

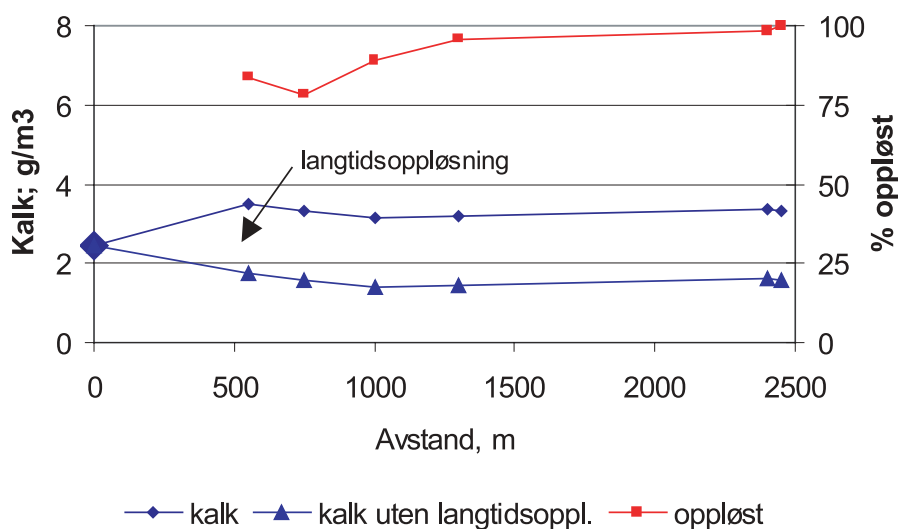
NIVA



RAPPORT LNR 4695-2003

Oppløsning av to ulike kalkprodukter i fullskala forsøk i Kvina og Lygna

KOPPEL (KalkOPPløsning i ELv)



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 Oppløsning av to ulike kalkprodukter i fullskala forsøk i Kvina og Lygna KOPPEL (KalkOPPløsning i ELv)	Løpenr. (for bestilling)	Dato
	4695-2003	2003-06-26
Forfatter(e) Hindar, Atle	Prosjektnr. Undernr.	Sider Pris
	O-21847	31
Fagområde Kalking	Geografisk område	Trykket
	Vest-Agder	NIVA

Oppdragsgiver(e) Direktoratet for naturforvaltning, Hustadmarmor AS og Franzefoss Kalk AS, avdeling Miljøkalk.	Oppdragsreferanse DN-kontrakt 02040035
---	--

Sammendrag

Det er gjennomført sammenliknende fullskala oppløsningsforsøk i Kvina og Lygna av to forskjellige kalktyper som brukes til vassdragskalking. Kalken ble dosert fra kalkdoserere i rutinemessig drift. Kalksteinsmelene BOKALK 75 fra Hustadmarmor og NK 3 fra Miljøkalk ble brukt i forsøkene. BOKALK 75 er vesentlig mer finmalt enn NK 3 og leveres i suspensjon som slurry. Målet med prosjektet var å måle oppløsningen av de to kalktypene, og på det grunnlag vurdere og sammenlikne egnethet for avsyring i vassdrag. Begge kalktypene løste seg godt nok i elvevannet til å gi akseptabel avsyring (pH>6,5) ved realistiske kalkdoser. Dette skjedde også ved forholdsvis dårlige oppløsningsforhold. BOKALK 75 var nær 100% løst 2 km nedstrøms doserer ved moderat og høy vannføring. Langtidsoppløsningen av tidligere sedimentert kalk var tidvis så betydelig at oppløsningsforløpet for dosert kalk ikke uten videre kunne følges. Resultatene er diskutert i forhold til elvekarakteristika og kalkingsstrategi.

Fire norske emneord 1. Kalksteinsmel 2. Oppløsning 3. Elv 4. Forsuring	Fire engelske emneord 1. Limestone powder 2. Dissolution 3. River 4. Acidification
--	--



Atle Hindar
Prosjektleder

Brit Lisa Skjelkvåle
Forskningsleder

Nils Roar Sælthun
Forskningsjef

KOPPEL (KalkOPPløsning i ELv)

**Oppløsning av to ulike kalkprodukter i fullskala
forsøk i Kvina og Lygna**

Forord

Direktoratet for naturforvaltning (DN) støtter uttesting av alternative kalktyper for å få et bedre utvalg avsyringsmidler for sure vann og vassdrag. I elva Kvina ble det gjennomført forsøk med dosering av flytende kalk (slurry), og NIVA ble spurt om å teste oppløsningen av denne kalken.

I prosjektforslag av 11. mai 2001 foreslo NIVA å gjøre fullskala forsøk med to ulike kalktyper i to elver. Forslaget ble akseptert, og kontrakt oversendt 2. oktober 2002. Feltarbeidet foregikk imidlertid i 2001 med midler fra DN.

Rolf Høgberget og Jarle Håvardstun har gjennomført forsøkene, mens Liv Bente Skancke har satt sammen data og tilleggsinformasjon.

Sammen med DN har de to kalkleverandørene Hustadmarmor AS og Franzefoss Kalk AS, avdeling Miljøkalk (tidligere Miljøkalk DA) støttet prosjektet. Vi takker alle for samarbeidet og Miljøkalk for at de stilte driftsdata fra Gyslandanlegget (Lygna) til disposisjon.

Grimstad, 26. juni 2003

Atle Hindar

Innhold

Sammendrag	5
1. Bakgrunn	6
2. Vassdrag og kalk	7
2.1 Kvina	7
2.2 Lygna	9
2.3 Kalken	10
2.3.1 BIOKALK 75	10
2.3.2 NK 3	11
2.4 Hydrologi	12
3. Prøvetaking og analyser	13
4. Resultater og diskusjon	15
4.1 Kvina	15
4.2 Lygna	17
4.3 Kalkopløsning	21
5. Oppsummering og anbefaling	25
6. Referanser	27
Vedlegg A. Primærdata vannkjemi	28

Sammendrag

Det ble gjennomført sammenliknende fullskala oppløsningsforsøk i Kvina og Lygna med to forskjellige kalktyper som brukes til vassdragskalking. Kalken ble dosert fra kalkdoserere i rutinemessig drift. Kalksteinsmelene BIOKALK 75 fra Hustadmarmor og NK 3 fra Miljøkalk ble brukt i forsøkene. BIOKALK 75 foreligger som ferdig oppblandet slurry og doseres via pumper, mens den andre leveres som tørr vare. Den doseres til et oppslemmingskar ved hjelp av mateskruer og slemmes opp i en vannstrøm i kalkdosereren før den tilsettes elva. BIOKALK 75 er vesentlig mer finmalt enn NK 3.

Målet med prosjektet var å måle oppløsningen av de to kalktypene, og på det grunnlag vurdere og sammenlikne egnethet for avsyring i vassdrag.

Fullskala oppløsningsforsøk med kalksteinsmel i elv er bare i svært begrenset grad gjennomført tidligere, og resultatene må ses i lys av det. Blant annet var det vi har kalt langtidsoppløsning av tidligere sedimentert kalk så betydelig at oppløsningsforløpet for dosert kalk ikke uten videre kunne følges. Det ble imidlertid også gjennomført forsøk uten dosering i det ene vassdraget, slik at det til en viss grad var mulig å kvantifisere denne langtidsoppløsningen. Plassering av prøvetakingsstasjoner var som ventet en kritisk faktor. Det ble tatt hensyn til dette, men ved enkelte vannføringsforhold var det større spredning i resultatene enn en forventet monoton endring nedstrøms kalkdoserer. Vassdragsavsnittene nedstrøms de to doseringsanleggene er forskjellige og gir dermed ulike oppløsningsforhold. Men oppløsningsforholdene varierer også med varierende vannføring.

De forhold som er nevnt over, setter rammer for hvordan resultatene kan brukes og tolkes. Forsøkene viste imidlertid at:

- Begge kalktypene løste seg godt nok i elvevannet til å gi akseptabel avsyring ($\text{pH} > 6,5$) ved realistiske kalkdoser. Dette skjedde også ved forholdsvis høy utgangs-pH (nær og over 6,0) og ved middels og noe under middels vannføring, da oppløsningsforholdene er mindre gode.
- Begge kalktypene hadde partikkelfraksjoner som sedimenterte under enkelte av de rådende forholdene, men BIOKALK 75 sedimenterte trolig bare ved lav vannføring.
- Oppløsning av tidligere sedimentert kalk ga betydelig avsyring (pH fra 6,4 og opp til 6,7; økning på 0,3 mg Ca/L) ved moderat vannføring. På årsbasis tilsvarer denne beregnede langtidsoppløsningen i størrelsesorden 20-30 % av totalt kalkforbruk i Lygna, men langtidsoppløsningen er trolig vesentlig større enn dette.
- Ved bruk av BIOKALK 75 i Kvina ble det ikke påvist partikler i vannet etter 2 km, selv ved høy vannføring. Kalkoppløsningen var derfor trolig nær 100%. Ved bruk av NK3 i Lygna ble det påvist 40% partikler i vannet etter 2,5 km ved den dobbelte av denne vannføringen. Den store forskjellen skyldes vesentlig forskjellig kornfordeling, men også ulik vannhastighet og elveutforming under forsøkene kan ha hatt betydning.

Disse og andre resultater viser at det kan være vanskelig å få sammenliknbare tall for faktisk kalkeffekt av ulike kalktyper i vassdrag uten at kalktypene er vesentlig forskjellig. Oppløsning i sedimentasjonskolonner gir et øyeblikksbilde og kan brukes til å rangere kalkprodukter i forhold til momentanoppløsning. Men langtidsoppløsningen utgjør en stor andel av den totale oppløsningen over et år, og den er vanskelig å måle. Med de styringsteknikker som er utviklet for kalkdosering i elver vil en stor andel av all oppløst kalk kunne inngå i doseberegninger. Men det forutsetter at kalkdosering skjer fra flere doserere nedover i vassdraget eller at pH-signaler nedstrøms kan inngå i styringen av anlegget. Det bør skaffes mer kunnskap om forholdet mellom kort- og langtidsoppløsning av kalk og hvordan dette på best måte kan utnyttes som del av kalkingsstrategien i det enkelte vassdrag.

1. Bakgrunn

Det er hittil ikke gjennomført sammenliknende undersøkelser i rennende vann av de forskjellige kalktyper som brukes til vassdragskalking. Verken oppløsning eller kalkforbruk er dokumentert under kontrollerte forhold. Kalkoppløsning er imidlertid undersøkt i sedimentasjonskolonner, men oppløsningsforholdene i slike kolonner er svært annerledes enn ute i vassdragene og gir ikke et fyllestgjørende svar på kalkeffekten. På den annen side er forsøksbetingelsene langt mer kontrollerbare under laboratorieforhold.

Når det ikke finnes data for faktisk oppløsning og heller ikke finnes relevante data til bruk for å sammenlikne kalktyper, er det vanskelig å dokumentere eventuelle konkurransefortrinn for spesifikke produkter.

Sverdrup m.fl. (1985) påpekte at partikkelfordeling i kalken, utgangs-pH, dosens størrelse og graden av oppslemming påvirker den momentane kalkoppløsningen langt mer enn andre faktorer. De fleste av disse fire faktorene er det ønskelig å optimalisere innenfor kalkingsvirksomheten, men utgangs-pH vil naturlig nok kunne være forholdsvis høy hvis det foregår kalking høyere opp i vassdraget. Partikkelfordelingen blir som regel et kompromiss mellom behovet for rask oppløsning og kostnaden ved å produsere små og lettøselige partikler. Dosens størrelse holdes så lav som mulig, dels for å unngå unødig dosering, dels for å unngå for stor sedimentasjon ved at oppløsningen blir for dårlig. Dette siste er sannsynligvis et lite problem før dosen blir over 20-30 g/m³. Så godt som all kalk slemmes idag opp før dosering, både ved innsjøkalking og kalkdosering i elv. Oppslemmingens effekt er imidlertid ikke undersøkt av andre enn Sverdrup og medarbeidere. De fant at tørrdosering reduserte oppløsningen med 25-50% (Sverdrup m.fl. 1985), men de målte ikke langtidsopløsning eller effekt av turbulens og tallene gir derfor på langt nær et fullgodt bilde.

For en del år siden ble det gjennomført forsøk i både innsjøer (Hindar 1984; Rosseland og Hindar 1988) og bekk/elv (Hindar 1987; Hindar og Henriksen 1992) som viste at kalkeffekten ved vassdragskalking er sammensatt av den oppløsning som skjer momentant, dvs. før kalken eventuelt sedimenterer, og en mer langsiktig kalkoppløsning (langtidsopløsning). Forsøk i Sverige viste at 30-80% av dosert kalk i elver sedimenterer når utgangs-pH er omlag 5,0 (Sverdrup m.fl. 1985). Hindar og Henriksen (1992) antydte at kanskje så mye som 100% av kalken løses over lang tid. Det finnes imidlertid ikke data som kan dokumentere dette.

Hindar (1987) foreslo å styre kalkdoseringsanlegg i et feed-back system, slik at langtidsopløsningen nedstrøms dosererne kunne fanges opp i doseberegningen. På den måten ville sedimentert kalk ikke nødvendigvis være tapt kalk. Dette er nå gjennomført ved de fleste større kalkdoseringsanlegg, enten ved at det måles og styres etter pH noen hundre meter nedstrøms anlegget og/eller ved at en bruker en overvåkingsstasjon enda lengere nede i vassdraget til å korrigere doseringen. I tillegg er det flere doserere nedover i samme vassdrag enkelte steder. Dette øker selvsagt muligheten for å ta hensyn til den totale kalkoppløsningen og optimalisere kalkingsstrategien.

På denne bakgrunn kan det synes for snevert å basere egnethetsbetraktninger for vassdragskalk utelukkende på basis av resultater fra momentanoppløsning i sedimentasjonskolonner. Dette prosjektet tok sikte på å skaffe bedre grunnlag for slike vurderinger ved å teste to kalktyper i to vassdrag ved forskjellige vannkjemiske og hydrologiske forhold.

2. Vassdrag og kalk

To vassdrag ble valgt ut for undersøkelsen, Kvina og Lynga i Vest-Agder. Kvina ble valgt ut fordi det i 2000 ble etablert et anlegg for dosering av kalkslurry, mens det i Lynga samme år ble etablert et nytt anlegg for dosering av kalksteinsmel. I begge vassdragene foregikk det kalking med doserere høyere oppe. Under har vi trukket fram en del data for vassdragene og gjennomført kalking i forsøksåret 2001.

2.1 Kvina

Data for Kvina er gitt i **Tabell 1**, mens **Figur 1** viser nedbørfelt og plassering av kalkdoserere. Vassdraget er sterkt regulert, og mer enn halvparten av nedbørfeltet er overført til Sira.

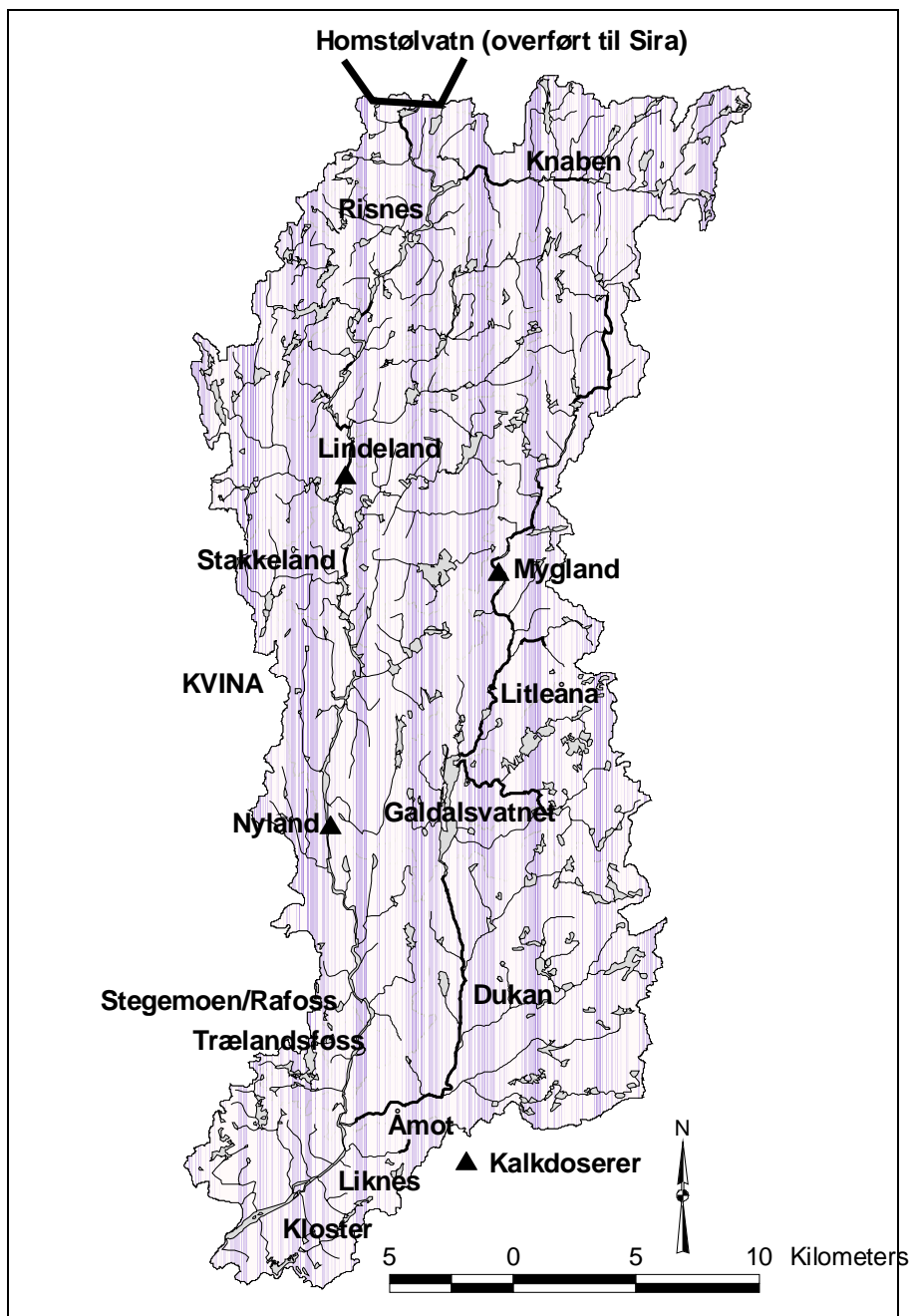
Tabell 1. Data for Kvinavassdraget (data fra DN 2002).

<i>Vassdragsnr:</i>	025
<i>Fylke(r):</i>	Vest-Agder
<i>Areal, nedbørfelt:</i>	1444,9 km ² før regulering (etter reg.: 645.2 km ² , inkl. Litleåna 229.2 km ²)
<i>Regulering:</i>	799.7 km ² (55%) overført til Sira. Mindre reguleringer i nedre del.
<i>Spesifikk avrenning:</i>	56,3 l/s/km ² før regulering (etter reg.: 54.7 l/s/km ²)
<i>Middelvannføring:</i>	81,3 m ³ /s før regulering (inkludert Litleåna)
<i>Kalket siden:</i>	1994 (Lindelands, Myglan), 2000 (Nyland)
<i>Lakseførende strekning:</i>	Til Rafoss, 13 km opp i Kvina og til Åmot, 1 km opp i Litleåna (Figur 1)
<i>Bakgrunn for kalking:</i>	Kvinavassdraget var forsuret, med pH-verdier i området 4,5-5,2. Vannkvaliteten var for dårlig til at laks og sjøaure kunne leve og reproducere i elva (Hindar 1992).
<i>Kalkingsplan:</i>	Hindar (1992)
<i>Biologisk mål:</i>	Å sikre tilstrekkelig god vannkvalitet for reproduksjon av laks i elva. Dette vil samtidig sikre livsmiljøet for de fleste andre forsurningsfølsomme vannorganismer.
<i>Vannkvalitetsmål:</i>	Lakseførende strekning: 1/4-31/5: pH 6,2, 1/6-31/3: pH 6,0.
<i>Kalkingsstrategi:</i>	Vassdraget kalkes med en kalkdoserer i Kvina ved Lindelands bru, en doserer i Litleåna ved Myglan og en doserer i nedre del av Kvina (Nyland). I tillegg blir enkelte innsjøer i nedbørfeltet kalket.

Kalkingen i 2001 ble gjennomført ved følgende lokaliteter og med angitte kalkmengder (kalkdataene er innhentet fra Fylkesmannen i Vest-Agder v/miljøvernveddelingen):

Doserer v/Lindelands:	1579 tonn NK3 (86% CaCO ₃)
Doserer v/Myglan:	580 tonn NK3 (86% CaCO ₃)
Doserer v/Nyland:	1227 tonn (BioKalk – kalkslurry; 92,5% vektprosent CaCO ₃ av tørrstoff; 27% vann i slurry)

Innsjøer i nedbørfeltet ble kalket med 810 tonn kalksteinsmel, mens 112 tonn skjellsand ble spredt i bekker i 2001.



Figur 1. Kvinavassdraget med plassering av tre kalkdoserere.

2.2 Lygna

Data for Lygna er gitt i **Tabell 2**, mens **Figur 2** viser nedbørfelt og plassering av kalkdoserere. Lygna er uregulert, og nedbørfeltarealet er i samme størrelsesorden som ”rest”-Kvina. Sidevassdraget Møska utgjør noe under 20% av hele feltet, og renner inn i Lygna rett før utløpet i sjøen.

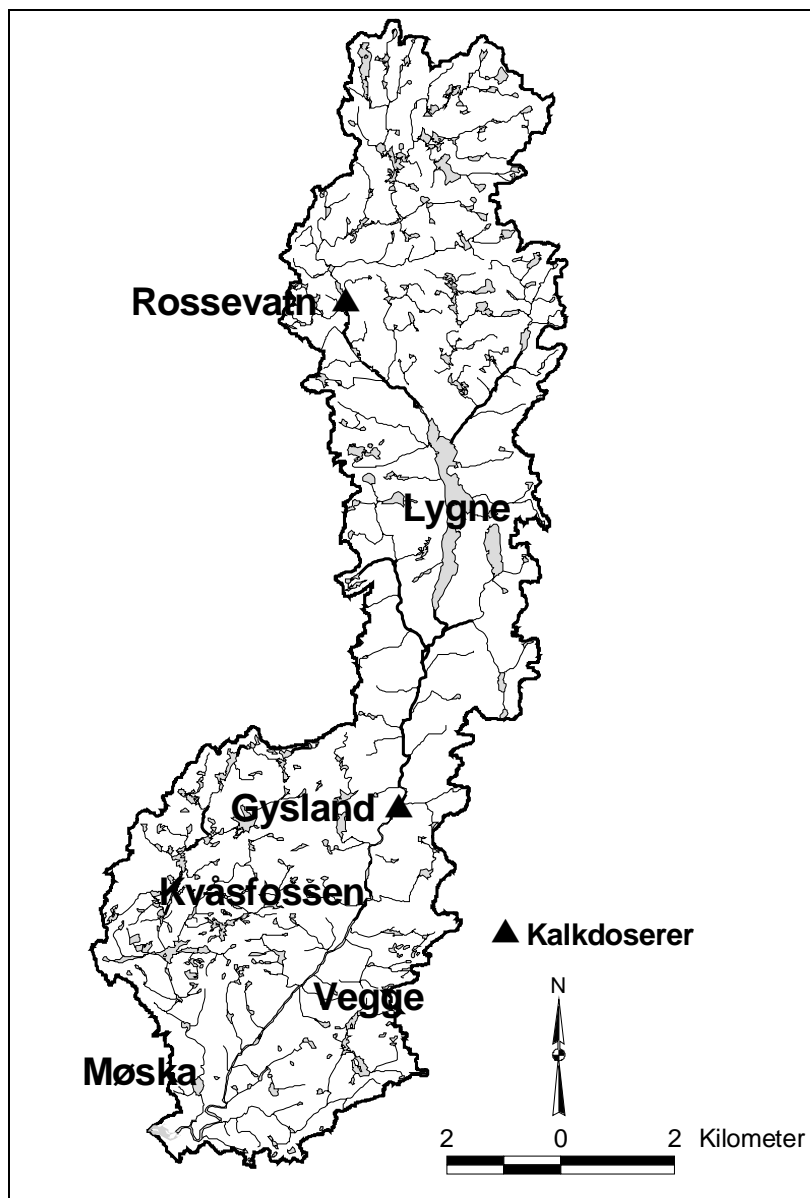
Tabell 2. Data for Lygnavassdraget (data fra DN 2002).

<i>Vassdragsnr:</i>	024
<i>Fylke(r):</i>	Vest-Agder
<i>Areal nedbørfelt:</i>	663,5 km ² (inkl. Møska, 124,6 km ²)
<i>Regulering:</i>	Nei
<i>Spesifikk avrenning:</i>	54 l/s/km ²
<i>Middelvannføring:</i>	30 m ³ /s
<i>Kalket siden:</i>	1991 (Rossevatn), 2000 (Gysland)
<i>Lakseførende strekning:</i>	Til Kvåsfossen (ca 20 km) (Figur 2)
<i>Bakgrunn for kalking:</i>	Laksestammen i Lygna var før kalking utdødd og sjøauren var truet av forsurening (Vikøyr et al. 1989). Det har hele tiden vært rester av de naturlige aurebestandene i Lygna og i hovedelva nedstrøms.
<i>Kalkingsplan:</i>	Vikøyr et al. (1989)
<i>Biologisk mål:</i>	1) Å sikre tilstrekkelig god vannkvalitet til at aure kan leve i Lygna og kalkede innsjøer i nærområdet. 2) Å sikre tilstrekkelig god vannkvalitet for reproduksjon av laks i elva. Dette vil samtidig sikre livsmiljøet for de fleste andre forsuringfølsomme vannorganismer.
<i>Vannkvalitetsmål:</i>	Lakseførende strekning f.o.m. 2001: 1/4-31/5: pH 6,2, 1/6-31/3: pH 6,0.
<i>Kalkingsstrategi:</i>	Vassdraget kalkes ved hjelp av en kalkdoserer plassert ved innløpet til Rossevatn oppstrøms innsjøen Lygna. I tillegg kalkes flere innsjøer i nedbørfeltet. Doserer ved Gysland, rett oppstrøms den lakseførende strekningen, ble satt i drift i mars 2000.

Kalkingen i 2001 ble gjennomført ved følgende lokaliteter og med angitt kalkmengder (kalkdataene er innhentet fra Fylkesmannen i Vest-Agder v/miljøvernveddelingen):

Doserer v/Rossevatn:	1455 tonn skjellsandmel (92% CaCO ₃)
Doserer v/Gysland:	650 tonn NK3 (86% CaCO ₃)
Doserer i Litlåna:	185 tonn grovdolomitt

Innsjøer i nedbørfeltet ble kalket med til sammen 337 tonn kalksteinsmel, mens 283 tonn skjellsand ble spredd i bekker.



Figur 2. Lygnavassdraget med plassering av to kalkdoserere.

2.3 Kalken

I forsøkene ble det brukt to forskjellige typer vassdragskalk, den ene levert som tørt kalksteinsmel og den andre som slurry. Det finnes produktdatablad for begge. Her er tatt med det viktigste.

2.3.1 BOKALK 75

Denne kalken leveres av Hustadmarmor, og den er et sideprodukt fra produksjonen av kalkslurry til papirindustrien. Kalken avvannes etter knusing og vasking til 73 % tørrstoffinnhold, og tilsettes godkjente dispergeringsmidler. Det er likevel nødvendig med røreverk i kalktanken for å holde kalken i suspensjon i doseringsanlegget. BOKALK 75 ble først fortynnet med elvevann i et sirkulasjonskar og deretter ledet ut i elva via pumper.

Vanninnholdet er altså i gjennomsnitt 27%, men kan variere i området 24-30%. Det er 1,35 kg tørrstoff pr. liter slurry (suspensjon). Siden tørrstoffet inneholder 37% Ca, blir innholdet av CaCO₃ 92,5% (37*100/40), som blir 1,25 kg CaCO₃/L slurry. Dette er det samme som 1,25 g CaCO₃/ml slurry. Kalkdosen oppgis i ml slurry/m³ ellevann, og innholdet av CaCO₃ kan finnes ved å multiplisere som følger:

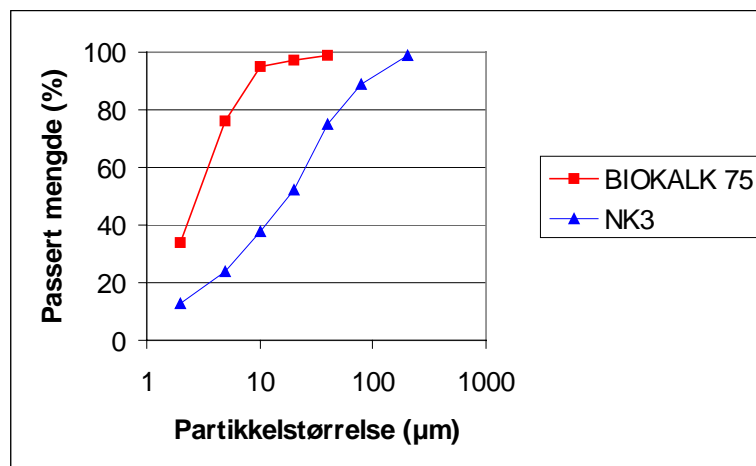
$$\text{CaCO}_3\text{-dose (g CaCO}_3\text{/m}^3\text{ ellevann)} = \text{g CaCO}_3\text{/ml slurry} * \text{ml slurry/m}^3\text{ ellevann}$$

Hvis det f.eks. doseres 3 mL/m³, blir CaCO₃-dosen: 3 mL/m³*1,25 g/mL = 3,75 g/m³. I BIODALK 75 er kornfordelingen som følger: 95% < 10 µm; 76% < 5 µm, 50% < 3 µm og 34% < 2 µm (produktdatablad av 14. desember 2001, se **Figur 3**). I følge litteratur referert av Hongve (1982), kan så godt som 100% av partiklene være i jevn fordeling i vannmassen selv ved lav vannhastighet (25 cm/sekund).

2.3.2 NK 3

Dette tørre kalksteinsmelet leveres av Miljøkalk DA, og er laget for vassdragskalking. Kalken leveres på silo som tørt mel, men slemmes opp i en vannstrøm i selve anlegget og doseres derfor som oppslemmet kalk. Den inneholder 34,5 % Ca, som tilsvarer 86% CaCO₃. I NK 3 er kornfordelingen som følger: 90% < 95 µm; 50% < 18 µm; 20% < 4 µm; 13% < 2 µm (produktdatablad av 3. oktober 2002; se **Figur 3**). NK3 har en kornfordeling som viser at partiklene er vesentlig grovere enn BIODALK 75. I følge litteratur referert av Hongve (1982), kan 70% av partikkelmengden være i jevn fordeling i vannmassen ved høy vannhastighet (100 cm/sek) og nær 50% ved lav vannhastighet (25 cm/sekund). Resten av partikkelmengden vil være utsatt for sedimentasjon.

NK 3 ble dosert ved hjelp av mateskruer til et blandekar med sirkulasjonsvann fra elva før den ble ledet i selvføll ut i elva. Dette prinsippet skal løse opp aggregater av kalkkorn, slik at kalkens totale overflate er mest mulig tilgjengelig for oppløsningsreaksjoner, men vannet tjener også som transportmedium for kalken.



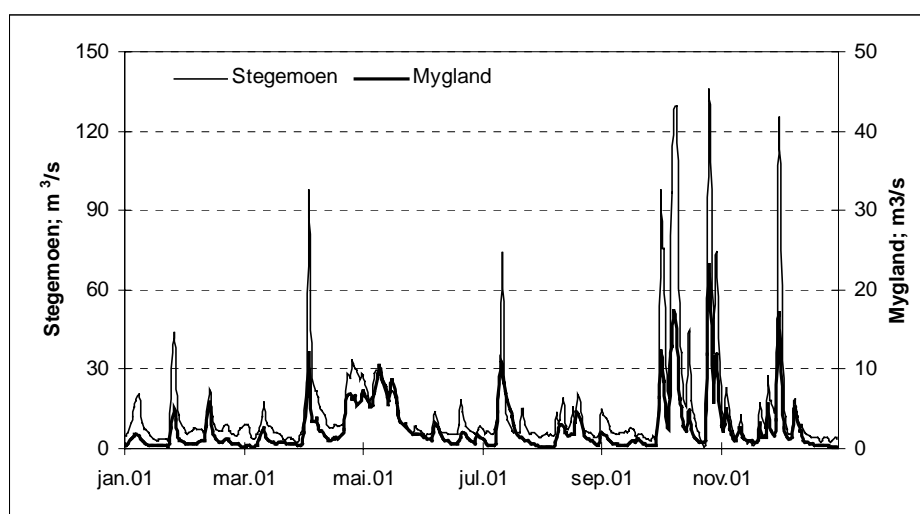
Figur 3. Partikkelfordeling for de to kalktypene. Passert mengde vil si den mengde som passerer gitte maskevidder i en sikt. Begge har en kornfordeling som tilsvarer silt, dvs. partikler i størrelsen mellom leire og sand. Men innslaget av partikler under 2 µm (leirefraksjonen) er vesentlig (34%) i BIODALK 75, og innslaget av sand (partikler > 60 µm) er 15% i NK3. 100 µm er det samme som 0,1 mm.

2.4 Hydrologi

Kvina

Det foreligger vannføringsdata fra Kvinavassdraget på stasjonene Stegemoen/Rafoss mellom Nylandanlegget og utløpet i sjøen og Mygland ved kalkdoseringsanlegget i Litleåna. Ved prøvetakingen den 18. mai 2001 var vannføringen ved Stegemoen $22 \text{ m}^3/\text{s}$, mens vannføringen den 29. august og 5. september 2001 var hhv. 5 og $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (**Figur 4**). Middelvannføringen i 2001 var $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$, mens medianvannføringen dette året var $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Det vil si at det var forholdsvis høy vannføring ved prøvetakingen i mai. Det var midlere vannføring (i forhold til medianvannføring) eller under midlere/lav vannføring (i forhold til middelvannføring) i august/september.

Medianvannføring finnes ved at vannføringen for alle dager i året rangeres fra lavest til høyest og man velger den midterste verdien. Den store forskjellen mellom middel og median skyldes at det kommer forholdsvis mye vann når det er flom og at dette utgjør en stor andel av den årlige avrenningen.

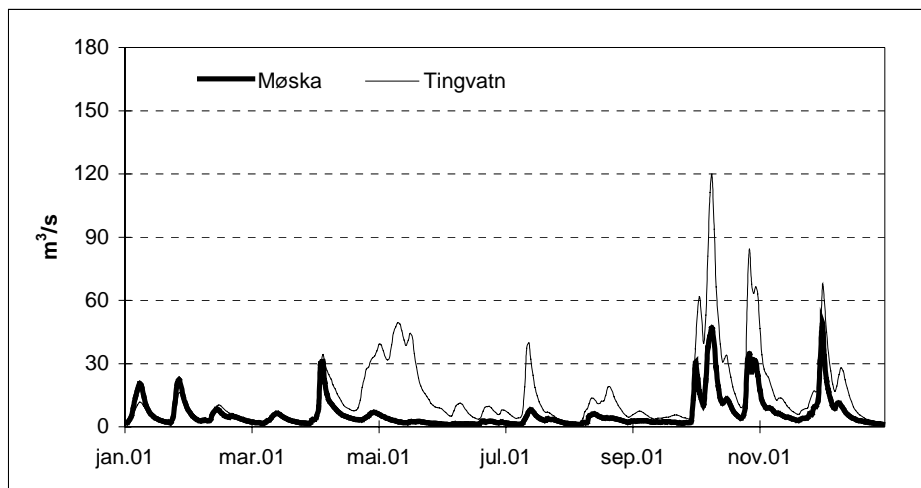


Figur 4. Vannføring (døgnverdier) i 2001 ved stasjonene Stegemoen (Kvina) og Mygland (Litleåna) (NVE 2002).

Lygna

Det foreligger vannføringsdata fra Lygnavassdraget på stasjonen Tingvatn i utløpet av Lygne. Ved prøvetakingen den 8. og 11. mai 2001 var vannføringen ved Tingvatn hhv. 33 og $47 \text{ m}^3/\text{s}$, mens vannføringen den 15. og 29. august 2001 var hhv. $12,5$ og $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (**Figur 5**). Middelvannføringen i 2001 var $14,9 \text{ m}^3/\text{s}$, mens medianvannføringen dette året var $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Det vil si at det var høy vannføring ved prøvetakingene i mai og midlere vannføring (i forhold til median) eller under midlere til lav vannføring (i forhold til middelavrenning) i august.

Figur 5 viser at det var lav vannføring i sidevassdaget Møska i mai, men høy ved Tingvatn. Det skyldes at Møska ligger nær sjøen, og at nedbørfeltet ligger lavere i terrenget. Det var derfor ingen snøsmelting her, mens det var tilfellet i de øvre deler av Lygna. Møska hadde omlag halvparten så stor middel- og medianavrenning som Lygna ved Tingvatn. Vinteravrenningen fram til mai var imidlertid omlag den samme fordi nedbøren i større grad kom som regn, mens høstavrenningen tydeligere gjenspeiler dette forholdet. Ut fra dette kan en også slutte at Lygna var dominert av smeltevann fra øvre deler i mai.



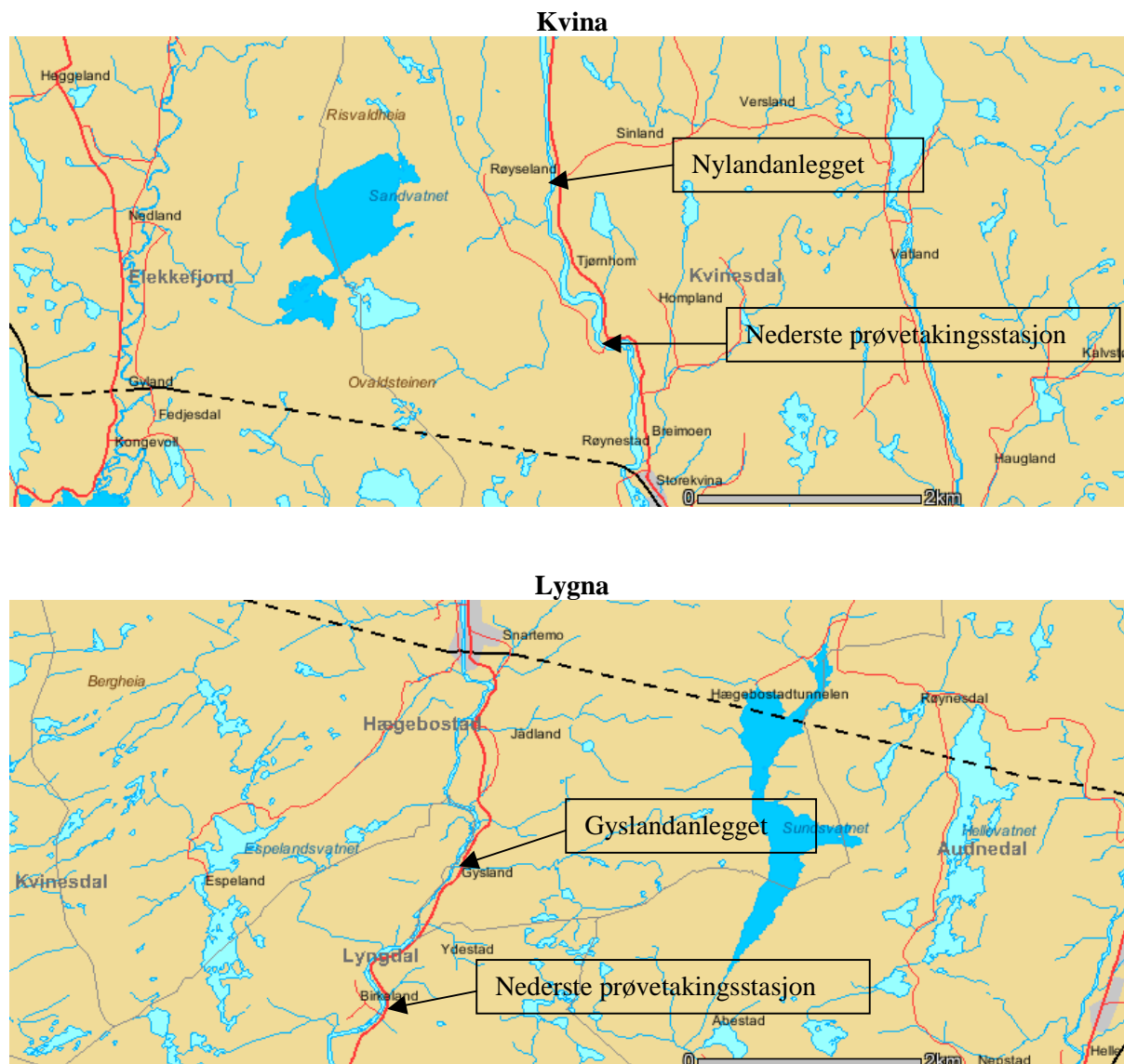
Figur 5. Vannføring (døgnverdier) i 2001 ved stasjonene Tingvatn (utløp Lygne) og sidevassdraget Møska (utløp Lyngdal sentrum) (NVE 2002).

3. Prøvetaking og analyser

Vassdragsavsnittene der doseringsanleggene er plassert og der prøvetakingen ble gjennomført er vist i **Figur 6**. Det ble tatt ut prøver oppstrøms og nedstrøms de to doseringsanleggene i Kvina (Nyland) og Lygna (Gysland) under hver forsøksperiode. Stasjonsplasseringene nedstrøms anleggene skulle være slik at det var homogen innblanding av kalk i elvevannet og at oppløsnings- og sedimentasjonsforløpet kunne følges et stykke nedover i elva. Det ble derfor valgt ut fem stasjonspunkter nedstrøms anleggene (**Tabell 3**). Stasjon 6 i begge vassdrag er på omlag samme sted som St.5, men her er prøvevannet tatt ut etter pumpeleddet ved loggestasjonen i motsetning til for St.5 hvor prøvevannet ble tatt ute i elva.

Tabell 3. Plassering av prøvetakingsstasjonene i vassdragene Kvina og Lygna.

Kvina	Lygna
Oppstrøms doseringsanlegget på Nyland	Oppstrøms doseringsanlegget på Gysland
St.1 200 m nedenfor anlegget	St.1 550 m nedenfor anlegget
St.2 550 m nedenfor anlegget	St.2 750 m nedenfor anlegget
St.3 850 m nedenfor anlegget	St.3 1000 m nedenfor anlegget
St.4 1450 m nedenfor anlegget	St.4 1300 m nedenfor anlegget
St.5 2150 m nedenfor anlegget (Oksestein bru)	St.5 2400 m nedenfor anlegget (Birkeland)
St.6 2200 m nedenfor anlegget (loggestasjon)	St.6 2450 m nedenfor anlegget (loggestasjon)



Figur 6. Vassdragsavsnittene i Kvina (øverst) og Lygna (nederst) der kalkdoserer er plassert og prøvetaking foregikk. Nylandanlegget i Kvina ligger der veien mot Sinland tar av fra hovedveien gjennom dalen, mens Gyslandanlegget i Lygna ligger der navnet Gysland er plassert på kartet. Nederste prøvetaking i begge vassdrag var ved bro omlag 2 km nedstrøms anleggene.

Kvina går for det meste i svakt hellende terreng på strekningen Nylandanlegget til nederste stasjon ved Oksestein bru. Hellingen her er trolig bare 5-10 meter på 2 km. Med unntak av et lite parti 500 meter nedstrøms doserer, er elveprofilen bred, og elva er nesten flodaktig ned mot brua. Gyslandanlegget i Lygna ligger rett oppstrøms et trangt juv, der elva faller 15-20 meter på omlag 500 meter. Deretter er det jevn helling og forholdsvis bredt tverrprofil på mesteparten av strekningen ned til bru ved Birkeland.

Forsøkene ble søkt holdt under stabile doseringsforhold ved anleggene. Dosene ble satt slik at en ville oppnå pH-verdier nedstrøms anleggene i forsøksperiodene i området pH 6.5-7.0 fordi dette er relativt realistisk med tanke på ordinær drift. Samtidig regnet vi med at dette ga en tilstrekkelig målbar økning

av kalsiumkonsentrasjonen, anslagsvis 0,5-1,0 mg/L i elvevannet. Ved hvert av anleggene ble det gjennomført forsøk med ulike doseringer og ved ulike vannføringsforhold.

Det ble filtrert prøvevann gjennom 0,45 µm glassfiberfiltere i felt slik at det ble analysert på pH og kalsium både i filtrert og ufiltrert prøve. Prøver fra oppstrøms doseringsanleggene og loggestasjonene nedstrøms ble analysert mht. full ionesammensetning i ufiltrert prøve: pH, kalsium, alkalitet, reaktivt - og ikke-labil aluminium, total organisk karbon, konduktivitet, magnesium, natrium, kalium, klorid, sulfat, nitrat og total nitrogen.

4. Resultater og diskusjon

For å få en oversikt over hovedtendensene i datamaterialet har vi først gjort en statistisk analyse for å se hvilke kjemiske forskjeller det er oppstrøms og nedstrøms kalking. Vi har brukt en en-veis ANOVA-test for å analysere om det skjedde signifikante endringer fra oppstrøms kalking til ca. 2,5 km nedstrøms. For pH, kalsium og alkalitet (bufferevne) var det signifikante endringer. Det bekrefter blant annet at dosene har gitt tilstrekkelige forskjeller i konsentrasjon til at beregninger kan gjøres. Ingen av de andre målte variable viste signifikante forskjeller. Det kan kanskje virke litt underlig i og med at vi ville forvente avtak i labilt aluminium og kanskje også reaktivt aluminium. Avtak i middelvei var det, men årsaken til at vi ikke fant signifikante endringer var at spredningen i dataene var for stor.

I den videre gjennomgangen blir resultater fra forsøkene i de to vassdragene først behandlet hver for seg, deretter samlet.

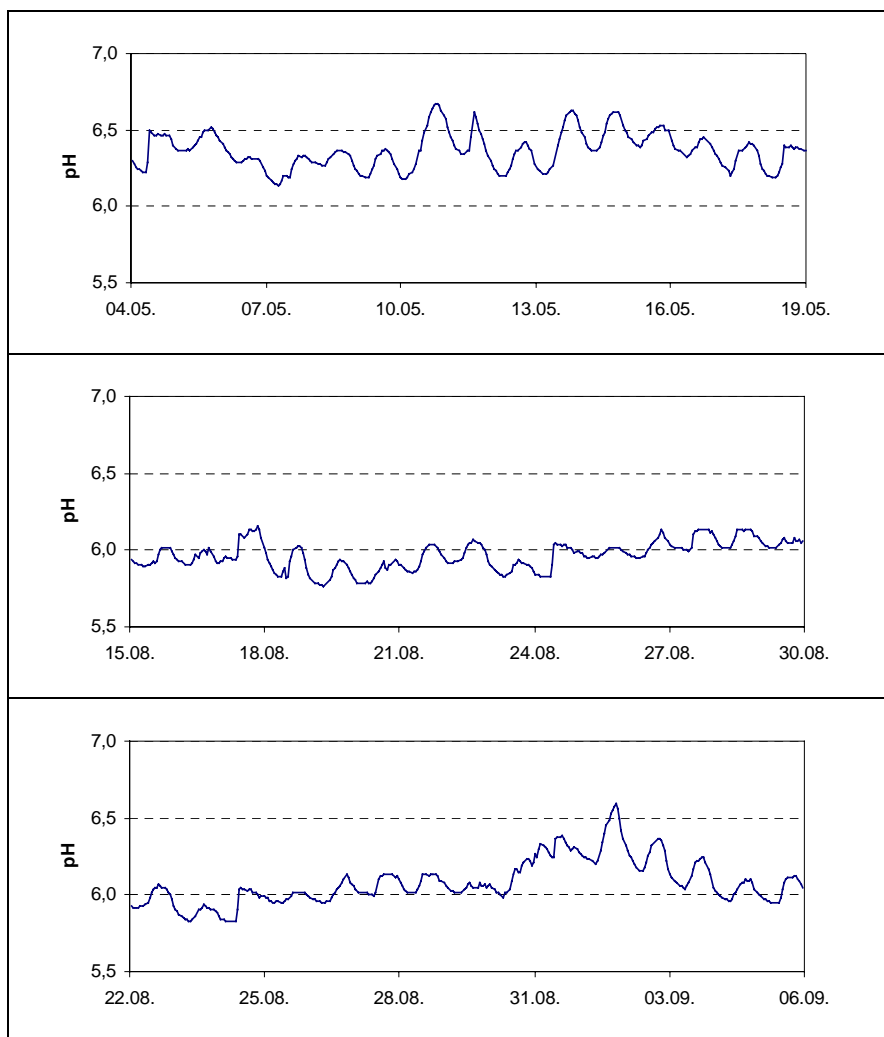
4.1 Kvina

pH-nivået og dermed doseringen skulle være stabil forut for forsøkene. Det er fordi høy dosering for forsøkene kunne gi en høy andel av løst eller partikulært kalsium fra sedimentert kalk under forsøk med lav dose eller ved lav vannføring. Da det ikke foreligger driftsdata fra selve anlegget i forsøksperiodene, benyttes data fra pH-loggestasjonen på Kloster. Kloster er nederst i vassdaget, etter samtløp med Litleåna. De to vassdragsdelene er omlag likeverdige med hensyn til vannmengder, slik at pH her gir en indikasjon på stabilitet nedstrøms Nyland. pH-utvikling og temperaturforholdene i elva før og under forsøkene er vist i **Figur 7** og **Figur 8**.

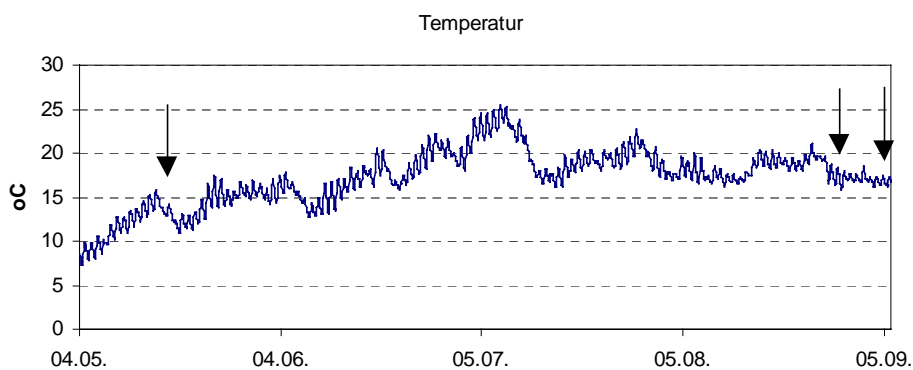
I 14-dagersperioden før første prøvetaking (18.5) varierte pH mellom 6,2 og 6,7 og det var et svakt avtak fram mot prøvetakingsdagen. I perioden før prøvetaking den 29.8 varierte pH mellom 5,8 og 6,2. Før siste prøvetaking (5.9) var pH langt mer ustabil, og varierte innenfor intervallet 5,8 og 6,6. Det var et betydelig avtak før prøvetaking. Vanntemperaturen var noe under 15 °C i mai og 17-18 °C i august.

Sammenhengen mellom tiden elvevannet bruker fra kalkdoseringsanlegget på Nyland til utløpet ved Kloster og vannføringen ved Nyland ved fallende vannføring er beregnet av Høgberget (2003a). Kurven kan brukes til å finne ut at pH ble målt ved Kloster ca. et halvt til et drøyt døgn etter forsøkene ved Nyland under de vannføringer som rådet ved prøvetakingen.

Doseringen med kalkslurry under forsøkene i Kvina var 1,7 ml/m³ den 18. mai og hhv. 3,5 og 1,7 ml/m³ den 29.8 og 5.9. Hvis vi sier at 1,7 ml/m³ er middels dose og 3,5 ml/m³ høy dose, har vi kombinasjonene D_M/Q_H , D_H/Q_L og D_M/Q_M for forholdet mellom dose og vannføring (D/Q) ved de tre prøverundene, der L, M og H er hhv. lav, middels og høy.

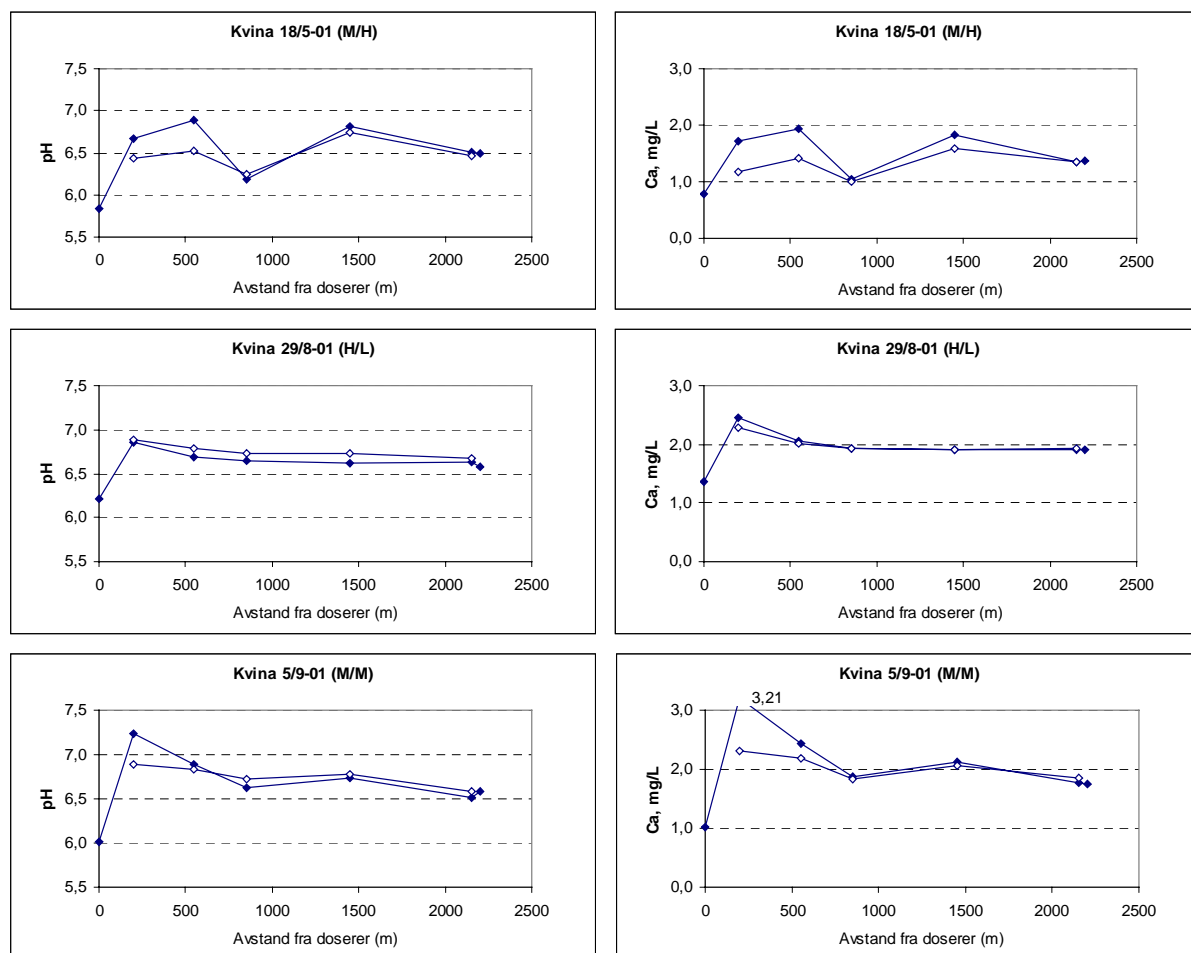


Figur 7. pH-utvikling før forsøkene den 18.5, 29.8 og 5.9 på overvåkingsstasjonen på Kloster i Kvina-vassdraget i 2001.



Figur 8. Vanntemperatur ved overvåkingsstasjonen på Kloster sommeren 2001. Forsøktidspunktene er indikert med pil.

Hovedresultater fra forsøkene er vist i **Figur 9**. pH oppstrøms var forholdsvis høy ved alle forsøk og høyest ved lavest vannføring. Konsentrasjonen av Ca fulgte også dette mønsteret. Ved høy vannføring i mai var det betydelig variasjon i pH og Ca nedstrøms dosering i forhold til en forventet monoton endring. Det skyldes sikkert at kalken blir forholdsvis sterkt konsentrert i vannstrømmen ved høy vannføring, og at den derfor blandes seinere inn i hele tverrprofilet. Hvis prøvetakingen skjer et sted på siden av denne kalkstrømmen vil derfor målingen kunne bli lite representativ og lite egnet til å sammenlikne med dosert mengde. Alle forsøk resulterte i betydelig økning i pH, opp mot typiske styringsverdier for kalkdosering i vassdrag.



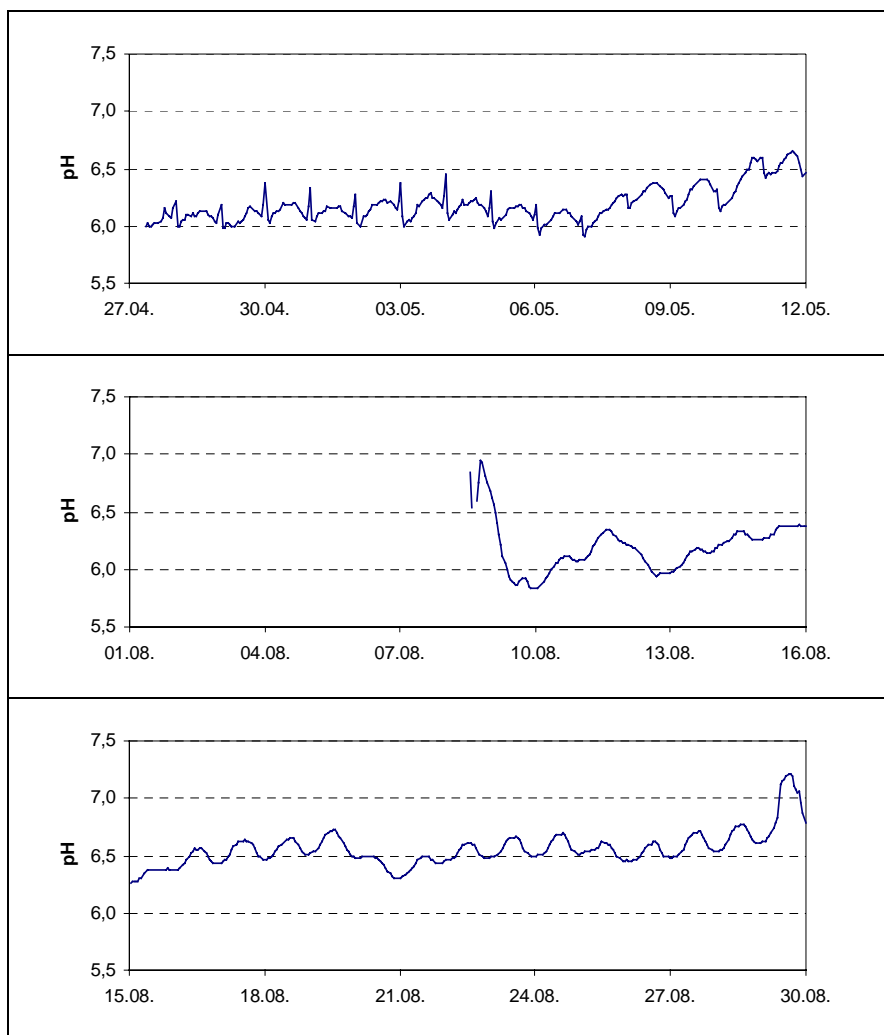
Figur 9. pH og kalsium ved de forskjellige stasjonene i de tre forsøkene i Kvina i 2001. Fylte punkter viser resultater for ufiltrerte prøver og åpne punkter er filtrerte prøver. Bokstaver i parentes etter dato er forholdet mellom dose og vannføring (D/Q), se tekst. F.eks. betyr L/M at dosen har vært lav og at vannføringen har vært middels.

4.2 Lygna

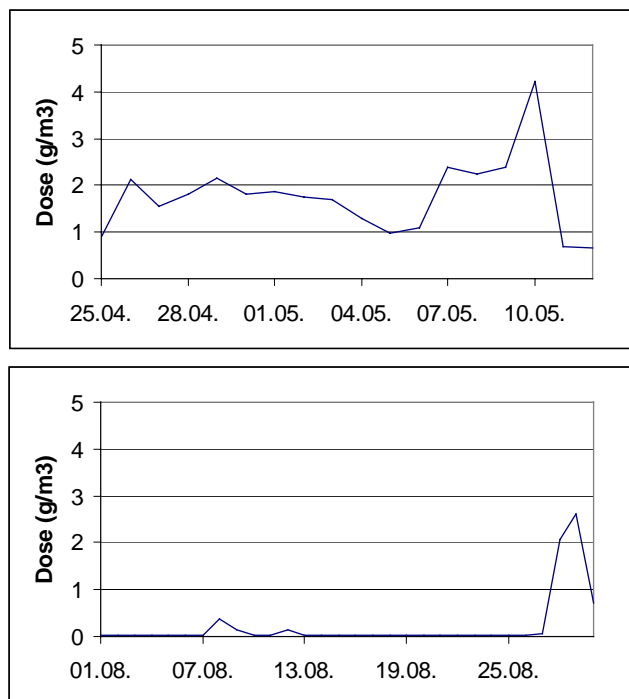
pH-nivået og kalkdosen skulle også her være stabile før forsøkene. Da det ikke foreligger pH-data fra selve anlegget for forsøksperiodene, benyttes data fra overvåkingsstasjonen på Vegge. I tillegg finnes doseringsdata fra anlegget. pH-utvikling forut for og under de fire forsøkene i Lygna er vist i **Figur**

10, mens doseringsforløpet er vist i **Figur 11**. Sammenhengen mellom tiden elvevannet bruker fra kalkdoseringsanlegget til utløpet ved Rom (7 km nedenfor Vegge) og vannføringen ved Gysland er beregnet av Høgberget (2003b).

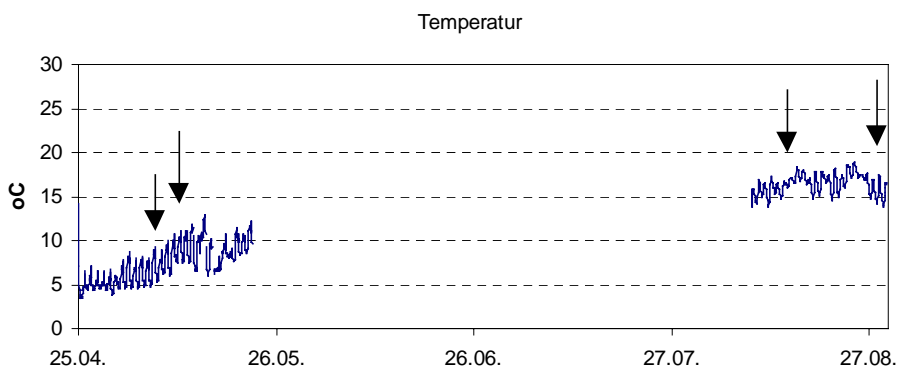
I perioden forut for forsøket den 9. mai var pH mellom 6,0 og 6,3. Deretter økte pH til omlag 6,5 fram til og under forsøket den 11. mai. Dagene før 15. august varerte pH mellom 5,9 og 6,4. Omlag 9. august var det imidlertid stor variasjon. Fram til 29. august var pH nær 6,5 og økte fra morgenen denne dagen til over 7,0. Ved prøvetakingen i mai var vanntemperaturen 6-8 °C, mens den var 15-17 °C i august.



Figur 10. pH-utvikling før for forsøkene den 8.5, 11.5, 15.8 og 29.8 på overvåkingsstasjonen på Vegge i Lygnavassdraget i 2001. For perioden 1.-8.august foreligger det ikke data for pH.



Figur 11. Kalkdosering ved Gyslandanlegget under forsøkene i 2001. Data fra Miljøkalk.

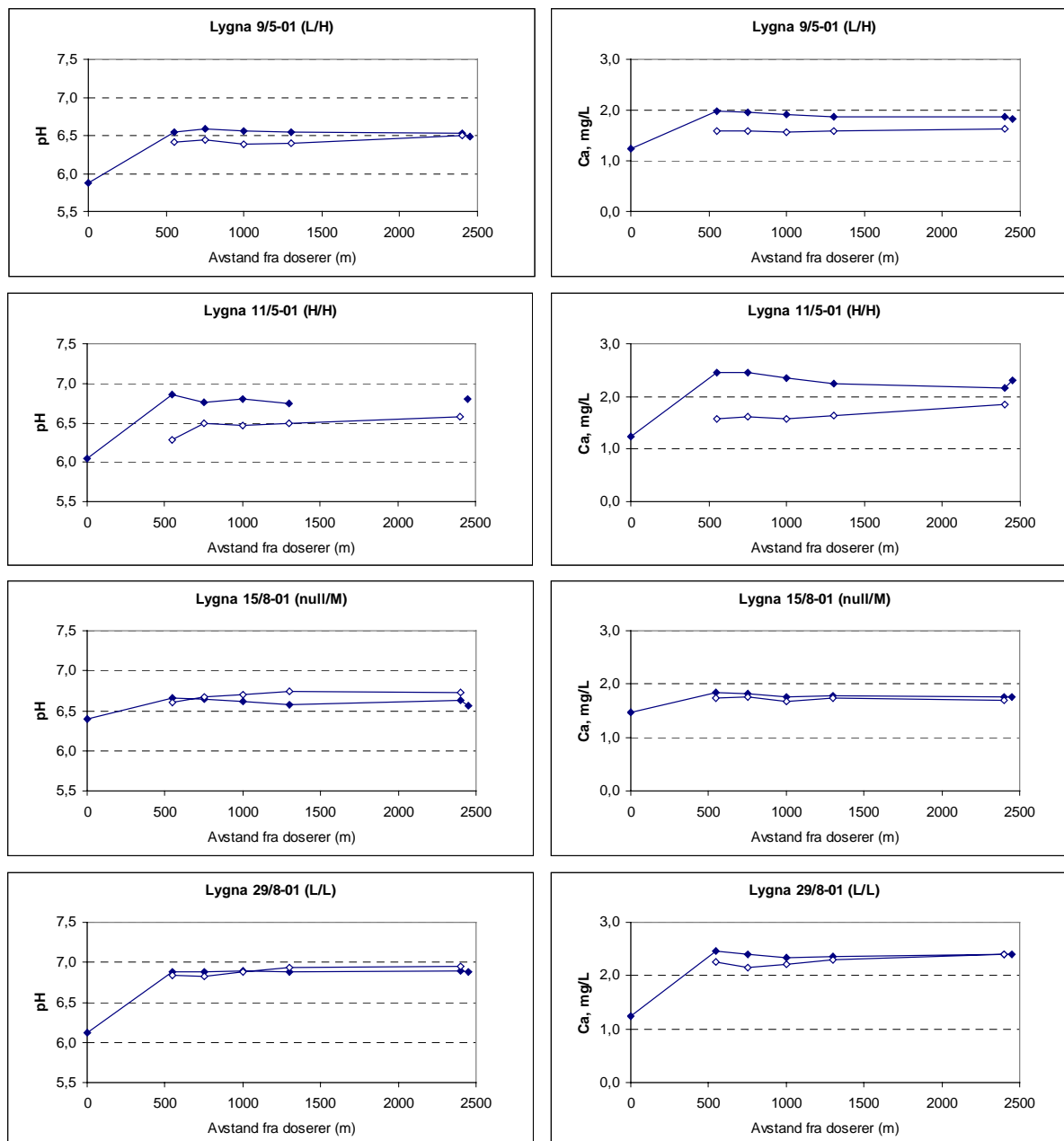


Figur 12. Vanntemperatur ved overvåkingsstasjonen på Vegge under de fire forsøkene i 2001. For perioden 22. mai –8. august foreligger det ikke data for temperatur. Forsøktidspunktene er indikert med pil.

pH-stasjonen på Vegge ligger 7 km nedstrøms Gyslandanlegget (**Figur 2**). Ved de vannføringer som ble målt under prøvetaking går det fra ett døgn til 6-7 timer fra prøvetaking skjer ved dosereren til pH måles ved utløpet på Rom ifølge en kurve som er konstruert av Høgberget (2003b). Siden pH-stasjonen på Vegge ligger halvveis mellom disse to stedene, kan en regne med en halvering av disse tidene fra forsøk på Gysland til pH-måling på Vegge.

Kalkdoseringen under forsøkene i Lygna var hhv. 2,4 og 4,1 g/m³ den 9. og 11. mai og 2,4 g/m³ den 29.8. Den 15.8 derimot ble det ikke dosert mer enn 0,03 g/m³, dvs. nær null. Hvis vi sier at 2,4 g/m³ er lav dose og 4,1 g/m³ høy dose, har vi kombinasjonene D_L/Q_H , D_H/Q_H , D_{null}/Q_M og D_L/Q_L for forholdet mellom dose og vannføring (D/Q) ved de fire prøverundene, der L, M og H er hhv. lav, middels og høy.

Resultater fra forsøkene er vist i **Figur 13**. Også her var pH forholdsvis høy oppstrøms kalking og pH var økt til 6,5-7,0 nedstrøms. Slik sett var forholdene svært sammenliknbare i de to vassdragene. Ved de to forsøkene i mai var det mye kalkpartikler i vannet. Det har trolig gitt høyere pH-verdi i ufiltrert vann målt på laboratoriet enn det en ville målt i elva fordi kalkpartikler løses over tid.

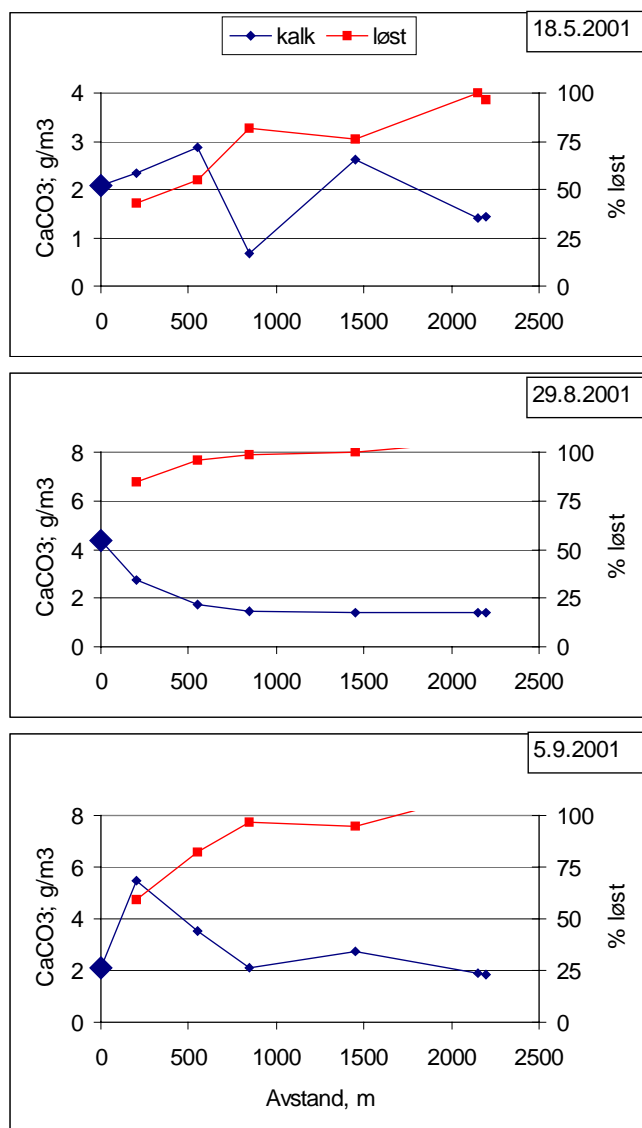


Figur 13. pH og kalsium ved de forskjellige stasjonene i de fire forsøkene i Lygna i 2001. Fylte punkter viser resultater for ufiltrerte prøver og åpne punkter er filtrerte prøver. Bokstaver i parentes etter dato er forholdet mellom dose og vannføring (D/Q), se tekst. Den 15.8 ble det "ikke" dosert kalk (kun 0,03 g/m³). pH-verdien fra 11.5.01 st.5, ufiltrert prøve, er utelatt.

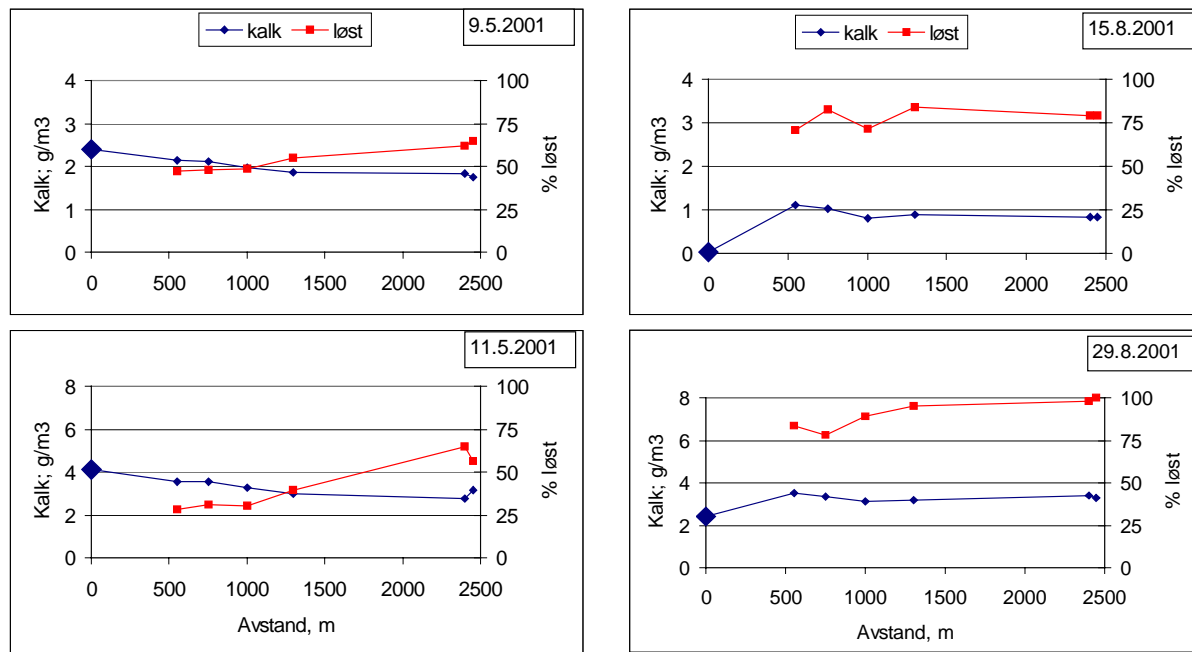
4.3 Kalkoppløsning

Kalkoppløsningen ble beregnet på basis av differanser i kalsium mellom målte konsentrasjoner oppstrøms doserer og konsentrasjoner på stasjonene nedstrøms. Data for Kvina er illustrert i **Figur 14**, mens data for Lygna er gitt i **Figur 15**.

I dette avsnittet diskuteres forholdet mellom kort- og langtidsoppløsning. Med korttidsoppløsning menes den kalkoppløsning som skjer før kalken rekker å sedimentere, dvs. synke til bunns. Med langtidsoppløsning menes kalkoppløsning av tidligere sedimentert kalk. Resuspensjon vil si at tidligere sedimentert kalk virvles opp og dermed kan transporteres videre nedover elva. Dette legger til rette for langtidsoppløsning. Ionebytting av løst Ca, f.eks. med H^+ og Al-ioner, kan skje på overflater i elva og dermed til en viss grad lade disse overflatene med Ca-ioner. Denne Ca-poolen kan seinere virke som kilde til løst Ca.



Figur 14. Netto $CaCO_3$ -konsentrasjon og andel løst kalk (i prosent) ved de tre forsøkene i Kvina i 2001. Oppgitt dose (omregnet fra mL slurry/L elvevann) fra driftsdata er markert med stor firkant i avstand null. Merk at y-aksen i øvre figur er forskjellig fra de andre.



Figur 15. Netto kalkkonsentrasjon og andel løst kalk (i prosent) ved de fire forsøkene i Lygna i 2001. Oppgitt dose fra driftsdata er markert med stor firkant i avstand null. Merk at y-aksen i øvre figurer er forskjellig fra de nedre.

Forsøkene viste at pH økte til omkring eller over 6,5 i begge vassdrag under alle forsøk. Oppstrøms-pH var forholdsvis høy ved flere av forsøkene, men det forhindret ikke betydelig og rask kalkoppløsning med de kalkdoser som ble brukt. Selv om vi har karakterisert noen av de brukte dosene som høye, har ingen av dem vært høyere enn det som kan forventes å bli brukt under ordinær drift. Begge kalktypene er derfor svært godt egnet som vassdragskalk.

Forsøkene i Kvina foregikk under kombinasjonene D_M/Q_H , D_H/Q_L og D_M/Q_M for forholdet mellom dose og vannføring (D/Q) den 18.5, 29.8 og 5.9 i 2001. Forsøkene i Lygna foregikk under kombinasjonene D_L/Q_H , D_H/Q_H , D_{null}/Q_M og D_L/Q_L ved de fire prøverundene den 9.5, 11.5, 15.8 og 29.8 i 2001. Dette gjenspeiles i målte verdier for Ca og beregnede verdier for kalk og kalkoppløsning.

Ved alle forsøkene i Kvina forelå BOKALK 75 som 100 % løst etter drøyt 2 km. I første forsøk skjedde oppløsningen gradvis og samtidig var det tegn til noe sedimentasjon. Målingene av Ca viser imidlertid et ujevnt forløp, noe som gjør tolkningen vanskelig. Dette skyldes trolig en noe uheldig plassering av prøvetakingsstasjonene under de rådende forhold. I andre forsøk sedimenterte minst 70% av dosert kalk, 60% allerede etter en halv kilometer. Høy dose ved lav vannføring var årsaken til dette. At nesten all kalk forelå som løst i vannfasen betyr derfor ikke at all kalk løste seg opp, men at partiklene sank raskt ned på bunnen. En del av målt Ca kan trolig tilskrives langtidsoppløsning, se nærmere om dette i avsnittet om Lygna, slik at andel sedimentert kalk kan ha vært enda høyere enn 70%.

I tredje forsøk i Kvina var det også tegn til at noen av de valgte prøvetakingsstasjonene ga et uryddig bilde. Hvis vi tar utgangspunkt i at oppgitt dosering er riktig, var all kalk løst allerede etter en kilometer. Hvis det har vært et bidrag fra langtidsoppløsning, vil det si at oppløsningen har vært under 100%. Men partikler av denne størrelsesorden skal i teorien fraktes med ellevannet og ikke sedimentere. Derfor indikerer dette forsøket at all kalk ble løst svært raskt.

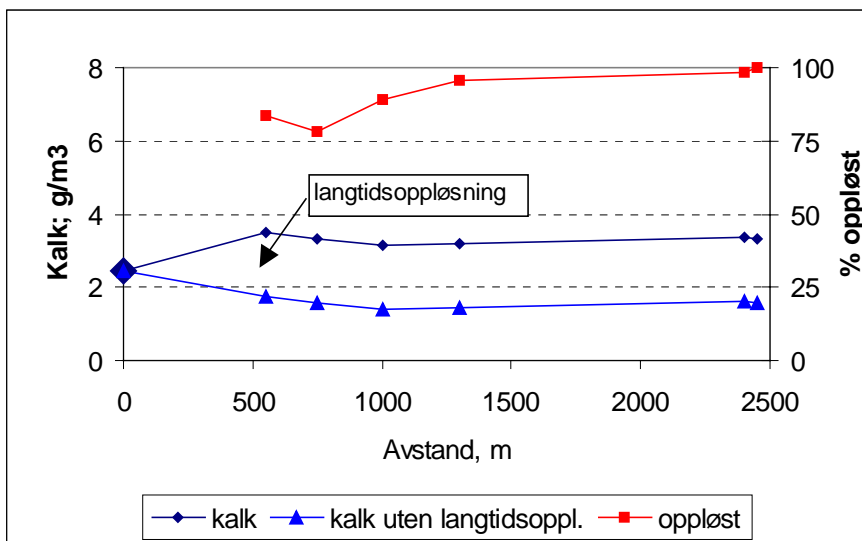
Ved forsøkene ved høy vannføring i mai i Lygna forelå kalken som drøyt 60% løst i de vannprøver som ble tatt i elva. Det er lite endring i dette bildet på de stasjonene vi brukte, og det savnes data fra områder enda lenger nede i elva. Det var minst 20-30 % sedimentasjon på de første 2500 meter under disse to forsøkene. Ved tredje forsøk var dosen omtrent lik null. Likevel økte Ca-konsentrasjonen med 0,2-0,3 mg/L. Drøyt 75% av dette var i løst form. Dette betyr at det foregikk en kalkpartikkeltransport i elva og at det også ble løst opp kalk fra tidligere sedimentert kalk. Den løste delen kan også komme fra ionebytting på overflater av moser og stein på elvebunnen. pH var allerede 6,4 oppstrøms doserer og forholdene for kalkopløsning og ionebytting var derfor ikke spesielt gode.

Ved det siste forsøket i Lygna var mesteparten av målt Ca løst på alle stasjoner og alt var løst på nederste stasjon. Denne dagen var det lav vannføring og kalkmengden i elvevannet økte til høyere konsentrasjoner enn kalkdosen skulle gi. Kombinasjonen av lav vannføring, høy andel løst Ca og ”for høy” konsentrasjon av kalk kan tyde på at det var en svært rask sedimentasjon av dosert kalk og at en vesentlig del av løst Ca stammer fra ionebytting/oppløsning fra tidligere sedimentert kalk fra bunnsedimentet. Forsøk tre tyder på at dette siste kan ha vært tilfellet, og vi har analysert situasjonen nærmere. En tilnærming er å la det forsøket som ble gjennomført uten dosering tjene som referanse for de andre forsøkene.

Oppløsning av tidligere sedimentert kalk (null dosering) ga under det tredje forsøket i Lygna en kalktransport på omlag 1000 kg/døgn. Selve langtidsopløsningen pr. arealenhet er trolig ikke større ved lav vannføring (og høy pH), men oppløsningsproduktene (Ca^{++} og HCO_3^-) blandes ut i forholdsvist lite vann slik at konsentrasjonene blir høyere enn ved større vannføring. Ved det fjerde forsøket i Lygna økte pH fra 6,1 til 6,9 og Ca fra 1,25 til 2,4 mg Ca/L ved lav dose og lav vannføring. Kalktransporten ble beregnet til 2150 kg/døgn. Hvis vi legger inn en langtidsopløsning på 1000 kg/døgn og fordeler på den aktuelle vannføring, framkommer en ny kurve som på en mer korrekt måte beskriver forløpet for dosert kalk (**Figur 16**). Langtidsopløsningen kan altså ha gitt grunnlag for nær halvparten av kalktransporten, og som antydnet over, kan dette være årsaken til at så mye forelå som løst i forsøk fire. Disse tallene indikerer dessuten at omlag en tredel av dosert kalk sedimenterte og at dette skjedde på de øverste 500-700 metrene.

Ved de høye vannføringene i de to første forsøkene er det beregnet at denne langtidsopløsningen kan ha bidratt med 10-15 % av kalktransporten. Hvis den er representativ for hele året, vil det utgjøre anslagsvis 300-400 tonn på årsbasis i Lygna. I Lygna ble det dosert omlag 1500 tonn kalk i 2002, slik at bidraget tilsvarer i størrelsesorden 20-30% av årsforbruket. I minst 14 dager forut for dette tredje forsøket var det nær null dosering, slik at tallet iallfall ikke er preget av unormalt mye kalk på elvebunnen. Langtidsopløsningen er trolig langt større enn dette fordi flommenes gravende evne gir resuspensjon i større grad enn det som har skjedd under de rådende forhold i forsøk tre. Resuspensjon gir masseforflytning og muligheter for ytterligere knusing og oppløsning av kalk.

Dette resultatet bekrefter målinger i Fosstølbekken og i Vikedalselva, der det også ble dokumentert klare bidrag fra langtidsopløsning av sedimentert kalk (Hindar 1987; Hindar og Henriksen 1992). Også data fra driftskontrollen i Lygna indikerer at langtidsopløsningen kan være viktig (Høgberget og Håvardstun 2003). Ionebytting av Ca på mineraloverflater ved tilførsel av surt vann er også vist eksperimentelt (Hindar og Lydersen 1995). Dette bidrar også til økt konsentrasjon av Ca og økt pH.



Figur 16. Fjerde forsøk i Lygna (29.8.2001) med effekten av langtidsoppløsning fratrukket. Resultatet er indikert ved linje med trekant (se også **Figur 15**). Det er tatt utgangspunkt i at langtidsoppløsningen bidrar med ca. 1 g kalk/m³ ved en vannføring på 14,4 m³/s (fra tredje forsøk), som er regnet om til 1,7 g kalk/m³ ved den aktuelle vannføringen på 8,3 m³/s.

Forsøkene i Lygna viser at det skjer en gradvis sedimentasjon av NK 3 ved høy vannføring. Men selv ved stasjonen nesten 2500 m nedstrøms dosering er denne prosessen ikke avsluttet i og med at det fortsatt var omlag 40% partikulært Ca i prøvene. Ved høy vannføring i Kvina forelå all Ca i løst form etter drøyt 2000 m og oppløsningen har trolig vært nær 100%. Ved lav vannføring i Kvina skjedde det imidlertid betydelig sedimentasjon av BOKALK 75 på de øvre 500-1000 m.

Resultatene viser at begge kalkproduktene inneholder partikler som vil sedimentere under gitte forhold, men BOKALK 75 løses trolig nesten fullstendig ved moderat og høy vannføring. NK 3 var både på partikulær og løst form etter 2-3 km ved høye vannføringer. Ulik kornfordeling har trolig vært avgjørende for denne forskjellen, men ulik strømhastighet kan også ha medvirket.

I Lygna var vannføringen 42 og 45 m³/s under "høy" vannføring. I Kvina var vannføringen 20 m³/s ved "høy" vannføring. Det som egentlig er avgjørende for partikkeltransporten i elva (også for kalkpartikler) er vannets turbulens eller mekaniske kraft. Ved turbulens blandes partiklene i vannmassen på en slik måte at de utsettes for slitasje og knusing. Dermed øker partikkeloverflaten og oppløsningen. Turbulens bestemmes av vannhastighet, men også elveutformingen (dybde eller tverrprofil) er viktig. Vannet skyter fart i et trangt juv og avtar sterkt når elva vider seg ut. I tillegg vil bunnens beskaffenhet avgjøre turbulensforholdene. Grove stein gir større turbulens enn en jevn overflate. Disse forholdene ble ikke målt, men det kan gjøres en sammenliknende vurdering i ettertid.

Kvina ved Nylandanlegget har et forholdsvis bredt tverrprofil med stor stein og slak helling på mesteparten av strekningen ned til Oksestein bru. Gyslandanlegget i Lygna ligger rett oppstrøms et trangt og bratt juv, slik at vannet skyter fart. Vannføringen i Lygna var omlag dobbelt så stor som i Kvina ved det som er kalt høy vannføring under forsøkene. Både vannføring og elveutforming kan derfor ha gitt forhold for rask transport av kalk i Lygna og dermed liten tid og mulighet til oppløsning og sedimentasjon. Den forskjellen i oppløsning som er målt, kan dermed være mindre under ellers like forhold.

Spørsmålet blir så hvilke konsekvenser resultatene har for valget mellom de to kalktypene. Her er det flere viktige momenter å ta hensyn til. Faktum er at både korttidsoppløsning og langtidsoppløsning kommer vassdraget til nytte. Sverdrup (1985) konkluderer med at 30-80% av NK3 – type kalksteinsprodukter kan sedimentere ved elvekalking når utgangs-pH er 5,0. Hindar og Henriksen (1992) antyder imidlertid at total oppløsning over lengre tid kan nærme seg 100%, men har ingen data som kan bekrefte dette.

Er det så mulig å ta hensyn til den totale kalkoppløsningen? Hindar (1987) anbefalte at kalkdosering justeres i et feed-back system etter pH målt tilstrekkelig langt nedstrøms dosering. Prinsippet er innført i flere vassdrag, og det medfører at en del av langtidsoppløsningen kan tas hensyn til. Men resultatene fra Lynga viser at en stor fraksjon kan være partikulær også 2-3 km nedstrøms dosering. Denne kalken vil løses ytterligere, men kan ikke tas med i regnestykket uten at det skjer ytterligere pH-styrt dosering nedstrøms eller ved at styringen reguleres etter pH målt langt nede i elva.

5. Oppsummering og anbefaling

Det foreligger svært få målinger av kalkoppløsning fra naturlige elveløp og dermed begrenset erfaring med hva som er gunstige forhold for slike målinger. De forsøkene som er gjennomført i dette prosjektet må ses i lys av det.

En del av de resultater som framkom gjenspeiler forhold som er kjent fra før. Langtidsoppløsning av tidligere sedimentert kalk, slik det ble målt i Lygna, er beskrevet i flere sammenhenger. Også i innsjøer er oppløsning over lang tid vesentlig. Men vi erfarte her at denne oppløsningen var så betydelig under lave og middels vannføringer at det ble vanskelig å få brukbare tall for oppløsning av dosert kalk. Det påvirker grunnlaget for å sammenlikne kalktyper.

Vi erfarte i Kvina at det kunne være betydelig variasjon i resultater for Ca og pH nedstrøms doserer i forhold til en forventet monoton variasjon. Selv om stasjonene ble plassert for å fange opp homogene vannkvaliteter med innblandet kalk, viser resultatene at dette ikke var helt vellykket. Resultatene viser imidlertid at stasjonene kunne være velplassert under strømningsforhold ved lav vannføring, men feilplassert ved høy vannføring. Dette bør ideelt sett sjekkes før prøvetaking, men pH-måling alene er lite egnet og det er ikke uten videre enkelt å ta samtidige prøver på tvers i en elv.

De forhold som er nevnt over setter rammer for hvordan resultatene kan tolkes. Forsøkene viste imidlertid at:

- Begge kalktypene løste seg godt nok i elvevannet til å gi akseptabel avsyring ($\text{pH} > 6,5$) ved realistiske kalkdoser. Dette skjedde også ved forholdsvis høy utgangs-pH (nær og over 6,0) og ved middels og noe under middels vannføring, da oppløsningsforholdene er mindre gode.
- Begge kalktypene hadde partikkelfraksjoner som sedimenterte under enkelte av de rådende forholdene, men BOKALK 75 sedimenterte trolig bare ved lav vannføring.
- Oppløsning av tidligere sedimentert kalk ga betydelig avsyring (pH fra 6,4 og opp til 6,7; økning på 0,3 mg Ca/L) ved moderat vannføring. På årsbasis tilsvarer denne beregnede langtidsoppløsningen i størrelsesorden 20-30 % av totalt kalkforbruk i Lygna, men langtidsoppløsningen er trolig vesentlig større enn dette.
- Ved bruk av BOKALK 75 i Kvina ble det ikke påvist partikler i vannet etter 2 km, selv ved høy vannføring. Kalkoppløsningen var derfor trolig nær 100%. Ved bruk av NK3 i Lygna ble det påvist 40% partikler i vannet etter 2,5 km ved den dobbelte av denne vannføringen. Den store

forskjellen skyldes vesentlig forskjellig kornfordeling, men også ulik vannhastighet og elveutforming under forsøkene kan ha hatt betydning.

Disse og andre resultater viser at det kan være vanskelig å få sammenliknbare tall for faktisk kalkeffekt av ulike kalktyper i vassdrag. Oppløsning i sedimentasjonskolonner gir et øyeblikksbilde og kan brukes til å rangere kalkprodukter i forhold til momentanoppløsning. Resultater i de forsøkene som er gjennomført her gjenspeiler den svært høye momentanoppløsningen (91-100% for pH-området 4-6) som er funnet for BOKALK 75 ved bruk av slike kolonner, se produktdatablad/varedeklarasjon av 14. desember 2001. Tilsvarende oppløsningstall for NK3 er 32-83% for det samme pH-området, dvs. vesentlig lavere momentanoppløsning (produktdatablad av 3. oktober 2002).

Men langtidsoppløsningen utgjør en stor andel av den totale oppløsningen over et år, og er vanskelig å måle. Variasjonen i både kort- og langtidsoppløsning vil trolig variere sterkt gjennom året, selv på samme sted i elva. Siden det er partikler av silttypen som sedimenterer, vil trolig mesteparten kunne graves opp igjen ved økende vannføring. Ved avtakende vannføring kan det derimot tenkes at effekten av tidligere sedimentert kalk er mindre igjen fordi partiklene jo allerede er gravd opp og transportert videre. Svært ulik resuspensjon av partikler ved samme vannføring vil derfor forekomme, og dette kalles en hysteresiseffekt.

Med de styringsteknikker en har utviklet vil en stor andel, kanskje opp mot 100% (Hindar og Henriksen 1992), av all kalk kunne inngå i doseberegninger hvis kalkdosering skjer fra en eller flere doserere nedstrøms. Da vil forskjeller i kalktyper, slik som mellom de to brukte kalktypene her, være mindre viktig. I mellomstore vassdrag, med bare ett doseringsanlegg eller med ett doseringsanlegg i to parallelle vassdragsavsnitt, vil det være en fordel med kalkmel som løses raskt fordi det kan være vanskelig å ta hensyn til resuspensjon og langtidsoppløsning. Ved å måle pH nedstrøms kan det til en viss grad tas hensyn til denne effekten hvis disse pH-målingene kan inngå i doseberegningen.

I mer flodpregede vassdrag og i de tilfeller dosereren må plasseres rett oppstrøms innsjøliknende elveutvidelser vil det temmelig sikkert være en fordel med finmalt kalk som løses raskt. Forskjellen i kornfordeling mellom BOKALK 75 og NK3 kan da vise seg å være viktig, men uansett vil prisen for å oppnå vannkvalitetsmålet være det som avgjør. Her vil en også i større grad måtte ta hensyn til tilslamming av bunnområdene, noe som i seg selv kan medføre krav om finmalt kalk.

Mer generelle konklusjoner og anbefaling må bli at:

- Det vil være vanskelig å sammenlikne kalktypers egnethet i fullskalaforsøk i elv hvis ikke partikkelfordelingen er vesentlig forskjellig slik som i de forsøkene som er presentert her. Noe av grunnen er mangelfull kunnskap om hvordan kalk løses på kort og lang sikt i vassdrag under ulike forhold.
- Kalk og kalkingsstrategi i vassdrag må ses i sammenheng for å kunne vurdere hvor optimalt kalkingen kan gjennomføres og hvor viktig kalkens malingsgrad er.
- Kunnskapsbehovet er betydelig, og det bør gjennomføres mer systematisk sammenlikning av kalkoppløsning og kalkforbruk i vassdrag.

6. Referanser

- DN 2002. Kalking i vann og vassdrag. Effektkontroll av større prosjekter 2001. Direktoratet for naturforvaltning, Notat 2002-1. 268 s.
- Hindar, A. 1984. pH-utvikling og kalkutnyttelse ved kalking av tre småvann i Gjerstad, Aust-Agder. Kalkingsprosjektet, rapport 14-84. 70 s.
- Hindar, A. 1987. Long-term dissolution of sedimented limestone powder in running water. Consequences for liming strategy and interpretation of liming efficiency data. *Vatten* 43: 54-58.
- Hindar, A. and Henriksen, A. 1992. Acidification trends, liming strategy and effects of liming for Vikedalselva, a Norwegian salmon river. *Vatten* 48: 54-58.
- Hindar, A. og Lydersen, E. 1995. Er utfelt/sedimentert aluminium etter vassdragskalking et mulig miljøproblem? O-92149, NIVA. 22 s.
- Hongve, D. 1982. Kalkingsmidler til bruk i doseringsanlegg for elvekalking. Kalkingsprosjektet, rapport 4-82. 32 s.
- Høgberget, R. 2003a. Driftskontroll av kalkdoseringsanlegg i Kvina. Avviksrapport år 2002. NIVA-rapport 4668-2003. 29 s.
- Høgberget, R. 2003b. Driftskontroll av kalkdoseringsanlegg i Lygna. Avviksrapport år 2002. NIVA-rapport 4675-2003. 21 s.
- NVE 2002. Vannføring ved fire NVE-stasjoner i 2001. Norges vassdrags- og energiverk, hydrologisk avdeling, Oslo.
- Rosseland, B.O. and Hindar, A. 1988. Liming of lakes, rivers and catchments in Norway. *Water, Air, Soil Pollut.* 41: 165-188. (Also appearing in Brocksen, R.W. and Wisniewski, J. (eds.) 1988: *Restoration of aquatic and terrestrial systems*. Kluwer Academic Publishers. 501 pp.)
- Sverdrup, H.U. 1985. Calcite Dissolution Kinetics and Lake Neutralization. Thesis, Lund Institute of Technology. LUTKDH/TKKT/1002/1-169/1985. 170 p.
- Sverdrup, H.U., Warfvinge, P.G. and Fraser, J. 1985. The dissolution efficiency for different stream liming methods and technologies. *Vatten* 41: 155-163.

Vedlegg A. Primærdata vannkjemi

KVINA - Biokalk-dosering fra Nyland kalkdoseringsanlegg

Stasjon	Prøvedato	pH	Ca mg/l	ALK mmol/l	Al/R µg/l	Al/II µg/l	LAL µg/l	TOC mg/l C	KOND mS/m	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3-N µg/l N	Tot-N/L µg/l N	Vannføring m3/s	Dosering ml/m3
Oppstrøms Nyland	18.05.2001	5,83	0,78	0,042	77	62	15	3,2	1,36	0,14	1,14	0,15	1,8	1,2	160	330	20,00	1,67
St.1 UF	18.05.2001	6,67	1,71															
St.2 UF	18.05.2001	6,89	1,93															
St.3 UF	18.05.2001	6,18	1,05															
St.4 UF	18.05.2001	6,82	1,83															
St.5 UF	18.05.2001	6,51	1,34															
St.1 F	18.05.2001	6,43	1,18															
St.2 F	18.05.2001	6,52	1,41															
St.3 F	18.05.2001	6,24	1,00															
St.4 F	18.05.2001	6,74	1,58															
St.5 F	18.05.2001	6,47	1,34															
Nedstr. Nyland/Oksestein bru	18.05.2001	6,49	1,36	0,068	70	61	9	2,9	1,63	0,16	1,20	0,16	1,8	1,3	175	350		
Oppstrøms Nyland	29.08.2001	6,21	1,36	0,060	123	119	4	6,9	1,81	0,20	1,65	0,16	2,1	1,6	58	300	6,30	3,50
St.1 UF	29.08.2001	6,85	2,46															
St.2 UF	29.08.2001	6,69	2,05															
St.3 UF	29.08.2001	6,65	1,94															
St.4 UF	29.08.2001	6,62	1,91															
St.5 UF	29.08.2001	6,63	1,91															
St.1 F	29.08.2001	6,89	2,29															
St.2 F	29.08.2001	6,78	2,02															
St.3 F	29.08.2001	6,73	1,93															
St.4 F	29.08.2001	6,73	1,91															
St.5 F	29.08.2001	6,67	1,94															
Nedstr. Nyland/Oksestein bru	29.08.2001	6,58	1,91	0,080	112	112	0	6,9	2,08	0,21	1,72	0,18	2,2	1,6	57	295		

KVINA – forts.

Stasjon	Prøvedato	pH	Ca mg/l	ALK mmol/l	Al/R µg/l	Al/II µg/l	LAL µg/l	TOC mg/l C	KOND mS/m	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3-N µg/l N	Tot-N/L µg/l N	Vannføring m3/s	Dosering ml/m3
Oppstrøms Nyland	05.09.2001	6,02	1,03	0,055	142	129	13	7,0	1,70	0,20	1,62	0,18	2,0	1,5	53	295	10,90	1,67
St.1 UF	05.09.2001	7,23	3,21															
St.2 UF	05.09.2001	6,89	2,44															
St.3 UF	05.09.2001	6,63	1,87															
St.4 UF	05.09.2001	6,74	2,13															
St.5 UF	05.09.2001	6,52	1,78															
St.1 F	05.09.2001	6,89	2,32															
St.2 F	05.09.2001	6,83	2,19															
St.3 F	05.09.2001	6,72	1,84															
St.4 F	05.09.2001	6,78	2,07															
St.5 F	05.09.2001	6,58	1,86															
Nedstr. Nyland/Oksestein bru	05.09.2001	6,58	1,76	0,103	128	125	3	7,0	2,02	0,21	1,71	0,19	2,1	1,5	52	295		

Lygna - Kalksteinsmel-dosering fra Gysland kalkdoseringsanlegg

Stasjon	Prøvedato	pH	Ca mg/l	ALK mmol/l	Al/R µg/l	Al/II µg/l	LAL µg/l	TOC mg/l C	KOND mS/m	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3-N µg/l N	Tot-N/L µg/l N	Vannføring m3/s	Dosering g/m3
Oppstrøms Gysland	09.05.2001	5,87	1,23	0,044	87	78	9	3,8	2,17	0,25	1,99	0,21	3,3	1,9	200	340	42,43	2,39
St.1 UF	09.05.2001	6,54	1,97															
St.2 UF	09.05.2001	6,58	1,96															
St.3 UF	09.05.2001	6,56	1,91															
St.4 UF	09.05.2001	6,54	1,87															
St.5 UF	09.05.2001	6,53	1,86															
St.1 F	09.05.2001	6,42	1,58															
St.2 F	09.05.2001	6,44	1,58															
St.3 F	09.05.2001	6,38	1,56															
St.4 F	09.05.2001	6,40	1,58															
St.5 F	09.05.2001	6,50	1,62															
Nedstr. Gysland/Birkeland	09.05.2001	6,49	1,83	0,069	73	70	3	4,6	2,39	0,26	2,00	0,22	3,1	1,7	200	350		
Oppstrøms Gysland	11.05.2001	6,05	1,23	0,047	82	52	30	4,0	2,18	0,26	1,98	0,22	2,7	1,4	200	345	45,45	4,12
St.1 UF	11.05.2001	6,85	2,46															
St.2 UF	11.05.2001	6,76	2,46															
St.3 UF	11.05.2001	6,80	2,35															
St.4 UF	11.05.2001	6,75	2,25															
St.5 UF	11.05.2001	8,91	2,17															
St.1 F	11.05.2001	6,28	1,58															
St.2 F	11.05.2001	6,49	1,61															
St.3 F	11.05.2001	6,46	1,57															
St.4 F	11.05.2001	6,49	1,63															
St.5 F	11.05.2001	6,58	1,84															
Nedstr. Gysland/Birkeland	11.05.2001	6,80	2,31	0,097	79	62	17	4,1	2,64	0,27	2,01	0,23	3,4	1,8	205	365		

LYGNA – forts.

Stasjon	Prøvedato	pH	Ca mg/l	ALK mmol/l	Al/R µg/l	Al/II µg/l	LAL µg/l	TOC mg/l C	KOND mS/m	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	NO3-N µg/l N	Tot-N/L µg/l N	Vannføring m3/s	Dosering g/m3
Oppstrøms Gysland	15.08.2001	6,40	1,47	0,069	63	63	0	4,9	2,06	0,21	1,73	0,21	2,2	1,5	125	335	14,40	0,03
St.1 UF	15.08.2001	6,66	1,85															
St.2 UF	15.08.2001	6,65	1,82															
St.3 UF	15.08.2001	6,62	1,75															
St.4 UF	15.08.2001	6,57	1,78															
St.5 UF	15.08.2001	6,63	1,76															
St.1 F	15.08.2001	6,61	1,74															
St.2 F	15.08.2001	6,67	1,76															
St.3 F	15.08.2001	6,70	1,67															
St.4 F	15.08.2001	6,74	1,73															
St.5 F	15.08.2001	6,73	1,70															
Nedstr. Gysland/Birkeland	15.08.2001	6,56	1,76	0,080	62	61	1	4,4	2,16	0,23	1,73	0,23	2,4	1,7	141	335		
Oppstrøms Gysland	29.08.2001	6,12	1,25	0,054	85	80	5	5,6	2,01	0,23	1,97	0,17	2,6	1,7	110	325	8,30	2,43
St.1 UF	29.08.2001	6,88	2,46															
St.2 UF	29.08.2001	6,88	2,40															
St.3 UF	29.08.2001	6,89	2,33															
St.4 UF	29.08.2001	6,88	2,35															
St.5 UF	29.08.2001	6,89	2,41															
St.1 F	29.08.2001	6,84	2,26															
St.2 F	29.08.2001	6,82	2,15															
St.3 F	29.08.2001	6,88	2,21															
St.4 F	29.08.2001	6,93	2,30															
St.5 F	29.08.2001	6,95	2,39															
Nedstr. Gysland/Birkeland	29.08.2001	6,88	2,39	0,105	60	57	3	4,4	2,51	0,26	1,82	0,24	2,6	1,7	155	345		