



# Kalkingens innvirkning på partikkelkonsentrasjonen i Modalselva

Målinger fra 2015 til 2017

*Truls Erik Bønsnes*

16  
2018



R  
A  
P  
P  
O  
R  
T

## Rapport nr 16-2018

# Kalkingens innvirkning på partikkelkonsentrasjonen i Modalselva

**Utgitt av:** Norges vassdrags- og energidirektorat

**Redaktør:** Truls Erik Bønsnes

**Forfattere:** Truls Erik Bønsnes

**Trykk:** NVEs hustrykkeri

**Opplag:** 5

**Forsidefoto:** Modalselva v/Espeneset

**ISBN** 978-82-410-1667-7

**ISSN** 1501-2832

**Sammendrag:** Det ble reiset spørsmål om ikke-løselige deler av Biokalk i Modalselva kunne føre til turbinslitasje. Målinger fra desember 2015 til oktober 2017 viser en maksimumskonsentrasjon på 7 mg/l i perioder uten kalking og 2,1 til 2,5 mg/l i perioder med kalking. Kalkforbruk ved doseringsanlegget ligger mellom 0,04 mg/l som en maksimalverdi ved minste kalkforbruk og 0,1 mg/l ved største. Konklusjonen så langt er at kalkinga ikke øker potensialet for turbinslitasje i elvekraftverkene nedstrøms kalkingsanlegget.

**Emneord:** suspensjonskonsentrasjon, kornfordeling, kalking

Norges vassdrags- og energidirektorat  
Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstua  
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95  
Telefaks: 22 95 90 00  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

Mars 2018

# Innhold

Forord .....	2
Sammendrag .....	3
1 Innledning .....	5
2 Kalkdosering.....	7
3 Måleresultater .....	8
4 Beregning av suspensjons-transport .....	15
5 Teoretiske beregninger av turbinlitasje ved Hellandsfoss kraftverk.....	20
6 Oppsummering .....	25
7 Litteraturliste.....	26

# Forord

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag for Miljøvern- og klimaavdelingen, Fylkesmannen i Hordaland. I tilknytning til etablering av et kalkingsanlegg i Modalselva i Modalen kommune i Hordaland har det blitt reist spørsmål om uløselige deler av kalken vil kunne medføre slitasje på turbinene ved Hellandsfoss og Hellandsfossen kraftverk. Det ble derfor igangsatt et måleprogram for suspenderte partikler i Modalselva for å dokumentere om den uløselige delen av kalken fører til forhøyede konsentrasjoner.

Dette rapporten er skrevet i henhold til Kontrakt FMHO-kalk-2015/4 og 2016/5, (november 2015 og august 2016) og er basert på målinger i perioden november 2015 til oktober 2017. Målingene vil fortsette fram til august 2018 og vil bli rapport når måleprogrammet er avsluttet. Endelig rapport skrives i samband med kontrakt FMHO-kalk-2017/4.

Oslo mars 2018



Sverre Husebye  
seksjonssjef



Truls Erik Bønsnes  
senioringeniør

# Sammendrag

Prosjektet har hatt til hensikt å gi svar på om kalking av Modalselva vil øke potensialet for slitasje på turbiner i elvekraftverk nedstrøms kalkingsanlegget.

I tilknytning til etablering av et kalkingsanlegg i Modalselva i Hordaland ble det reist spørsmål om hvorvidt ikke-løslige deler av Biokalk vil kunne øke mengden av partikler som kan slite på turbiner nedstrøms doseringsanlegget. På bakgrunn av dette ble det igangsatt et måleprogram for suspenderte partikler i Modalselva for å dokumentere om den uløselige delen av kalken fører til forhøyede konsentrasjoner. I november 2015 ble det installert automatisk vannprøvetaker i Hellandsfoss kraftverk. Prøvetakingsfrekvensen ble satt til 1 prøve pr dag.

Det er utført målinger av suspensjonskonsentrasjon i Hellandsfoss kraftverk i perioden november 2015 til april 2017. I løpet av denne perioden har det vært prøvedrift ved doseringsanlegget i to perioder, 9. desember til 21. desember 2015 og 12. april til 10. mai 2016. Første periode med permanent drift var fra 1/12-2016 til 30/6-2017.

De høyeste partikkelkonsentrasjonene ble målt i perioder med flomepisoder i løpet av desember 2015 og januar 2016 uten at doseringsanlegget var i drift.

Maksimumskonsentrasjonen i denne perioden var på 7 mg/l. Den høyeste konsentrasjonen så langt i perioder med kalking er målt i desember 2015 og juni 2017 med en maksimumskonsentrasjoner på 2,1 til 2,5 mg/l.

Fra februar 2016 til oktober 2016 var konsentrasjonene målt i kraftverket svært lave, med en maksimumskonsentrasjon på 0,5 mg/l fra en måling i september. Doseringsanlegget var i drift i perioden 12. april til 10. mai. Maksimumskonsentrasjonen i denne perioden var på 0,4 mg/l og ble målt 19. april. Dette var også den eneste prøven med målbar konsentrasjon i driftsvannet i denne kalkingsperioden. I perioden 1/1 til 30/6-2017 ble det målt konsentrasjoner opp mot 2,5 mg/l. Doseringsanlegget var i drift i hele denne perioden.

Dette viser at det i perioder med lave bakgrunnskonsentrasjoner i vassdraget ikke nødvendigvis er målbare konsentrasjoner i kraftverket selv om doseringsanlegget er i drift.

Konsentrasjonene som er målt i Hellandsfoss kraftverk i 2015 til 2017 er lave, men i perioder langt høyere enn innvirkningen fra den uløste delen av Biokalk.

I situasjoner med svært lave konsentrasjoner i driftsvannet (0,3 mg/l) vil beregnet totalkonsentrasjonen av uløst kalk utgjøre fra, ca 13% til 33% gitt kalkkonsentrasjonen i kraftverket er den samme som ved doseringsanlegget.

Kalkforbruk ved doseringsanlegget ligger mellom 0,04 g/m<sup>3</sup> (0,04 mg/l) som en maksimalverdi ved minste kalkforbruk og 0,10 g/m<sup>3</sup> (0,1 mg/l) ved største.

Kornfordelingsanalyser av driftsvannet viser det er større andel materiale i fraksjonene ( $d > 20 \mu\text{m}$ ) enn det som finnes av disse fraksjonene i den uløste kalken. Også i perioder uten kalking. Målinger viser andeler på inntil 44% i enkeltprøver. Tilsvarende viser kornfordelingen av den syreuløslige kalken andeler på ca 6,5% for de samme fraksjonene.

Konklusjonen så langt er at kalkinga i Modalselva med Biokalk ikke øker potensialet for turbinslitasje i elvekraftverkene nedstrøms kalkingsanlegget.

# 1 Innledning

I tilknytning til etablering av et kalkingsanlegg i Modalselva i Hordaland ble det reist spørsmål om hvorvidt ikke-løselige deler av Biokalk vil kunne øke mengden av partikler som kan slite på turbiner nedstrøms doseringsanlegget. På bakgrunn av dette ble det igangsatt et måleprogram for suspenderte partikler i Modalselva for å dokumentere om den uløselige delen av kalken fører til forhøyede konsentrasjoner.

Av et planlagt forbruk på mellom 700 og 1700 tonn Biokalk i året ved doseringsanlegget, er en syreuløselig rest deklarerert til 3-4% som utgjør fra 28 til 68 tonn. Omlag 80% av dette er kvarts.

Den første delen av måleprogrammet ble utført av BKK i Hellandsfoss kraftverk i perioden 29. juni til 16. juli 2015. Vannprøvene er basert på manuell prøvetaking med 1 l flasker. Det første inntaket som går til det ene av de to kraftverkene nedenfor Hellandsfossen (A) er plassert ca 4 km nedstrøms doseringsanlegget (X), se fig 1.1.

I november 2015 ble det installert en automatisk prøvetaker (ISCO 6712) inne i Hellandsfoss kraftverk. Prøvetakingsfrekvensen ble satt til 1 prøve pr dag. Så langt har det vært en sammenhengende prøvetaking fram til 9. oktober 2016. Etter et kort opphold fortsatte prøvetakingen fra desember 2016 og fram til mai 2017. Det er også lagt opp til prøvetaking mhp kornfordelig (Laser coulter analyse) av suspensjonmaterialet med en frekvens på ca 1 prøve hver måned. Analysene er videre utført ved NVE sediment laboratorium i Oslo. I perioden fra februar til juni 2016 er det også tatt manuelle vannprøver i Modalselva ved Espeneset oppstrøms doseringsanlegget. Det er tidvis også tatt enkelte manuelle stikkprøver ved Espeneset og utløpet av Hellandsfoss kraftverk.

Vannføringene er hentet fra målestasjon 63.5 Øvre Helland, minstevannføringsmålinger ved Almelid nedstrøms inntaket og driftsvannføring i Hellandsfoss kraftverk.

Faktorer som er av betydning for turbinlitasje og teoretiske beregninger av turbinlitasje ved Hellandsfoss kraftverk og Hellandsfossen er tidligere drøftet i «Beregninger av risiko for turbinlitasje fra kalking i Modalselva i Modalen kommune» (Bønsnes, Elster og Bogen 2015).

I det følgende er det også konsentrasjonsmålinger og kornfordelinger av driftsvannet i Hellandsfoss kraftverk fra perioden 2015-2016 inkludert i risikoberegningene.



Fig. 1.1. Inntaket til Hellandsfoss kraftverk (A) og plassering av doseringsanlegget (X). Automatisk vannprøvetaking er foretatt i Hellandsfoss kraftverk (BKK), (B) og manuell prøvetaking oppstrøms doseringsanlegget.

## 2 Kalkdosering

Kalkingsplanen anslo et beregnet forbruk på 700 tonn Biokalk i året ved doseringsanlegget i Modalen. I driftsperioden fra 1.12.2016 til 30.06.2017 ble det reelle kalkforbruker 1700 tonn Biokalk. Dette skyldtes bl.a. av pH-målet ble økt fra 6,2 til 6,3 i deler av perioden.

Av dette vil en syreuløselig rest (silikat) deklarerert til 3-4% utgjøre 28 tonn. Omlag 80% av dette er kvarts.

Dersom kalkforbruket ligg på 1700 tonn som i perioden des. 2016 – juni 2017, blir silikat mengden på 68 tonn i året. Bare en liten del av dette vil nå fram til kraftverkene. Suspensjonskonsentrasjonen av den uløselige resten av Biokalk ved dosering være så lav som 0,04 g/m<sup>3</sup> (dvs. 0,00004 g/l ( $4 \cdot 10^{-5}$  g/l)) som en maksimalverdi ved minste kalkforbruk, 0,10 g/m<sup>3</sup> (dvs. 0,0001 g/l ( $1 \cdot 10^{-4}$  g/l)) ved største.

Noe av dette kan også sedimentere i elveløpet før det når fram til kraftverkene. Det som sedimenterer i elveløpet oppstrøms kraftverket kan imidlertid antas å kunne resuspenderes under flomforhold og deretter føres fram til inntakene. Avstand fra doseringsanlegget til det første inntaket er ca 4 km.

Det er foretatt våtsikting av syreuløselig rest for å bestemme kornfordeling av Biokalk. Med spesiell vekt på midlere og litt grovere partikkelstørrelser som er partikkelstørrelse som kan omfatte skadelig slitemineral i kraftverksturbiner. Det viste seg å være så lite som 936 kg i partikkelområdet 20-45 µm, 368 kg i området 45-63 µm, og 300 kg i området 63-140 µm, alt dette ved bruk av 700 tonn Biokalk årlig. Dette vil svare til respektive 1,471, 0,578 og 0,471 mg/m<sup>3</sup> for de 3 fraksjonsgruppene. Ved bruk av 1700 tonn Biokalk har vi 2273 kg i partikkelområdet 20-45 µm, 894 kg i området 45-63 µm, og 729 kg > 63 µm. Henholdsvis 3,572, 1,404 og 1,144 mg/m<sup>3</sup> for de 3 fraksjonsgruppene.

Om lag 26,4 tonn av de tilførte 28 tonn følgemineral (silikat) vil være finere enn 20 µm ved bruk av 700 tonn Biokalk årlig, og tilsvarende 64,1 av 68 tonn ved 1700 tonn Biokalk.

Den karbonatiske delen av kalken kommer ikke til vurdering som kilde til slitasje, fordi denne løses umiddelbart med 100%. Maks diameter på den ikke løselige delen av Biokalk er oppgitt til å være >63 µm (maks ca 145 µm før dosering), mens ca 94% av dette har d < 20 µm, se tabell 2.1 (Rådgivande Agronomar 2018).

**Tabell 2.1** Totalkonsentrasjon og konsentrasjoner i tre fraksjoner av uløst andel Biokalk etter dosering. Partikkelkonsentrasjonen av materiale d > 20 µm utgjør ca 6% av den totale syreuløslige delen (0,04 mg/l ved minste kalkforbruk, 0,1 mg/l ved største).

Total mg/l	d < 20 µm (mg/l)	20-45 µm (mg/l)	45-63 µm (mg/l)	63-140 µm (mg/l)
0,04	0,0374	0,0015	0,0006	0,0005
0,1	0,0939	0,0036	0,0014	0,0011

### 3 Måleresultater

Resultater fra vannprøvetakingen i Hellandsfoss kraftverk i perioden viser lave konsentrasjoner av minerogent materiale på mellom 0,0 og 7,0 mg/l. se fig. 3.2 - fig. 3.5 og tabell 3.2 og tabell 3.3. De høyeste konsentrasjonene er målt i forbindelse med flomepisoder i løpet av desember 2015 og januar 2016 uten drift i doseringsanlegget. Deretter var det svært lave konsentrasjoner i en lang periode fram til mai 2017. Det ble målt noe høyere konsentrasjoner i forbindelse med vårflommen i perioden mai-juni 2017, men det er fremdeles lave verdier, under 3 mg/l.

Oversikt over perioder med drift ved doseringsanlegget er gitt i fig. 3.1 og tabell 3.1. Høyeste konsentrasjon i 2015 som ble målt samtidig som anlegget var i drift, var på ca 2,1 mg/l (19. desember 2015). I perioden februar til juni 2016 ble det tatt prøver ved Espeneset i Moelva oppstrøms kalkdosereren. Disse viser svært lave konsentrasjoner, se fig 3.4 og tabell 3.3. Resultatene viser heller ikke forhøyede konsentrasjoner ved Hellandsfoss sammenlignet med Espeneset i perioden med kalking (12/4-11/5 -2016). Maksimumskonsentrasjonen som ble målt i kraftverket i denne perioden var på 0,4 mg/l og ble målt 19. april. Dette var også den eneste prøven med målbare konsentrasjoner i denne kalkingsperioden. Fra 1. desember 2016 til 30. juni 2017 var det sammenhengende drift ved doseringsanlegget. De høyeste konsentrasjonene i denne perioden ble målt i mai-juni med et maksimum på ca 2.5 mg/l, se fig 3.5. Med unntak for enkeltprøver viser resultatene lave konsentrasjoner (< 1 mg/l) i perioden juli til oktober 2017.

Manuelle kontrollprøver (18-19 mai 2017) fra utløpet av Hellandsfoss kraftverk og oppstrøms for doseringsanlegget viser lave verdier, begge steder mindre enn 1 mg/l. Kontrollprøvene ble tatt i forbindelse med en flomepisode med vannføringer på over 90 m<sup>3</sup>/s i Modalselva ved Almelid.

Det er også tatt jevnlige prøver for analyse mhp kornfordelingen av suspensjonsmaterialet ved Hellandsfoss kraftverk. Disse er basert på 5 liters vannprøver for å sikre nok materiale til analysen. Dette kan tidvis gi signifikante analyseresultater i perioder da konsentrasjonsanalyse basert på daglige liters prøver ikke viser målbare konsentrasjoner, tabell 3.4.

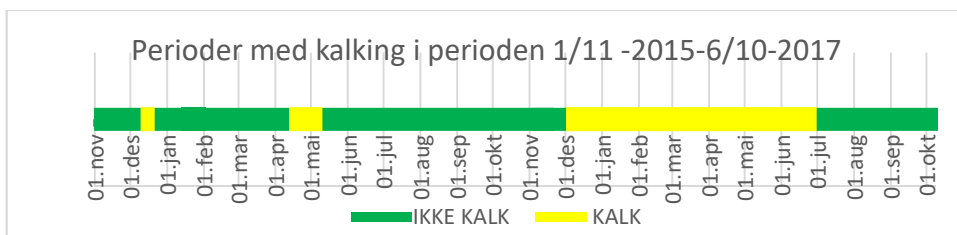


Fig. 3.1 Oversikt over perioder med drift i doseringsanlegget.

Tabell. 3.1 Oversikt over perioder med drift i doseringsanlegget.

Periode	År	Ikke kalk	Kalk
1/11-8/12	2015	X	
9/12-21/12	2015		X
22/12-31/12	2015	X	
1/1-11/4	2016	X	
12/4-10/5	2016		X
10/5-31/11	2016	X	
1/12-31/12	2016		X
1/1-30/6	2017		X
1/7-6/10	2017	X	

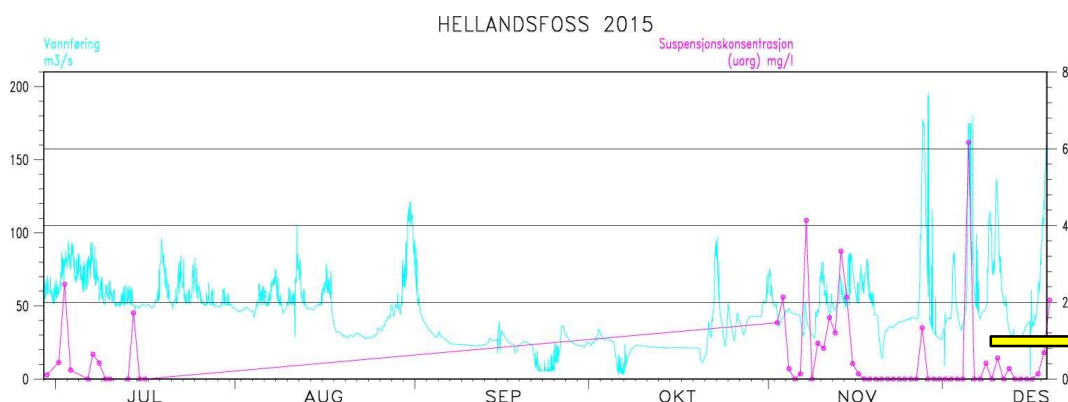


Fig. 3.2 Konsentrasjoner av uorganisk (mg/l) suspensjonsmateriale i driftsvannet i Hellandsfoss kraftverk i perioden 29/6 til 16/7 og 1/11 til 19/12 -2015. Periode med kalking, 9/12-21/12 (gul markør). Vannføring fra Modalselva ved Almelid.

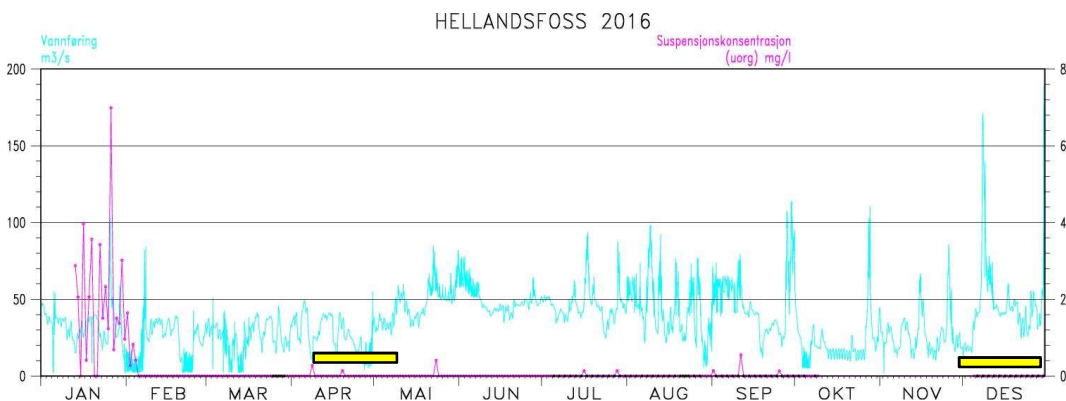
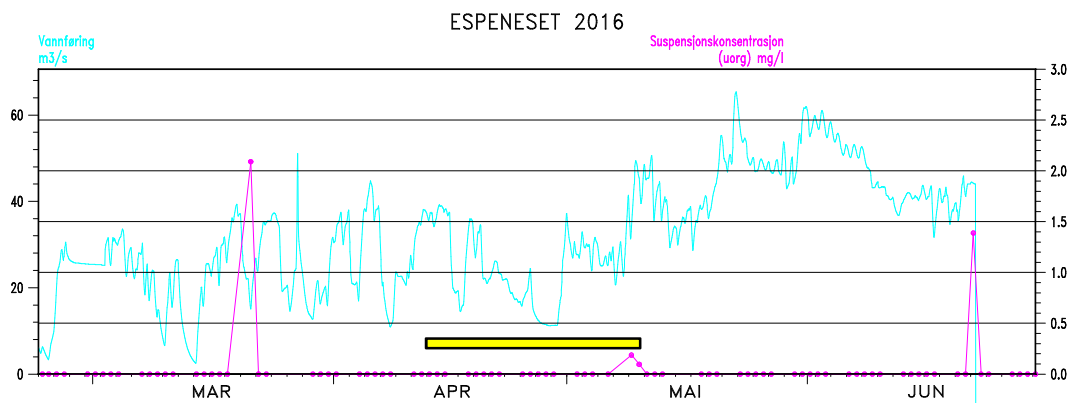
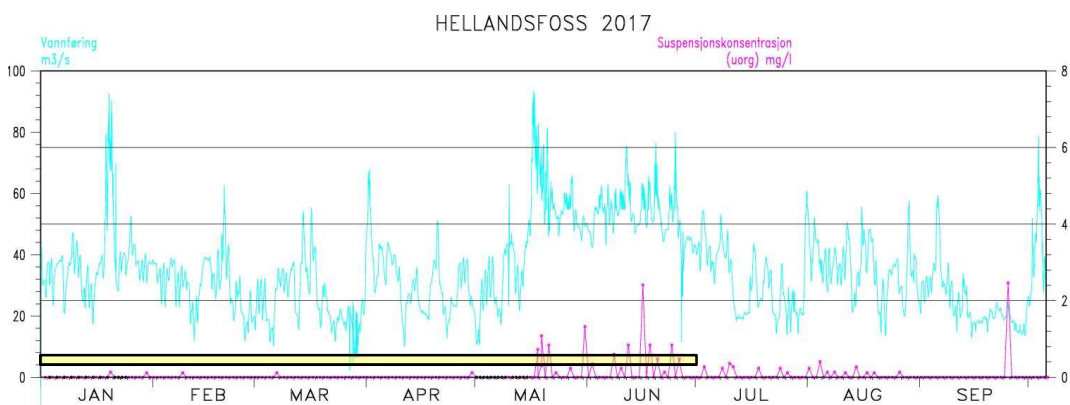


Fig. 3.3 Konsentrasjoner av uorganisk (mg/l) suspensjonsmateriale i driftsvannet i Hellandsfoss kraftverk i perioden 13/1 til 9/10 -2016. Periode med kalking, 12/4-10/5 (gul markør). Vannføring fra Modalselva ved Almelid.



**Fig. 3.4** Konsentrasjoner av uorganisk (mg/l) suspensjonsmateriale ved Espeneset ovf kalkingsanlegget i perioden 23/2 til 30/6 -2016. Periode med kalking, 12/4-10/5 (gul markør). Vannføring fra Modalselva ved Øvre Helland.



**Fig. 3.5** Konsentrasjoner av uorganisk (mg/l) suspensjonsmateriale i driftsvannet i Hellandsfoss kraftverk i perioden 2/1 til 30/4 -2017. Det ble kalket i hele perioden, 1/1-30/6 (gul markør). Vannføring fra Modalselva ved Almelid.

**Tabell 3.2** Månedlige maksimums, middel og minimums konsentrasjoner (mg/l) av suspendert uorganisk materiale i driftsvannet i Hellandsfoss kraftverk i perioden 29/6-2015 til 30/4-2017.

Periode	Uorg (mg/l) maks	Uorg (mg/l) mid	Uorg (mg/l) min
29/6 - 16/7-15	2,5	0,5	0,0
November 2015	4,1	0,7	0,0
Desember 2015	6,2	0,5	0,0
Januar 2016	7,0	2,0	0,0
Februar 2016	1,6	0,1	0,0
Mars 2016	0,0	0,0	0,0
April 2016	0,3	0,0	0,0
Mai 2016	0,4	0,0	0,0
Juni 2016	0,0	0,0	0,0
Juli 2016	0,1	0,0	0,0
August 2016	0,0	0,0	0,0
September 2016	0,5	0,0	0,0
Oktober 2016	0,0	0,0	0,0
Desember 2016	0,0	0,0	0,0
Januar 2017	0,1	0,0	0,0
Februar 2017	0,1	0,0	0,0
Mars 2017	0,1	0,0	0,0
April 2017	0,1	0,0	0,0
Mai 2017	1,3	0,1	0,0
Juni 2017	2,4	0,2	0,0
Juli 2017	0,4	0,1	0,0
August 2017	0,4	0,1	0,0
September 2017	2,5	0,1	0,0
Oktober 2017	0,0	0,0	0,0

**Tabell 3.3** Månedlige maksimums, middel og minimums konsentrasjoner (mg/l) av suspendert uorganisk materiale i Modalselva ovf kalkingsanlegget i perioden 23/2-til 30/6-2016.

Periode	Uorg (mg/l) maks	Uorg (mg/l) mid	Uorg (mg/l) min
Februar 2016	0,0	0,0	0,0
Mars 2016	2,1	0,1	0,0
April 2016	0,0	0,0	0,0
Mai 2016	0,2	0,0	0,0
Juni 2016	1,4	0,1	0,0

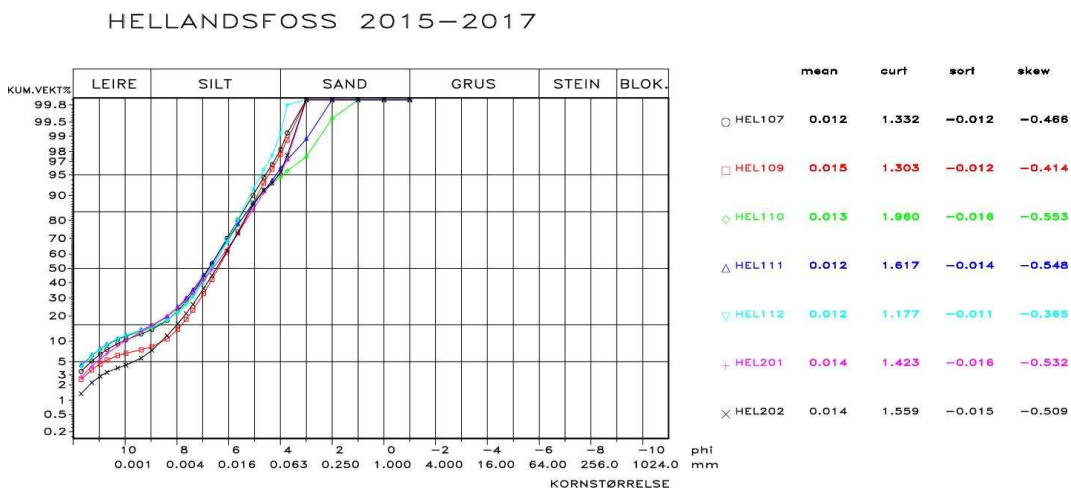
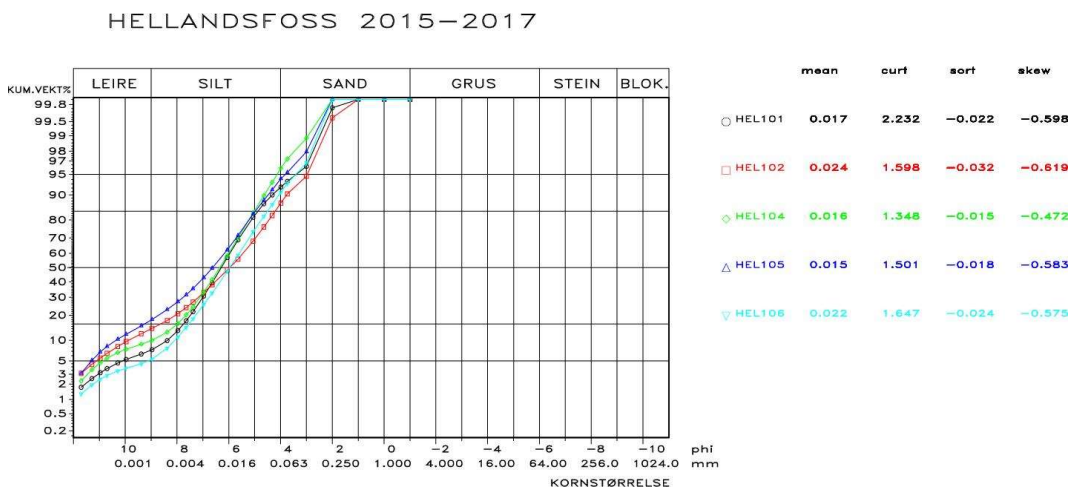


Fig 3.6 Kornfordeling av suspensjonsmaterialet i Hellandsfoss kraftverk i perioden 1/11 2015 til 6/4 2017.

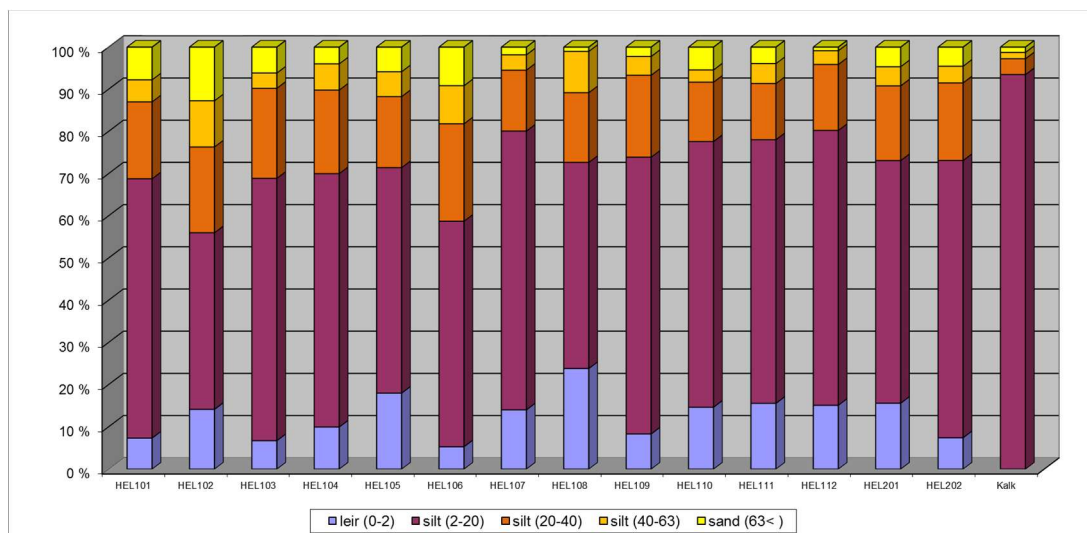


Fig 3.7 Fraksjonsvis framstilling av kornfordelingen i Hellandsfoss kraftverk (fra tabell 3.4) og fraksjonsvis framstilling av uløselig andel materiale fra Biokalk.

**Tabell 3.4** Fordelingen av leir, silt og sand i suspensjonsprøver og målt konsentrasjon (basert på 1 liters prøver) i Hellandsfoss kraftverk i perioden 1/11 2015 til 4/4 2017 og målt konsentrasjon. Kornfordelingsanalyser med laser coulter er basert på 5 liters prøver. (Samtidige 1 ltr prøver har tidvis ikke målbare mengder materiale) Prosentfordelingen av uløst kalk er kalkulert fra tabell 2.1. (Gult felt viser prøver tatt i kalkingsperiode)

ID	Dato	%leir (< 2 µm)	%silt (2-20 µm)	%silt (20-40 µm)	%silt (40-63 µm)	%sand (>63 µm)	Cs (mg/l) målt
HEL101	01.11.2015	7,4	61,4	18,2	5,2	7,8	1,5 ca
HEL102	23.11.2015	14,2	41,9	20,3	10,9	12,7	Na
HEL104	29.02.2016	10,0	60,1	19,8	6,2	4,0	Na
HEL105	24.03.2016	18,0	53,4	16,8	5,9	5,8	Na
HEL106	08.04.2016	5,3	53,4	23,1	9,0	9,2	0,3
HEL107	17.05.2016	14,0	66,1	14,0	3,6	1,8	Na
HEL109	11.07.2016	8,3	65,6	8,3	4,4	2,2	Na
HEL110	24.08.2016	14,7	63,0	14,7	2,9	5,4	Na
HEL111	10.09.2016	15,6	62,5	13,3	4,7	3,9	Na
HEL112	24.10.2016	15,1	65,1	15,6	3,3	0,8	Na
HEL201	18.02.2017	15,6	57,5	17,7	4,5	4,6	Na
HEL202	06.04.2017	7,4	65,7	18,4	3,9	4,5	Na
Uløst kalk	Beregnet v/ dos. Min	93,7		3,7	1,4	1,2	0,04
Uløst kalk	Beregnet v/ dos. Maks	93,9		3,58	1,4	1,14	0,1

**Tabell 3.5** Målte fraksjonsvis konsentrasjoner (mg/l) i Hellandsfoss krv sammenlignet med beregnet konsentrasjon av uløst kalk (ved doseringsanlegget).

ID	Dato	Cs mg/l leir (< 2 µm)	Cs mg/l silt (2- 20 µm)	Cs mg/l silt (20- 40 µm)	Cs mg/l silt (40- 63 µm)	Cs mg/l sand (>63 µm)	Cs mg/l totalt målt
HEL101	01.11.2015	0,1110	0,9210	0,2730	0,0780	0,1170	1,5 ca
HEL106	08.04.2016	0,0159	0,1602	0,0693	0,0270	0,0276	0,3
Uløst kalk	Beregnet v/dos. Min	0,0374		0,0015	0,0006	0,0005	0,04
Uløst kalk	Beregnet v/ dos. Maks	0,0939		0,0036	0,0014	0,0011	0,1

Beregnete konsentrasjoner av den ikke-løselige delen av Biokalk i tre fraksjonsgrupper etter dosering er vist i tabell 2.1 (Rådgivande Agronomar, 2018). Totalkonsentrasjonen av uløst Biokalk er beregnet å ligge mellom 0,04 mg/l og 0,1 mg/l ved dosering.

Kornfordelingsanalyser av driftsvannet ved Hellandsfoss kraftverk er vist i fig 3.6, fig 3.7 og tabell 3.4. Den fraksjonsvise konsentrasjonen er gitt i tabell 3.5. Alle disse resultatene er fra perioder uten drift ved doseringsanlegget med unntak av de to siste måletidspunktene i tabell 3.4. Tabellen viser også en tilnærmet prosentvis fraksjonsinndeling av uløst Biokalk etter dosering.

I situasjoner med svært lave konsentrasjoner i driftsvannet (0,3 mg/l) vil beregnet totalkonsentrasjonen av uløst kalk utgjøre fra, ca 13% til 33% gitt kalkkonsentrasjonen i kraftverket er den samme som ved doseringsanlegget (tabell 3.5).

Kornfordelingsanalyser av driftsvannet viser mer materiale i fraksjonene ( $d > 20 \mu\text{m}$ ) enn kornfordelingen av den uløste kalken. Det gjelder også i perioder uten kalking. Målinger viser andeler på inntil 44% i enkeltprøver, se tabell 3.4 og fig 3.7. Tilsvarende viser kornfordelingen av den syreuløslige kalken andeler på ca 6,5% for de samme fraksjonene.

## 4 Beregning av suspensjons-transport

Det er utført beregninger av suspensjonstransport i Hellandsfoss kraftverk og total transport i Modalselva ved Almelid som ligger ved inntaket til kraftverket. Totaltransporten er beregnet på grunnlag av summen av driftsvannføring og minstevannføring/ overløp ved Almelid med samme konsentrasjon som målt i kraftverket.

Den totale minerogene suspensjonstransporten gjennom kraftverket for måleperiodene i henholdsvis 2015, 2016 og 2017 var på 118,5 tonn, 103 tonn og 1,7 tonn. Ved å legge beregnet totalvannføring (driftsvannføring Hellandsfossen + overløp) til grunn blir den totale suspensjonstransporten i samme perioder på henholdsvis 165,1 tonn, 124 tonn og 2,13 tonn. Dette er forutsatt at konsentrasjonsmålingene i kraftverket er representative for den totale vannføringen. Målingene i 2017 dekker en periode på 4 måneder (1/1 til 30/4), men transporten er mye lavere enn samme periode i 2016. Høyere konsentrasjoner i januar 2016 er hovedårsaken til en noe høyere suspensjonstransport i 2016.

Totalt i periodene 2. november 2015 til 9. oktober 2016 og 1. januar til 6 oktober 2017 ble det målt 281 tonn minerogen suspensjonstransport i driftsvannet i Hellandsfoss kraftverk. Dette utgjør ca 74% av den totale transporten før overløp ved Almelid.

Tabell 4.1 Vannføring og beregnet minerogen og organisk suspensjonstransport ved Hellandsfoss kraftverk 2015, 2016 og 2017. Antall døgn er antall døgn i måleserien og tilhørende antall driftsdøgn i denne perioden.

Mnd	Ant døgn	Driftsdøgn	Avløp		Minerogen Suspensjonstransport			Organisk Suspensjonstransport		
			Total Mill m <sup>3</sup>	Pr. driftsdøgn mill m <sup>3</sup>	Total Tonn	Pr. driftsdøgn Tonn	Kons., mg/l	Total Tonn	Pr. driftsdøgn Tonn	Kons., mg/l
NOV	29	29	98,8	3,4	74,7	2,58	0,76	96,7	3,33	0,98
DES	19	19	66,7	3,5	43,8	2,30	0,66	61,0	3,21	0,91
<b>2015</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>165,4</b>	<b>3,5</b>	<b>118,5</b>	<b>2,47</b>	<b>0,72</b>	<b>157,7</b>	<b>3,28</b>	<b>0,95</b>
JAN	19	19	46,4	2,4	97,2	5,11	2,09	42,5	2,24	0,91
FEB	29	20	43,8	2,1	0	0	0	28,3	1,35	0,65
MAR	31	28	55,0	2,0	0	0	0	36,1	1,29	0,66
APR	30	28	62,1	2,2	0,7	0,02	0,01	35,4	1,26	0,57
MAI	31	31	108,9	3,5	1,7	0,06	0,02	66,0	2,13	0,61
JUN	30	30	113,1	3,8	0	0	0	60,2	2,01	0,53
JUL	31	31	107,6	3,5	1,0	0,032	0,01	82,6	2,66	0,77
AUG	31	30	90,6	2,9	0,0	0	0	69,7	2,25	0,77
SEP	30	30	92,1	3,1	2,3	0,078	0,02	64,0	2,13	0,70
OKT	9	9	11,5	1,3	0,0	0	0	7,8	0,87	0,68
DES	26	26	92,9	3,6	0,0	0	0	30,0	1,15	0,32
<b>2016</b>	<b>271</b>	<b>256</b>	<b>731,1</b>	<b>2,7</b>	<b>102,8</b>	<b>0,36</b>	<b>0,14</b>	<b>522,5</b>	<b>1,85</b>	<b>0,71</b>
JAN	30	30	88,8	3,0	0,9	0,03	0,01	34,4	1,15	0,39
FEB	28	28	67,7	2,4	0,3	0,01	0	21,2	0,76	0,31
MAR	31	31	59,9	1,9	0,3	0,01	0	22,5	0,73	0,38
APR	30	30	72,5	2,4	0,2	0,01	0	26,1	0,87	0,36
MAI	31	31	103,5	3,3	14,6	0,472	0,14	54,9	1,77	0,53
JUN	30	30	120,4	4,0	30,9	1,03	0,26	95,0	3,17	0,79
JUL	31	31	71,3	2,3	4,8	0,154	0,07	47,8	1,54	0,67
AUG	31	31	80,0	2,6	4,5	0,144	0,06	65,6	2,11	0,82
SEP	30	30	48,2	1,6	3,4	0,113	0,07	34,4	1,14	0,71
OKT	6	6	17,0	2,8	0	0	0	14,0	2,33	0,82
<b>2017</b>	<b>278</b>	<b>278</b>	<b>729,3</b>	<b>2,6</b>	<b>59,9</b>	<b>0,22</b>	<b>0,08</b>	<b>417,0</b>	<b>1,50</b>	<b>0,57</b>

Tabell 4.2 Vannføring og beregnet minerogen og organisk suspensjonstransport i Modalselva 2015, 2016 og 2017. Antall døgn er antall døgn i måleserien og tilhørende antall driftsdøgn i denne perioden. Beregningene basert på totalvannføringen ved Hellandsfoss (summen av overløp ved Almelid og driftsvannføring fra Hellandsfoss kraftverk).

Mnd	Ant døgn	Avløp		Minerogen Suspensjonstransport			Organisk Suspensjonstransport		
		Total Mill m <sup>3</sup>	Pr. døgn mill m <sup>3</sup>	Total Tonn	Pr. døgn Tonn	Kons., mg/l	Total Tonn	Pr. døgn Tonn	Kons., mg/l
NOV	29	126,3	4,4	94,1	3,25	0,75	126,6	4,37	1,00
DES	19	102,0	5,4	93,0	4,90	0,91	97,2	5,12	0,95
<b>2015</b>	<b>48</b>	<b>228,3</b>	<b>4,8</b>	<b>187,2</b>	<b>3,90</b>	<b>0,82</b>	<b>223,8</b>	<b>4,66</b>	<b>0,98</b>
JAN	19	52,1	2,7	114,2	6,01	2,19	48,3	2,54	0,93
FEB	29	55,4	1,9	1,8	0,06	0,03	36,7	1,27	0,66
MAR	31	68,1	2,2	0	0	0	44,8	1,45	0,66
APR	30	71,4	2,4	0,8	0,03	0,01	40,5	1,35	0,57
MAI	31	122,6	4,0	2,2	0,07	0,02	75,1	2,42	0,61
JUN	30	126,5	4,2	0	0	0	67,6	2,25	0,53
JUL	31	122,6	4,0	1,2	0,04	0,01	94,1	3,03	0,77
AUG	31	113,8	3,7	0,06	0,002	0,0	85,0	2,74	0,75
SEP	30	120,1	4,00	3,6	0,12	0,03	84,5	2,82	0,70
OKT	9	16,3	1,8	0,00	0,000	0	10,7	1,19	0,66
DES	26	92,9	3,6	0,00	0,000	0	30,0	1,15	0,32
<b>2016</b>	<b>297</b>	<b>961,9</b>	<b>3,2</b>	<b>123,9</b>	<b>0,42</b>	<b>0,13</b>	<b>617,3</b>	<b>2,08</b>	<b>0,64</b>
JAN	30	97,9	3,3	1,2	0,04	0,01	39,7	1,32	0,41
FEB	28	73,0	2,6	0,3	0,012	0	22,9	0,82	0,31
MAR	31	67,1	2,2	0,3	0,01	0	25,1	0,81	0,37
APR	30	80,2	2,7	0,3	0,01	0	28,8	0,96	0,36
MAI	31	120,0	3,9	17,2	0,55	0,14	63,5	2,05	0,53
JUN	30	136,3	4,5	35,9	1,20	0,26	107,1	3,57	0,79
JUL	31	83,1	2,7	5,4	0,17	0,06	55,8	1,80	0,67
AUG	31	94,2	3,0	5,2	0,17	0,06	77,1	2,49	0,82
SEP	30	61,6	2,0	4,5	0,15	0,07	43,9	1,46	0,71
OKT	6	20,3	3,4	0,0	0,00	0,0	16,7	2,79	0,83
<b>2017</b>	<b>278</b>	<b>833,6</b>	<b>3,0</b>	<b>70,3</b>	<b>0,25</b>	<b>0,08</b>	<b>480,5</b>	<b>1,73</b>	<b>0,58</b>

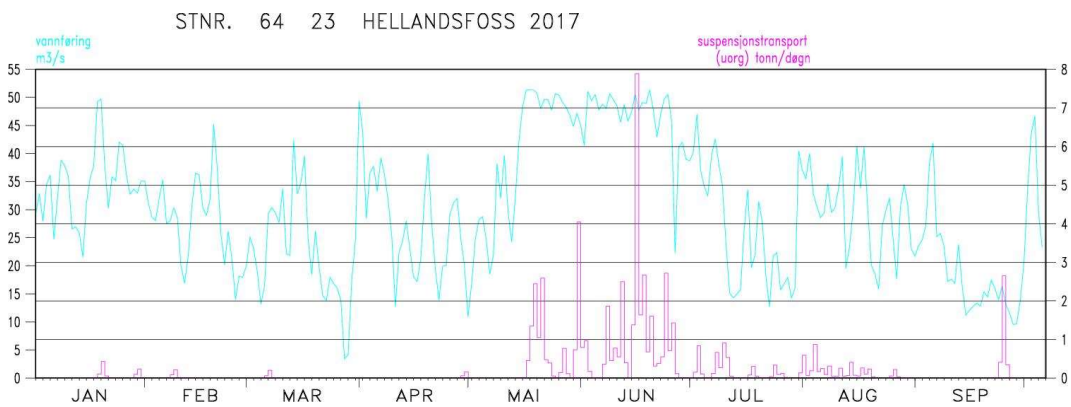
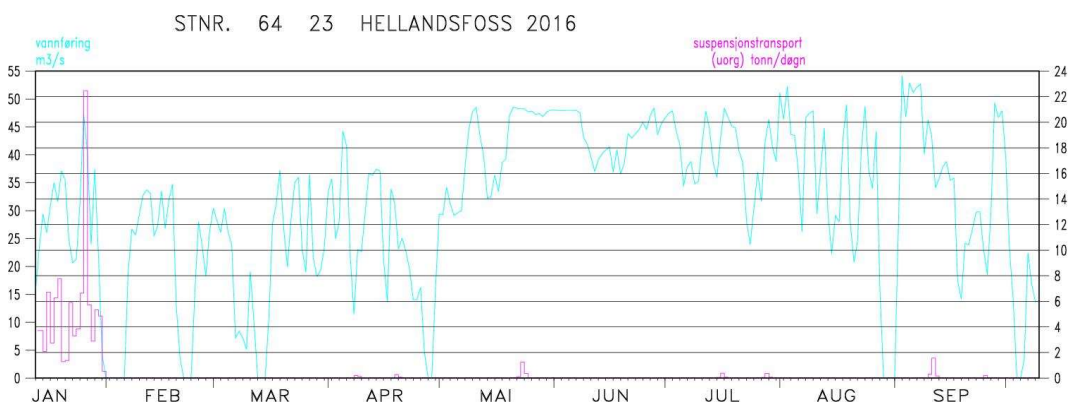
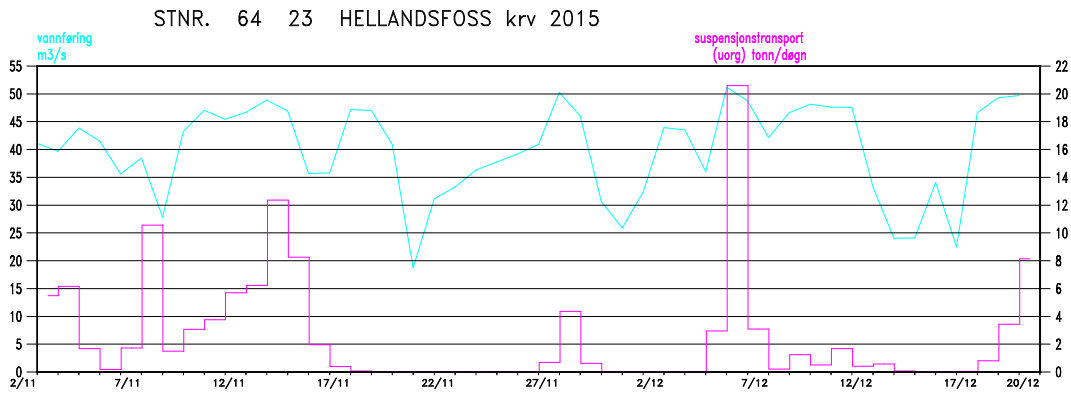
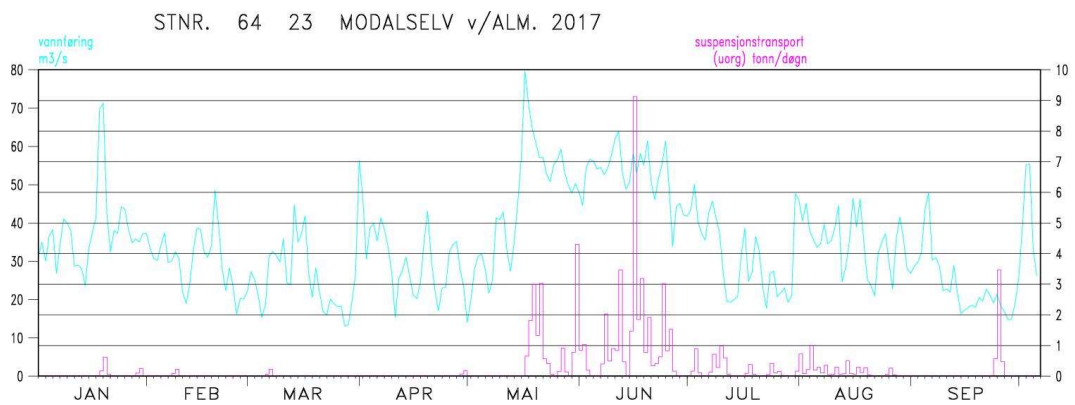
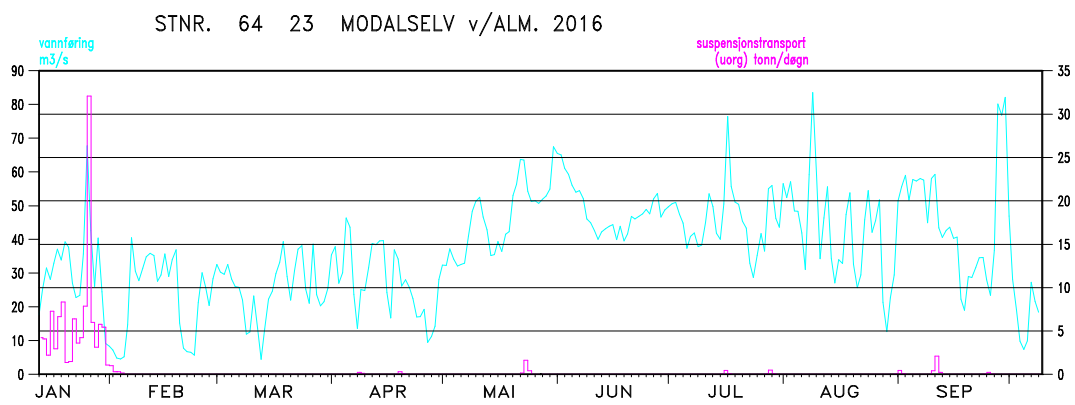
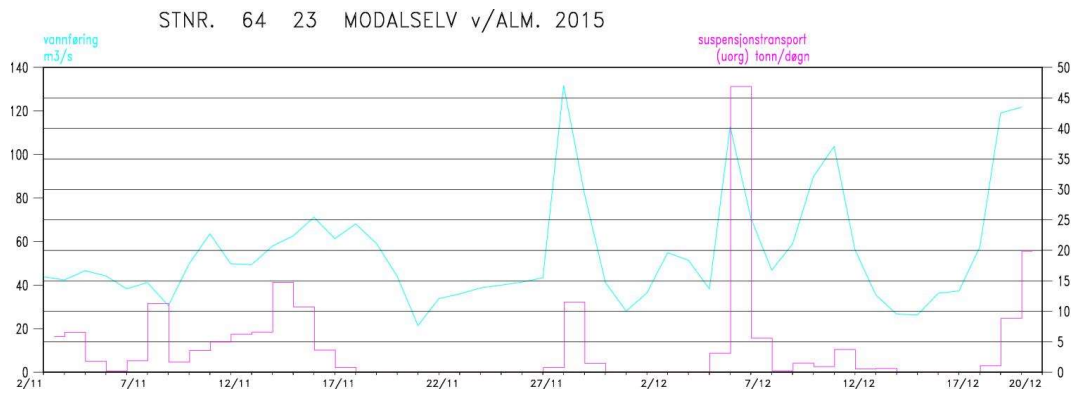


Fig. 4.1abc Minerogen suspensjonstransport ved Hellandsfoss kraftverk 2015, 2016 og 2017.



**Fig. 4.2abc** Minerogen suspensjonstransport Modalselva, total vannføring Hellandsfoss krø + minstevannføring ved Almelid.

# 5 Teoretiske beregninger av turbinslitasje ved Hellandsfoss kraftverk

Det er foretatt beregninger av risiko for turbinslitasje (hydro-abrasive erosion risk) for Hellandsfoss kraftverk som er basert på Zu-yan 1996 og Gummer 2009.

Suspensjonskonsentrasjonen er modifisert etter Nozaki 1990, hvor faktorer knyttet til kornstørrelse ( $a$ ), kornform ( $k_1$ ), hardhet ( $k_2$ ) og turbinmateriale ( $k_3$ ) er tatt i betraktning. I følge Zu-yan 1996 og Gummer 2009 er en enkel tilnærming for slitasje kriterier gitt ved en faktor  $H * C$ , hvor  $H$  er netto fallhøyde til turbin (m) og  $C$  er midlere årlig partikkelkonsentrasjon (g/l) for alle partikler med diameter  $d > 50 \mu\text{m}$ .

Suspensjonskonsentrasjonen er modifisert etter Nozaki 1990, hvor faktorer (tabell 5.1) knyttet til kornstørrelse ( $a$ ), kornform ( $k_1$ ), hardhet ( $k_2$ ) og turbinmateriale ( $k_3$ ) er tatt i betraktning:

$$(1): \quad CE = C * a * k_1 * k_2 * k_3$$

I følge Zu-yan 1996 og Gummer 2009 vil risikoen for turbinslitasje være i henhold til dette:

**$H * CE > 7$ : alvorlig, svært høy risiko**

**$H * CE > 0.7$  og  $< 7$ : moderat risiko**

**$H * CE < 0.7$ : ubetydelig risiko**

Partikkelformen er antatt å være kantete ( $k_1=1$ ) og hardhet etter Mohs skala er satt til  $k_2=1$  for hardhet, dvs Mohs  $> 3$ . (kvarts=7, feltspat=6). Utrekningene er foretatt for turbin installasjoner med rustfritt stål (stainless steel X5 Cr/Ni 13/4)  $k_3=1$ . (se tabell 5.1). Netto fallhøyde ( $H$ ) er satt til 70 m.

Risikoberegningene tar utgangspunkt i konsentrasjonsmålinger og kornfordelinger av driftsvannet som ble foretatt i perioden 2015-2016.

Beregningene er foretatt for materiale med  $d \geq 50 \mu\text{m}$  for fraksjonsgrupper etter det som tidligere er målt i driftsvannet, dvs  $50 \mu\text{m}$ ,  $63 \mu\text{m}$ ,  $125 \mu\text{m}$  og  $250 \mu\text{m}$ , se fig 3.1 og tabell 5.2. Konsentrasjonene som er benyttet i løsningsforslagene er også basert på tidligere målinger og er regnet ut for hver fraksjonsklasse. Det er utarbeidet løsningsforslag for følgende betingelser (se tabell 3.2a-e):

1. Kornfordeling med høyest innhold av partikler i fraksjonen ( $d > 250 \mu\text{m}$ , fra november 2015) og maksimum suspensjonskonsentrasjon ( $7 \text{ mg/l}$ , 26. januar 2016, se fig 3.4).
2. Utarbeidelse av grenseverdier (konsentrasjoner) for moderat og svært høy risiko for turbinslitasje basert på grov kornfordelingskurve (analyse av prøve fra november 2015).

Tabell 5.1 Faktorer til formel (1).

<b>Kornstørrelse (mm)</b>	<b>a</b>
Diameter = 0.05	1
Diameter = >0.05	d/0.05
<b>Kornform</b>	<b>k<sub>1</sub></b>
Rundet	0.75
Kantete	1.00
Ekstremt kantete	1.25
<b>Partikkel Hardhet (Mohs)</b>	<b>k<sub>2</sub></b>
> 3	1
< 3	0.5
<b>Turbin materiale</b>	<b>k<sub>3</sub></b>
X5 Cr/Ni 13/4	1.0
Cast steel	2.3
Bronse	4.0
Stellite	0.3

Tabell 5.2 Fordelingen av «grov» kornfordelingskurve (HEL 102, 23 november 2015 vist i fig 3.5 og 3.6.) for fraksjonene d>50 µm

Kurve	% d, (50-63 µm)	% d, (63-125 µm)	% d, (125-250 µm)	% d, (d>250 µm)
Grov	5,15 %	7,38 %	4,93 %	0,41 %

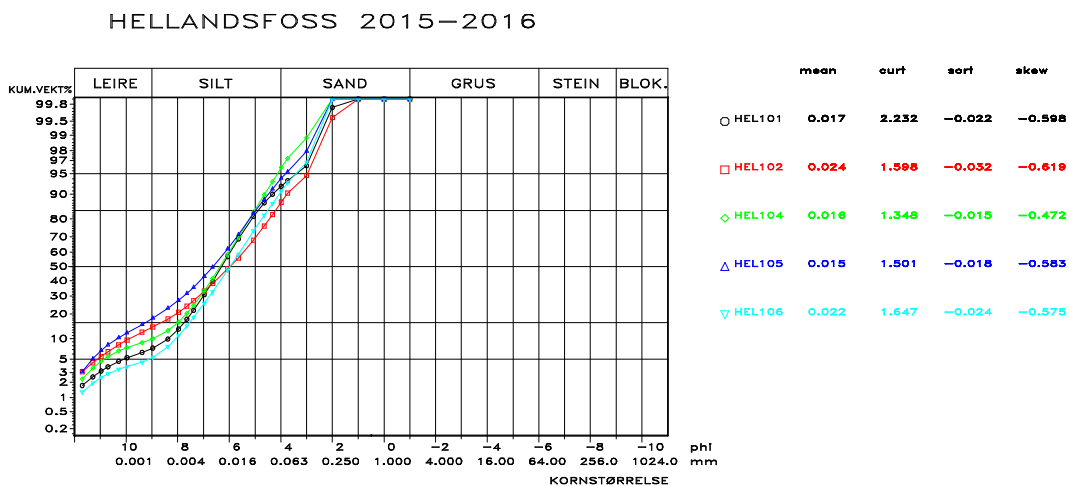


Fig 5.1. Fordelingen av «grov» kornfordelingskurve (HEL 102, 23 november 2015) sammenlignet med et utvalg andre kurver.

**I løsningsforslag (1)** er verdien for faktor knyttet til kornstørrelse (**a**) beregnet for fire fraksjoner, d= 50 µm, d=63 µm, d=125 µm og d=250 µm. C er basert på maksimumskonsentrasjon fra en episode 26. januar 2016. Fraksjonsvis fordeling er basert på kornfordelingsanalyse fra driftsvannet 23/11– 2015, som har høyest innhold av grove partikler, (se HEL102 i tabell 5.2 og fig.5.1).

**I løsningsforslag (2)** er verdien for faktor knyttet til kornstørrelse (**a**) beregnet for fire fraksjoner,  $d=50\ \mu\text{m}$ ,  $d=63\ \mu\text{m}$ ,  $d=125\ \mu\text{m}$  og  $d=250\ \mu\text{m}$ . C er basert på grensekonsentrasjon henholdsvis for moderat risiko (2a) og høy risiko (2b) for slitasje. Fraksjonsvis fordeling er basert på kornfordelingsanalyse fra driftsvannet 23/11– 2015, som har høyest innhold av grove partikler av samtlige prøver

**Tabell 5.3a Løsningsforslag 1: Høyeste målte konsentrasjon (7 mg/l) og «grov» kornfordelingskurve (23/11 - 2015).**

C(g/l) (maks)	C(g/l) % av total	a	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	CE	H	HCE
0,007	0,00036 (5,15%)	1 ( <b>d=50 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00036	70	0,025
0,007	0,00052 (7,38%)	1,26 ( <b>d=63 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00065	70	0,045
0,007	0,00035 (4,93%)	2,5 ( <b>d=125 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00086	70	0,060
0,007	0,000029 (0,41%)	5 ( <b>d=250 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00014	70	0,01

**Tabell 5.3b Løsningsforslag 2a: Grensekonsentrasjon for moderat risiko for slitasje med «grov» kornfordelingskurve (23/11 - 2015). Gul: Fraksjon hvor grensekonsentrasjon først inntreffer.**

C(g/l) (mid)	C(g/l) % av total	a	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	CE	H	HCE
0,194	0,00999 (5,15%)	1 ( <b>d=50 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00999	70	0,699
0,107	0,00790 (7,38%)	1,26 ( <b>d=63 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00995	70	0,696
0,081	0,00399 (4,93%)	2,5 ( <b>d=125 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,00998	70	0,696
0,488	0,00200 (0,43%)	5 ( <b>d=250 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,01000	70	0,700

**Tabell 5.3c Løsningsforslag 2b: Grensekonsentrasjon for høy risiko for slitasje med «grov» kornfordelingskurve (23/11 - 2015). Oransje: Fraksjon hvor grensekonsentrasjon først inntreffer.**

C(g/l) (mid)	C(g/l) % av total	a	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	CE	H	HCE
1,943	0,10006 (5,15%)	1 ( <b>d=50 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,10006	70	7,00
1,075	0,0793 (7,38%)	1,26 ( <b>d=63 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,09996	70	7,00
0,811	0,03998 (4,93%)	2,5 ( <b>d=125 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,099996	70	7,00
4,88	0,02001 (0,43%)	5 ( <b>d=250 <math>\mu\text{m}</math></b> )	1	1	1	0,10004	70	7,00

I tabell 5.3a er beregningene utført med høyeste partikkelkonsentrasjon som er målt i 2016 (7 mg/l, januar 2016) og med en kornfordeling med høyest innhold av grove partikler som forekommer i 2015, se fig 5.1. Disse beregningene viser at faktoren H\*CE ligger langt under faktor 0,7 som representerer moderat risiko for slitasje. Dette gir ingen risiko for slitasje innenfor noen av fraksjonene.

I tabell 5.3b er beregningene utført med konsentrasjoner som gir en H\*CE faktor på 0,7 (moderat risiko) gitt at kornfordelingen er en med høyest innhold av grove partikler som forekommer i 2015, se fig 5.1. Denne grenseverdien vil oppnås med en konsentrasjon på ca 81 mg/l i driftsvannet, gult felt i tabell 5.3b.

I tabell 5.2b er beregningene utført med konsentrasjoner som gir en H\*CE faktor på 7 (svært høy risiko) gitt at kornfordelingen er en med høyest innhold av grove partikler som forekommer i 2015, se fig 5.1. Denne grenseverdien vil oppnås med en konsentrasjon på ca 811 mg/l i driftsvannet, oransje felt i tabell 5.3c.

En oppsummering av disse grenseverdiene er gitt i tabell 5.4 som viser hvilken konsentrasjon som må forekomme i driftsvannet for at det skal være henholdsvis moderat og høy risiko for slitasje. Den laveste konsentrasjonen som vil representere en fare for slitasje, er gjengitt med henholdsvis gul og oransje farge. Dette gjelder hvis kornfordelingen på partiklene i driftsvannet følger den kurven med høyest innhold av grovt materiale som i november 2015. Materiale i fraksjonen 125-250 µm med i middel 4,93 % av suspensjonsmaterialet er derfor den gruppen som representerer størst risiko, dvs risiko for slitasje inntreffer først, med lavest konsentrasjon.

**Tabell 5.4** Beregnede konsentrasjoner (mg/l) for høy og moderat risiko (grenseverdier) basert på «grov» kornfordelingskurve (november 2015, se fig 5.1). Gul og oransje: Fraksjon hvor grenseghonsentrasjon først inntreffer.

<b>H*CE=7</b>	<b>50 µm (5,15%)</b>	<b>63µm (7,38%)</b>	<b>125 µm (4,93%)</b>	<b>250 µm (0,41%)</b>
<b>Høy risiko</b>				
Total Cs i driftsvannet	1943 mg/l	1075 mg/l	811 mg/l	4880 mg/l
<b>H*CE=0,7</b>	<b>50 µm (5,15%)</b>	<b>63µm (7,38%)</b>	<b>125 µm (4,93%)</b>	<b>250 µm (0,41%)</b>
<b>Moderat risiko</b>				
Total Cs i driftsvannet	194 mg/l	107 mg/l	81 mg/l	488 mg/l

Målinger av suspensjonskonsentrasjonen i kraftverket i perioden 2015 - 2017 viser at episoder med verdier som overstiger 4 mg/l, inntreffer svært sjelden. I perioden mellom november 2015 og januar 2016 forekom dette bare ved fire episoder. I resten av perioden var konsentrasjonen svært mye lavere. Disse episodene har svært kort varighet, vanligvis under et døgn.

Konsentrasjonene som er målt i Hellandsfoss kraftverk i 2015 til 2017, er lave, men i perioder langt høyere enn innvirkningen fra den uløste delen av Biokalk.

Kornfordelingsanalyser av driftsvannet viser også mer materiale i sand og de groveste silt fraksjonene ( $d > 40 \mu\text{m}$ ) enn kornfordelingen av den uløste kalken. Det gjelder også i perioder uten kalking.

Teoretiske beregninger av slitasje viser at målte maksimums konsentrasjoner (7 mg/l) i kraftverket er svært mye lavere enn det som kan føre til moderat slitasje. Det er først ved en minerogen totalkonsentrasjon på 81 mg/l at dette kan inntreffe, gitt at kornfordelingen er som målt 23. november i 2015.

I beregningene er partikkelformen antatt å være kantete ( $k_1=1$ ) og hardhet etter Mohs skala er satt til  $k_2=1$  for hardhet, dvs Mohs  $> 3$ . (kvarts=7, feltspat=6). Utregningene er foretatt for turbininstallasjoner med rustfritt stål (stainless steel X5 Cr/Ni 13/4)  $k_3=1$ . Netto fallhøyde (H) er satt til 70 m.

## 6 Oppsummering

Det er utført målinger av suspensjonskonsentrasjon i Hellandfoss kraftverk i perioden november 2015 til april 2017. I løpet av denne perioden har det vært prøvedrift ved doseringsanlegget i to perioder, 9. desember til 21. desember 2015 og 12. april til 10. mai 2016. Første periode med permanent drift var fra 1/12 2016 til 30/6 2017.

De høyeste partikkelkonsentrasjonene ble målt i perioder med flomepisoder i løpet av desember 2015 og januar 2016 uten at doseringsanlegget var i drift.

Maksimumskonsentrasjonen i denne perioden var på 7 mg/l. Høyeste konsentrasjon i 2015 som ble målt samtidig som anlegget var i drift, var på ca 2,1 mg/l (19. desember 2015).

Fra februar 2016 til oktober 2016 var konsentrasjonene i kraftverket svært lave, med en maksimumskonsentrasjon på 0,5 mg/l fra en måling i september. Doseringsanlegget var i drift i perioden 12. april til 10. mai. Maksimumskonsentrasjonen i denne perioden var på 0,4 mg/l og ble målt 19. april. Dette var også den eneste prøven med målbar konsentrasjon i driftsvannet i denne kalkingsperioden. I perioden 1/1 til 30/6 2017 var konsentrasjonene i kraftverket lave. Resultatene viser en økning mot slutten av perioden, med konsentrasjoner opp mot 2,5 mg/l. Doseringsanlegget var i drift i hele denne perioden. Med unntak for enkeltprøver viser resultatene lave konsentrasjoner (< 1 mg/l) i perioden juli til oktober 2017.

Dette viser at det i perioder med lave bakgrunnskonsentrasjoner i vassdraget ikke nødvendigvis er målbare konsentrasjoner i kraftverket selv om doseringsanlegget er i drift.

Konsentrasjonene som er målt i Hellandsfoss kraftverk i 2015 til 2017, er lave, men kan tidvis være langt høyere enn innvirkningen fra den uløste delen av Biokalk.

I situasjoner med svært lave konsentrasjoner i driftsvannet (0,3 mg/l) vil beregnet totalkonsentrasjonen av uløst kalk utgjøre fra, ca 13% til 33% gitt kalkkonsentrasjonen i kraftverket er den samme som ved doseringsanlegget.

Kalkforbruk ved doseringsanlegget ligger mellom 0,04 g/m<sup>3</sup> (0,04 mg/l) som en maksimalverdi ved minste kalkforbruk og 0,10 g/m<sup>3</sup> (0,1 mg/l) ved største.

Kornfordelingsanalyser av driftsvannet viser det er større andel materiale i fraksjonene (d>20 µm) enn det som finnes av disse fraksjonene i den uløste kalken. Også i perioder uten kalking. Målinger viser andeler på inntil 44% i enkeltprøver. Tilsvarende viser kornfordelingen av den syreuløslige kalken andeler på ca 6,5% for de samme fraksjonene.

Konklusjonen så langt er at kalkinga i Modalselva med Biokalk ikke øker potensialet for turbinslitasje i elvekraftverkene nedstrøms kalkingsanlegget.

## 7 Litteraturliste

Bønsnes, T. E., Elster, M. C., Bogen, J., 2015. Beregninger av risiko for turbin slitasje fra kalking i Modalselva i Modalen kommune. *NVE Oppdragsrapport B 16-2015*.

Gummer, J. H., 2009: Combating Silt Erosion in Hydraulic Turbines. *HRW-Hydro Review Worldwide 03/01/2009, Volum 17. Issue 1*.

Nozaki, T., 1990: Technical Report: Estimation of Repair Cycle of Turbine Due To Abrasion Caused By Suspended Sediment and Determination of Desilting Basin Capacity. *Japan International Cooperation Agency 1990*.

Rådgivande Agronomar, 2018: Transport av partiklar i Modalselva som følge av kalkingsprosjektet med flytande Biokalk. *Oppdragsgivar: Fylkesmannen i Hordaland, Miljøvern avdelinga*.

Vassdragsregulantenenes forening, 1984: Sandslitasje på kraftturbiner. *Komiteen for undersøkelse av sandslitasje på turbiner. 73s*

Zu-Yan, M., 1996: Review of Research on Abrasion and Cavitation of Silt Laden Flows through Hydraulic Turbines in China. *18<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation. International Association of Hydraulic Engineering and Research, Valencia, Spain, 1996*.



Norges  
vassdrags- og  
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29  
Postboks 5091 Majorstuen  
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95  
Internett: [www.nve.no](http://www.nve.no)

