

# Modellberegning av vannkjemiske effekter av vassdragsreguleringer – eksempel fra Sira-Kvina-reguleringen

*Av Espen Enge og Tor Hemmingsen*

*Espen Enge* er overingeniør hos Fylkesmannen i Rogaland (Miljøvernavdelingen) og *Tor Hemmingsen* er professor ved Universitetet i Stavanger.

## Sammendrag

Som følge av Sira-Kvina-utbyggingen ble ionesvakt vann fra de høyereliggende feltene regulert bort fra selve hovedelva Sira. I dag utgjøres selve elvestrengen Sira kun av vann fra lokalfeltene langs selve hoveddalføret. For å kvantifisere de vannkjemiske effektene av dette er det laget en vannkjemisk blandemodell, som estimerer vannkvaliteten på to stasjoner i Sira i en tenkt situasjon hvor vannet fra de høyereliggende feltene slippes tilbake i Sira igjen. Modellen tar hensyn til både ulikt avrenningsmønster fra de forskjellige delfelt (varierende blandingsforhold), og håndterer både konservative og ikke-konservative kjemiske parametre. Modellberegningene viste at reguleringene har medført små effekter på pH-verdiene i Sira. Derimot hadde ioneinnholdet, målt som konduktivitet og kalsium, økt betydelig. Det var trolig disse effektene som gjorde at auren nede i selve Sira overlevde forsurenningen i 1970-årene, mens fiske

bestandene i andre deler av vassdraget var utdøende. Økende fiskebestander i ettertid kan forklares med redusert surhet.

## Summary

**Modelling of water chemical effects of regulation of river Sira.** The regulation of Sira and Kvina has removed low conductivity high altitude water from the main river Sira. The origin of the current water in river Sira is small local side tributaries. To quantify the water chemical effects of the regulation, a mathematical model for simulation of water quality in river Sira was created. The model considers both hydrology and conservative/non-conservative chemical parameters. Simulations suggest that regulation yielded limited effects on pH, but a distinct effect on conductivity and calcium. This indicates that increased conductivity and calcium in the river water saved the

trout populations in Sira during the strong acidification in the 1970's, while most of the other trout populations in the area were wiped out. Increasing densities of trout the last two decades were caused by decreasing acidity.

### Innledning

Allerede rundt 1870 ble det registrert tilbakegang i fiskebestanden i Sandvatn, øverst i Degevassdraget i Sira (Huitfeldt-Kaas 1922), av årsaker som i ettertid kan antas å være begynnende forsuring. I Guddal i Sirdal ble det registrert fiske-tomme vann allerede rundt 1910 (Qvenild et al. 2007). I Vest-Agder økte skadearealet fra 7.5 % i 1950, til 26.0% i 1960 og 84.5% i 1970 (Hesthagen et al. 1999). Samtidig med den store økningen i skade-areal i 1960-årene, startet også utbyggin-gen av Sira og Kvina (i 1963).

Mens det i utgangspunktet ble tatt som en selvfølge at reguleringene ville medføre betydelige skader på fiskebe-standene i de berørte vassdragsavsnitt (Jensen 1967, Jensen 1968), antydte Lø-kensgard (1975) allerede i 1970-årene at forsuringen var vel så viktig. Seinere skulle dette vise seg tydelig, da fisk som Sira-Kvina Kraftselskap ble pålagt å sette ut som kompensasjon for reguleringens skader på fiskebestandene, ikke overlevde på grunn av surt vann (Gunnerød et al. 1981).

På slutten av 1970-tallet ble 75 % av innsjøene i Sirdal regnet som fisketomme eller hadde reduserte og forsuringsskadde bestander (Sevaldrud og Muniz 1980). I uregulerte innsjøer oppe på fjellet langs hovedvassdraget og i de store

reguleringsmagasinene var aurebestan-dene stort sett blitt helt borte (Løkens-gard 1975, Tollan og Overrein 1977, Se-valdrud og Muniz 1980, Gunnerød et al. 1981, L'Abée-Lund 1985, Møkkelgjerd og Gunnerød 1985, Hansen 1986). På tross av både forsuring og regulering overlevde imidlertid auren nede i selve Sira, selv om tetthetene var svært lave en periode (Larsen et al. 1989).

Mellquist (1972) utførte statistiske analyser av pH-data fra en rekke stasjo-ner i Sira og Kvina fra perioden 1967-1972, og konkluderte med at reguleringene snarere bremsset enn påskyndet forsuringsutviklingen. Enge (1992) viste seinere til at reguleringen tok bort store sure høyereliggende felter som tidligere drenerte ned i hovedelva Sira, og antydte positive effekter på vannkvaliteten i selve Sira som følge av dette.

Sira-Kvina-overvåkingen har pågått i mer enn 20 år, og omfatter en rekke stasjo-ner for registrering av fisketetthet og vannkjemi. Slike lange tidsserier er av stor verdi, og har mange anvendelsesom-råder. Den mest åpenbare anvendelsen er å se på tidstrender i vannkjemi og fis-ketetthet, men også andre problemstil-linger kan analyseres ut fra dette materi-alet. Det er tidligere vist kvalitativt at både forsuring og regulering har påvir-ket vannkjemien i Sira, men det er aldri blitt gjort kvantitative vurderinger. Med vannkjemiske data fra de lange tids-seriene og hydrologiske data fra stasjo-nene i Sira, kan det utvikles beregnings-modeller, som kvantifiserer disse effekt-ene.

## Materiale

### Vannkjemi

Sira-Kvina Kraftselskap henter jevnlig vannprøver fra en rekke lokaliteter i vassdragene Sira og Kvina. I 2009 var 20 lokaliteter inkludert i denne overvåkingen. På noen av disse stasjonene finnes kontinuerlige serier helt fra 1984. Fra starten av Sira-Kvina-overvåkingen i 1984, ble det målt pH, konduktivitet, aluminium og "hardhet". Sistnevnte parameter gikk ut på de fleste offentlige overvåkningsstasjoner i løpet av 1980-årene, men ble i Sira og Kvina tatt ut først i 1996. På data med parallellanalyser er det imidlertid funnet godt samsvar ( $r^2=0.93$ ,  $p<0.001$ ,  $n=28$ ) mellom kalsiumverdier og hardhet&konduktivitet (Enge 2009b), slik at eldre hardhetsdata enkelt kan konverteres til kalsium. Begrensninger i slike konverteringer er diskutert i Enge (2009b). Fargetall ble inkludert fra 1998 og kalsium fra 2002. Mer periodisk har også andre parametre blitt målt.

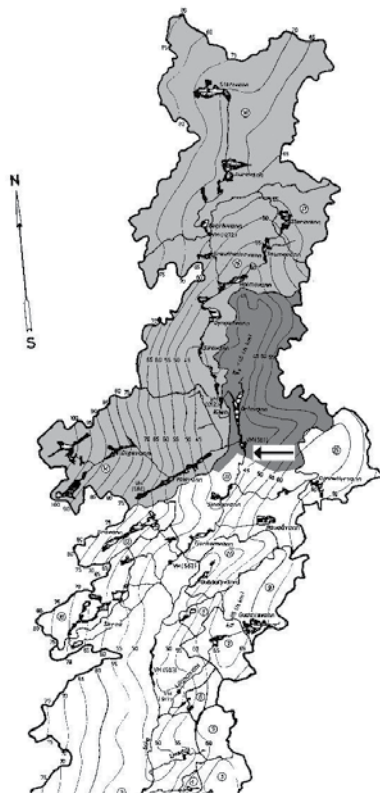
Det er utført beregninger for stasjonene "Fidjelandvatn", figur 1, og "Sira v/ Omlid", figur 2, da disse stasjonene hadde best datagrunnlag. Fra øvre del av Sira var datamaterialet sparsomt, og det ble kun funnet data til å utføre beregninger på 2 datoer for Gofarlonene og 1 dato for Sira v/Grydalen.

### Hydrologi

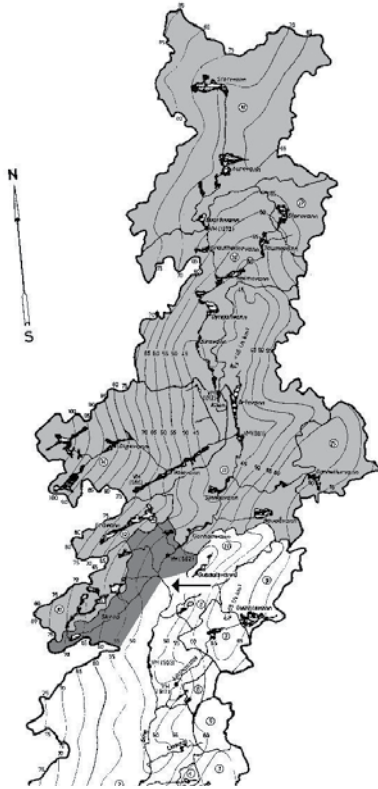
Sira-Kvina Kraftselskap er pålagt å foreta hydrologiske observasjoner i konsesjonsområdet. Stasjonene som er i drift i dag har dataserier helt tilbake til 1970-årene. I denne studien er det benyttet vann

føringsdata med døgnoppløsning fra stasjonene "Jogla" og "Regevik".

NVE har allerede beregnet både areal og avrenning for en rekke felter, såkalte "REGINE" enheter (NVE-atlas), og disse er så langt som mulig benyttet. For enkelte felter som ikke inngår i REGINE er det supplert med beregnede arealer på 1:50.000 kart (M711). Spesifikk avrenning for disse ble hentet fra NVE-atlas.



Figur 1. Fidjelandvatn (PIL). Nåværende restfelt (mørk grått) og overført felt (grått). Kartet er omarbeidet etter isohydatkart gitt i Otnes og Ræstad (1978), som også feltnummereringen referer til.



Figur 2. Sira v/Omlid (PIL). Nåværende restfelt (mørk grått) og overført felt (grått). Kartet er omarbeidet etter isohydatkart gitt i Otnes og Ræstad (1978), som også feltnummereringen referer til.

## Metoder

### Blandingsmodell

For å estimere en uregulert vannkvalitet må det lages blandingsmodeller for vannkvaliteten fra de forskjellige delfelt, som tar hensyn både til varierende blandingsforhold over året og varierende vannkjemi. For konservative parametre gjelder at summen av massefluksene inn

til et blandingspunkt skal være lik fluksen ut:

$$dM_{\text{ut}}/dt = dM_1/dt + dM_2/dt + \dots dM_n/dt$$

hvor "n" er antall tilløp (1)

Massefluksen kan også skrives som produktet av vannføring (Q) og konsentrasjon (C):

$$Q_{\text{ut}}(t) \times C_{\text{ut}}(t) = Q_1(t) \times C_1(t) + Q_2(t) \times C_2(t) + \dots Q_n(t) \times C_n(t)$$

(2)

Løst med hensyn på  $C_{\text{ut}}$  tilsvarer dette en volumveid middel av konsentrasjonene i de forskjellige tilløpene til blandingspunktet. Eksempel for kalsium (Ca):

$$Ca_T(t) = 1/Q_T(t) \times \sum (Q_n(t) \times Ca_n(t))$$

for n = 1 ... antall tilløp (3)

hvor  $Ca_T(t)$  er kalsium ved tidspunkt "t" for alle feltene (samløp)

$Ca_n(t)$  er kalsium ved tidspunkt "t" fra delfelt "n"

$Q_n(t)$  er vannføring ved tiden "t" fra delfelt "n"

$Q_T(t)$  er total vannføring fra alle felt ved tiden "t":  $Q_T(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + \dots Q_n(t)$

Estimater av  $Q_n$  er basert på målte samtidige vannføringer fra vannmerker i Sira. Valgene av vannmerker er nærmere begrunnet i Enge (2009b):

- **Jogla** er benyttet for delfelter oppstrøms 660 m o.h. (Valevatn-nivå)
- **Regevik** er benyttet nedstrøms Tjørhom

- **40 % Jogla + 60 % Regevik** er benyttet for Tjørhom/Fidjeland-feltet

Alle verdier for  $Ca_n$  (og konduktivitet og Al) er samtidige målinger hentet fra ulike overvåkingsserier. Med "samtidig" menes her samme måned. For felt uten målinger er data fra nærliggende felter benyttet. Stasjonsvalgene er nærmere begrunnet i Enge (2009b):

- **Degevatn/Storå** er benyttet for hele Valevatn-feltet + Gravatn og Skreå-feltene
- **Storstein** er benyttet for Sira oppstrøms Kilen i Valevatn
- **Raudåvatn** er kun benyttet for eget felt
- **Fidjelandsvatn og Sira Omlid** benyttet for lokale delfelt
- **Sira Nesset** er benyttet for lokale delfelt og Ognhellerfeltet
- **Flatstølåna og Jogla** er benyttet i stedet for Sira Nesset i 1987/88
- **Holmevatn** er benyttet i stedet for Storstein i 1987/88
- **Gofarlonene inn** er benyttet for hele Godfarfeltet + Svartevatn
- **Gofarlonene utløp** er benyttet for lokalt restfelt

### Ikke-konservative vannkjemiske parametre

I utgangspunktet er det valgt å betrakte Al og konduktivitet som konservative parametre (diskuteres seinere). pH derimot er ikke en konservativ parameter, i tillegg til at sammenhenger som omfatter pH vanligvis heller ikke er lineære. Dessuten vil også mer uspesifikke para-

metre som organisk stoff (humussyrer og korresponderende anioner) kunne påvirke pH. pH i blandingsvannkvaliteten må derfor estimeres med utgangspunkt i empiriske sammenhenger mellom pH og konservative parametre. Med utgangspunkt i de parametre som er benyttet i overvåkingen, er det valgt å forsøke å etablere sammenhenger mellom pH og parametrene Ca, konduktivitet og Al. Det forsøkes flere alternative sammenhenger, fra en ren lineær sammenheng på formen:

$$pH = K_1 \times Ca + K_2 \times Kond + K_3 \times Al + K_4 \quad (4)$$

til en logaritmisk variant på formen:

$$pH = K'_1 \times \log(Ca) + K'_2 \times \log(Kond) + K'_3 \times \log(Al) + K'_4 \quad (5)$$

og alle kombinasjoner i mellom. Konstantene bestemmes ved multiplere regresjon.

Siden vannkvaliteten har bedret seg betydelig i observasjonsperioden, er også dato ("datevalue") forsøkt tatt med i den empiriske pH-kurven. ("Datevalue" er en standard regnearkformatering av datoer.)

Rent regneteknisk er beregningene gjort i LOTUS regneark. Utskrift av selve regnearkene er vist i vedlegg 5 i Enge (2009b).

## Resultater

Den empiriske sammenhengen mellom pH og andre parametre er basert på alle tilgjengelige målinger fra stasjonene i Sira og Kvina med data for pH, kondukti-

vitet, Ca og Al (n=1601). Det ble funnet bedre tilpasning ved å også inkludere dato (“datevalue”) i regresjonen, noe som skyldes at pH-Ca forholdet er endret de seinere

år på grunn av avtagende forsurening. Best tilpasning ( $r^2=0.75$ ,  $p<0.001$ ,  $n=1601$ ) ble funnet med en full-logaritmsk sammenheng (Ca: mg/l, Kond:  $\mu\text{S/cm}$ , Al:  $\mu\text{g/l}$ ):

$$\text{pH}_{\text{ESTIMERT}} = 6.67 + 1.13 \times \log(\text{Ca}) - 0.94 \times \log(\text{Kond}) - 0.70 \times \log(\text{Al}) + 0.000040 \times \text{“datevalue”} \quad (6)$$

Lokalitet	Dato	Vannføring		$\Delta$ pH	$\Delta$ Kond. $\mu\text{S/cm}$	$\Delta$ Ca mg/l	$\Delta$ Al $\mu\text{g/l}$
		m3/s	%				
Gofar ut	15-mai-87	18,3	93%	0,03	0,4	0,01	-6
Gofar ut	15-jun-87	22,2	113%	0,12	-1,5	0,02	-10
Omlid	01-okt-87	298	446%	-0,00	4,9	0,16	29
Omlid	01-nov-87	12,6	19%	-0,03	5,1	0,18	46
Omlid	01-jan-88	27,7	42%	0,01	3,2	0,16	8
Omlid	01-mar-88	4,05	6%	0,25	5,9	0,54	2
Omlid	01-mai-88	224	337%	0,19	-2,5	0,00	-45
Fidjeland	20-feb-93	18,4	35%	-0,06	28,5	0,77	115
Fidjeland	16-apr-93	6,18	12%	-0,04	22,4	0,75	84
Fidjeland	26-mai-93	176	339%	0,18	-14,1	-0,15	-49
Fidjeland	04-aug-93	169	325%	-0,06	2,9	0,17	58
Fidjeland	16-apr-94	42,7	82%	0,00	13,7	0,37	39
Omlid	23-feb-93	20,2	30%	-0,13	-1,2	-0,16	14
Omlid	17-apr-93	8,29	12%	-0,09	9,5	0,28	54
Omlid	26-mai-93	209	314%	0,10	-10,0	-0,02	-2
Omlid	04-aug-93	247	370%	-0,18	5,6	0,16	66
Omlid	20-apr-94	61,7	92%	-0,28	15,7	0,18	97
Fidjeland	10-apr-02	50,9	98%	-0,10	3,3	0,09	37
Fidjeland	24-mar-03	12,8	25%	0,06	7,9	0,51	42
Fidjeland	21-jun-03	93,2	180%	-0,32	1,1	-0,00	42
Fidjeland	29-jan-04	12,6	24%	0,15	1,2	0,34	31
Fidjeland	20-mar-04	9,86	19%	0,04	3,5	0,27	51
Fidjeland	28-jan-05	20,7	40%	-0,15	12,1	0,21	48
Fidjeland	06-apr-05	72,7	140%	-0,08	4,0	0,12	38
Fidjeland	05-apr-06	3,87	7%	0,00	4,4	0,31	38
Fidjeland	06-aug-07	15,7	30%	-0,02	2,3	0,15	31
Fidjeland	31-okt-07	41,2	79%	-0,08	2,9	0,20	61
Fidjeland	10-feb-08	10,3	20%	-0,07	11,1	0,36	42
Grydal	18-jul-02	6,84	21%	0,08	0,1	0,07	3
Omlid	13-apr-02	62,0	93%	-0,09	3,1	0,09	37
Omlid	25-mar-03	17,7	27%	-0,08	3,4	0,10	26
Omlid	13-jun-03	110	165%	-0,13	3,5	0,09	27
Omlid	28-jan-04	16,6	25%	0,04	5,0	0,29	18
Omlid	24-mar-04	13,9	21%	-0,04	3,9	0,12	26
Omlid	25-jan-05	28,9	43%	-0,10	17,4	0,37	44
Omlid	06-apr-05	99,6	149%	-0,28	4,2	-0,08	33
Omlid	06-apr-06	6,71	10%	-0,14	4,4	0,02	15
Omlid	02-sep-06	62,7	94%	-0,29	3,9	0,13	80
Omlid	07-aug-07	20,2	30%	-0,02	6,9	0,36	37
Omlid	03-nov-07	55,8	84%	-0,22	6,6	0,12	50
Omlid	12-feb-08	13,4	20%	-0,14	15,9	0,36	40

“Dato”: Vannprøvene som inngår i hver enkelt blandingsberegning har sjelden eksakt sam me dato. Av praktiske årsaker er disse på tidsaksen representert ved middel av datoene for prøvene som inngår.

“Vannføring”: Estimert uregulert vannføring. “%”: Relativ vannføring (i forhold til årsmiddel).  $\Delta$ : Differanse mellom nåværende målt regulert vannkvalitet og den estimert uregulerte vannkvaliteten for parametrene pH, konduktivitet, kalsium og aluminium.

Tabell 1. Beregninger (n=41) av vannkvalitetsendringer i Sira som følge av Sira-Kvina reguleringen. Beregningsrådata er vist i detalj i vedlegg 5 i Enge (2009b).

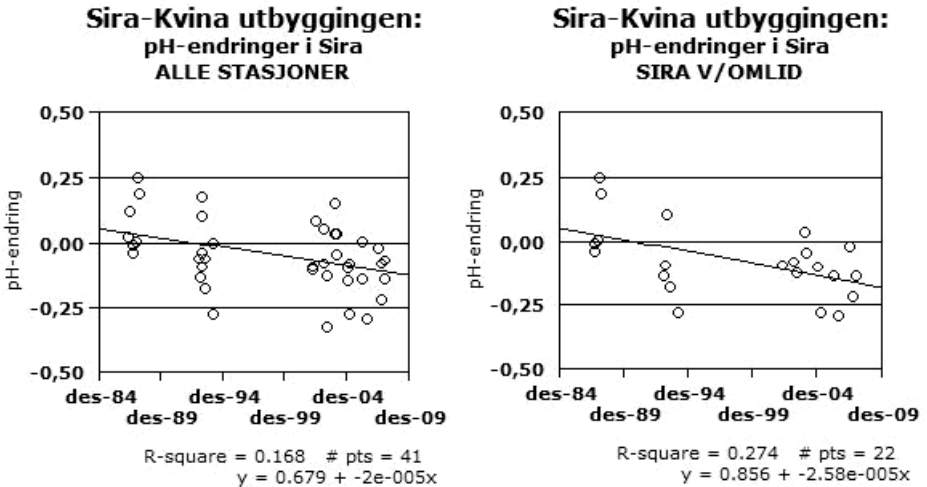
Reguleringen har gitt signifikant ( $p < 0.05$ ) økte verdier for konduktivitet, kalsium og aluminium i Sira, tabell 1. Det ble ikke funnet tidstrender ( $p > 0.05$ ) i disse endringene, tabell 2.

Effektene på pH derimot, var ikke konstante over tid (fig. 3). En opprinnelig positiv effekt på pH-verdiene i Sira, avtok over tid, ( $p < 0.05$ ).

Lokalitet	Dato	$\Delta$ pH	$\Delta$ Kond. $\mu\text{S/cm}$	$\Delta$ Ca mg/l	$\Delta$ Al $\mu\text{g/l}$
Gofar/Omlid	1987/88	+	0	+	0
Fidjeland/Omlid	1993/94	0	0	++	++
Fidjeland/Omlid/Grydal	2002-08	--	+++	+++	+++
<b>ALLE</b>	<b>1987-2008</b>	--	+++	+++	+++

“+” og “-” referer til positiv og negativ effekt. Enkelt tegn (+ el. -) referer  $p < 0.10$  nivå, og dobbelt (++ el. --) til  $p < 0.05$  nivå, og trippel (+++ el. ---) til  $p < 0.01$  nivå. “0” betyr ingen signifikante effekter.

Tabell 2. Vannkvalitetsendringer og signifikans



Figur 3. Tidstrender i reguleringseffekter på pH. Stigningskoeffisienten i regresjonene refererer til “datevalue” (se tidligere).

## Diskusjon

Siden det var nødvendig med en “universell” sammenheng mellom pH og andre parametre, som kunne benyttes alle år, måtte en viktig parameter som fargetall utelates, da denne ikke ble målt før i 1998. Farge representerer vannets innhold av humussyrer, som i varierende grad virker bufrende (Lydersen et al. 2004). Det ble forsøkt en multiplere regresjon med pH mot Ca, konduktivitet, Al og dato, og alle disse gav signifikante bidrag ( $p < 0.05$ ). Det ble funnet best tilpassing med en full-logaritmisk sammenheng. De ulike parametrene effekt på denne kurven er nærmere diskutert i Enge (2009b).

Ideelt sett ville det vært ønskelig med samtidig vannkjemi fra alle de aktuelle felter, i en slik blandingsberegning. I mange tilfeller lå imidlertid prøvestasjonene i varierende avstander oppstrøms det aktuelle blandingspunktet, og da blir det ikke rett å benytte samtidig vannkvalitet. Det er forsøkt en tilnærming hvor alle data benyttet i en blandingsberegning skulle være hentet innenfor en periode på 1 måned. Dette kravet var et kompromiss mellom det ideelle og det praktiske. Noe forkorting av dette intervallet kunne vært ønskelig, men da hadde antall observasjoner blitt betydelig redusert. Stort antall observasjoner er i seg selv en styrke.

Siden kalsium ikke inngår i kjemiske reaksjoner under blanding av de aktuelle vannkvaliteter, kan den betraktes som en konservativ parameter. Konduktivitet og Al er derimot er ikke uten videre å betrakte som konservative, men er likevel

håndtert som konservative parametre i beregningene. Konduktiviteten inkluderer bidrag fra både salter og fra  $H^+$ . Siden pH ikke er en konservativ parameter, blir heller ikke  $H^+$ -konduktiviteten konservativ. Imidlertid utgjorde  $H^+$ -konduktiviteten i snitt bare omlag 10 % av den målte konduktiviteten (elvestasjoner i Sira). I estimeringssammenheng vil derfor selv betydelig usikkerhet i sistnevnte i begrenset grad slå ut på den totale konduktiviteten. Siden Al-specieringen er pH-avhengig (Stumm og Morgan 1996, Gensemer og Playle 1999) vil heller ikke de pH-avhengige Al-fraksjoner være å betrakte som konservative parametre. Imidlertid medfører analysemetoden (ECR) surgjøring til pH=3 (Eaton et al. 1995), så alle de aktuelle specieringene vil uansett måles. Derfor kan også Al med god tilnærming betraktes som en konservativ parameter under disse forhold.

Alt vann fra de øvre delfeltene i Sira samles nå etter reguleringen i Valevatn-magasinet. På grunn av lang oppholdstid og utveksling av vann med Svartevassmagasinet (pumping) utjevnes vannkvalitetsvariasjonene, og selv et fåtall prøver i dette systemet forventes derfor å gi et brukbart estimat av middelverdi for fraført vannkvalitet. Som kontroll av både representativiteten av stasjonene “Degevatn/Stora” og “Storstein”, og beregningsmetodikken generelt er det gjort en tilsvarende modellberegning som for Sira, men med utgangspunkt i at vannet går til Valevatn-magasinet. Observerte og modellberegnet pH-verdi i Valevatn var identisk ( $\Delta pH = 0.01$ ).



Beregningene, tabell 1, viste at de største vannkjemiske endringene i restfeltene var økt ioneinnhold i vannet. Årsakene til dette er noe gunstigere geologiske forhold nede i selve hoveddalførene, og relativt sett større grad av marin påvirkning, da de minst marint eksponerte feltene ble overført. Basert på tabell 1 kan endringene i konduktivitet beregnes til  $+5.4 \pm 7.4 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $n=41$ ) og kalsium  $+0.20 \pm 0.20 \text{ mg}/\text{l}$  ( $n=41$ ). Med middelværdier for konduktivitet som i utgangspunktet var  $<20 \mu\text{S}/\text{cm}$  og kalsium  $<0.5 \text{ mg}/\text{l}$ , er dette betydelige økninger.

Basert på dette materialet, som er fra etter 1987, ble det ikke funnet tidstrender i effektene på konduktivitet eller Ca ( $p>0.05$ ). Det er heller ingen kjemiske eller hydrologiske grunner til at det skulle være tidstrender i disse effektene. De estimerte økningene i konduktivitet ( $+5.4 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) og kalsium ( $+0.20 \text{ mg}/\text{l}$ ) er derfor trolig representative for hele perioden etter reguleringen. Reguleringens effekter på pH-verdiene var derimot små, figur 3. Ekstrapolering tilbake til 1970, antydnet kun en liten momentan, men temporær positiv effekt ( $+0.17 \text{ pH}$ ), men dette estimatet er forbundet med usikkerhet.

Ikke bare pH, men også konduktivitet og Ca har stor betydning for overlevelse av fisk i surt vann (Wright og Snekvik 1978, Sevaldrud og Muniz 1980, Brown 1981a, Brown 1981b, Bulger et al. 1993). Reguleringens momentane effekter på disse parametrene var derfor trolig hovedårsaken til at aure overlevde i Sira på begynnelsen av 1970-tallet, på et tidspunkt da fiskebestandene i andre deler

av vassdraget stort sett var utdøende. Til tross for reguleringseffekten var vannkvaliteten i Sira likevel marginal, og fiskebestandene i Sira var tynne i hvert fall ut 1970-tallet.

Siden 1980-årene har det blitt inngått flere internasjonale avtaler om reduksjoner av de sure utslippene. Siste avtalen er den såkalte "Gøteborg-avtalen, som ble undertegnet i 1999 (UNECE 1999). Som følge av disse avtalene er forsuringen vesentlig redusert de seinere år (SFT 2005), noe som har gitt bedret vannkvalitet blant annet i Sira-vassdraget. I dag er de høyestliggende områdene i Sira og Kvina bare svakt forsuret, og vannkvaliteten antas etter hvert å nærme seg en uforurett vannkvalitet (Enge 2008). Samtidig er de søndre områdene fortsatt tydelig påvirket av forsuring. Som følge av dette er den tidligere positive effekten av reguleringene på pH nå reversert fordi vannet i høyereliggende strøk nå er litt mindre surt enn i restfeltene, figur 3. Imidlertid vedvarer den positive reguleringseffekten på Ca og konduktivitet, tabell 2.

Parallelt med vannkvalitetsforbedringene er det registrert betydelige økninger i fiskebestander i innsjøer og fiske tettheter i Sira (Enge 1997, Enge 2000, Enge 2001, Enge 2004, Enge 2005, Enge 2006, Enge 2008 og Enge 2009a). De siste årene har imidlertid økningene i fiske tetthet i Sira vært liten, så endringene fra år til år er nå trolig naturlige svingninger. Dette støttes av statistisk bearbeidelse av de lange tidsseriene for fisketetthet, som viste at det var habitat som nå var viktigste forklaringsparameter, mens vannkvalitet var av mindre betydning (Enge

2009b). Forsuring er derfor ikke lenger begrensende for fiskebestandene i Sira.

### Referanser

Brown, D.J.A. (1981a): The effect of pH and calcium on fish and fisheries. *Water, Air and Soil Pollution*, 18: 343-351

Brown, D.J.A. (1981b): The effects of various cations on the survival of brown trout, *Salmo trutta* at low pHs. *Journal of Fish Biology* 18: 31-40

Bulger, A.J., Lien, L., Cosby, B.J. and Henriksen, A. (1993): Brown trout (*Salmo trutta*) Status and Chemistry from the Norwegian Thousand Lake Survey: Statistical Analysis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 50: 575-585

Eaton, A.D. (editor), Clesceri, L.S. (editor) and Greenberg, A.E (editor) (1995): Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19.edt.). *American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation, Washington DC*

Enge, E. (1992): Vannkjemisk overvåkning i Sira-Kvina's konsesjonsområde (aug. 1985 - aug. 1991). (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (1997): Fiskeribiologiske undersøkelser i Sira 1996. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2000): Fiskeribiologiske undersøkelser i Sirdal juli 2000. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2001): Fiskeribiologiske undersøkelser i Sirdal juli 2001. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2004): Fiskeribiologiske undersøkelser i Sirdal sommeren 2003. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2005): Fiskeundersøkelser i Sira juli 2005 - Lang tidsserie: 1987 - 2005. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2006): Fiskeundersøkelser i vassdragene Sira, Kvina og Hunnedal/Dirdal (juni - sept. 2006). (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2008): Forsuringsstatus og vurdering av behov for kalking i fjellområdene i Agder-fylkene og Rogaland. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Fylkesmannen i Aust-Agder*)

Enge, E. (2009a): Fiskeundersøkelser i Sira- og Kvinavassdragene sommeren 2008. (*Prosjektrapport, oppdragsgiver: Sira-Kvina*)

Enge, E. (2009b): Sira-Kvina utbyggingen - Effekter på vannkjemi, forsuringssituasjon og fiskebestander i Sira. *MSc-oppgave UiS, juni 2009*

Gensemer, R.W. and Playle, R.C. (1999): The Bioavailability and Toxicity of Aluminium in Aquatic Environments. *Critical reviews in Environmental Science and Technology*, 29(4): 315-450

- Gunnerød, T.B., Møkkelgjerd, P.I., Kle-metsen, C.E., Hvidsten, N.A. og Garnås, E. (1981): Fiskeribiologiske undersøkel-ser i regulerte vassdrag på Sørlandet, 1972-1978. *Direktoratet for vilt og fersk-vannsfisk - Reguleringsundersøkelsene DVF-RU 4-1981*
- Hansen, J.H. (1986): Forslag til forvalt-ningsplan for fisk i Njardarheim Veide-mark. *Fylkesmannen i Aust-Agder, 14-1986*
- Hesthagen, T., Sevaldrud, I.H. og Berger, H.M. (1999): Assessment of damage to fish populations in Norwegian lakes due to acidification. *Ambio 28: 112-117*
- Huitfeldt-Kaas, H. (1922): Om aarsaken til massedød av laks og ørret i Frafjordel-ven, Helleelven og Dirdalselven i Ryfylke høsten 1920. *Norges Jæger og Fiskerfore-nings tidsskrift, 1922: 51:37-44*
- Jensen, K.W. (1967): Sira-Kvina. Utbyg-gingens virkninger på ørretfisket. II. Sir-dalsvatn-Lundevatn m.m. *Fiskeforskning-en, DVF*
- Jensen, K.W. (1968): Sira-Kvina. Utbyg-gingens virkninger på ørretfisket. III. Sira fra Tonstad til Tjørhom, Ousdalen, Valevatn m.m. *Fiskeforskningen, DVF*
- L'Abée-Lund, J.H. (1985): Fiskeundersø-kelser i Njardarheim, forprosjekt for for-valtningsplan. *Fylkesmannen i Aust-Ag-der, 5-1985*
- Larsen P.A., Haraldstad, Ø. og Ousdal, J.O. (1989): Fiskeribiologiske under-søkelser i Sira på strekningen Sirekrok - Tonstad i 1987. *Fylkesmannen i Vest-Agder*
- Lydersen, E., Larsen, T. og Fjeld, E. (2004): The influence of total organic carbon (TOC) on the relationship be-tween acid neutralizing capacity (ANC) and fish status in Norwegian lakes. *Science of the Total Environment 326: 63-69*
- Løkensgard, T. (1975): Fiskeribiologiske undersøkelser i Sira/Kvina vassdragene i 1972. *Fiskerikonsulenten for Øst-Norge*
- Mellquist, P. (1972): Statistisk analyse av pH-data fra Sira-Kvina vassdragene. *NVE, Kontoret for landskapspleie og na-turvern, VN-rapport 1-72*
- Møkkelgjerd, P.I. og Gunnerød, T. B. (1985): Utsettinger av bekkerøye i regu-lerte vassdrag på Sørlandet - Rapport fra kontrollfisket i 1984. *DVF-RU 10-1985*
- NVE-atlas: [nve.no](http://nve.no)
- Otnes, J. og Ræstad, E. (1978): Hydrologi i praksis. *Ingeniørforlaget, Oslo*
- Qvenild, T., Kleiven, E. og Hesthagen, T. (2007): Forsuring i 150 år. *Jakt & Fiske, 10-07*
- Sevaldrud, I. og Muniz, I.P. (1980): Sure vatn og innlandsfiske i Norge. Resultater fra intervjuundersøkelsene 1974-1979. *IR 77/80, SNSF*

SFT (2005): Overvåking av langtransportert luft og nedbør. Årsrapport - Effekter 2004. *Statens Forurensingstilsyn*

Stumm, W. and Morgan, J.J. (1996): Aquatic chemistry. *Wiley-Interscience Publication, New York*

Tollan, A. og Overrein, L.N. (1977): Sur nedbør og noen alternative kilder som årsak til forsuring av vassdrag. *SNSF*

UNECE (1999): Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. "The Gothenburg Protocol" *United Nations Economic Commission for Europe, Environment and Human Settlements Division*

Wright, R.F. og Snekvik, E. (1978): Acid precipitation: Chemistry and fish population in 700 lakes in southernmost Norway. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 20: 765-775