

FUNKSJON TIL COANDAINNTAKSRISTER

ERFARING FRA DYRKORN KRAFTVERK

Henrik Opaker

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Hanne Nøvik, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGAVE Vår 2012

Student: Henrik Opaker

Tittel: FUNKSJON TIL COANDAINNTAKSRISTER –
ERFARING FRA DYRKORN KRAFTVERK

Title: PERFORMANCE OF COANDA INTAKE SCREEN –
EXPERIENCES FROM DYRKORN HYDRO POWER PLANT

1 INNLEDNING

Et velfungerende inntak til et vannkraftverk er en forutsetning for vellykka drift. Hovedutfordringene med å skape gode inntaksløsninger med grunne inntak går på drivgods, løv, is (sarr og isgang), luftmedrivning, sedimenter og hydrauliske forhold generelt. I tillegg skal ofte fisk kunne passere opp og/eller ned. Det er svært utfordrende å løse alle utfordringene i et inntak med lite dyp og kraftig innstrømning. En utforming tilpasset forholdene på stedet er derfor svært viktig. Det finnes svært mange ulike inntaksprinsipp som benyttes per i dag, noen gode og noen mindre gode. Både private initiativ og større aktører kommer med nye løsninger til utprøving. NTNU Vassdragslaboratoriet ønsker å kunne hjelpe til med videreutvikling, verifisering og innovasjon innenfor dette fagområdet.

2 BAKGRUNN

Tafjord Kraft AS bygget ferdig småkraftverket Dyrkorn våren 2011. Det er installert en såkalt Coanda-rist på inntaket, og Dyrkorn kraftverk er dermed det første kraftverket i Norge og Norden som benytter seg av konseptet. Rista er selvreisende slik at både fisk og drivgods skal passere over, mens rent vann renner inn i de smale åpningene mellom de tverrsgående riststavene og ned i en samlekanal. Inntaksristen har vist seg å være svært velfungerende i prototyper i andre land og i modellforsøk, og den skal ha en kapasitet på 140 l/s/meter rist. Siden dette er første gang konseptet testes ut her i landet, er det interessant å kunne dokumentere funksjon og kapasiteten av inntaksgrinden. Spesielt er det interessant å følge med på hvordan det går gjennom vinteren med tanke på gjenfrysning av rister og is- og sarrproduksjon.

Funksjonen til inntakskonseptet er ønsket dokumentert. Det er installert et web-kamera som kontinuerlig overvåker inntaksristen. Som en del av prosjektoppgaven til Henrik Opaker høsten 2011, ble det også installert termometer og trykksensorer i inntaket.

3 PROBLEMSTILLING

Funksjonen av Coanda-inntaksristen på Dyrkorn kraftverk skal dokumenteres med bilder, all tilgjengelig data og kapasitetskurver, alt relatert til vær- og strømningsforhold ved inntaket. Det skal vurderes om kapasiteten endrer seg med forholdene utover vinteren og våren 2012, og de fysiske forholdene og fenomen som oppstår i inntaket for ulike situasjoner skal forklares. En nøyaktig vannføringskurve over rista skal fastsettes, både for ren og tilstoppet grind. For å utarbeide en pålitelig kapasitetskurve, skal det etableres en vannføringskurve for elva oppstrøms inntaksdammen, relatert til vannstanden i inntaksmagasinet, en kurve for produksjon/vannføring (P-Q-kurve) gjennom turbinene og målinger av minstevannsføring.

Gjenfrysningshendelser skal dokumenteres. Isutviklingen på inntaksristen og i inntakskammeret skal beskrives og forklares. Det skal blant annet registreres profiler gjennom isen ulike steder på rista. Dersom det er mulig å være ved inntaket når sarrproduksjon oppstår, skal det søkes å finne en metode for å skrape av og veie opp sarret som fester seg til rista, med hensikt å finne ut hvor mye sarr som produseres og fanges opp på rista ved visse temperaturer.

Alle relevante forhold for drift av inntaket skal dokumenteres. Blant annet skal svingninger i reguleringskammeret som følge av et relativt lite reguleringsvolum måles, og eventuell luftmedrivning og sedimenttransport i og gjennom inntaksmagasinet og inntaket skal vurderes.

For å få inntaket til å fungere under lengre kuldeperioder, ønsker Tafjord Kraft AS å teste ut ulike modifikasjoner av inntaket. De ulike løsningene kan testes, vurderes og dokumenteres dersom det viser seg tjenlig.

4 MÅL

Masteroppgaven skal med bilder og analyserte måledata dokumentere driften av inntaket til Dyrkorn kraftverk under ulike situasjoner. Arbeidet skal konkludere med kapasitetskurver og en vurdering av egnethet for bruk av Coanda-inntak i kaldt klima og i underkjølt vann. De fysiske forhold som oppstår i inntaket skal forklares. Dokumentasjonen og måleseriene skal være av en slik kvalitet at de er egnet for publisering i tidsskrift.

5 KONTAKTPERSONER

NTNU	Leif Lia, professor (formell veileder)
	Hanne Nøvik, stipendiat (medveileder)
Tafjord Kraft AS	Per Kåre Skudal
	Perry Åse
	Arnfinn Vike

Diskusjon med og bidrag fra kollegaer og medarbeidere ved NTNU, SINTEF, Tafjord Kraft AS og eventuelt andre kraftselskap er anbefalt. Bidrag som inngår i oppgava skal alltid refereres til på rett vis.

6 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING

Oppgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto etc. skal være av god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, en innholdsliste, liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser. Oppgaven skal leveres i A4 format som pdf i DAIM og trykkes i tre eksempler som leveres faglærer/institutt.

Sammendraget skal ikke overskride 450 ord og skal være egnet for elektronisk rapportering.

Masteroppgaven skal ikke leveres senere enn mandag 11. juni 2012.

Sammendrag

Hovedmålet med oppgaven er å dokumentere egnetheten til coandainntak i kaldt klima, og å studere og forklare tilfrysningsprosessen som skjer. Coandainntak er en type selvrensende overfallsinntak, hvor åpningen mellom grindstavene er typisk en millimeter. Usikkerhet knyttet til inntakstypen er i forhold til tilfrysning. Oppgaven følger den første vinteren til et coandainntak på Dyrkorn Kraftverk. Observasjoner og kontinuerlige temperaturmålinger fra inntaket i vinter viser tydelig at tilfrysning skyldes flere ulike prosesser. Temperaturmålinger av stålet i coandarista viser at rista kan bli underkjølt, og slik bidra til gjenfrysning.

Vanntemperaturen har ved andre gjenfrysninger vært underkjølt, noe som tyder på sarrproduksjon. Sarr har også blitt observert ved inntaket under tilfrysning. Gjenfrysning grunnet snøfall på åpent inntaksmagasin og elv forekom også. Ved gjenfrysning fester ispartikler seg til den fine inntaksrista, og is bygger seg opp i tykkelse opp til 0,3 meter. Ut fra observasjoner i felt, og laboratorieforsøk, virker det som at isen kun legger seg på utsiden av rista. Meget små ispartikler kan legge seg mellom stavene til rista, men det vil ikke dannes et islag på baksiden av rista tilsvarende det på framsida. I løpet av månedene november til mars var det tre fullstendige tilfrysninger hvor Dyrkorn Kraftverk måtte stanse i opptil 40 timer. Totalt var produksjonstap ved de tre tilfellene ca. 73 MWh, hvilket utgjør ca. 2 % av kraftproduksjon i perioden. Senere, i begynnelsen av april, var det flere mindre tilfrysninger. Felles for alle tilfrysningene er at ingenting ble gjort for å åpne opp inntaket. Ved alle tilfellene var det vannet selv som åpnet opp inntaket ved å lage et fritt innløp under islaget på rista. Når en slik iskappe med fritt innløp av vann først var etablert, viste målinger at lufttemperaturer som tilsa tilfrysning ikke fikk betydning. Gjenåpningsprosessen av inntaket skyldes en kombinasjon av varmeutveksling og mekaniske krefter. Sistnevnte har vært dominerende ved de observerte gjenåpningene. For å minske problemet med tilfrysning er det sett på ulike tiltak som innsnevring av overløp, tildekking av rist og bypass-ventil. Tiltakene er i liten grad utprøvd og usikkerheten er dermed stor. Driften av Dyrkorn Kraftverk har generelt fungert bra i vinter, og det er ikke brukt resurser verken til drift eller vedlikehold av inntaket. Ut fra observasjoner og målinger i vinter virker det som coandainntak fungerer under norske vinterforhold. Beliggenheten til Dyrkorn Kraftverk, rett ved Storfjorden på Sunnmøre, gir mange fryseprosesser. Et mer stabilt innlandsklima vil sannsynligvis gi færre problemer med tilfrysning.

Abstract

This thesis documents the function of a coanda screen intake at Dyrkorn during a Norwegian winter. A coanda screen intake consists of fine wedge wires with opening between wires typically equal to one millimeter. Questions concerning the intakes ability to handle ice and freezing have been raised. Observations and continuous measurements of temperature at Dyrkorn show that the freezing of the screen is caused by several different processes. Temperature measurements of the steel in the screen revealed that the screen itself can become supercooled, and thereby contribute to the freezing. At other freezing events the water itself has been supercooled, which could imply presence of frazil ice. Frazil ice has also been observed at the intake during blocking of the intake by ice. Freezing of the screen due to snowfall on open intake pound also occurred. When freezing small ice particles stick to the steel of the screen, and ice builds up in thickness up to 0,3 meter. From observations in the field, and from tests in the laboratory, it seems as the ice only builds up on the outside of the screen. Small ice particles could get in between the wedge wires, but they will not make a continuous sheet of ice on the back of the screen, as observed on the front. During the months November to March there were three complete freezing events where the power production stopped in up to 40 hours. In total the production loss at those three events were about 73 MWh, which make up around 2 % of the production these months. Later in April there were several minor freezing events. At every freezing of the intake nothing was done to open the intake. Every time the water itself opened the intake by making a passage under ice on the screen. Once such a passage was made weather conditions which indicated that freezing should occur had no impact. The opening of the intake by water itself seems to be caused by a combination of heat exchange and mechanical forces acting on the ice. The later has been the dominating force at the observed reopenings. Measures to mitigate the problem caused by freezing have been looked into, but they have in little degree been tested. The intake has in general performed well during the winter, and there have not been spent resources on maintenance of the intake. From the observations and the measurements this winter it seems that coanda screen intakes perform well during Norwegian winter conditions.

Forord

Masteroppgaven markerer avslutningen på et 5 års langt studie innenfor Bygg- og Miljøteknikk, med fordypning Vassdragsteknikk. Arbeidet med oppgaven har vært krevende, men interessant.

Underveis har jeg fått hjelp av flere personer som må nevnes. Jeg har fått mye hjelp av mine to veiledere, doktorgradsstudent Hanne Nøvik og professor Leif Lia. Oppgaven har innebært et samarbeid med Tafjord Kraft AS som fortjener takk for all hjelp jeg har fått. Spesielt gjelder det Per Kåre Skudal, planingeniør og Perry Aase, hydrolog. Jeg har også fått mye hjelp til installering av måleutstyr av Arnfinn Vike, svakstrømsingeniør i Tafjord Kraft.

Brødrene Dahl AS har vært villige til å låne meg sin coandamodell slik at jeg kunne gjennomføre modellforsøk, og fortjener derfor takk. Det gjelder spesielt Bjarte Skår.

Trondheim, 7. juni 2012

Henrik Opaker

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	v
Abstract.....	vi
Forord.....	vii
1. Innledning	1
2. Bakgrunn	2
2.1 Coandainntak	2
2.2 Dyrkorn Kraftverk.....	3
3. Teori	5
3.1 Tilfrysingsprosesser.....	5
3.2 Sarr	6
3.3 Snøfall	9
3.4 Overflateis.....	10
3.5 Oppbrytning av isdekke	10
3.6 Isrelaterte utfordringer for kraftverk.....	11
3.7 Tilfrysning av coandainntak	12
4. Metode.....	13
4.1 Temperaturmålere Vemco Minilog-II	13
4.2 Temperaturmåler SBE 39	14
4.3 Temperaturmåler Comark EV N2012.....	15
4.4 Kamera AXIS 214 PTZ	16
4.5 Trykksensor WL 16.....	16
4.6 Plassering måleutstyr	17
4.7 Måleprosedyre sarmengde og isprofiler	17
4.8 Vannføringskurve.....	18
4.9 Sedimenter.....	19
4.10 Luftmedrivning.....	19
4.11 Forsøk i laboratorium.....	19
5. Resultater vinteren 2011/12.....	22
5.1 Værforhold vinteren 2011/12.....	22
5.2 Tilfrysningstilfeller.....	23
5.2.1 Første islegging-17. november.....	23
5.2.2 Første fullstendige tilfrysning-7.desember	26

5.2.3. Tilfrysning 20. desember.....	30
5.2.4 Tilfrysning 5. januar.....	33
5.2.5 Tilfrysning 20. januar.....	35
5.2.6 Tilfrysning april.....	40
5.2.7 Total nedetid vinteren 2011/12.....	42
5.2.8 Kuldeperioder uten tilfrysninger.....	43
5.3 Målinger av sammengde og isprofiler.....	44
5.4 Gjenåpningsprosess	44
5.5 Laboratorieforsøk	46
5.5.1 Romtemperatur -5 °C.....	46
5.5.2 Romtemperatur -7 °C.....	48
5.5.3 Romtemperatur -10 °C.....	49
5.5.4 Romtemperatur -15 °C.....	50
5.5.5 Oppsummering av forsøk.....	52
5.6 Luftmedrivning.....	53
5.7 Svingninger i reguleringskammer	53
5.8 Sedimenttransport.....	54
5.9 Vannføringskurve.....	56
6. Diskusjon	59
6.1 Tilfrysning.....	59
6.2 Laboratorieforsøk	62
6.3 Gjenåpning.....	62
6.4 Luftmedrivning, svingninger og sedimenter	63
7. Endringer for å forbedre funksjonen til coandaintak i kaldt klima.....	64
7.1 Tildekking av coandarist.....	64
7.2 Bypass	64
7.3 Innsnevring.....	64
7.4 Inntak av vann fra større dybde.....	64
7.5 Inntaksdam og reguleringskammer	65
8. Konklusjon og videre arbeid	66
9. Litteraturliste	67
10. Figur- og tabelliste	70
11. Vedlegg	72

1. Innledning

Coandainntak er en type selvrensende overfallsinntak med svært fine grindstaver.

Lysåpningen mellom stavene, som er orientert ortogonalt på strømrretningen, er typisk på en millimeter. Inntaket benytter coandaeffekten, at strømmende væsker og gasser vil følge faste overflater. Coandainntak har vært i bruk i deler av Europa og Nord-Amerika i opptil 20 år, med gode resultater. Det er et inntak som potensielt kan redusere flere problemer, slik som drivgods og miljøpåvikning, for småkraftverk. Løsning av slike problemer for småkraftinntak er etterspurt for tiden, i og med at det er mye aktivitet i forbindelse med planlegging og bygging av småkraft i Norge.

I juni 2011 ble Dyrkorn Kraftverk, som eies av Tafjord Kraft AS, satt i drift. Inntaket til Dyrkorn Kraftverk er et coandainntak, det første i Norden. Det er beliggende i bygda Dyrkorn, på indre Sunnmøre. Nærheten til Storfjorden gjør at værforholdene i løpet av vinteren stadig vil veksle mellom pluss- og minusgrader.

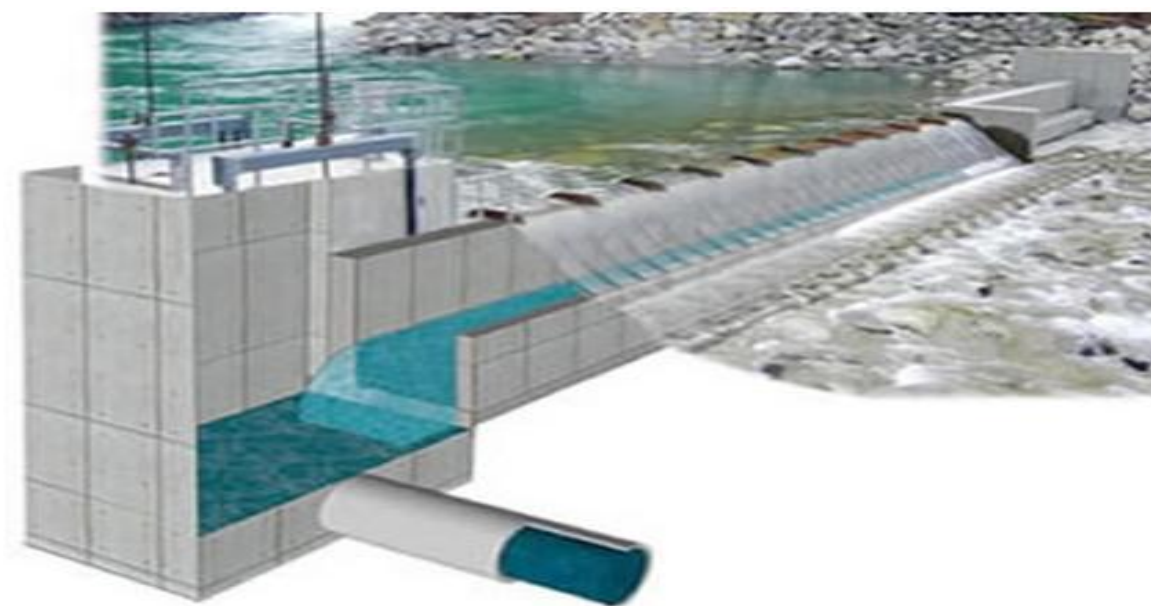
Formålet med oppgaven har vært å dokumentere funksjonen til coandainntaket på Dyrkorn gjennom vinterhalvåret. Coandainntak har flere fordeler med tanke på selvrensing, miljø og sikkerhet, men det har knyttet seg tvil i forhold til hvordan det vil fungere i løpet av en norsk vinter. Oppgaven har derfor et spesielt fokus på tilfrysning av coandarista, med tanke på å finne ut hva det er som skaper tilfrysningen og hva som faktisk skjer. Årsaken til at det er fokus, er med tanke på og eventuelt kunne forbedre inntakskonstruksjonen. For å gjøre forbedringer må problemet først forstås. Dokumentasjon av tilfrysninger er sikret gjennom temperaturmålinger i vann og luft ved inntaket, webkamera ved inntaket, målinger av vannføring nedstrøms dammen og produksjonsdata fra Tafjord Kraftproduksjon AS. Det er også blitt gjennomført feltundersøkelser under en tilfrysning. I tillegg er det gjort laboratorieforsøk der tilfrysningsprosessen er forsøkt gjenskapt. Resultatene gir en pekepinn på hvor godt egnet coandainntak er i Norge.

For litteratur angående miljøfordeler ved bruk av coandainntak anbefales rapporten *Roadmap for PIER Research on Fish Passage at California Hydropower Facilities* (Johnson, 2005). For dokumentasjon av selvrensing anbefales *BEDUIN project* (Huber, 2005).

2. Bakgrunn

2.1 Coandainntak

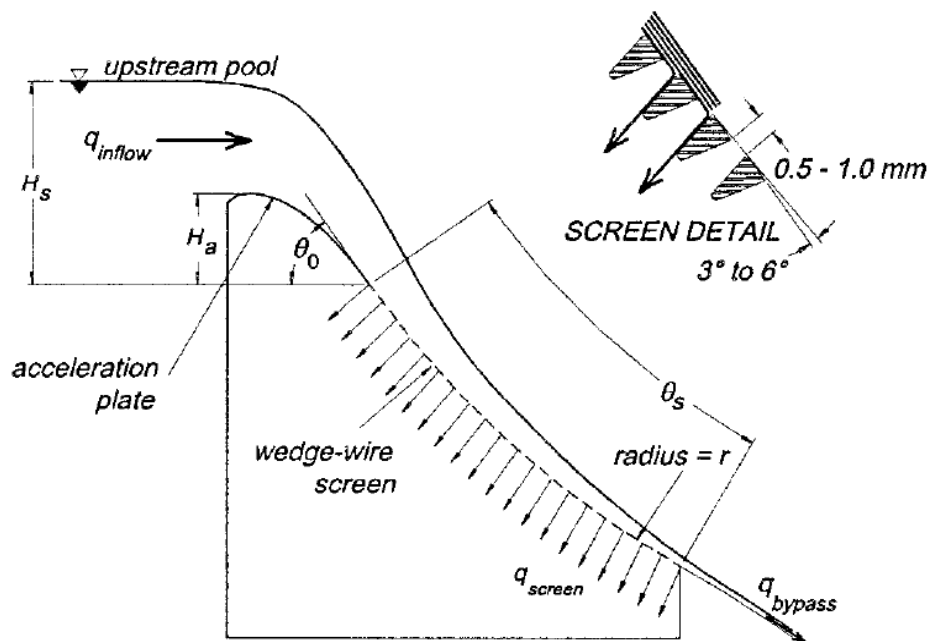
En coandarist benytter seg av coandaeffekten. Den kan kort beskrives som tendensen som strømmende væsker og gasser har til å bøye av og følge faste overflater (Huber, 2005). Et coandainntak er en spesiell type overfallsinntak, der vannet først renner over en terskel og deretter nedover en rist hvor inntaket av vann foregår. Rista består av tynne, horisontale staver som ligger vinkelrett på strømrretningen. Åpningen mellom stavene er typisk på en millimeter eller mindre. Stavene er orientert slik at de skjærer vekk det nederste filmlaget til vannet. I og med at åpningen mellom spaltene er så liten vil rask og større sedimenter bli skylt vekk. Inntaket skal slik være selvrensende uten større behov for inspeksjon og vedlikehold (Wahl, 2001). Under selve inntaket er det en samlekanal som fører vannet videre, som regel til et mindre reguleringskammer (Figur 1).



Figur 1: Typisk utforming av coandainntak, med samlekanal og reguleringskammer (Dulas)

For å oppnå høyest mulig effektivitet på coandarista er utformingen viktig (Figur 2). Etter terskelen er det en akselerasjonsplate som akselererer vannet slik at vannstrømmen kommer tangentielt på overflaten til rista (Wahl, 2001). Akselerasjonsplaten kan ha såkalt Ogee-form eller den kan ha form som en del av en sirkelbue. Selve rista er også som regel konkav, men den kan også være helt plan.

Hastigheten som vannet oppnår over inntaksrista er typisk 2-3 m/s, og den er økende mot nedre del (Wahl, 2001). Coandaristene som er kommersielt tilgjengelige i dag har typisk høydeforskjell på 1,2-1,5 meter fra toppen av terskelen og til bunnen av inntaksrista. Helningen er oftest på rundt 60° fra horisontalplanet. Utformingen av selve stavene på rista er gjort nøye for å oppnå høyest mulig effektivitet. Hver stav er kileformet og vridd et par grader for best å skjære i vannfilmen, og sammen med coandaeffekten bidrar det til kapasiteten til inntaket.



Figur 2: Typisk utforming av coandarist (Wahl, 2001)

Coandaristene kan leveres i flere størrelser, men standard størrelse har en inntakskapasitet på 140 l/s pr. lengdemeter. Høyden til en slik rist er 1,27 meter (Dulas, 2008). Fysiske begrensinger i terreng ved inntaksområde, kombinert med økonomiske faktorer har vært begrensende for maksimal størrelse for installerte coandainntak. Ved anlegg i USA er det installert coandainntak med kapasitet på opptil 6 m³/s (Howarth, 2001).

2.2 Dyrkorn Kraftverk

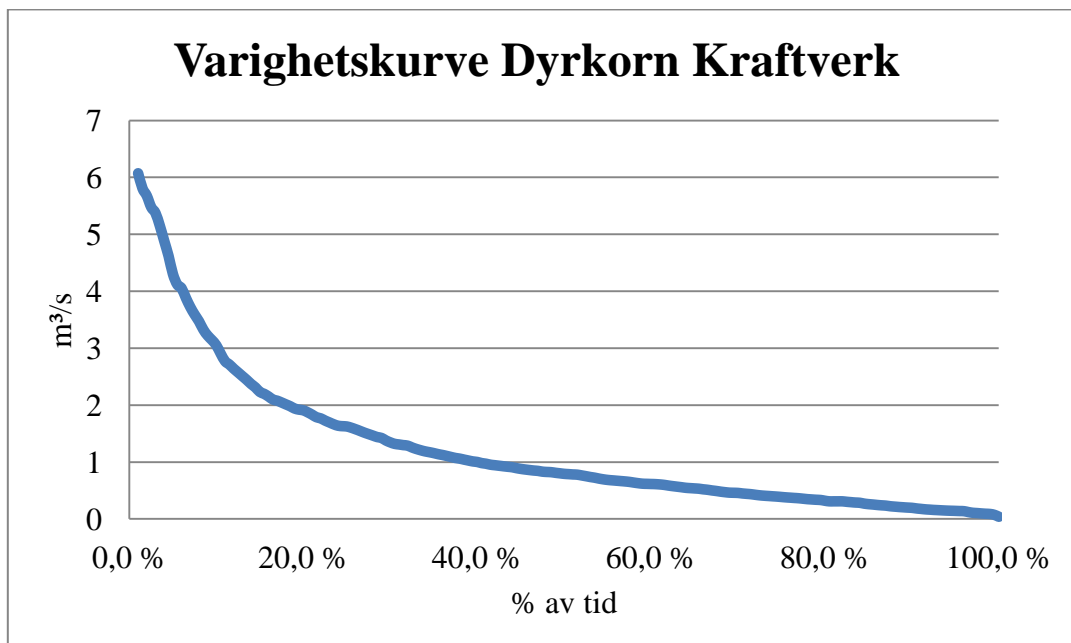
Dyrkorn kraftverk er det første kraftverket i Norden med coandainntak, og ligger i bygda Dyrkorn på Sunnmøre (Figur 3). Inntaket ble bygget av Taffjord Kraftproduksjon AS og ble satt i drift i juni 2011. Forventet årsproduksjon for kraftverket er ca. 10 GWh. Kraftverket utnytter 220 meter fallhøyde i Dyrkornelva. Elva er forholdsvis liten, men har stort fall over en kort strekning. Elva begynner på over 500 meter over havet, og har lengde på ca. 4200 meter. Det gir gjennomsnittlig gradient på over 1:10.

Kraftstasjonen ligger ved Storfjorden, mens inntaket ligger ca. 900 meter nordover i luftlinje. Fra inntaket føres vannet ned til stasjonen i nedgravd rørgate, hvor røret har innvendig diameter 800 millimeter. Coandarista til inntaket er levert av Dulas Ltd og har oppgitt kapasitet på 140 l/s/m. Totalt er det installert 15 moduler, hver av bredde en meter, slik at lengden til inntaket er 15 meter. Det gir total inntakskapasitet på 2,1 m³/s. Inntaket har dermed overkapasitet, da slukeevnen til kraftverket er ca. 1,5 m³/s. Restvannføringen på opptil 0,6 m³/s vil gi tilbakespyling av den nedre delen av rista. Tilbakespyling vil begynne ved vannføringer over 1,5 m³/s (Skudal, 2011). Utformingen av coandainntaket på Dyrkorn er normal, med samlekanal og trykkreguleringskammer. Samlekanalen er 15 meter lang, med svak helning. Kammeret har bredde på fire meter, og lengde på ti meter. Den vertikale avstanden fra topp av turbinrør i kammer til nedre del av coandarist er 1,1 meter. Det gir et aktivt reguleringsvolum på 44 m³ i inntakskammeret.



Figur 3: Coandainntak ved Dyrkorn Kraftverk (Foto: H. Opaker)

Figur 4 viser en varighetskurve for Dyrkornelva. Kurven er lagd fra data som Tafjord Kraft har fra måling av vannføring i Dyrkornelva. Målingen går tilbake til 1999, og er gjort ved et gammelt inntak ca. 300 meter nedstrøms det nye inntaket. Målingen inkluderer derfor også avrenning fra et restfelt. Størrelsen på restfeltet er ca. 1 km², mens nedbørsfeltet til Dyrkorn Kraftverk er ca. 13,2 km² (mailkorrespondanse med Perry Aase, 21.9.2011).

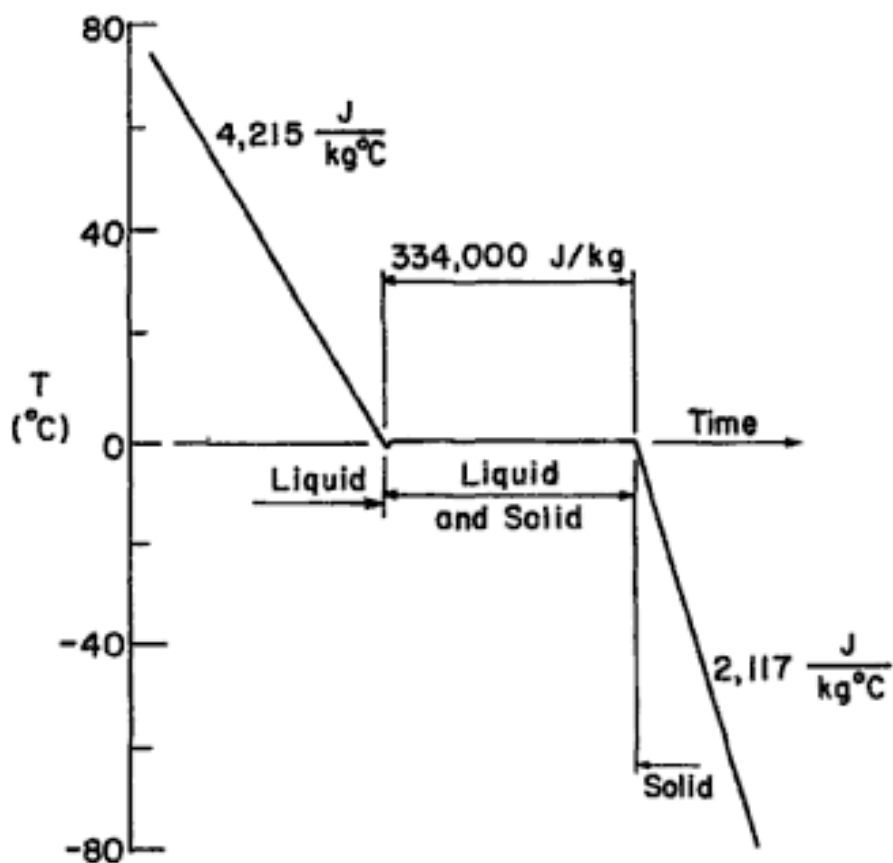


Figur 4: Varighetskurve for Dyrkorn Kraftverk

3. Teori

3.1 Tilfrysningsprosesser

Is oppstår på elver og innsjøer når overflatevann kjøles ned til omtrent 0 °C. I naturen vil den første dannelsen av is skyldes en av tre mulige prosesser (Ashton, 1986). Den første er dannelsen av overflateis på grunn av nedkjølt overflatesjikt. Den andre er dannelse av is grunnet snøfall direkte på vann. Den tredje prosessen er den mest spesielle, og skyldes underkjøling av vann og dannelse av små ispartikler som kalles sarr. For elver vil sarr ofte være den dominerende prosessen. Figur 5 viser en nedkjølingskurve for vann. Kurven viser at det er nødvendig med en viss underkjøling før den første isdannelsen inntreffer. Den viser også at nødvendig energi for å gjennomføre faseovergang fra vann til is er stor sammenlignet med energi som trengs for nedkjøling. Grafen forutsetter konstant verdi for energiavgivelse.



Figur 5: Nedkjølingskurve for vann (Ashton, 1986)

3.2 Sarr

I elver vil isen oppstå først der vannhastigheten er lavest, hvor plateformede ispartikler som driver løst omkring i vannet binder seg sammen og danner et nettverk (Ashton, 1986). Slik vil den første sammenhengende isflaten oppstå og vokse. Større grad av turbulens og høyere vannhastighet i elver enn i innsjøer vil føre til at tilfrysningsprosessen vil være dominert av underkjøling av vannet og dannelse av sarr. Sarr er mindre ispartikler som oppstår når vann blir underkjølt, i størrelsesorden fra noen hundredeler til en tidel under 0 °C. Sarrpartiklene er ofte formet som diskoser med diameter på en millimeter eller mindre, men større partikler med diameter opp til 5 millimeter forekommer også. Sarrpartikler vil skille seg fra vanlige ispartikler ved at de er klebrige. Turbulens i elver kombinert med sarr sin klebrige egenskap gjør at sarrpartikler gjerne fester seg til elvebunnen og danner såkalt bunnis. Sarr kan også danne overflateis, da ofte ved obstruksjoner i elva slik som bruer og dammer. Daly (1994) oppgir at sarr vanligvis dannes ved lufttemperatur omtrent -8 °C, eller kaldere.

For å få dannet iskrystaller i vann må det være en konstant frigivelse av energi fra vannet til omgivelsene. Dannelsen av de første krystallene vil kreve en viss underkjøling av vannet (Ashton, 1986). Måles temperaturen når krystaller oppstår i en væske vil alltid temperaturen ligge under smeltepunktet. I helt rent, homogent vann vil temperaturen hvor de første krystallene dannes ligge på rundt - 40 °C (Mossop, 1955). I naturen vil alt vann inneholde visse urenheter (bakterier og andre fremmedlegemer), og de er essensielle for dannelsen av de første krystallene. Rundt fremmedlegemer vil ikke vannet lenger trenge like mye underkjøling. Tabell 1 viser resultatene fra en laboratorieundersøkelse over nødvendig temperatur for dannelse av sarr rundt fremmedlegemer (Robert, 1979 gjengitt av Ashton, 1986).

Tabell 1: Nødvendig temperatur for isdannelse

Type fremmedlegeme	Underkjøling [°C]
Leirpartikler	1,1
Løvetannfrø	1,7
Løv (bjørk)	0,9
Mindre greiner	1,25

Prosessen rundt dannelsen av de første sarrpartiklene er ikke fullt ut forstått enda, men det er klart at det er lettere å få dannet nye partikler når de første har oppstått (Daly, 1994). Årsaken til det er deling av eksisterende sarrpartikler når de treffer en hard overflate (inkludert andre sarrpartikler). Turbulensnivået vil dermed påvirke produksjonen av sarrpartikler. Volumet til en enkelt sarrpartikkel er opptil ca. 0,1 mm³, og konsentrasjonen av partikler kan bli så høy som 10⁶ /m³ (Schaefer, 1950).

Studie av sarrdannelse gjennomført i laboratorium viste at det ikke er en entydig sammenheng mellom turbulensnivå og tiden vannet er underkjølt (Clark og Doering, 2006). Underkjøling vil fortsette helt til dannelse av sarr starter, og dannelsen vil frigjøre energi til vannet slik at temperaturen stiger igjen. Tiden vannet er underkjølt vil dermed si noe om hvor

raskt dannelsen av sarr foregår. Selv om sammenhengen var svakere enn ventet, var det en tendens til at høyere grad av turbulens ga lavere tid med underkjølt vann, det vil si raskere dannelse av sarr. Samme forsøk viste at størrelsen til partiklene økte med økende turbulensnivå, helt til det nådde en grenseverdi og størrelsen falt igjen med økende turbulens. Fordelingen av partiklene viste at hovedvekten lå mellom 0,5-2 millimeter, mens største partikkel hadde diameter på ca. 5 millimeter. En undersøkelse som så på vertikal fordeling av sarr, viste at det var avtagende konsentrasjon med dybde (Richard og Morse, 2009).

Sarrpartikler har som oftest form som diskoser, men kan også være formet som nåler (Ashton, 1986). Nåleform er mer uvanlig og dannes ved lavere turbulensnivå enn diskosformen. Etter at nok partikler er dannet vil flere begynne å vokse sammen. Det skyldes klebrigheten til partiklene kombinert med at partiklene kan låse hverandre fast. Når flere partikler slår seg sammen vil tettheten endre seg på grunn av at strukturen blir forholdsvis åpen. Tettheten synker dermed. Konsistensen til klumpene av sarr vil minne om slush. Den reduserte tettheten medfører at større klumper av sarr vil flyte på overflaten av vannet. Turbulens kan føre slike klumper midlertidig ned i dypere vannlag, og også løse de opp igjen. Sarrklumper som flyter på overflaten vil ofte støte inn i land og andre sarrklumper. Slik blir kantene avrundet, og klumpene blir dermed sirkulære og danner det som kalles for pannekakeis. Pannekakeisen har ofte hevede kanter etter gjentatte sammenstøt med andre ispannekaker. Etter hvert kan det flytende sarret danne et kontinuerlig isdekke over hele vannflaten. Det skjer typisk i strekninger av elva der hastigheten er lav slik at ispannekaker fryser sammen. Figur 6 viser en slik situasjon.



Figur 6: Sarrpannekaker (Denniskalma, 2012)

Med tanke på hvor mye sarr som kan produseres er arealet til vannflaten og varmetapet fra vannet til luften de avgjørende faktorene. Overflatearealet er forholdsvis lett å estimere, mens varmetapet er vanskeligere. Ashton (1986) angir ligning 1 for å estimere total varmeutveksling mellom vann og luft:

$$\Phi_N = (1-r_S)\Phi_S + (1-r_L)\Phi_{Lc} - \Phi_{LW} + \Phi_E(1+R) + \Phi_P \quad (1)$$

der Φ_S = kortbølget stråling (fra sol)

Φ_{Lc} og Φ_{LW} = langbølget stråling fra henholdsvis luft og vann

Φ_E = energi fra fordampning eller kondensering

R = Bowens ratio

Φ_P = energi fra nedbør

r_S = refleksjon av kortbølget stråling

r_L = refleksjon av langbølget stråling, konstant lik 0,03

Den kortbølgede strålingen fra sol vil være liten under vinterhalvåret grunnet at vinkelen for innstrålingen blir liten. I tillegg kan skydekke påvirke den faktoren kraftig. Uansett vil Φ_S være liten i forhold til de andre faktorene når dannelse av sarr skjer.

Φ_{Lc} og Φ_{LW} vil være faktorer som normalt er dominerende ved dannelse av sarr. De er kompliserte å sette en verdi på da de er avhengige av meteorologiske faktorer som luftfuktighet og skydekke. Temperatur og luftfuktighet vil i tillegg variere lagvis i luftmassen, slik at en punktmåling alene kanskje ikke er tilstrekkelig, avhengig av krav til nøyaktighet. Ashton (1986) angir at verdien for Φ_{LW} vil variere mellom ca. 200 W/m² ved – 30 °C og 100 W/m² ved 0 °C.

Fordampning er en prosess som tar energi fra vannmassene, og vil forekomme så lenge relativ fuktighet i lufta ligger under 100 % (Ashton, 1986). Vanndamp fraktes fra vannoverflaten ved molekylær diffusjon og konveksjon. Det er prosesser som påvirkes kraftig av vind. Fordampningen vil være mye større dersom det er bevegelse i luftmassene.

Kommer det snøfall på åpent vann, vil snøen smelte på grunn av at vannet er over 0 °C. Smeltingen vil kreve energi fra vannet, og dermed senke temperaturen nærmere frysepunktet. Et snøfall som tilsvarer regn på 1mm/time vil kreve ca. 90 W/m². Selvfølgelig er den verdien avhengig av snøens temperatur, men mesteparten av energien vil uansett bli brukt til faseovergangen mellom fast til flytende form, slik at det er mulig å gi et estimat for energien som avgis.

Å finne et estimat for total energiutveksling er ikke lett, men Ashton (1986) sier at 200 W/m² er et moderat varmetap.

For å finne total mengde produsert sarr kan ligning 2 benyttes (Ashton, 1986):

$$Q_{\text{ice}} = \frac{\Phi \cdot b \cdot l}{\rho \cdot L} \quad (2)$$

der	Q_{ice} = produksjon av is (sarr)	[m ³ /s]
	Φ = varmetap fra vannoverflate	[W/m ²]
	b = bredde til elv	[m]
	l = lengde til elvestrekke	[m]
	ρ = tetthet til is	[kg/m ³]
	L = energi til faseovergang vann til is	[J/kg]

Energien som er nødvendig for å transformere vann til is er 334 kJ/kg (Ashton, 1986).

Slush laget av sarr er kjent for å ha høy porøsitet, og verdier mellom 60 og 80 % er blitt funnet i undersøkelser (Ashton, 1986).

For Dyrkorn kan det sees på hvor mye sarr som teoretisk kan produseres i inntaksmagasinet. Regnes det med en gjennomsnittlig bredde på 10 meter, 15 meters lengde, varmetap på 200 W/m² og porøsitet på 60 % vil sarrproduksjonen anslagsvis være lik ca. 0,8 m³ i timen.

Det har det siste tiåret blitt utviklet flere metoder for å måle sarrmengder. Ingen av metodene har blitt enerådende, og det må sies at det knyttes en viss grad av usikkerhet til resultatene. Bruk av sonar er en metode som er utviklet de siste par årene. Shallow water ice profiling sonar (SWIPS) er et instrument som plasseres på bunnen av elva/sjøen og som måler is på overflaten og i vannet over ved hjelp av sonar (Marko og Jasek, 2010). Bruk av ulike frekvenser gjør at små sarrpartikler skal registreres. Interferensproblemer kan oppstå dersom antallet partikler blir for høyt. Grensen for at det skal inntreffe er imidlertid ca. 10⁷/m³, noe som er høyere enn konsentrasjoner for sarr som er registrert. SWIPS deler opp vannet i mindre volumer, og teller opp for hvert volum antallet partikler innenfor visse størrelser basert på refleksjonen fra de akustiske signalene. Partiklene summeres deretter fra hvert volum, og volum med sarr finnes. Et system basert på bildeanalyse for å finne antallet sarrpartikler er også under utvikling. Her sendes høyoppløselige bilder kontinuerlig, og bildene analyseres i matlab (Clark og Doering, 2002). Systemet har en svakhet ved at det kan kun finne partikler av størrelse 86 μm og større, mens de minste sarrpartiklene er ca. 30 μm . Systemet har også foreløpig begrensninger i forhold til å analysere et større volum, og ikke bare et overflatesjikt.

3.3 Snøfall

Is kan dannes ved snøfall direkte på åpent vann, og er en vanlig årsak til isdannelse i naturen (Ashton, 1986). For at det skal kunne inntreffe må vannet holde en temperatur nærme frysepunktet, og vannet bør ha liten grad av turbulens. Snøpartikler som faller på vannet vil

smelte, men det krever energi fra vannet. Vanntemperaturen vil dermed synke nærmere frysepunktet. Flytende snøpartikler vil kunne fryse sammen og danne is som i begynnelsen vil ha en konsistens som ligner på slush, akkurat som for sarr. Den formen for isdannelse kan også inntreffe i perioder hvor elva produserer mye frostrøyk. Frostrøyk består av meget små ispartikler, og en del av partiklene vil kunne falle ned i elva igjen og i likhet med snøfall starte en fryseprosess. Dersom det ligger mye snø ved siden av et åpent elvestrekk, kan en større økning i vannføring få samme effekt som et snøfall. Økning i vannstand medfører at snø som ligger ved siden av elva kan bli dratt med i strømmen.

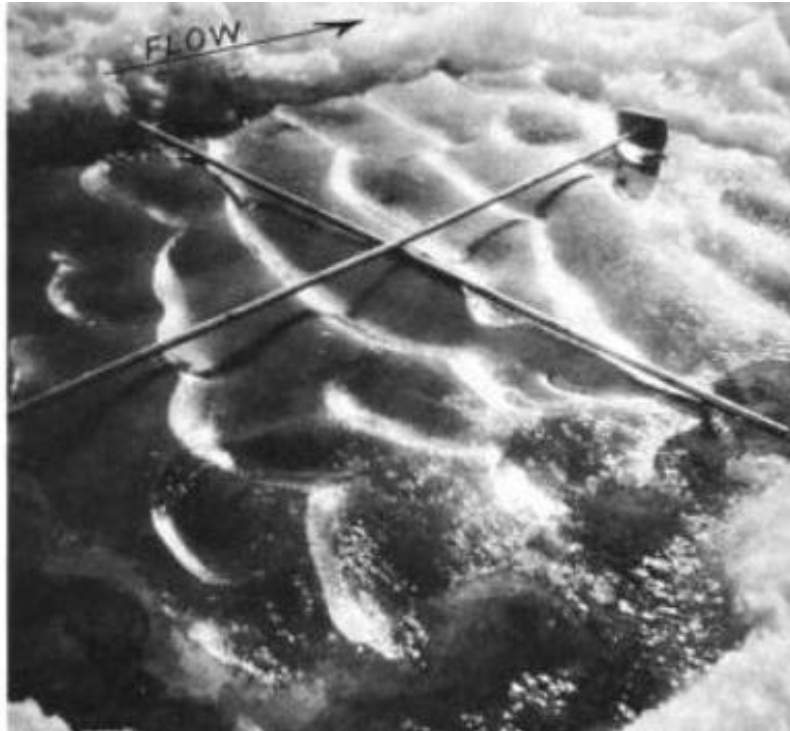
3.4 Overflateis

Dersom vannet har lav hastighet slik at det er tilnærmet laminær strømning, vil det gi grunnlag for underkjølt overflatevann (Ashton, 1986). Vann er ugjennomtrengelig for langbølget stråling, så all langbølget stråling fra vannet vil være fra overflaten. Det kan slik oppstå et tynt sjikt som er underkjølt. Når det øverste laget oppnår temperaturen som er nødvendig, vil de første iskrystallene oppstå. Temperaturgrensen for at krystalliseringen skal oppstå, er en underkjøling på minst 0,3 °C. Krystallene som dannes er generelt nåleformede, og antallet er avhengig av nedkjølingshastigheten til vannet.

3.5 Oppbrytning av isdekke

Proessen der isen bryter opp er vanskelig å modellere grunnet at isen påvirkes fra to sider, og at veldig mange faktorer har innvirkning (Ashton, 1986). Spesielt vanskelig å forutse er det for is som ligger i elver. Det skyldes at friksjonen på undersiden av isen på grunn av turbulens og strømning i vannet får betydning. Generelt er oppbrytningen en kombinasjon av varmeutveksling mellom is, luft og vann, kombinert med påvirkning fra mekaniske krefter som vannstrømninger og vind. For varmeutveksling mellom isoverflata og lufta vil mange av de samme faktorene som er nevnt tidligere i forbindelse med tilfrysning ha betydning. En stor forskjell er at absorpsjon av stråling har mye større påvirkning. Absorpsjonen er avhengig av overflatens albedoverdi, som beskriver en overflates evne til å reflektere stråling. Ettersom albedoverdien synker, øker mottatt stråling hos isen og temperaturen øker. Ved ca. 0 °C begynner grensesjiktet mellom krystallene og smelte. Volummessig utgjør det sjiktet veldig lite av ismassen, men det gjør at isen mister mye av styrken den opprinnelig hadde. Tidligere nevnte mekaniske krefter kan dermed lettere bryte opp isen. En kraftig økning i vannføring kan også være utløsende årsak til oppbrytning av isen.

Ved oppbrytning av isdekke i elver er ofte turbulensen i vannet avgjørende (Ashton, 1986). Den turbulente strømningen vil, sammen med varmeutvekslingen som skjer, danne små riller i undersiden av isen. Rillene vil som regel ha form som bølger, skrått på strømrretningen. Bølgelengden til rillene er avhengig av hastigheten til vannet. Forholdet er at lengden er omtrent invers proporsjonal med hastigheten. Effekten av dannelsen til rillene er økt varmeutveksling og at overflaten får en økt ruhet. Den økte ruheten medfører at skjærkraften som vannet utøver på isen øker. Figur 7 viser undersiden av isblokk fra ei elv i USA i 1965. Her kan bølgeformede riller i isen tydelig sees.



Figur 7: Bølgeformede riller i is (Carey, 1966)

På Figur 7 er strømningsretningen markert med ei pil. Jernstengene som ligger i kryss er ca. 1,2 meter lange og viser dimensjonene. Størrelsen til bølgene er mellom ca. 0,18 og 0,25 meter i lengde (Carey, 1966).

3.6 Isrelaterte utfordringer for kraftverk

For drift av kraftverk representerer is, og spesielt sarr, en stor utfordring. Utfordringen med sarr er større for elvekraftverk enn for kraftverk med store magasiner. Spesielt småkraftverk er utsatt for problemer med sarr, da de ofte er plassert i mindre, bratte elver. Slike elver vil produsere mer sarr enn rolige, slake lever på grunn av at de er uten isdekke større deler av vinteren og har mer turbulens. Forståelse for hvordan sarr oppstår og hvordan det påvirker kraftverket er dermed viktig for å kunne forutse og gjøre tiltak for å redusere problemet mest mulig.

Sarr, både aktivt og passivt (i form av slush), vil feste seg til alle kalde flater og kan raskt tette igjen store deler av strømningsarealet til en varegrind (Daly og Ettema, 2006). Kapasiteten til inntaket vil dermed synke, og trykktapet over varegrinda vil øke. I ekstreme tilfeller kan trykket på varegrinda på grunn av is bli så stort at den kollapser. Ofte vil gjentetting av inntaksrist medføre manuell rensking av rista, spesielt for mindre kraftverk der automatisk grindrensk er for dyrt. Tiltak som kontrollerer hastigheten til blokkering har vært gjennomført med en viss suksess, men å fjerne problemet som helhet er vanskelig. For å unngå problemet helt er utforming av inntak og plassering viktige faktorer. Dykking av inntak slik at vann fra dypere vannlag tas inn er et tiltak som minsker risikoen for problemer med sarr. Plassering av inntak hvor det er størst sannsynlighet for stabilt isdekke er også effektivt, men må selvfølgelig veies opp mot en rekke andre forhold. I tillegg kan flere mindre endringer gjøres for å bedre situasjonen. Varegrinda bør ha så stor avstand mellom

stavene som mulig, og stavene bør samtidig være tynneste mulig. Varegrinda bør også overflatebehandles for å unngå rust. Det på grunn av at bindingskreftene mellom rust og is er mye større enn mellom is og for eksempel epoxy, plast eller maling. Oppvarming av varegrinda er også et mulig alternativ, men det er kostbart og ofte vanskelig å gjennomføre. Dersom det gjøres må temperaturen i grinda være minst 0,1 °C.

Sarr kan også i enkelte tilfeller komme inn i selve vannveien, og feste seg til veggene og dermed redusere tverrsnittsarealet slik at friksjonstapet øker (Ettema et al., 2009). Også pumper som inngår i systemet kan påvirkes av sarr. Et annet problem kan være dannelsen av bunnis nedstrøms kraftverket. Bunnisen vil heve vannspeilet, slik at tilgjengelig trykkehøyde for kraftproduksjon reduseres. For høytrykksanlegg har det forekommet problemer med tilfrysning umiddelbart etter turbinen i avløpstunnelen. Det skyldes at det høye trykket før turbinen senker frysepunktet, men etter turbinen reduseres trykket drastisk og frysepunktet øker også tilsvarende.

3.7 Tilfrysning av coandainntak

Søk etter litteratur, og kontakt med selskaper som Dulas Ltd og Andaco viste at det finnes lite publisert informasjon om tilfrysning av coandainntak. Andaco er et firma som har flere coandainntak i alpine i Sveits og som har flere års erfaring med coandainntak. Det ble funnet en artikkel skrevet på tysk der tilfrysning av coandainntak er beskrevet. Artikkelen nevner ikke at det er gjort temperaturmålinger, og det er ikke vurdert hva som skaper tilfrysningen (ENTEC AG, 1998). For å vurdere tilfrysning, og gjenåpning av coandainntak, er det naturlig å se på spesifikk varmekapasitet for elementene som er involvert. For is og vann er spesifikk varmekapasitet nevnt i kapitel 3.1. For luft er volumetrisk spesifikk varmekapasitet 1297 J/m³ K (ved 0 °C og havnivå), mens for stål er spesifikk varmekapasitet 490 J/kg K (Zum Dahl, 2005). Ved gjenåpning av coandainntak kan mekaniske krefter som beskrevet i kapitel 3.5 ha betydning.

4. Metode

For best å dokumentere forholdene ble det ved inntaket utplassert forskjellig måleutstyr. Målerne dokumenterte blant annet temperatur i luften, både i samlekanal og utenfor inntaksdammen. Vanntemperatur ble registrert på flere steder. En termistorstreng registrerte temperaturen til rista. I tillegg ble en trykksensor satt ut for å registrere vannstand og mengde vann som gikk over coandarista. Utvalgte måleserier brukes til å støtte opp under forklaringer på observerte hendelser, slik som gjenising av rist. Måleseriene blir presentert i form av grafer i oppgaven, men selve måleseriene vil ligge vedlagt.

I forbindelse med oppgaven er det gjennomført litteratursøk, og det er lest og skrevet teori for best mulig og utdype hva som skjer ved inntaket. Spesielt gjelder det teori knyttet til is og gjenfrysing. Flere firmaer og personer som har erfaring med coandainntak i Wales, Sveits og Alaska er blitt kontaktet.

Gjennom høsten og vinteren har anlegget blitt fulgt opp gjennom befaringer, webkamera og samtaler med personell i Taffjord Kraft AS. Befaringene har også inkludert feltarbeid, med resultater som er presentert videre i oppgaven. Totalt har det i løpet av høsten og vinteren blitt gjennomført 7 turer til Dyrkorn med feltarbeid.

Det er også blitt gjennomført forsøk i laboratorium for å forstå tilfrysingsprosessen best mulig.

Teori, forsøk, observasjoner, befaringer og samtaler ligger til grunn for vurderinger som er gjort angående anleggets funksjonalitet og egnethet for norske forhold.

4.1 Temperaturmålere Vemco Minilog-II

Det ble utplassert 5 målere av typen Vemco Minilog-II. To målte lufttemperatur, hvorav en i samlekanal og den andre på utsiden av lukehuset. De resterende tre målerne registrerte vanntemperatur i reguleringskammeret og i begge ender av samlekanalen. Minilog-II logger temperatur ved på forhånd spesifiserte tidsintervaller. Nøyaktigheten er oppgitt å være 0,1 °C (vemco, 2012). For vårt formål ble det valgt å sette dem til å logge med tidsintervall 30 minutter. Det ble valgt etter å ha studert prøvemålinger høsten 2011. Det virket som de vesentlige endringene i temperatur ble registrert, og at store svingninger mellom målingene ikke forekom. Samtidig ga intervallet håndterlige datamengder. Målerne ble festet til betongen med metallbånd (Figur 8).



Figur 8: Minilog-II på veggen i reguleringskammer nede ved betongsåle (Foto: H. Opaker)

Målinger lagres internt i loggeren, så for å hente data må målerne tas opp fra samlekanal og reguleringskammer. Prosessen for tømning av data krevde dermed planlegging, spesielt siden nedtapping er avhengig av at vannføringen ikke er for høy.

4.2 Temperaturmåler SBE 39

I tillegg til miniloggerne ble det utplassert en mer nøyaktig temperaturmåler, SBE 39, på utsiden av dammen som målte temperaturen i det oppdemte magasinet. SBE 39 er et måleinstrument som registrerer temperatur og eventuelt trykk med høy nøyaktighet. SBE 39 har internt batteri og minne, og er tiltenkt for langtidsmåling ved et fastsatt målingspunkt eller korttidsmålinger i bevegelse. Termistorføleren i instrumentet har en oppløsning på 0,0001 °C, og en nøyaktighet på 0,002 °C. Måleområdet ligger mellom -5° og 35 °C. Tid registreres samtidig med temperatur (seabird, 2012).

Det ble valgt å måle kun temperatur med SBE 39. Måleintervallet ble satt til 15 minutter. Årsaken til at den ble satt til å måle oftere enn miniloggerne, er at den har finere oppløsning. På Dyrkorn ble måleren plassert ca. 0,2 meter under damkrona. Den ble plassert høyt opp mot vannspeilet i håp om å registrere underkjølt vann, samtidig måtte den dykkes noe for å unngå problemer med is. Måleren ble plassert i et ståldeksel som beskyttet den (Figur 9).

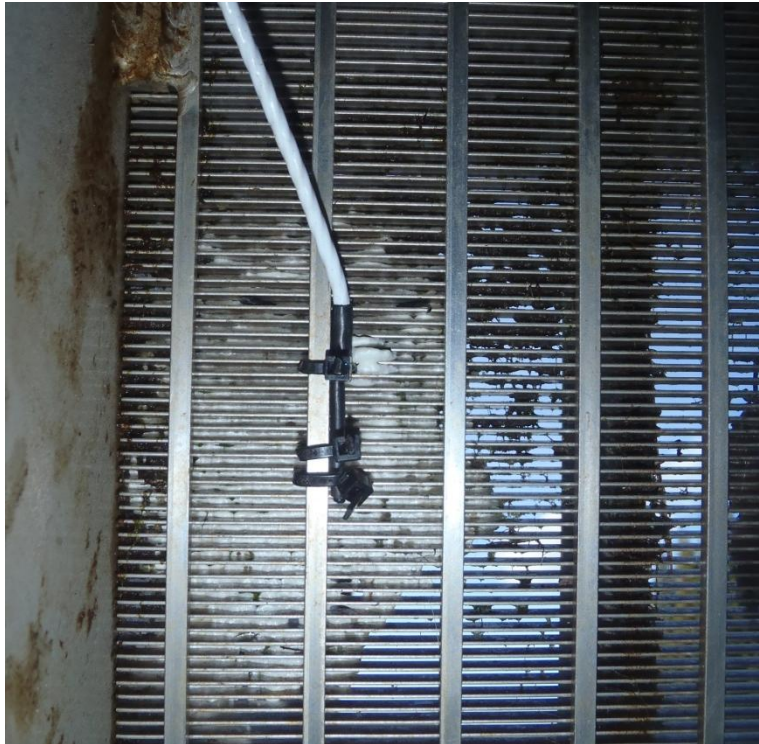


Figur 9: Plassering av SBE 39 på inntaksdam (Foto: H. Opaker)

Målinger lagres internt i SBE 39 og for å få tilgang til data må loggeren tømmes. For å komme til måleren måtte inntaksmagasinet tappes ned. Nedtapping krevde at vannføringen ikke var for stor.

4.3 Temperaturmåler Comark EV N2012

Det ble også utplassert en termistorstreng direkte på coandarista. Det ble gjort med tanke på og se om rista kan bidra til isdannelse. Termistorstrengen var av typen Comark EV N2012. Føleren har måleområde mellom $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, og med nøyaktighet på $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (impex, 2012). Loggeren ble plassert i lukehuset, og en 8 meter lang termistorstreng ble trukket ned til coandarista. Termistorstrengen ble plassert til rista ved hjelp av fire strips som holdt den fast innvendig mot en tversgående avstivning på rista (Figur 10). For å hindre at lufttemperaturen ikke påvirket målingene ble det lagt et lag av isolasjonsskum rundt føleren. Avlesning av data fra loggeren var forholdsvis enkelt på grunn av loggerens plassering i lukehuset.



Figur 10: Termistorstreng på coandarist (Foto: H. Nøvik)

4.4 Kamera AXIS 214 PTZ

På utsiden av lukehuset, på veggen som vender mot inntaksdammen, har Tafjord Kraft plassert et kamera av typen AXIS 214 PTZ. Fra det punktet har kameraet full oversikt over coandarista samt inntaksmagasinet. Kameraet er koblet opp til internett, noe som gjør at det kan styres via PC. Kameraet ga bilder av god kvalitet, og ga dermed gode muligheter til å dokumentere hva som skjedde på inntaket. Det var imidlertid ikke mulig å se hva som skjedde etter at det var blitt mørkt med kameraet.

4.5 Trykksensor WL 16

Oppstrøms damkrona, på innsiden i inntaksmagasinet, ble det plassert en trykksensor av typen WL 16 som produseres av det amerikanske firmaet Global Water. Sensoren kan bli satt til å logge med selvbestemte tidsintervaller, eller ved gitte endringer i trykk. Data lagres internt i instrumentet. Når måleren utplasseres må det spesifiseres hvilke dybder den skal måle ut fra en serie med forhåndsprogrammerte dybdeskalaer. Nøyaktigheten skal være 0,1 % av skalaen den er innstilt for å måle på. For den fineste skalaen som går fra 0-0,91 meter, vil dermed nøyaktigheten ligge på 0,0009 meter. For å kompensere for naturlige endringer i lufttrykk, måles også lufttrykket samtidig. Det gjøres av en måler som ligger i enden av en kabel som føres opp i fri luft. Trykksensoren måler også vanntemperatur for å kompensere vannhøyden for endringer i vannets egenvekt (globalwater, 2012).

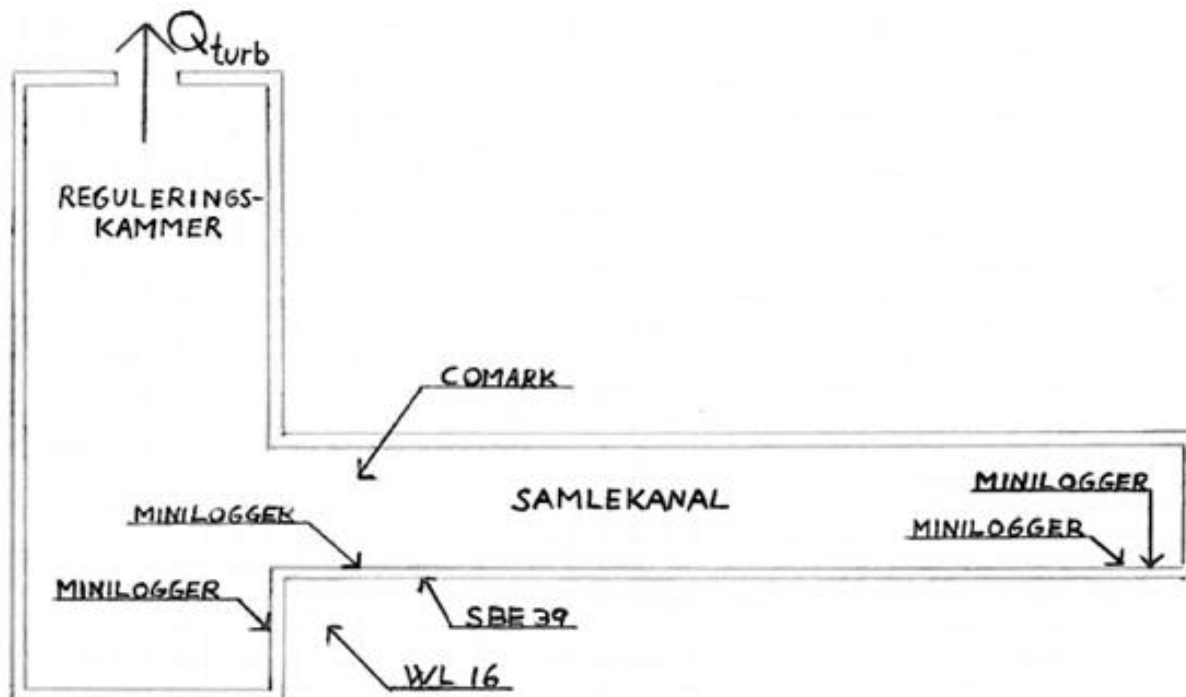
Data fra trykksensoren skulle bli brukt, sammen med vannføringsdata, til å utarbeide kapasitetskurve for inntaket ved ulike situasjoner.

I tillegg til trykksensoren som ble plassert ut i inntaksdammen, har Tafjord Kraftproduksjon AS en trykksensor i inntakskammeret som de bruker for regulering av turbinen. Måledata fra

trykksensoren, kombinert med produksjonsdata, ga informasjon om hvor stort problemet med svingninger i inntakskammeret er.

4.6 Plassering måleutstyr

Plassering av måleutstyr på dam er vist i Figur 11.



Figur 11: Plassering av måleutstyr på inntaksdam (Tegning: H. Opaker)

Av de to miniloggerne til høyre i samlekanal, registrerte en luft- og en vanntemperatur. I tillegg til de fire miniloggerne markert på skissen, ble en plassert på lukehuset.

4.7 Måleprosedyre sarmengde og isprofiler

Dersom det var mulig å være tilstede ved en gjenfrysning som skyldes sarr, ble det planlagt å måle mengden sarr. For å forutse mulige gjenfrysninger ble værvarslingstjenester, slik som yr.no, brukt. Tilstedeværelse var derfor avhengig av riktige værmeldinger. Ingen slike tilfrysninger skjedde i februar og mars, men måleplan ble utarbeidet. Selve oppmålingen av sarr kan gjøres ved å skrape av sarr som fanges opp på en meters bredde av rista. Oppveiiing skjer ved hjelp av en egnet, mekanisk kjøkkenvekt som oppbevares i lukehuset. Den går opp til 5 kg, og har inndeling på 25 gram. I tillegg til å notere ned vekt bør volum også registreres, så sarret bør veies i litermål. Når sarret skrapes av vil det sannsynlig være vannmettet, så det meste av vannet bør renne av før sarret veies.

Oppmåling av sarr fra en meters bredde vil gi et anslag for sarmengden over hele rista, såfremt isforholdene i inntaksmagasinet er like over dammens bredde. Forhold ved inntaket kan imidlertid føre til at sarr legger seg ulikt på rista. Dersom det er tilfellet må det måles over hvor stor bredde avskrapning skjer, og total bredde hvor sarr fanges opp.

I tillegg til å registrere mengde og volum sarr, bør tid registreres. Avskrapninger bør skje med jevne tidsintervaller. Intervallene må tilpasses produksjonsraten til sarret. Ved store forskjeller i temperatur mellom vann og luft, vil sarrproduksjonen være større enn ved lavere forskjeller. Det betyr at hensiktsmessig intervall må avgjøres på stedet, men det er viktig at tid registreres og at måleplanen følges. Starttidspunkt må også registreres. Figur 12 viser skjema for registrering av sarrmengde.

Starttidspunkt		
Måleintervall (min)		
Målebredde		

Måling nr.	Mengde[kg]	Volum [l]
1		
2		
3		
4		

Figur 12: Skjema for måling av sarrmengde

Ved en gjenfrysning er det interessant å registrere isprofiler på coandarista. Registrering av profiler bør gjøres under gjenfrysning på grunn av at is fra sarr i utgangspunktet er myk. Etter at gjenfrysingsprosessen er over vil isen hardne og vanskeliggjøre oppmåling, og når inntaket åpnes opp vil også profilene endres. For å måle opp isprofiler kan det brukes bladsøker som stikkes gjennom isen på ulike punkter med gitt intervall oppover rista. Bladsøker har den fordel at den har blad som er tynne nok til å måle mellom grindstavene. Høyden til coandarista på Dyrkorn er 1,27 meter, hvorav øvre del er en akselerasjonsplate (Dulas, 2008). Ved måling av istykkelsen vil det måles for hver 0,1 høydemeter. Det burde være lite nok intervall til at profilene viser hvordan isen har lagt seg på rista. Det burde også gjøres flere målinger bortover rista, minst tre, slik at et helhetlig bilde kan dannes. Plasseringen av målingene bør være spredt bortover lengden av rista.

Det som er mest interessant å få frem med isprofilene er om isen også legger seg mellom stavene. Det kan være vanskelig å få frem uten å skrape av selve isen for så å studere mellom stavene. Avskrapning bør derfor også gjøres, for å verifisere at målingene er riktige og representative. Et antall felt mellom boulder bars (bredde 0,1 meter) bør derfor skrapes rene for overflateis. Antallet felt bør være minst 10, og de bør også være spredt langs ristas lengde.

4.8 Vannføringskurve

Det var egentlig tiltenkt å lage vannføringskurver for både ren og tilstoppet rist, men det ble gått bort fra. Det på grunn av at det ble vurdert som meget vanskelig å gjennomføre målinger for gjenfrost rist, og verdien av en slik måling syntes uklart. Måling for ren rist ble likevel gjennomført. Ei kapasitetskurve viser vannstand mot vannføring, slik at avlesning av vannhøyde er nok for å finne vannføring. For å vite hvor mye vann som går gjennom inntaket ble det brukt driftsdata fra Dyrkorn kraftverk, samt vannføringsmålinger fra minstevannsmerket lenger ned i elva. Her er det imidlertid et restfelt som det normalt må korrigeres for. Tafjord Kraft registrerer kontinuerlig hvor stor kraftproduksjonen er, men for å

finne hvor mye vann som brukes måtte det etableres en P-Q kurve. Sammenhengen mellom vannmengde og kraftproduksjon er ikke lineær. Ved Dyrkorn har røret som fører vann til turbinen lik diameter hele veien. Måling av tiden vannet brukte fra reguleringskammer til turbin, ga vannmengden ved hjelp av kontinuitetsligningen. Tiden ble funnet ved hjelp av saltmåling. Salt ble tilsatt ved reguleringskammeret, og så registrertes tiden vannet brukte ved måling av ledningsevnen til vannet nede ved turbinen. Ledningsevnen ble målt med WTW multi 3410. Det ble ikke nødvendig å bruke data fra WL 16. Deler av damkrona ble oppdemt for å skape høydeforskjeller på vannet, mens høyden ble avlest på målestav.

Ut fra målingene ble C-faktor for overløpet bestemt. Det ble gjort ut fra ligning 3 (NVE, 2005).

$$Q = C \cdot L \cdot H^{1,5} \quad (3)$$

En annen måte å lage kapasitetskurver er å bruke ADCP (acoustic doppler current profiler) til å finne vannføringen rett oppstrøms dammen. ADCP er et måleinstrument som plasseres på en båt som trekkes over et måletverrsnitt. Instrumentet måler ved hjelp av partikler i vannet hastighetsfelt og vannmengde (SonTek, 2012). Måling med ADCP ble vurdert, men ikke valgt.

4.9 Sedimenter

For vurdering av massetransport i elva ble bilder fra inntaksmagasinet og elva fra forskjellige tidspunkt brukt. For å se på massetransport gjennom coandarista ble det tatt bilder fra inntakskammeret, samt at sedimenter funnet i kammeret ble siktet for å finne kornfordeling. Resultatet er fremstilt ved hjelp av kornfordelingskurve.

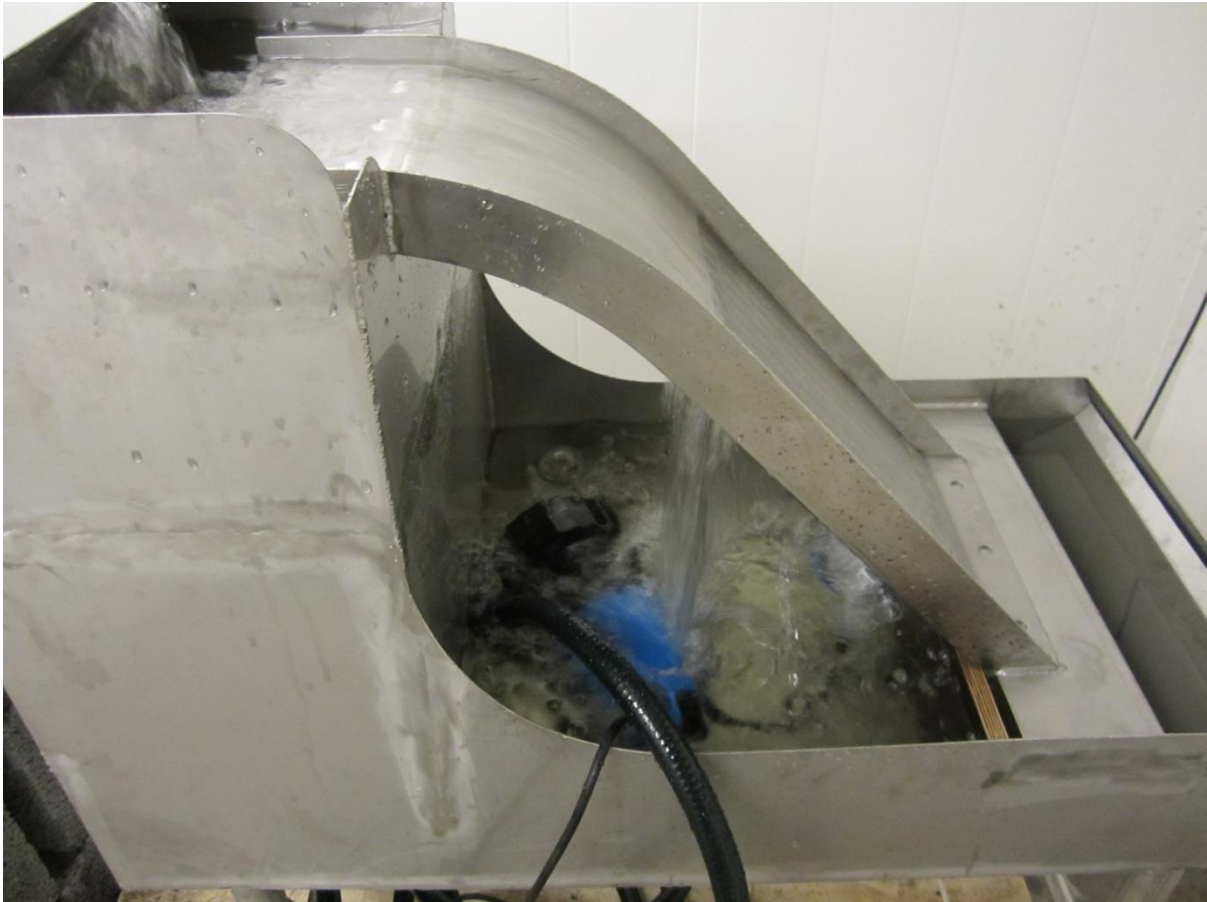
4.10 Luftmedrivning

Luftmedrivning ble vurdert ved å se etter luftvirvler i inntakskammer når anlegget var under drift. Kraftverket gikk for fullt med slukeevne $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$., og det krevde dermed forholdsvis stor vannføring i elva. Luftmedrivningen kan også vurderes ved at anlegget stoppes under drift slik at luft i vannveien stiger opp og kommer ut igjen ved innløpet, men det ble valgt og ikke gjøre det. Undersøkelsen ble dokumentert ved filming. Observerte virvler ble beskrevet etter NVE (Norges Vassdrags- og Energidirektorat) sin klassifisering av virvler.

4.11 Forsøk i laboratorium

Grunnet varm vinter ble det gjennomført laboratorieforsøk. Det ble forsøkt å gjenskape tilfrysingsprosessen som skjer på coandarista i laboratorium. I forsøket ble en modell av en coandarist plassert i et fryserom. Modellen som ble brukt er laget av Brødrene Dahl AS. Den ble tidligere brukt som demonstrasjonsmodell i forbindelse med at de har startet som distributør av coandarister i Norge. Modellen har en 0,3 meter bred og 0,4 meter høy coandarist. Rista ble levert av Dulas Ltd og har avstand en millimeter mellom stavene, akkurat som rista på Dyrkorn har. Modellen består av et lite oppsamlingsbasseng under rista, og et øvre kammer bak rista. En pumpe sørget for at vann sirkulerte fra oppsamlingsbassenget til det øvre kammeret (Figur 13).

Fremstilling av sarr ble forsøkt gjort i en tank med 230 liter vann plassert inne i fryserommet. Når temperaturen var 0 °C ble finknust is tilsatt samtidig mens det ble rørt om med mørtelvisp. Det lyktes ikke å lage sarr. En erstatning for sarr, med samme konsistens og lignende størrelse på partiklene ble brukt. Forskjellige løsninger med finknusing av snø og is blandet med vann ble utprøvd. Det ble fastsatt et blandingsforhold for å få mest mulig lik konsistens hver gang. Forsøket ble deretter gjort ved at erstatningen for sarr ble sendt over rista. For å få finknust snø og is ble stavmixer brukt.



Figur 13: Modell med coandarist (Foto: H. Opaker)

Under selve forsøket ble det tilsatt en fast mengde sarr. Fornuftig mengde ble bestemt ved å prøve seg fram. Sarrblandingen ble sluppet i det øvre kammeret når pumpa var avslått. Deretter ble blandingen best mulig forsøkt løst opp ved hjelp av elektrisk visp. Pumpa ble deretter slått på slik at vann og sarr rant over rista. Etter at det meste av sarrblandingen var borte fra det øvre kammeret ble pumpa slått av. Da ble det studert hvordan isen hadde lagt seg, og med spesielt fokus på is mellom stavene og på baksiden av rista. Bladsøker ble brukt for å komme til mellom stavene til rista. Etter undersøkelsen ble isen skrapet av og veid. Temperatur på rist, vann i modell og i sarrblanding ble registrert før forsøket startet. Forsøket gjennomførtes ved forskjellige romtemperaturer, og to ganger for hver romtemperatur. Forsøkene ble filmet for å sikre dokumentasjon. Temperaturene som forsøket ble gjennomført ved var -5, -7, -10 og -15 °C.

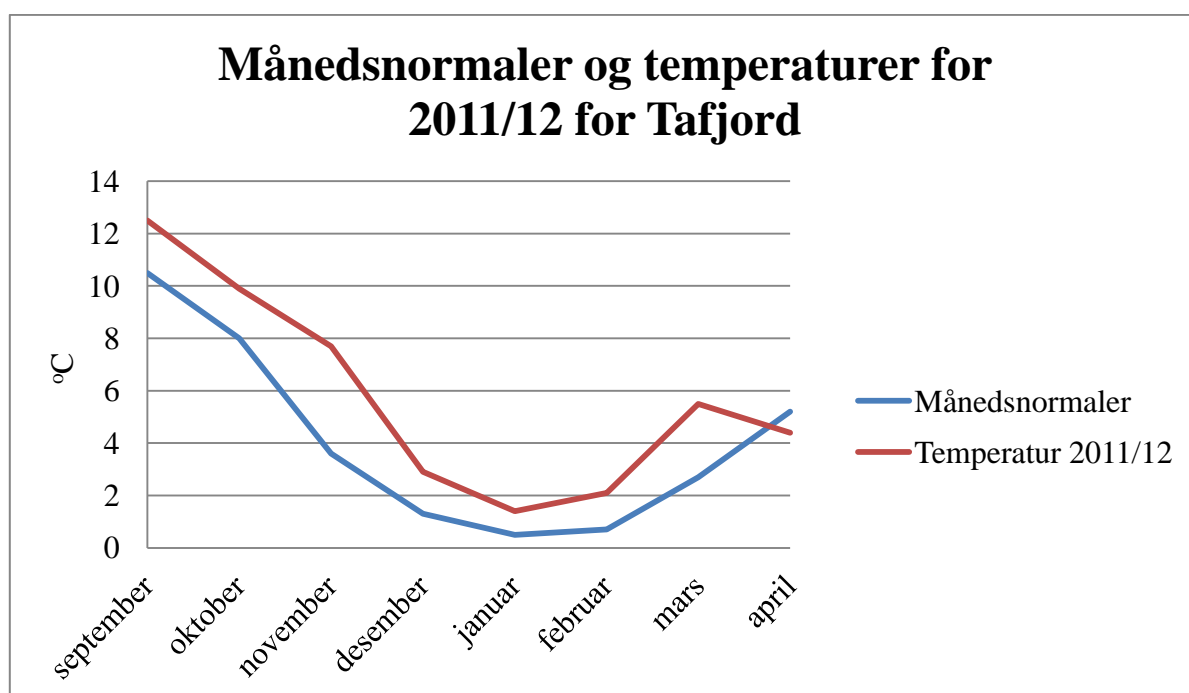
Temperaturmålinger i forbindelse med forsøket ble gjort ved hjelp av ASYC II MX 54. Det er et måleinstrument som blant annet kan måle temperatur, og har en oppløsning på 0,1 °C. Nøyaktigheten er oppgitt å være 0,5 °C (chauvin-arnoux, 2012).

Kapasiteten til pumpa ble bestemt ved å pumpe vann i en ti-liters bølge og måle tida. Antall liter vann i modellen målt ved uttapping etter endt forsøk.

5. Resultater vinteren 2011/12

5.1 Værforhold vinteren 2011/12

Høsten og vinteren 2011 og 2012 var preget av å være varmere enn normalt på Sunnmøre. Figur 14 viser normaltemperatur fra perioden 1961-1990, og temperaturen for vinteren 2011/12 for Tafjord. Temperaturene som er vist er gjennomsnittlige månedstemperaturer. Tafjord ligger innerst i Storfjorden ca. 31 kilometer i luftlinje fra Dyrkorn (gislink, 2012). Målestasjonen ligger ved fjorden og det er generelt varmere på Tafjord i forhold til Dyrkorn, men grafen viser tydelig tendenser som også er gjeldene for Dyrkorn. Data stammer fra meteorologisk institutt (eklima, 2012).



Figur 14: Temperatur for Tafjord

Vinteren ga færre gjenfrysningstilfeller ved Dyrkorn enn forventet. Det var perioder i vinter med plussgrader døgnet igjennom. Kombinert med stabile vinterforhold når temperaturen først sank under null, gav det kun fire gjenfrysningstilfeller i tidsperioden oktober-mars.

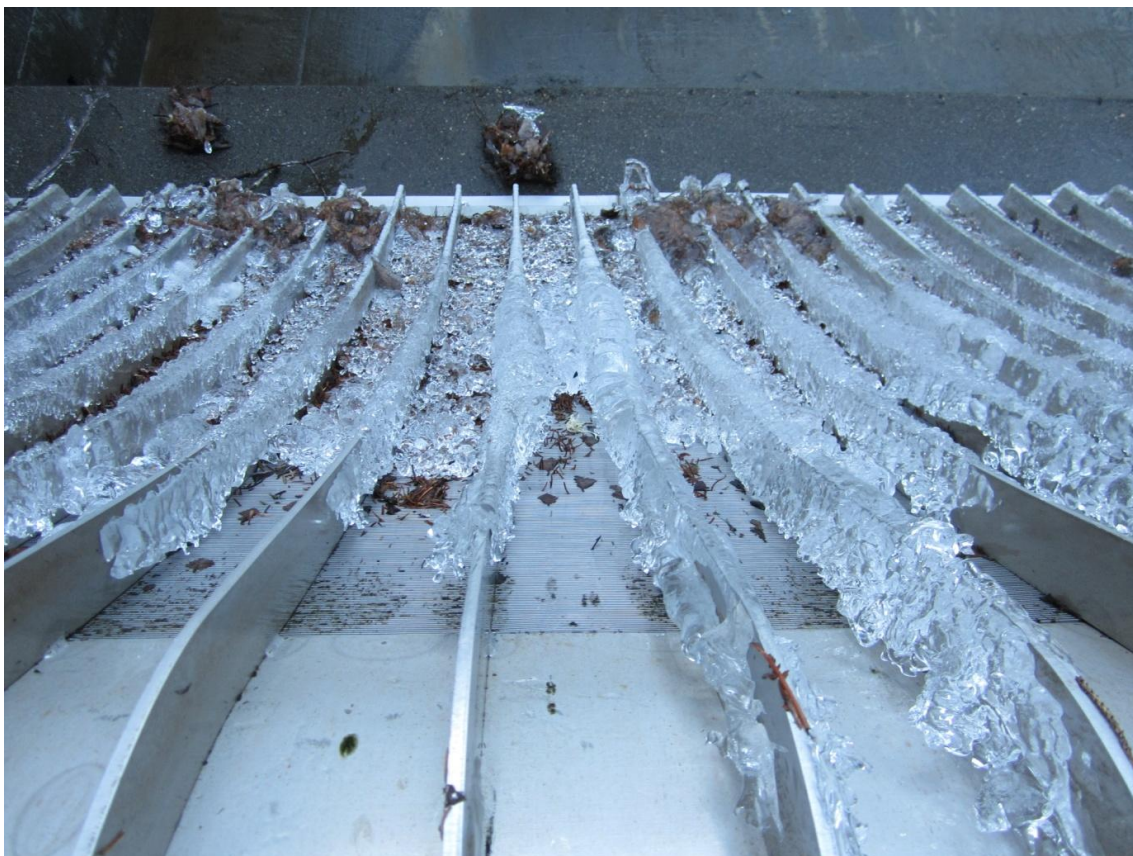
Temperaturmålingene fra Dyrkorn har dessverre en del forskyvning i tid. For to av miniloggerne som måler vanntemperatur, og den som måler lufttemperatur i samlekanal, er målingene forskjøvet med ca. 15 minutter. For SBE 39 er målingen forskjøvet med ca. 4 minutter. Med forskjøvet menes i forhold til måling hver hele og halve time.

En graf med alle temperaturmålinger, produksjon, nedbør og isdekke på inntaksmagasin mellom 17. november og 31. april ligger i vedlegg (Figur A1). Nedbørserien er for Sjøholt, og serien for isdekke er lagd gjennom å studere bildeserie for inntaksmagasinet gjennom vinteren.

5.2 Tilfrysningstilfeller

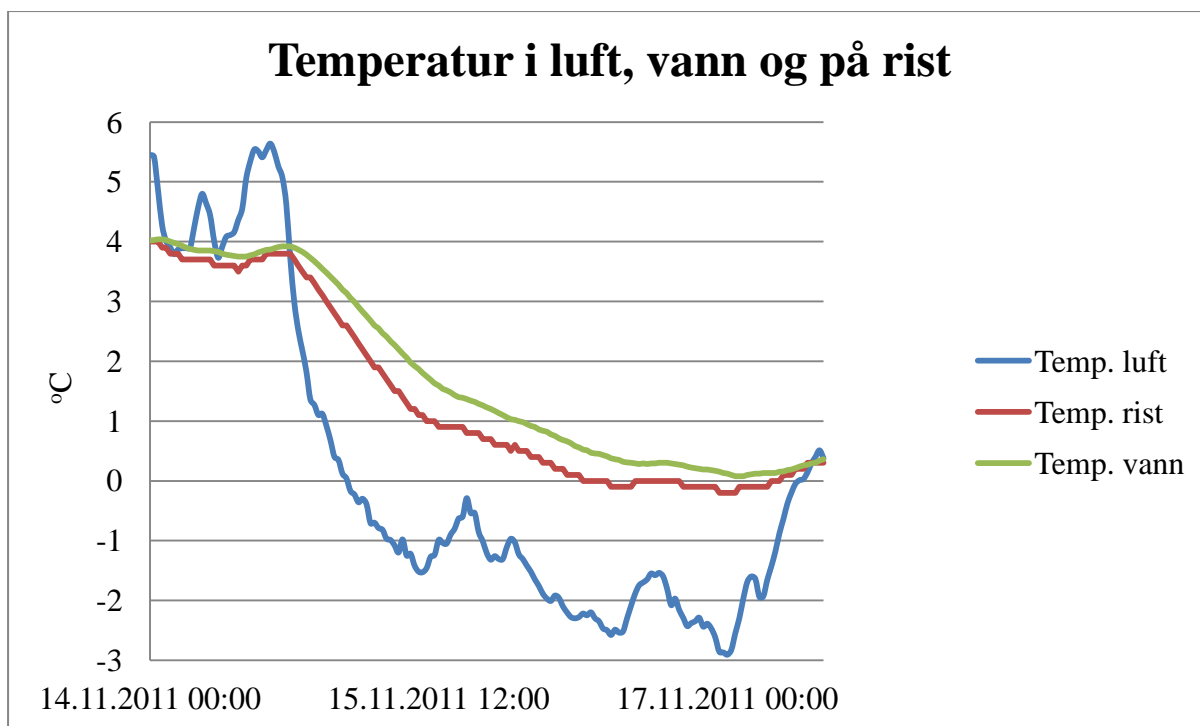
5.2.1 Første islegging-17. november

Figur 15 er fra befaring på anlegget 17. november og viser isleggingen som har startet på coandarista. Bildet viser at isleggingen har startet på boulder bars-ene, som stikker opp fra rista for å beskytte mot større drivgods. Tilfrysning har også begynt på den nederste delen av rista hvor mengden vann har vært liten. Ved undersøkelse var isen hard og kompakt, og av tykkelse ca. 10 millimeter.



Figur 15: Islegging på coandainntak på Dyrkorn (Foto: H. Opaker)

Måledata fra 16. november, viser at lufttemperaturen ved inntaket lå mellom $-1,5$ og -3 °C i løpet av døgnet. Temperatursensoren som var koblet direkte til coandarista viste i samme periode at temperaturen i stålet sank under 0 °C i totalt 14 timer, og at minimumstemperaturen var $-0,2$ °C. Temperatur i luft, vannet og på rista for 14.-17. november vises i Figur 16. Temperaturen som er oppgitt for vannet stammer fra en Vemco minilogger plassert i reguleringskammeret, mens lufttemperaturen er målt ved lukehuset. For de tre Vemco miniloggerne som måler vanntemperatur var forskjellen $0,01$ - $0,02$ °C. Det er så lite at det ikke er lagd graf for alle tre. Figur 16 viser at temperaturen til stålet er lavere enn vanntemperaturen, men høyere enn lufttemperaturen.



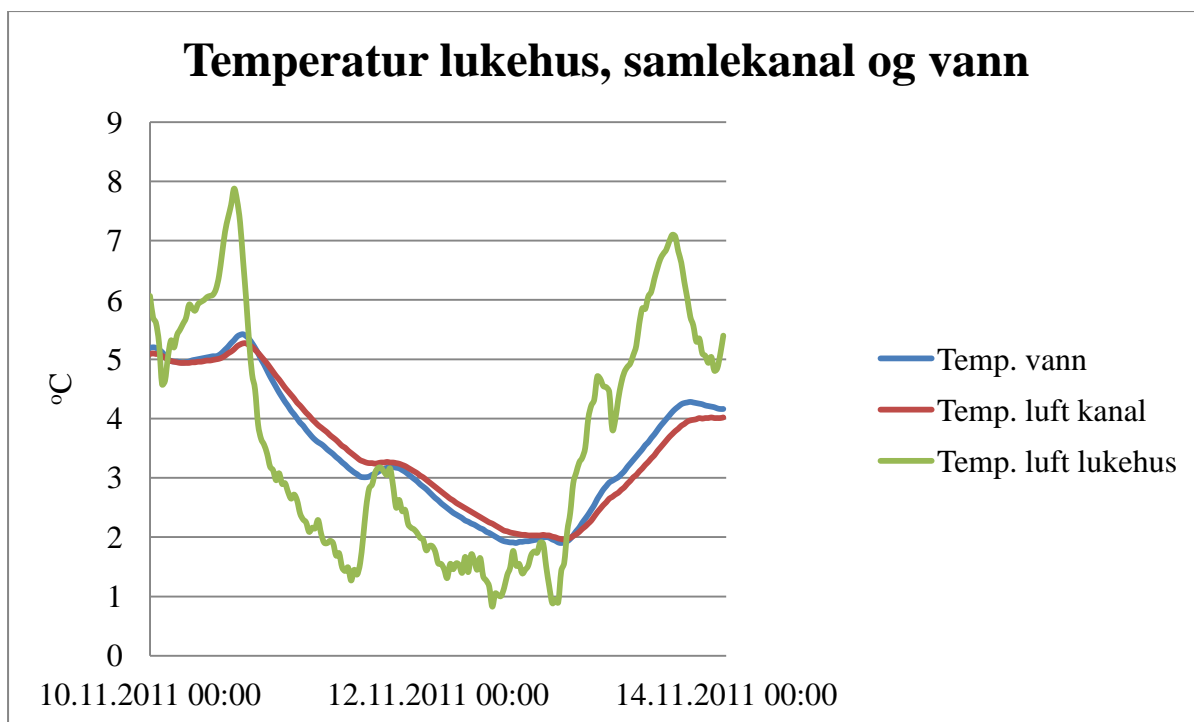
Figur 16: Temperatur ved Dyrkorn 14.-17. november

Temperaturmålingen av stålet i coandarista er foretatt på en avstivning av de tversgående stavene, høyt oppe på rista (Figur 10). Det betyr at målepunktet i normale situasjoner vil være dekket av vann. Det vil ikke boulder bars-ene, eller den nedre delen av rista, være. Derfor vil temperaturen i stålet her normalt være mer påvirket av lufttemperaturen enn ved målepunktet.

Figur 17 viser hvordan temperaturen i samlekanalen utvikler seg over tid, og hvordan den påvirkes av vanntemperaturen og lufttemperaturen utenfor inntaket. Grafen viser at lufttemperaturen i samlekanalen grovt sett følger vanntemperaturen, men at det er små forskjeller ved at lufttemperaturen endres saktere. Når vanntemperaturen synker, går ikke lufttemperaturen ned like raskt, og tilsvarende ved økning. Lufttemperaturen i samlekanalen kunne også hatt betydning for temperaturen i rista for tidsperioden 14-17. november. Grunnen til at lufttemperaturen er blitt utelatt i Figur 16, er at den i perioden følger vanntemperaturen omtrent nøyaktig. Det er derfor ikke mulig å lese av begge.

I følge SBE 39 var temperaturen i vannet oppstrøms damkrona underkjølt i omtrent to timer natt til 17. november. Laveste registrerte temperatur var $-0,0084\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Det er ikke registrert nedbør på Sjøholt mellom 15. og 17. november (eklima, 2012).



Figur 17: Temperatur Dyrkorn 10.-14. november

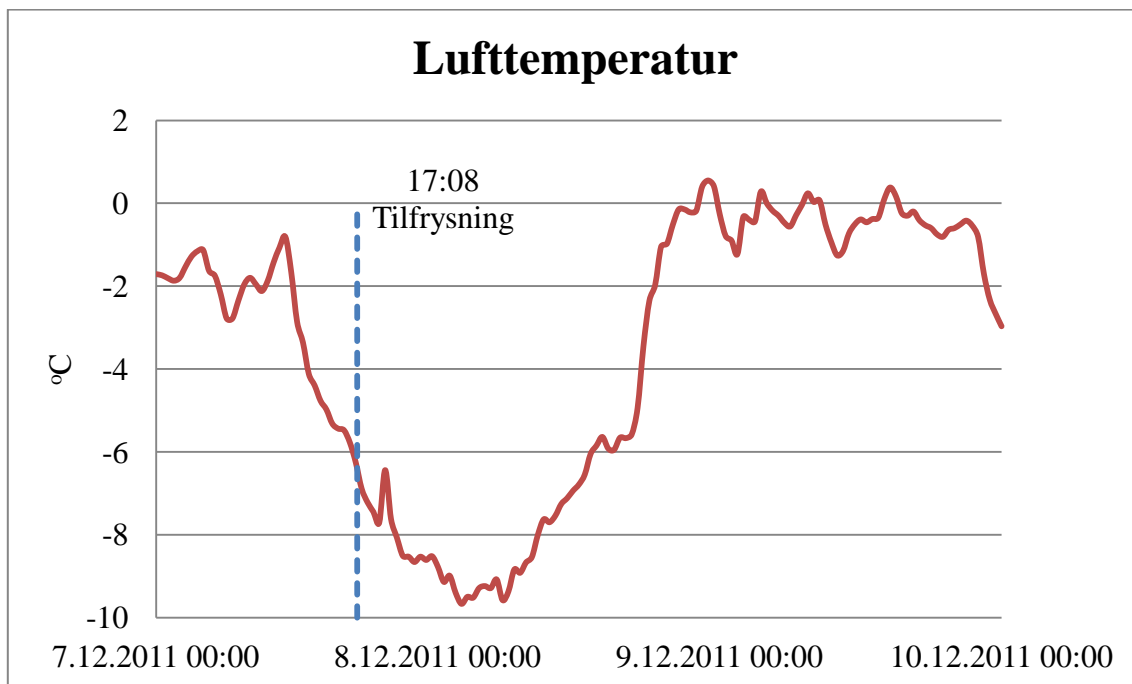
Under befaringen på Dyrkorn 17. november ble inntakskammeret tømt for å få tilgang til måleutstyr plassert i samlekanal og reguleringskammer. På innsiden av reguleringskammeret ble det på veggen observert en isrand av høyde ca. 50 millimeter som gikk rundt kammeret der vannspeilet hadde stått. Målinger hentet fra temperaturlogger i reguleringskammeret, viste at vanntemperaturen i reguleringskammeret hadde vært 0,05 °C kl. 23.30 den 16. november.

Vannføringen på Dyrkorn var lav 16.-17. november, med omtrent 100 l/s. Et par timer natt til 17. stoppet også produksjonen grunnet for lite vann til å kunne kjøre turbinen. Nedstoppingen skyldtes ikke tett inntak, men for lite tilsig.

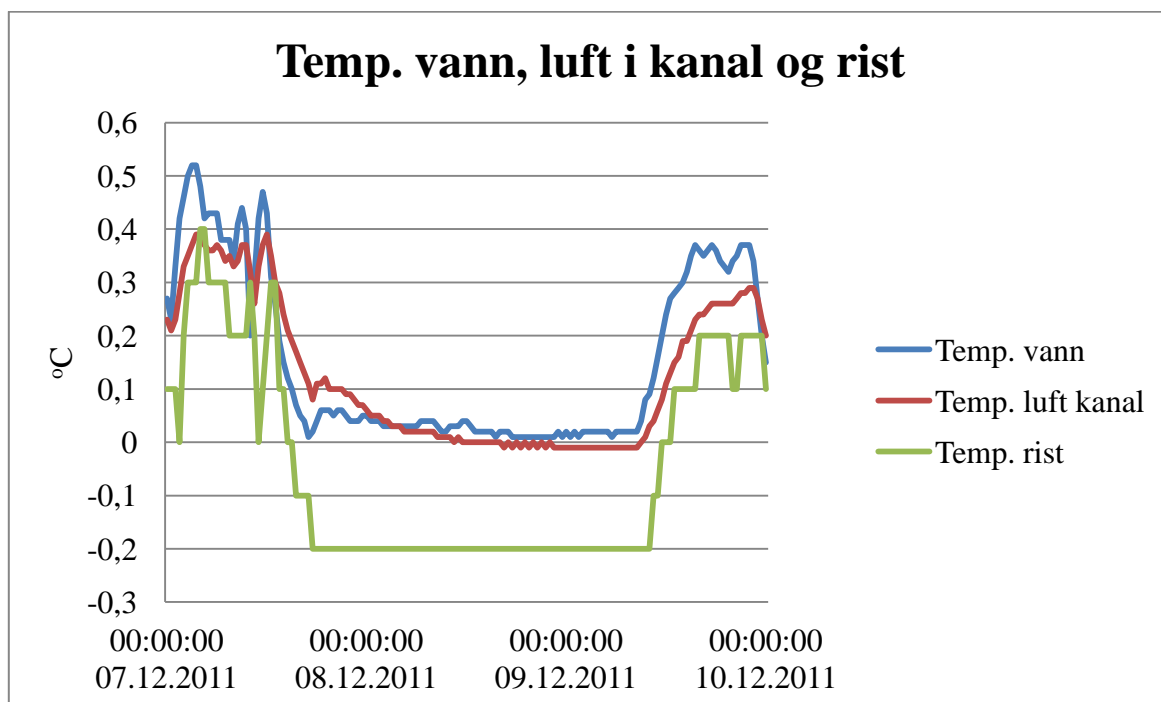
Det var ingen is på inntaksmagasinet før tilfrysningen fant sted, og heller ikke i etterkant.

5.2.2 Første fullstendige tilfrysning-7.desember

Før tilfrysningen inntraff var deler av inntaksmagasinet isfritt, og elva videre oppstrøms var åpen. Den 5. desember kl. 18 sank lufttemperaturen ved inntaket under 0 °C, og 7. desember falt lufttemperaturen fra ca. -2 til nærmere -10 °C på 14 timer. Lufttemperaturen ved lukehuset er vist i Figur 18. Temperaturen for vann og luft i samlekanal og for rist er vist i Figur 19. Årsaken til at graf for risttemperatur er rettlinjet, er lavere oppløsning på måling.

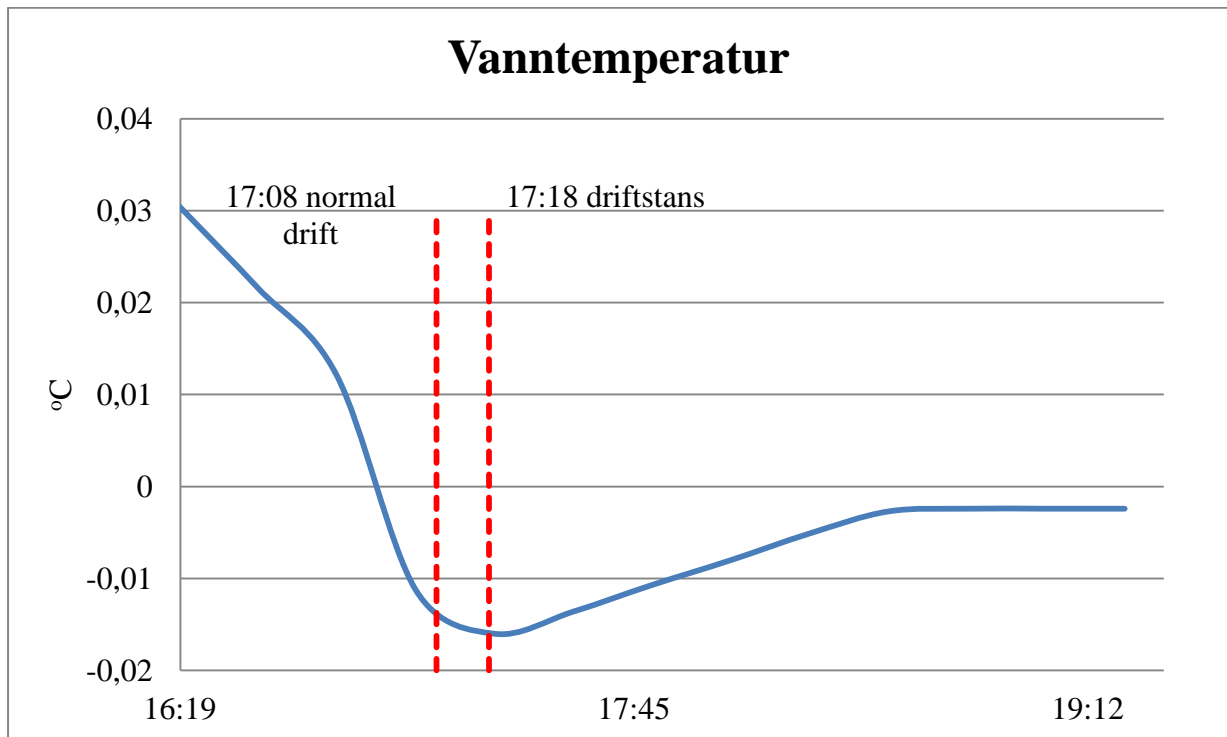


Figur 18: Lufttemperatur ved Dyrkorn 7.-10. desember 2011



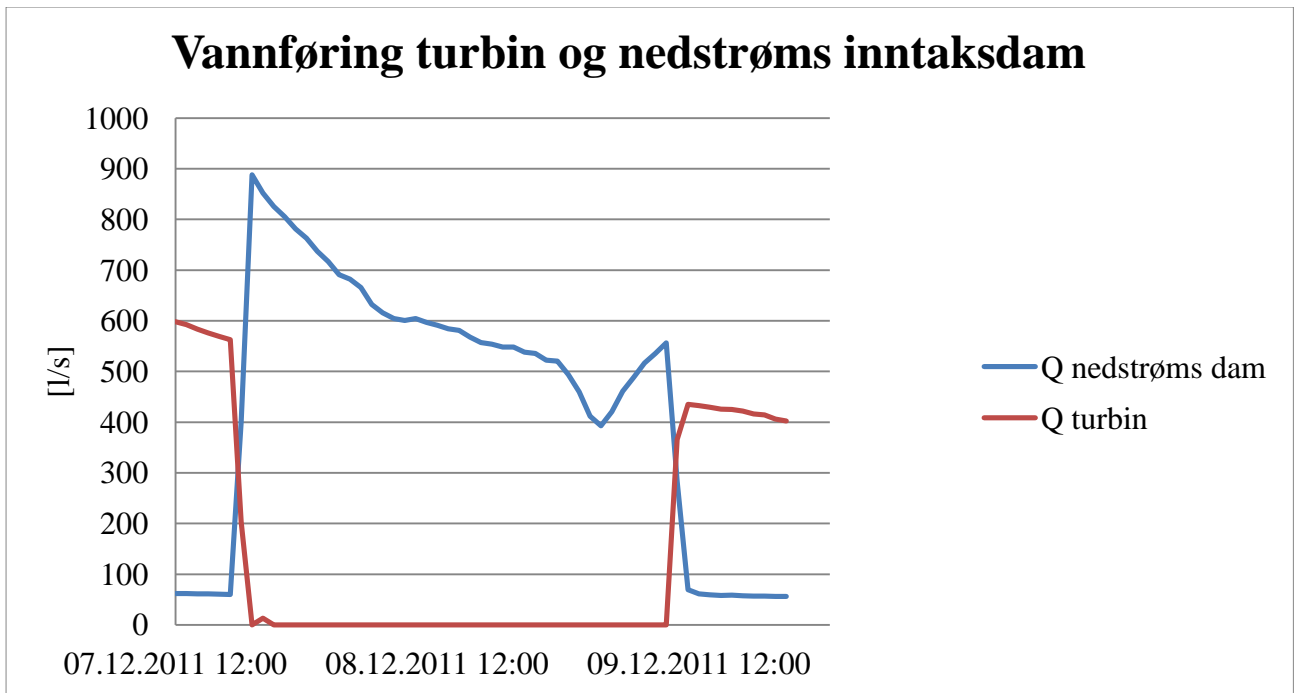
Figur 19: Temperatur ved Dyrkorn 7.-10. desember 2011

Målinger fra SBE 39 oppstrøms damkrona viste at vannet var underkjølt fra 7. desember kl. 17 frem til 9. desember kl. 06. Selve tilfrysningen gikk raskt og begynte ca. kl. 17 den 7. desember. Figur 20 er fra målinger fra SBE 39 i tidsrommet der tilfrysningen begynte.



Figur 20: Vanntemperatur ved Dyrkorn 7. desember

Dyrkorn Kraftverk gikk den 7. desember fra normal drift kl. 17.08 til full stopp 10 minutter senere. Kl. 17.08 tilsvarte produksjonen ca. 1 MWh. Det betyr at kraftverket brukte ca. 0,54 m³/s. Kl. 17.18 ble kraftverket stoppet. Tilsiget, som var for lite til å kjøre på, førte til at vannhøyden i kammeret økte. Ca. kl. 19.10 startet kraftverket igjen på grunn av økt vannstand i kammeret. Trykket sank raskt etter oppstart, og produksjonen ble stoppet etter 5 minutter. En ny oppstart ble forsøkt ca. kl. 19.45, men igjen ble det stopp etter 5 minutter. På tidspunktet tilfrysningen inntraff var det blitt mørkt, og bilder eksisterer derfor ikke. Figur 21 viser vannføring til turbin og vannføringen målt nedstrøms dammen for døgnene rundt gjenfrysningen. Verdien som er brukt fra minstevannføringsmålingen er høyeste verdi for hver time. Da kraftverket måtte stoppe var vannføringen omtrent 600 l/s.



Figur 21: Vannføring ved Dyrkorn

Figur 22 viser hvordan inntaket så ut 8. desember kl. 11. Det har dannet seg et massivt islag med tykkelse anslått til ca. 0,3 meter over hele rista. Utseende til isen minner mye om bunnis. Anslagsvis 30-40 liter vann i sekundet kom gjennom inntaket i den perioden.



Figur 22: Gjenfrost coandarist (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)

Det ble ikke observert vesentlig nedbør ved inntaket 7. desember, men nedbørsmåleren ved Ørskog registrerte 7,1 millimeter nedbør det døgnet (eklima, 2012). Målestasjonen ligger ca. 10 kilometer fra inntaket på Dyrkorn i luftlinje (gislink, 2012).

Etter at kraftverket stoppet ble det bestemt at det ikke skulle gjøres tiltak for å åpne opp inntaket, men heller la situasjonen utvikle seg av seg selv. Morgenen 9. desember ble det observert at det ikke rant vann over islaget på rista. Inntaket fungerte nå som normalt (Figur 23). I følge Per Kåre Skudal kunne kraftstasjonen ha blitt kjørt i gang ved midnatt, men det ble ventet til kl. 9.15 den 9. desember. Totalt ble driftstansen på 39 timer, mens den kunne ha vært ca. 30 timer (mailkorrespondanse med Per Kåre Skudal, 9.12.2011).



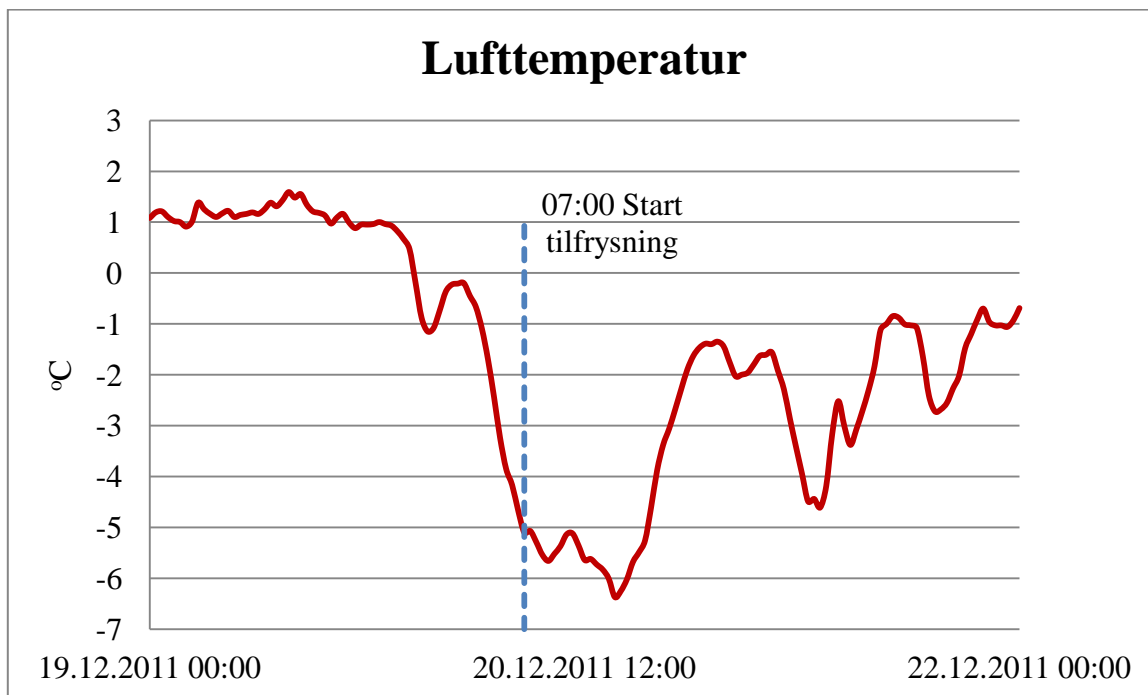
Figur 23: Coandarist med fritt innløp vann under islag (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)

Temperaturen målt for rista viste at den var underkjølt mellom kl. 15.30 den 7. desember og frem til kl. 11.00 den 9. desember. Laveste måling viste $-0,2$ °C.

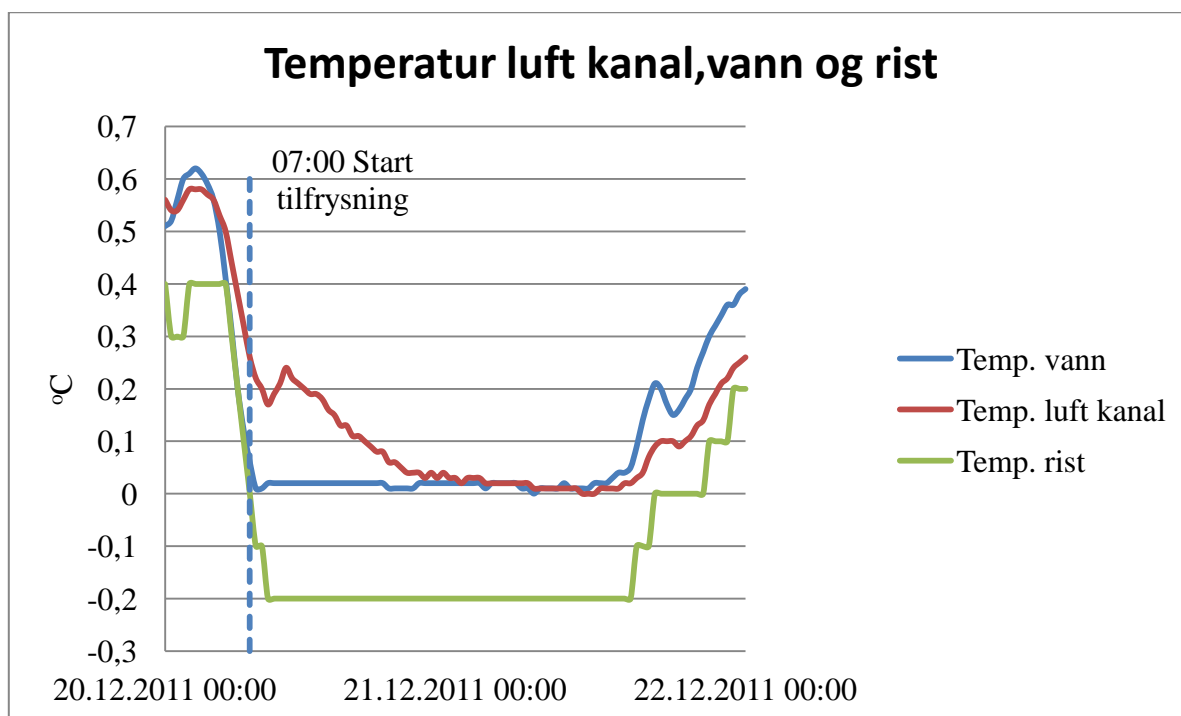
Det var ingen is i inntaksmagasinet den 5. desember, så det var høyst sannsynlig lite eller ingen is inntaksmagasinet 7. desember.

5.2.3. Tilfrysning 20. desember

Tilfrysningen 20. desember ligner på den som skjedde 7. desember. Tilfrysningen gikk imidlertid saktere. Prosessen gikk over to timer fra kl. 07 til 09. Det finnes bilder fra kl. 09, og videre utover dagen hvor inntaket samler stadig mer is. Temperaturen på Dyrkorn er vist i Figur 24. Målingen er fra minilogger plassert på lukehus. Temperaturen for vann og luft i samlekanal og for rist er vist i Figur 25.



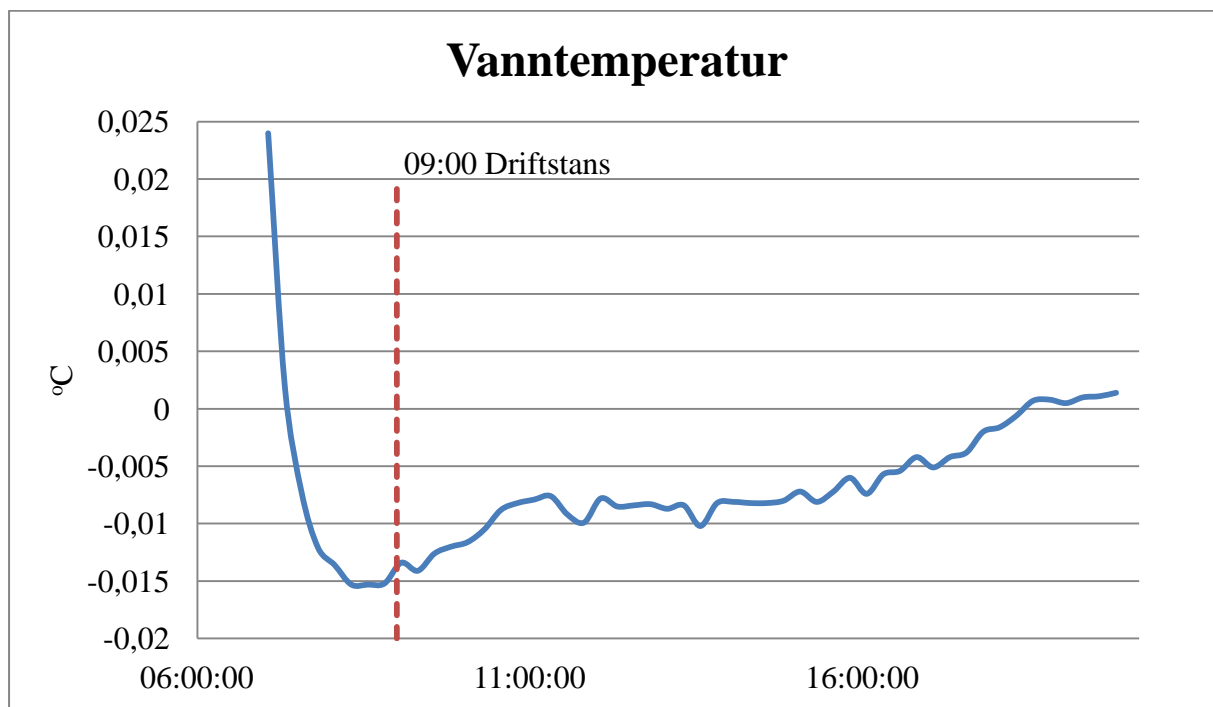
Figur 24: Lufttemperatur Dyrkorn 19.-22. desember 2011



Figur 25: Temperatur Dyrkorn 20.-22. desember 2011

Ved tilfrysningen var inntaksmagasinet delvist åpent, og det samme var elva videre oppstrøms. Det kom ingen nedbør på Sjøholt 20. desember (eklima, 2012), og det ble ikke observert nedbør på Dyrkorn i løpet av dagen.

Figur 26 viser vanntemperaturen i tilfrysningsperioden. Data er hentet fra SBE 39. Grafen viser et fall i temperatur, fra 0,024 °C til -0,015 °C på 75 minutter. Fallet i temperatur skjer samtidig med at inntaket begynner å fryse til. Etter tilfrysningen stiger vanntemperaturen sakte, og rundt kl. 18 er den igjen over 0 °C.



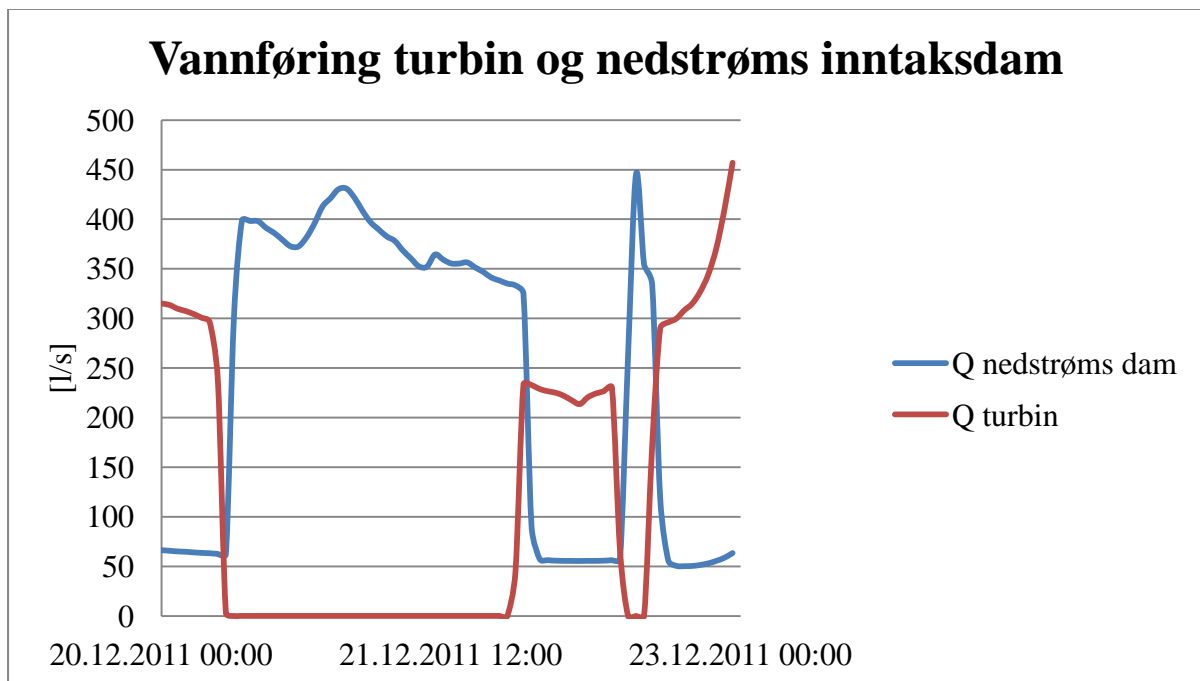
Figur 26: Temperatur Dyrkorn 20. desember

Det ble sett at det under tilfrysningen kom drivende klumper med is som festet seg til coandarista. Isen la seg først i bunn av rista, og bygde seg deretter videre oppover. Figur 27 viser hvordan coandarista så ut ca. kl. 14 den 20. desember, og det sees tydelig at isen samler seg i bunn av rista først.



Figur 27: Coandarista tilstoppet av is (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)

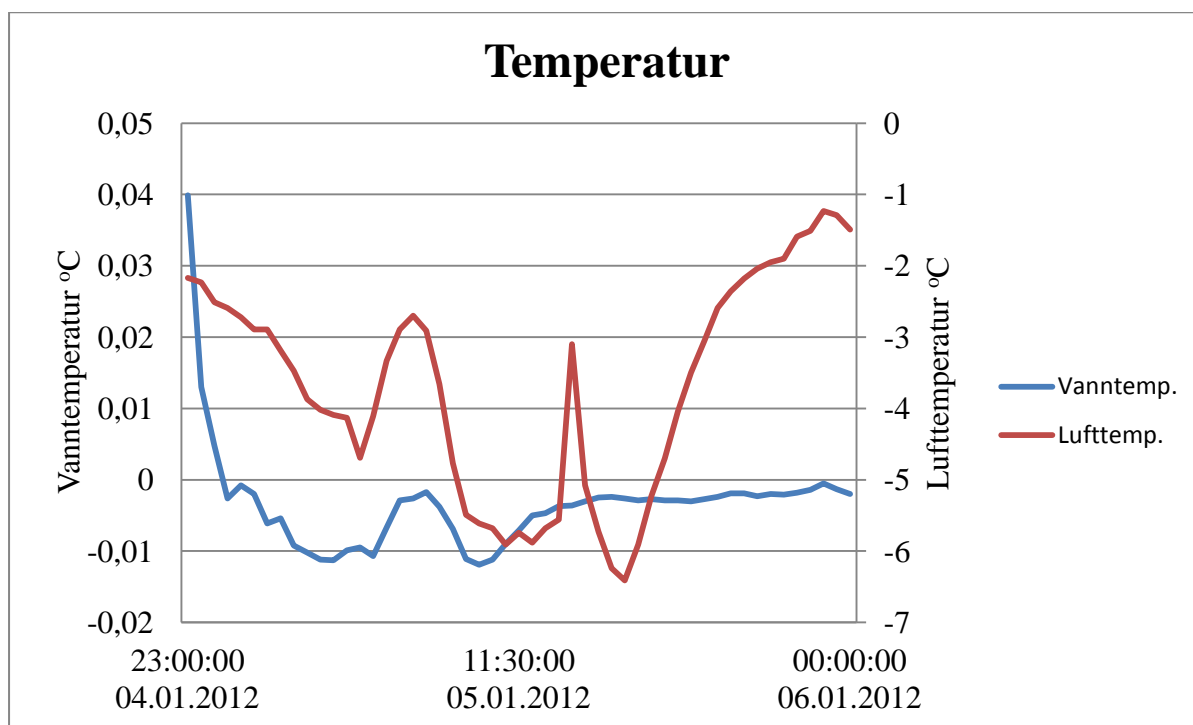
Kl. 21 den 21. desember var inntaket åpent igjen, og det var normal drift. Totalt ble driftstansen på 37 timer mellom 20. og 21. desember. I tillegg ble det driftstans tre timer morgenen 22. desember. Vannføring for perioden 20.-23. desember er vist i Figur 28.



Figur 28: Vannføring ved Dyrkorn 20.-23. desember

5.2.4 Tilfrysning 5. januar

Ved tilfrysningen 5. januar er dokumentasjonen dårligere enn ved de tidligere tilfellene. Det skyldes at føleren som registrerte temperaturen til rista ble revet vekk 22. desember. Luft- og vanntemperaturen på Dyrkorn 4. til 6. januar er vist i Figur 29. Målingene er fra minilogger plassert på lukehus og fra SBE 39.



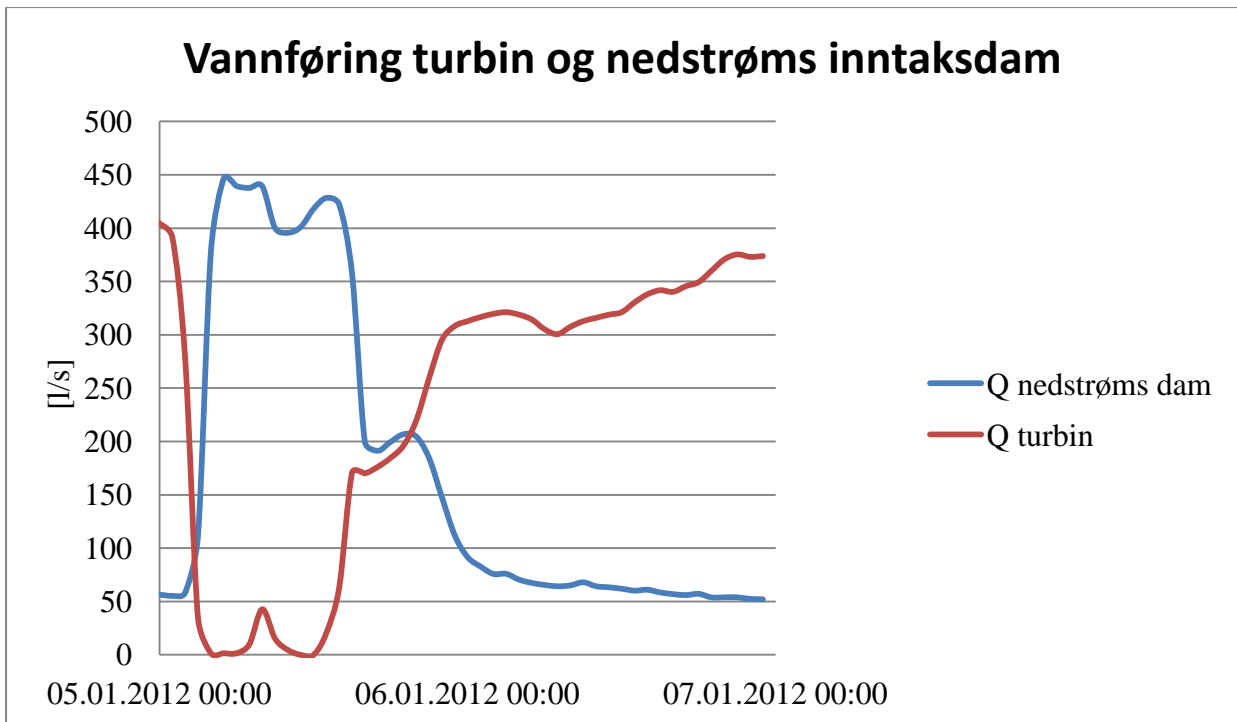
Figur 29: Temperatur Dyrkorn 4.-6. januar

Tilfrysningen 5. januar foregikk fra kl. 02 om natta. Kraftproduksjonen sank til null etter 2 timer. Vannet som rant gjennom etter det, var ikke nok til å få jevn produksjon. Fra kl. 14 begynner produksjonen å øke. Vannet har da funnet en vei inn under islaget på rista. Kl. 13 den 6. januar er situasjonen normal igjen, med minstevannføringen mindre enn 60 l/s. Totalt var det 34 timer der vannføringa nedstrøms inntaket lå over 60 l/s, og 20 timer der vannføringa var over 100 l/s. Vannføring ved minstevannsmærket og vannføringen til turbin 5.-6. januar er vist i Figur 30.

Islaget over rista ble liggende som et beskyttende lokk de neste dagene. Den 8. januar viser målingene at det var $-8,5$ °C i lufta ved inntaket. Inntaket fungerte da uten problemer.

Inntaksmagasinet var før tilfrysningen bare delvis tilfrost. Klokken 10.30 den 5. januar var kun nærmeste 0,1-0,15 meter foran damkrona og innløpet til elva i inntaksmagasin åpent.

Det ble registrert 7,8 og 11,7 millimeter nedbør på Sjøholt 4. og 5. januar (eklima, 2012).



Figur 30: Vannføring Dyrkorn 5.-6. januar

I forhold til de foregående tilfellene hvor coandarista har fryst igjen, skiller tilfrysningen 5. januar seg ut. Isen bygde seg ikke opp fra bunnen av rista. Figur 31 viser hvordan det har lagt seg is rundt boulder bars-ene. Bildet er tatt ca. kl. 10.20, og inntaket er tett.



Figur 31: Gjenfryst coandarist (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)

5.2.5 Tilfrysning 20. januar

En befaring ble foretatt på Dyrkorn 20. januar 2012. Vannføringen i elva var omtrent 300 l/s, grunnet lite nedbør i januar. Ved inntaket ca. kl. 10.45 ble det observert at det var i ferd med å danne seg is nederst på coandarista nærmest lukehuset. På det tidspunktet hadde større deler av inntaksmagasinet, anslagsvis ca. 75 %, et isdekke. Kun et mindre område langsmed land mot lukehuset var åpent (Figur 32). Lengden på råka er ca. 15 meter, mens bredden varierer fra ca. 1,5 til 5 meter. Totalt var arealet av åpent vann anslagsvis ca. 50 m². Det var kald vind på Dyrkorn 20. januar. Vinden bidrar til økt nedkjøling av vann på grunn av økt fordampning.



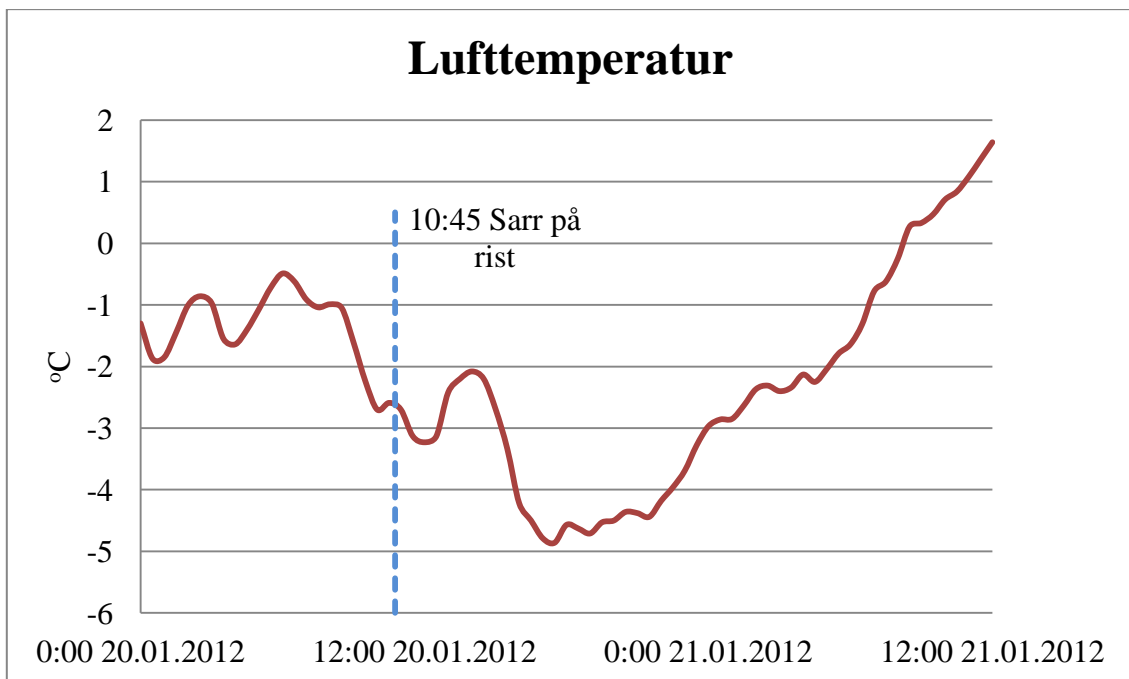
Figur 32: Åpen råk på inntaksdam (Foto: H. Opaker)

I den åpne råka ble det fra damkrona observert sarr, både enkeltpartikler og større klumper. Klumpene hadde samme konsistens som slush (Figur 33). Ved innløpet til inntaksmagasinet var det også sarr, og det ble her sett en sarrpannekake med diameter ca. 0,3 meter. Strømningsforholdene i elva oppstrøms og i innløpet til magasinet, med mye turbulens, bidrar høyst sannsynlig til sarrproduksjonen.



Figur 33: Sarr fra elva (Foto: H. Opaker)

Temperaturen døgnet før 20. januar hadde vært over 0 °C. Natt til den 20. sank temperaturen under 0 °C, og kl. 12 sank den under -3 °C (Figur 34). Videre i løpet av kvelden sank den ned mot -5 °C.



Figur 34: Lufttemperatur Dyrkorn 20.-22. januar

Senere, omtrent klokka 13, hadde gjenfrysingen økt i tempo. Sarrret lå så tett i overflaten av vannet at nærmest damkrona begynte det å danne seg et isdekke. Ved undersøkelse var den nye isen på rista myk, porøs og inneholdt mye vann, noe som er typisk for is som dannes fra sarr. Isen skilte seg dermed klart fra eldre is på boulder bars-ene som var hard og kompakt. Det lå is fra sarr langs bunn av hele rista, men klart mest ved enden med den åpne råka. Det rant vann over coandarista langs hele dens lengde, men det var tydelig at vanntapet var størst der det lå mest sarr. Kraftverket var fortsatt i drift, men med redusert produksjon. Ved minstevannmerket hadde vannføringen økt fra ca. 50 l/s til 80 l/s. For å se om isen som la seg på coandarista også trengte inn mellom stavene, som har lysåpning på en millimeter, ble det brukt en skrutrekker som ble stukket inn mot åpningene. Det ble gjort på 5-6 bredder mellom boulder bars. Vertikal lengde av isen som ble fjernet var mellom 0,3-0,4 meter. Undersøkelsen viste at isen som la seg på rista var et rent overflatefenomen. Samtlige av spalteåpningene som ble undersøkt var åpne og rene uten noe tegn til is (Figur 35).



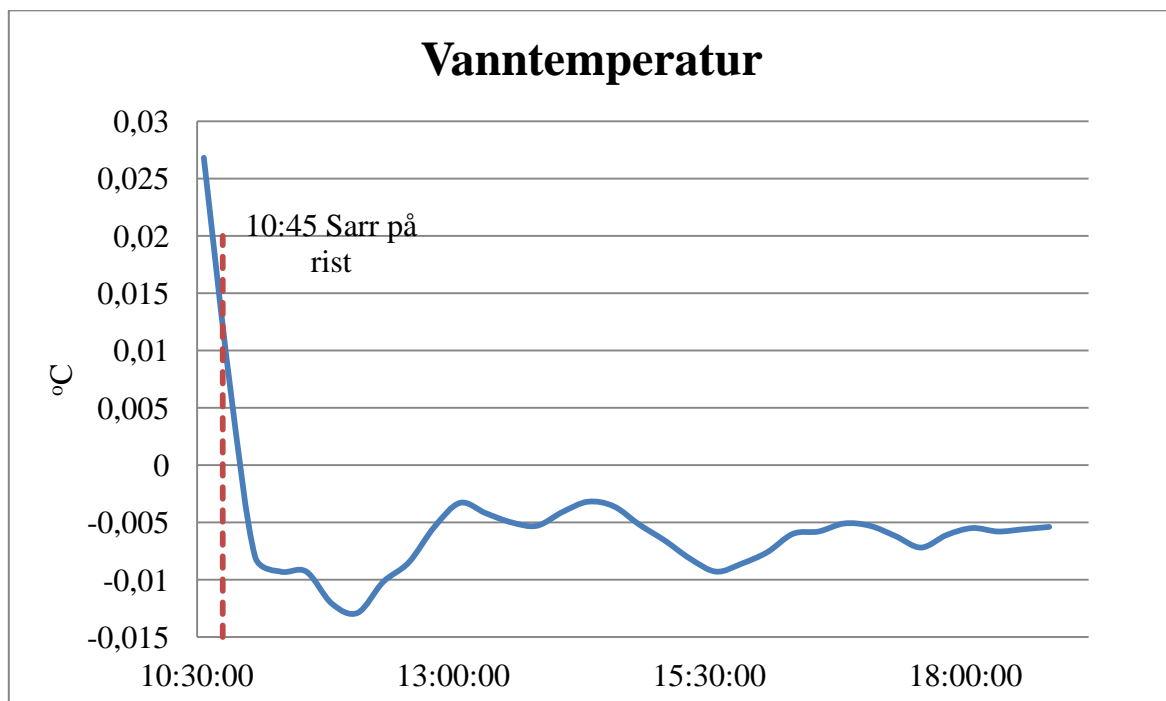
Figur 35: Avskrapning av sarr (Foto: H. Opaker)

Ved senere undersøkelser av isen på rista ca. kl. 16 ble det funnet aktive sarrpartikler. Med aktiv menes at de fortsatt er klebrige. Partiklene var typisk for sarr diskosformede, og med diameter på ca. 2-4 millimeter (Figur 36). Partiklene klistret seg til skrutrekkeren som ble brukt, og var deretter meget vanskelige å få av. Partikkelen avbildet i Figur 36 er uniform med avrunde kanter, men det ble også funnet partikler med skarpe kanter.



Figur 36: Aktiv sarrpartikkel (Foto: H. Opaker)

Vanntemperatur for 20. januar er vist i Figur 37. Data er hentet fra SBE 39. Grafen viser at det var et fall i temperatur mellom kl. 10.34 og 10.49 på ca. 0,02 °C. Den første isen ble fanget opp på coandarista omtrent i det tidsrommet. Vanntemperaturen sank videre under 0 °C, og vannet forble underkjølt frem til ca. kl. 8 den 21. januar.



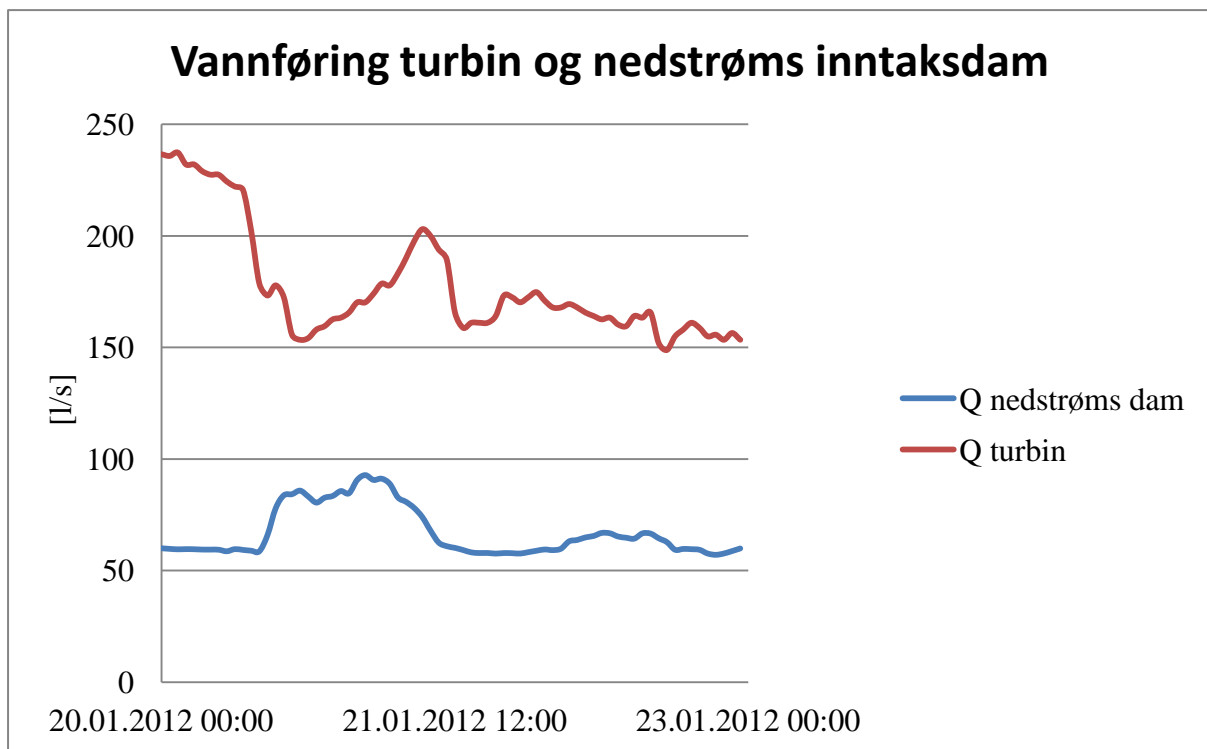
Figur 37: Temperatur Dyrkorn 20. januar

I løpet av befaringen ble det sett ned i reguleringskammeret for å se om det kunne være is der nede. Det skjedde ca. kl. 16. Det ble da sett 2-3 mindre klumper av sarr. Diameteren på

klumpene ble anslått til å være opptil ca. 0,15 meter. Det ble tatt bilder fra reguleringskammeret, men lysforholdene gjorde at kvaliteten ble lav.

Omtrent kl. 16 var råka hvor det tidligere var blitt sett mye sarr, blitt gjenfrost de nærmeste 5 meterne fra damkrona. Også videre langs råka ved land begynte det å danne sag fast is.

Vannføringen ved Dyrkorn under tilfrysningen 20. januar og døgnene etterpå, er vist i Figur 38.



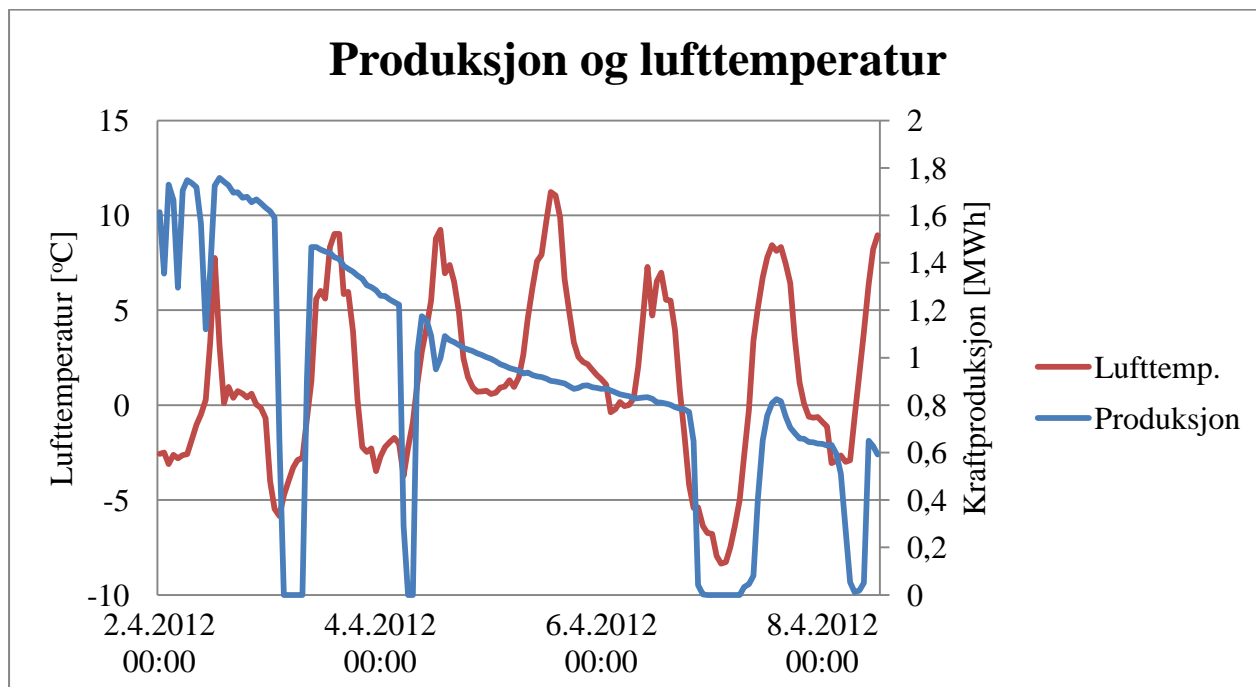
Figur 38: Vannføring på Dyrkorn 20.-23. januar

Pålagt minstevannføring er 50 l/s. Det betyr at de timene vanntapet var størst var det omtrent 40 l/s. Fra en vannføring på 40 l/s vil produksjonen over en time bli ca. 75 kWh. Totalt ble det 19 timer med tap av vann som følge av tilfrysninga. Tid med tap av vann er fra målingene av minstevannføring, og er tiden det er registrert vannføring over 60 l/s.

I løpet av natt til 21. januar dannet det seg et fast isdekke over hele coandarista og inntaksmagasinet. De første timene om morgenen 21. januar kunne det sees at det punktvis rant noen liter vann over isen på rista. Senere på dagen rant det ikke vann over. Den 28. desember ble det åpnet et tapperør som går gjennom dammen, fra samlekanalen til inntaksmagasinet. Det betyr at fra den datoen går ikke lenger alt vannet gjennom coandarista. Tapperøret har diameter på 300 millimeter. I dagene etter 20. januar var vannføringen ca. 200 l/s.

5.2.6 Tilfrysning april

I løpet av den første uka av april skjedde det flere mindre tilfrysninger på coandarista. Figur 39 viser korrelasjonen mellom lufttemperatur og kraftproduksjon 2.-8. april. Temperaturdata stammer fra minilogger plassert på lukehuset.



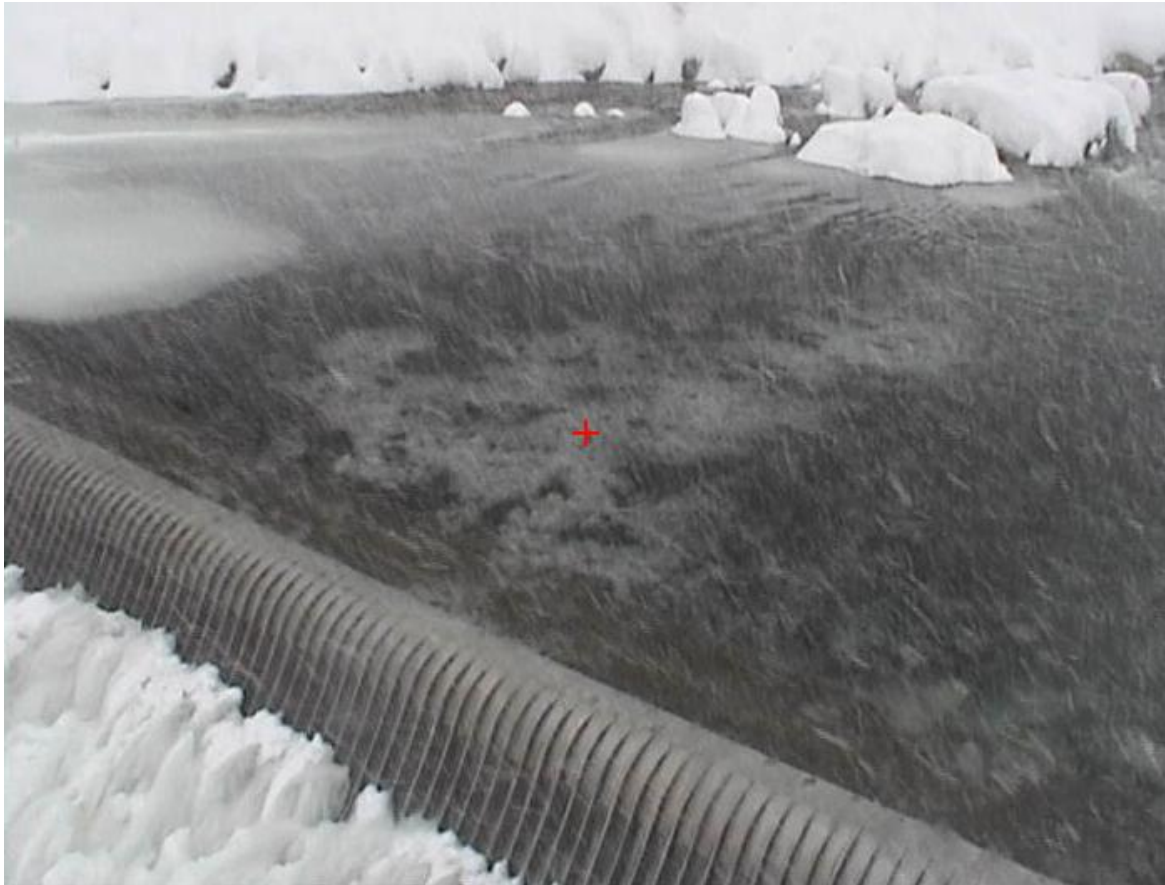
Figur 39: Lufttemperatur og kraftproduksjon Dyrkorn

Perioden var preget av mye nedbør flere av dagene. Tabell 2 viser registrert nedbør på meteorologisk institutts målestasjon på Sjøholt (eklima, 2012).

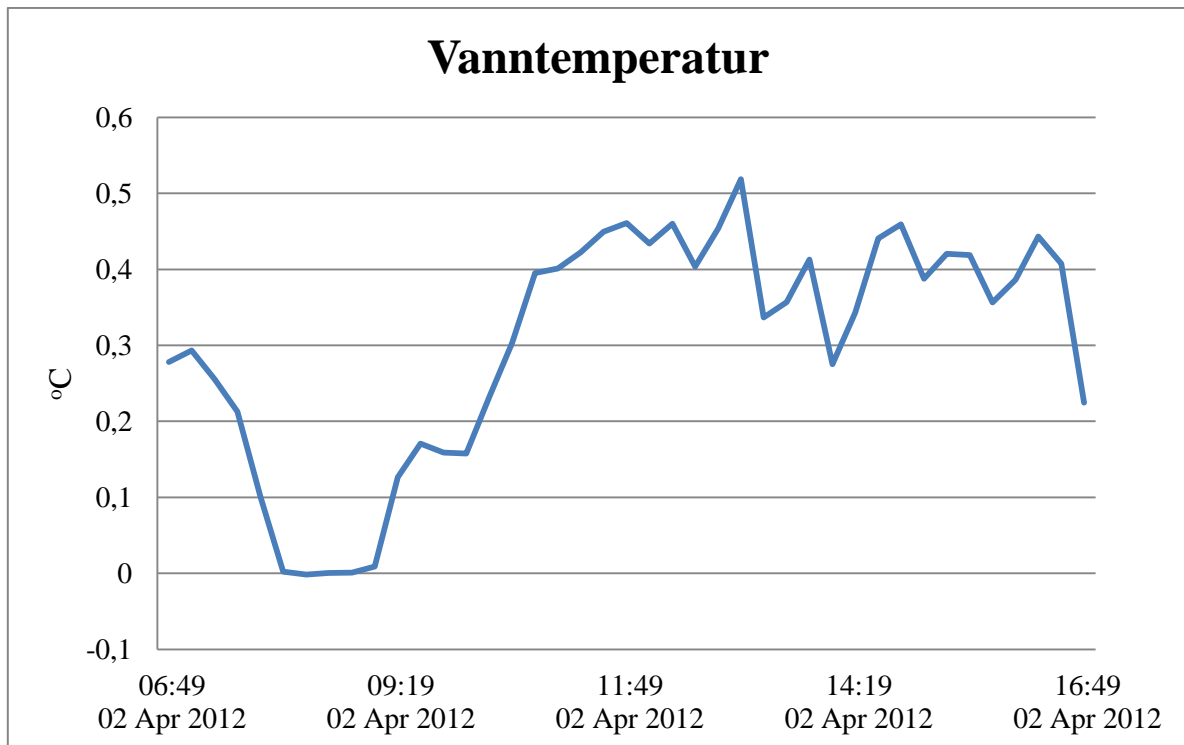
Tabell 2: Nedbør Dyrkorn 1.-7. april

Dato	1. april	2. april	3. april	4. april	5. april	6. april	7. april
P (mm)	21,5	14,5	37,1	8,2	16,1	8,2	0,8

Mars var en varm måned, så alt av is var borte fra Dyrkornelva og inntaksmagasinet. Nedbøren som kom som snø, dannet klumper av slush som kom drivende med elva. I konsistens ligner klumpene mye på sarr, og de skaper samme problem. Figur 40 viser hvordan slush dannet fra snø kommer drivende i inntaksmagasinet. Bildet er fra 2. april ca. kl. 10 om morgenen. Kl. 08.30 var det ingen tegn til is i vannet, og det var opphold. Kl. 09.30 begynte det å snø, og det kom mye slush drivende i elva. Figur 41 viser at vannet mellom ca. kl. 7 og 17 aldri var underkjølt. Data er hentet fra SBE 39.



Figur 40: Slush i inntaksdam fra snøfall (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)



Figur 41: Vanntemperatur Dyrkorn 2. april

Situasjonen fra 2. april gjentok seg senere i uka. Større mengder snø direkte på elva og inntaksmagasinet førte til produksjonsstans flere dager. Den 2. april ble ikke kraftverket stanset, men produksjonen var redusert.

Ved gjenfrysingen som skjedde 7. april var det 0,8 millimeter nedbør på Sjøholt. Det er vesentlig mindre enn dagene før hvor nedbøren var mellom 8,2 og 37,1 millimeter. Det var kaldt 7. april, med laveste lufttemperatur på $-8,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ kl. 02.00. Målingene fra SBE 39 viste at 7. april var vannet aldri underkjølt, men det hadde en temperatur ned mot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mellom 15.-18. april var det kortere driftstans (3-5 timer), eller redusert produksjon hvert døgn om natta. Det ble tidlig om morgene observert at det lå is langs boulder bars-ene. Data fra SBE viser at vanntemperaturen sjelden var under $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ de døgnene, og det var ikke nedbør på Sjøholt (eklima, 2012). Figur 42 er fra 17. april ca. kl. 08.30. På bildet skinner solen på nærmeste del av rista, og tiner opp isen. På den andre delen renner vann over rista.



Figur 42: Coandarist delvis gjenfryst 17. april (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)

Totalt var det tre tilfeller med driftstans den første uka i april. Varigheten var henholdsvis 5, 3 og 13 timer. I tillegg kommer en periode på 5 timer 8. april der produksjonen gikk ned mot null.

5.2.7 Total nedetid vinteren 2011/12

Med nedetid regnes timene for gjeldene døgn eller periode der produksjonen har vært null. Tapt produksjon er funnet ved å ta restvannføring over 70 l/s ved minstevannsmarket, og regnet ut hvor mye restvannføringen ville gitt i produksjon. 70 l/s er valgt fordi at minstevannføringen er blitt sluppet gjennom ei bunnluke, noe som har gitt unøyaktig minstevannføring. Pålagt minstevannføring er 50 l/s , men det er blitt sluppet mer gjennom

luka i perioder. Tall for tapt produksjon for 1.-20. april er antageligvis er mye høyere enn reelt. Det på grunn av at restfeltet mellom dam og minstevannsmarket nok tidvis alene har gitt vannføring høyere enn 70 l/s. Resultatene er vist i Tabell 3. Her er salgsverdi av tapt produksjon regnet ut med pris 0,4 kr pr kWh.

Tabell 3: Produksjonstap vinter 2011/12

Dato	Nedetid [timer]	Tapt prod. [MWh]	Verdi [kr]
7.-9. desember 2011	39	40,5	16000
20.-21. desember 2011	40	22,7	9000
5. januar 2012	5	9,3	4000
20. januar 2012	0	0,5	200
April 2012	24	77,5	31000

I løpet av månedene november til og med mars var kraftproduksjonen 3,62 GWh ved Dyrkorn Kraftverk. Det betyr at tapt kraftproduksjon grunnet tilfrysning utgjorde ca. 2 % av produsert kraft for vinteren 2011/12. April måned er utelatt her, grunnet usikkerhet i tapstall. Kraftproduksjonen tapt som følge av nettutfall etter stormen Dagmar 26. desember er heller ikke medregnet. Tapt produksjon vil selvfølgelig kunne variere mye fra vinter til vinter, avhengig av værforhold. Tiltak for å redusere tapet kan også gjøres for å bedre situasjonen. Utgiftene til nødvendig vedlikeholdsarbeid og andre driftsutgifter forbundet med coandainntaket har i løpet av høsten og vinteren nært null. Tafjord Kraftproduksjon ønsker imidlertid å bruke en time neste høst for å skrubbe rista ren for barnåler før vinteren kommer (samtale med Per Kåre Skudal, 25.4.2012).

5.2.8 Kuldeperioder uten tilfrysninger

I løpet av vinteren sank lufttemperaturen flere ganger ned mot nivået hvor tilfrysninger inntraff. Ved et par av de tilfellene ble det ingen problemer for kraftverket.

31. desember sank lufttemperaturen ved inntaket til -6 °C. Lufttemperaturen hadde mellom 22. og 30. desember vært positiv, men natt til 31. desember sank den. Over 16 timer mellom kl. 23 den 30. og kl. 11 den 31. desember var gjennomsnittstemperaturen -4,5 °C. Dessverre er det ingen bilder fra inntaksmagasinet 31. desember som kan si hvordan forholdene var.

8. januar var lufttemperaturen ved inntaket nede i -8,5 °C. Lufttemperaturen hadde etter tilfrysningen 5. januar vært positiv mellom 6. januar kl. 11.30 og 8. januar kl. 4. Riktignok falt lufttemperaturen ned mot -0,5 °C i 2 timer natt til 7. januar, men det er sett bort fra. Gjennomsnittstemperaturen i lufta var mellom kl. 5 den 8. desember og kl. 5 den 10. desember ca. -6 °C. Tilfrysningen som skjedde 5. januar medførte at det var isdekke over hele inntaksrista og –magasinet når væromslaget kom 8. januar.

29. januar til 2. februar var det en periode med lufttemperaturer ned mot -11,6 °C. Gjennomsnittlig temperatur over døgnene var -6 °C. Etter tilfrysningen som skjedde 20. januar lå det fortsatt et solid isdekke i inntaksmagasinet og på rista.

5.3 Målinger av sarrmengde og isprofiler

Forholdene under vinteren gjorde at det planlagte arbeidet med oppveing av sarr og måling av isprofiler ikke lot seg gjøre. Den 20. januar hvor det var sarrproduksjon i elva samtidig mens en befaring ble gjennomført, var ikke alt det praktiske rundt målingene i orden. Det var uansett ventet at en slik situasjon ville oppstå igjen i februar eller mars. Det gjorde det ikke på grunn av uvanlig høy temperatur for perioden kombinert med stabile værforhold. På grunn av lite målinger i felt i februar og mars, ble det istedenfor gjort laboratorieforsøk.

5.4 Gjenåpningsprosess

For å forklare hva som skjer når inntaket åpner seg opp etter tilfrysning, er det naturlig å se på måledata og regne på varmeutveksling. Lufttemperaturen ute og inne i samlekanalen har betydning. Det har også vanntemperaturen, og for å se om det har vært varmeutveksling mellom is på rist og vann kan måledata fra SBE 39 og miniloggere i samlekanal sammenlignes. Dersom vanntemperaturen har sunket mellom damkrona (måling SBE 39) og samlekanal (måling miniloggere), kan det tyde på energiavgivelse til isen.

Mengden is som må smeltes må først estimeres for å kunne regne på energibalanse. Ved å anta at det smeltes 10 millimeter tykt islag over hele ristas lengde, og i høyde 0,5 meter gir det $0,075 \text{ m}^3$. Isen har høy porøsitet, så det antas vekt 500 kg/ m^3 . Mengde is blir omtrent 40 kg.

Stålet i rista har noe betydning for varmebalansen. Stål har imidlertid så lav varmekapasitet at bidraget er så lite at det utelukkes i den videre beregningen.

Ved utregning av luftvolum i samlekanal og reguleringskammer er det regnet med full vannstand. Luftutskiftning skjer så sakte at den kan neglisjeres. Det understøttes av målinger av lufttemperatur i samlekanal.

Luftvolum i samlekanal er ca. 15 m^3 , og i reguleringskammer ca. 88 m^3 . Det gir totalt volum ca. 103 m^3 .

Nødvendig senkning av lufttemperatur for hele luftvolumet i samlekanal og reguleringskammer vil være 2,5 grader for å smelte en kg is. For å regne på hvor mye energi vannet avgir er det valgt å se på måledata fra faktiske hendelser.

Ved gjenåpning 9. desember kl. 10 var vanntemperaturen $0,13 \text{ }^\circ\text{C}$. Den steg over $0 \text{ }^\circ\text{C}$ kl. 8. Målinger fra SBE og miniloggere viser at vanntemperaturen etter rista var opptil $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$ kaldere enn før rista. Lufta i samlekanalen var imidlertid kaldere enn vannet nå, så deler av avkjølingen kommer antageligvis herfra. I tiden etter kl.8 og frem til kl. 10 var det i en halv time forskjell i målingene fra SBE og minilogger. Gjennomsnittlig forskjell var $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$, men usikkerheten ved miniloggeren er $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Antas det at hele forskjellen skyldes avgivelse av energi til is, så trengs det ca. 2700 liter vann for å smelte 1 kg is. Vannføring var ca. 500 l/s. Det vil imidlertid bare være vannet som renner under isen som kan bidra til å smelte isen fra undersiden og danne fritt innløp under iskappen. Dersom det rant 50 l/s gjennom rista, vil det si at 40 kg is kan smeltes på ca. 35 minutter.

Gjenåpningen 21. desember skjedde kl. 22. Da var vanntemperaturen 0,35 °C. Den steg over 0 °C kl.10.30. Mellom 10.30 og 22 var det forskjell i vanntemperaturmålingene i 4,5 timer. Forskjellen var ca. 0,02-0,03 °C kaldere i samlekanalen. Vannføring var ca. 300 l/s.

Gjenåpning 5. januar skjedde kl. 21, og da var vanntemperaturen -0,002 °C. Vannet forble underkjølt frem til kl 13.30 den 6. januar.

Tilfrysning 20. januar startet ca. kl. 11. Vannet forble underkjølt frem til kl. 7 den 21. januar. Inntaket ble aldri tett, men vanntapet var redusert fra ca. 40 l/s på det meste til ca. 10 l/s kl. 7 den 21. januar.

Bidraget fra lufttemperatur utendørs trengs ikke å regnes med. Ved gjenåpningene 9. desember, 21. desember, 5. januar og 21. januar var lufttemperaturen henholdsvis -1,-1, -2 og -1 °C.

5.5 Laboratorieforsøk

Etter at det mislyktes å fremstille sarr, ble en erstatning forsøkt fremstilt. Erstatningen skulle ha samme konsistens og noenlunde samme størrelse på partiklene. Etter å ha prøvd forskjellige løsninger med snø og is, ble en løsning med snø valgt. Snø ble hentet inn og satt inn i fryserommet. På grunn av vårtemperaturer i Trondheim i midten av april var snøen både vasstrukken og grovkornet.

Finknusing av snø, og tilsetting av vann med temperatur 0 °C ga en slushblanding som lignet konsistensen til sarr som har klumpet seg sammen. Partiklene i blandingen var av størrelse fra ca. 10 millimeter i diameter til mindre enn 1 millimeter. Det som skilte seg fra sarrpartikler observert i felt var at partiklene produsert i lab generelt var mer kantete.

For at slushblandingens skulle være mest mulig lik ved forsøkene ble en fremgangsmåte for fremstilling bestemt. Blandingens ble gjort i en bøtte der det først ble lagt i finknust snø opp til 5 liter-merket. Videre ble det fylt opp med vann til 7 liter-merket.

Vekten til slushblandingens lagd på den måten ble målt til å være 0,27 kg for 0,3 liter, det vil si egenvekt på 0,9. Målinger av bunnis viser at egenvekten ligger mellom 0,36 og 0,9, så tettheten er i det øvre sjiktet av hva som er målt i naturen (Stickler og Alfredsen, 2009).

Ved prøving viste det seg at 15 beger av størrelse 0,3 liter var passende mengde å tilsette under forsøket.

I fryserommet varierte temperaturen etter at termostaten var innstilt med ca. 3 °C. Etter å ha blitt innstilt på en temperatur tillot aggregatet at temperaturen steg med ca. 2 grader før det startet opp. Når flere personer oppholdt seg i fryserommet, samtidig med at forsøket stadig medførte at døren til rommet ble åpnet opp, varierte temperaturen i rommet en del.

5.5.1 Romtemperatur -5 °C

Ved første forsøk ble vanntemperaturen målt til å være 2,6 og 1,1 °C. Under forsøket smeltet mye av slushen som ble tilsatt. Resultatene var derfor ikke av ønsket kvalitet. Forsøket ble derfor gjentatt senere. Problemet med å få temperaturen i vannet ned mot null skyldes at pumpa tilfører energi.

Forsøk 1: Før start var rista ren for is. Inntak av vann gjennom rista skjer på de øverste 20-30 millimeterne. Etter start av forsøket la is seg nedenfor inntakssonen i en bredde av ca. 20 millimeter. Her bygde det opp seg en isrand. Noe skled over isranden, eller dyttet deler av randen videre ned til bunnen av rista. Ved slutt av forsøk var isranden rett nedenfor inntakssonen av tykkelse ca. 50 millimeter. Betraktelig mindre is lå spredt nedenfor isranden (Figur 43). Inntaket var fortsatt i funksjon, men det sprutet opp vann punktvis der isen gikk opp til akselerasjonsplata. Fra baksiden kunne det sees enkelte ispartikler mellom stavene.



Figur 43: Islag ved slutt av forsøk – 5 °C (Foto: H. Opaker)

Forsøk 2: Ren rist ved start av forsøk. Slushblandingen ble annerledes på grunn av at det ble brukt snø fra en ny bøtte. Snøen har vært plassert på eget fryserom, men rommet klarte ikke å holde temperaturen nede over flere døgn. De siste 3 døgnene før forsøk lå temperaturen mellom 0 og 3 °C. Det ga snø som var grovkornet og vannholdig mot bunnen. Selve slushblandingen ble mer vannholdig, og av det som havnet på rista var det flere større biter (10-30 millimeter). Isleggingen skjedde også nå fra inntakssonen og nedover. Isranden ble ca. 40 millimeter høy. Isen la seg punktvis helt opp til akselerasjonsplaten.

5.5.2 Romtemperatur -7 °C

Forsøk 1: Ved start av forsøk var det ingen is på rista på forhånd. Is begynte å legge seg først ved randen nedenfor sonen med vanninntak. Det la seg etter hvert et 20-30 millimeter tykt lag over hele rista, men enkelte områder fra midten av rista og nedenfor forble isfrie. Kunne underveis se enkelte store klumper (30-40 millimeter diameter) som gled over, spesielt i starten. Ved undersøkelse ble sporadiske ispartikler mellom stavene sett. Etter avskrapning ble det forsøkt å helle vann på nedre del av rista for å se om den var tett. Rista var da åpen.

Forsøk 2: Ved start av forsøk var det is på rista etter forrige forsøk. Isen ligger som ei tynn hinne på stavene, og også punktvis mellom stavene. Sammenfallende resultat som i forsøk 1, men med en mindre forskjell i hvordan isen la seg. Den la seg til å begynne med nederst av rista, så etter ca. 10 sekunder stoppet noe is nedenfor inntakssonen. Det førte til en oppstuvning av is øverst på rista (Figur 44).

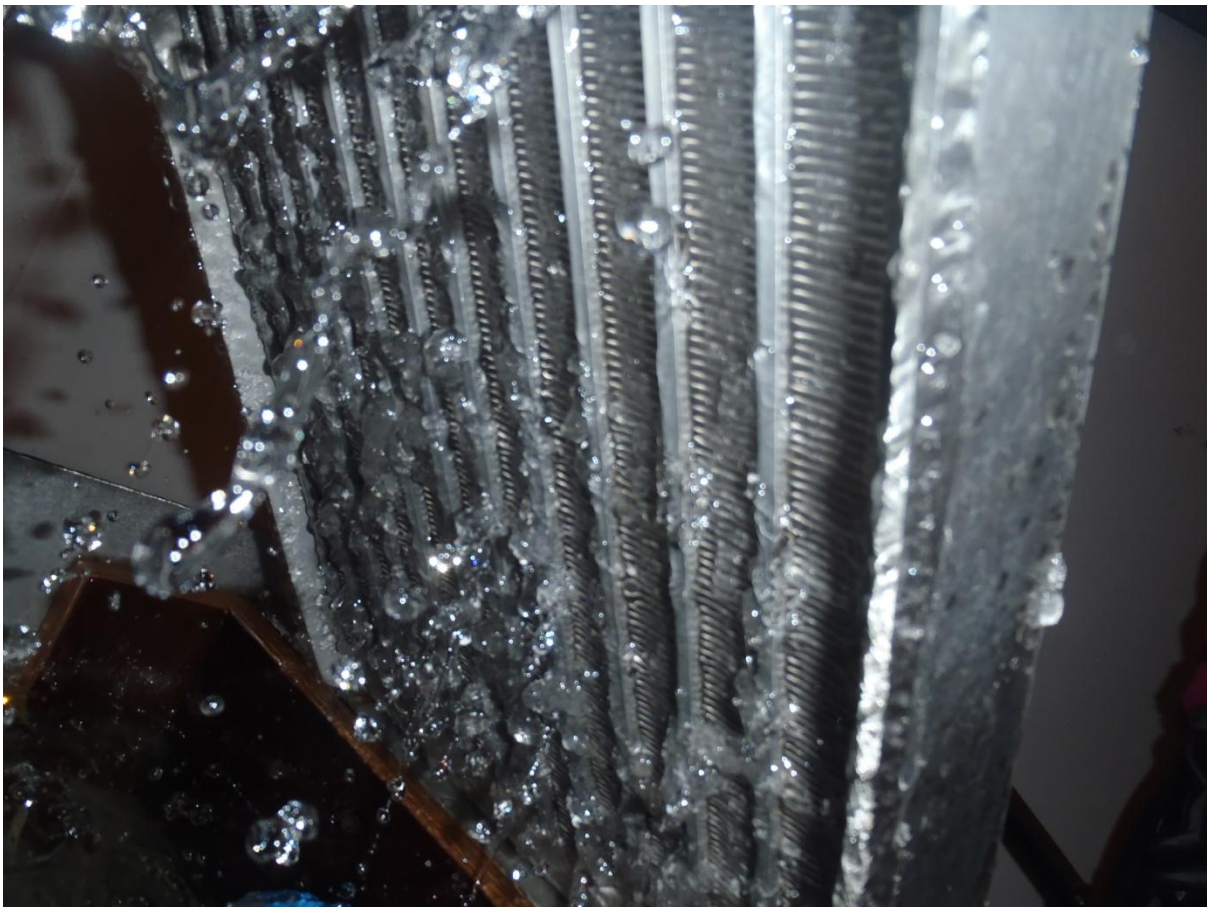


Figur 44: Islegging ved slutt av forsøk - 7 °C (Foto: H. Opaker)

5.5.3 Romtemperatur -10 °C

Forsøk 1: Ved start av forsøket la det seg en tynn ishinne på oversiden av rista enkelte steder. Tilsatt isslush la seg i bunn av rista og bygde seg videre oppover. Noe slush gikk også nå over. Omtrent hele rista ble dekket av et lag (tykkelse 20-30 millimeter) med slush. Bare helt øverst der vanninntak skjer var det åpent. Observerte fra baksiden av rista at det var is der, spesielt langs avstivningene. Det ble sett at det var is mellom stavene på en del av ristas areal (anslått ca. 25 %). Ved bruk av bladsøker var det tydelig at det var is også mellom stavene der det ikke var mulig å se fra baksiden. Etter avskrapning av isen på oversiden, ble det helt vann fra ei øse på midten av rista, og det aller meste av det rant over. Vannføringen i forsøket var redusert på grunn av lite vann i oppsamlingsbassenget. Lavt vannivå påvirket pumpas kapasitet. Figur 45 viser baksiden til rista. På bildet er det noe is langs avstivningene. Det er også enkelte små ispartikler mellom stavene, men de er for små til å sees på bildet.

Forsøk 2: Isen begynte først å legge seg nederst på rista, og bygge seg opp videre derfra. Etter ca. 30 sekunder festet også noe seg i sonen nedenfor vanninntaket. Sluttresultatet ble likevel likt som for forrige forsøk. Det lå et relativt jevnt isdekke av tykkelse 20-30 millimeter over store deler av rista ved slutt av forsøk. Undersøkelse av is mellom staver og bakside av rist ga samme resultat som forrige forsøk. Vannføringen var økt til normalen ved å helle i ca. 20 liter vann i oppsamlingsbassenget før forsøket startet.



Figur 45: Bakside av rist ved forsøk -10 C (Foto: H. Opaker)

5.5.4 Romtemperatur -15 °C

For å få vannet i modellen ned i 0 °C ble temperaturen satt lik -15 °C kl. 09.30. Temperaturen i vannet var da ca. 4 °C. Ved en sjekk av vanntemperatur kl. 11.45 var den 0,6 °C. Klokken 12.30 hadde rista begynt å fryse til, uten at det var blitt tilsatt slush. Nesten hele rista, med unntak av øverste 40-50 millimeter, var dekket av et tynt islag (ca. 1-3 millimeter tykt) bestående av mindre ispartikler (Figur 46). Noen av partiklene var tydelig diskosformede som typisk for sarr, mens andre var mer ujevne i formen. Det var ikke mulig å måle temperaturen midt på rista siden den var dekket av is, men på kanten av rista ble temperaturen målt til -7,3 °C. På baksiden av rista var det is mellom stavene (omtrent som for forsøk ved -10 °C). Isen på baksiden utgjorde ikke et dekke som på framsiden. Sonen som var åpen og hvor det foregikk inntak av vann ble mindre ettersom tiden gikk. Kl.13.30 var det 20-30 millimeter hvor det ikke lå is. På det tidspunktet rant det vann over rista. For å se om rista ville gå helt tett dersom det ble tilført mer sarr, ble det satt i gang forberedelser til forsøk. Forsøket ble ikke gjennomført på grunn av at pumpa stoppet opp. For å hindre at vannet i modellen skulle fryse til ble forsøket avbrutt og temperaturen i rommet satt opp.



Figur 46: Naturlig gjenfrysing av rist (Foto: H. Opaker)

Forsøk 1: Ved start av forsøk var rista forholdsvis ren for is. Eneste is var enkelte isperler nedenfor inntakssonen. Ved tilsetting av slushblanding ble pumpa ikke avslått, da det virket usikkert om pumpa ville klare å starte igjen. Det medførte at slushblandingen kom mindre konsentert over rista enn tidligere. Romtemperaturen medførte også at deler av slushblandingen fikk en annen konsistens. De siste 4-5 begrene av blandingen hadde begynt å fryse til når de ble tilsatt. I starten var det tendens til at det startet å legge seg is rett nedenfor inntakssonen, men til slutt gled alt nedover og isen la seg i bunnen. Isen la seg også delvis mellom stavene slik at rista ble tett. Ved avskrapning var det et ca. 3-4 millimeter tykt islag jevnt over hele rista nedenfor inntakssonen og en stor isklump nederst på rista (Figur 47).



Figur 47: Islegging ved slutt av forsøk -15 °C (Foto: H. Opaker)

Forsøk 2: Før start av forsøk var store deler av rista allerede tett. Det var kun åpent øverst. Forsøket viste at all is gled rett over rista og samlet seg i bunn som en massiv klump. Rista avluttet i en horisontal plate, og hadde det ikke vært for den ville mye av isen ha sklidd helt over. Det var ingen endring av is mellom stavene, eller bak rista. Øvre 20 millimeter av rista var fortsatt åpne.

5.5.5 Oppsummering av forsøk

Ved forsøkene ble romtemperatur før og etter registrert. Temperatur ble målt i vann, slushblanding og på rista. Målepunktet kalt midt på rist lå i høyde ca. 0,15 meter fra bunnen av rista, og ca. 0,15 meter fra begge kantene av rista. Målepunktet kalt på siden av rist lå i høyde ca. 0,15 meter fra bunnen på stålkanten som avslutter rista. Etter endt forsøk ble isen skrapet av og veid. Resultatene er vist i Tabell 4.

Tabell 4: Resultater fra forsøk

Romtemp. Innstilt	[°C]	-5		-7		-10	
Temp. i rom ved start	[°C]	-4,7	-3,2	-6,8	-5,4	-9,2	-8,8
Temp. i rom ved slutt	[°C]	-4,1	-2,9	-5	-6,1	-	-9,4
Temp. i vann i modell	[°C]	0,3	0,4	0	0	0	0
Temp. i slushblanding	[°C]	0	0	0	0	0	0
Temp. midt på rist	[°C]	-0,7	-0,4	-1,4	-1,9	-3,1	-1,2
Temp. på siden av rist	[°C]	-1,1	-0,7	-2,4	-2,4	-5,4	-1,4
Vekt slush avskrapet	[g]	1520	1700	670	645	1540	1210

Romtemp. Innstilt	[°C]	-15	
Temp. i rom ved start	[°C]	-14	-13,8
Temp. i rom ved slutt	[°C]	-13,2	-14,1
Temp. i vann i modell	[°C]	0	0
Temp. i slushblanding	[°C]	0	0
Temp. midt på rist	[°C]	-5,9	-
Temp. på siden av rist	[°C]	-7,1	-6,7
Vekt slush avskrapet	[g]	1350	1070

5.6 Luftmedrivning

På befaring 22. mars på Dyrkorn ble det undersøkt om anlegget har problemer med luftmedrivning. Vannføring i elva var omtrent $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Kraftverket gikk for fullt med maks slukeevne lik $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Imidlertid førte den store overkapasiteten som er lagt inn i inntaket til at vannstanden inne i reguleringskammeret var hevet. Økningen i vannstand var ca. 0,2 meter i forhold til vannstand ved vannføring på $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ved observasjon ned foran innløpet til turbinrøret ble det sett at det tidvis foregikk en sirkulær strømning på overflaten. Bevegelsen var imidlertid svak, og det var ikke en type virveldannelse som sluker med seg luft. Det ble også tatt opp film med kamera, men i de minuttene det ble filmet oppstod det ingen sirkulære overflatebevegelser. Virvelen som i kort tid ble observert på Dyrkorn vil i forhold til Inntakshåndboka til NVE være klassifisert som en klasse 1 virvel. Det er den minst alvorlige graden og kjennetegnes ved overflaterotasjon (Jenssen et al., 2006).

Det ble sammen med personell fra Tafjord Kraft tatt den vurderingen at det ikke var nødvendig å stoppe kraftverket. Det på grunn av at det ikke var noen synlig luftinnsugning.

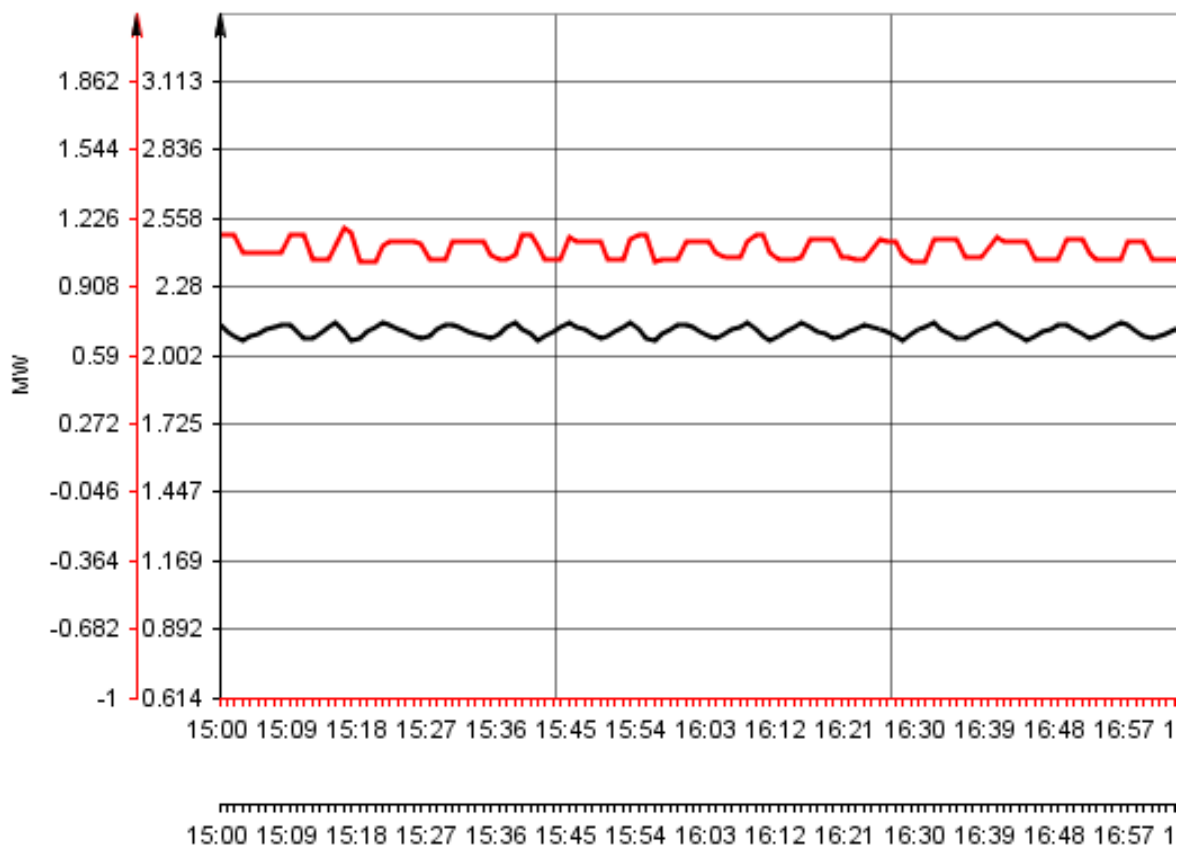
Tafjord Kraftproduksjon AS har ikke registrert at det er problemer ved Dyrkorn Kraftverk på grunn av luftmedrivning (samtale med Perry Aase, 22.3.2012).

5.7 Svingninger i reguleringskammer

Det aktive reguleringsvolumet i kammeret ved Dyrkorn er relativt lite med 44 m^3 . I tillegg kommer volumet i samlekanalen som er ca. 22 m^3 . Totalvolum er dermed ca. 66 m^3 . Gjeldene ingeniørpraksis i Norge er minstevolum for inntaksmagasin større enn 200 ganger slukeevne (forelesning professor Leif Lia, 2010). For Dyrkorn Kraftverk er det 300 m^3 . Lite reguleringsvolum fører til at endringer i vannstand skjer i løpet av minutter. Det vil også føre til en endring i generert kraft på grunn av tapt trykkehøyde. Endringen i trykkehøyde kan også medføre at det blir endringer i vannmengde til turbinen (Jenssen et al., 2006). For et høytrykksanlegg som Dyrkorn vil endringen i trykkehøyde alene ikke medføre store svingninger i kraftproduksjonen. For eksempel vil en nedgang i trykkehøyde på 0,5 meter på Dyrkorn føre til en reduksjon i produksjonen på ca. 0,23 %. Skulle vannmengden til turbinen bli påvirket kan det gi større utslag i produksjonen.

Basert på tall fra Tafjord Kraftproduksjon AS sin trykkcelle i reguleringskammeret, virker det som de typiske svingningene har amplitude ca. 0,1 meter og bølgelengde 5-10 minutter.

Endringene i kraftproduksjon på grunn av trykkendring er vist i Figur 48. Her er det et dobbelt aksesystem hvor kraftproduksjonen er merket med rødt og vannstand i svart. Tallene stammer fra 8. desember rett før inntaket frøs igjen.



Figur 48: Endringer i vannstand og produksjon (Tafjord Kraftproduksjon AS)

Lastvariasjoner som på Dyrkorn vil normalt ikke øke slitasjen vesentlig på verken turbin eller reguleringssystem. Lastvariasjonene er en belastning, men anlegget skal i utgangspunktet tåle det. For kraftverk er det ikke variasjonene i last som sliter mest, men start og stopp av anlegget. Spesielt generator slites ved start og stopp (mailkorrespondanse Mette Eltvik, phd-student vannkraft maskin, 22.5.2012).

5.8 Sedimenttransport

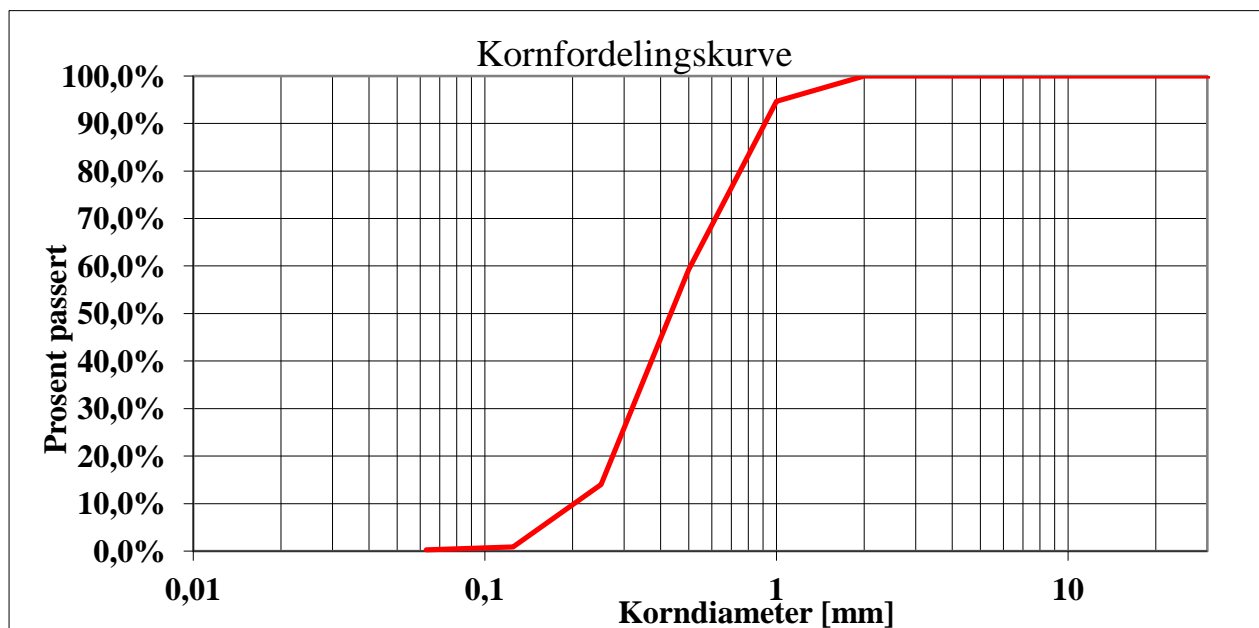
Dyrkornelva har vist seg å ha ikke uvesentlig massetransport. Den 26. august ble det gått oppstrøms dammen langs elva for å se hvordan det så ut. Tidligere på sommeren hadde det i juni og juli vært flom, og det var tydelig at steiner i elva med diameter opptil ca. 0,5 meter hadde vært i bevegelse. Figur 49 består av to bilder fra inntaksmagasinet ved Dyrkorn tatt fra samme punkt. Venstre bilde er fra 26. mai, mens høyre er tatt 26. august. Bildene viser tydelig at det i tidsrommet har foregått massetransport.

Etter høsten og vinteren har det kommet ytterligere masser inn i magasinet. Massene har bygd seg fremover mot damkrona, og kanten av haugen er nå ca. 10 meter fra damkrona. Gjennomsnittlig dybde til haugen er anslått til ca. 0,75 meter. Lengden den har gått inn i magasinet er omtrent 8 meter. Med gjennomsnittlig bredde anslått til 6 meter, gir det volum lik 36 m^3 . I tillegg fjernet Tafjord Kraft et par kubikkmeter sedimenter sist høst (samtale med Perry Aase, 2.5.2012). Totalt har det fra sommeren 2011 til våren 2012 kommet omtrent 40 m^3 med sedimenter i inntaksmagasinet.



Figur 49: Endringer i inntaksmagasin etter flom (Foto: H. Nøvik)

I løpet av vinteren og våren ble det ikke funnet sedimenter innenfor coandarista. På befaringene gjennomført høsten 2011 ble det funnet sedimenter i reguleringskammeret to ganger. Den 26. oktober ble det funnet anslagsvis ca. 2-3 kg sedimenter i reguleringskammeret. En prøve, med vekt ca. 60 gram, ble tatt med for å finne kornfordelingen. Resultatet etter tørking og sikting av prøven er vist i Figur 50:



Figur 50: Kornfordelingskurve for sedimentprøve fra reguleringskammer

5.9 Vannføringskurve

For å etablere en vannføringskurve ble det vurdert om vannføringsmålinger skulle gjøres med ADCP oppstrøms. I samtaler med Perry Aase, hydrolog i Tafjord Kraft AS, ble det vurdert at ADCP-måling sannsynligvis ikke ville gi gode resultater. Det ble i stedet bestemt at deler av damkrona kunne demmes opp for å heve vannspeilet, og etter det bruke produksjonsdata. For å få gode nok tall for hvor mye vann som gikk til produksjon, måtte virkningsgrad finnes. Det ble gjort ved hjelp av saltmålinger.

Målingene, både for virkningsgrad og vannføringskurve, ble gjort 2. mai. Fra produksjonstall kan total vannmengde gjennom coandarista finnes. Det er ikke nødvendig å se på minstevannsføringen. Det på grunn av at en bekk rett nedstrøms dammen hadde vannføring større enn minstevannsføringen. Dermed ble luka som slipper minstevannsføringen stengt.

For å få forskjellige punkter til vannføringskurva ble overløpet innsnevret ved hjelp av sandsekker. Det ble avlest høyde på vannspeil i inntaksdam på egen målestav oppsatt av Tafjord Kraftproduksjon AS. Med hjelp av sandsekker ble overløpet innsnevret med 3 og 5 meter (Figur 51).



Figur 51: Innsnevring av overløp med sandsekker (Foto: H. Opaker)

Resultatene av virkningsgradsmålingen er gitt i Tabell 5.

Tabell 5: Virkningsgrad Dyrkorn Kraftverk

P [kW]	805	998	1345	1993
Q [m ³ /s]	0,44	0,54	0,715	1,05
n	0,845	0,86	0,87	0,875

Det burde vært gjort målinger på høy last i tillegg, men tiden førte til at det dessverre ikke ble gjort.

Resultatet fra innsnevringen av damkrona vises i Tabell 6.

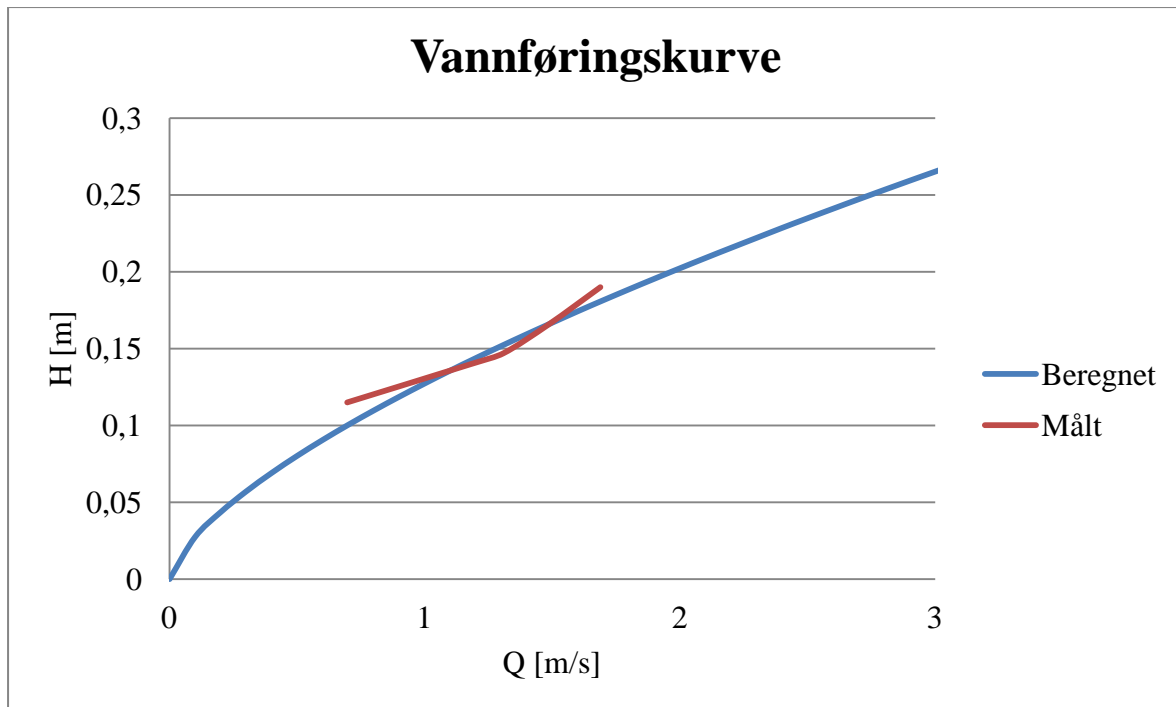
Tabell 6: Resultater av måling for vannføringskurve

h [m]	P [MW]	innsnevring [m]	Q [m ³ /s]	L _{eff} [m]	C
0,14	2,24	0	1,18	14,97	1,51
0,147	2,48	0	1,31	14,97	1,55
0,166	2,35	3	1,24	11,97	1,53
0,19	2,4	5	1,27	9,96	1,54

Ved beregning av vannmengden Q er det benyttet samme virkningsgrad som målt for 2 MW. Det på grunn av at usikkerheten ved ekstrapolering er stor. Faktoren C i Tabell 6 er regnet ut fra ligning 3.

Verdien for C kan virke lav, men det en bred krone på 0,9 meter på overløpet på Dyrkorn. Overløpet er også skarpkantet. NVE sine retningslinjer for flomløp angir at for skarpkantede overløp med bred krone, vil C-faktoren ligge på mellom 1,4 og 2 (NVE, 2005). Verdien er avhengig av bredden på damkrona og energihøyden til vannet. Brukes tallene fra Dyrkorn gir det i følge retningslinjene C-faktor på omtrent 1,45. Det stemmer forholdsvis bra med den beregnede verdien for C.

Figur 52 viser vannføringskurve for overløpet på Dyrkorn. Den beregnede vannføringskurva er basert på målingene som ble gjort. Det er for kurva benyttet en fast C-verdi på 1,47. I virkeligheten vil C-faktoren gå litt opp når vannføringen øker, slik at kurva egentlig vil være noe slakere ved økte vannføringer. I tillegg til målingene i Tabell 6, bruker kurva for målte verdier i Figur 52 en observasjon av vannhøyde i magasinet på 0,115 meter ved effekt 1,3 MW.



Figur 52: Vannføringskurve for overløp på Dyrkorn

Vannføringskurve for tilstoppet rist ble ikke utarbeidet. Årsaken til det er at det etter en vurdering ble ansett for vanskelig å gjennomføre. Med is på inntaksmagasinet kan det ikke brukes ADCP, og å få vannføring fra produksjonsdata og minstevannsmåling vil gi stor unøyaktighet. Det på grunn av at det må korrigeres for et restfelt. Verdien av en vannføringskurve for tilstoppet rist er også uklar. For hvert tilfrysningstilfelle vil antageligvis kurva se annerledes ut. Kapasitet på coandarista ble heller ikke målt, da det er kjent kunnskap (Huber, 2005).

6. Diskusjon

6.1 Tilfrysning

Resultatene fra målingene og observasjonene som ble gjort i løpet av vinteren tyder på at det er flere forskjellige prosesser som skaper gjenfrysningen av coandarista.

17. november:

- Vanntemperatur over 0 °C hele 17. november. To timer natt til 17. underkjølt med -0,0084 °C som laveste temperatur.
- Temperatur i luft mellom -1,5 og -3 °C for 16. november.
- Temperatur rist var ved laveste måling -0,2 °C. Totalt 14 timer kaldere enn 0 °C.
- Nedbør ble ikke registrert på Sjøholt for 15.-17. november.
- Vannføring omtrent 100 l/s.
- Ingen is på inntaksmagasinet før tilfrysning.

Den lave temperaturen målt i stålet til rista kan bety at isen var blitt dannet av at stålet var nedkjølt. Vann som kom i kontakt med boulder bars-ene og den nedre delen av rista, som vil være de kaldeste delene av rista, frøs.

Tendensene fra temperaturmålingene er tydelige. Økende forskjell i temperatur mellom vann og stål, sammenfallende med økende forskjell i temperatur luft og vann. På det meste er forskjellen mellom temperaturen i vann og stål 0,4 °C. Det viser at ristas temperatur er påvirket også av lufttemperaturen, og ikke bare vannet. Temperaturmålingene i døgnene før 17. november, viser at temperaturen i stålet er den laveste med ca. 0,2 °C. Det betyr at enten så er det en målefeil, eller så har faktorer som ikke har blitt målt hatt betydning. Høyst sannsynlig er det en feil i målingene fra temperaturen i rista. Det er målingene av ristas temperatur som har høyest usikkerhet. Likevel er konklusjonen at lufttemperaturen påvirker temperaturen i rista gyldig.

7. desember:

- Vanntemperatur viste underkjøling av vann fra ca. kl. 17.
- Temperatur i luft ned i mot -10 °C.
- Temperatur rist var ved laveste måling -0,2 °C. Underkjølt fra 15.30.
- 7,1 millimeter nedbør ble registrert på Sjøholt 7. desember.
- Vannføring omtrent 650 l/s.
- Ingen eller lite is i inntaksmagasinet

Gjenfrysningen som skjedde 7. desember er annerledes. Den gikk raskt, på kun 10 minutter. Det tyder på at den skyldes tilstopping av is som fanges opp på rista, og ikke at is dannes direkte på stålet slik som tilfrysningen i november. Tykkelsen til isen tilsier også at det ikke er snakk om nedkjøling av rista. Det er mulig å få en nedkjøling av rista slik at det dannes et islag på rista, men når den første isen legger seg vil det virke isolerende. Det er dermed ikke

mulig at ren nedkjøling av rista vil generere is av tykkelse på 0,3 meter slik som var tilfellet. Utseende til isen er typisk for bunnis som dannes av sarr. Det var nedbør i området 7. desember, så isen som kom kan også være fra dannet fra snø som falt direkte på åpent vann. Temperaturmålingen fra SBE 39 for tidsrommet når kraftverket stoppet opp viser at vannet var underkjølt. Den laveste temperaturen inntreffer ca. kl. 17.20. Etter det stiger temperaturen nesten 0,01 °C. Temperaturstigningen sammenfaller omtrent med tidspunktet kraftstasjonen måtte stenges ned. En plutselig økning i vanntemperatur som er målt her, tyder på at det har skjedd en dannelse av is. Ved isdannelse i vannet vil prosessen frigjøre energi slik at vanntemperaturen øker. Måledata og observasjoner tyder dermed på at tilfrysningen skjedde på grunn av sarr.

20. desember:

- Vanntemperatur viste underkjøling av vann fra ca. kl. 07.30.
- Temperatur i luft på det kaldeste omtrent -6 °C.
- Temperatur rist var ved laveste måling -0,2 °C. Underkjølt fra 07.30.
- Nedbør ble ikke registrert på Sjøholt 20. desember.
- Vannføring omtrent 370 l/s.
- Delvis tilfrost inntaksmagasin.

Den 20. desember ligner tilfrysningen som skjedde 7. desember. Nå går imidlertid prosessen saktere, over to timer i stedet for ti minutter. Lufttemperaturen var på det kaldeste ca. -6 °C, mot nesten -10 °C den 7. desember. Det tyder på at hastigheten til tilfrysningen er sterkt avhengig av lufttemperaturen. Det ble observert isslush som kom drivende og samlet seg opp på rista. Det tyder på at det er enten sarr som dannes, eller at det er snø som faller på vannet. I og med at det ikke ble observert nedbør på Dyrkorn den dagen, tyder alt på at gjenfrysningen skyldes sarr.

5. januar:

- Vanntemperatur viste underkjøling av vann fra ca. kl. 00.00.
- Temperatur i luft på det kaldeste omtrent -6 °C.
- Temperatur rist mangler.
- 7,8 og 11,7 millimeter nedbør på Sjøholt den 4. og 5. januar.
- Vannføring omtrent 450 l/s.
- Delvis tilfrost inntaksmagasin.

Hva som forårsaket tilfrysningen 5. januar er mer uklart. Ut fra tidlige bilder så sees det tydelig at det ligger is langs boulder bars-ene. Isen har ikke bygd seg opp fra bunn av rista slik som den 20. desember. Det kan tyde på at tilfrysningen ikke skyldtes sarr, men heller nedkjøling av rista eller eventuelt en kombinasjon. Dessverre finnes det ikke målinger for temperatur på rista etter 22. desember.

20. januar:

- Vanntemperatur viste underkjøling av vann fra ca. kl. 11.00.
- Temperatur i luft på det kaldeste omtrent $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Temperatur rist mangler.
- Ingen nedbør ved inntaket.
- Vannføring omtrent 300 l/s
- Delvis tilfrost inntaksmagasin. Åpent areal ca. 25 %.

Ved gjenfrysingen 20. januar ble det gjennomført en befaring. Det er derfor ingen tvil om at det var sarr som var årsaken til gjenfrysingen. Det ble sett mer sarr ved enden av den åpne råka enn ved starten. Det tyder på at mye av sarret oppsto på de 15 meterne. Det innebærer at det ikke vil hjelpe og øke lengden til inntaksmagasinet for å minske sarrproduksjonen, akkurat for det her tilfellet. Generelt vil det nok likevel være å anbefale å ha et stort inntaksmagasin, i og med at det reduserer vannhastigheten slik at det blir et isdekke på magasinet tidligst mulig.

April:

Gjenfrysingen 2.-6. april virker tydelig å være forårsaket av snøfall direkte på vannet. Det var mye snø de døgnene, og SBE 39 registrerte heller ikke at vannet var underkjølt. Bilder og observasjoner støtter også opp under den konklusjonen.

Årsaken til gjenfrysingen 7. april virker ikke å være snøfall i og med at lite nedbør ble registrert. Det ble heller ikke målt underkjølt vann. Lufttemperaturen var imidlertid ca. $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ på det kaldeste. Målingene kan tyde på at det var nedkjøling av rista som var årsaken.

Gjenfrysingene som skjedde om nettene 15.-18. april virker også å være forårsaket av nedkjøling av rista. Det var ingen nedbør på Sjøholt de døgnene, og vanntemperaturen var langt over frysepunktet.

Tilfrysningsprosess:

Av faktorene som skaper gjenfrysing virker det som om lufttemperaturen er den viktigste. Tilfrysningene inntreffer når lufttemperaturen faller ned mot $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ og kaldere. Det ser ikke ut til at det er nødvendig at lufttemperaturen må ligge under $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i mer enn et par timer for å skape en tilfrysning. Et værromslag vil raskt kjøle ned vann og rist.

Observasjoner fra vinteren viser også at når det først er etablert et fast isdekke på inntaksmagasinet og rista, oppstår det ikke problemer når lufttemperaturen synker. Rolige strømningsforhold, slik som i inntaksmagasinet på Dyrkorn, sikrer stabilt isdekke tidlig. Den isolerende virkningen som is har lover godt i forhold til bruk av coandainntak i innlandet av Norge, som generelt har kalde, stabile vinterforhold.

Ut fra hva som har vært observert virker det som om isen som legger seg på coandarista legger seg på utsiden, uavhengig av tilfrysningsårsak. Det er ingenting som tyder på at det kommer mye is mellom stavene, slik at det dannes et isdekke på innsiden.

6.2 Laboratorieforsøk

Tilstoppinga av rista under forsøkene lignet mye på det som har vært observert i felt. Det hadde vært en fordel om det hadde lyktes å kontrollere prosessen som gir dannelse av naturlig sarr. Konsistensen til isblandingen som til slutt ble brukt ligner på sarris, men dannelsen er annerledes. Generelt var ispartiklene som ble sluppet over rista mer kantete enn sarr observert i felt. Størrelsen til partiklene var fra ca. 10 millimeter ned til mindre enn 1 millimeter. Konsistensen og størrelsene varierte nok noe i forhold til for naturlig sarr, men isblandingen som ble brukt virket som en god erstatning. Fra baksiden av rista ble det flere ganger observert at små partikler hadde lagt seg mellom stavene. Ved bruk av bladsøker ble en av partiklene tatt frem. Den var mindre enn 1 millimeter. Ingen av forsøkene førte til at det ble dannet et isdekke på baksiden av rista. Selv om enkelte ispartikler kilte seg mellom stavene, så virker det som om tilstoppingen av is først og fremst er et overflatefenomen.

I forhold til hvor mye is som ble skrapet av rista, så er det ingen klar trend i forsøkene. Her ligger resultatene for forsøket ved romtemperatur $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ langt under de andre. Det ble ikke lagt merke til noen faktor som kan forklare avviket. Et forhold som virker å ha betydning for hvor mye is som fester seg til rista, er om det allerede ligger ei ishinne på rista. Ved flere av forsøkene var det ishinne ved start av forsøk, og da gikk mer is over rista. Spesielt tydelig var det ved forsøk 2 på $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vekta av is på rista sank med 280 gram ved forsøk 2 i forhold til forsøk 1. Hadde det ikke vært for at rista ender opp i en horisontal plate ville differansen blitt større. Endringen skyldes nok ishinna som har redusert friksjonen og kohesjonskreftene mellom ispartiklene og stavene på rista. Det virker tydelig som at det er større sannsynlighet for dannelse av ishinne ved lavere lufttemperaturer.

Det er flere forhold i forsøket som ikke har vært like som i felt. I forsøket er lufta på undersiden av rista like kald som lufta ellers i rommet. I virkeligheten er lufttemperaturen på undersiden av rista tilnærmet lik vanntemperaturen, det vil si $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. På grunn av pumpa i modellen er det mer turbulent tilstrømning enn i virkeligheten. Fordelingen av sarr langs ristas bredde er i forsøket avhengig av personen som gjennomfører forsøket. Det på grunn av at mye av sarret fester seg langs kantene og må løsnes manuelt.

6.3 Gjenåpning

Årsaken til at inntaket åpner seg opp igjen er noe uklar. For å finne ut mer om det trengs det flere undersøkelser. Det virker uansett som om inntaket aldri blir helt tett. Noe vann siver igjennom, men det kan være for lite til å kjøre kraftverket. De spesifikke varmekapasitetene til stål, vann og luft og energien til faseovergangen is til vann, tyder på at luften under rista ikke smelter isen. Målingen av lufttemperatur i samlekanalen viser også at det ikke skjer utbytting av luft. Lufttemperaturen i samlekanalen er omtrent den samme som vannets, og kan bidra til at temperaturen til isen vil være ca. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, men faseovergang på grunn av lufttemperaturen alene er ikke mulig.

Vannet som siver igjennom kan i de to første tilfrysningstilfellene i vinter ha tilført den nødvendige energien til smelting. Ved de neste to tilfellene var vannet imidlertid underkjølt når inntaket åpnet seg opp. Det betyr at isen ikke smeltet, men at det var erosjonskrefter fra vannet som åpnet opp inntaket. Sarris er forholdsvis myk så det er ikke utenkelig at selv mindre vannmengder kan slite løs sarrpartikler. Hastigheten som vannet oppnår over rista på 2-3 m/s gir et potensial for erosjon. Det virker sannsynlig at gjenåpningen ved de to første tilfellene skyldes en kombinasjon av varmeavgivelse fra vannet og mekaniske krefter.

Vannføringen i elva økte ikke før inntaket åpnet seg opp ved tilfrysningstilfellene. Det virker heller ikke som om det er noen sammenheng mellom tiden inntaket er gjenfrosset og vannføringen. Ut fra måledataene fra i vinter er det dermed ikke mulig å trekke noen konklusjon angående hvilken betydning vannføringen har for gjenåpningen.

6.4 Luftmedrivning, svingninger og sedimenter

Ut fra observasjoner på Dyrkorn, og driftserfaringen til Tafjord Kraft, virker det som kraftverket ikke har vesentlige problemer med luftmedrivning. Det til tross for at inntaket ligger grunt i forhold til NVE sine kriterier i inntakshåndboka.

Svingningene i reguleringskammeret virker ikke å være så store (opptil 0,1 meter), men de virker å være årsaken til variasjonen i produksjon. I og med at produksjonssvingningene følger svingningene i vannstand virker det som om årsaken er det lave reguleringsvolumet. De faktiske konsekvensene av så lite reguleringsvolum burde undersøkes videre. Det virker umiddelbart som det burde vurderes å ha større reguleringsvolum i forhold til maks slukeevne.

Sedimentene funnet på innsiden av coandarista er forholdsvis ensgradert. Noe overraskende har en andel av prøven diameter på over en millimeter, som er åpningen i coandarista. Det er mulig at noen mindre stein kan ha kommet inn i reguleringskammeret gjennom rista som ligger over kammeret. En annen mulighet er at stavene vibrerer ved høye vannhastigheter, slik at spalteåpningen overstiger en millimeter i korte tidsrom. Størrelsen til prøven er slik at kun noen få steiner over en millimeter utgjør et par prosent, så prøven burde ha vært større. I forhold til sedimenter så virker det som coandainntak alene ikke er et effektivt tiltak. Den konklusjonen understøttes også av tidligere undersøkelser (Huber, 2005). Det er riktignok kun relativt finkornige sedimenter som kommer igjennom, men også de kan skade turbinen dersom mengden er stor nok. Coandainntak virker riktignok å være bedre enn konvensjonelle inntak i forhold til sedimenter, men er problemet stort må også coandainntak kombineres med sedimenteringsbasseng. Sedimentene som kommer gjennom rista innebærer at det er praktisk med ei tappeluke i reguleringskammeret for å kunne spyle ut sedimenter.

7. Endringer for å forbedre funksjonen til coandainntak i kaldt klima

For å redusere problemet med tilfrysning av coandainntak er det mulig med flere mer eller mindre permanente tiltak.

7.1 Tildekking av coandarist

En mulighet er å bygge et nettverk av stålarmoring over coandarista, som deretter dekkes til med sekkestrier. Vannsprut vil gjøre sekkestriene våte, og det vil ganske raskt dannes et isdekke. Det vil fungere som isdekke som oppstår etter en naturlig tilfrysning. Et stabilt isdekke har vist seg og fungere bra i lave lufttemperaturer (ENTEC AG, 1998). Løsningen med å legge over sekkestrier på et armeringsnettverk skal ha fungert bra i USA. Det i følge et innlegg av Hydroscreen CO. LLC på et diskusjonsforum om coandainntak (micro hydropower, 2011).

Ulemper ved det tiltaket er dersom det skulle komme drivgods med elva som setter seg fast i armeringsnettverket. Dersom inntaket er stort vil et slikt armeringsnettverk også bli en forholdsvis stor og tungmanøvrert konstruksjon. Å fjerne konstruksjonen etter vinteren, som er nødvendig, vil dermed bli vanskelig. Konstruksjonen kan også være utsatt i forhold til tunge snøfall.

7.2 Bypass

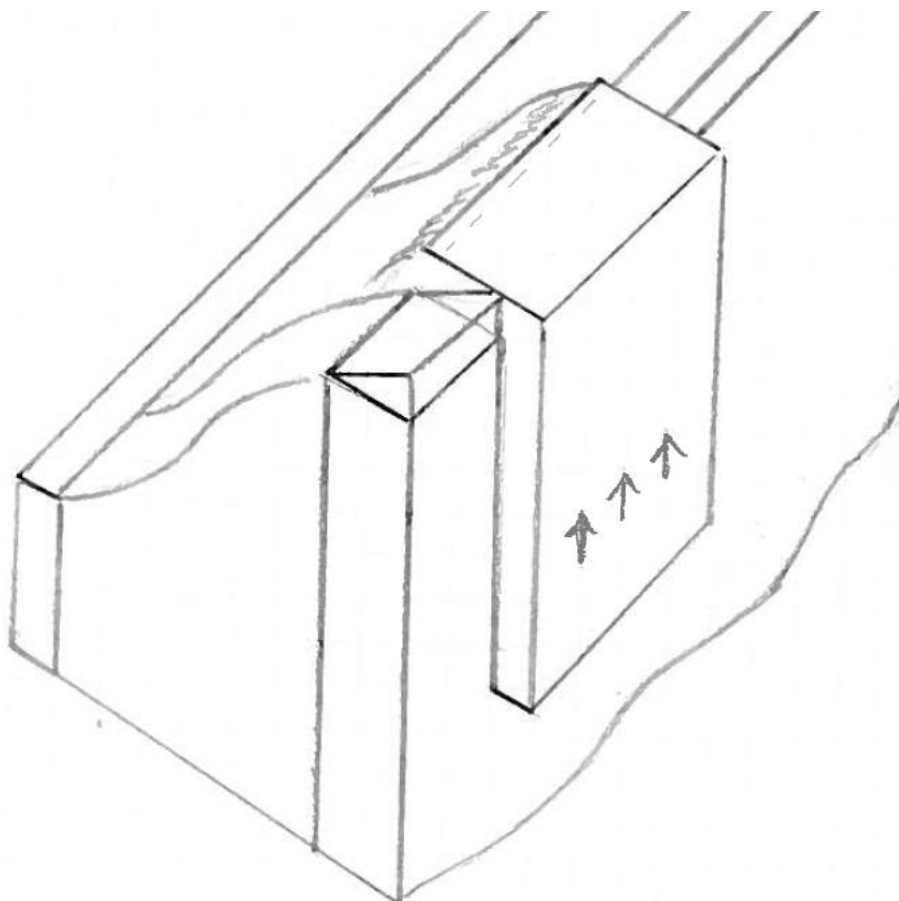
Et konvensjonelt inntak plassert i oppstrøms side av dammen, eller en bypass-ventil som tar vann direkte fra magasin inn til samlekanal er også en mulighet. Bypass-ventil ble brukt på Dyrkorn vinteren 2012. Dersom den løsningen velges bør det være mulighet til å fjernregulere ventilen. Dermed kan den brukes kun når inntaket er tett. Det vil være fare for at også en slik ventil fryser til, spesielt dersom det er sarr i elva. Antakeligvis vil en slik ventil ha den uheldige effekten at det tar lenger tid før coandainntaket åpner seg opp igjen.

7.3 Innsnevring

Innsnevring av overløpet kan også tenkes å ha positiv effekt. Ved å konsentrere tilløpet av vann, kan muligens tilfrysningsproblemet minskes. Tiltaket vil muligens hindre eller minskede tilfrysningene som skyldes underkjøling av selve rista. Når det gjelder tilfrysninger som skyldes sarr eller snøfall vil det nok ikke hindre selve tilfrysningen, men det er mulig at inntaket åpnes opp raskere.

7.4 Inntak av vann fra større dybde

Slik coandainntaket er utformet i dag vil det være vannet fra overflaten som tas inn. Det medfører problemer når det dannes mye slush fra sarr eller snøfall som kommer drivende i overflaten. For å unngå mye av det kan det utformes en slags snorkel som tar inn vann dypere. Damkrona må da demmes opp med planker eller lignende, der hvor snorkelen ikke ligger. Løsningen er skissert i Figur 53. Løsningen kan kanskje også kombineres med å dekke til boulder bars-ene, slik at problemet med nedkjøling av rista minskes. Løsningen med snorkel er ikke blitt utprøvd, så det er usikkert hvor godt det faktisk vil fungere.



Figur 53: Skisse av løsning med snorkel (Tegning: H. Opaker)

7.5 Inntaksdam og reguleringskammer

Det er sikkert at å ha en inntaksdam med rolige strømningsforhold slik at det lett etablerer seg et isdekke vil være gunstig for å unngå tilfrysninger. Det både med tanke på tilfrysning på grunn av sarr og snøfall. Det vil være fordelaktig med stor inntaksdam med tanke på stabile isforhold. En større dam vil gi lavere vannhastigheter, som gir raskere tilfrysning og tjukkere is.

Isdannelse i samlekanal og reguleringskammer er en av utfordringene med coandainntak som det må sees mer på. Ved befaring 20. januar ble det observert sarris flytende i reguleringskammeret. En senkning av bunn av reguleringskammeret ville gitt mer effekt fra jordvarme, og et større vannvolum. Det vil kanskje hjelpe i forhold til å unngå isdannelse i kammeret. En annen fremgangsmåte for å unngå problemet er å la minstevannføringen gå utenom coandainntaket, og ha ei regulerbar tappeluke i kammeret som åpnes ved for lavt tilsig til å kjøre turbinen. Uansett bør det nok settes inn ei grind foran turbinrøret slik at eventuell is som er dannet i samlekanal eller reguleringskammer ikke blir med ned til turbinen.

8. Konklusjon og videre arbeid

Det er tydelig at det er flere ulike prosesser som skaper tilfrysningen på Dyrkorn. Uavhengig av prosess virker det som at isen kun legger seg på utsiden av coandainntak. Det viser både felt- og laboratorieundersøkelser. Det virker ikke som det dannes isdekke på baksiden av rista, og bare unntaksvis kommer små ispartikler seg mellom stavene. Tap av vann når inntaket var tilfrost varte i opptil 40 timer på Dyrkorn i vinter. Tilfrysningstilfeller som varer lenger kan ganske sikkert forekomme, i og med at antallet tilfrysninger i vinter var lavt. Erfaringen fra i vinter viser at etter inntaket fryser til, så åpner det seg igjen av seg selv. Tiltak for å minske tilfrysningsproblemet kan utprøves. Det er ganske sikkert mulig å forbedre konstruksjonen. Plassering av inntaket i elva bør være slik at det er rolig vann oppstrøms. Det for å etablere et stabilt islag raskest mulig. Fra drifterfaringene i vinter, og målingene som ble gjort, virker det som coandainntak fungerer tilfredsstillende under norske vinterforhold. Forholdene langs norskekysten med gjentatte tine- og fryseprosesser, er antageligvis de mest utfordrende forholdene for coandainntak. Stabile vinterforhold, som i innlandet i Norge, er antageligvis bedre. Det er dog et ubesvart spørsmål om lavere temperaturer enn $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, kombinert med lav vannføring, kan gi isdannelse i samlekanal og reguleringskammer.

I forhold til svinginger i reguleringskammer, så virker det som kammeret burde vært større. Konsekvensene av svingningene virker ikke å være alvorlig med tanke på levetiden til anlegget. Dersom reguleringskammeret må økes i størrelse betyr det at det blir vanskelig å bruke coandainntak for anlegg som er mye større enn Dyrkorn. Reguleringskammeret vil i tilfelle bli en stor konstruksjon.

Fremover bør det dokumenteres om det oppstår problemer med tilfrysning i samlekanal og reguleringskammer ved lavere lufttemperaturer enn de som var på Dyrkorn i vinter. Tiltak for eventuelt å unngå problemet bør utredes. Videre bør det sees på hva som blir konsekvensen av svingningene som oppstår på grunn av lite reguleringsvolum.

Målingene som ble gjort i vinter bør videreføres. På grunn av få tilfrysninger i vinter er grunnlaget forholdsvis lite, og med data fra flere tilfrysningstilfeller vil det være lettere å kunne trekke sikre konklusjoner.

Prosessen rundt gjenåpningen av coandainntaket etter gjenfrysning, bør også undersøkes nærmere. Her er det antageligvis mulig å gjøre laboratorieforsøk, men da må designet på modellen endres. For at resultatet skal bli riktig må lufttemperaturen under rista i modellen stemme med det som er målt i virkeligheten. Etter at rista har fryst til kan modellen gå til inntaket åpner seg igjen.

I tillegg bør det gjøres målinger av sarrmengde og isprofiler under en tilfrysning, slik det egentlig var tiltenkt at skulle gjøres i arbeidet med masteroppgaven.

Ulike tiltak for å minske problemet med gjenfrysning bør utprøves, og virkningen bør dokumenteres.

9. Litteraturliste

- Ashton, G. D. (1986): *River and Lake Ice Engineering*. Water resources publications, Chelsea, Michigan, USA, 485 s.
- Carey, K. L. (1966): Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix river, Wisconsin. Geological Survey professional paper, Volum 550, Del 2, s 192-98.
- Chauvin-arnoux (2012): Hentet fra <http://www.chauvin-arnoux.com.ua/upload/mx5x.pdf>. Nedlastet 20.4.2012.
- Clark, S. og Doering, J. C. (2002): *Laboratory observations of frazil ice*. 16th IAHR International Symposium on Ice.
- Clark, S. og Doering, J. C. (2006): *Effect of turbulence intensity on frazil formation*. 18th IAHR International Symposium on Ice.
- Daly, S. F. (1994): *Report on frazil ice*. International Association for Hydraulic Research Working Group on Thermal Regimes.
- Daly, S. F. og Ettema, R. (2006): *Frazil Ice Blockage of Water Intakes in the Great Lakes*. Journal of Hydraulic Engineering, Volum 132, No. 8.
- Denniskalma (2012): Hentet fra <http://www.denniskalma.com/ice.html>. Nedlastet 30.1.2012.
- Dulas (2008): *Type AB-X100-boulderbars-Dimensions & Installation*. upublisert, tilgjengelig fra Dulas Limited, Machynlleth, Powys, SY20 8AX,UK
- Eklima (2012): Hentet fra <http://www.eklima.no>. Nedlastet 3.5.2012.
- ENTEC AG (1998): *Schlussbericht Pilotprojekt COANDA Feinrechen für kleine Wasserkraftanlagen*.
- Ettema, R., Kirkil, G. og Daly, S. F. (2009): *Frazil ice concerns for channels, pump-lines, penstocks, siphons, and tunnels in mountainous regions*. Cold Regions Science and Technology, Volume 55, Issue 2, pp 202-11.
- Gislink (2012): Hentet fra <http://www.gislink.no/gislink/>. Nedlastet 18.3.2012.
- Globalwater (2012): Hentet fra <http://www.globalw.com/downloads/WL16/WL16B.pdf>. Nedlastet 9.2.2012.
- Howarth, J. (2001): *Coanda hydro intake screen testing and evaluation*. upublisert, tilgjengelig fra Dulas Limited, Machynlleth, Powys, SY20 8AX,UK
- Huber, D.(2005): *BEDUIN Project*. Diplomoppgave NTNU, Trondheim

Impex (2012): Hentet fra <http://www.impex.no/?gclid=CObFqOu6l6sCFcsXzQod2CRatw>. Nedlastet 9.2.2012.

Jenssen, L., Tesaker, E., Lund, S. og Huber, D.(2006): *Inntakshåndboken. Rettledning og utforming av inntak til små kraftverk i Norge*. [online] Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/global/publikasjoner/publikasjoner%202006/veileder%202006/veileder1-06.pdf>

Johnson, P. (2005): *Roadmap for PIER Research on Fish Passage at California Hydropower Facilities*. California Energy Commission.

Marko, J. R. og Jasek, M. (2010): *Sonar detection and measurements of ice in a freezing river I: Methods and data characteristics*. Cold Regions Science and Technology, Volume 63, Issue 3, pp 121-34.

Micro Hydropower (2011): Hentet fra <http://tech.groups.yahoo.com/group/microhydro/message/14413>. Nedlastet 13.5.2012.

Mossop, S. C. (1955): *The freezing of supercooled water*. Proceedings of the Physical Society

NVE (2005): *Retningslinjer for flomløp*. [online] Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/Global/Sikkerhet%20og%20tilsyn/Damsikkerhet/Retningslinjer/Retningslinjer%20for%20floml%C3%B8p%20-%20utgave%202.pdf?epslanguage=no>

Morse, B. og Richard, M. (2009): *A field study of suspended frazil ice particles*. Cold Regions Science and Technology, Volume 55, Issue 2, pp 86-102.

Seabird (2012): Hentet fra http://www.seabird.com/products/spec_sheets/39data.htm. Nedlastet 2.12.2012.

Schaefer, V. J. (1950): *The formation of frazil and anchor ice in cold water*. Transactions of the American Geophysical Union, vol. 31, pp. 885-893.

Skudal, P. K. (2011): *Coandainntak-miljøvenleg og sjølvreinskande vassinntak for elvekraftverk*. Foredrag VTF Ålesund 13.9.2011. [online] Tilgjengelig fra: <http://www.energinorge.no/getfile.php/FILER/KALENDER/Foredrag%202011/Vassdragsteknisk%20forum,%20region%20vest/Per%20Kaare%20Presentasjon-VTF-%C3%85lesund-13-sept-2011.pdf>

SonTek (2012): Hentet fra <http://www.sontek.com/adp-adcp.php>. Nedlastet 20.4.2012.

Stickler, M. og Alfredsen, K. T.(2009): *Anchor ice formation in streams: a field study*. Hydrological Processes, Volume 23, Issue 16, pp 2307-2315.

Vemco (2012): Hentet fra <http://www.vemco.com/pdf/minilog2t.pdf>. Nedlastet 2.2.2012.

Wahl, T. (2001): *Hydraulic performance of coanda-effect screens*. Journal of hydraulic engineering, Vol. 127, No. 6, June 2001, pp. 480-488.

Zumdahl, S. S. (2005): *Chemical Principles - Fifth Edition*. Houghton Mifflin Company, Boston, Massachusetts, USA, 1175 s.

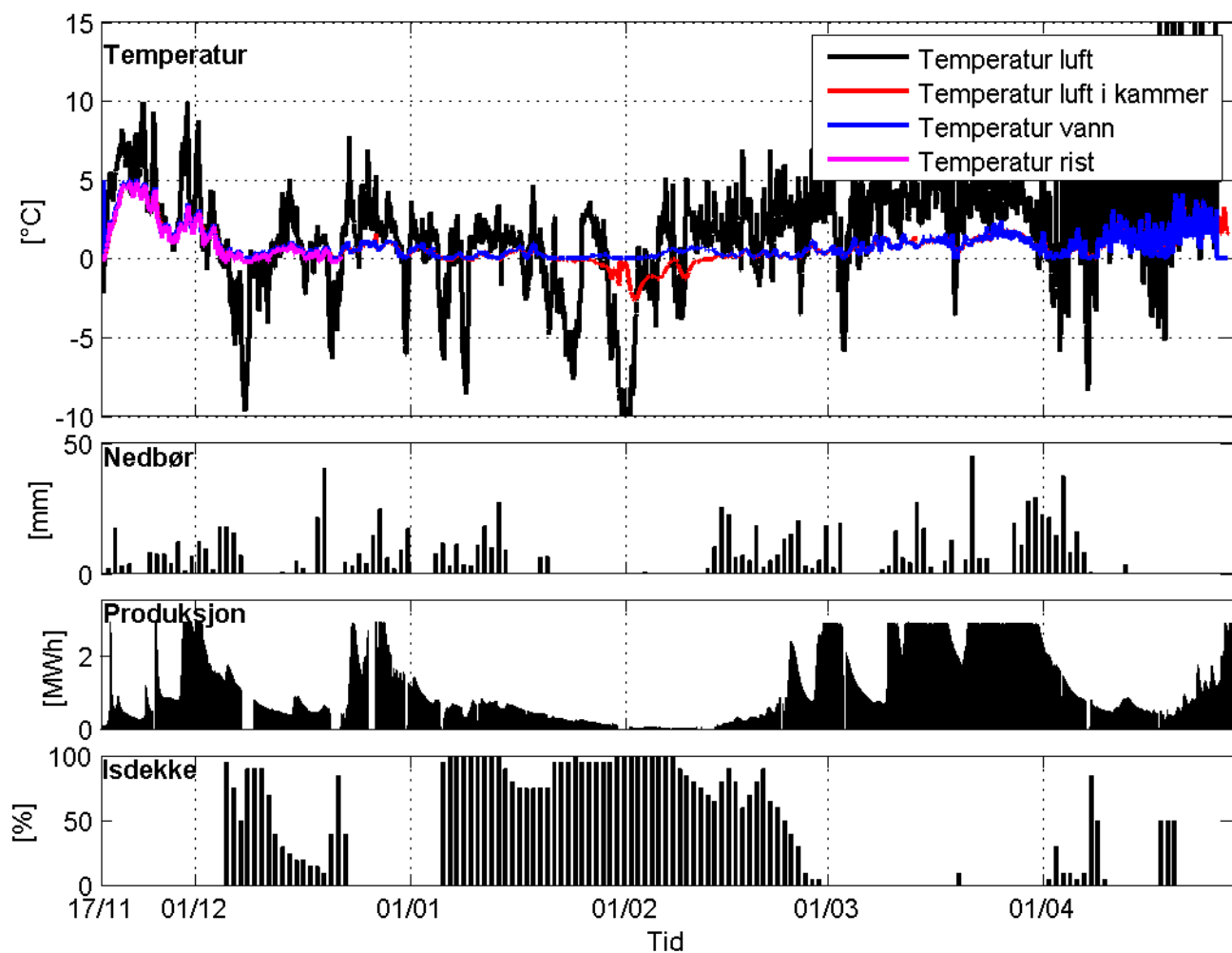
10. Figur- og tabelliste

Figur 1: Typisk utforming av coandainntak, med samlekanal og reguleringskammer (Dulas)	2
Figur 2: Typisk utforming av coandarist (Wahl, 2001)	3
Figur 3: Coandainntak ved Dyrkorn Kraftverk (Foto: H. Opaker)	4
Figur 4: Varighetskurve for Dyrkorn Kraftverk	4
Figur 5: Nedkjølingskurve for vann (Ashton, 1986)	5
Figur 6: Sarrpannekaker (Denniskalma, 2012)	7
Figur 7: Bølgeformede riller i is (Carey, 1966)	11
Figur 8: Minilog-II på veggen i reguleringskammer nede ved betongsåle (Foto: H. Opaker)	14
Figur 9: Plassering av SBE 39 på inntaksdam (Foto: H. Opaker)	15
Figur 10: Termistorstreng på coandarist (Foto: H. Nøvik)	16
Figur 11: Plassering av måleutstyr på inntaksdam (Tegning: H. Opaker)	17
Figur 12: Skjema for måling av sarrmengde	18
Figur 13: Modell med coandarist (Foto: H. Opaker)	20
Figur 14: Temperatur for Tafjord	22
Figur 15: Islegging på coandainntak på Dyrkorn (Foto: H. Opaker)	23
Figur 16: Temperatur ved Dyrkorn 14.-17. november	24
Figur 17: Temperatur Dyrkorn 10.-14. november	25
Figur 18: Lufttemperatur ved Dyrkorn 7.-10. desember 2011	26
Figur 19: Temperatur ved Dyrkorn 7.-10. desember 2011	26
Figur 20: Vanntemperatur ved Dyrkorn 7. desember	27
Figur 21: Vannføring ved Dyrkorn	28
Figur 22: Gjenfryst coandarist (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)	28
Figur 23: Coandarist med fritt innløp vann under islag (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)	29
Figur 24: Lufttemperatur Dyrkorn 19.-22. desember 2011	30
Figur 25: Temperatur Dyrkorn 20.-22. desember 2011	30
Figur 26: Temperatur Dyrkorn 20. desember	31
Figur 27: Coandarista tilstoppet av is (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)	32
Figur 28: Vannføring ved Dyrkorn 20.-23. desember	32
Figur 29: Temperatur Dyrkorn 4.-6. januar	33
Figur 30: Vannføring Dyrkorn 5.-6. januar	34
Figur 31: Gjenfryst coandarist (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)	34
Figur 32: Åpen råk på inntaksdam (Foto: H. Opaker)	35
Figur 33: Sarr fra elva (Foto: H. Opaker)	36
Figur 34: Lufttemperatur Dyrkorn 20.-22. januar	36
Figur 35: Avskrapning av sarr (Foto: H. Opaker)	37
Figur 36: Aktiv sarrpartikkel (Foto: H. Opaker)	38
Figur 37: Temperatur Dyrkorn 20. januar	38
Figur 38: Vannføring på Dyrkorn 20.-23. januar	39
Figur 39: Lufttemperatur og kraftproduksjon Dyrkorn	40
Figur 40: Slush i inntaksdam fra snøfall (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)	41
Figur 41: Vanntemperatur Dyrkorn 2. april	41

Figur 42: Coandarist delvis gjenfryst 17. april (Foto: Tafjord Kraftproduksjon AS)	42
Figur 43: Islag ved slutt av forsøk – 5 °C (Foto: H. Opaker).....	47
Figur 44: Islegging ved slutt av forsøk - 7 °C (Foto: H. Opaker)	48
Figur 45: Bakside av rist ved forsøk -10 C (Foto: H. Opaker)	49
Figur 46: Naturlig gjenfrysing av rist (Foto: H. Opaker)	50
Figur 47: Islegging ved slutt av forsøk -15 °C (Foto: H. Opaker)	51
Figur 48: Endringer i vannstand og produksjon (Tafjord Kraftproduksjon AS).....	54
Figur 49: Endringer i inntaksmagasin etter flom (Foto: H. Nøvik)	55
Figur 50: Kornfordelingskurve for sedimentprøve fra reguleringskammer.....	55
Figur 51: Innsnevring av overløp med sandsekker (Foto: H. Opaker)	56
Figur 52: Vannføringskurve for overløp på Dyrkorn	58
Figur 53: Skisse av løsning med snorkel (Tegning: H. Opaker)	65
Figur A1: Forhold ved Dyrkorn vinteren 2011/12.....	72
Tabell 1: Nødvendig temperatur for isdannelse	6
Tabell 2: Nedbør Dyrkorn 1.-7. april	40
Tabell 3: Produksjonstap vinter 2011/12.....	43
Tabell 4: Resultater fra forsøk.....	52
Tabell 5: Virkningsgrad Dyrkorn Kraftverk.....	57
Tabell 6: Resultater av måling for vannføringskurve	57

11. Vedlegg

Oversikt over vinterforhold 2011/2012



Figur A1: Forhold ved Dyrkorn vinteren 2011/12