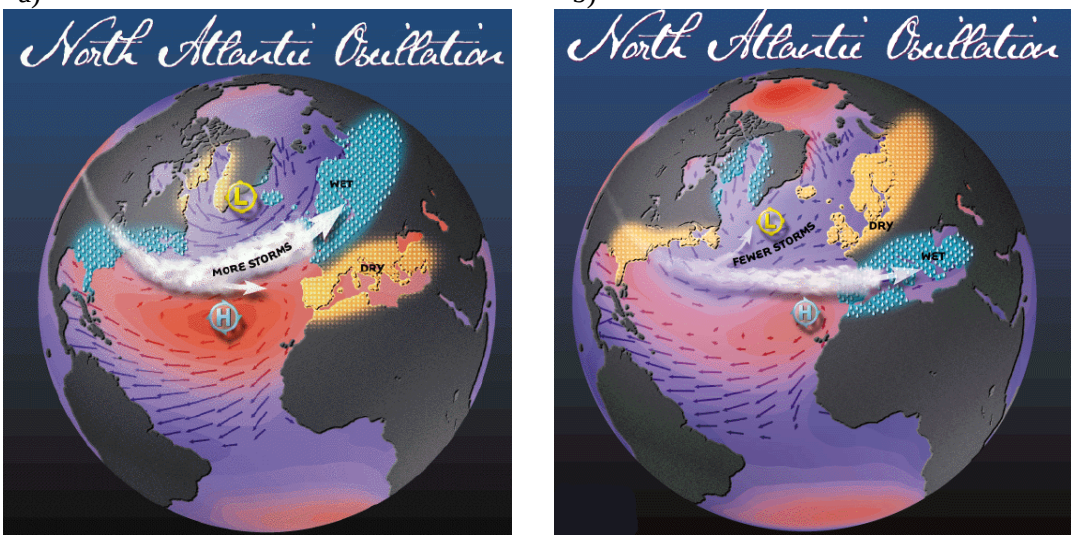
sjøsaltepisoder kan relateres til NAO. På grunnlag av dette kan vi vurdere hvordan endret klima i retning av mer ekstreme værsituasjoner vil påvirke forsuringen i vassdragene i framtida.

Rapporten starter med en summarisk innføring i det nordatlantiske sirkulasjonsmønsteret, den nordatlantiske svingning (NAO) og tilhørende indeks (NAOI). Etter en redegjørelse for de data som er brukt i denne rapporten, presenteres deretter en analyse av trender i forsuringsutvikling i de undersøkte vassdragene og sjøsaltenes betydning. NAO og våtavsetning koples så sammen og til slutt analyseres korrelasjoner mellom NAO, sjøsaltdeposisjon og forsuringseffekter i vassdragene. Betydningen av disse sammenhengene diskuteres.

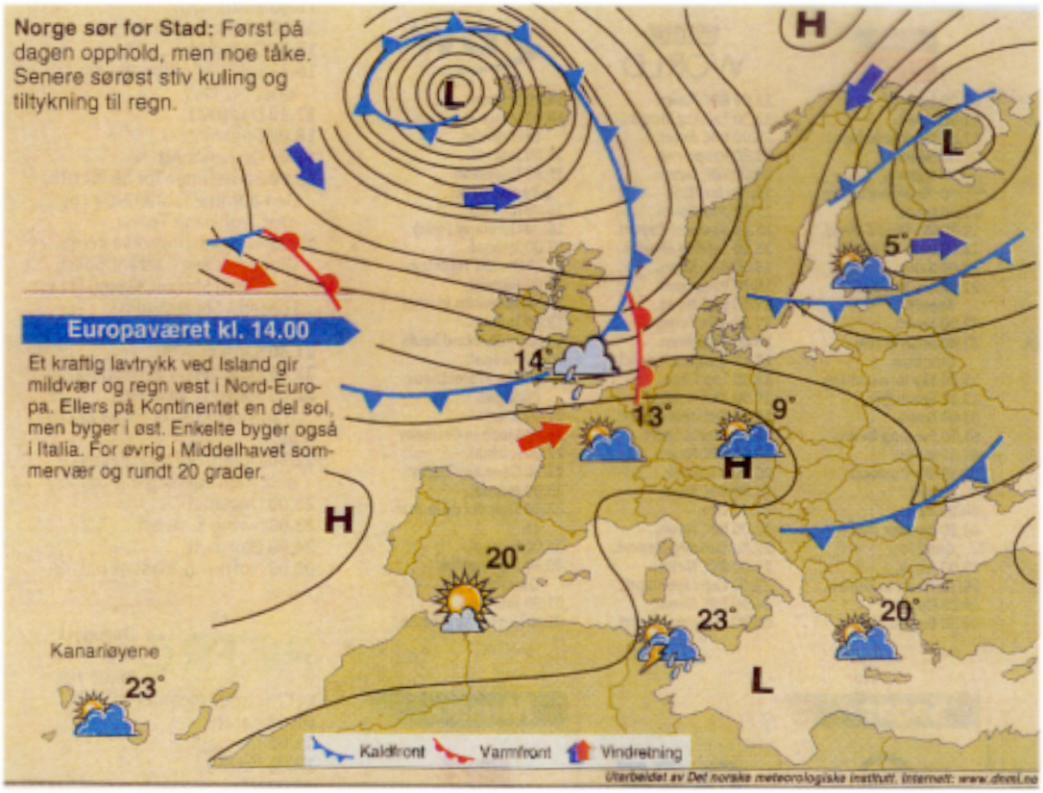
2. Den nordatlantiske svingning (NAO)

Det nordatlantiske atmosfæriske sirkulasjonsmønster eller den nordatlantiske svingning (NAO) er sterkt assosiert med værforholdene i Europa (Osborn et al. 1998; Marshall et al. 2001). Svingningens styrke uttrykkes ved NAO-indeksen (North Atlantic Oscillation Index; Hurrel 1995; Marshall et al. 2001), og den er basert på forskjell i lufttrykk målt ved havnivå mellom det nordlige (Island) og noe sørligere (Azorene) Atlanterhavet, se **Figur 1**. Høye positive verdier i høst- og vintermånedene, dvs. unormalt lavt trykk ved Island og høyt ved Azorene, framkaller kraftige vestlige vinder, frontnedbør og relativt høye temperaturer over blant annet Storbritannia og Skandinavia (illustrert i **Figur 2**). Samtidig observeres kaldt og tørt vær i Middelhavsområdet. NAOI er derfor også assosiert med en rekke ulike effekter, fra fylling av reguleringsmagasiner/strømforbruk i Norge via størrelsen på olivenavlinger i Middelhavsområdet til økologiske effekter (se f.eks. Stenseth et al. 2002). Det er sterke korrelasjoner mellom NAOI og ulike effekter både i Storbritannia/Skandinavia og Nord-Amerika.

a) b)



Figur 1. Den nordatlantiske svingning (NAO) uttrykkes ved NAO-indeksen. Den er basert på forskjell i lufttrykk mellom det nordlige (Island) og noe sørligere (Azorene) Atlanterhavet. a): Kraftig lavtrykk ved Island og kraftig høytrykk lenger sør (høy NAOI) presser fram sterke sørvestlige vinder med mye nedbør og gir forholdsvis høy temperatur vinterstid. b): Svakere trykksystemer gir ikke denne effekten (Kilde: http://www.ldeo.columbia.edu/NAO/ av Martin Visbeck, Columbia University).



Figur 2. Værsituasjonen i Europa 27. oktober 2000 (Kilde: Aftenposten 27. oktober 2000). NAOI denne måneden var 6.9 (http://www.met.rdg.ac.uk/cag/NAO/), som er svært høyt.

3. Materiale og metoder

Denne undersøkelsen er basert på de lange tidsseriene med data for atmosfæriske tilførsler og vannkjemi i elver som er framskaffet gjennom Statlig programmet for overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør (SFT 2001), og disse er koblet med NAOI.

Dataserier fra tre laksevassdrag og to sidevassdrag på Vestlandet og i Trøndelag er brukt som grunnlag for beregningene, se **Tabell 1**. Prøver samles inn og analyseres ved NIVA etter standard metoder.

Tabell 1. Data for vassdrag som er brukt i denne rapporten. Nedbørfeltstørrelser er gitt i km^2 og spesifikk avrenning i $l/s\ km^2$.

Vassdrag og fylke	Nedbørfelt, km^2	Spes. avrenning, $l/s\ km^2$
Vikedalselva i Rogaland	119	86.6
Sæta (sidevassdrag i Gaular) i Sogn og Fjordane	181	77.2
Nausta i Sogn og Fjordane	274	79.7
Trodøla (sidevassdrag i Nausta)	10	79.7
Øyensåa i Nord-Trøndelag	263	45

For vassdragene er det lagt vekt på å knytte de to sjøsaltindikatorene konsentrasjonene av Cl og ikke-marin Na (se f.eks. Hindar et al. 1994; 1995) til deposisjonsdata og klimaindeks. Det samme er gjort med toksisitetsindikatorene uorganisk, monomert aluminium (labilt Al; LAl, beregnet som differansen mellom reaktivt og ikke-labilt Al) og pH. For å finne ikke-marin Na (Na*) trekker vi fra den andelen av Na som hører til sjøsalttilførselen. Vi går ut fra at all klorid i vannprøven tilføres som sjøsalt og bruker forholdet mellom Na og Cl i sjøvann (0,556 på vektbasis) i beregningen.

Sjøsaltdeposisjon medfører økte konsentrasjoner av natrium og klorid i vannprøver fra elvene. Den usikkerheten som gjør seg gjeldende ved måling av høye kloridkonsentrasjoner gjenspeiles i beregningen av ikke-marine konsentrasjoner av andre komponenter.

Datasettene for vassdrag er korrelert med værsituasjonen, representert ved deposisjon av sjøsalter, for hele overvåkingsperioden, dvs. fra tidlig på 1980-tallet og fram til desember 2001. Deposisjonsdata er målt ved NILU og er også analysert etter standard metoder. Data fra flere stasjoner i overvåkingsnettet er benyttet.

Ofte oppgis NAOI på månedsbasis eller det opereres med vinterverdier, mens dette arbeidet baseres på døgnlige verdier (Orsolini og Limpasuvan 2001). Hemisfæriske trykkanomalier ved havnivå er beregnet vha. meteorologiske re-analyser fra NCEP (National Centre for Environmental Prediction), som ble tilpasset typiske NAO mønstre. Verdiene er standardisert ved å dividere med standardavviket for vinterperioden i årene 1958-2001. Døgnverdiene er i sin tur utgangspunkt for analyser av hvordan ulike indeksvarianter er korrelert med nedbør- og vassdragsdata.

4. Trender i elvenes vannkjemi

For alle vassdragene er det funnet en klar reduksjon i SO_4-konsentrasjonen i den undersøkte perioden, se **Tabell 2**. SO_4-reduksjonen er 50% for de to elvene i Sogn og Fjordane, samt for Trodøla. For Vikedalselva i sør er den noe mindre, mens reduksjonen i Øyensåa er hele 78%.

Tabell 2. Trender i konsentrasjonen av ikke-marin SO_4 (SO_4*) funnet ved lineær regresjon av SO_4* mot datonummer (D). For alle elver er det brukt data fram til desember 2001. Regresjonslikning og korrelasjonskoeffisient (r) er gitt, samt prosent reduksjon i perioden.

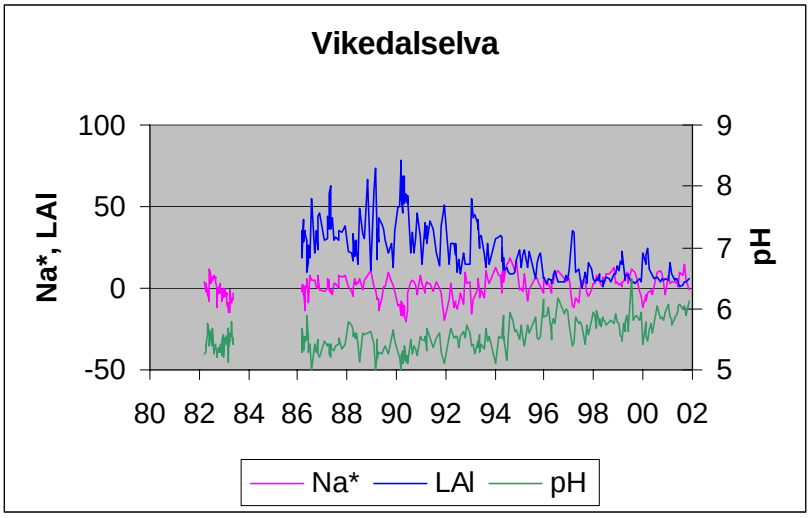
Elv	Data fra:	Likning	r	% reduksjon
Øyensåa	29. september, 1980	SO_4* = 40 - 0,00185 D	-0.63	78
Nausta	16. februar, 1980	SO_4* = 41 - 0,00151 D	-0.59	50
Sæta	20. mars, 1984	SO_4* = 45 - 0,00171 D	-0.49	50
Trodøla	21. mars, 1984	SO_4* = 41 - 0,00157 D	-0.65	50
Vikedal	29. mars, 1982	SO_4* = 65 - 0,00211 D	-0.74	38

Aluminium ved lav pH er giftig for forsuringsfølsomme organismer, spesielt laks. Aluminium en samtidig en nøkkelfaktor fordi de uorganiske, monomere forbindelsene av dette stoffet (LAl) både er giftige og ser ut til å være sterkt assosiert til både forsuring generelt og sjøsaltepisoder spesielt. Effekten av sulfatreduksjoner på pH og LAl er derfor viktige. Trender og analyser er gitt for det enkelte vassdrag.

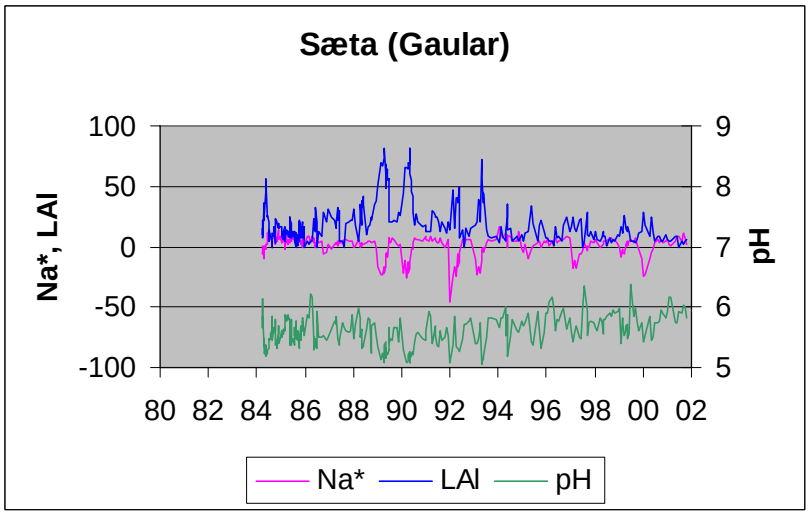
4.1 Vikedalselva

Dataserien starter i 1982, men har et opphold i 1984 og 1985. Reduksjonen i SO_4 har medført en klar økning i pH i Vikedalselva, spesielt fra midten på 1990-tallet er denne økningen tydelig (**Figur 3**). Konsentrasjonen av LAl er også merkbart redusert i perioden, og det ser ut til at også sjøsaltepisodene, representert ved Na*, gir mindre utslag i LAl. Spesielt ser det ut til at sjøsaltvinterene 1997 og 2000 har gitt langt svakere effekter med hensyn til Al-konsentrasjon og pH enn årene 1989-1990.

Dette viser tydelig at effekten av sjøsaltdeposisjon er avhengig av utgangs-pH. Det er tidligere funnet at det er en generell sammenheng mellom økning i middel-pH over tid (mindre surt) og økning i minimumsverdier for pH, dvs. at episodene også er mindre sure (SFT 1999). Tilsvarende er funnet for aluminium; lavere middelverdier over tid følges av lavere ekstremverdier.



Figur 3. Endringer i ikke-marin natrium (Na*), labilt aluminium (LAl) og pH i Vikedalselva. Konsentrasjoner er gitt i µekv/L og µg/L for hhv. Na* og LAl.

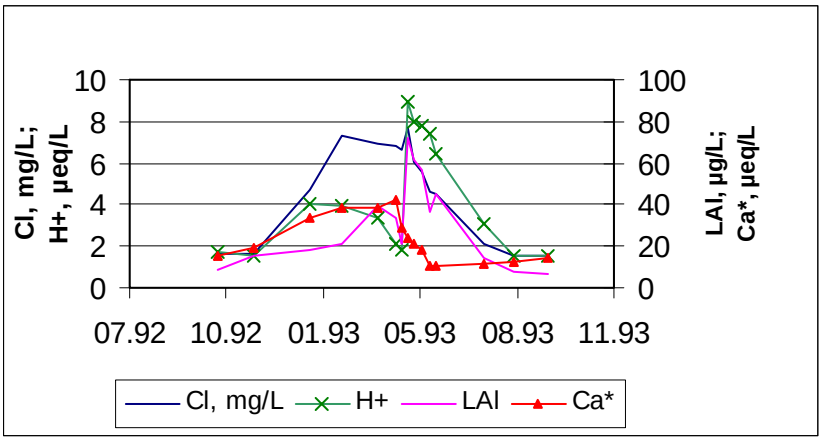


Figur 4. Endringer i ikke-marin natrium (Na*), labilt aluminium (LAl) og pH i Sæta. Konsentrasjoner er gitt i µekv/L og µg/L for hhv. Na* og LAl.

4.2 Sæta i Gaularvassdraget

Dataserien fra Sæta starter i 1984 med en mindre sjøsaltepisode i april (
Figur 4). LAl-konsentrasjonene kom imidlertid opp i over 50 µg/L. Deretter er det ikke spesielle episoder før vintrene i 1989-1990. Deretter er det kraftige episoder i 1992, 1993, 1997 og 2000. Om en ser bort fra den ekstreme episoden i 1993, gir alle epsiodene omlag den samme beregnede Na*-konsentrasjon. Mens episodene i 1989, 1990 og 1993 mobiliserte uorganisk Al i forholdsvis høye konsentrasjoner (> 70 µg/L), var det klart lavere konsentrasjoner i både 1997 og 2000 (< 30 µg/L).

Vi har sett nærmere på den ekstreme sjøsaltvinteren 1993 for dette vassdraget. **Figur 5** viser klart hvordan vannets potensielle toksisitet endres i løpet av vinteren 1993 ved omlag de samme kloridkonsentrasjonene i elva. Selv om sjøsaltpåvirkningen av vassdraget var den samme gjennom vinteren (iallfall ved de fire prøvetakingene vi har data for), endret vannkvaliteten seg brått i siste del. I den første del av vinteren ble det mobilisert tilstrekkelig med basekationer til at H^+ og Al bare ble mobilisert i mindre konsentrasjoner, mens det motsatte var tilfellet senere på vinteren. Forløpet for Sæta ble målt over noen måneder, men et liknende forløp kan en trolig også finne innenfor kortere tidsintervaller.



Figur 5. Endringer i konsentrasjonen av klorid (Cl), hydrogenioner (H^+), labilt Al (LAl) og ikke-marin kalsium (Ca*) i Sæta i perioden september 1992-september 1993.

4.3 Nausta

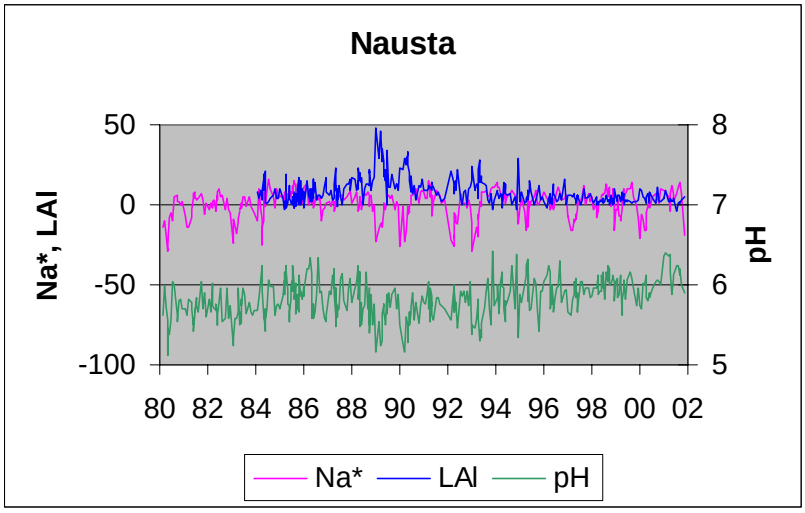
Dataserien fra Nausta starter i 1980 og viser at det har vært sjøsaltepisoder i 1980, 1983 og 1984, med antatt høye konsentrasjoner av uorganisk Al. Siden målingene av Al ikke startet før i 1984, kan dette imidlertid ikke bekreftes.

Dataserien fra Nausta viser klart hvordan Al-mobiliseringen i forhold til ikke-marin Na (Na*) er redusert over tid. Allerede ved episoden i 1993 var det klart lavere konsentrasjoner enn det en kunne forvente i forhold til den mobiliseringen som ble registrert i 1989 og 1990-episodene. Det er bemerkelsesverdig at de forholdsvis kraftige episodene (vurdert etter Na*) i både 1997 og 2000 ikke førte til høyere LAl-konsentrasjoner enn ca. 10 µg/L. Dataserien for Nausta viser også at sjøsaltepisodene i 1989 og 1990 førte til sterk nedgang i pH, mens dette ikke var tilfellet i 1997 og 2000.

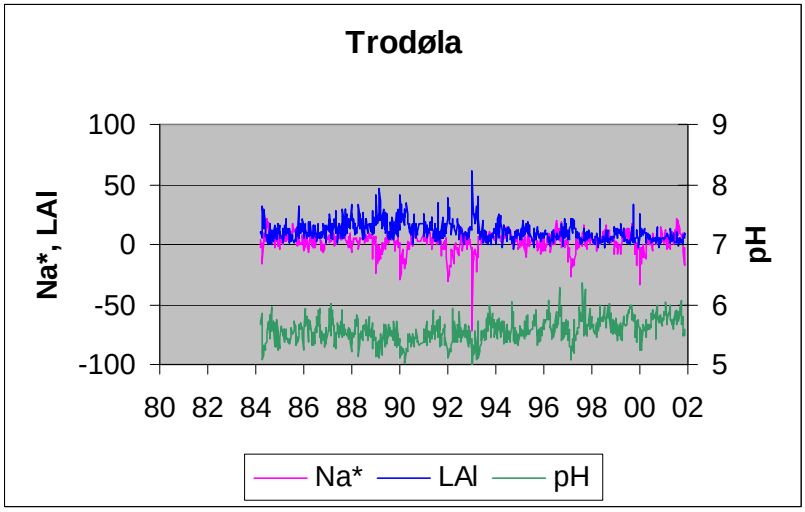
4.4 Trodøla i Naustavassdraget

Dataserien fra Trodøla starter i 1984 med en sjøsaltepisode i april, deretter er det ikke spesielle episoder før vintrene i 1989-1990. Deretter er det kraftige episoder i 1992, 1993, 1997 og 2000, slik som i de andre vassdragene. Om en ser bort fra den ekstreme episoden i 1993, gir alle episodene omlag den samme beregnede Na*-konsentrasjon. Mens episodene i 1989, 1990, 1992 og 1993 mobiliserte uorganisk Al i moderate konsentrasjoner, var det lavere konsentrasjoner i både 1997 og 2000.

pH økte klart og LAl ble klart redusert i perioden ($p<0.001$). Trendene for dette store datasettet ($n=890$) tilsvarer en midlere pH-økning fra 5.4 til 5.7 og en LAl-reduksjon fra 16 til 6 µg/L.



Figur 6. Endringer i ikke-marin natrium (Na*), labilt aluminium (LAl) og pH i Nausta. Konsentrasjoner er gitt i µekv/L og µg/L for hhv. Na* og LAl.

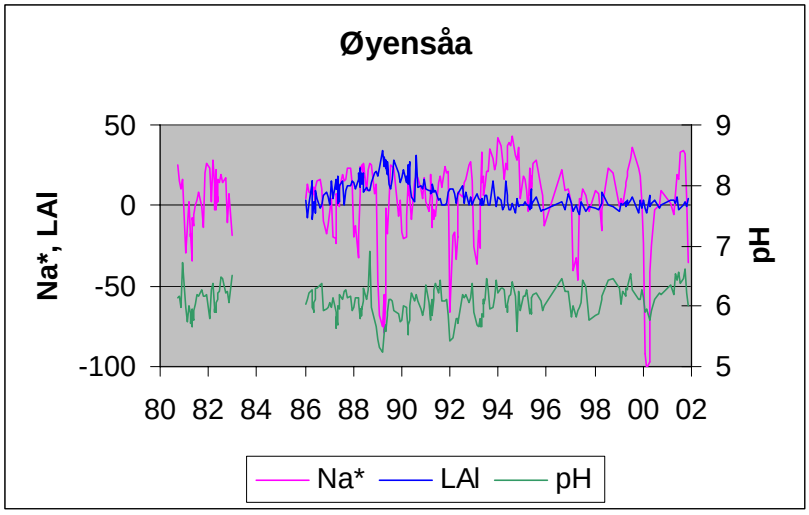


Figur 7. Endringer i ikke-marin natrium (Na*), labilt aluminium (LAl) og pH i Trodøla. Konsentrasjoner er gitt i µekv/L og µg/L for hhv. Na* og LAl.

4.5 Øyensåa

Det var også i Øyensåa en klart nedadgående trend i ikke-marin sulfat (SO_4*) fra september 1980 og fram til desember 2001 (**Tabell 2**). Det er interessant å merke seg at det i årene 1989 og 1990 (”sjøsaltår”) var markerte konsentrasjoner av labilt Al (opp mot 30 µg/L) så langt nord som her ved Namdalseid i Nord-Trøndelag. Det viser at det også så langt nord har vært en forsuringssituasjon som har gjort det mulig med Al-mobilisering.

I dette vassdraget kommer Cl-konsentrasjonen tidvis opp i mer enn 20 mg/l og de laveste konsentrasjoner av ikke-marin Na i overvåkingsserien er funnet her. Tilsvarende Al-mobilisering som i 1989-1990 er ikke funnet for det like markerte sjøsaltåret 2000. Mens pH endret seg lite, men signifikant ($p<0.05$) i denne perioden, ble labilt Al redusert klart ($r^2=0.27$; $p<0.001$). Den generelle reduksjonen i tilførslene av sur nedbør har sannsynligvis resultert i at det ikke lenger er mulig å få mobilisert Al under sjøsaltepisoder.



Figur 8. Endringer i ikke-marin natrium (Na*), labilt aluminium (LAl) og pH i Øyensåa. Konsentrasjoner er gitt i µekv/L og µg/L for hhv. Na* og LAl.

5. Endringer i sjøsaltepisodenes betydning for vannkvalitet

Det store datasettet fra overvåkingsundersøkelsene gjør det mulig å se nærmere på sammenhengene mellom syrepåvirkning (ikke-marin SO_4), sjøsaltepisoder (Cl og ikke-marin Na) og toksisk vann (pH og labilt Al; LAl). Data fra Trodøla er best egnet til slike analyser fordi de er samlet på ukesbasis, mens det for øvrige elver i hovedsak er data samlet inn på månedsbasis.

Multippel korrelasjonsanalyse for Trodøla viser at pH er den av de vannkjemiske variablene som best forklarer variasjonen i LAl ($r^2=0.32$). At konsentrasjonen av LAl i vassdrag er sterkere korrelert til pH enn andre forklaringsvariable er vist tidligere (Hindar et al. 2000). Variasjonen i pH i sin tur er et resultat av mange prosesser; deposisjon av sterke syrer og sjøsalter, innhold av løst organisk stoff og bufring fra jordsmonn og berggrunn. Variablene SO_4, NO_3, Na*, TOC og Ca* bidro signifikant til variasjonen i pH ($p<0.01$ for alle, med unntak av NO_3; $p< 0.05$), og forklarte tilsammen 46% av

variasjonen. Det samme var tilfellet for LAl; om en ser bort fra at Ca* ikke bidro signifikant, forklarte de øvrige 42% av variasjonen i LAl.

Som **Figur 7** indikerer, kan en del av variasjonen i LAl forklares med variasjonen i Na* alene. Dette bekreftes ved at r^2= 0.19, dvs. at 19% av variasjonen er forklart kun av Na*. Sammenhengen bedres sterkt hvis datasettet innsnevres til å gjelde bare vinterperioden 1.desember-1.april for alle årene (r^2=0.33). Med ytterligere innskrenkning til denne vinterperioden i årene 1988-1993 forbedres forklaringsgraden videre fra 33 til 50%. Sjøsaltdeposisjon synes derfor å være en avgjørende faktor for mobilisering av LAl.

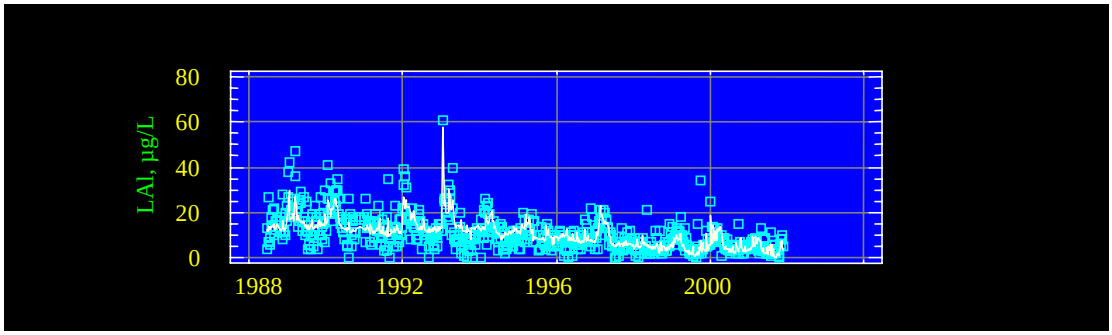
For å se nærmere på hvordan den underliggende forsuringsendringen og den episodiske sjøsaltdeposisjonen påvirker LAl, gjennomførte vi en analyse på grunnlag av datonummer (løpende tidsserie) og Na*. Disse to forklarte tilsammen 34% av variasjonen i LAl.

LAl er også styrt av organisk stoff ved at organisk stoff binder LAl. Ved å inkludere TOC i denne analysen (TOC-data fra 1988), økte forklaringsgraden til 49%. At TOC-bidraget i denne analysen er positivt når økt TOC vitterlig skulle gi redusert LAl ved binding, kan synes paradoksalt. Vi tror imidlertid at dette kan skyldes kombinasjonen av et generelt svært lavt TOC-nivå i vassdraget (noe over 1 mg TOC/L) og at TOC øker ved økende avrenning (ikke testet), slik som under kraftig uvær og sjøsaltdeposisjon. For dette vassdraget vil vi derfor tro at det snarere er snakk om en samvariasjon enn et direkte bidrag til endring i LAl.

Det var også interessant å legge merke til at forklaringsgraden økte til 56% ved å erstatte Na* med Cl. Årsaken til dette kan være at Cl-verdiene er bedre fordelt enn Na*-verdiene.

Modellen:
LAl (µg/L) = 88 - 0,0026 D + 3,6 [Cl] + 1,64 [TOC] (r^2=0.56, n=890)

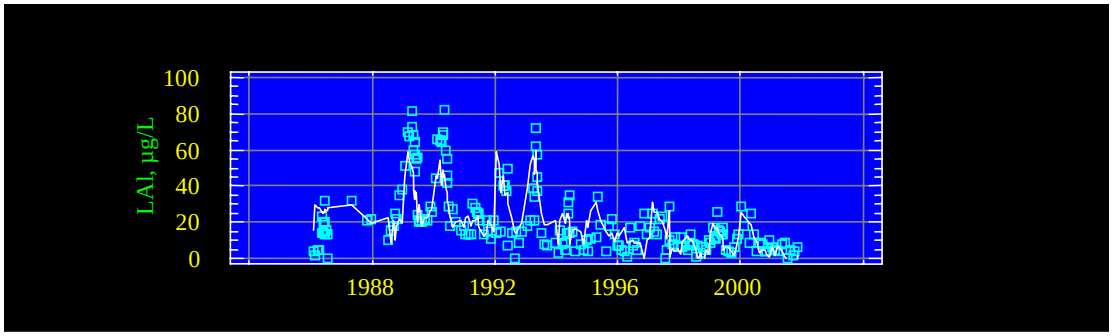
der D er datonummer, forklarer altså 56% av variasjonen i LAl (**Figur 9**). Den fanger opp variasjonen i dataene, men får ikke med seg de høyeste og laveste verdiene. Det skyldes trolig at pH ikke er representert direkte i modellen. Hvis TOC og Cl holdes konstant på hhv. 1 og 6 mg/L, beskriver modellen en reduksjon i LAl fra 31 til 15 µg/L, dvs. en halvering over 13 år. Dette kan tolkes slik at den underliggende forsuringsutviklingen reduserer LAl.



Figur 9. Variasjonen i LAl i Trodøla sammen med en modell basert på tidsutvikling, sjøsaltdeposisjon og organisk stoff, se tekst.

En tilsvarende modell for Sæta gir:
LAl (µg/L) = 175 - 0,0047 D - 7,8 [TOC] + 6,8 [Cl] (r^2=0.59, n=315)

Den beskriver godt alle episoder og en midlere LAl-reduksjon fra 63 til 34 µg/L (**Figur 10**).



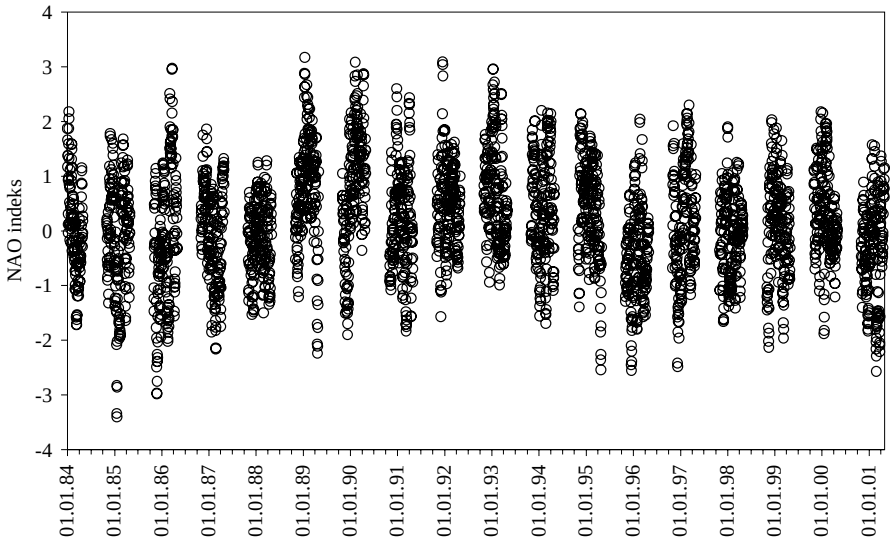
Figur 10. Variasjonen i LAl i Sæta sammen med en modell basert på tidsutvikling, sjøsaltdeposisjon og organisk stoff, se tekst.

Her kan det se ut til at TOC bidrar direkte til reduksjon i LAl (negativt fortegn i modellen), slik en ville forvente. Det er ellers interessant at SO_4* ikke bidrar så godt som tid til å forklare variasjonen i pH og LAl i Trodøla. Det kan skyldes at SO_4* ofte er "for lav" under sjøsaltepisoder, mens LAl er spesielt høy under slike episoder. Trenden for SO_4* påvirkes kunstig ved at marin SO_4 trolig adsorberes i jorda under disse episodene slik at den ikke-marine konsentrasjonen som beregnes blir for lav og i enkelte tilfeller negativ. I overvåkingsrapporten for 2000 påpekes dette for Øyensåa; "De ekstremt lave verdiene (*av SO4**) i Øyensåa er delvis forårsaket av høye Cl-konsentrasjoner …. i februar, mars og april, som forårsaket negative verdier av ikke-marin sulfat i disse tre månedene." (SFT 2001). Dette fenomenet er også påvist i Storbritannia (Evans et al. 2001) og ble omtalt innledningsvis.

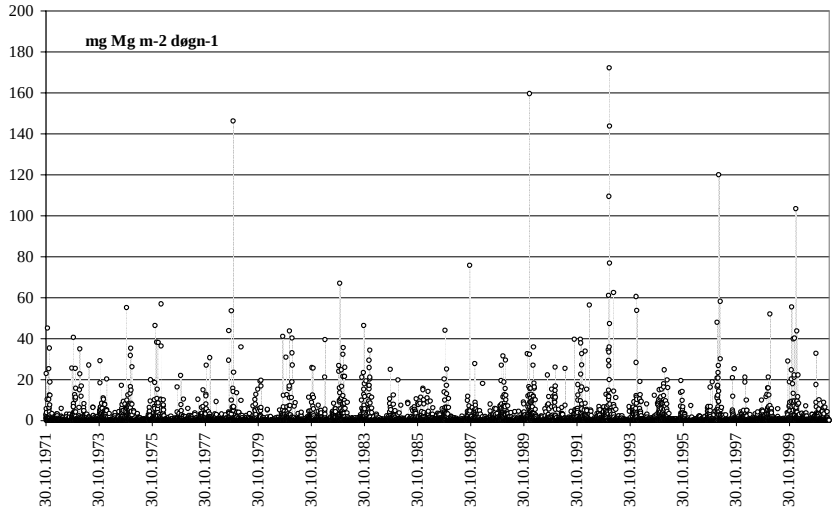
For Øyensåa er variasjonen i pH relativt godt forklart (36%) av variasjonen i SO_4*, Ca* og Na*. Ved å erstatte Na* med Cl forbedres imidlertid forklaringen til 62%. Omtrent samme effekt oppnås med konduktivitet. TOC bidrar ikke signifikant til å forklare variasjonen i pH, mens datonummer bidrar signifikant ($p<0.05$), men lite. Cl alene forklarer 35% av variasjonen i pH, mens Na* alene forklarer 23%. Heller ikke for LAl er TOC signifikant bidragsyter, mens både Cl og datonummer gir signifikante ($p<0.01$) bidrag til en samlet forklaringsgrad på 32%. Dato alene forklarer 27% av variasjonen.

6. NAO og våtavsetning

NAOI foreligger som døgnindekser for hele året. Det har imidlertid vist seg at det er vinterverdier for NAOI som best korrelerer med værforhold og ulike fenomener i Europa, og det er døgnverdier for vinterperioder vi har brukt som grunnlag for våre analyser (**Figur 11**). Døgnverdier for våtavsetning av magnesium (Mg) for stasjonen Skreådalen (i Sirdal, Vest-Agder) siden observasjonene startet i 1971 er vist i **Figur 12**. Deposisjonstall påvirkes både av konsentrasjon i nedbøren og mengde nedbør, og som figuren viser er det svært stor variasjon.

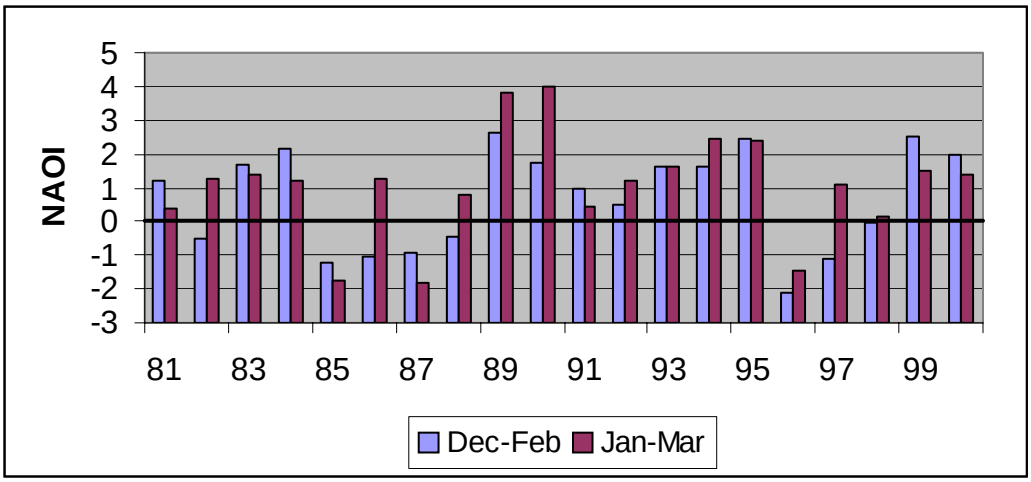


Figur 11. Døgnlig NAO-indeks for perioden november-april i perioden 1984 til 2001 på Skreådalen målestasjon.



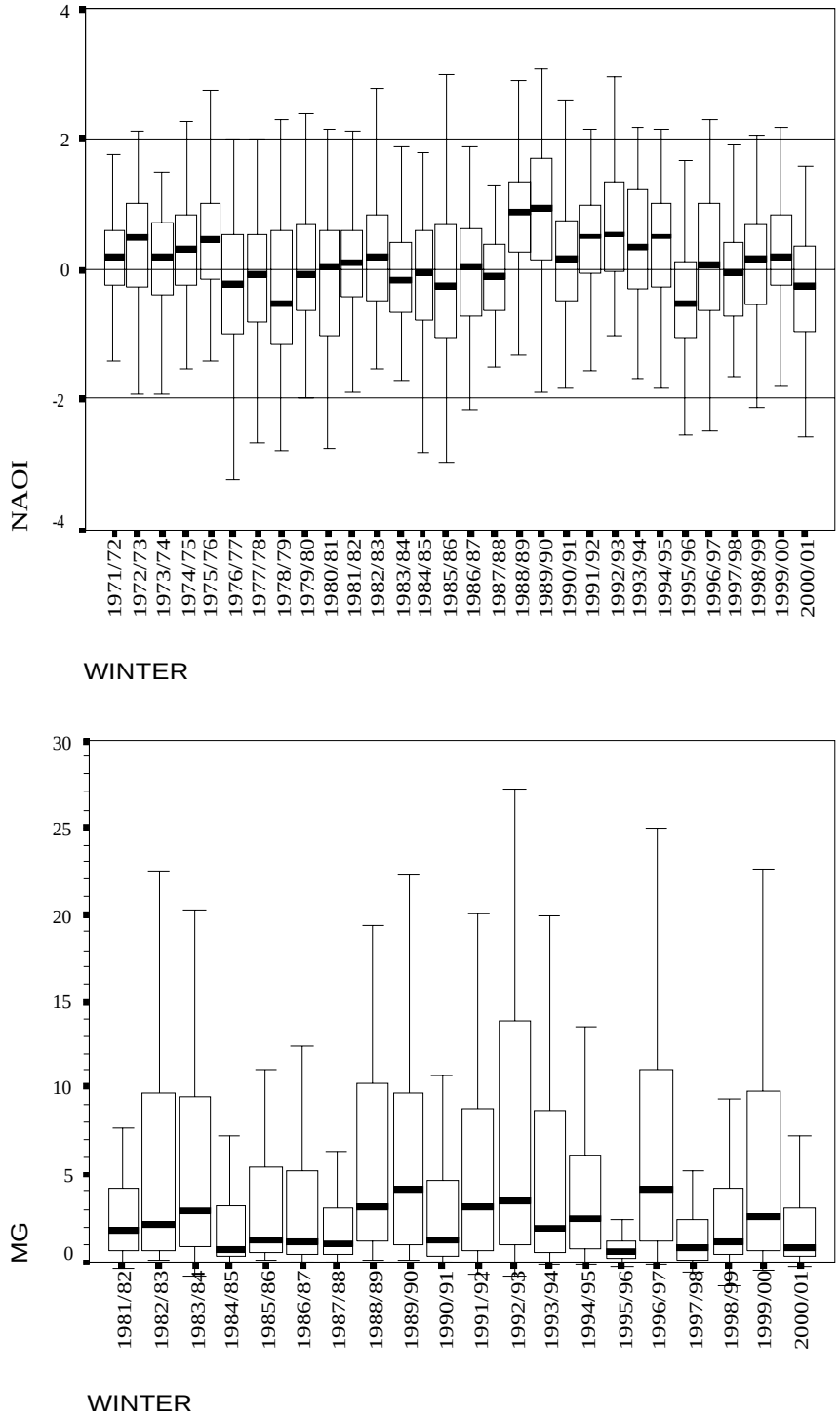
Figur 12. Døgnlige våtavsetninger av magnesium ved Haukeland i Hordaland for perioden 1971 til 2000 (vinterverdier; mg Mg m^{-2} $døgn^{-1}$).

Månedsmidler for fire vintermåneder er mye brukt ved presentasjon av NAOI, men valget av periode kan variere. I **Figur 13** har vi vist verdier for to ulike perioder, hhv. desember-februar og januar-mars. Forskjellene indikerer at valget av indeksgrunnlag kan påvirke resultatet av dataanalyser. Figuren viser også at vinterverdiene for NAOI har vist betydelig variasjon i undersøkelsesperioden, med svært høye verdier enkelte vintre. Årene 1989, 1990 peker seg ut med høye verdier, mens 1996 ligger lavest. I perioden 1981-2000 hadde bare tre år negative verdier. Det har vist seg at denne perioden har de høyeste indeksverdiene som er registrert (Marshall et al. 2001).



Figur 13. Vinter NAO-indekser, representert ved middel-NAOI for hhv. desember-februar og januar-mars i perioden 1981-2000.

Frekvensfordeling av NAOI og av sjøsaltdeposisjon vist i **Figur 14**. Beregningsmetoden for NAOI innebærer en normalisering og følger derfor en gaussisk normalfordeling, mens sjøsalttilførselen har en markant log-normal fordeling. Dette skyldes at sjøsaltdeposisjonen knyttes til et fåtall tilfeller med ekstreme værsituasjoner.



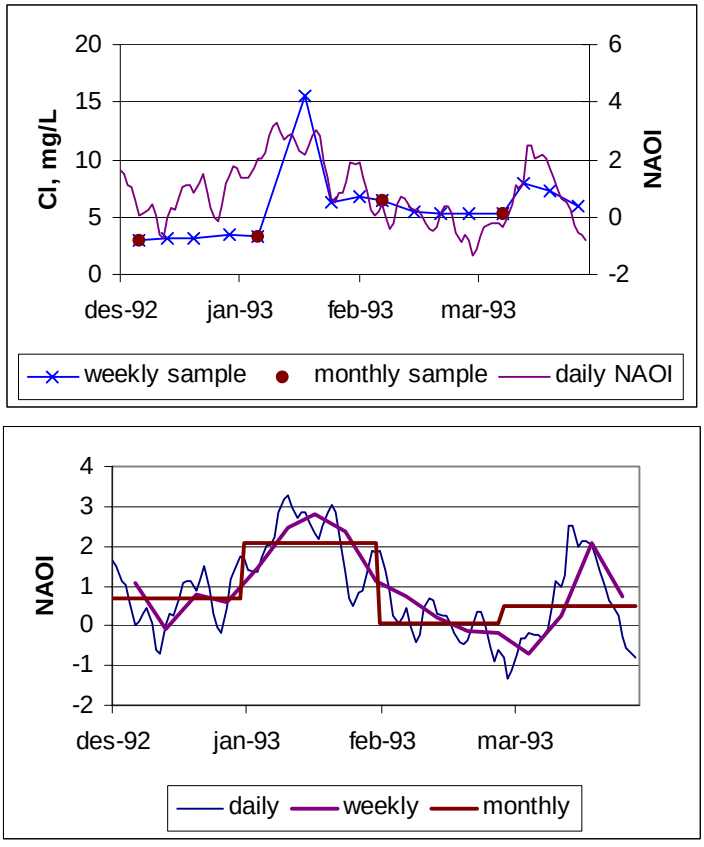
Figur 14. NAOI (øverst) og våtavsetning av Mg (nederst; mg Mg m^{-2} døgn^{-1}) på Haukeland målestasjon. Fordelingen av NAOI og sjøsaltdeposisjon er vist ved såkalte box and whiskers-plot, hvor nedre og øvre del av boksen angir hhv. 1. og 3. kvartil, mens medianverdien er vist med en horisontal linje. Linjene i topp og bunn (whiskers) viser hhv. største og laveste verdi som ikke overstiger 1.5 ganger avstanden mellom 1. og 3. kvartil (Inter Quartile Range). Figurene viser en normalfordeling av NAOI og en sterk log-normal fordeling for Mg-avsetning, se tekst.

7. Sammenhenger mellom NAO, våtavsetning og sjøsaltepisoder i vassdrag

I dette arbeidet er det brukt døgn-, ukes-, måneds- og vinterverdier for NAOI. **Figur 15** illustrerer hvordan forholdet mellom tre av disse kan være for en avgrenset periode og hvordan kloridverdier for vannprøver tatt en gang per uke og en gang per måned sammenfaller med døgnverdier for NAOI. Månedsprøvetaking, slik det er indikert i figuren, vil i liten grad fange opp effekten av de høye NAOI-verdiene for januar, men det vil ukesverdiene.

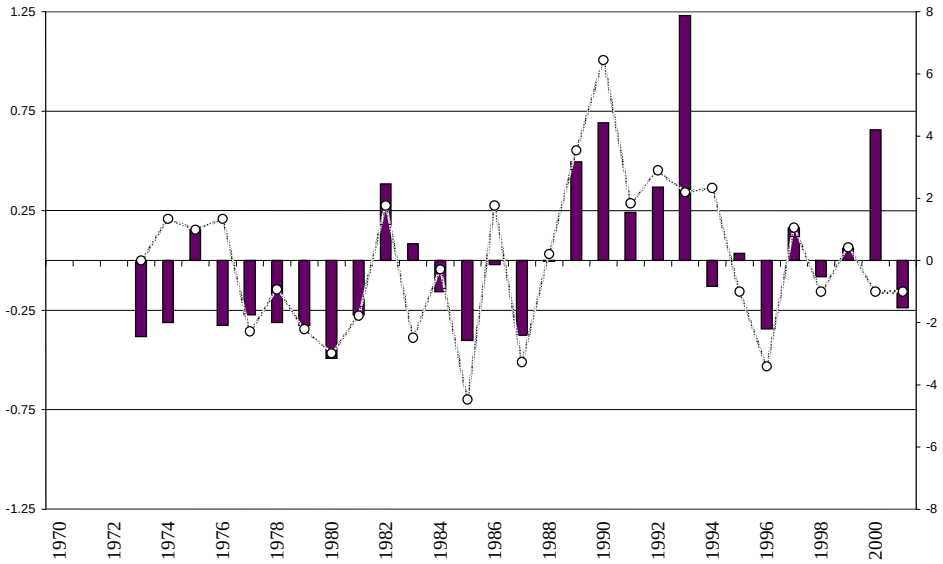
Det er åpenbart at korrelasjoner mellom NAOI og vannkjemi kan påvirkes både av hvilket grunnlag for NAOI som brukes og hvilken frekvens av vannprøver som er brukt. Analyser som er basert på månedsverdier for vannkjemi vil trolig gi mindre signifikante sammenhenger enn analyser som er basert på ukesverdier. Siden det tar tid før de værforhold som NAOI uttrykker når fram til norskekysten, vil trolig også tidsforsinkelser kunne påvirke resultatet.

Vi tar med dette innledningsvis i dette kapittelet for å illustrere at de sammenhenger som finnes i det foreliggende datamaterialet trolig kunne vært enda bedre med en prøvetakingsdesign som var tilpasset formålet med dataanalysen.



Figur 15. NAOI i perioden 1. desember 1992 – 31. mars 1993, representert ved døgn-, ukes,- og månedsverdier (venstre). Til høyre er vist døgnverdier for NAOI og ukentlige Cl-konsentrasjoner fra Trodøla. Et mulig resultat av månedlig innsamling av vannprøver fra elva er også indikert.

Det er en klar sammenheng mellom NAOI og sjøsalttilførselen i Norge. **Figur 16** viser denne sammenhengen for stasjonene Birkenes, Lista, Vatnedalen og Tustervatn, hvor det relative avviket fra periodens middelverdi er angitt. Med få unntak er sjøsaltavsetningen høy i år med høy NAOI og tilsvarende lav i år med lav NAOI.



Figur 16. Relativt avvik fra middelkonsentrasjonen av Mg i våtavsetning for stasjonene Birkenes, Lista, Vatnedalen og Tustervatn og årlige vintermidler for NAOI. Stopler er Mg og åpne ringer er NAOI.

Tabell 3. Korrelasjonskoeffisienter for 75-prosentilverdier for hver vintersesong (november-april) i perioden 1984 til 2001. Analysen er for NAOI, Mg-deposisjon ved Haukeland øst for Bergen og vannkjemi (klorid, pH og labilt aluminium) i vassdragene Trodøla og Sæta (n=17).

	NAOI	Mg dep. Haukeland	Klorid Trodøla	pH Trodøla	LAl Trodøla	Klorid Sæta	pH Sæta	LAl Sæta
NAOI	1.000	.853	.728	-.769	.755	.767	-.812	.705
p	.	.000	.001	.000	.000	.000	.000	.002
Mg avsetning		1.000	.861	-.624	.662	.867	-.642	.568
p		.	.000	.007	.004	.000	.005	.017
Klorid Trodøla			1.000	-.490	.504			
p			.	.046	.039			
pH Trodøla				1.000	-.812			
p				.	.000			
LAl Trodøla					1.000			
p					.			
Klorid Sæta						1.000	-.631	.669
p						.	.007	.003
pH Sæta							1.000	-.861
p							.	.000

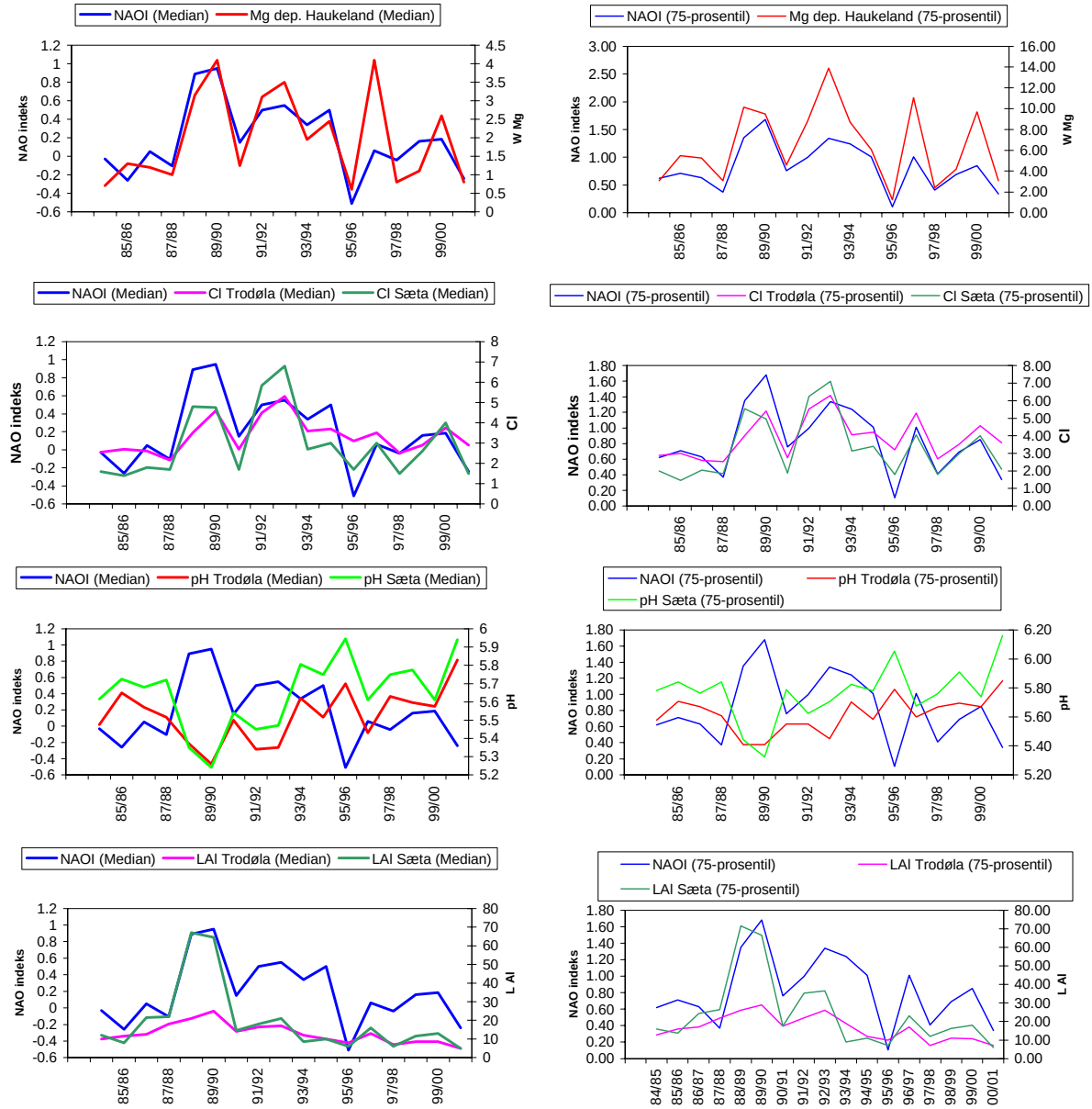
Korrelasjonen mellom NAOI og sjøsaltdeposisjon har r=0.76 (Pearson Correlation Coeff.) for medianverdier for hver vinter med, men 75-prosentilverdiene er generelt høyere korrelert (r=0.85; **Tabell 3**). Korrelasjonene med vannkjemien er sterk for begge de to Vestlandsvassdragene i denne analysen og for alle de tre variablene klorid, pH og labilt aluminium (**Tabell 3**). Det vil si at sammenhengen er sterk både for direkte sjøsaltpåvirkning (klorid) og vannets giftighet (pH og LAl) for fisk og andre forsuringsfølsomme organismer. Sammenhengene er illustrert i **Figur 17**.

Korrelasjonen mellom NAOI og sjøsaltavsetning, sjøsalt i avrenningsvann og konsentrasjoner av labilt Al styrkes markant ved å sammenligne 75-prosentilverdier framfor medianverdier. Dette er som forventet fordi 75-prosentilverdier også inkluderer episoder der den kjemiske effekten av sjøsaltepisoder kommer tydeligere til uttrykk. Samvariasjonen for 99-prosentilverdier ble generelt svakere. Årsaken til dette antas å være at denne analysen inkluderer ekstreme observasjoner og at deres grunnlag er for dårlig knyttet til hovedtrendene. Både for Trodøla og Sæta ble imidlertid korrelasjonen mellom NAOI og pH fortsatt god, med r>0.6.

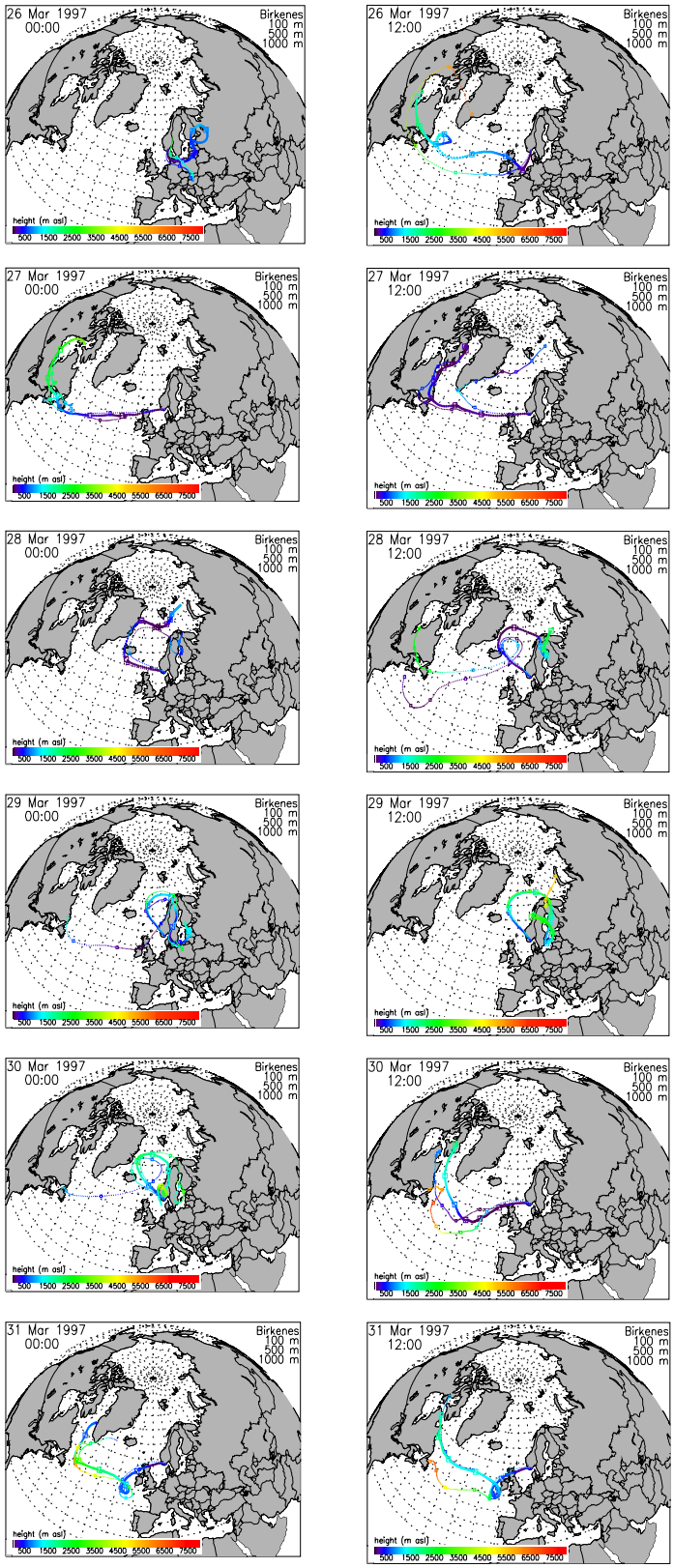
Figur 17 viser at ett år skiller seg markant ut ved å ha en relativt høy deposisjon av sjøsalter uten at NAOI verdiene var særlig høye (vinteren 1996/1997). Verdiene fra denne vinteren er inkludert i korrelasjonsanalysen og ved å fjerne denne med en "outlier"-test styrkes samvariasjonen ytterligere. Analyser av luftmassetrajektorier[1] for noen dager i løpet av denne perioden er vist i **Figur 18**. Her illustreres en situasjon med transport fra mer nordlig retning i perioden 28. til 29. mars, som medførte vesentlige mengder sjøsalter uten at NAOI var særlig høy. Vi har ikke grunnlag for å vurdere hvor ofte slike avvikende episoder kan opptre, men de er åpenbart relativt sjeldne. Dette understreker et en bør benytte relative trender i prosentilverdiene framfor å kople døgnlig NAOI med observasjoner, dersom ikke dette gjøres i en synoptisk transportmodell.

Det er også gjennomført enkle regresjonsanalyser for å se på hvilken måte valget av NAO indekstype påvirker relasjonen til viktige vannkjemiske parametre (Na*, Cl, pH og LAl) i de fem elvene. Vi har brukt døgnindekser, ukesindekser og månedsindekser i analysen. Døgnindeksen er NAOI for samme dag som vannkjemisk prøvetaking i elva har funnet sted. Ukes- og månedsideksene er midler basert på indekser fra hhv. samme døgn + seks døgn forut og samme døgn + 29 døgn forut for vannkjemisk prøvetaking i elva. Det er brukt data for perioden desember-april for alle år med vannkjemiske data.

[1] Trajektorier er linjer som beskriver luftmassenes bevegelse i tiden før luftmassene nådde fram til angjeldende sted.



Figur 17. Tidsserier av hhv. median og 75-prosentilverdier for NAOI og våtavsetning (fluks) av magnesium (W Mg) ved Haukeland og vannkjemiske variable (konsentrasjoner) i Trodøla og Sæta.



Figur 18. Luftmassetrajektorier for enkelttidspunkter (hver 12. time) ved stasjonen Birkenes i Vest-Agder i perioden 26. mars til 31. mars 1997.

I Trodøla har vi data for 434 vannkjemiske prøvetakinger med tilhørende NAOI-verdier i undersøkelsesperioden. Dette er langt flere enn for de fire andre elvene (195 i Nausta og noe over 100 i de andre). Analysen for Trodøla viser at alle parametre er sterkt positivt korrelert ($p<0.001$) til alle de tre indeksvariantene (**Tabell 4**). Signifikansnivået er svakest for døgnindeksen, bedre for ukesindeksen og sterkest for månedsindeksen.

Tabell 4. Korrelasjoner mellom de vannkjemiske variable Na*, Cl, pH og LAl i vassdragene og ulike NAO-indekser. NAO-indeksene er gitt som I_1 (døgn), I_7 (uke) og I_{30} (måned), se tekst. Signifikansnivå er gitt; *** viser $p<0.001$, ** viser $p<0.01$, * viser $p<0.05$, mens i.s. viser ikke-signifikant ($p>0.05$) sammenheng. Vannkjemiske data i perioden november-april for alle år er benyttet i analysen. Antall vannkjemiske data for hver elv er gitt i parentes bak navnet. For LAl er det noe færre data for Vikedal (115), Nausta (165) og Øyensåa (97) fordi analysen ble introdusert først i 1984.

	Vikedal (n=146)			Trodøla (n=434)			Nausta (n=195)		
	I_1	I_7	I_{30}	I_1	I_7	I_{30}	I_1	I_7	I_{30}
Na*	i.s.	***	***	***	***	***	i.s.	*	***
Cl	i.s.	*	***	***	***	***	*	**	***
pH	***	***	***	***	***	***	***	***	***
LAl	***	***	***	***	***	***	**	***	***

	Sæta (n=135)			Øyensåa (n=118)		
	I_1	I_7	I_{30}	I_1	I_7	I_{30}
Na*	i.s.	**	***	i.s.	i.s.	*
Cl	**	***	***	i.s.	i.s.	**
pH	**	***	***	i.s.	i.s.	*
LAl	***	***	***	i.s.	i.s.	*

For Sæta er resultatet omtrent som for Trodøla, for Nausta og Vikedal noe svakere, mens korrelasjonene for døgn- og ukesindekser er svake for Øyensåa. For månedsindeksene er imidlertid korrelasjonene med alle variable signifikante ($p<0.05$) også for Øyensåa.

Denne analysen viser at hyppig prøvetaking i vassdragene (ukentlig i Trodøla) gir de sterkeste korrelasjoner. Det kan skyldes at månedlig prøvetaking i for liten grad fanger opp de variasjoner i vannkjemi som kan knyttes til NAO. Vi har tidligere vist at døgnindekser ikke gir best forklaring. Analysen viser også at korrelasjonene er svakere for Øyensåa i Nord-Trøndelag både når det gjelder direkte sjøsaltpåvirkning (klorid) og giftighet (pH og LAl). Det skyldes trolig at dette vassdraget ligger noe mer i utkanten av det kraftigste influensområdet for NAO i Norge.

Analysene i dette kapittelet viser at høye positive verdier for NAOI er koplet til sjøsaltepisoder, reduksjon i pH og mobilisering av uorganisk aluminium i vassdraget. Videre viser analysen at det kan ha stor betydning hvilken indekstype som benyttes i analysen. Dette skyldes at NAOI er basert på målinger ute i Atlanterhavet og at det tar tid før det tilhørende vær når kysten av Norge. At månedsverdiene kommer så godt ut, også i forhold til ukesverdier, kan tyde på at sjøsaltepisoder er relatert til værforhold som ligger noe tilbake i tid. Lang periode med høye NAOI-verdier og mye nedbør kan gi økt grunnlag for lav pH og høy LAl, både pga fortynning og ved å vaske ut basekationer. De store forskjellene som framgår av **Tabell 4** bør gi grunnlag for å raffinere indeksene ytterligere.

8. Et historisk tilbakeblikk på fiskedødepisoder i Sør-Norge

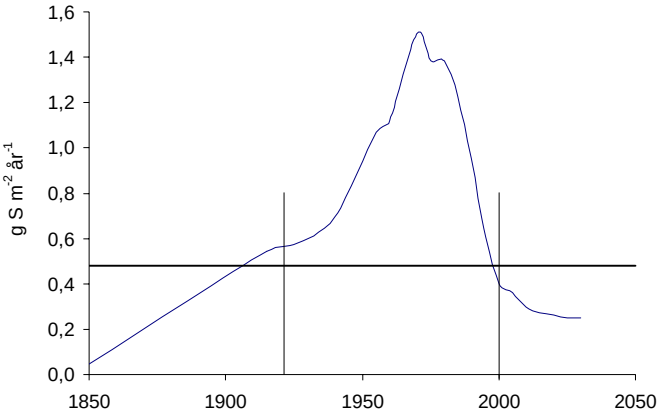
I denne rapporten er det påvist en klar sammenheng mellom den nordatlantiske svingning (NAO), nedbørepisoder med høyt innhold av sjøsalter og vannkjemiske effekter i elver. Hindar et al (1994) antyder at sjøsaltepisoder med fiskedød kan være det første tegn på økende forsuringsproblem i kystnære områder. Hindar et al (1993) antyder på samme måte at gjentatt fiskedød i Frafjordelva på 1920-tallet (Huitfeldt-Kaas 1922) kan ha sammenheng med effekter av nedbørepisoder med høyt innhold av sjøsalter. Vi vil forfølge denne hypotesen litt videre.

Registreringer og opplysninger om fiskedød i vassdrag i Sør-Norge foreligger tilbake til ca 1900, se bl.a. Huitfeldt-Kaas (1922) og Dahl (1921; 1926). Et vesentlig problem er at det foreligger svært lite vannkjemiske data for nedbør og elver fra første halvdel av 1900-tallet. Mylona (1993) har imidlertid beregnet svovelnedfallet for 5-års perioder i den såkalte Birkenesruten i Sør-Norge fra 1850 (**Figur 19**). Beregningene er utført med bakgrunn i utslippstall for Europa og fra modellberegninger. De gjør det mulig å antyde hvordan forsuringssituasjonen var like etter det forrige århundreskiftet. Vinterverdier for NAOI foreligger helt tilbake til 1823 (**Figur 20**), og kan nå brukes for å sannsynliggjøre frekvensen, styrken og effekten av sjøsaltepisoder. Data som ytterligere kan belyse forholdene ved en tidlig forsuringsfase kan hentes fra det såkalte RAIN (Reversing Acidification In Norway)-prosjektet. Her ble et nedbørfelt i Sogndal (lite påvirket av sur nedbør) tilført kunstig sur nedbør, som resulterte i sur avrenning med høyt innhold av labilt aluminium (Wright et al. 1988a). I et annet forsøk i Sogndal (Wright et al. 1988b) ble det tilsatt sjøsalt (NaCl) til et nedbørfelt med avrenning til en bekk. Også her fikk en avrenning med lav pH og høyt innhold av labilt aluminium. Disse forsøkene indikerer at selv med relativt lav tilførsel av sur nedbør kan avrenningsvannet bli surt og aluminiumsrikt når forholdene ligger til rette.

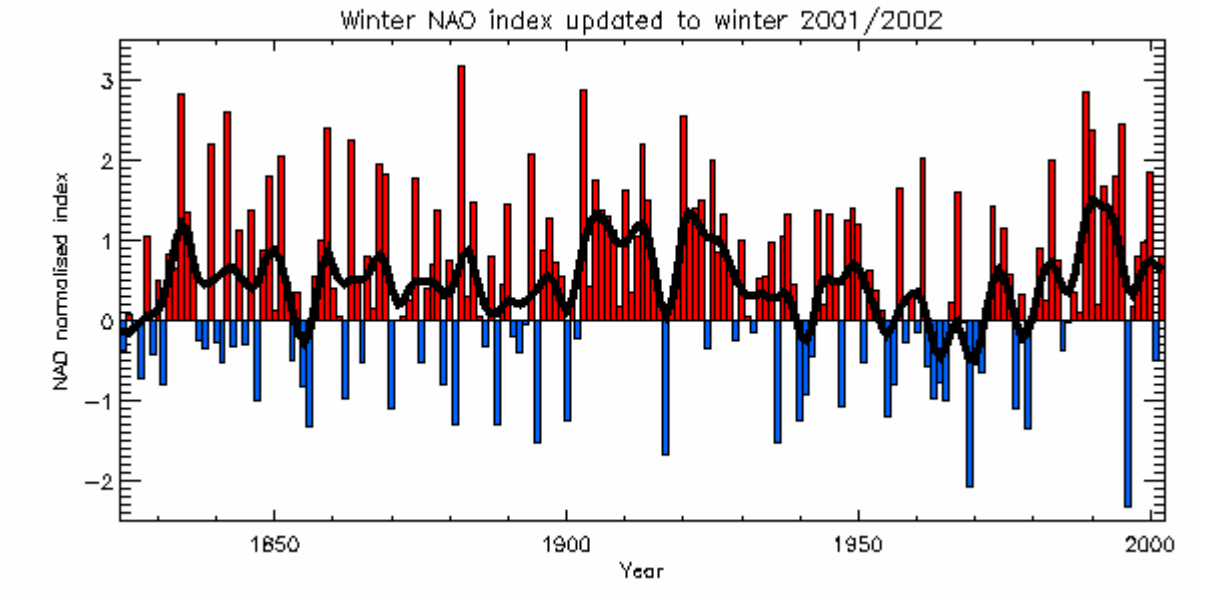
Huitfeldt-Kaas gir en grundig beskrivelse av forholdene i Frafjordelva høsten 1920: ”Efter en lang tør høst kom i november en sterk nedbørsperiode som bragte Frafjordelven til at svulme opp til en usedvanlig høy flom”. Han kom til den slutning at årsaken til fiskedøden skyldtes oksidasjon av svovel under tørkeperioden til svovelsyre som ble vasket ut under flommen. Huitfeldt-Kaas refererer til flere situasjoner med fiskedød i forbindelse med mye nedbør. Allerede i 1890 inntraff laksedød i Frafjordelva, om enn i mindre målestokk.

Knut Dahl beskriver i en artikkel ”Undersøkelser over ørretens utdøen i det sydvestlige Norges fjeldvand” (Dahl 1921), der han poengterer en regional utbredelse av ørretens tilbakegang meget lik den typiske utviklingen som er kjent gjennom SNSF-prosjektets beskrivelse av fiskedød: ”at fiskebestanden i de angjeldende vand uten forstaaelig grund svandt inn, indtil der kun var relativt faa og store fisk tilbake”. Han dokumenterte også en klar tilbakegang av utbyttet i Sørlandets lakseelver gjennom laksestatistikken for perioden 1903-1919, en nedgang på 20-60%. Dahl forklarte denne nedgangen med en regional utbredelse av en parasitt (Glukea). Han viste at parasitten sporadisk også forekom i andre deler av landet, ”Men bare i Sørlandets heiestrekninger, netop der hvor de særlige klager over ørretens bortdøen er fremkommet, har jeg funnet en epidemisk optræden av parasiten, som er tilstrekkelig til at forklare en voldsom eller total ødelæggelse av bestanden”. Dahl (1926) kom senere til at ikke alle tilfelle av dødelighet kunne skyldes glugeose. På denne tiden ble den kolorimetriske metode for måling av pH innført av Clark og Lubb (Atkins 1922). Dahl (1926) tok metoden i bruk og kom til at vannets surhet var en viktig faktor for fiskens velbefinnende. Sunde (1926) ga en beskrivelse av bakgrunnen for pH i en artikkel ”Surt vand dræper laks- og ørretyngel”, der han henviser til Dahls arbeide.

På den tiden Huitfeldt-Kaas og Dahl foretok sine undersøkelser viser beregninger at svoveldeposisjonen var på vei oppover (**Figur 19**) og at den omkring 1900-1920 kan ha vært på samme nivå som eller høyere enn i dag (Mylona ….; Posch et al. 2003). NAOI verdiene for et flertall av årene i perioden ca. 1900-1925 var høye (**Figur 20**) i forhold til perioden før og etter. Resultater fra denne rapporten sannsynliggjør at hyppigheten og styrken av sjøsaltepisoder var høyere enn vanlig i denne perioden. Det er derfor ikke urimelig å anta at elvene på den tiden var blitt forsuret på grunn av økende S-deposisjon, og at dette i samspill med hyppige sjøsaltepisoder har svekket fiskebestandene og også ført til fiskedød i episoder, slik det er beskrevet.



Figur 19. Svoveldeposisjon i Birkenes-ruta i EMEP-nettet i perioden 1850-2030 beregnet på basis av utslippstall i Europa og modellering av deposisjon. (Mylona 1996; Posch et al. 2003). De hjelpelinjene som vi har trukket indikerer at S-nedfallet i 1920 var større enn i 2000.



Figur 20. NAOI (vinterverdier; desember-mars) for perioden 1823-2002. Legg merke til perioder med positive indekser i årene etter 1900 (se tekst), at store deler av perioden 1950-1980 var preget av lave indekser (indikerer kalde vintre i Sør-Norge) og at perioden 1980-2000 var preget av høye indekser (milde vintre). Vinteren 1996 var spesielt kald, noe som reflekteres i svært lav NAOI (Kilde: http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm).

9. Diskusjon

Bakgrunnen for dette arbeidet er sjøsaltepisoders betydning for vannkvaliteten (surhet og giftighet for fisk) i vassdrag på Vestlandet og den sammenhengen det er mellom sjøsaltdeposisjon og værforhold. Værforholdene i Europa er koplet til den nordatlantiske svingning (NAO), og det var derfor av interesse å undersøke om det også var en sammenheng mellom dette klimatiske mønsteret og vannkvaliteten i vassdrag. En god sammenheng vil gi et bedre grunnlag for å si noe om effekten av klimatiske endringer på forsuringssituasjonen.

Vi har valgt å kople NAO-indeksen direkte til sjøsaltdeposisjon og vannkjemi i vassdragene, men kunne også valgt å gå veien via værforhold, uttrykt ved vindstyrke og nedbørmengder. Vår vurdering er imidlertid at sjøsaltdeposisjon målt som fluks (mengde per areal og tid) samtidig er et godt uttrykk for værforholdene. Høy fluks oppstår når både konsentrasjonen er høy og nedbørmengden stor.

Lange vannkjemiske dataserier for både nedbør og elver er tilgjengelige fra programmet for overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Data for tre laksevassdrag og to sidevassdrag er sammenstilt og analysert. Sulfatkonsentrasjonen er sterkt redusert i alle undersøkte vassdrag, også i Øyensåa i Nord-Trøndelag. Dette samsvarer godt med nedgangen i tilførsler fra atmosfæren. Løst, uorganisk Al (toksisk) mobiliseres og pH reduseres ved sjøsaltepisoder i alle undersøkte vassdrag. Sjøsaltepisoder framstår som en sterk drivkraft, nærmest avgjørende, for betydelig Al-mobilisering i enkelte vassdrag.

Reduksjonen i svoveldeposisjon de siste årene har vært sterk nok til å gi en klar reduksjon i konsentrasjonen av uorganisk aluminium i vassdragene. Selv om sjøsaltepisodene er jevnt fordelt i den undersøkte perioden, er det en klar reduksjon i uorganisk Al og en økning i pH også under episodene.

Svovelnedfallet er så sterkt redusert de siste 10-15 årene at det må skje en betydelig økning i styrken av sjøsaltepisoder i framtida for å gi like stor negativ effekt på vannkvalitet som f.eks. i 1989/1990. Endret forsuring kan derfor være viktigere enn eventuelle klimaendringer for vannets giftighet for fisk og andre forsuringsfølsomme organismer i kystnære vassdrag. Men dette gjenstår å undersøke.

Det er påvist en klar sammenheng mellom våtavsetning av sjøsalter, sjøsaltepisoder i vassdragene og den nordatlantiske svingning (NAO). Positive verdier av NAOI korrelerer godt med tilførsler av sjøsalter og med sjøsalteffekter i elvevann på Vestlandet og i Nord-Trøndelag. Basert på dynamikken i elvenes vannkvalitet som er vist for Sæta (**Figur 5**), kan det være enklere å finne gode korrelasjoner mellom NAOI og Cl, konduktivitet eller ikke-marin Na enn det er å finne gode sammenhenger mellom NAOI og pH eller labilt Al. For fire av de fem undersøkte vassdragene er det overveiende månedlig prøvetaking, og vi har vist at ukentlig prøvetaking gir langt bedre korrelasjoner. Når signifikante korrelasjoner likevel finnes, er det et uttrykk for at det er tett kopling mellom det nordatlantiske sirkulasjonsmønster, værforhold og negative effekter i vassdragene.

Samvariasjonen mellom den nordatlantiske svingning, våtavsetning og effekter i vassdragene er svakest for døgnlige verdier, noe som skyldes at den observerte NAOI (bestemt på basis av trykkforskjellen ved havnivå mellom Island og Azorene) ikke har umiddelbar innflytelse på værsituasjonen i Norge. Det er her ikke benyttet atmosfæriske transportmodeller for å vurdere adveksjonen og dannelsen av sjøsaltaerosolers innflytelse på observasjonsdataene. Ved å studere prosentilverdier for de ulike dataseriene kan en identifisere samvariasjoner i disse over tid, men en slik tilnærming vil ikke gi en god beskrivelse av de enkelte episoder. Prosentilverdiene gjør det imidlertid mulig på en enkel måte å studere samvariasjonen mellom dataserier med ulik tidsoppløsning. NAOI og sjøsalttilførsel er døgndata, mens største hyppighet for elvedataene er ukentlig.

Avvik fra den generelt gode koplingen mellom NAO og sjøsaltdeposisjon ved enkeltepisoden i mars 1997 er forklart. Her skjedde også sjøsaltdeposisjonen som resultat av kraftige vinder og nedbør, men opphavet til luftmassene var fra nordlig kant. Dette avviket er imidlertid ikke uventet fordi også andre typer værsituasjoner enn det mer typiske vestlandsværet, med sterke vinder fra sørvest, kan gi opphav til storm og sjøsaltdeposisjon.

Det er også slik at sjøsaltdeposisjon ikke behøver å framkalle dårlig vannkvalitet. Hindar et al. (1993; 1994) viste at det i forsurede områder ble mobilisert H^+ og Al-ioner for å kompensere for den mengden Na som ble adsorbert ved ionebytting i jorda. Men i mindre forsurede områder ble det midlertidige "tapet" av Na kompensert ved mobilisering av basekationer, særlig kalsium. Den vannkjemiske effekten bestod derfor i det vesentlige av fortynning pga mye vann, noe som i seg selv reduserer f.eks. ANC og pH. Dette betyr at menneskeskapt forsuring er en nødvendig tilleggsfaktor, mens Heath et al (1992) viste til at sur jord var tilstrekkelig for tilsvarende effekter i Maine, US. Også her var imidlertid pH i nedbøren svært lav; volumveid vintermiddel var pH 4.5. Resultatet for Øyensåa i Nord-Trøndelag er interessant i denne sammenheng fordi området er lite forsuret og mindre koplet til NAO på samme tid. Likevel er det funnet signifikante korrelasjoner mellom NAO, sjøsaltdeposisjon og vannkvalitet, samt en reduksjon i aluminium over tid, slik som i de andre vassdragene. Dette viser at den kombinerte effekten av svak forsuring og sjøsaltdeposisjon kan gi potensielt giftig vann så langt nord. Episodisk forsuring kan altså inntreffe i kystnære områder under slike forhold, svært parallelt til episodisk forsuring i en tidlig forsuringsfase, slik som er indikert i det historiske tilbakeblikket.

Den kanskje mest interessante nytten ved denne dokumenterte sammenhengen mellom NAOI og sjøsaltepisoder kan være større innsikt i hvordan framtidig forsuringssituasjon vil påvirkes gitt en økning i frekvens og styrke av storm og orkan langs kysten. Denne økningen er prognosert som resultat av de klimaendringer vi etter all sannsynlighet står midt oppe i og som vil forsterkes i årene framover. En tilsvarende økning i sjøsaltepisoder må påregnes, men vi har påvist at redusert svoveldeposisjon (mindre sulfat i vassdragene) reduserer forutsetningene for toksisk vann under slike episoder.

Vi tror at klimaindekser basert på flere trykksentra, f.eks. slik at den såkalte "Scandinavian blocking" tas hensyn til, kan være med å forbedre forklaringsgraden og dermed gi en enda bedre kopling mellom klima, deposisjon og vannkjemi i vassdrag. Dette bør undersøkes nærmere.

Data fra Storbritannia har vist at det også kan knyttes vannkjemiske forhold til høye negative NAOI-verdier. Høye konsentrasjoner av nitrat opptrer ved lave NAOI, noe som sammenfaller med kalde vintre, altså det motsatte av de forhold som frambringer sjøsaltepisoder. En foreløpig undersøkelse av data fra Trodøla viser at en slik sammenheng også kan gjelde for norske vassdrag. Dette kan ha betydning for trender i nitrogenavrenning og dermed for både forsuring og næringssalttilførsel til kystområdene.

10. Referanser

Atkins, W.R. 1922. Measurement of acidity and alkalinity of natural water in their biological relationship. Salmon and Trout Magazin.

Dahl, K. 1921. Undersøkelser over ørretens utdøen i det sydvestlige Norges fjeldvand. N.J. & F.F. tidsskrift. 249-267.

Dahl, K. 1926. Vannets surhetsgrad og dens virkninger på ørretyngel. N.J. & F.F. tidsskrift. 232-242.

Evans, C.D., Monteith, D.T. og Harriman, R. 2001. Long-term variability in the deposition of marine ions at west coast sites in the UK Acid Waters Monitoring Network: impacts on surface water chemistry and significance for trend determination. Sci. Total Environ. 265: 115-129.

Heath, R.H., Kahl, J.S. og Norton, S.A. 1992. Episodic stream acidification caused by atmospheric deposition of sea salts at Acadia National Park, Maine, United States. Water Resour. Res. 28: 1081-1088.

Hindar, A., Henriksen, A., Tørseth, K. og Lien, L. 1993. Betydningen av sjøsaltanriket nedbør i vassdrag og mindre nedbørfelt. Forsuring og fiskedød etter sjøsaltepisoden i januar 1993. NIVA, O-93129. 42 s.

Hindar, A., Henriksen, A., Tørseth, K. and Semb, A. 1994. Acid water and fish death. Nature 372: 327-328.

Hindar, A., Henriksen, A., Kaste, Ø., Tørseth, K. 1995. Extreme acidification in small catchments in southwestern Norway associated with a sea salt episode. Water, Air Soil Pollut. 85: 547-552.

Hindar, A. og Kroglund, F. 2000. Forsuringssituasjonen for laks i Vosso og vurdering av behov for ytterligere kalkingstiltak. NIVA-rapport 4255-2000. 41 s.

Hindar, A. og Skancke, L.B. 2001. Terrengkalking i Suldal-effekter på vannkvalitet før kalking, s. 62-69. I: Terrengkalkingsprosjektet. Årsrapporter 1998 og 1999. DN-notat 2001-1.

Hindar, A., Teien, H.-C., Salbu, B., Lierhagen, S. og Oug, E. 2000. Faktorer som påvirker aluminiumskjemien og dermed vannkvalitetsmålet for laks i Tovdal- og Mandalsvassdraget. NIVA-rapport 4229-2000. 81 s.

Huitfeldt-Kaas, H. 1922. Om aarsaken til massdød av laks og ørret i Frafjordelven, Helleelven og Dirdalselven i Ryfylke høsten 1920. Norsk Jæger Fiskerfor. Tidskr. 1/2: 37-44.

Hurrell, J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. Science 269: 676-679.

Marshall, J., Kushnir, Y., Battisti, D., Chang, P., Czaja, A., Dickson, R., McCartney, M., Saravanan, R., Visbeck, M. 2001. North Atlantic Climate Variability: phenomena, impacts and mechanisms. Inter. Jour. Climatology, vol.21, No.15: 1863-1898

Mylona, S. 1996. Sulphur dioxide emissions in Europe 1880-1991 and their effect on sulphur concentrations and depositions. *Tellus* 48B: 662-689.

Orsolini, Y.J. og Limpasuvan, V. 2001. The North Atlantic Oscillation and the occurrences of ozone miniholes. Geophys. Res. Lett., vol. 28, no. 21: 4099-4102.

Osborn, T.J., Briffa, K.R., Jones, P.D., Tett, S.F.B. og Schweingruber, F.H. 1998. Relationships between Euopean climate and the North Atlantic Oscillation: observations, models and paleodata. Final report for NERC, contract GR9/02522. (internettversjon).

Posch, M., Schöpp, W., Johansson, M. og Mylona, S. 2003. 151 years of S and N emissions and deposition in Europe (1880-2030). (Manuskript).

SFT 1999. Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Årsrapport-Effekter 1998. SFT-rapport 781/99. 240 s.

SFT 2001. Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. Årsrapport-Effekter 2000. SFT-rapport 834/2001. 197 s.

Stenseth, N.C., Mysterud, A., Ottersen, G., Hurrel, J., Chan, K.-S. og Lima, M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. Science 297: 1292-1296.

Sunde, S.E. 1926. Surt vand dræper laks- og ørretyngel. N.J. & F.F. tidsskrift. 121-124.

Sygna, L. og O'Brien K. 2001. Virkninger av klimaendringer i Norge. Oppsummering fra seminaret i Oslo 30.-31. oktober 2000. CICERO report 2001:1.

UN/ECE. 1994. Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution on Further Reduction of Sulphur Emissions. Document ECE/EB.AIR/40, United Nations Economic Commission for Europe, New York and Geneva. 106 s.

Wright, R.F., Lotse, E. og Semb, A. 1988a. Reversibility of acidification shown by whole-catchment experiments. Nature 334: 670-675.

Wright, R.F., Norton, S.A., Brakke, D.F. og Frogner, T. 1988b. Experimental verification of episodic acidification of freshwaters by sea-salts. Nature 334: 422-424.

Wright, R.F. og Henriksen, A. 1999. Gap closure: use of MAGIC model to predict time required to achieve steady-state following implementation of the Oslo protocol. NIVA-rapport 4012-99. 44 s.

Naturens Tålegrenser

Programmet Naturens Tålegrenser ble satt igang i 1989 i regi av Miljøverndepartementet. Programmet skal blant annet gi innspill til arbeidet med Nordisk Handlingsplan mot Luftforurensninger og til pågående aktiviteter under Konvensjonen for Langtransporterte Grensoverskridende Luftforurensninger (Genevekonvensjonen). I arbeidet under Genevekonvensjonen er det vedtatt at kritiske belastningsgrenser skal legges til grunn ved utarbeidelse av nye avtaler om utslippsbegrensning av svovel, nitrogen og hydrokarboner.

En styringsgruppe i Miljøverndepartementet har det overordnete ansvar for programmet, mens ansvaret for den faglige oppfølgingen er overlatt en arbeidsgruppe bestående av representanter fra Direktoratet for naturforvaltning (DN) og Statens forurensningstilsyn (SFT).

Arbeidsgruppen har for tiden følgende sammensetning:

Tor Johannessen - SFT
Andre Kammerud - SFT
Else Løbersli - DN
Steinar Sandøy – DN

Henvendelse vedrørende programmet kan rettes til:

Direktoratet for naturforvaltning
7485 Trondheim
Tel: 73 58 05 00

eller
Statens forurensningstilsyn
Postboks 8100 Dep
0032 Oslo 1
Tel: 22 57 34 00

Naturens Tålegrenser - Oversikt over utgitte rapporter

1 Nygaard, P. H., 1989. Forurensningers effekt på naturlig vegetasjon en litteraturstudie. Norsk institutt for skogforskning (NISK), Ås.

Uten nr. Jaworovski, Z., 1989. Pollution of the Norwegian Arctic: A review. Norsk polarinstitutt (NP), rapportserie nr. 55. Oslo.

2 Henriksen, A., Lien, L. & Traaen, T.S. 1990. Tålegrenser for overflatevann. Kjemiske kriterier for tilførsler av sterke syrer. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89210.

3 Lien, L., Henriksen, A., Raddum ,G. & Fjellheim, A. 1989. Tålegrenser for overflatevann. Fisk og evertebrater. Foreløpige vurderinger og videre planer. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89185.

4 Bølviken, B. & medarbeidere, 1990. Jordforsuringsstatus og forsuringsfølsomhet i naturlig jord i Norge. Norges geologiske undersøkelse (NGU), NGU-rapport 90.156. 2 bind (Bind I: Tekst, Bind II:Vedlegg og bilag).

5 Pedersen, H. C. & Nybø, S. 1990. Effekter av langtransporterte forurensninger på terrestriske dyr i Norge. En statusrapport med vekt på SO_2, NOx og tungmetaller. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Utredning 005.

6 Frisvoll, A. A., 1990. Moseskader i skog i Sør-Norge. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 018.

7 Muniz, I. P. & Aagaard, K. 1990. Effekter av langtransportert forurensning på ferskvannsdyr i Norge - virkninger av en del sporelementer og aluminium. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Utredning 013.

8 Hesthagen, T., Berger, H. M. & Kvenild, L. 1992. Fiskestatus i relasjon til forsuring av innsjøer. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Forskningsrapport 032.

9 Pedersen, U., Walker, S.E. & Kibsgaard, A. 1990. Kart over atmosfærisk avsetning av svovel- og nitrogenforbindelser i Norge. Norsk institutt for luftforskning (NILU), OR 28/90.

10 Pedersen, U. 1990. Ozonkonsentrasjoner i Norge. Norsk institutt for luftforskning (NILU), OR 28/90.

11 Wright, R. F., Stuanes, A. Reuss, J.O. & Flaten, M.B. 1990. Critical loads for soils in Norway. Preliminary assessment based on data from 9 calibrated catchments. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89153.

11b Reuss, J. O., 1990. Critical loads for soils in Norway. Analysis of soils data from eight Norwegian catchments. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89153.

12 Amundsen, C. E., 1990. Bufferprosent som parameter for kartlegging av forsuringsfølsomhet i naturlig jord. Universitetet i Trondheim, AVH (stensil).

13 Flatberg, K.I, Foss, B., Løken,A. & Saastad, S.M. 1990. Moseskader i barskog. Direktoratet for naturforvaltning (DN), notat.

14 Frisvoll, A.A., & Flatberg, K.I., 1990. Moseskader i Sør-Varanger. Norsk institutt for naturforskning (NINA) , Oppdragsmelding 55.

15 Flatberg, K.I., Bakken, S., Frisvoll, A.A., & Odasz, A.M. 1990. Moser og luftforurensninger. Norsk institutt for naturforskning (NINA) , Oppdragsmelding 69.

16 Mortensen, L.M. 1991. Ozonforurensning og effekter på vegetasjonen i Norge. Norsk landbruksforsk. 5:235-264.

17 Wright, R.F., Stuanes, A.O. & Frogner, T. 1991. Critical Loads for Soils in Norway Nordmoen. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89153.

18 Pedersen, H.C., Nygård, T., Myklebust, I. og Sæther, M. 1991. Metallbelastninger i lirype. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 71.

19 Lien, L., Raddum, G.G. & Fjellheim, A. 1991. Tålegrenser for overflatevann evertebrater og fisk. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Rapport 0-89185,2.

20 Amundsen, C.E. 1992. Sammenlingning av parametre for å bestemme forsuringsfølsomhet i jord. NGU-rapport 91.265.

21 Bølviken, B., R. Nilsen, J. Romundstad & O. Wolden. 1992. Surhet, forsuringsfølsomhet og lettløselige basekationer i naturlig jord fra Nord-Trøndelag og sammenligning med tilsvarende data fra Sør Norge. NGU-rapport 91.250.

22 Sivertsen, T. & medarbeidere. 1992. Opptak av tungmetaller i dyr i Sør-Varanger. Direktoratet for naturforvaltning, DN-notat 1991-15.

23 Lien, L., Raddum, G.G. & A. Fjellheim. 1992. Critical loads of acidity to freshwater. Fish and invertebrates. Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Rapport O-89185,3.

24 Fremstad, E. 1992. Virkninger av nitrogen på heivegetasjon. En litteraturstudie. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 124.

25 Fremstad, E. 1992. Heivegetasjon i Norge, utbredelseskart. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 188.

26 Flatberg, K.I. & Frisvoll, A. 1992. Undersøkelser av skader hos to sigdmoser i Agder. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 134.

27 Lindstrøm, E.A.1992. Tålegrenser for overflatevann. Fastsittende alger. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-90137/E-90440, rapport-2.

28 Brettum, P. 1992. Tålegrenser for overflatevann. Planteplankton. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-90137/E-90440, rapport-3.

29 Brandrud, T.E., Mjelde, M. 1992. Tålegrenser for overflatevann. Makrovegetasjon. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-90137/E-90440, rapport-1.

30 Mortensen, L.M. & Nilsen, J. 1992. Effects of ozone and temperature on growth of several wild plant species. Norwegian Journal of Agricultural Sciences 6: 195-204.

31 Pedersen, H.C., Myklebust, I., Nygård, T. & Sæther, M. 1992. Akkumulering og effekter av kadmium i lirype. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 152.

32 Amundsen, C.E. 1992. Sammenligning av relativ forsuringsfølsomhet med tålegrenser beregnet med modeller, i jord. Norges geologiske undersøkelse. NGU-rapport 92.294.

33 Frogner, T., Wright, R.F., Cosby, B.J., Esser, J.M., Håøya, A.-O. & Rudi, G. 1992. Map of critical loads for coniferous forest soils in Norway. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-91147.

34 Henriksen, A., Lien, L., Traaen, T.S. & Taubøll, S. 1992. Tålegrenser for overflatevann - Kartlegging av tålegrenser og overskridelser av tålegrenser for tilførsler av sterke syrer. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89210.

35 Lien, L. Henriksen, A. & Traaen, T.S. 1993. Tålegrenser for sterke syrer på overflatevann -Svalbard. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-90102.

36 Henriksen, A., Hesthagen, T., Berger, H.M., Kvenild, L., Taubøll, S. 1993. Tålegrenser for overflatevann - Sammenheng mellom kjemisk kriterier og fiskestatus. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-92122.

37 Odasz, A.M., Øiesvold, S., & Vange, V. 1993. Nitrate nutrition in *Racomitrium lanuginosum* (Hedw.)Brd., a bioindicator of nitrogen deposition in Norway. Direktoratet for naturforvaltning. Utredning for DN 1993-2.

38 Espelien, I.S. 1993. Genetiske effekter av tungmetaller på pattedyr. En kunnskapsoversikt. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Utredning 051.

39 Økland, J. & Økland, K.A. 1993. Database for bioindikatorer i ferskvann - et forprosjekt . Laboratorium for ferskvannsøkologi og innlandsfiske (LFI), Zoologisk Museum, Oslo, Rapport 144, 1993.

40 Aamlid, D. & Skogheim, I. 1993. Nikkel, kopper og andre metaller i multer og blåbær fra Sør-Varanger, 1992. Rapport Gkogforsk 14/93. 14/93.

41 Kålås, J.A., Ringsby, T.H. & Lierhagen, S. 1993. Metals and radiocesium in wild animals from the Sør-Varanger area, north Norway. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 212.

42 Fløisand, I. & Løbersli, E. (red.)1993. Tilførsler og virkninger av lufttransporterte forurensninger (TVLF) og Naturens tålegrenser. Sammendrag av foredrag og postere fra møte i Stjørdal, 15.-17.februar 1993. Norsk institutt for luftforskning (NILU), OR 17/93.

43 Henriksen, A. & Hesthagen, T. 1993. Critical load exceedance and damage to fish populations. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-89210.

44 Lien, L., Henriksen, A. & Traaen, T.S. 1993. Critical loads of acidity to surface waters, Svalbard. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-90102.

45 Løbersli, E., Johannessen, T. & Olsen, K.V (red.) 1993. Naturens tålegrenser. Referat fra seminar i 1991 og 1992. Direktoratet for naturforvaltning, DN-notat 1993-6.

46 Bakken, S. 1993. Nitrogenforurensning og variasjon i nitrogen, protein og klorofyllinnhold hos barskogsmosen blanksigd (*Dicranum majus*). Direktoratet for naturforvaltning (DN). Utredning for DN 1994-1.

47 Krøkje, Å. 1993. Genotoksisk belastning i jord . Effektstudier, med mål å komme fram til akseptable grenser for genotoksisk belastning fra langtransportert luftforurensning. Direktoratet for naturforvaltning (DN). Utredning for DN 1994-2.

48 Fremstad, E. 1993. Heigråmose (*Racomitrium lanuginosum*) som indikator på nitrogenbelastning. Norsk i nstitutt for naturforskning (NINA) Oppdragsmelding 239.

49 Nygaard, P.H. & Ødegaard, T.H. 1993. Effekter av nitrogengjødsling på vegetasjon og jord i skog. Rapport Skogforsk 26/93.

50 Fløisand, I. og Johannessen, T. (red.) 1994. Langtransporterte luftforurensninger. Tilførsler, virkninger og tålegrenser. Sammendrag av foredrag og postere fra møte i Grimstad, 7.-9.3.94. Norsk institutt for luftforskning NILU OR: 17/94

51 Kleivane, L. Skåre, J.U. & Wiig, Ø. 1994. Klorerte organiske miljøgifter i isbjørn. Forekomst, nivå og mulige effekter. Norsk Polarinstitutt Meddelelse nr. 132.

52 Lydersen, E., Fjeld, E. & Andersen, T. 1994. Fiskestatus og vannkjemi i norske innsjøer. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) O-93172

53 Schartau, A.K.L. (red.) 1994. Effekter av lavdose kadmium-belastning på littorale ferskvanns-populasjoner og -samfunn. Norsk institutt for naturforskning (NINA) Forskningsrapport 055.

54 Mortensen, L. (1994). Variation in ozone sensitivity of *Betula pubescens* Erh. from different sites in South Norway. Direktoratet for naturforvaltning (DN). Utredning for DN, Nr. 1994-6.

55 Mortensen, L. (1994). Ozone sensitivity of *Phleum alpinum* L. from different locations in South Norway. Direktoratet for naturforvaltning (DN). Utredning for DN, Nr. 1994-7.

56 Frogner, T., Wright, R.F., Cosby, J.B. and Esser, J.M. (1994). Maps of critical loads and exceedance for sulfur and nitrogen to forest soils in Norway. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) O-91147.

57 Flatberg, K.I. & Frisvoll, A.A. 1994. Moseskader i Agder 1989-92 (1994). Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 298.

58 Hesthagen, T. & Henriksen, A. (1994). En analyse av sammenhengen mellom overskridelser av tålegrenser for overflatevann og skader på fiskebestander. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 288.

59 Skåre, J.U., Wiig, Ø. & Bernhoft, A. (1994). Klorerte organiske miljøgifter; nivåer og effekter på isbjørn. Norsk Polarinstitutt Rapport nr. 86 - 1994.

60 Tørseth, K. & Pedersen, U. 1994. Deposition of sulphur and nitrogen components in Norway. 1988-1992. Norsk institutt for luftforskning (NILU): OR 16/94.

61 Nygaard, P.H. 1994. Virkning av ozon på blåbær (*Vaccinium myrtillus*), etasjehusmose (*Hylocomium splendens*), furumose *(Pleurozium schreberi*) og krussigd (*Dicranum polysetum*). Rapport Skogforsk 9/94.

62 Henriksen, A. & Lien, L. 1994. Tålegrenser for overflatevann: Metode og usikkerheter. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-94122.

63 Hilmo, O. & Larssen, H.C. 1994. Morfologi hos epifyttisk lav i områder med ulik luftkvalitet. ALLFORSK Rapport 2.

64 Wright, R.F. 1994. Bruk av dynamiske modeller for vurdering av vann- og jordforsuring som følge av redusert tilførsel av sur nedbør. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), O-94112.

65 Hesthagen, T., A. Henriksen & Kvenild, L. 1994. Overskridelser av tålegrenser for overflatevann og skader på fiskebestander i norske innsjøer med spesiell vekt på Troms og Finnmark. Norsk institutt for naturforskning (NINA), Oppdragsmelding 298.

66 Sagmo Solli, I.M, Flatberg, K.I.F., Söderström, L., Bakken S. & Pedersen, B. 1996. Blanksigd og luftforurensningsstudier. NTNU. Vitenskapsmuseet. Rapport botanisk serie 1996-1.

67 Stuanes, A. & Abrahamsen, G. 1996. Tålegrenser for nitrogen i skog - en vurdering av kunnskapsgrunnlaget. Aktuelt fra Skogforsk 7-96.

68 Ogner, G. 1995. Tålegrenser for skog i Norge med hensyn til ozon. Aktuelt fra Skogforsk 3-95.

69 Thomsen, M., Nellemann, C. Frogner, T., Henriksen A., Tomter, S. & Mulder, J. 1995. Tilvekst og vitalitet for granskog sett i relasjon til tålegrenser og forurensning. Rapport fra Skogforsk 22-95.

70 Tomter, S. M. & Esser, J. 1995. Kartlegging av tålegrenser for nitrogen basert på en empirisk metode. Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (NIJOS). Rapport nr 10/95.

71 Pedersen, H.Chr. (red.). 1995. Kadmium og bly i lirype: akkumulering og cellulære effekter. Stiftelsen for naturforskning og kulturminneforskning (NINA-NIKU) Oppdragsmelding 387

72 Bakken, S. & Flatberg, K.I.F. 1995. Effekter av økt nitrogendeposisjon på ombrotrof myrvegetasjon. En litteraturstudie. ALLFORSK Rapport 3.

73 Sogn, T.A., Stuanes, A.O. & Abrahamsen, G. 1995. Akkumulering av nitrogen - en kritisk parameter for beregning av tålegrenser for nitrogen i skog. Rapport fra Skogforsk 21/95.

74 Nygaard, P.H. & Eldhuset, T. 1996. Forholdet mellom basekationer og aluminium i jordløsning som kriterium for tålegrenser i skogsjord. Norsk institutt for skogforskning (NISK). Rapport fra Skogforsk 1/96

75 Mortensen, L. 1993. Effects of ozone on growth of several subalpine plant species. Norw. J. Agric. Sci. 7: 129-138.

76 Mortensen. L. 1994. Further studies on the effects of ozone concentration on growth of subalpine plant species. Norw. J. Agric. Sciences 8:91-97.

77 Fløisand, I. & Løbersli, E. (red.) 1996. Lufttransporterte forurensninger - tilførsler, virkninger og tålegrenser. Norsk institutt for luftforskning (NILU) OR 2/96.

78 Thomsen, M.G., Esser; J., Venn, K. & Aamlid, D. 1996. Sammenheng mellom trærs vitalitet og næringsstatus i nåler og humus på skogovervåkingsflater i Sørøst-Norge (in prep).

79 Tørseth, K., Mortensen, L. & Hjellbrekke, A.-G. 1996. Kartlegging av bakkenær ozon etter tålegrenser basert på akkumulert dose over 40 ppb. Norsk institutt for luftforskning (NILU) OR 12/96.

80 Esser, J.M. & Tomter, S.M. 1996. Reviderte kart for tålegrenser for nitrogen basert på empriske verdier for ulike vegetasjonstyper. Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (NIJOS).

81 Henriksen, A. , Hindar; A., Styve, H., Fjeld, E. & Lien, L. 1996. Forsuring av overflatevann, beregningsmetodikk, trender og mottiltak. Norsk institutt for vannforskning (NIVA). Rapport LNR 3528-96.

82 Henriksen, A., Hesthagen, T. & Fjeld, E. 1996. Overskridelser av tålegrenser for overflatevann og skader på fiskebestander. Norsk institutt for vannforskning (NIVA). Rapport LNR 3565-96.

83 Wright, R. F., Raastad, I.A., & Kaste, Ø. 1996. Atmospheric deposition of nitrogen, runoff of organic nitrogen, and critical loads for soils and waters. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 3592-97

84 Mortensen, L.M. 1995. The influence of ozone pollution on growth of young plants of Betula pubescens Ehrh. And Phleum alpinum L. Dose-response relations. Norw. J. Agr. Sci. 9:249-262

85 Mortensen, L.M. 1996. Ozone senistivity of Betula pubescens at different growth stages after budburst in spring. Norw. J. Agr. Sci. 10:187-196.

86 Tørseth, K., Rosendahl, K.E., Hansen, A.C., Høie, H. & Mortensen, L.M. 1997. Avlingstap som følge av bakkenært ozon. Vurderinger for perioden 1989-1993. SFT-rapport.

87 Rognerud, S, Hognve, D. & Fjeld, E. 1997. Naturlige bakgrunnskonsentrasjoner av metaller. Kan amosfæriske avsetninger påvirke metall-konsentrasjoner slik at det ikke reflekterer berggrunnens geokjemi? Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Rapport LNR 3670-97

88 Skjelkvåle, B.L., Wright, R.F. & Tjomsland, T. 1997. Vannkjemi, forsuringsstatus og tålegrenser i nasjonalparker; Femundsmarka og Rondane. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Rapport LNR 3646-97.

89 Nordbakken; J.-F. 1997. Småskalaendringer i ombrotrof myrvegetasjon i SØ-Norge 1990/91-96. Botanisk Hage og Museum, Univ. Oslo Rapp. 1

90 Sogn, T.A., Kjønnås, J., Stuanes, A.O., & Abrahamsen, G. 1997. Akkumulering av nitrogen - variasjoner avhengig av bestandsutvikling, nitrogentilførsel og simulert snødekke. Norges Landbrukshøgskole, Institutt for jord- og vannfag, Rapport nr. 10/97.

91 Nygaard, P.H., Ødegård, T. & Flatberg, K.I.F. Vegetasjonsendringer over 60 år i fattig skog- og myrvegetasjon i Karlshaugen skogreservat. Skogforsk (in prep)

92 Knutzen, J., Gabrielsen, G.W., Henriksen, O.E., Hylland, K., Källqvist, T. Nygård, T., Pacyna, J.S. Skjegstad, N. & Steinnes, E. 1997. Assessment of the applicability for pollution authorities ofthe concept “critical load” of long-range transported micrpollutants in relation to aquatic an terrestrial ecosystems. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 3751-97.

93 Tørseth, K. & Semb, A. 1997. Deposition of major inorganic components in Norway 1992-1996. Norsk institutt for luftforskning (NILU), OR 67/97.

94 Henriksen, A. 1998. Application of the first order acicvity balance (FAB) model to Norwegian surface waters. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 3809-98

95 Sogn, T.A. & Wright, R.F. 1998. The model MERLIN applied to Nordmoen, Norway. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 3844-98

96 Skjelkvåle, B.L. & A. Henriksen, 1998. Vannkjemi, forsuringsstatus og tålegrenser i nasjonalparker; Hardangervidda. Norsk institutt for vannforskning (NIVA). Report SNO 3895-98

97 Henriksen, A. 1998. Binding grid cells – Norway. An evaluation. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 3942-98

98 Lükewille, A. & A. Semb. 1998. Deposition in Norwegian Mountain areas. Norsk institutt for luftforskning (NILU) OR 66/97

99 Strand, L.T., Stuanes, A.O. & G. Abrahamsen. 1998. Akkumulering av karbon og nitrogen i unge jordsmonn. Institutt for jord og vannfag, rapport nr 9/98.

100 Wright, R.F. & Henriksen, A. 1999. Gap closure; use of MAGIC model to predict time required to achieve steady-state following implementation of the Oslo protocol. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 4012-99

101 Henriksen, A. 1999. Tålegrenser i fjellområder. Hva vet vi og hva bør vi vite? Rapport fra seminar 16.-17. Februar 1999. Rondablikk Føyfjellshotell. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Rapport LNR 4017-99

102 Wright, R.F. 1999. Risk of N leaching from forests to surface waters in Norway. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 4038-99

103 Wright, R.F., Mulder, J. & Esser, J.M., 1999. Soils in mountain uplands regions of southwestern Norway: nitrogen leaching and critical loads. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Report SNO 4130-99

104 Lindstrøm, E.A., Kjellberg, G. & Wright, R.F. 1999. Tålegrensen for nitrogen som næringsstoff i norske fjellvann: økt "grønske"? Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Rapport LNR 4187-2000

105 Thomsen, M.G. & Nellemann, Chr. 2000. Mortalitet og tilvekst i relasjon til forurensningsbelastningen i Sør Norge 1920-2000 (under trykking)

106 Henriksen, A & Buan, A.K. 2000. Tålegrenser og overskridelse av tålegrenser for overflatevann, skogsjord og vegetasjon i Norge. Norsk institutt for vannforskning (NIVA). Rapport LNR 4179-2000

107 Aarrestad, P.A. & Vandvik, V. 2000. Vegetasjonsendringer i vestnorsk kystlynghei - effekter av skjøtselsformene brann og sauebeite ved rehabilitering av gammel lynghei på Lurekalven i Hordaland. - NINA fagrapport 044.

108 Oredalen, J.T. & Aas, W. 2000. Vurdering av atmosfærisk fosforavsetning i sørøst-Norge. Norsk institutt for vannforskning Rapport LNR 4310-2000.

109 Bruteig, I., Thomsen, M.G. & Altin, D. 2001. Vekstrespons hos tre aerofyttiske algar på tilførsel av nitrogen. NINA oppdragsmelding 680. (*Rapporten er feilnummerert og har fått nummer 108)*

110 Sogn; T.A., Mulder, J., Haugen, L.E., Berge, G., Rustad, K.B. & Stuanes, A. 2001. N-omsetning i hei-/fjellområder: En første tilnærming til dynamiks modellering av N-omsetningen. Institutt for jord- og vannfag, Norges landbrukshøgskole. Rapport nr 11/2001.

111 Kroglund, F., Wright, R.F. & Burchart, C. 2001. Acidification and Atlantic salmon: critical limits for Norwegian rivers. Norwegian Institute for Water Research Report No O-20191

112 Lindstrøm, E.A. 2001. Økt plantevekst i uberørt fjellvann: et samspill mellom langtransporterte forurensninger og klima. Norsk institutt for vannforskning. Rapport LNR 4459-2001.

113 Larssen; T.; Clarke, N., Tørseth, K. & Skjelkvåle, B.L. 2002. Prognosis for future recovery from acidification of water, soils and forests: Dynaic modelling of Norwegina data from ICP Forests, ICP IM and ICP Waters. Norsk institutt for vannforskning. Report no. O-21172

114 Hindar, A. Tørseth, K., Henriksen, A. & Orsolini, Y. 2002. Betydningen av den nordatlantiske svingning (NAO) for sjøsaltepisoder og forsuring i vassdrag på Vestlandet og i Trøndelag. Norsk institutt for vannforskning. Rapport LNR 4592-2002

Henvendelser vedrørende rapportene rettes til utførende institusjon