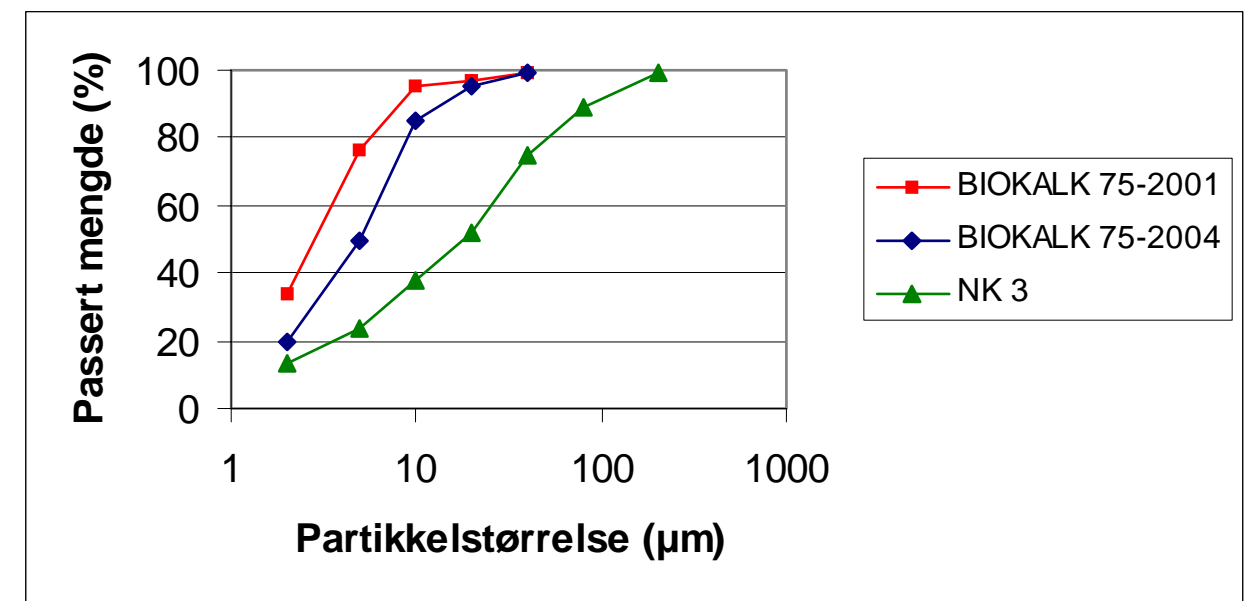




RAPPORT LNR 5224-2006

Avsyringseffekt for ulike kalktyper i doseringsanlegg i Kvina og Lygna



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

Midt-Norge

Postboks 1266
7462 Trondheim
Telefon (47) 73 54 63 85 / 86
Telefax (47) 54 63 87

Tittel Avsyringseffekt for ulike kalktyper i doseringsanlegg i Kvina og Lygna	Løpenr. (for bestilling) 5224-2006	Dato 23.05.2006
	Prosjektnr. Undernr. O-26110	Sider Pris 21
Forfatter(e) Atle Hindar	Fagområde Sur nedbør	Distribusjon
	Geografisk område Vest-Agder	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Kvinesdal kommune	Oppdragsreferanse 04/023 12-3/274/06
---------------------------------------	---

Sammendrag

Data fra NIVAs driftskontroll ved to kalkdoseringsanlegg i Kvina og Lygna er brukt i et forsøk på å beregne vannkjemisk effekt i forhold til kalkforbruk for to kalktyper. BOKALK 75 fra Hustadmarmor (brukt i Nylandanlegget i Kvina) skulle sammenliknes med NK3 fra Miljøkalk (brukt i Gyslandanlegget i Lygna). BOKALK 75 er en kalkslurry der tørrestoffet er svært finmalt ($50\% < 5 \mu\text{m}$), og slurryen doseres fra tank, mens NK3 er en tørr og betydelig grovere kalk ($50\% < 18 \mu\text{m}$) som slemmes opp i doseringsanlegget før dosering. Data fra driftskontrollen ble kvalitetsikret, og data fra fire tidsperioder i 2004-2005 er brukt for sammenlikning. Kalkeffektiviteten for NK3 var som forventet, og langtidsoppløsning av kalk fra bunnen var en betydelig andel av effekten. Effektiviteten for BOKALK 75 var svært lav i forhold til forventningen om full oppløsning, og resultatene fra Nylandanlegget bør brukes med forsiktighet. Det brukes 25000 tonn kalk til elvekalking i Norge hvert år, og det bør gjennomføres mer systematiske forsøk for å øke kunnskapen om kalkoppløsningen i elver.

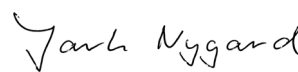
<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kalkdosering 2. Vassdrag 3. Kalkoppløsning 4. Langtidsoppløsning 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Lime-dosing 2. Watercourses 3. Dissolution 4. Long-term dissolution
---	--



Atle Hindar
Prosjektleder



Brit Lisa Skjelkvåle
Forskningsleder



Jarle Nygard
Fag- og markedsdirektør

Avsyringseffekt for ulike kalktyper i doseringsanlegg i Kvina og Lygna

Forord

På oppdrag fra Kvinesdal kommune har NIVA utført sammenliknende undersøkelser av avsyringseffekt for to ulike kalktyper. Undersøkelsen kom i gang etter et ønske om å sammenlikne avsyringseffekten for den slurrybaserte og finmalte BOKALK 75 med en tradisjonell kalktype (NK3) for bruk i doseringsanlegg i vassdrag, samt å forsikre seg om at dosering av BOKALK 75 var mest mulig optimal med hensyn på oppnådd vannkvalitet og økonomi.

Kontrakt ble underskrevet 7. februar 2006.

Rapporten er basert på data fra NIVAs driftskontroll av kalkdoseringsanlegg. Rolf Høgberget, Liv Bente Skancke og Tore Høgåsen har vært hjelpelige med å tilrettelegge dataene for det foreliggende prosjektet.

Vi takker Sira-Kvina kraftselskap for vannføringsdata fra Stegemoen vannmerke i Kvina.

Prosjektet ble etablert på initiativ av Steinar Sandøy i DN og i samarbeid med Fylkesmannen i Vest-Agder v/ Edgar Vegge, mens kontaktperson i Kvinesdal kommune har vært Skogbrukssjef Tor Arne Eiken.

Grimstad, 23. mai 2006

Atle Hindar

Innhold

Sammendrag	5
Summary	6
1. Bakgrunn	7
2. Materiale og metoder	8
2.1 Kalktyper	8
2.2 Data fra effektkontrollen og DN's doserer kontroll	10
2.3 Data fra driftskontrollen	10
3. Resultater	11
3.1 Beregningsgrunnlag	11
3.2 Kvalitetsikring av dataene	13
3.3 Sammenlikning mellom like perioder	13
3.4 Langtidsoppløsning	16
4. Diskusjon	17
4.1 Generelt	17
4.2 Beregnet kalkeffektivitet	18
4.3 Anbefalinger	20
5. Referanser	21

Sammendrag

Det er hittil ikke gjennomført undersøkelser i rennende vann av de forskjellige kalktyper som brukes til vassdragskalking i Norge. Kalkeffekt i forhold til kalkforbruk er ikke dokumentert. Det er derfor ikke grunnlag for en riktig fastsettelse av kostnad i forhold til total effekt, og heller ikke mulig å sammenlikne kostnadsbildet for ulike produkter.

I NIVAs driftskontroll føres det tilsyn med at det brukes optimale kalkdoser i forhold til de vannkvalitetsmål som er satt for den enkelte doserer. Kalkforbruk registreres og effekt måles som pH. Data fra driftskontrollen er imidlertid aldri blitt systematisert for å beregne effekt i forhold til forbruk (kalkeffektivitet).

I Kvina i Vest-Agder er det siden 2000 brukt BIOKALK 75 fra Hustadmarmor AS. Det har hele tiden vært et ønske om å skaffe dokumentasjon på effektiviteten av denne kalken i forhold til andre kalktyper, men slik dokumentasjon foreligger ikke. Det har derfor ikke vært mulig å gjøre en reell sammenlikning.

I den foreliggende rapporten er data fra NIVAs driftskontroll ved to kalkdoseringsanlegg brukt i et forsøk på å beregne vannkjemisk effekt i forhold til kalkforbruk for to kalktyper. BIOKALK 75 fra Hustadmarmor (brukt i Nylandanlegget i Kvina) skulle sammenliknes med NK3 fra Miljøkalk (brukt i Gyslandanlegget i Lygna).

BIOKALK 75 er en kalkslurry der tørrstoffet er svært finmalt ($50\% < 5 \mu\text{m}$), og slurryen doseres fra tank, mens NK3 er en tørr og grovere kalk ($50\% < 18 \mu\text{m}$) som slemmes opp i doseringsanlegget før dosering. Vi forventet at den finmalte kalken ville løses fullstendig slik at kalkeffektiviteten dermed ble 100%. For NK3 forventet vi at effektiviteten var betydelig lavere enn 100%.

Data fra driftskontrollen ble kvalitetsikret, og data fra fire perioder i 2004-2005 er sammenliknet. Kalkeffektiviteten for NK3 var som forventet, og langtidsopløsning av kalk fra bunnen var en betydelig andel av effekten. Effektiviteten for BIOKALK 75 var svært lav i forhold til forventningen om full oppløsning, og resultatene fra Nylandanlegget bør derfor brukes med forsiktighet

Resultatene i denne rapporten er de første i sitt slag, og de gir grunnlag for å anbefale følgende:

- Kalkeffektiviteten for kalktypen NK3 lå nær forventningen, og en total kalkoppløsning på 85% er antydnet for tre måneder høsten 2005. Det bør imidlertid skaffes mer og bedre dokumentasjon av denne typen før slike tall brukes aktivt i markedet.
- Beregnet kalkeffektivitet for Nylandanlegget var svært lav og langt under forventningen på 100%. Årsaken til dette er ikke funnet. Det kan være grunn til å anbefale nærmere undersøkelser av usikkerhetsmomenter og en tilsvarende gjennomgang for ytterligere to år for å se om det har vært en systematisk endring i noen av de faktorer som påvirker beregningene.
- Eksperimentelle forsøk bør gjennomføres nedstrøms både Nyland- og Gyslandanlegget for å få direkte mål på kalkeffekt (endring i pH og økning i oppløst Ca) og på forholdet mellom oppløst kalk og kalkpartikkelinnhold.
- Gode data fra driftskontrollen har en stor nytteverdi og bør brukes mer aktivt til beregninger av den typen som er gjennomført her. Det kan være grunn til å se på rutiner for løpende datakorreksjon i driftskontrollen når feil eller avvik oppdages.
- Det er en stor mangel på kunnskap om kalkoppløsning i elver, spesielt sett i forhold til de om lag 25000 tonn kalk som årlig passerer kalkdoseringsanlegg i norske vassdrag. Systematiske forsøk bør gjennomføres for å bedre denne situasjonen.

Summary

Title: Effect of liming for two different limestone powders at lime-dosers in the rivers Kvina and Lygna.

Year: 2006

Author: Atle Hindar

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-4947-8

No examination of limestone dissolution efficiency in rivers has so far been conducted in Norway. Effects of liming in relation to the amount of limestone powder used are not documented. No basis for correct estimates of cost-benefit for different products therefore exists.

The limestone powder BOKALK 75 has been used in River Kvina since 2000, and despite of an explicit desire of documented efficiency in relation to other products, no such data have been available.

NIVA is responsible for the continuous operation control at several lime-dosing plants. This control ensures optimal dosing, but data from the control programme have never been used for estimation of liming efficiency. Here this has been done to compare BOKALK 75 and another limestone powder (NK3 from Miljøkalk). BOKALK 75 is a slurry with very finely ground particles (50% < 5 µm), whereas NK3 is dry and significantly coarser (50% < 18 µm). We expected 100% dissolution of the former and significantly lower efficiency for the latter.

After quality assurance of the data from the operational control data from four periods in 2004-2005 could be compared. Liming efficiency was as expected for NK3 but very low for BOKALK 75, and the results for BOKALK 75 should be used cautiously. Long-term dissolution (dissolution of previously sedimented limestone powder) was an important part of the measured effect for NK3.

The following recommendations can be suggested based on the results in this report:

- Total dissolution for NK3 may have been 85% over three months in the autumn of 2005. More documentation should be gathered before liming efficiency as high as this figure can be used for marketing purposes.
- The actual cause of low effects for BOKALK 75 has not been identified, and another two years of data should be examined to see if there is a sudden change in some of the suggested factors that are important for the estimates.
- Experimental data should be secured in order to get a direct estimate of dissolution efficiency.
- Good data from the operational control are valuable and should be used more actively as has been done in this work.
- There is still an obvious lack of data on liming dissolution in rivers, especially in the light of the annual 25.000 tonnes of limestone powder that are applied in Norway by dosers. More systematic work should be initiated.

1. Bakgrunn

Det er hittil ikke gjennomført undersøkelser i rennende vann av de forskjellige kalktyper som brukes til vassdragskalking i Norge. Verken oppløsningsforløp eller total vannkjemisk effekt i forhold til kalkforbruk er dokumentert. Det er derfor ikke grunnlag for en riktig fastsettelse av kostnad i forhold til total effekt, og heller ikke mulig å sammenlikne kostnadsbildet for ulike produkter.

Kalkoppløsning er 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, og momentanoppløsning (oppløsning før kalken synker til bunns) for ulike kalktyper kan sammenliknes.

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. Høy pH reduserer kalkoppløsningen. Partikkelfordelingen blir som regel et kompromiss mellom behovet for rask oppløsning og kostnaden ved å produsere små og lettløselige partikler.

Kalkdosene skal sikre at biologiske mål nås og samtidig være så lave at unødvendige kostnader unngås. Best mulig kalkutnyttelse er avgjørende for den økonomiske delen. 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 langtidsoppløsning eller effekt av turbulens i elver, 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 (langtidsoppløsning). Forsøk i Sverige viste at 30-80% av dosert kalk i elver sedimenterer når utgangs-pH er omlag 5,0 (Sverdrup m.fl. 1985). Men 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 langtidsoppløsningen nedstrøms dosererne kunne fanges opp i doseberegningen. På den måten ville sedimentert kalk ikke nødvendigvis være tapt kalk. Dette er nå gjennomført ved mange større kalkdoseringsanlegg, enten ved at det måles og styres etter pH noen hundre meter nedstrøms anlegget og/eller ved at det brukes en overvåkingsstasjon enda lengre nede i vassdraget til å korrigere doseringen. I tillegg er det flere doserere nedover i samme vassdrag enkelte steder. Dette øker muligheten for å ta hensyn til den totale kalkoppløsningen og optimalisere kalkingsstrategien.

Ved Nyland kalkdoseringsanlegg i Kvina har det siden 2000 vært forsøksdosering med BOKALK 75 fra Hustadmarmor. BOKALK 75 skiller seg fra de vanlige kalktypene som brukes i vassdrag ved at partiklene er svært finkornige og ved at kalken leveres som ferdig suspensjon (slurry) og doseres fra tank. Det har hele tiden vært et ønske om å skaffe dokumentasjon på effektiviteten av denne kalken i forhold til andre kalktyper, men slik dokumentasjon foreligger ikke. Det har derfor ikke vært mulig å få en reell sammenlikning.

NIVA gjennomførte prosjektet KOPPEL (KalkOPPløsning i ELv) i Kvina og Lygna i 2001-2003, men av ulike grunner ble ikke resultatene rapportert. Det nærmeste vi kommer en dokumentasjon på

kalkeffektivitet er NIVAs driftskontroll, som er en kontroll på at det kalkes med optimale doser i forhold til de vannkvalitetsmål som er satt for den enkelte doserer. Data fra driftskontrollen er imidlertid ikke systematisert for å beregne kalkoppløsning eller for å kunne sammenlikne de ulike dosererne/kalktypene.

I det foreliggende prosjektet har vi brukt data fra driftskontrollen i Kvina og Lygna for å vurdere total effekt av BIOKALK 75 og kalktypen NK3 fra Miljøkalk i forhold til brukte mengder kalk.

2. Materiale og metoder

Dette arbeidet er hovedsakelig basert på data fra driftskontrollen for Nylandanlegget i Kvina og Gyslandanlegget i Lygna (**Figur 1**). I tillegg er det brukt data fra effektkontrollen av vassdragskalkingen (den kjemiske og biologiske kalkingsovervåkingen) i begge vassdrag og fra DN's dosererkontrollprosjekt (manuelle prøver oppstrøms og nedstrøms kalkdoserer).

Det vises til DN's årsrapporter for effektkontrollen for en generell beskrivelse av vassdragene Kvina og Lygna og for vannkjemiske og biologiske undersøkelser i forbindelse med kalkingstiltakene. Det vises også til de årlige "avviksrapportene" fra driftskontrollen for Nylandanlegget i Kvina og Gyslandanlegget i Lygna.

Kvina går for det meste i svakt hellende terreng på strekningen Nylandanlegget til nedre pH-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, men dybden er forholdsvis liten slik at vannet har god turbulens. 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 brua ved Birkeland der pH nedstrøms måles.

I årene 2002-2005 var det årlige kalkforbruket ved de to anleggene hhv. 1835-3184 tonn BIOKALK 75 og 974-1453 tonn NK3. I begge vassdrag er det dosering oppstrøms, slik at disse mengdene ikke gjenspeiler avsyringsbehovet for hele vassdraget.

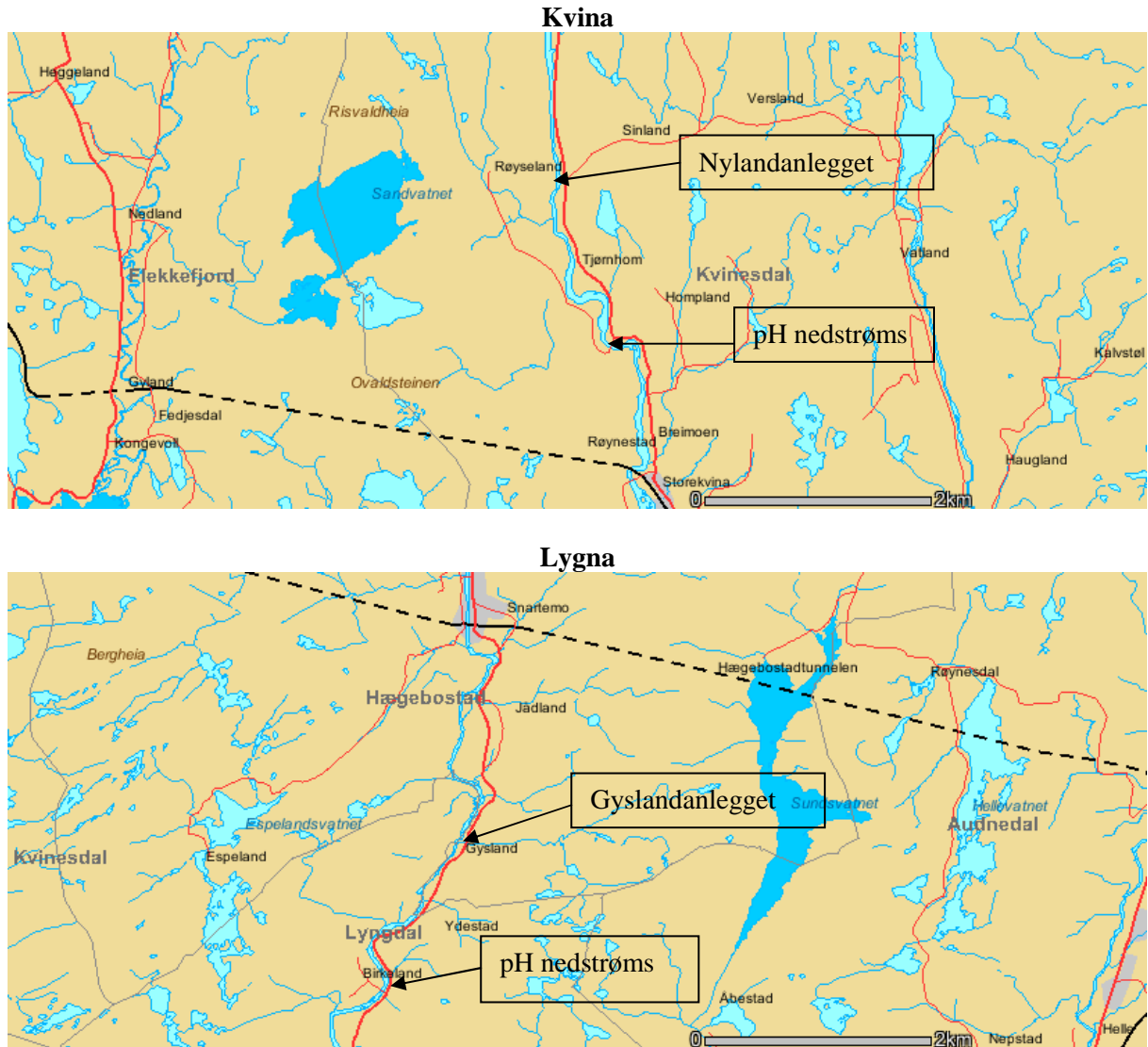
2.1 Kalktyper

BIOKALK 75 fra Hustadmarmor er svært finmalt og er i DN's kategori 2 i rangeringen av kalk etter finmalingsgrad. Kalken 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 for å holde kalken i suspensjon i doseringsanlegget. BIOKALK 75 ble først fortynnet med elvevann i et sirkulasjonskar og deretter ledet ut i elva via pumper.

Vanninnholdet i slurryen er i gjennomsnitt 27 % som vektprosent, egenvekten er 1,85 kg/l og Ca-innholdet er 27 % som vekt. Det blir da 0,5 kg Ca/l slurry.

I BIOKALK 75 var kornfordelingen i juni 2005 som følger: 90% < 15 µm, 50% < 5 µm og 20% < 2 µm (produktdatablad av 24.06.2005; **Figur 2**). I 2001 hadde produktet mer finstoff, som det også går fram av figuren.

I følge litteratur referert av Hongve (1982), kan partikler under 15 μm i diameter være jevnt fordelt ved lav vannhastighet (25 cm/sekund). Resten av partiklene vil være utsatt for sedimentasjon. Det vil si at kalkpartikler i BOKALK 75 i all hovedsak ikke vil sedimentere.

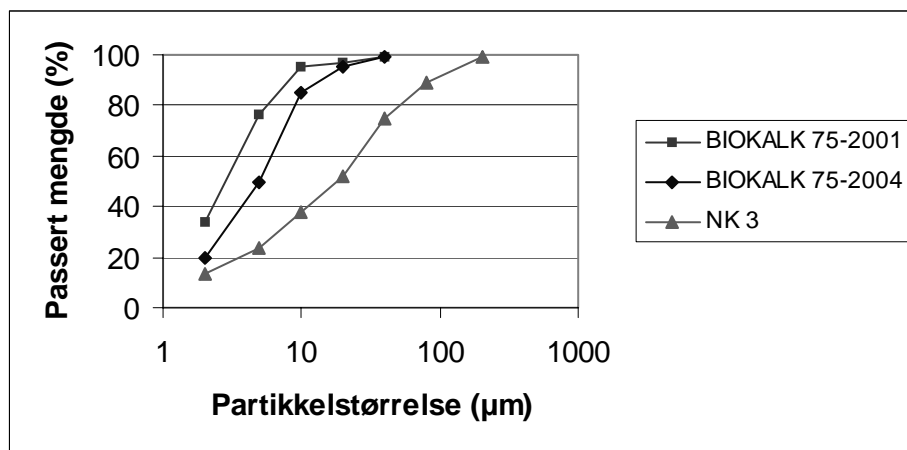


Figur 1. Vassdragsavsnittene i Kvina (øverst) og Lygna (nederst) der kalkdoserer er plassert. pH nedstrøms måles ved hhv. Oksestein bru og Birkeland. Kartgrunnlaget er fra NVE-Atlas.

NK3 fra Miljøkalk er laget for vassdragskalking og er i kategori 3 i DN's system. Kalken leveres på silo som tørt mel, men slemmes opp i en vannstrøm i selve anlegget og doseres derfor som oppslemmet kalk. 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.

Kalken inneholder 34,5 % Ca, som tilsvarer 86 % CaCO₃. I NK 3 er kornfordelingen som følger: 90% < 95 µm, 50% < 18 µm, 20% < 4 µm og 13% < 2 µm (produktdatablad av 3. oktober 2002; **Figur 2**).

I følge litteratur referert av Hongve (1982), kan 70 % av partikkelmengden i NK3 være i jevn fordeling i vannmassen i raskt strømmende vann (100 cm/sek) og nær 50 % ved lav vannhastighet (25 cm/sekund). Resten av partikkelmengden vil være utsatt for sedimentasjon, spesielt i brede og grunne elveleier der partiklenes kontakt med bunnen er stor.



Figur 2. Partikkelfordeling for de to kalktypene. Passert mengde vil si den mengde som passerer gitte maskevidder i en sikt. 1000 µm er det samme som 1 mm. Tallene i figuren er basert på produktdatablad.

2.2 Data fra effektkontrollen og DN's dosererkontroll

For å finne den generelle sammenhengen mellom pH og Ca-konsentrasjon i vassdragene har vi brukt data for pH og Ca-konsentrasjon fra DN's effektkontroll (kalkingsovervåkingen; DN 2005) og DN's dosererkontroll i begge vassdragene. Data fra 2004 og 2005 fra alle stasjoner i vassdragene er brukt for å få et best mulig datamateriale.

2.3 Data fra driftskontrollen

Data for 2004 og 2005 fra driftskontrollen ved begge kalkdoserere er brukt, se **Tabell 1**.

Tabell 1. Data fra driftskontrollen som er brukt i beregningene.

	Originalformat	Brukt format
pH oppstrøms	Timebasis	Døgnbasis
pH nedstrøms	Timebasis	Døgnbasis
Temperatur	Timebasis (°C)	
vannføring	Timebasis (m ³ /s)	Døgnbasis
Kalkvekt eller volum	Timebasis (kg eller m ³)	Døgnbasis

pH-verdier på timebasis er først regnet om til H^+ -konsentrasjon ($\mu\text{ekv/l}$). Middelkonsentrasjon av H^+ per døgn og tilhørende middel-pH for døgn er så beregnet.

Kalkforbruk for døgn ble først beregnet ved å trekke kalkvekt eller kalkvolum kl. 23.00 fra kalkvekt eller kalkvolum kl. 00.00 for hvert enkelt døgn. Kalkpåfylling skjer imidlertid ved andre tidspunkt enn disse slik at det kan framkomme store negative verdier ved denne måten å regne på. Dette ble det tatt hensyn til ved å manuelt gå inn i datarekkene og ta ut riktige data.

3. Resultater

3.1 Beregningsgrunnlag

For å beregne effekt kunne vi ikke bruke forskjellen mellom oppstrøms og nedstrøms verdier for pH eller H^+ -konsentrasjon direkte. pH-forskjeller gir ingen meningsfulle verdier fordi avsyringseffekten varierer langs pH-skalaen. Hvis avsyringseffekten bare skulle måles ved pH-verdier under 5,5 kunne vi ha brukt H^+ -konsentrasjonen, men fordi avsyringen gir pH-verdier på over 6,0, blir dette umulig. Når pH øker vil en stadig mindre del av effekten være i form av endret H^+ -konsentrasjon og en økende del av kalkeffekten er i form av buffer, som ikke måles.

Det mest ideelle ville være om det innenfor driftskontrollen ble målt på kalsium på samme måte som pH. Da kunne vi beregnet effekten direkte ved å se på endringer i Ca-konsentrasjonen. Men slike data finnes ikke.

For å komme rundt dette dilemmaet, er forholdet mellom Ca og pH i vassdragene beregnet ved hjelp av andre data enn de som samles i driftskontrollen (**Figur 3**). Vannkjemien er svært lik (se **Tabell 2**) og forholdet mellom pH og Ca viste seg også å være svært likt i begge vassdrag. Kun data der pH er over 5,5 er med i beregningen av sammenhengen for dette forholdet. Det var for hovedsakelig å ha med data fra kalkpåvirkede lokaliteter og for å unngå vannkvaliteter fra referansestasjoner høyt oppe i vassdragene.

Figuren viser at variasjonen i Ca er relativt stor omkring gitte pH-verdier, men usikkerheten kan bli den samme i begge vassdrag. Dette er ikke undersøkt nærmere. pH-verdier over ca. 7,2 gir systematisk for lave Ca-konsentrasjoner, men dataene med svært høy pH i figuren er fra Eiesland høyt oppe i Litleåna, Kvina. Tilsvarende data fra hovedvassdraget ville trolig ligget noe lavere, slik at feilen antakelig ikke er så stor likevel. Det er også svært få driftskontrollverdier for pH nedstrøms som er i dette området.

Tabell 2. Middelerverdier og standardavvik for pH, totalt organisk karbon (TOC) og kalsium ved Vegge i Lygna og Kloster i Kvina i perioden 1. januar 2004 – 31. desember 2005. (data fra DNs effektkontroll).

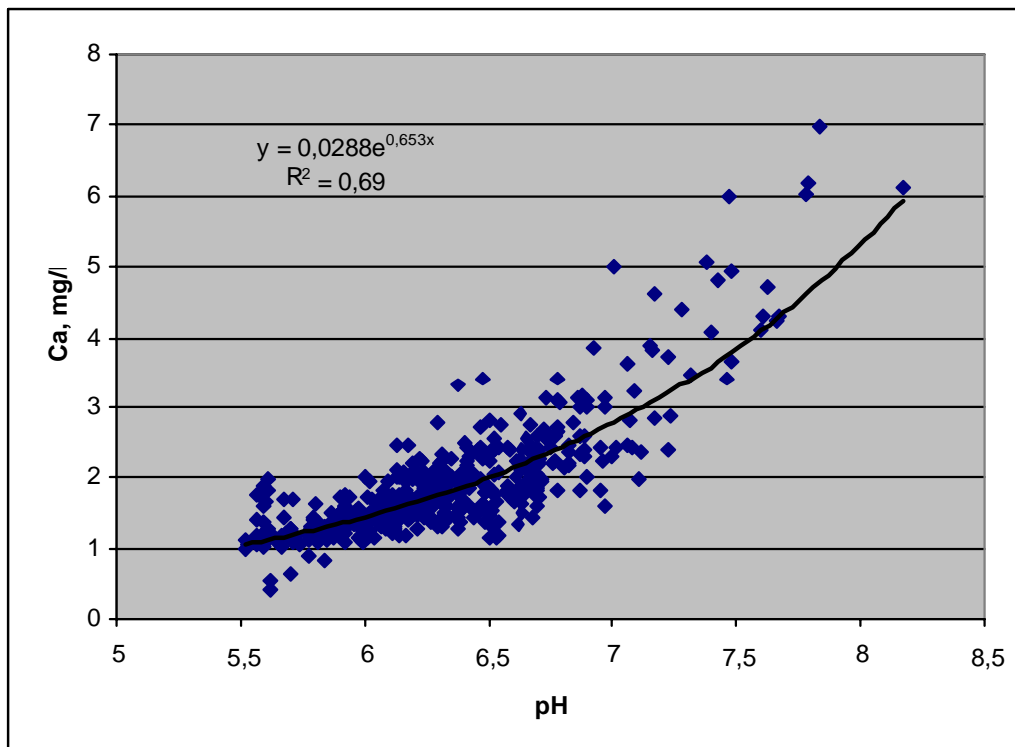
		pH	TOC mg/l C	Ca mg/l
Lygna	Middel	6,30	4,04	1,97
	St.avvik	0,31	1,50	0,41
Kvina	Middel	6,30	3,69	2,00
	St.avvik	0,23	0,93	0,46

Følgende likning fra **Figur 3** for pH-Ca-forholdet ble brukt for å beregne en tilhørende Ca-konsentrasjon for alle døgnmiddel-pH-verdier:

$$y = 0,0288 \cdot e^{0,653 \cdot x}, \text{ dvs.} \\ \text{Ca (mg/l)} = 0,0288 \cdot e^{0,653 \cdot \text{pH}}$$

Likningen er også brukt til å beregne Ca-konsentrasjoner ved $\text{pH} < 5,5$. Ved $\text{pH} 5,0$ blir eksempelvis Ca-konsentrasjonen 0,8 mg/l.

De beregnede kalsiumkonsentrasjonene ble så kombinert med vannføring og det ble funnet en kalkeffekt på døgnbasis (tonn Ca/døgn) for alle døgn i perioden 2004-2005.



Figur 3. Forholdet mellom pH og kalsiumkonsentrasjon i Kvina og Lygna i perioden 2004-2005. Data er hentet fra effektkontrollen og DN's dosererkontroll. Alle datapar med $\text{pH} > 5,5$ i vassdragene er tatt med.

Kalkforbruket er hentet direkte fra driftskontrollen slik det er beskrevet i metodekapittelet. Det er også midlet til forbruk per døgn.

Både kalkeffekt og kalkforbruk er akkumulert over tid slik at totaleffekt og totalforbruk for lengre perioder framkommer. Kalkeffekt og kalkforbruk uttrykkes med benevnelsen tonn for en spesifikk periode, og vi har sett på ulike perioder. Ved å dividere kalkeffekten med kalkforbruket er det beregnet en kalkeffektivitet for perioden. Kalkeffektiviteten har benevnelsen %, dvs. kalkeffekt som prosent av kalkforbruk. Det blir det samme som total kalkopløsning fra dosering til målepunkt og omfatter som vi skal se både korttidsopløsning og langtidsopløsning på strekningen.

3.2 Kvalitetsikring av dataene

Beregningene over skulle i prinsippet gi brukbare resultater slik at to ulike kalktyper kan sammenliknes. Driftskontrollen slik den er gjennomført hittil er imidlertid innrettet for å kontrollere drift og ikke for å lagre gode kvalitetsdata. Dataseriene bærer preg av dette, og det er ikke alle perioder i denne toårsperioden som har gode nok data for beregning av kalkeeffektivitet.

En stor del av arbeidet med denne rapporten har derfor bestått i kvalitetsikring av data, og det er brukt ulike metoder for å finne fram til perioder med gode data. Her beskrives ulike forhold som har medført at data ikke kunne brukes:

- driftsavbrudd eller perioder med dokumenterte uregelmessigheter i målingene
- pH oppstrøms og nedstrøms er i enkelte perioder like
- pH oppstrøms er høyere enn pH nedstrøms
- temperaturen i vannet er for høy, som tyder på stillstand i målekyvetta for pH
- pH oppstrøms er manuelt justert ned for å øke kalkdoseringen (kun ett eksempel)

Det har ikke vært noe mål å forklare hvorfor uregelmessighetene har oppstått. Det vises til loggbøker og avviksrappporter fra driftskontrollen for nærmere forklaringer.

Enkelte måleverdier er korrigert. Det kan være pH-målinger i forbindelse med kalibrering, og lave/høye verdier er da justert til det normale nivået for døgnet eller i perioden.

I de undersøkte periodene har pH oppstrøms generelt vært temmelig lik eller noe lavere ved Nylandanlegget enn ved Gysland. pH nedstrøms har vært sammenliknbar for de to dosererne.

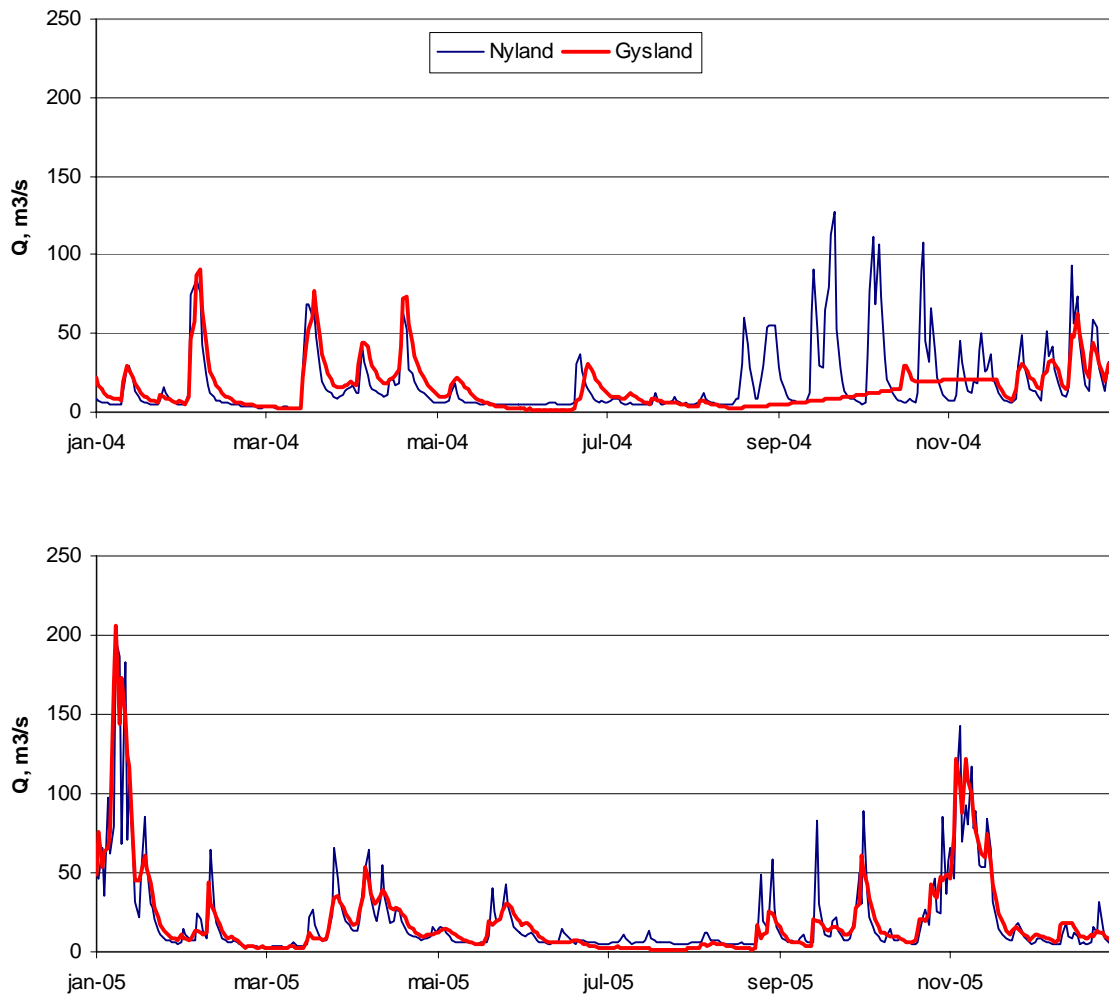
3.3 Sammenlikning mellom like perioder

Sammenhengende perioder med antatt brukbare data for begge anlegg er analysert. Ved å se på like tidsperioder kan vi anta at enkelte faktorer er forholdsvis likt fordelt i vassdragene, spesielt vannføring (**Figur 4**) og temperatur. Vannføringens størrelse er forholdsvis lik ved begge dosererne og kalkforbruket er i samme størrelsesorden. Men elveutformingen er forskjellig og kan gi ulike vannhastighet, ulike turbulensforhold og dermed ulike forhold for oppløsning. Dette er ikke undersøkt nærmere.

Som det framgår av **Figur 5** for pH oppstrøms og nedstrøms doseringsanleggene er det identifisert perioder ved begge dosererne og for begge år som er egnet til beregning av kalkeeffektivitet, men også lange perioder med for dårlige data. For Gysland er alle data etter sommeren 2004 uegnet, likeledes første del av 2005, samt sommeren 2005. For Nyland er det sommeren 2004 og vinter/vår 2005 som er uegnet. Totalt ser det ut til å være best data for Nylandanlegget i Kvina.

Kalkforbruket ble beregnet på basis av kalkvekter eller tankvolum ved døgnetts start og døgnetts slutt. Påfyllinger skjer ofte og vanligvis på dagtid, og kalkvektene er derfor ikke monotont avtakende for lange perioder. Kalkforbruket (reduksjonen i kalkvekt eller -volum) måtte dermed beregnes manuelt for hvert enkelt døgn.

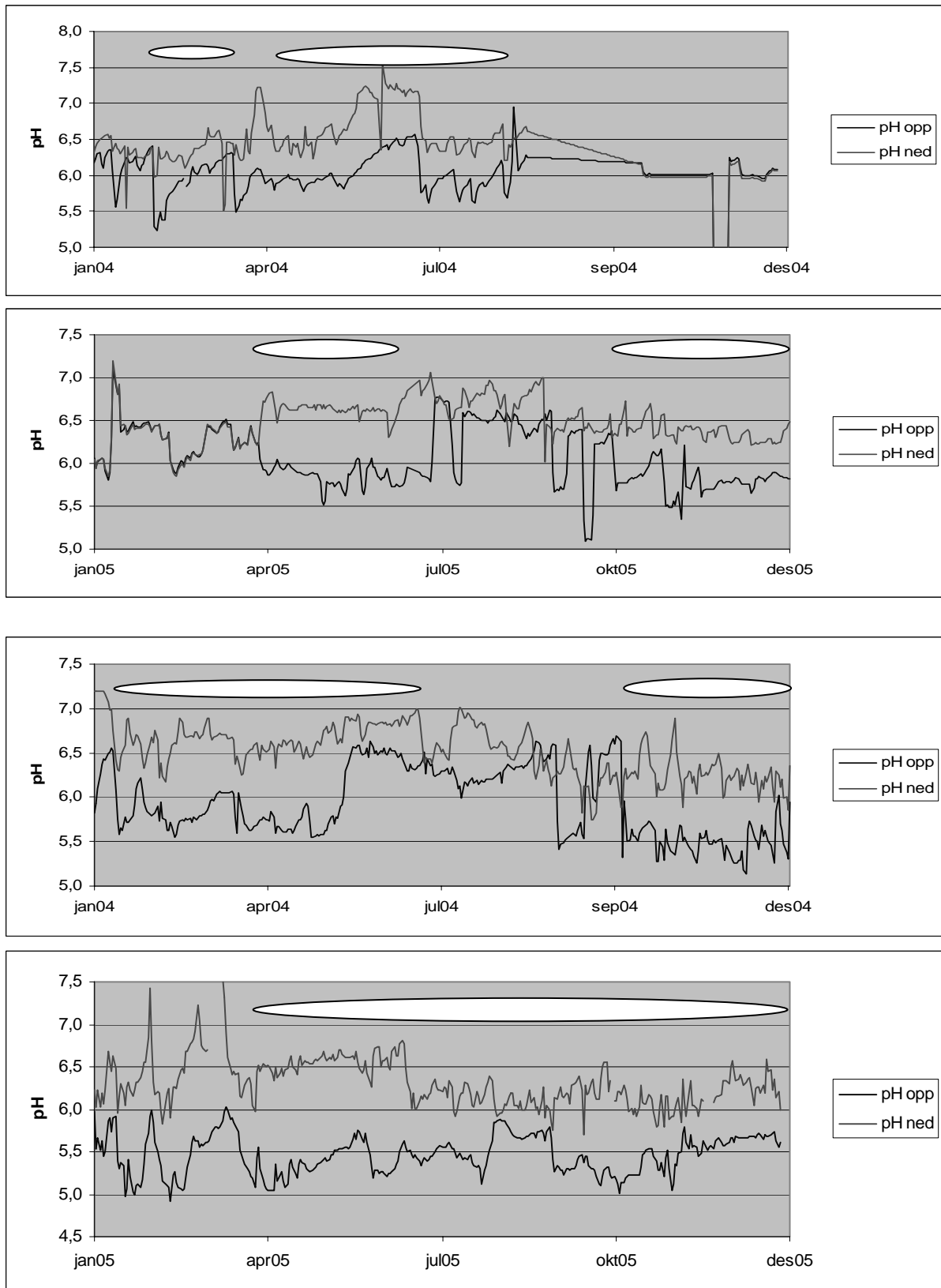
Det framgår av dette datamaterialet at kalkeeffektiviteten varierer mellom 74 og 124% for Gyslandanlegget og mellom 41 og 119% for Nylandanlegget i de sammenliknbare periodene (**Tabell 3**). Gyslandanlegget har størst effektivitet i tre av de fire periodene og har også den høyeste enkeltverdien. Den største forskjellen er seinhøsten 2005, da Gyslandanlegget hadde 124% effektivitet og Nylandanlegget kun 41%. Nylandanlegget hadde overraskende lav effektivitet i tre av fire perioder.



Figur 4. Vannføring ved Nyland og Gysland i 2004 og 2005. Ved Gysland var det en lang periode uten registreringer høsten 2004.

Tabell 3. Kalkeffektivitet i sammenliknbare perioder (a-d) ved de to kalkingsanleggene.

Doserer	Periode	Ca brukt tonn	Ca effekt tonn	Effektivitet %
Gysland-a	02.02.04-23.03.04	70	54	77
Nyland-a	02.02.04-23.03.04	73	51	70
Gysland-b	03.04.04-05.07.04	78	81	104
Nyland-b	03.04.04-05.07.04	91	63	69
Gysland-c	30.03.05-03.06.05	152	112	74
Nyland-c	29.03.05-13.06.05	120	143	119
Gysland-d	02.10.05-31.12.05	107	133	124
Nyland-d	02.10.05-31.12.05	282	116	41



Figur 5. pH oppstrøms og nedstrøms ved Gysland (to øvre) og Nyland (to nedre). Perioder med brukbare data er markert i alle figurene.

3.4 Langtidsoppløsning

Effektiviteten er tidsvis over 100% (**Tabell 3**), noe som i utgangspunktet kan synes å være umulig. Men oppløsning av kalk fra elvebunnen er en tilleggskilde, slik at effekten er et resultat av både det som doseres i perioden og det som er dosert tidligere. Denne langtidsoppløsningen er det til en viss grad mulig å kvantifisere med de data som foreligger. På den måten kan den totale kalkutnyttelsen beregnes bedre, og vi får et bedre begrep om det totale kost-nytteforholdet.

Beregningen av langtidsoppløsning og den mer reelle kalkeffektiviteten er gjort ved å gå gjennom fire steg. Det første steget er de målte tallene slik de er gitt i **Tabell 3**, men der tidsperioden er splittet opp i en periode med liten vannføring og en med stor vannføring. I det neste steget er først langtidsoppløsningen innført som forskjellen mellom brukt kalk og målt effekt for perioden med lav vannføring. I steg 3 er langtidsoppløsningen tatt inn som en tilleggskilde for perioden med stor vannføring. Da framkommer den mer reelle kalkeffektiviteten. I det fjerde og siste steget er bidraget fra både korttidsoppløsning og langtidsoppløsning for de to periodene satt opp.

Steg 1:

Perioden 2. oktober-31. desember 2005 ved Gyslandanlegget er valgt som et eksempel fordi kalkeffektiviteten her i første omgang ble beregnet til 124% (**Tabell 3**). I beregningen under vises hvordan dette tallet kan justeres til et mer reelt anslag av kalkeffektivitet. Som det framgår er dette, i mangel av data fra kontrollerte forsøk, basert på en blanding av beregninger som gir konkrete tall og antakelser som er basert på faglig skjønn. Tallene som framkommer må derfor brukes med varsomhet.

I denne perioden var vannføringen først svært lav (fra 2.10. til 24.10), fulgt av stor vannføring og deretter en periode fra 20.11. og ut året med svært lite vann (**Figur 4**). I perioden med høy vannføring (24.10.- 20.11.), ble det funnet en kalkeffektivitet på 102 %. I perioden med lite vannføring var effektiviteten hele 300 % (steg 1 i **Tabell 4**).

Steg 2:

Vi kan gå ut fra at forskjellen mellom kalkeffekt og brukt kalk i perioden med liten vannføring er et resultatet av langtidsoppløsning. Siden kalkeffekten er 36 tonn Ca og forbruket er 12 tonn i denne perioden, blir langtidsoppløsningen minst 24 tonn Ca, steg 2 i **Tabell 4**. Det tilsvarer 0,27 tonn Ca/døgn eller 800 kg kalk/døgn av NK3 kalk. Dette er formidabelt og altså dobbelt så mye som forbruket. Med samme beregning blir langtidsoppløsningen i perioden med høy vannføring bare 2 tonn Ca. Perioden er riktignok kortere, men en bør forvente minst like stor langtidsoppløsning ved høyere vannføring pga større vanndekket areal, større vannhastighet, større turbulens og dermed større gravende krefter som kan virvle opp kalk fra elvebunnen.

Steg 3:

Vi går så ut fra følgende: I perioden med lite vannføring synker minst 50 % av dosert kalk ned på bunnen. Av de doserte 12 tonn Ca utnyttes derfor bare 6 tonn. Langtidsoppløsningen må da være 6 tonn større enn de opprinnelige 24 tonn, og blir 30 tonn Ca (24+6). I perioden med høy vannføring regner vi med at langtidsoppløsningen er dobbelt så stor som i perioden med lav vannføring. Om vi også tar hensyn til at perioden med høy vannføring er kortere, blir langtidsoppløsningen 20 tonn Ca.

Alle disse stegene er basert på beregnede verdier og rimelige antakelser, men gir bare en skalering av hvor stor langtidsoppløsning er. Som det går fram av **Tabell 4** er nå kalkutnyttelsen blitt ca. 85 % og langtidsoppløsningen utgør hele 50 tonn Ca, mens total kalkbruk i perioden var 107 tonn Ca.

Steg 4:

I steg 4 er størrelsen på både korttids- og langtidsoppløsning beregnet fra tallene i forrige steg. I perioden med liten vannføring var langtidsoppløsningen omlag 80% av total effekt (30 av 36 tonn Ca), mens den i perioden med stor vannføring var 20% (20 av 97 tonn Ca), steg 4 i **Tabell 4**.

Tabell 4. Stegvis beregning av langtidsoppløsning av kalk ved Gyslandanlegget i perioden 2.10.2005 til 31.12.2005. De to periodene med liten vannføring er slått sammen og sammenliknet med perioden med stor vannføring. Tallene i steg 1, høyre kolonne, er hentet fra **Tabell 3**. Det endelige resultatet er gitt i steg 3 og 4 (se nærmere forklaring i teksten).

	Liten vannføring	Stor vannføring	Totalt	
Steg 1				
Ca, brukt	12	95	107	tonn
Ca, effekt	36	97	133	tonn
Effektivitet	300	102	124	%
Steg 2				
Ca, brukt	12	95	107	tonn
Ca, langtidsoppl.	24	2	26	tonn
Ca, effekt	36	97	133	tonn
Effektivitet	100	100	100	%
Steg 3				
Ca, brukt	12	95	107	tonn
Ca, langtidsoppl.	30	20	50	tonn
Ca, effekt	36	97	133	tonn
Effektivitet	86	84	84	%
Steg 4				
Ca, korttidsoppl.	6	77	83	tonn
Ca, langtidsoppl.	30	20	50	tonn
Ca, effekt	36	97	133	tonn

4. Diskusjon

Beregningene viser at kalkdosering i elver gir to kilder til kalkeffekt; det som løses opp umiddelbart av dosert kalk (korttidsoppløsning) og det som løses opp av kalk som først er sunket ned på elvebunnen (langtidsoppløsning). Forståelsen av dette og utnyttelsen av langtidsoppløsning i kostnadsberegningen for kalkingstiltak er vesentlig for å sette opp realistiske kost-nytte regnskaper. Dette er dermed avgjørende for å kunne sammenlikne ulike kalktyper, slik ønsket har vært ved bruk av BIODKALK 75 i Kvina.

4.1 Generelt

Kalkoppløsning er et dårlig undersøkt fenomen, med unntak av forsøk i sedimentasjonskolonner, der kalk løses mens partiklene synker ned (Sverdrup 1985), enkelte beregninger for innsjøer (Hindar 1984;

Sverdrup et al. 1985; Hindar og Rosseland 1988) og beregninger i Vikedalselva (Hindar og Lien 1988). Kalkoppløsning i sedimentasjonskolonner brukes for å karakterisere norske kalkprodukter.

Total kalkoppløsning i et vassdrag er et resultat av både korttidsoppløsning og langtidsoppløsning. Med korttidsoppløsning menes den kalkoppløsning som skjer før kalken rekker å sedimentere, for eksempel synke til bunns i en innsjø. Med langtidsoppløsning menes oppløsning av kalk fra innsjøbunn eller elvebunn. Kalk som er sunket ned på innsjøbunnen kan løses direkte eller virvles opp i bølgeslagsonen for ytterligere oppløsning. Kalk som er sunket ned på elvebunnen kan også løses direkte eller virvles opp fra elvebunnen ved økende vannføring og løses ytterligere under transport nedover i elva.

Det eksisterer nesten ingen beregninger av langtidsoppløsning ved elvekalking. Men basert på eksperimenter i Fosstølbekken, Vegår i 1985 konkluderte Hindar (1987) med at "... previously sedimented limestone powder may be an important source of dissolved calcium". Dette resultatet var en direkte foranledning til at kalkdosering i Vikedalselva ble styrt etter pH målt 700 meter nedstrøms i et feed-back system. Det ble antatt at langtidsoppløsningen kunne inngå i beregningen av kalkdose (Hindar m.fl. 1989). For en periode fra kalkslutt i mai 1987 og fram til kalkstart i oktober samme år ble det beregnet en kalkoppløsning på 45 tonn kalk fra elvebunnen i Vikedalselva (Hindar og Lien 1988). Hindar og Henriksen (1992) skriver at total kalkoppløsning over lang tid kanskje kan nærme seg 100%.

Oppløst kalsium fra kalken kan lagres i moser og på steinoverflater på elvebunnen ved adsorpsjon. Påfølgende ionebytting av adsorbent Ca med H^+ og aluminiums-ioner fra elvevannet virker bufrende (Hindar og Lydersen 1995) og vil også være med å gi en langtidseffekt.

Kalkeffekten er altså ikke kun et resultat av det som skjer umiddelbart etter at kalken kommer ut i elva. Men hvis et kalkprodukt er så finmalt som BOKALK 75, vil en forvente at så godt som alle kalkpartiklene løses og at svært lite blir sedimentert. Ioneadsorpsjon/desorpsjon kan som nevnt ha betydning for en langtidseffekt, men dette har aldri vært undersøkt på en slik måte at en vet hvor stor denne kilden kan være.

For kalktypen NK3 vil situasjonen være en annen i og med at en stor andel av partiklene er så store at de kan sedimentere. Oppløsning av kalk på elvebunnen kan derfor være en betydelig del av den totale kalkeffekten. Når en skal sammenlikne kost-nytteforhold for NK3 med andre kalktyper, er det avgjørende i hvilken grad en kan regne dette inn som en del av kalkeffekten.

4.2 Beregnet kalkeffektivitet

Total kalkoppløsning eller det som her er kalt kalkeffektiviteten varierer med en rekke forhold, særlig vannføring, turbulens, pH og temperatur. Vannføring og temperatur i Kvina og Lygna er forholdsvis like i like perioder, mens inngående pH og turbulens kan være forskjellige, pga hhv. oppstrøms kalking og elveutforming.

Det var forventet at kalkeffektiviteten generelt var bedre for BOKALK 75 ved Nylandanlegget enn for NK3-kalken ved Gysland, men det er få av resultatene som tyder på det. Tvert om er det Gyslandanlegget som kommer best ut, med resultater nær forventningen, mens Nylandanlegget har lav effektivitet. Resultatene for BOKALK 75 som framkommer i denne rapporten gir overraskende resultater og må vurderes med varsomhet inntil nærmere undersøkelser av usikkerhetsfaktorene er gjennomført.

BOKALK 75 hadde en kalkeffektivitet på 41 % for hele perioden 2.10.2005 – 31.12.2005. Det er vanskelig å tro at dette tallet er korrekt fordi det er så lavt, og det bør derfor brukes med forsiktighet. En systematisk pH-feil oppstrøms og nedstrøms ble avdekket tidlig i november 2005 (feil elektrode til

felt-pH meter ble levert fra produsent). Denne feilen var trolig 0,25 pH-enheter i middel for mesteparten av 2005, og en korreksjon er innbakt i beregningen. Korreksjoner av denne art har imidlertid bare en marginal effekt på kalkeeffektiviteten fordi effektiviteten er basert på forskjellen mellom pH-verdier oppstrøms og nedstrøms. Vi antar at en slik feil i pH-avlesningene påvirker målt pH oppstrøms og nedstrøms likt.

Ved Nylandanlegget har det vært brukt vannføringsverdier som i perioden 2004-2005 viste seg å være for lave. Data fra Stegemoen vannmerke ble oversendt fra Sira-Kvina kraftselskap og lagt inn i beregningene i siste fase i prosjektet, noe som forbedret effektiviteten ved Nylandanlegget betydelig, men ikke så mye at tallene virker rimelige. Stegemoen ligger 5 km i luftlinje nedstrøms doserer, men lokalfeltet på strekningen er forholdsvis lite. Tilleggsavrenningen og dermed den tilleggs effekten som er forårsaket av dette betyr derfor ikke så mye.

Det foreligger ingen dokumentasjon fra eksperimentelle forsøk i de to vassdragene eller resultater fra andre vassdrag som kan underbygge resultatene i dette arbeidet. Kalkopløsning i sedimentasjonskolonner viser imidlertid at BLOKALK 75 løses raskt, se produktdatabladet, og denne kalken skulle dermed gi en umiddelbar og god effekt på nær 100% fram til et målested som ligger ca. 2 km nedstrøms anlegget. Men dette var bare tilfellet for en av de fire undersøkte periodene.

Det er viktig å påpeke at perioder med åpenbare feil i dataene ikke er brukt i dette arbeidet, se kriterier for dette i avsnittet om kvalitetsikring av dataene. De store forskjellene i kalkeeffektivitet og den svært lave beregnede effektiviteten ved Nylandanlegget kan likevel skyldes usikkerheter ved de målingene og de metodene for beregning som er brukt. Usikkerheter kan knyttes til følgende:

- vannføringsmålinger
- kalkvekter og volumer
- kalkkvalitet i forhold til produktdatablad
- målestedenes representativitet
- pH-målinger oppstrøms og nedstrøms, kalibreringsrutiner
- beregningen av Ca-effekt fra målt pH
- bruk av døgnmidler og ikke timesverdier

Alle disse usikkerhetsmomentene er felles for begge anlegg, men kan være mest framtreddende i kun ett. Eventuelle feil i vannføringsmålingene ved Nyland ved høye vannføringer kan påvirke beregningene fordi det er perioder med høy vannføring som er viktigst for beregningen av effekt. Lave vannføringstall kan gi for lav beregnet effekt. Feil i kalkvekter og –volumer er ikke vurdert. Teoretisk sett kan det være mulig å levere en annen kalk (for eksempel mer fortynnet kalkslurry) enn det som framgår av produktdatabladet, men vi må anta at det ikke er jukset med dette.

Målestedene ligger om lag 2 km nedstrøms doseringsanleggene. Begge steder har gode innblandingforhold, men det er mulig målestedene ved Nylandanlegget bør vurderes på nytt for å være på den sikre siden. pH-målinger oppstrøms og nedstrøms kan som vi har erfart være systematisk feil, men som vi har testet, vil slike feil i utgangspunktet ikke gi store utslag her.

Beregningen av Ca er selvsagt usikker, det framgår av spredningen av datapunktene i **Figur 3**, men vi har antatt at datamaterialet skulle gi den samme usikkerheten for begge dosererne i og med at bakgrunnstallene var overlappende og at pH oppstrøms og nedstrøms i de to anleggene ikke var vesentlig forskjellig. Forskjellen i usikkerhet er ikke undersøkt nærmere.

Vi har ikke hatt muligheter for å gå nærmere inn på de ulike momentene enn denne summariske gjennomgangen innenfor rammen av prosjektet. Det vises ellers til avviksrapportene fra driftskontrollen.

Langtidsoppløsning ved Gyslandanlegget for høsten 2005 var sannsynligvis i størrelsesorden 50 tonn på tre måneder. Kalkforbruket var til sammenlikning ca. 100 tonn, og total oppløsning (kalkeffektivitet) for hele denne perioden kan ha vært 85%. Forutsetningen for slike høye tall for kalktyper med en stor andel av forholdsvis grove partikler (50% > 20 µm) er at doseringsanlegget styres etter nedstrøms-pH og at pH måles så langt nedstrøms at en får inn langtidsoppløsningen i det totale regnestykket. En noe rimeligere NK3-kalk vil med dette kunne være konkurransedyktig i forhold til svært finmalt kalk som løses 100%, men dokumentasjonen må bedres om slike tall skal kunne brukes i markedet.

I tillegg til den kalkoppløsningen som kan beregnes på basis av effekten 2 km nedstrøms doserer kommer oppløsning av kalkpartikler som er transportert videre nedover i elva. Ved høy vannføring bør en forvente at en betydelig andel av de kalkpartiklene som er dosert i perioden og partikler som graves opp fra elvebunnen kan føres forbi målestasjonen. Effekten av denne delen er det ikke mulig å anslå med de data som foreligger i driftskontrollen. Data fra pH-stasjonen ved Vegge i Lygna kunne imidlertid vært brukt i et forsøk på å inkludere denne tilleggseffekten.

Langtidsoppløsning vil være en betydelig del av den totale kalkeffekten også for de andre periodene i **Tabell 3** og for resten av året, men det er ikke gjort nærmere beregninger for disse periodene. Siden det ikke foreligger totale kalkeffektberegninger blir det vanskelig å sette opp et totalt regnestykke, men antakelsen til Hindar og Henriksen (1992) om kalkoppløsning på nærmere 100% over lang tid for den kalktypen som er brukt i Lygna er ikke urimelig.

4.3 Anbefalinger

Resultatene i denne rapporten gir grunnlag for å anbefale følgende:

- Kalkeffektiviteten for kalktypen NK3 lå nær forventningen, og en total kalkoppløsning på 85% er beregnet for tre måneder høsten 2005. Det bør imidlertid skaffes bedre dokumentasjon av denne typen før slike tall brukes aktivt i markedet.
- Beregnet kalkeffektivitet for Nylandanlegget var svært lav og langt under forventningen på 100%. Årsaken til det er ikke funnet. Det kan være grunn til å anbefale en tilsvarende gjennomgang for to år til for å se om det har vært en systematisk endring i noen av de faktorer som påvirker beregningene.
- Eksperimentelle forsøk bør gjennomføres nedstrøms både Nyland- og Gyslandanlegget for å få direkte mål på kalkeffekt (pH og økning i oppløst Ca) og på forholdet mellom oppløst kalk og kalkpartikkelinnhold.
- Data fra driftskontrollen har en tilleggsverdi når de brukes slik som her. Det kan imidlertid være grunn til å se på rutiner for løpende datakorleksjon i driftskontrollen for å bedre kvaliteten på lagrede data.
- Det er en stor mangel på kunnskap om kalkoppløsning i elver, spesielt om en ser det i forhold til de om lag 25000 tonn kalk som årlig passerer kalkdoseringsanlegg i norske vassdrag. Systematiske forsøk bør gjennomføres for å endre denne situasjonen.

5. Referanser

- DN 2005. Kalking i vann og vassdrag. Effektkontroll av større prosjekter 2004. Direktoratet for naturforvaltning, Notat 2005-1. 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., Hoell, E., Veidel, A. og Nilsen, A.N. 1989. Kalking av Vikedalselva. Forsøk med styring av kalkdosering etter pH målt nedstrøms kalkdoserer. Kalking av surt vann, rapport 7/89, NIVA-rapport 2292. 39 s.
- Hindar, A. og Lien, L. 1988. Overvåking av Vikedalselva i forbindelse med kalking i 1987. Kalking av surt vann, rapport 1/88, NIVA-rapport 2096. 33 s.
- 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.
- 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.