



Statens vegvesen

# Salt SMART Vegsalt i innsjøer

Tålegrenser mht kjemisk sjiktning

Statens vegvesens rapporter

Nr. 120



Vegdirektoratet  
Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen  
Miljøseksjonen  
Mai 2012



### Tittel

Salt SMART  
Vegsalt i innsjøer

### Undertittel

Tålegrenser mht kjemisk sjiktning

### Forfatter

Ståle Haaland, Stein Turtumøygard, Lars  
Jakob Gjemlestad & Thor Endre Nytrø

### Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

### Seksjon

Miljøseksjonen

### Prosjektnummer

601945

### Rapportnummer

Nr. 120

### Prosjektleder

Kjersti Wike Kronvall

### Godkjent av

Kjersti Wike Kronvall

### Emneord

Vegsalt, innsjø, kjemisk sjiktning

### Sammendrag

Ionekomposisjon og tetthet i innsjøer vil i større eller mindre grad påvirkes av vegsalting. Det er et behov for bedre å forstå betydningen av disse tilførselene opp i mot innsjøers kjemiske sjiktning. Denne rapporten diskuterer innsjøers tålegrense mht kjemisk sjiktning i norske innsjøer sør for Saltfjellet. En del fysiske og kjemiske faktorer blir diskutert.

Foto: Kjell Wold. E18 Longumvann, Arendal

### Title

Salt SMART  
Road salt in lakes

### Subtitle

Threshold limits regarding chemical stratification

### Author

Ståle Haaland, Stein Turtumøygard, Lars  
Jakob Gjemlestad & Thor Endre Nytrø

### Department

Traffic safety, Environment and Technology  
Department

### Section

Environmental Assessment Section

### Project number

601945

### Report number

No. 120

### Project manager

Kjersti Wike Kronvall

### Approved by

Kjersti Wike Kronvall

### Key words

Road salt, lake, chemical stratification

### Summary

The ionic composition and density of lake water might be affected by roadsalt. In this context, we need a better understanding of different lake's threshold limits regarding changed density and changes in chemical stratification dynamics. This report discusses some physical and chemical factors affecting this threshold limit for Norwegian lakes, south of Saltfjellet.

Photo: Kjell Wold. E18 Longumvann, Arendal



# Forord

---

Resultatene som presenteres i denne rapporten er en del av forsknings- og utviklingsprosjektet Salt SMART. Målet for Salt SMART har vært at Statens vegvesens innsats for å opprettholde framkommelighet og trafikksikkerhet om vinteren ikke skal gi uakseptabel skade på miljøet. Bruk av vegsalt kan skade innsjøer, grunnvann, vegetasjon og økosystemer langs det saltede vegnettet. Undersøkelser viser at tilførsler av vegsalt kan føre til saltsjiktning, noe som kan gi oksygenfattig, stagnerende bunnvann. I Salt SMART er det laget miljøsonkart hvor det er gjort en risikovurdering av det saltede vegnettet i forhold til hvor vegsalt kan skade miljøet. I denne forbindelsen har det vært behov for å bestemme innsjøers tålegrense for vegsalt, før det dannes saltsjiktning. I denne rapporten er det foreslått en metode for å bestemme innsjøers tålegrense før det dannes saltsjiktning i norske innsjøer sør for Saltfjellet. Betydningen av fysiske og kjemiske faktorer for sjiktdannelse har blitt diskutert.

Rapporten og arbeidet er i sin helhet skrevet og utført av Bioforsk ved Ståle Haaland, Stein Turtumøygard, Lars Jakob Gjemlestad og Thor Endre Nytrø. Ståle Haaland har vært prosjektleder. Oppdragsgiver hos Statens vegvesen har vært Kjersti Wike Kronvall.



<p><i>Tittel/Title:</i>  <b>Vegsalt i innsjøer</b>  <b>Tålegrense mht kjemisk sjiktning</b></p>
<p><i>Forfatter(e)/Author(s):</i>          Ståle Haaland, Stein Turtumøygard, Lars Jakob Gjømlestad          &amp; Thor Endre Nytrø</p>

<i>Dato/Date:</i> 22.11.2011	<i>Tilgjengelighet/Availability:</i> Åpen	<i>Prosjekt nr./Project No.:</i> -	<i>Saksnr./Archive No.:</i> -
<i>Rapport nr./Report No.:</i> 6(130) 2011	<i>ISBN nr./ISBN-no:</i> 978-82-17-00860-6	<i>Antall sider/Number of pages:</i> 23	<i>Antall vedlegg/Number of appendices:</i> 1
<i>Oppdragsgiver/Employer:</i> Statens Vegvesen		<i>Kontaktperson/Contact person:</i>	
<i>Stikkord/Keywords:</i> Vegsalt, innsjø, kjemisk sjiktning Roadsalt, lake, chemical stratification		<i>Fagområde/Field of work:</i> Limnologi, Hydrologi Limnology, Hydrology	
<i>Sammendrag:</i> Ionekomposisjon og tetthet i innsjøer vil i større eller mindre grad påvirkes av vegsalting. Det er et behov for bedre å forstå betydningen av disse tilførselene opp i mot innsjøers kjemiske sjiktning. Denne rapporten diskuterer innsjøers tålegrense mht kjemisk sjiktning i norske innsjøer sør for Saltfjellet. En del fysiske og kjemiske faktorer blir diskutert.			
<i>Summary:</i> The ionic composition and density of lake water might be affected by roadsalt. In this context, we need a better understanding of different lake's threshold limits regarding changed density and changes in chemical stratification dynamics. This report discusses some physical and chemical factors affecting this threshold limit for Norwegian lakes, south of Saltfjellet.			
<i>Land/Country:</i>	Norge/Norway		
<i>Fylke/County:</i>	-		
<i>Kommune/Municipality:</i>	-		
<i>Sted/Lokalitet:</i>	Norge sør for Saltfjellet/Norway south of Saltfjellet		

Godkjent / Approved

Prosjektleder / Project leader




Per Stålnacke

Ståle Haaland





# Innhold

---

1. Innledning .....	3
2. Metode .....	5
3. Resultater .....	8
4. Diskusjon og konklusjon .....	20
Referanser .....	22
Vedlegg.....	24

# 1. Innledning

---

I forbindelse med salting av veger, har en rekke innsjøer i Norge fått tilført ekstra mengder natriumklorid (NaCl) (Amundsen m.fl. 2008, Bækken & Haugen 2006, Kjensmo 1997). Klorid er som et konservativt element å regne, og transporteres lett videre ut til innsjøer uten nevneverdig retensjon i nedbørfeltet (klorid tas ikke særlig opp av biota, holdes ikke særlig igjen i jordsmonn, osv., men kan som andre elementer magasineres i grunnvann, snø, osv.). Ionekomposisjon og tetthet i innsjøer vil i større eller mindre grad påvirkes av dette, og det er derfor et behov for bedre å forstå betydningen av tilførsler av vegsalt opp i mot innsjøers kjemiske sjiktning.

Innsjøer har en naturlig variasjon i vannkvalitet via ulike depositionsmonster og nedbørfeltkarakteristika. Innsjøer lokalisert nær kysten og innsjøer med marine sedimenter, vil ofte ha en ionesammensetning med markante innslag av sjøsalter (hovedsakelig natrium og klorid) (Haaland m.fl. 2010). Andre innsjøer kan ha store tilførsler av for eksempel karbonatforbindelser eller organisk materiale fra nedbørfeltet (Haaland m.fl. 2010, jfr. fig. 1). God vertikal sirkulasjon av vannmassene er viktig for utveksling av salter og gasser mellom topp- og bunnsjikt i innsjøer, hvorav høstsirkulasjonen ofte er den mest markante (for eksempel Golterman m.fl. 1975, Monismith & MacIntyre 1990). God vertikal sirkulasjon begrenser dermed problemer relatert til opphopning av ioner i bunnsjiktet (for eksempel fra vegsalting) (Einsele 1936, Grøterud & Haaland 2009, Mortimer 1941, Wetzel 2001). Hvor god sirkulasjonen er, avhenger av innsjøens geografiske beliggenhet (temperatur, nedbørsmønster, innsjøens ionekomposisjon, etc.), vindpåvirkning (areal, form og stabiliserende moment, islegging, dekningsgrad, etc.) og innsjøvannets oppholdstid og gjennomstrømning (hydrologisk regime og hypsografisk kurve, etc.).

Det er stor usikkerhet i beregninger av en tålegrense mht kjemisk sjiktning for innsjøer. Ofte er datagrunnlaget spinkelt og dybdekart mangler for de fleste innsjøer. Beregning av dybdeprofiler og tyngdepunkt via hypsografisk kurve, kan være usikkert. Det hydrologiske regimet (avrenningsmønsteret) i de respektive nedbørfeltene, vil variere på grunn av årlige og til dels store variasjoner i klima. Mikrometeorologiske data på for eksempel vind og nedbørmengder, er vanskelig å få tak i for alle innsjøer. Vi har valgt å gjøre vurderinger med bruk av data som er tilgjengelig for alle innsjøene.



Fig. 1. Eksempel på ulike typer innsjøer i Norge, basert på data fra midt på 1990-tallet. Hvite sirkler er innsjøer der sulfater ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) var dominerende anion. Sorte sirkler er innsjøer der klorider ( $\text{Cl}^-$ ) var dominerende. Grå sirkler er innsjøer som ligger noe lenger fra havet og over marin grense, men med en del uorganisk bufferkapasitet i nedbørfeltet. Her dominerer karbonater ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) i innsjøene. I dag har flere av sulfatsjøene blitt kloridsjøer eller karbonatsjøer, etter at deponeringen av sur nedbør har avtatt. Fig. fra Haaland m.fl. 2010.

## 2. Metode

---

Ut i fra et datasett for innsjøer prøvetatt i topp- og bunnsjikt, levert av Statens Vegvesen og beskrevet nærmere i Bækken og Haugen (2006), har vi på en enkel måte estimert en generell tålegrense for innsjøer mht ioneinnhold og kjemisk sjiktning. Tålegrense ble satt ut i fra kloridkonsentrasjon i toppsjikt, i innsjøer der klorider dominerer, dvs utgjør hovedbestanddelen av innsjøens totale innhold av ioner. Vi har benyttet oss av en operasjonell definisjon for kjemisk sjiktning i forbindelse med bruk av vegsalt, der det sies å være kjemisk sjiktning i en innsjø dersom konsentrasjonen av klorid i innsjøens bunnsjikt er  $> 10$  mg/l høyere enn i innsjøens toppsjikt ved høstsirkulasjon, jfr. Bækken og Haugen (2006).

Med bakgrunn i det samme datasettet, har vi også laget en enkel metodikk for grovt å kunne beregne bakgrunnskonsentrasjon av klorid for sjøsaltpåvirkede innsjøer. Dette ble gjort ut i fra regresjoner mellom innsjøens beliggenhet med hensyn til meter over havet, under marin grense, samt avstand til hav. Vi har videre, på bakgrunn av de innsjøene som er sjiktet, gitt et overslag for tålegrense mht kjemisk sjiktning, som videre har blitt vektet med hensyn til fysiske og kjemiske egenskaper til innsjøene; tålegrense  $\cdot K_{\text{fysisk}} \cdot K_{\text{kjemisk}}$ .  $K_{\text{fysisk}}$  er en funksjon av vindens arbeid og den hydrauliske belastning på innsjøen. For innsjøer der andre ioner enn sjøsalter bidrar vesentlig til det totale ionebudsjettet, har vi lagt inn en korreksjon ( $K_{\text{kjemisk}}$ ). Disse ionene vil på samme måte som sjøsalter påvirke innsjøens sirkulasjonsegenskaper (jfr. fig. 2-5). Denne korreksjonen har blitt gjort for områder med høyere konsentrasjoner av karbonater. Sulfater og nitrater vil også variere i konsentrasjon mellom innsjøer, men på dette presisjonsnivået anses de å være av underordnet betydning, både fordi de generelt i dag forekommer i vesentlig lavere konsentrasjon enn tidligere (jfr. fig. 3), og også fordi de vil variere i konsentrasjon i mindre grad enn klorider og karbonater mellom innsjøer på (jfr. Haaland m.fl. 2010). Korreksjonen ( $K_{\text{kjemisk}}$ ) kunne ha vært lagt inn i beregningen for bakgrunnskonsentrasjon av ioner i innsjøene, eller i beregningen av tålegrense for kjemisk sjiktning. Vi valgte, på grunn av en begrenset mengde data, det siste alternativet.

Tålegrense mht kjemisk sjiktning = Beregnet tålegrense  $\cdot K_{\text{kjemisk}} \cdot K_{\text{fysisk}}$ .

Tålegrensen kan så videre sees i sammenheng med innsjøens naturlige innhold av sjøsalter og tilførsler av vegsalt (jfr. fig. 4). Mer enn 30000 innsjøer har blitt undersøkt og beregning av vegsalttilførsler er tidligere beskrevet i Kitterød m.fl. (2010).

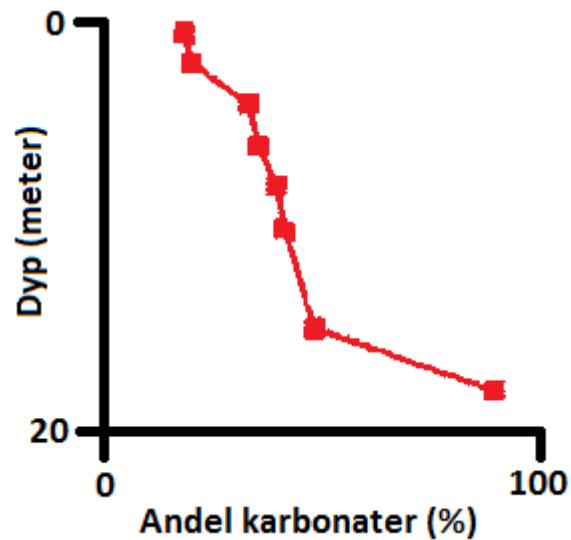


Fig. 2. Andel kalsiumkarbonat i en innsjø etter kalking. Denne innsjøen hadde i utgangspunktet naturlig lav konsentrasjon av både kalsium og karbonater. Det er med andre ord også andre antropogene kilder enn klorider fra vegsalt som historisk har påvirket den kjemiske sjiktning av norske innsjøer. Etter Grøterud og Haaland (2010).

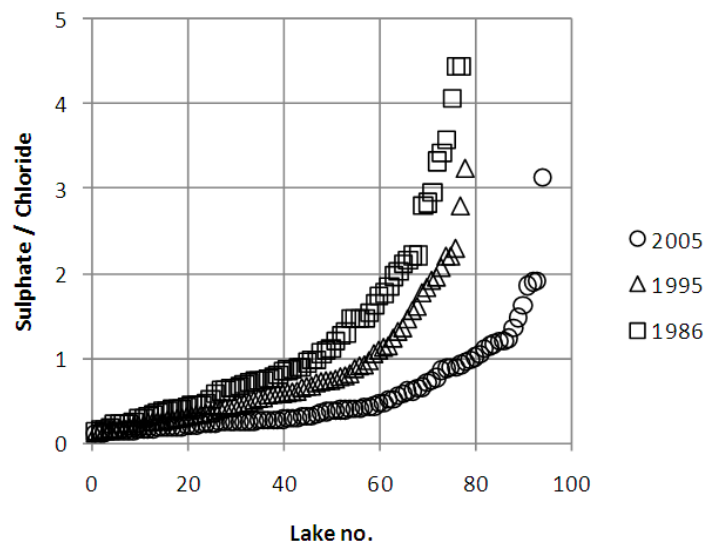


Fig. 3. Endring i anionekomposisjon, hovedsakelig via en stadig mindre dominans av sulfater i norske innsjøer etter avtaket i deponering av sur nedbør. Data fra overvåkningsinnsjøer i Norge (1986 vs. 1995 vs. 2005). Innsjøene har blitt sortert etter stigende sulfat/klorid forhold. Data fra Klif.

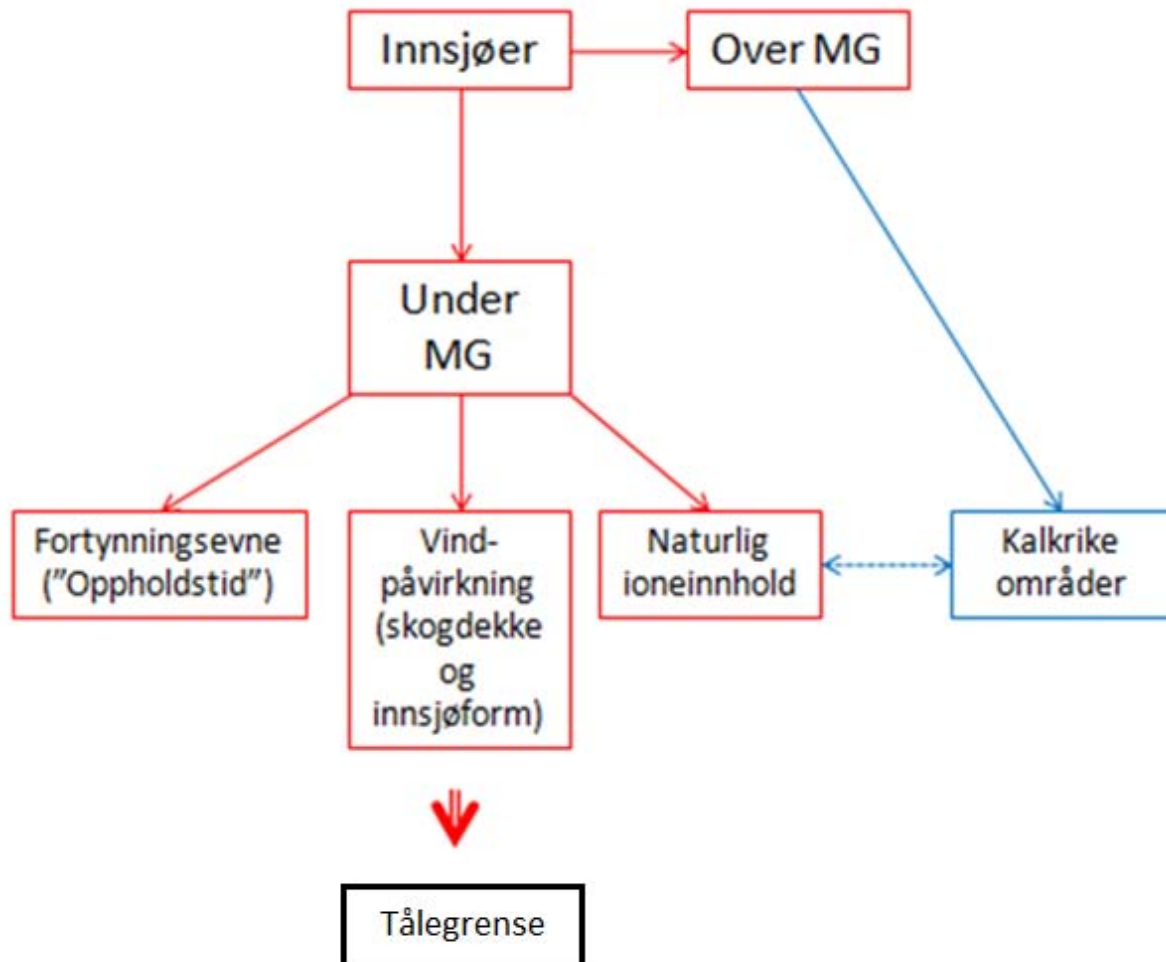


Fig. 4. Flytskjema for tålegrenseberegning for innsjø mht kjemisk sjikning.

### 3. Resultater

#### Kjemiske karakteristika

Innsjøers kjemiske sammensetning er nært knyttet til atmosfærisk deponisjon og geologiske forhold i nedbørfelt. I en rekke innsjøer under marin grense og nær kysten finner vi god korrelasjon mellom totalt ioneinnhold og konsentrasjon av klorid. Dette gjelder spesielt for kloridinnsjøer, dvs innsjøer med klorid som det dominerende anion (jfr. fig. 1). For en rekke innsjøer i Norge som tidligere har hatt sulfat som dominerende anion, har nå klorid som dominerende anion etter at deponisjon av sur nedbør har avtatt kraftig over Norge (jfr. fig. 4). For kloridinnsjøer vil avstand til hav være av stor betydning, samt innsjøens beliggenhet i forhold til den marine grense i nedbørfeltet. Dette vil også gjenspeile seg i grunnvannskvaliteten i nedbørfeltet.

Beregningen av ionekomposisjonen i innsjøene er basert på en beregning av to hovedandeler; sjøsalter (klorider) og andre ioner (ideelt sulfater, nitrater, karbonater).

$f_{moh}$  beskriver sammenhengen mellom marin grense og konsentrasjon av sjøsalt.

$K_{hav}$  beskriver sammenhengen mellom avstand til hav og konsentrasjonen av sjøsalter.

$K_{kjemisk}$  beskriver tillegget fra andre ioner enn sjøsalter.

#### *Marin grense (MG), $f_{moh}$*

For å vurdere innsjøers kjemiske kvalitet ut i fra påvirkning fra nedbørfeltets marine sedimenter, har vi utarbeidet et nytt digitalt kart for MG i Norge (jfr. fig. 5). I våre data er det innsjøer under MG som utvikler kjemisk sjiktning (fig. 6). Ut i fra sammenhengen mellom kloridkonsentrasjonen i overflatesjikt om høsten i innsjøer under MG og deres lokalisering i meter over havet (der vi vet at innsjøene også er påvirket av sjøsalt fra nedbør og til dels vegsalting), har vi stipulert et generelt bidrag knyttet til de marine sedimenter,  $f_{moh}$  (jfr. fig. 7).

Vi har videre kunnet sette en generell tålegrense mht ioneinnhold og kjemisk sjiktning, ut i fra å se på sammenhengen mellom kloridkonsentrasjonen i overflatesjiktet under høstsirkulasjon i innsjøene og kategorisk om det er kjemisk sjiktning. Vi har av det for disse innsjøene satt grensen (konservativt) til 5 mg klorid/l (jfr. fig. 8). Denne tålegrensen justeres, som tidligere nevnt, via kjemiske og fysiske innsjøegenskaper.

Digitale kart over marine sedimenter er generert på grunnlag av digitale løsmassekart. Disse sedimentkartene er deretter koblet mot høydedata fra Statens kartverk (20 meters grid), og hver kartfigur er tilordnet største høyde (moh) fra tilhørende gridceller. Resultatet er et grovt digitalt kart over marin grense i Norge. Dette er

videre koblet til kart over nedbørfelt (Regine), og det er beregnet en marin grense pr Reginefelt lik antall meter over havet på det høyest liggende marine området i nedbørfeltet. Tilsvarende er høyde (moh) for alle innsjøer beregnet ved kobling mot det digitale høydekartet. Innsjøhøydene er sammenholdt med beregnet marin grense i tilhørende Reginefelt, og for innsjøer under marin grense beregnes et bakgrunnsnivå for ioner fra marine sedimenter.

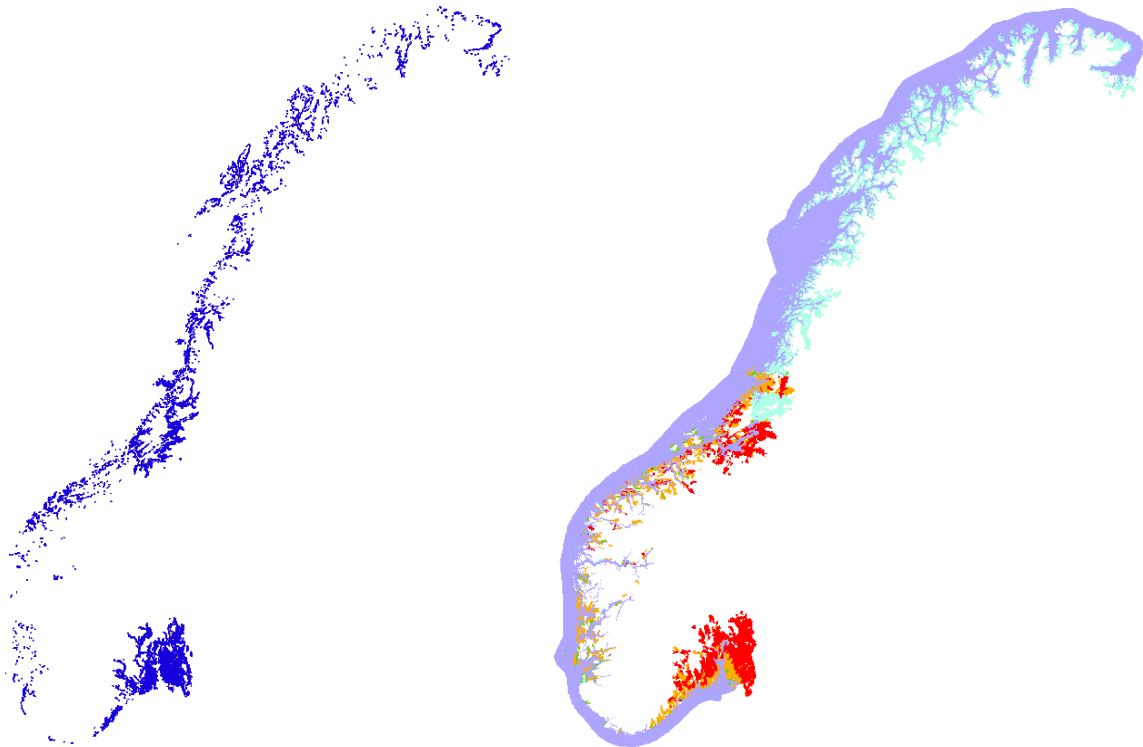


Fig. 5. Digitalt kart for MG i Norge (venstre) og marin grense pr nedbørfelt i Regine.



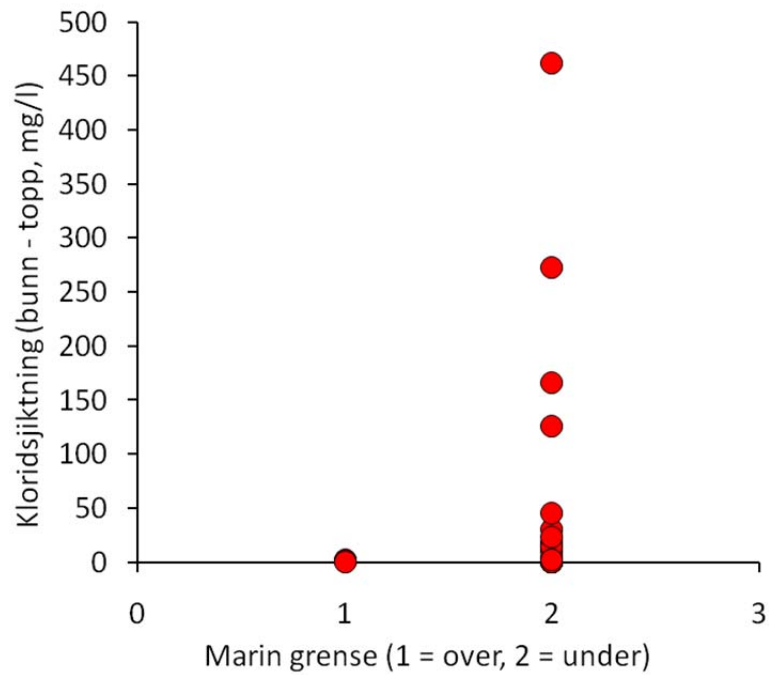


Fig. 6. Grad av kjemisk sjiktning for innsjøer under og over marin grense. Kloridsjiktning beskriver forskjellen i klorid mellom topp og bunn. Figuren viser at ut fra våre data er det innsjøer under marin grense som utvikler kjemisk sjiktning.

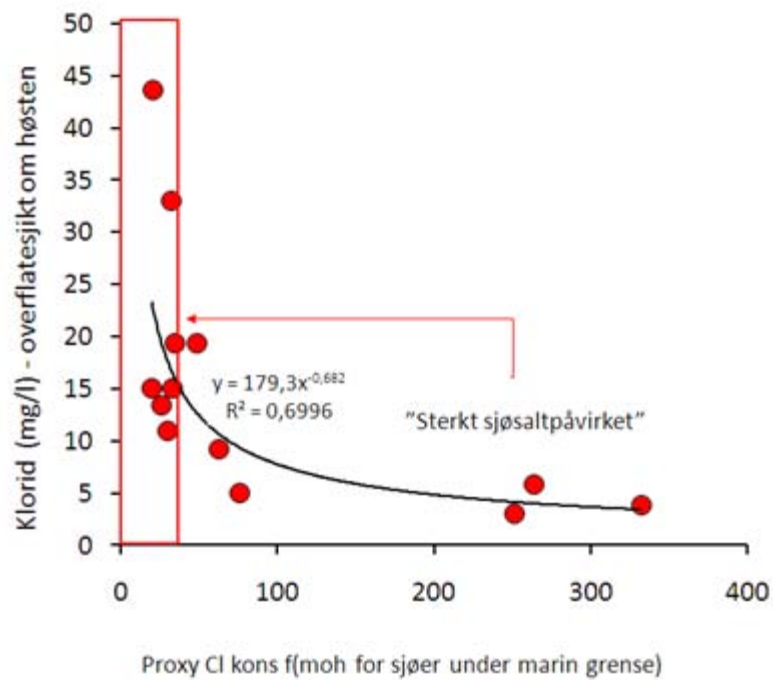


Fig. 7. Estimert kloridkonsentrasjon i innsjøoverflatesjikt som en funksjon av meter over havet for innsjøer under marin grense. En del av dette antas å innbefatte klorid kun fra marine sedimenter (se plot øverst til høyre). Dette bidraget fra sediment til innsjø kalkuleres derfor fra dette som konsentrasjonen av klorider (mg/l) =  $8(\text{moh, for innsjøer under marin grense})^{-0,3}$ , med et tak fra dette bidraget på 20 mg klorid/l.

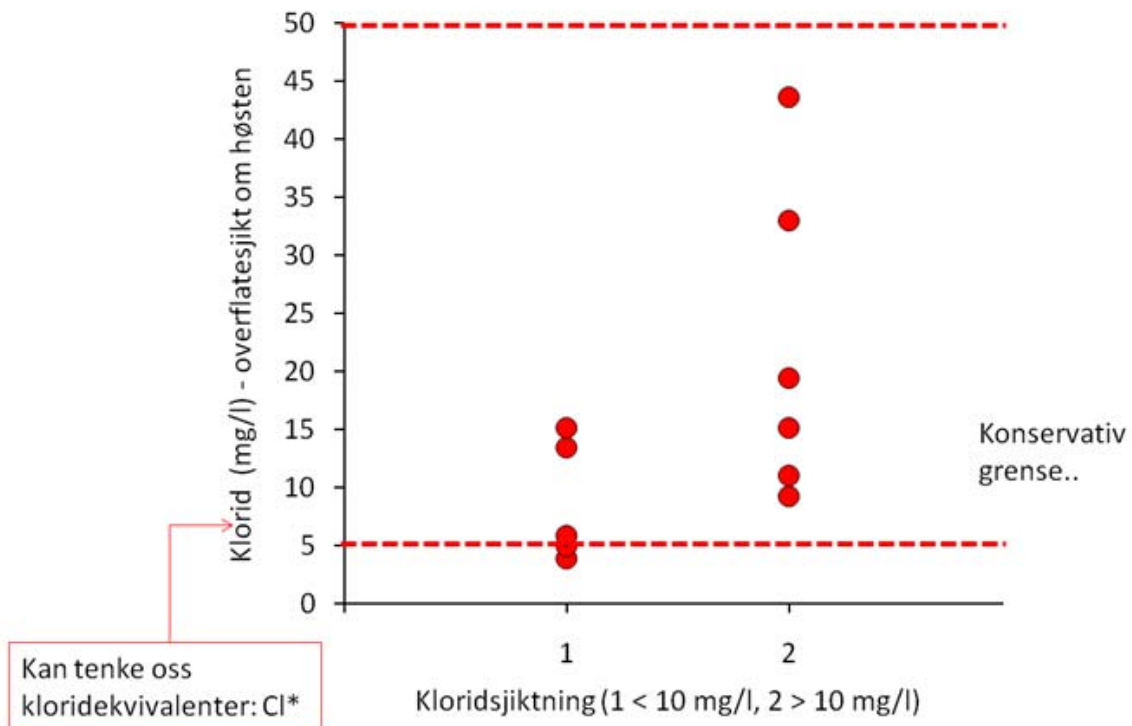


Fig. 8. Konsentrasjon av klorid i overflatevann ved høstsirkulasjon for to ulike klasser; innsjøer uten (1) og med (2) kloridsjiktning. Stiplede linjer indikerer mulig grensesetting mht tålegrense for kjemisk sjiktning (nederste linjen, som her er satt til 5 mg/l og grense for når innsjøen trolig naturlig som oftest (eller alltid) vil ha kloridsjiktning. I andre typer innsjøer (som for eksempel bikarbonat-innsjøer) kan vi tenke oss at vi regner om ioneinnholdet til kloridekvivalenter (jfr. fig. 2, samt diskusjon vedrørende karbonatinnsjøer i tekst under), eller at Y-aksen gjøres om til totalt ioneinnhold ( $\mu\text{mol}_c/\text{l}$ ). Vi tar høyde for dette bidraget ved å modifisere tålegrensen for slike vann ved å multiplisere inn en korreksjonsfaktor,  $K_{\text{kjemisk}}$ .

### *Deposisjon av sjøsalt, $K_{hav}$*

For å vurdere kloridtilførsler fra atmosfærisk deposisjon, har vi utarbeidet en enkel algoritme som tar inn avstand til hav for hver innsjø. Vi har delt Norge inn i 7 soner som representerer påvirkningsgrad fra havsalter. Vi har beregnet avstandene fra saltvann (hav og fjorder). For de mest utsatte innsjøene mht sjøsalt via nedbør, er det ikke tatt med avstand til fjorder, kun til åpent hav (jfr. lilla linje i fig. 9).

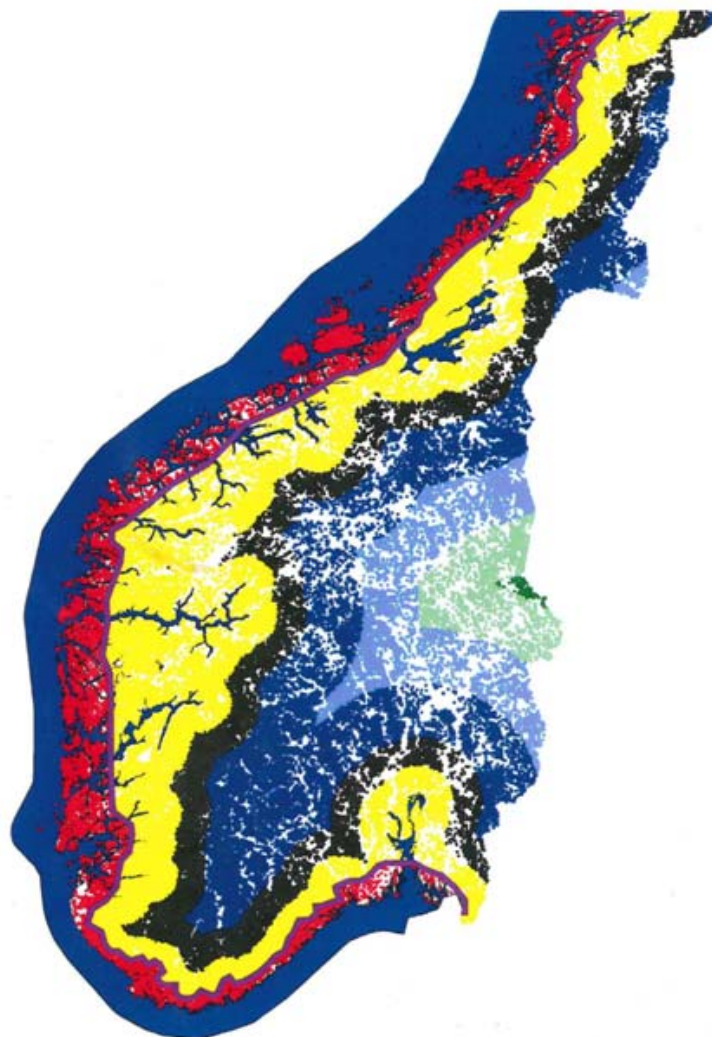


Fig. 9. Avstand til hav er brukt som proxy for deposisjon dominert av klorider. Proxyen vil til en stor grad gjenspeile kloridkonsentrasjonen i grunnvann.

### *Tilførsler av andre ioner enn kloridforbindelser, $K_{\text{kjemisk}}$*

I enkelte vannforekomster vil bergarter i nedbørfeltet gi opphav til dels meget høye konsentrasjoner av karbonater ("hardt vann"), og ofte vil kalsiumkarbonat og magnesiumkarbonat utgjøre en hovedbestanddel av ionebudsjettet i norske vannforekomster. Slike områder har vi forsøkt lokalisert for å ta hensyn til det bidraget disse ionene vil ha mht tålegrensen for kjemisk sjiktning (jfr. også tidligere diskusjon om ionekomposisjon), og er i tålegrenseberegningen multipliserer inn som et tillegg. Vi tok utgangspunkt i data for grunnvannsbrønner fra NGU. Kartet, som ble lastet ned fra NGU sine nettsider, har blitt georeferert i Arc MAP og deretter manuelt digitalisert slik at vi kunne koordinatfeste karbonatrike forekomster og knytte de til innsjøenes geografiske beliggenhet (jfr. fig. 10). Det samme kan i prinsippet til en viss grad gjøres for organiske syrer (gitt som løst organisk materiale), men dette kan det også (for å forsøke å unngå for mye kovarians) tas høyde for ved å se på skogdekningsgrad (se avsnitt under).

Ut i fra data fra vannforekomster innen de ulike kategoriene, har vi for bløtt, midt-dels og hardt vann satt  $K_{\text{kjemisk}}$  til hhv 1 ("dominans av sjøsalter"), 2,5 ("noe mer karbonater enn sjøsalter") og 5 ("dominans av karbonater"), faktorer som multipliseres med  $K_{\text{hav}}$ . Dette gjør vi for å ta med karbonatforbindelsene i beregningen av kjemisk sjiktning (som "kloridekvivalenter", jfr. fig. 8).

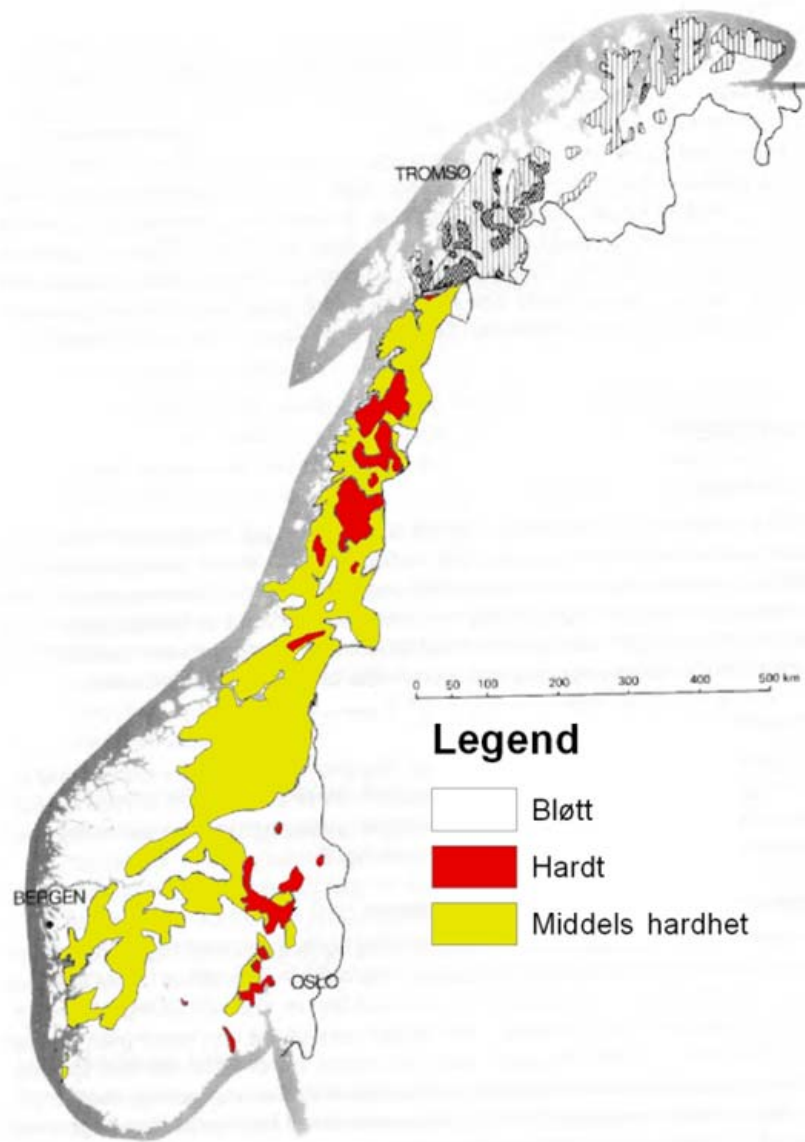


Fig. 10. Grunnvannsbrønner med ulike kategorier for konsentrasjoner av karbonater. Fig. omarbeidet med data fra NGU.

## Fysiske karakteristika

$K_{\text{fysisk}}$  består av to hoveddeler; vindens arbeid og hydraulisk belastning.

$$K_{\text{fysisk}} = K_{\text{hydraulisk}} * K_{\text{vind}}, \text{ der } K_{\text{vind}} = K_{\text{dekning}} + K_{\text{morf}}$$

### Vinddelen av $K_{\text{fysisk}}$

Vindeksponering avhenger blant annet av skogdekningsgrad (som vil kunne skjerme for vind). I tillegg vil innsjøens utforming ha stor betydning, der en dyp innsjø med lite areal (liten maksimal diameter) vil ha større vanskeligheter med å utjevne sjiktning enn store grunne innsjøer. Analogt er det for overflateformen på innsjøen (rund, smal og lang, etc.). Dybde data er dessverre en mangelvare for norske innsjøer og er av det ikke inkludert i klassifiseringen av innsjøer mht morfometri.

*Innsjøens maksimale diameter ( $D_{\text{maks}}$ ), innsjøoverflatens form (formproxy og  $K_{\text{morf}}$ )*

Vi har beregnet innsjøenes maksimale diameter ( $D_{\text{maks}}$ ). Vi har benyttet en GIS-modell for å finne ut innsjøareal, -omkrets og  $D_{\text{maks}}$  for hver enkelt innsjø, og  $D_{\text{maks}}$  er videre inkludert i en formproxy som tar høyde for innsjøens form med hensyn til grad av rundhet. Dette sier oss noe om vindens potensielle friksjonsdrag på innsjøen.

$$\text{Formproxy} = 2 \sqrt{\frac{\text{innsjøareal}}{\pi D_{\text{maks}}}}$$

Smalere innsjøer får relativt sett større  $D_{\text{maks}}$  og en formproxy nærmere 0.5 enn 1.0. Vi har videre lagt inn en korreksjon ( $K_{\text{morf}}$ ) for innsjøens form, der mer sirkulære (runder) innsjøer med mindre diameterer anses som de dårligste til å sirkulere og vice versa.  $K_{\text{morf}} = 2(\text{formproxy} - 0.5)$  (jfr. fig. 11).

### *Dekningsgrad, $K_{\text{dekning}}$*

For å vurdere grad av vindeksponering, har vi inkludert innsjøens dekningsgrad med hensyn til skog og bebyggelse. Data er hentet ut fra databaser, blant annet fra Skog og landskap og NVE. Vi har delt innsjøene inn i ulike klasser vedrørende dekningsgrad. For innsjøer med  $D_{\text{maks}} < 250$  meter ble det beregnet dekningsgrad for en sone rundt innsjøen med bredde lik 0,2 ganger  $D_{\text{maks}}$ . For større innsjøer har det ikke blitt beregnet dekningsgrad, da store deler av innsjøens areal allikevel er fritt eksponert for vindens arbeid.

Lite skog = dekningsgrad (< 20 %):  $K = 1$

Halvåpen skog = dekningsgrad (20 % - 80 %):  $K = 0.75$

Tettere skog (> 80 %):  $K = 0.5$

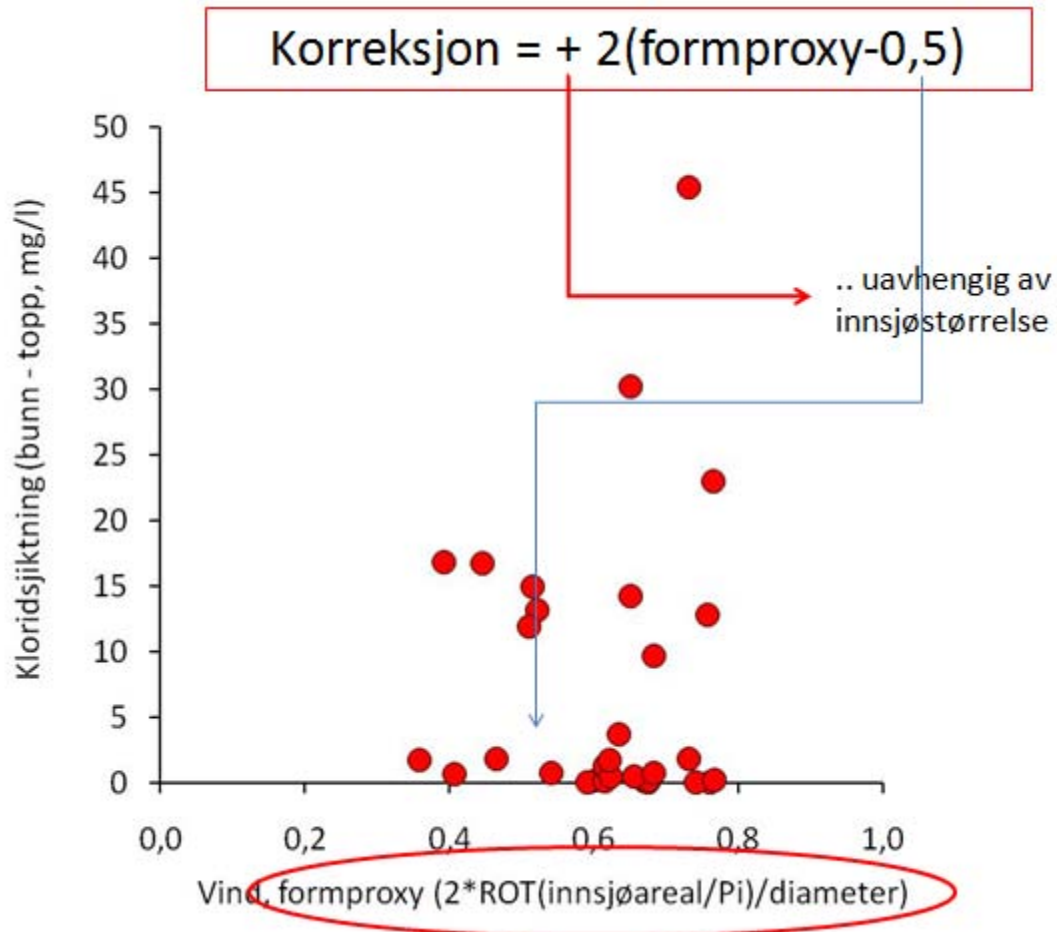


Fig. 11. Korreksjon for innsjøform,  $K_{\text{morf}}$ . Smale lange innsjøer (lav formproxyverdi) teoretisk bedre vinddrag enn runde innsjøer (høy formproxyverdi). Vindens arbeid er viktig for å få i gang vår- og høstsirkulasjon. Figuren illustrerer at det er en tendens til at det er runde innsjøer i vårt datasett som har mest markant kjemisk sjiktning.



## Den hydrauliske belastningsdelen av $K_{\text{fysisk}}$

Ofte kan det synes at små innsjøer er mer utsatt for saltgradienter enn større innsjøer. Det kan være flere grunner til det, og i tillegg til at små innsjøer ofte er mer sårbare for dekningsgrad for vind, er noe av forklaringen også det at små innsjøer ifht større innsjøer ofte har en relativt lang teoretisk oppholdstid pga relativt små nedbørfelt ifht innsjøstørrelse. En korreksjon  $K_{\text{hydraulisk}}$ , som tar høyde for hydraulisk belastning, har blitt satt til  $T_w/20$ , der  $T_w$  er en proxy for teoretisk oppholdstid beregnet som nedbørfeltareal/innsjøareal (jfr. fig. 12). Grad av kjemisk sjiktning i vårt datasett tenderer til å øke med lengre oppholdstid, og særlig ved  $T_w < 20$ . Areal er beregnet for hver innsjø på grunnlag av digitale kart. Arealet av innsjøens nedbørfelt er også beregnet på grunnlag av digitale kart over hellingsretning (rutenett på 25 x 25 meter) fra NVE. Vi mangler i Norge, og i verden for øvrig, dessverre for det aller meste både innsjødyb og ekkogrammer.

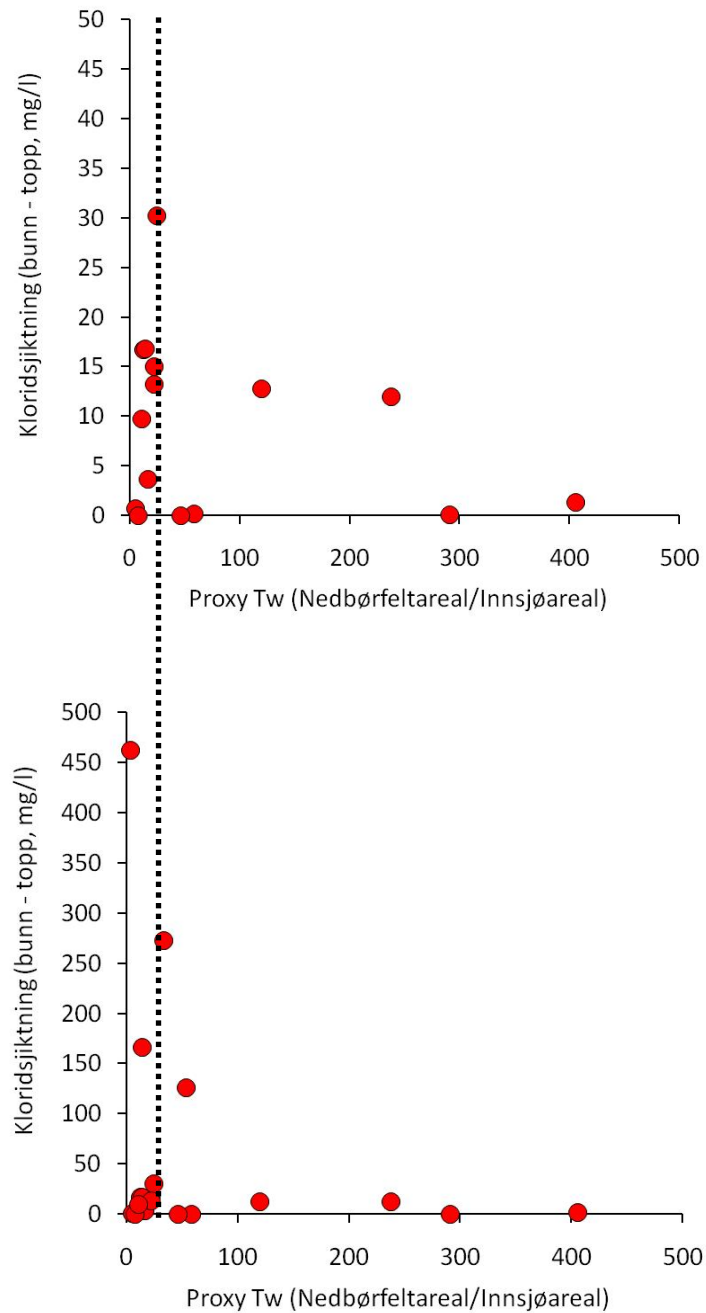


Fig. 12. Kloridsjiktning plottet mot en proxy for teoretisk oppholdstid (nedbørfeltareal/innsjøareal). Det øverste plottet er et utsnitt av plottet under (ulik Y-akse). Grad av kjemisk sjiktning tenderer til å øke med lengre oppholdstid, særlig ved  $T_w < 20$ . Stiplet linje viser  $T_w = 20$ .

## 4. Diskusjon og konklusjon

---

Innsjøer i vårt datasett som lå over marin grense (ca. 50) hadde, med hensyn til den operasjonelle definisjon (jfr. Bækken & Haugen 2006), ikke kjemisk sjiktning forårsaket av sjøsalter (fig. 6). En innsjøes evne til å sirkulere påvirkes bl.a. av innsjøvannets tetthet, som er bestemt av temperatur (viktigste faktor), ionesammensetning og - konsentrasjon (for eksempel Imboden 1990, Imberger & Patterson 1989). Innsjøens ionekomposisjon er nært knyttet til atmosfærisk deposisjon og geologiske forhold i nedbørfeltet (Haaland m.fl. 2010; fig. 7). Tettheten av vann ved samme temperatur vil variere betydelig med konsentrasjonen av ioner (Grøterud og Haaland 2010), og over marin grense er det også andre kjemiske konstituenten enn sjøsalter i nedbørfeltet som potensielt vil medføre til en tilsvarende kjemisk sjiktning (jfr. fig. 10).

Fysiske faktorer, i tillegg til temperatur, som påvirker sirkulasjonsmønsteret, vil være grad av vindpåvirkning (Desai m.fl. 2009, Eccles 1974), morfometri (Hutchinson 1938, Moses m.fl. 2011, Grøterud & Haaland 2009, Golterman m.fl. 1975), hydraulisk belastning (Imberger & Patterson 1989, etc.). Dette inkluderer videre ytre fysiske faktorer som isleggingsregime og dekningsgrad av skog, fjell, tettbebyggelse, innsjøens areal/dybde-forhold, areal/omkrets-forhold, o.l., samt nedbørfelt areal / innsjøareal, hydrologisk regime, størrelsesforhold mellom vannbalansens komponenter, etc. Vi så klare forskjeller mellom innsjøer med ulik hydraulisk belastning (jfr. fig. 12), og også mht innsjøens form (fig. 11). Vårt datamateriale inneholdt ikke innsjøer med vinddekningsgrad > 80 %, tettere skog, men det er klare tendenser i datasettet til en effekt der økt dekningsgrad gir mer sjiktdannelse, noe som også er godt kjent i fra litteraturen (jfr. Densai 2009, Pan m.fl. 2002). Lokale klimaforhold som is dekningsgrad og nedbørmengder, som kan variere betydelig mellom år, vil også i stor grad kunne påvirke vannforekomstens sirkulasjonsmønster (jfr. Andersen 2003).

Grensekonsentrasjonene av kloridekvivalenter (dvs her; klorid + konsentrasjonen av karbonater) som ble satt til 5 mg/l som nedre grense, der innsjøer med lavere konsentrasjoner antas å ikke ville ha problemer med sjiktdannelse, til tross for at de ligger under marin grense (jfr. fig. 8). Denne konsentrasjonen er et konservativt estimat og er basert på de data vi har hatt tilgjengelig. En stor andel av norske innsjøer har til sammenlikning kloridkonsentrasjoner i området 1 - 10 mg/l, og vi kan ut i fra det samme plottet ved å være noe mindre konservative justeres opp grensekonsentrasjonen til 10 mg/l (jfr. fig. 8). Tilsvarende grense for en konsentrasjon av kloridekvivalenter der sjiktning av innsjøer om høsten fra tid til annen naturlig alltid vil forekomme, er satt relativt høyt og til 50 mg/l. Dette er igjen tatt ut fra samme fig. 8, og er valgt ut i fra at vi over denne konsentrasjonen, med en viss sikkerhet, kan si at innsjøene vil ha en "naturlig" sjiktning, og selv om saltingen opphører vil det fra år til annen trolig være en kjemisk sjiktning i disse innsjøene også i sirkulasjonsperioder.

Fra det å vite en del om innsjøers sirkulasjonsmønster, til å beregne tålegrense for sjiktdannelse i innsjøer over hele Norge, sør for Saltfjellet ( $n > 30\,000$ ), blir alltid en krevende øvelse mht usikkerhet. Et av problemene er den noe begrensede mengden eksisterende data og påfølgende usikkerhet, der svakheten er mangel på

info vedrørende innsjøers morfometriske egenskaper (dybdeprofil). Dette er et generelt problem, og ikke bare for Norge. Vi har måttet benytte de data vi har hatt tilgjengelig, som dog utgjør et representativt utvalg av innsjøer for både utforming og geografisk beliggenhet knyttet til salting av veger (jfr. Bækken & Haugen 2006). Med det har vi på en enkel måte estimert en generell tålegrense for innsjøer mht ioneinnhold og kjemisk sjiktning. For å få det til har vi også inkludert en enkel metodikk for grovt å kunne beregne bakgrunnskonsentrasjon av klorid for sjøsaltpåvirkede innsjøer, ut i fra regresjoner mellom innsjøens beliggenhet i moh under marin grense, samt avstand til hav. I disse beregningene er det usikkerheter, både pga mangel på data, men også med den generaliseringen som har blitt gjort mht vannbalansen. Vi har ikke tatt hensyn til forskjeller i fordampning eller nedbørmengder, med tanke på fortynning og ditto forskjeller i avrenningsmønsteret og hydraulisk belastning på vannforekomstene. Dette kan enkelt implementeres, men de generelle usikkerhetene er såpass store i seg selv, og det er åpenbart at det vil være store forskjeller mellom år når vi betrakter enkeltstående vannforekomster, slik at betraktninger rundt faktorer som for eksempel hydraulisk belastning ( $T_w$ ) i mangel av innsjødyb og ekkogrammer, trolig blir tilstrekkelig godt kvantifisert ved å bruke forholdet mellom innsjøareal og nedbørfeltareal. Det finnes i tillegg en rekke analoge tilsvarende betraktninger. Modellen er enkel, noe vi er klar over, men modellen kan være et brukbart verktøy dersom vi erkjenner usikkerheten.

Eksempler på bruk av modellen er vist i vedlegg.

## Referanser

---

Amundsen CE, Haaland S, French H, m.fl. 2008. Miljøkonsekvenser ved salting av veger - en litteraturgjennomgang. Statens vegvesen. Rapport nr. 2535.

Andersen DO, 2003. Impacts of warm winters and extreme rainstorms on the base consumption in a limed lake, southern Norway. *Sci. Tot. Environ.* 313(1-3):127-139.

Bækken T, Haugen T, 2006. Kjemisk tilstand i vegnære innsjøer. Statens vegvesen. Rapport UTB 2006/06.

Desai RA, Austin, JA, Bennington V, McKinley GA, 2009. Stronger winds over a large lake in response to weakening air-to-lake temperature gradient. *Nature geosciences* 2:855-858.

Eccles DH, 1974. An outline of the physical limnology of Lake Malawi. *L&O* 19:730-743.

Einsele W 1936. Über die Beziehungen des eisenkreislauf zum Phosphatkreislauf im eutrophen See. *Arch. Hydrobiol.* 29:664-686.

Golterman HL, Clymo KE, Clymo RS, 1975. *Physiological limnology: An approach to the physiology of lake ecosystems.* Elsevier. ISBN 0-444-41270-0. 468pp.

Grøterud O, Haaland S, 2009. Side effects of liming - A study of four dimictic lakes in Southern Norway. *Wat. Air. Soil Pollut.* 211(1-4):135-141.

Haaland S, Riise G, Hongve D, Grøterud O, Blakar I, 2010. TOC concentrations in Norwegian lakes - The effect of sea-salts and anthropogenic acid components. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 30(9):1471-1474.

Imberger J, Patterson JC, 1989. *Physical Limnology.* *Adv. Appl. Mec.* 27:303-405.

Imboden DM, 1990. Mixing and transport in lakes: Mechanisms and ecological relevance, *Large lakes: Ecological structure and function.* Red. Tilzer MM & Serruya S.

Hutchinson GE, 1938. Chemical stratification and lake morphology. *Proc Nati Acad Sci USA.* 24(2):63-69.

Kitterød NO, Turtumøygard S, Aakerøy PA, Haaland S 2010. SaltSMART - Estimering av gjennomsnittlig saltfluks til vannforekomster. Statens vegvesen. Teknologirapport nr. 2589. 115 s.

Kjensmo J, 1997. The influence of road salts on the salinity and the meromictic stability of Lake Svinsjøen, southeastern Norway. *Hydrobiol.* 347:151-159.

Monismith SG, MacIntyre S, 2009. The surface mixed layer in lakes. In: Likens G (red). *Encyclopedia of Inland waters* 1, pp 636-650. Oxford, Elsevier.

Mortimer CH 1941. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *J.Ecol.* 29:280-329.

Moses SA, Janaki L, Joseph S, Justus J, Vimala SR, 2011. Influence of lake morphology on water quality. *Eviron. Monit. Assess.* 182(1-4):443-454.

Pan H, Avissar R, Haidvogel AB, 2002. Summer circulation and temperature structure of Lake Kinneret. *Journal Phys. Ocean.* 32:295-313.

Wetzel RG 2001. *Limnology - Lake and River Ecosystems*. 3ed. Academic Press. ISBN 0-12-744760-1.

## Vedlegg

Innsjømodell for vegsalt		
Eksempel på beregning av tålegrenser og bakgrunnskonsentrasjon		
<b>Innsjødata</b>		
Navn innsjø		Juveren
Areal nedbørfelt km <sup>2</sup>		3,061875
Avrenning m <sup>3</sup> /år		461711
Innsjøareal		332602
Meter under marin grense		227
Skogdekningsgrad		Lite skog
Avstandsklasse		3
Høyde over havet (hoh)		64
Formfaktor (F-faktor)		-0,213
Grunnvannssone		3
<b>Estimert vegsalt i innsjøen</b>		
NaCl, mg/L		94
Cl mg/L	$94 \cdot (35.453 / (35.453 + 22.99))$	57
Maks saltkonsentrasjon inn i ett punkt mg/L		258
Maks saltmengde inn i ett punkt tonn/år		36
Total saltmengde tilført tonn/år		43,7
b1	$2 \cdot 5$	10
b2	$8 \cdot 64^{**} \cdot (-0.3)$	2,3
Bakgrunnskonsentrasjon Cl mg/L	$b1 + b2$	12,3
Total konsentrasjon Cl mg/l	Cl + bakgrunnskonsentrasjon	69,3
<b>Grenseverdier</b>		
Skogfaktor		1
Hydraulikkfaktor	$nb\_areal / (sjøareal \cdot 20)$	0,46
Nedre tålegrense	$5 \cdot \text{skogfaktor} \cdot \text{hydraulikkfaktor}$	2
Øvre tålegrense	$50 \cdot \text{skogfaktor} \cdot \text{hydraulikkfaktor}$	22,8
Beregnet tetthetssjiktning, grenseverdier (mg/l)	Uavklart: 2-22,8	Høy: 22,8-
Risikoklasse	$69,3 > 22,8$	<b>Høy</b>

$$b1 = K_{\text{hav}} \cdot K_{\text{kjemisk}}$$

$$b2 = \text{bidrag knyttet til de marine sedimenter, } f_{\text{moh}}$$

$$\text{Skogfaktor} = K_{\text{vind}}$$

$$\text{Hydraulikkfaktor} = K_{\text{hydraulisk}}$$

## Risikonivå



### Tidligere resultater Beregnet 09-03-2012

Innsjødata	
Navn innsjø	Juveren
Kalsium rik/fattig	
Areal nedbørfelt km <sup>2</sup>	3.061875
Avrenning m <sup>3</sup> /år	461711
Kontraksnummer	602
Estimert vegsalt i innsjøen i	
NaCl, mg/L	94
Cl mg/L	57
Maks saltkonsentrasjon inn i ett punkt mg/L	258
Maks saltmengde inn i ett punkt tonn/år	36
Total saltmengde tilført tonn/år	43.6889
Bakgrunnskonsentrasjon Cl mg/L	12
Total konsentrasjon Cl mg/L	69
Grenseverdier	
Biologisk tålegrense	
Planktonalger mg C/L: i	40-
Kjemisk tålegrense	
Innsjøundersøkelsen i	
Tonn salt/km i	10-24 25
Beregnet tetthetssjiktning mg C/L: i	2-22.8 22.8
Risikonivå	
Biologisk tålegrense	
Planktonalger	Middels
Kjemisk tålegrense	
Innsjøundersøkelsen	Uavklart
Beregnet tetthetssjiktning	Høy
Total risiko	Høy

- Modellberegning for denne innsjøen  
- Hent hele kontraktområde 602







Statens vegvesen

Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
[publvd@vegvesen.no](mailto:publvd@vegvesen.no)

ISSN: 1893-1162