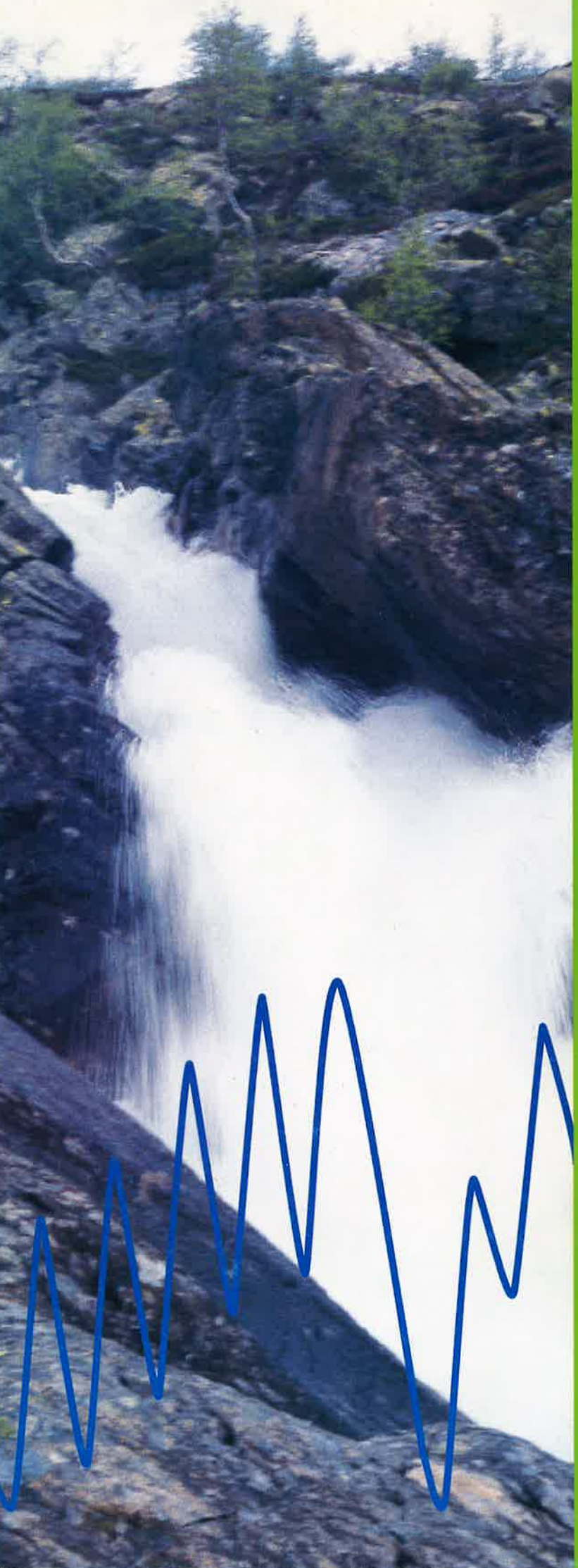


Rapport nr. 15

Virkninger av effektregulering på vanntemperatur og is i vannkraftmagasiner og innsjøer

Effekt-regulering – Miljø-virkninger og konflikt-reduserende tiltak

Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak

FoU-prosjektet Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak er et prosjekt under Norges Forskningsråds Effekt-program. Prosjektet startet i 1996 og planlegges sluttført i år 2000.

Økt kraftutveksling med utlandet aktualiserer økte effektinstallasjoner og endret kjørestrategi i eksisterende og i nye kraftverk. Prosjektet fokuserer på miljøvirkninger av økt døgnregulering som synes å bli den mest aktuelle formen for effektregulering i Norge.
Særtrekk ved effektregulering er raskere endringer i de fysiske forholdene i vassdraget enn de vi er vant med ved dagens kraftverksdrift. Slike endringer vil påvirke vassdragsmiljøet på en ny måte og vil i mange tilfeller kreve nye tillatelser fra myndighetene.
Vi har så langt lite systematisert kunnskap om miljøvirkninger knyttet til døgnregulering og annen effektregulering av kraftverk.

Hovedmålsettingene for prosjektet er derfor å:

- oppgradere kunnskapen om miljøvirkninger av effektregulering
- utvikle avbøtende tiltak som kan redusere eller eliminere negative virkninger

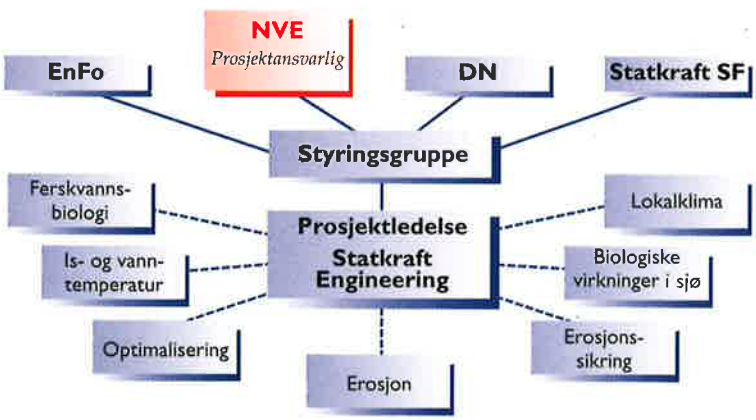
Gjennom økte kunnskaper vil utbyggere og forvaltning få et bedre grunnlag for å vurdere miljøkonsekvenser ved effektregulering og for å vurdere effektiviteten av avbøtende tiltak.

Prosjektet vurderer miljøvirkninger av effektregulering i innlandsvassdrag med vekt på virkninger i små og mellomstore innsjøer/magasin. Som eksempelvassdrag er valgt deler av Tokke-reguleringen. To delprosjekter tar i tillegg for seg mulige virkninger av økt effektregulering på biologiske forhold i fjorder.

Norges vassdrags- og energiverk (NVE) er prosjektansvarlig. Det er i tillegg etablert en styringsgruppe for prosjektet som består av representanter for Direktoratet for naturforvaltning (DN), Energiforsyningens fellesorganisasjon (EnFO), Statkraft SF og NVE. Daglig prosjektledelse utføres av Statkraft Engineering as.

Prosjektet er inndelt i seks delprosjekter knyttet til innlandsvassdrag og to delprosjekter knyttet til fjord. Delprosjektene knyttet til innlandsvassdrag dekker fagområdene: is- og vanntemperatur, erosjon, erosjonssikring, lokalklima, biologi og optimalisering med hensyn på teknikk, miljø og økonomi. Fjordprosjektene omfatter problemstillinger knyttet til effektregulering og virkning på fisk og algevekst.

Utførende institusjoner er: Universitetet i Bergen, Det norske meteorologiske institutt, Norsk institutt for vannforskning (NIVA), NVE, Statkraft Engineering og Universitetet i Oslo.



Ytterligere informasjon om prosjektet og publikasjoner i serien Rapport fra Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak får du ved å kontakte:

Prosjektleder Elise Førde
Statkraft Grøner as
Postboks 400
1327 Lysaker

Tlf : 67128000
Fax: 67128212

e-mail: elf@statkraftgroner.no
http://www.statkraftgroner.no/project/effe

 Forsidefoto: Vegard Pettersen

EFFEKTREGULERING – MILJØVIRKNINGER OG KONFLIKTREDUSERENDE TILTAK

Delprosjekt 1.2 Is og vanntemperatur

TITTEL: Virkninger av effektregulering på vanntemperatur og is i vannkraftmagasiner og innsjøer The impacts of short-term regulation on watertemperature and ice in reservoirs and lakes	**RAPPORT NR. 15**
PROSJEKTANSVARLIG: Randi Pytte Asvall **PROSJEKTLEDER:** Ånund Kvambekk	**INSTITUSJON:** Norges vassdrags- og energidirektorat
FORFATTER: Ånund Kvambekk	**INSTITUSJON:** Norges vassdrags- og energidirektorat

SAMMENDRAG:
Denne rapporten omhandler virkninger av effektregulering i magasiner på vanntemperatur- og isforhold. Vurdering av virkningene er basert på resultatene av to fullskala effektreguleringsforsøk i Vinjevatn (Telemark) høsten 1997 og 1998, samt vinteren 1999. I tillegg er det gjort en del teoretiske betraktninger. Det er lagt vekt på at resultatene/vurderingene skal kunne ha overføringsverdi til andre typer vann og vassdrag hvor det planlegges effektregulering.

En innløpselv oppstrøms kraftverksutslippet viste seg å ha stor innvirkning på temperaturforholdene ved effektkjøring. Om høsten observerte vi uvanlig store døgnlige temperaturvariasjoner helt ned til bunnen i 30 m dyp. Når kraftverket stanses helt om natten, vil råken ved utslippsstedet islegges i sterk kulde. Råkarealet midlet over ett døgn blir derfor vesentlig mindre ved effektkjøring i sterk kulde. Hvis kraftverket derimot går med lav driftsvannføring om natten vil det ikke islegges, og råken vil bli større.

ABSTRACT:
This report describes daily fluctuations in water temperature and ice cover in regulation reservoirs that may be caused by hydro power peaking operation. The conclusions are based on two full scale peaking operations of lake Vinjevatn (southern Norway) during autum 1997 and 1998, and winter 1999. Making the results applicable for other sites where hydro power peaking operations are planned has been focused.

An inlet river upstream the power plant outlet strongly influenced the water temperature in the lake during peaking operations. Hence, abnormally large daily fluctuations were observed in the deep parts of the lake (30 m depth) in the autumn. In very cold weather, the lead downstream the power plant outlet will freeze over during the night if the power plant is completely stopped. The daily averaged lead area is therefore substantially reduced during peaking operations. However, if the power plant is operated with low discharges during the night, the lead will stay open and increase in the daytime when the discharge is increased.

EMNEORD: Effektregulering, innsjø, Vinjevatn, Våmarvatn, vanntemperatur, is.

Lysaker, Februar 2001

Elise Førde
Prosjektleder

ISBN 82-91904-16-2
ISSN 0809-5825

Innholdsliste

SAMMENDRAG **3**

SUMMARY **5**

1. INNLEDNING **8**

1.1 MÅLSETTING 8
1.2 OM ARBEIDET 8

2. LOKALITETEN **9**

3. FORSØK, MÅLINGER OG RESULTATER I VINJEVATN **11**

3.1 VANNTEMPERATUR 11
3.1.1 Forsøkskjøring høsten 1997 ..... *11*
3.1.2 Forsøkskjøring høsten 1998 ..... *14*
3.1.3 Perioder med effektlignende kjøring *16*
3.1.4 Samlet resultat fra Vinjevatn *20*
3.2 ISFORHOLD 20
Observerte isforhold *20*
3.2.2 Helgestansen februar 1999 ..... *21*

4. MÅLINGER OG RESULTATER I VÅMARVATN **23**

4.1 VANNTEMPERATUR 23
4.2 ISFORHOLD 25

5. GENERALISERING **26**

5.1 SESONGMESSIG REGULERING 27
5.1.1 Vanntemperatur *27*
5.1.2 Isforhold *28*
5.2 EFFEKTREGULERING 29
5.2.1 Vanntemperatur *29*
5.2.2 Isforhold *31*
5.3 FORSKJELLER MELLOM SESONGMESSIG REGULERING OG EFFEKTREGULERING 31
5.3.1 Vanntemperatur *31*
5.3.2 Isforhold *32*
5.3 MAGASINTYPEN OG ANDRE INNVIRKNINGER 34

6. AVBØTENDE TILTAK **36**

7. MODELLER **37**

8. METODEUTVIKLING **38**

9. LITTERATURLISTE **39**

FIGUR- OG TABELL-LISTE **39**

Sammendrag

Det er lagt vekt på å skille virkninger på vanntemperatur og is som oppstår ved effektkjøring fra de som oppstår ved "vanlig" sesongregulering. Med effektkjøring menes her døgnregulering, og det er sammenlignet jevn kjøring gjennom et døgn med effektkjøring hvor en tenker seg omtrent dobbel vannføring om dagen og avstengt om natten. Prosjektet har fokusert på virkninger på inntaksmagasiner og innsjøer/magasiner oppstrøms og nedstrøms et effektkjørt kraftverk. Virkninger på elvestrekninger er derfor ikke behandlet her.

For å komplettere teoretiske betraktninger ble det iverksatt et omfattende måleprogram i magasinene oppstrøms (Våmarvatn) og nedstrøms (Vinjevatn) Vinje kraftverk. Vinje kraftverk ble valgt da det har installasjon som er dimensjonert for effektkjøring, og også periodevis effektkjører. Det ble foretatt to perioder med forsøkskjøring som varte 1-2 uker med et på forhånd fastlagt kjøremønster.

I inntaksmagasinet (Våmarvatn) fant vi så godt som ingen temperaturvariasjoner som skyldtes effektkjøringen.

Utløpsmagasinet (Vinjevatn) er et typisk gjennomstrømningsmagasin. Det er spesielt da det har en innløpselv (Smørkleppåi) oppstrøms kraftverket som har en betydelig vannføring, også om vinteren. Det viste seg under forsøkene at de største variasjonene i vanntemperaturen på grunn av effektkjøring skyldtes samspillet mellom innløpselva og kraftverksvannet.

Når det er store temperaturforskjeller mellom innløpselva og kraftverksvannet blir det også tetthetsforskjeller og innløpselva vil dykke de ganger den er tyngst. Under forsøket i september dykket Smørkleppåi og vi fikk døgnlige temperatursvingninger på inntil 1 °C i alle dyp fra 5-30 m, størst svingninger nær bunnen. Normalt er det svært stabile temperaturer i dypet i uregulerte vann eller vann med jevn kjøring.

Fra effektlignende kjøring til andre årstider fant vi at det av samme grunn kunne oppstå døgnvariasjoner på anslagsvis 3 °C om sommeren og 2 °C om vinteren, men da i de øverste 2 m da vannet i innløpselva vanligvis er lettest på disse årstidene. Tidlig på høsten er det en overgangsperiode hvor vannmassene fra innløpselva og kraftverket vanligvis er like tunge, og temperaturvariasjonene blir svært små.

Målingene viste også to andre temperaturvirkninger som oppstår ved effektkjøring. Disse virkningene avhenger av inntaksdypet og er nok størst når inntaket ligger like under termoklinen (skille mellom varmt overflatevann og kaldere bunnvann). Etter en stans startes kraftverket forsiktig. I starten trekkes vann hovedsakelig fra samme dyp som inntaket. Når vannføringen øker dras det med mer overflatevann og temperaturen stiger. De første 1-2 timer etter oppstarten fant vi derfor inntil 2 °C kaldere vann enn det en ville fått med halvparten så stor jevn kjøring. Den andre effekten var at driftsvannets temperatur var inntil 2 °C høyere ved full last enn ved halv last. Årsaken er at det dras med mer varmt overflatevann ved høy last. Denne effekten vil avhenge av været og neppe være så stor ved effektkjøring over lengre perioder da varmt overflatevann "forbrukes".

Temperaturfallet etter oppstart har kun lokal effekt nær kraftverket, mens den økede temperaturen ved full last vil merkes overalt hvor kraftverksvannet brer seg.

Når en skal vurdere virkningen på vanntemperaturen i utløpsmagasiner skiller det seg ut tre grupper:

- Dypt magasin uten nevneverdig gjennomstrømning
- Dypt magasin med gjennomstrømning
- Grunt magasin med gjennomstrømning som gir stor blanding

I kommentarene som følger er det antatt at det ikke er noen stor innløpselv oppstrøms kraftverket.

I et dypt magasin uten nevneverdig gjennomstrømning vil det dannes et varmt overflatelag om sommeren. Nær kraftverksutløpet vil vannmassene blandes, og blandingssonen vil bli litt større ved effektkjøring enn ved jevn kjøring. Ellers ventes det små endringer.

I et dypt magasin med gjennomstrømning vil strømhastigheten variere ved effektkjøring. Også her vil blandingssonen nær kraftverksutløpet bli litt større, men vanntemperaturen ellers i sjøen vil nok bli svært nær de en finner ved jevn kjøring.

I et grunt magasin med gjennomstrømning vil vannmassene blandes over terskler. Ved effektkjøring får en enda bedre blanding over tersklene, men dersom det er gjennomblanding allerede ved jevn kjøring blir det ingen endring der ved effektkjøring. Om natten når kraftverket står er det betydelig svakere strøm og temperaturen kan endre seg noen tideler i de øverste vannlagene (vanligvis kaldere). Når overflatelaget er kaldere enn 4 °C vil avkjølt vann bli lettere og en kan få flere graders temperaturfall i et tynt overflatelag. Under rette forhold (kaldt og vindstille) kan en få islegging. I dypet blir det derimot små endringer av en natts avkjøling.

Dersom det eksisterer en relativt stor innløpselv som ligger slik til at kraftverksvannet og elvevannet blandes, vil en ved effektkjøring få temperaturvariasjoner i perioder hvor temperaturen på de to vannkildene er forskjellig. Variasjonen avtar forholdsvis raskt med avstanden fra kraftverket, avhengig av dybdeforholdene. I Vinjevatn var variasjonene borte allerede etter 2-3 km.

Dersom inntaksmagasinet er lite, kan en få vesentlig variasjon i vannstanden ved effektkjøring, både opp og ned. Ved jevn kjøring er det jevnt avtagende vannstand utover vinteren bortsett fra under eventuelle vinterflommer. Det vil derfor bli mer oppsprukket is og mer overvann ved land ved effektkjøring. Ved store magasiner blir isforholdene i inntaksmagasinet derimot ganske lik de ved jevn kjøring.

Et isdekke dannes når vanntemperaturen når null grader. Dersom det allerede eksisterer en iskant, kan denne iskanten opprettholdes selv om vanntemperaturen er over null. Det må bare være kaldt nok til at varmen som avgis fra vannet balanseres av varmetapet fra overflaten. En iskant som dannes i en periode med sterk kulde kan derfor holde seg på samme sted selv om det blir mindre kaldt.

Ved effektkjøring vil en få islegging i stille og kalde netter når kraftverket står. Når kraftverket starter opp igjen vil isen brekke opp og/eller smelte vekk i hovedstrømmen. Lenger vekk avtar strømmen og det vil oppstå en likevekt ved iskanten hvor vannet kan være over frysepunktet. I streng kulde kan vanntemperaturen være vesentlig over null, mens den ligger nær null i svak kulde. Også ved jevn kjøring kan en ha situasjoner hvor vanntemperaturen er over null ved iskanten, men da må det nylig ha vært en enda strengere kuldeperiode for å bygge opp isdekket.

Dobbel vannføring gir økt strømhastighet, så vanntemperaturen er høyere i samme avstand fra kraftverket under effektkjøring (når kraftverket går). I sterk kulde kan vi derfor forvente at råken som oftest blir mindre ved effektkjøring enn ved jevn kjøring. Ved moderat kulde blir råken av omtrent samme størrelse, mens den vil bli større ved svak kulde og mildvær. Under moderat og sterk kulde får vi islegging om natten, så midlet over døgnet blir det vesentlig mindre åpent vann som igjen virker dempende på frostrøyken. Dersom kraftverket ikke slås helt av om natten, eller det av andre grunner er en strøm av "varmt" vann, vil det ikke bli nevneverdig islegging om natten. Råken vil da kunne bli større ved effektkjøring også ved moderat og sterk kulde.

Vi har ikke fokusert på dykket utslipp i dette prosjektet. Dykket utslipp har vært brukt ved utslipp i fjorder for å unngå ferskt overflatelag med ofte tilhørende islegging, og det har vært brukt i ferskvann for å redusere råken og dermed frostrøyken. Virkningen på isdekket er altså forskjellig i saltvann og ferskvann, men begge steder ønsker en å holde kraftverksvannet unna overflaten. Ved effektkjøring med dobbel vannføring av jevn kjøring vil det bli mer turbulens og større sjanse for at overflaten blir påvirket. Effektkjøring vil derfor kunne redusere virkningen av et dykket utløp. Enkelte steder kan nok likevel et dykket utslipp være et avbøtende tiltak ved effektkjøring.

Ved effektkjøring blir det som oftest også varierende vannstand i utløpsmagasinet/innsjøen. Det blir mer oppsprekking av strandsonen med overvann. Dette gir først og fremst problemer der strandsonen er bratt. Over terskler får vi øket strømhastighet når kraftverket går, så isen blir mer usikker i slike områder.

I dette prosjektet ble det ikke foretatt en numerisk analyse av vanntemperaturen ved effektkjøringen. Vi har derimot undersøkt om det finnes kompetanse på dette området i Norge. Det viser seg at det er flere miljøer i Norge som kan løse oppgaven med å simulere en effektregulering med utslipp i en innsjø, men ingen miljøer kan hevde at de har god erfaring med dette. De fleste miljøene har konsentrert virksomheten rundt fjorder og hav. Det er trolig at det er mer erfaring på ferskvannsmodellering i andre land, for eksempel Sverige ved SMHI. Vi har ikke undersøkt dette nærmere, da vi kan konkludere med at det er ekspertise nok i Norge. Men en slik modellering vil være ganske kostnadskrevende, da det vil være et visst preg av utvikling over arbeidet.

Summary

Fluctuations in water temperature and ice cover due to hydro power peaking distinct from a constant load has been emphasized. The term "hydro power peaking" is in this report used for daily regulations where the power plant is on during the daytime and off during the night. Compared with a hydro power plant operated under a constant load, the hydro power peaking yields approximately double the discharge during the daytime. This project has focused on inlet reservoirs and lakes/reservoirs upstream and downstream a power plant operating with peaking.

An extensive field measuring program was established in the reservoirs upstream (Våmarvatn) and downstream (Vinjevatn) of the Vinje hydro power plant to support theoretical considerations. Vinje power plant was chosen as it is designed for power peaking and it is also operated with power peaking in periods. Two test periods lasting 1-2 weeks with power peaking operation following a strictly determined pattern were carried out.

We found almost no temperature variations in the inlet reservoir (Våmarvatn) due to power peaking.

The outlet reservoir (Vinjevatn) can be classified as a through-flow reservoir. Vinjevatn is somewhat special as it has an inlet river (Smørkleppåi) upstream of the power plant with a considerable discharge, even in the winter. During the test cases, the greatest temperature fluctuations in Vinjevatn were caused by interplay between the inlet river and the water from the power plant.

Water temperature differences between the inlet river and the power plant discharge induces density differences, and the river water will dive when it is heaviest. Smørkleppåi dived during the test case in September, and we measured daily temperature fluctuations of up to 1 °C in all depths from 5-30 m with the largest fluctuations at the bottom. The normal situation is very stable temperatures at such depths.

For the same reason, from situations where Vinje had been operated in a peak-like way, we found daily fluctuations of approximately 3 °C in summertime and 2 °C in wintertime. However, the fluctuations now occured in the uppermost 2 m as the inlet river normally is lightest at these times of

the year. In early spring there is a transition period where the water masses from the inlet river and the power plant usually have the same density, and hence induce small temperature fluctuations.

The measurements also revealed two other temperature effects induced by power peaking. These effects depend upon the inlet depth and are probably of greatest importance when the inlet is located below the thermocline. After a stop, the power plant is started carefully. At once the water is pulled out from the same depth as the inlet. When the discharge increases more and more water is taken from the higher levels and the temperature in the power plant discharge increases. Therefore, the first 1-2 hours after the start-up, we measured up to 2 °C colder water than we would have measured with half as large constant discharge. The other effect is that more "warm" surface water is pulled out when the discharge increases. We measured up to 2 °C warmer discharge water at full load than at half the load. This effect will depend on the weather and will probably be reduced after long periods of peaking operations since the warm surface water is "consumed". The temperature drop after start-up only affects the area close to the power plant outlet, while the increased temperature at full load will affect all areas where the discharge water is spread.

Three groups of outlet reservoirs stand out when we study the effect on water temperature in reservoirs:

- Deep reservoir with very small flow through the reservoir
- Deep reservoir with through-flow
- Shallow reservoir with through-flow that imposes mixing of water masses

The following comments assume that no large inlet rivers enter the reservoir upstream the power plant.

A warm surface layer develops in a deep reservoir with very small through-flow. The water masses will mix in the zone close to the power plant outlet, and the mixing zone will be somewhat larger under peaking operation than under constant load. Only small differences are expected elsewhere.

The current will change under peaking operation in a deep reservoir with through-flow. The mixing zone will also increase somewhat in such reservoirs, but elsewhere the water temperature will probably be very close to those found when operating at a constant load.

In a shallow reservoir with a through-flow, the water masses will mix when passing shallow sills. Power peaking will increase the mixing efficiency, but negligible changes will occur if the water masses are already fully mixed at a constant load. At night, when the power plant is stopped, the current is considerably weaker and the water temperature can change some tenths of a degree in the upper layers (most often colder). When the surface layer is colder than 4 °C cooled water will be lighter and increase the stability. A thin surface layer can therefore be several degrees colder. At the right conditions (cold and calm), the surface layer can freeze. However, one night of cooling will only cause small changes below the surface layer.

At power peaking, if a relatively large inlet river is located in such a way that the river water and the water from the power plant mix, daily temperature fluctuations will occur in periods with temperature differences between the two sources. The fluctuations will diminish rapidly with distance from the power plant outlet, dependent of the depth conditions. In Vinjevatn the fluctuations were negligible at a distance of 2-3 km.

Power peaking may cause substantial water level fluctuations in a small inlet reservoir, both up and down. When operating with a constant load, the water level decreases steadily through the winter except at winter flood events. Hence, close to the shore the ice will crack to smaller fragments and water will rise to the ice surface more frequently. The ice conditions on a large inlet reservoir do not depend so much on the way the power plant is operated.

An ice cover is formed when the water temperature reaches zero degrees Celsius. When the ice cover has formed, if the air is cold enough, the water temperature may be above zero without melting the ice.

Therefore, the size of a lead in equilibrium in severe cold depends on the ice conditions prior to the coldperiod.

At power peaking ice is formed in calm cold nights when the power plant is stopped. After start-up the ice will break up and/or melt in the main current. Further downstream the current will decrease and the ice edge will stabilise at a distance where the water temperature may be above the freezing point. In severe cold the water temperature at the ice edge may be substantially above zero while it is close to zero in weak cold. Also when operating at constant load, there may be situations where the water temperature is above zero at the ice edge, but then the ice cover must have formed in a recently colder period.

Increased discharge leads to increased velocity of the currents, so the water temperature in the same distance from the power plant outlet is larger at power peaking (when not stopped) than at a constant load. We can therefore expect the lead size to decrease in severe cold at power peaking compared to a constant load. In medium cold the lead size will remain unchanged, while it increases during weak cold or mild weather. An ice cover will form during the stop at night in medium and severe cold, so the daily averaged lead size will decrease substantially, in turn reducing the frost smoke. However, the lead will not freeze during the night if the power plant is not set to a complete stop, or if for any other reason a flow of "warm" water is sustained. Then even the lead size will increase in medium and weak cold.

We have not focused on submerged outlets in this project. Submerged outlets have been constructed for outlets in fjords to avoid a surface layer of fresh water with a potential for ice building, and have been used in lakes to reduce the lead and consequently the frost smoke. The effect of a submerged outlet differs from salt water to fresh water, but in both mediums the purpose is to keep the power plant discharge away from the surface. When operating with power peaking and double discharge in the daytime, increased turbulence will increase the possibility of disturbing the surface layer. Power peaking may therefore reduce the effect of a submerged outlet. Even with power peaking there will still be locations where a submerged outlet can be a remedy.

Fluctuations in the outlet reservoir/lake are often a result of power peaking. The ice will crack close to shore and water may rise to the surface. This is mostly a problem where the shoreline is steep. The ice cover will also be weaker across sills as the current is increased during power peaking.

The project did not include numerical modelling of water temperature at power peaking. We have however made some requests to reveal where such competence is possessed in Norway. Several may be able to solve the task of simulating a power peaking discharge in a lake, but no institutions can claim long experience with this. Most institutions have concentrated their work to the fjords and the open ocean. More experience is most probably found in other countries, for instance Sweden at SMHI. We have not searched abroad as we can conclude that we have sufficient expertise in Norway. However, such modelling will be costly, and to some extent the work will have a touch of development.

1. Innledning

1.1 Målsetting

Hovedmålsettingen til prosjektet "Effektregulering – miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak" er å heve kunnskapen om miljøvirkninger i vassdrag av effektreguleringer. Prosjektet har tatt for seg problemer og løsninger knyttet til innsjøer og magasiner, samt i fjorder. Delprosjekt 1.2, "Vanntemperatur og is" fokuserer på endringer i vanntemperatur og isforhold i innsjøer og magasiner som skyldes effektkjøring. Elvestrekninger er ikke vurdert i dette prosjektet. Det er lagt vekt på å skille virkninger som oppstår ved "effektkjøring" fra de som ville oppstått ved "vanlig" sesongregulering. Prosjektet ble startet høsten 1996 og avsluttes i 2000.

Prosjektet har valgt å konsentrere seg om virkninger av døgnregulering da en forutsetter at det er denne type effektregulering som vil få størst økning i omfang som følge av kraftutveksling med kontinentet. Da samme vannmengde skal ut om en kjører jevnt eller effektkjøring, har vi i sammenligningen fokusert på effektkjøring som kjøring med dobbel vannføring om dagen (dobbel av jevn kjøring), og stans om natten. Resultatene av arbeidet vil likevel ha nytteverdi ved vurdering av andre typer korttidsreguleringer.

1.2 Om arbeidet

Tidlig i prosjektet ble det foretatt internasjonalt litteratursøk uten at en fant noen interessante undersøkelser som omhandlet effektkjøring og innsjøer for dette delprosjektet.

Da dette var nye problemstillinger vektla vi målinger av en virkelig effektkjøring. Tokke/Vinje ble valgt som testområde (fig. 2.1) da Vinje kraftverk tidvis ble kjørt som et effektverk. Det viste seg tidlig at det var vanskelig å forutsi når de ville kjøre effektlignende kjøring da det ble styrt etter kraftetterspørselen, og vi ønsket i tillegg å måle på mer ekstreme vannstandssvingninger enn det som var vanlig. Vi klarte med velvilje fra operatøren å få til to planlagte forsøkskjøringer om høsten/sensommeren, og en forsøkskjøring om vinteren som måtte avbrytes pga. høy lufttemperatur.

Det ble foretatt omfattende målinger av vanntemperatur og isforhold, også utenom forsøksperiodene, og dataene er gjennomgått for å se etter perioder med effektlignende kjøring.

Undersøkelsene er foretatt i Tokke/Vinje , men det er forsøkt å generalisere resultatene for å få ny kunnskap som kan brukes ved vurderinger av effektreguleringer også i andre vassdrag.

2. Lokaliteten

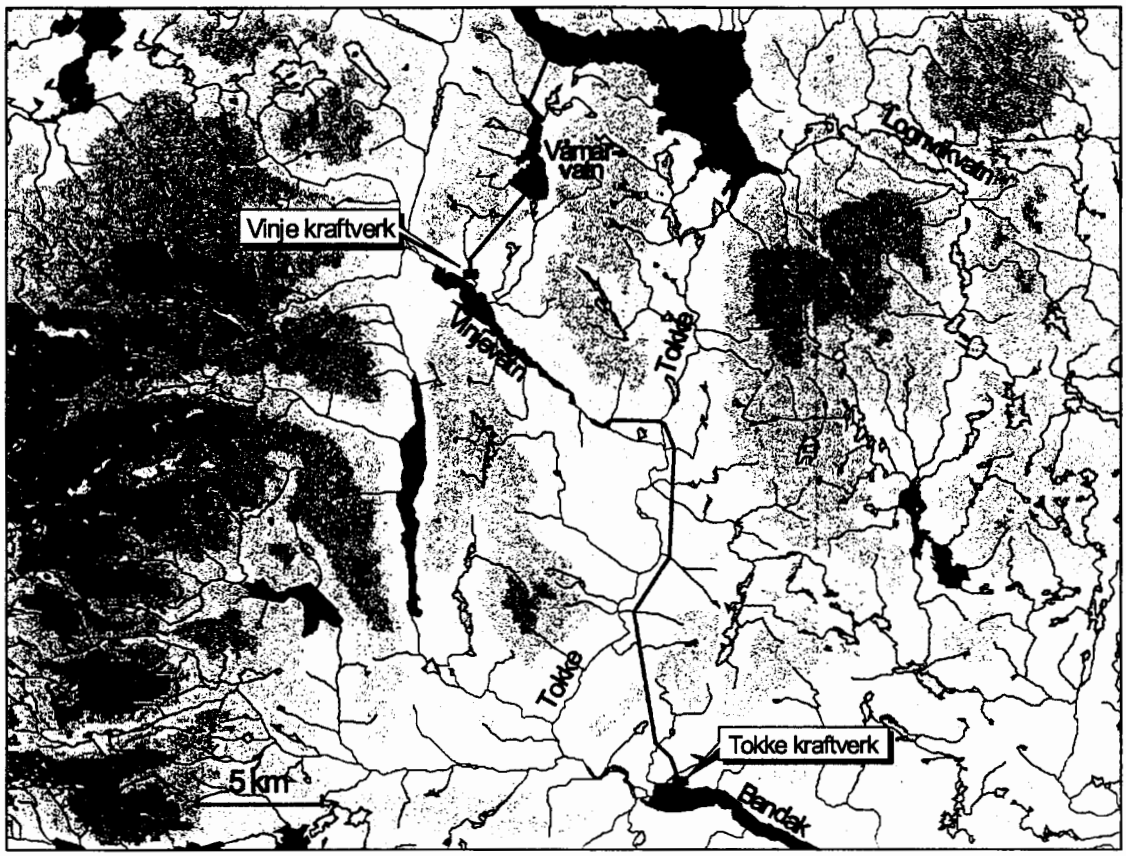


Fig. 2.1 Kart over magasiner, kraftverk og tunneler i Tokkevassdraget nær Vinje kraftverk.

Tokkevassdraget ligger i Vinje og Tokke kommuner. Det naturlige elveløpet går mellom Totak og Bandak, men vannet ledes nå fra Totak i tunneler gjennom Våmarvatn, Vinje kraftstasjon, Vinjevatn og Tokke kraftstasjon (fig. 2.1). Tabell 1 og 2 viser noen viktige data for magasinene og kraftverkene.

Tabell 2.1 Noen data for magasinene rundt Vinje kraftverk

		Våmarvatn	Vinjevatn
HRV	m o.h.	687.3	465.5
LRV	m o.h.	677.0	462.0
Magasin volum	mill. m^3	26.2	11.2
Største dyp	m	98	35
Grunneste terskel	m	15	1

Tabell 2.2 Største mulige driftsvannføring for kraftverkene ved Vinjevatn

		Vinje kraftverk	Tokke kraftverk
Driftsvannføring	m^3/s	166	128

Våmarvatn er inntaksmagasin til Vinje kraftverk og er forbundet med Totak med en tunnel. I prinsippet skulle de to magasinene ha samme vannstand, men tunnelen er for trang slik at vannstanden i Våmarvatn blir liggende opp til 4 m lavere enn vannstanden i Totak når Vinje går for fullt. Vi får

derfor betydelig større vannstandsendringer i Våmarvatn enn i Totak ved effektkjøring. Våmarvatn er nesten 100 m dypt, og har ingen terskler som er grunnere enn 15 m ved LRV.

Vinje kraftverk har overflateutslipp i Vinjevatn som er et langt, smalt og grunt magasin med flere dypere partier (25-35 m) avbrutt av terskler med 1-5 m dyp. Nedre del av vannet var tidligere en elv, og ved stor vannføring er det betydelig strøm i magasinet. Fig. 2.2 viser en enkel strømberegning ved kjøring av Vinje og Tokke kraftverk i motfase. Resultatet viser gjennomsnittlig strøm, og hastigheten vil nesten alltid være større i deler av tverrsnittet.

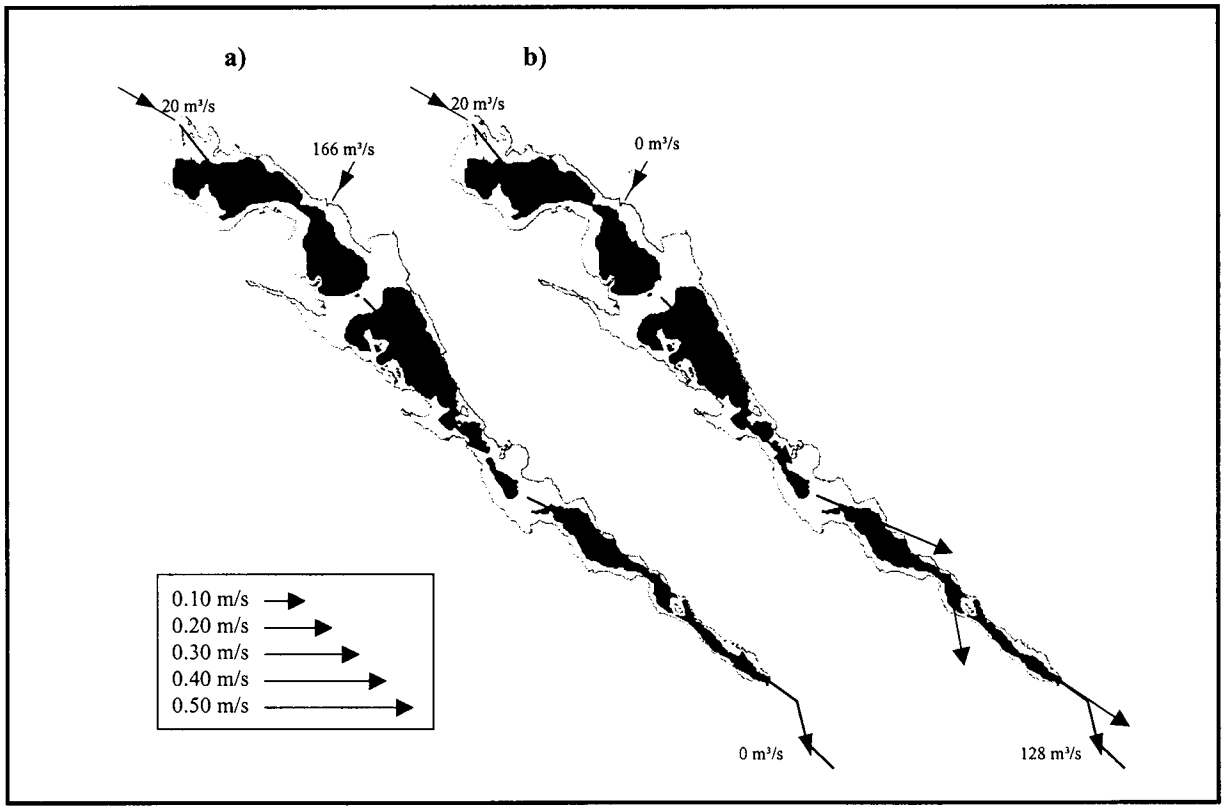


Fig. 2.2 Gjennomsnittelig strøm over terskler i Vinjevatn ved (a) full drift av Vinje kraftverk og stans i Tokke kraftverk, og (b) full drift av Tokke kraftverk og stans i Vinje kraftverk. Vannstanden i Vinjevatn er 1 m under HRV og det kommer 20 m³/s inn fra Smørkleppåi. Skraveringen angir dybdeforholdene der mørkt er dypest.

De største vannmengdene til Vinjevatn kommer fra Vinje kraftverk. Den nest største tilførselen er fra Smørkleppåi som kommer fra Haukeliområdet (også avløp fra Haukeli kraftverk). Et titalls bekker drenerer direkte til Vinjevatn, men selv til sammen er de vesentlig mindre enn Smørkleppåi. Vinjevatn er inntaksmagasin for Tokke kraftverk som har inntak i sør-østre ende av vannet. Tokke har utløp direkte i Bandak.

3. Forsøk, målinger og resultater i Vinjevatn

For å ha kontrollerte og ensartede forhold ble Vinje og Tokke kraftverk kjørt etter et fastlagt mønster i 3 forsøksperioder av 1-2 uker hver. For dette delprosjektet var det spesielt viktig å få kraftverket til å stenge helt om natten, da det gir større potensiale for korttidsvariasjoner i temperatur- og isforhold. Av miljøhensyn kunne vi ikke gjennomføre forsøk i den varmeste delen av sommeren. Svært milde vintre i forsøksperioden førte til at den tredje forsøksperioden måtte avbrytes etter 3 dager, og ikke ble fullført.

3.1 Vanntemperatur

3.1.1 Forsøkskjøring høsten 1997

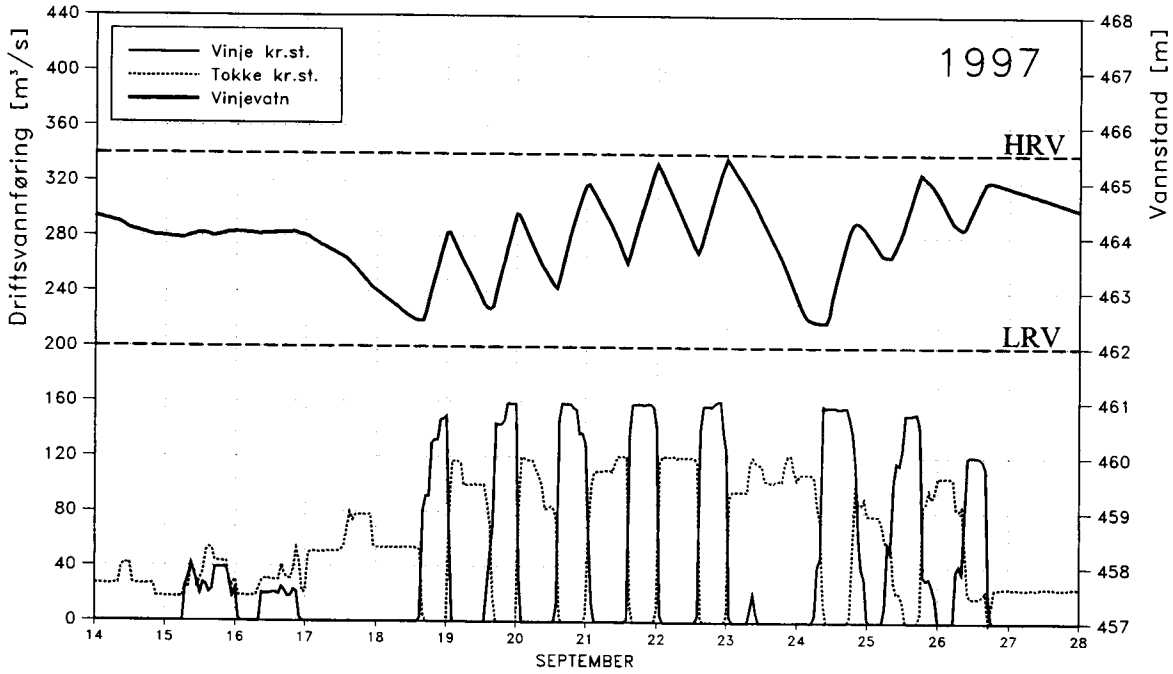


Fig. 3.1 Driftsvannføringen i kraftverkene og vannstanden i Vinjevatn under forsøkskjøringen 17-26 september 1997.

17-26 september 1997 ble det gjennomført forsøkskjøringer i Vinje og Tokke kraftverk. Vinje kraftverk ble stanset i 15 timer og gikk i 9 timer for full maskin. Tokke ble kjørt i motfase slik at vannstandsutslagene i Vinjevatn ble så store som mulig, men innenfor de tillatte grensene. Forsøkskjøringsperioden ble innledet med en stans i halvannet døgn i Vinje kraftverk for å illustrere en helgestans. Vannstanden sank da ned mot LRV (Fig. 3.1). I løpet av en uke steg vannstanden mot HRV mens de døgnlige svingningene var på 1.5 – 2 m.

For å måle vanntemperaturen under forsøket var det satt ut termistorstrenger i Vinjevatn ved Sandnes og Engesgrovbekken og i Våmarvatn ved Landsverk (Fig. 3.2). Disse målte vanntemperaturen i inntil 10 dyp. I tillegg var en temperaturstreng plassert i Lognvikvatn (ved Rauland) som fungerte som referansemåling (uregulert vassdrag). Temperaturene ble registrert hver time i Våmarvatn og Vinjevatn, mens det var tre timers intervaller i Lognvikvatn. For å måle temperaturen på vannet som kom inn og ut av Vinjevatn var det lagt ut loggere i Smørkleppåi og i Vinje og Tokke kraftverk. Disse målte hver tredje time. Nøyaktigheten på alle temperatur-målingene er bedre enn 0.1 °C.

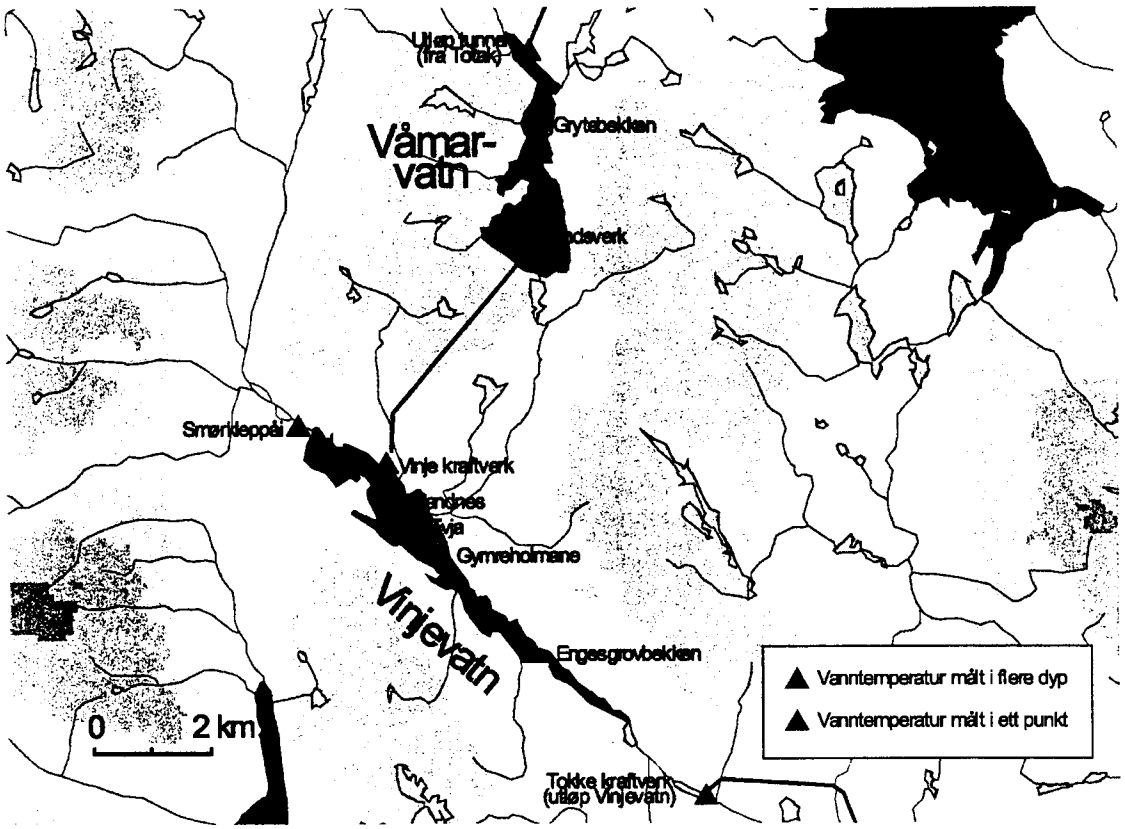


Fig. 3.2 Målepunkter som er benyttet i prosjektperioden

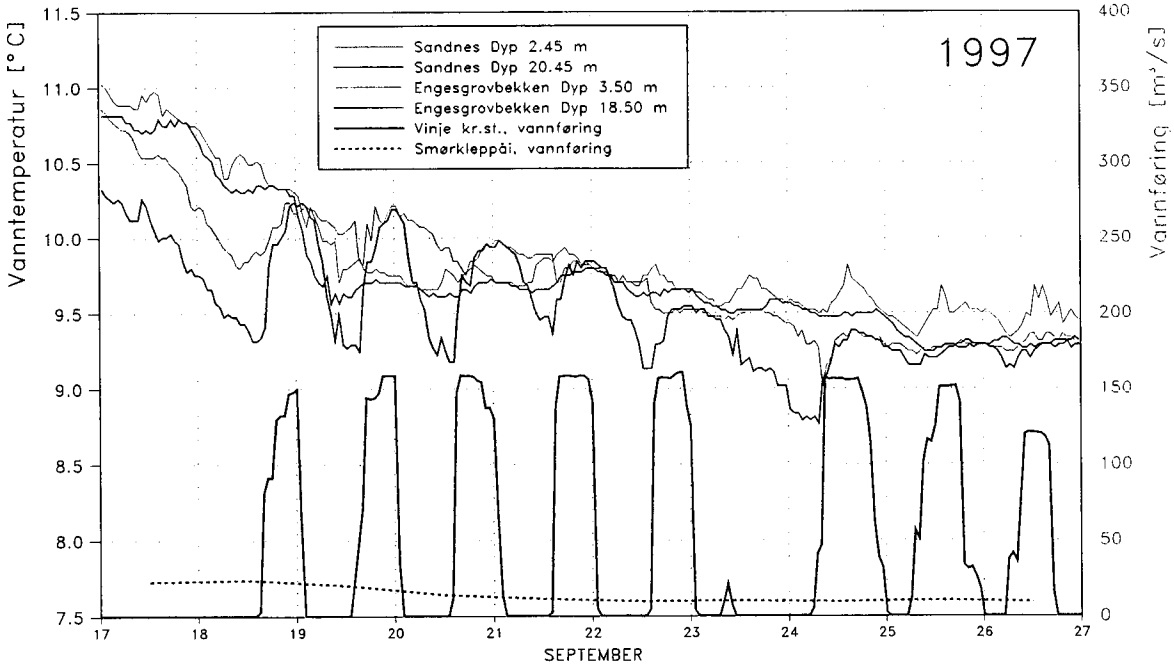


Fig. 3.3 Vanntemperaturen i Vinjevatn ved Sandnes og Engesgrovbekken i forsøkskjøringsperioden (18-26 september 1997). Det er også plottet vannføringen i Vinje kraftverk og Smørkleppåi.

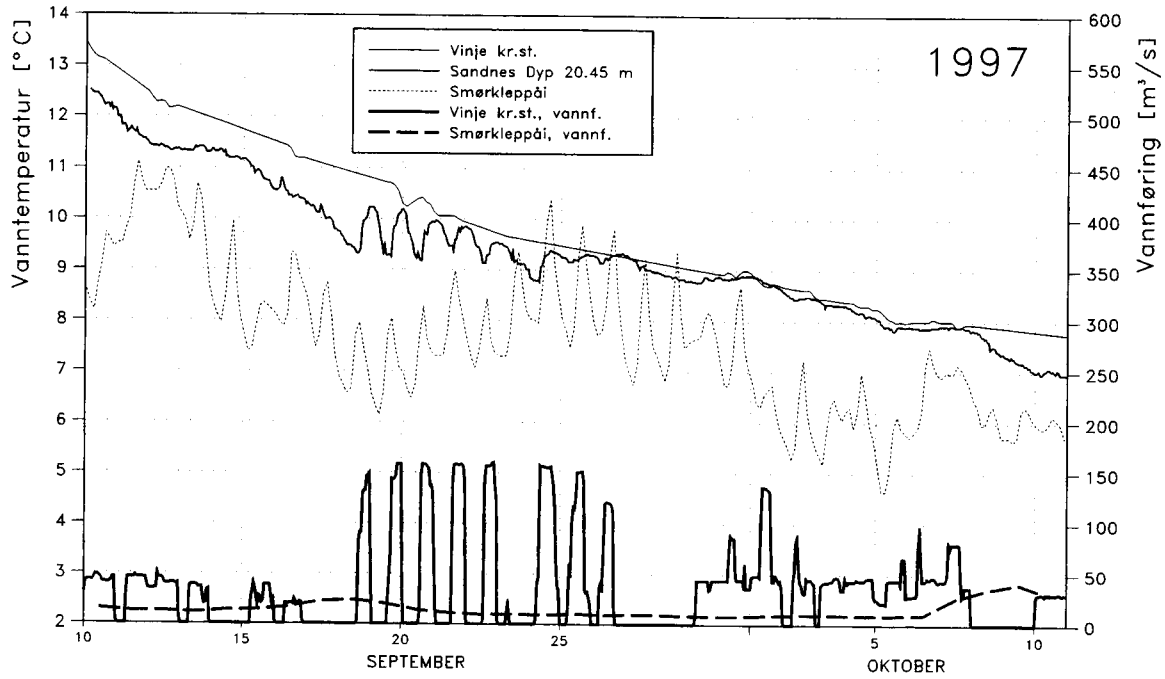


Fig. 3.4 Vanntemperaturer og vannføringer som påvirket forholdene i bassenget utenfor Vinje kraftverk (Sandnes) under forsøkskjøringen 17-26 september 1997.

Forsøkskjøringsperioden var delt inn i to deler. Den første delen (18-23 september) gikk Vinje kraftverk fra kl. 15 til midnatt, mens det fra 24 september gikk mellom kl. 9 og kl. 18 (fig. 3.3). Forsøkskjøringen ble avsluttet 26 september. Da driftsvannet denne gangen var varmere enn innsjøvannet (fig. 3.4), er første periode gunstigst for å se etter temperaturvirkninger. Det 'varme' driftsvannet strømmer da ut i en del av døgnet hvor vi normalt venter en avkjøling.

Fig. 3.3 viser de målte vanntemperaturene under forsøkskjøringen i utvalgte dyp ved Sandnes og Engesgrovbekken. Det er også vist vannføringen i Vinje kraftverk og i Smørkleppåi. Vannføringen i Smørkleppåi er ikke målt, men beregnet fra vannbudsjettet i Vinjevatn hvor vannstanden og driftsvannføringene måles. Dette gir en unøyaktighet som er glattet ut med glidende 3-døgns midler.

Ved Sandnes er det sterkest strøm når Vinje kraftverk kjører (fig. 2.2). Ved Engesgrovbekken er det derimot vesentlig sterkere strøm når Tokke kjører. Fra vannet forlater bassenget utenfor Vinje kraftverk (fig. 2.2) må det over to terskler hvor dypet er 1-5 m og vannmassene blandes. Vi ser at dette gir en mye mindre variasjon i temperaturen i dypet ved Engesgrovbekken enn ved Sandnes.

Termistorstrengen ved Sandnes ligger i det største og dypeste bassenget i Vinjevatn. Avstanden oppstrøms til Vinje kraftverk er 0.7 km og Smørkleppåi ligger 2.1 km oppstrøms. Vi ser at temperaturen steg i alle dyp når kraftverket gikk (fig. 3.3). Strømmen var så sterk at vannet ble fullstendig gjennomblandet, og vi fikk samme temperatur i alle dyp. Når kraftverket ble stanset, sank temperaturen, og den sank først og mest i de dypeste lagene. Dette skyldtes at vannet fra Smørkleppåi var kaldere, og dermed tyngre enn vannet i Vinjevatn (fig. 3.4). Vannet fra Smørkleppåi dykket når det kom ut i Vinjevatn og la seg dermed som et kaldt lag langs bunnen. Ved ny start av kraftverket ble det ny blanding av elvevann og kraftverksvann, og temperaturen steg igjen. I forsøkskjøringsperioden var døgnamplituden i dypet omtrent 1 °C, og forsøksperioden skiller seg klart ut fra perioden før og etter.

Termistorstrengen ved Engesgrovbekken ligger 4.0 km nedstrøms Vinje kraftverk og 5.4 km nedstrøms Smørkleppåi. På veien passerer vannmassene to terskler med dyp mellom 1 og 5 meter, så en burde vente en god blanding av vannmassene. Målingene viste da også at vannmassene var gjennomblandet, men ble oppvarmet lokalt. Vi ser at det i dypet også her var en døgnvariasjon i fase med driftsvannføringen i Vinje kraftverk (topp rundt midnatt). Amplituden var 0.2-0.3 °C, men den

'flate' formen gjør det vanskelig å bestemme eksakte tidspunkter for topp og bunn. Da avstanden mellom Sandnes og Engesgrovbekken er over 3 km, skulle en vente fra transportbetraktninger at temperaturtoppen skulle nå Engesgrovbekken noen timer senere. En slik forsinkelse er det ikke mulig å se. Det virker derfor mer sannsynlig at variasjonen i dypet skyldes været og ikke effektkjøringen. Ved sterk vind vil varme fra overflaten bli blandet nedover. Dette tar tid, så maksimumstemperaturen i 18 m dyp nås derfor senere på kvelden enn i overflaten. Blåser det lite blir det heller ingen døgnvariasjon i dypet. I fig. 3.3 ser en tydelig tidsforsinkelsen i temperaturtoppen fra dypene 3.5 m til 18 m. En ser også at døgnamplituden i 18 m dyp avtar fra den 24 september. Dette rimer bra med vindobservasjonene hvor middelvinden fra 17-23 september var i området 4-7 m/s, mens det deretter kom en rolig periode med middelvind rundt 1.5 m/s.

3.1.2 Forsøkskjøring høsten 1998

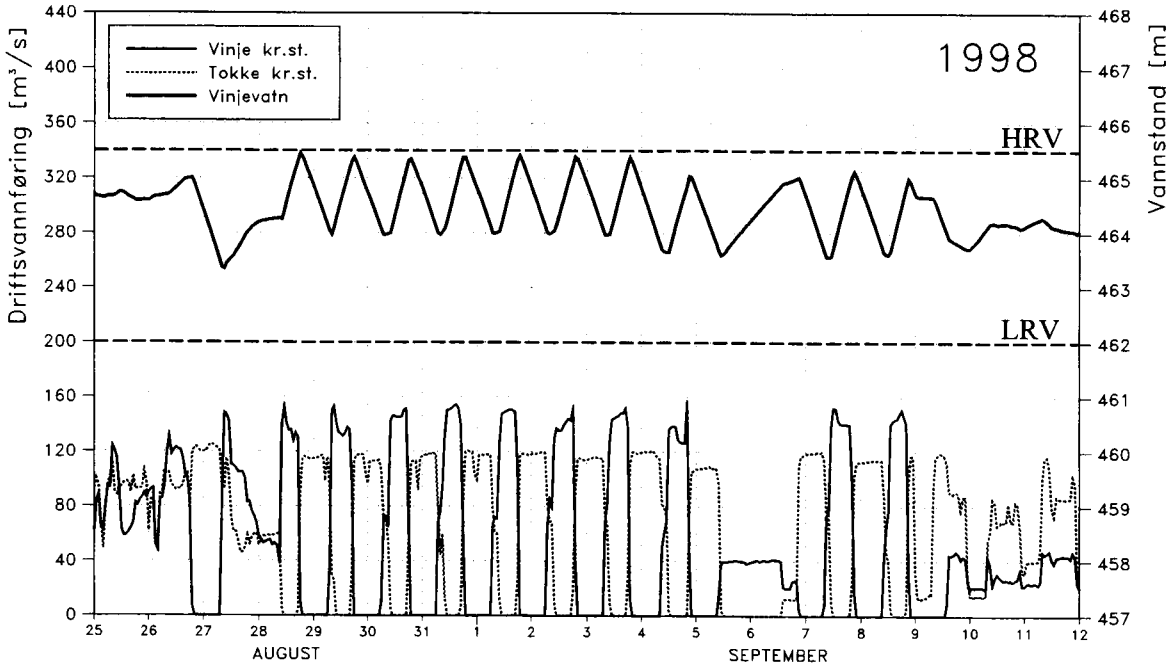


Fig. 3.5 Driftsvannføringen i kraftverkene og vannstanden i Vinjevatn under forsøkskjøringen 26 august – 9 september 1998.

Fra 27 august til 9 september 1998 ble det gjennomført en ny forsøkskjøring. For å unngå større erosjonsskader ble pendlingen lagt på en høyere vannstand enn sist. Variasjonen i vannføringene var likevel like store som ved forrige effektkjøring.

For å øke detaljeringsgraden ble instrumentparken i Vinjevatn utvidet med en termistorstreng i det første bassenget nedenfor Sandnes (Gymreholmane), og det ble lagt en logger på terskelen mellom disse bassengene (Evja). Loggeren lå på bunnen der terskelen var dypest (5 m dyp).

Dessverre er innsamling av data sjeldent problemfritt, og under denne forsøkskjøringen var det strømsvikt på to av loggerne. Vi har derfor ikke data fra temperaturstrengen i bassenget rett utenfor Vinje kraftverk (Sandnes). Dette er meget beklagelig da det var der vi fant de største forskjellene ved forrige forsøkskjøring. Vi har heller ikke data fra driftsvannet i Vinje kraftverk, men det er ikke så kritisk da temperaturen i driftsvannet er omtrent som temperaturen i 10 m dyp i Våmarvatn. Vi kan derfor bruke data fra temperaturstrengen der til å finne driftsvannets temperatur i Vinje kraftverk

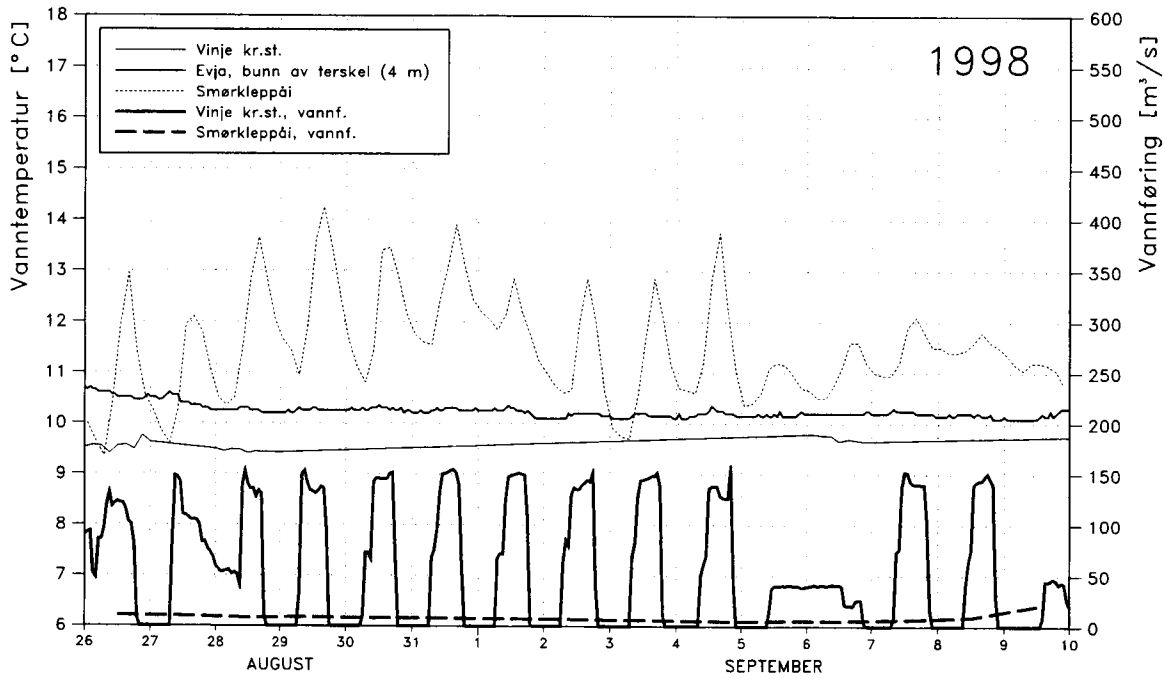


Fig. 3.6 Vanntemperaturen i Vinjevatn på bunnen av terskelen ved Evja i forsøkskjøringsperioden 26 august – 9 september 1998. Det er også plottet vanntemperaturen på det innkommende vannet fra Vinje kraftstasjon og fra Smørkleppåi , samt vannføringen i Vinje kraftstasjon og i Smørkleppåi.

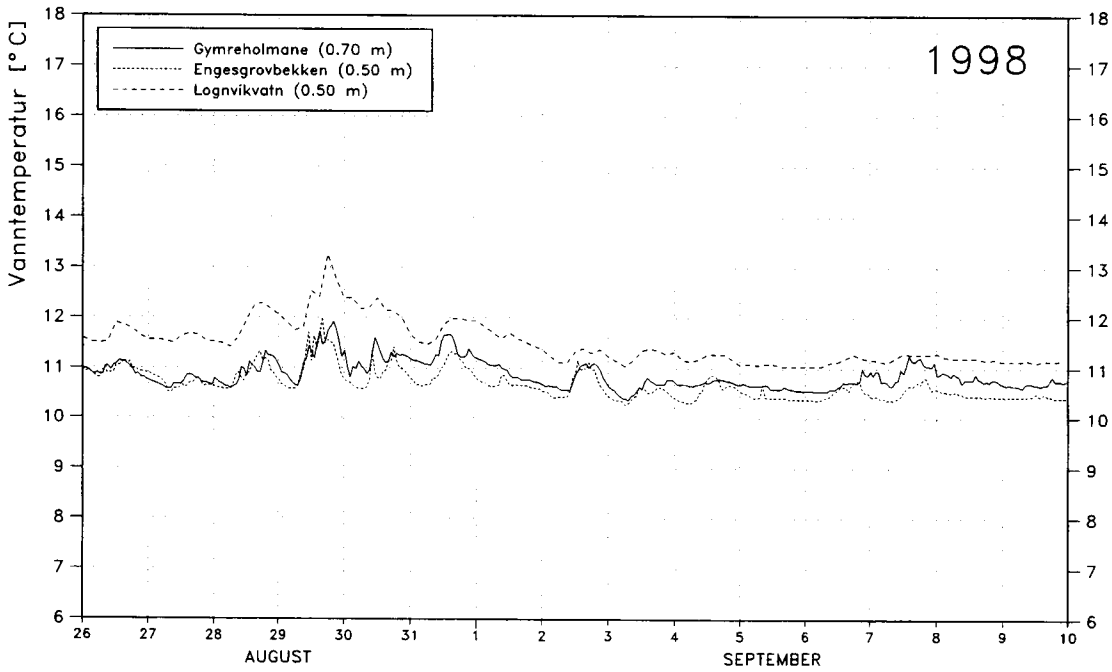


Fig. 3.7 Vanntemperaturen nær overflaten i Vinjevatn og i Lognvikvatn i forsøkskjørings-perioden i 1998.

Fig. 3.6 viser temperaturen på bunnen av terskelen ved Evja sammen med vanntemperaturene på vannet fra Smørkleppåi og Vinje kraftverk og vannføringen i Vinje kraftverk og Smørkleppåi. I forsøkskjøringsperioden var det ingen døgnvariasjoner å spore på terskelbunnen. Som en ser var vannet fra Smørkleppåi 2-3 °C varmere enn vannet fra Vinje kraftverk, og dermed lettere. Det la seg derfor i overflaten. Fra andre sommermålinger har vi sett at dette laget ofte er mindre enn 2 m tykt, og det kan derfor tenkes at det skjedde endringer nær overflaten som ikke kunne merkes på terskelbunnen. Vindstyrken i forsøkskjøringsperioden var mellom 1 og 5 m/s i døgnmiddel, så det var moderat blanding på grunn av vinden.

Fig. 3.7 viser temperaturen målt i omtrent en halv meters dyp (den øverste termistoren) ved Gymreholmane og Engesgrovbekken som ligger nedstrøms terskelen ved Evja. Figuren viser også temperaturen ved referansestasjonen i Lognvikvatn. Kurvene følger hverandre så tett at vi må slå fast at variasjonene skyldes været og ikke effektkjøringen.

Etter at vannmassene passerte terskelen ved Evja kunne vi altså ikke finne endringer i vanntemperaturen som skyldtes effektkjøringen. Vi kunne heller ikke spore noen virkning av den varierende temperaturen i vannet fra Smørkleppåi. Dessverre førte teknisk svikt til at vi ikke vet hva som skjedde i bassenget mellom Vinje kraftverk og Evja.

Forsøkskjøringsperioden om høsten 1997 var omtrent 14 dager senere på året enn forsøkskjøringen i 1998. Det medførte den vesentlige forskjellen at vannet fra Smørkleppåi i 1997 var tyngre enn vannet fra kraftverket, og elvevannet dykket når det kom ut i innsjøen. Vi observerte da døgnvariasjoner nær 1 °C i dypet (20-30 m) ved Sandnes. Heller ikke i 1997 observerte vi endringer nedstrøms terskelen ved Evja som skyldtes effektkjøringen, men vi hadde da ikke målinger før ved Engesgrovbekken 2.5 km nedstrøms terskelen.

3.1.3 Perioder med effektlignende kjøring

Forsommer/sommer

Om sommeren er vanligvis elvene varmere enn driftsvannet i kraftverk som henter vann fra dypet i et magasin. Smørkleppåi er i størrelsesorden 3-5 °C varmere enn driftsvannet i Vinje kraftverk i slutten av juni. Forskjellen avtar utover sommeren ettersom varme transporteres nedover i magasinet. I starten av september har de omtrent samme temperatur før elva igjen blir kaldere. Vanntemperaturen i Vinjevatn bestemmes av temperaturen på det innkommende vannet og varmeutveksling fra vannoverflaten.

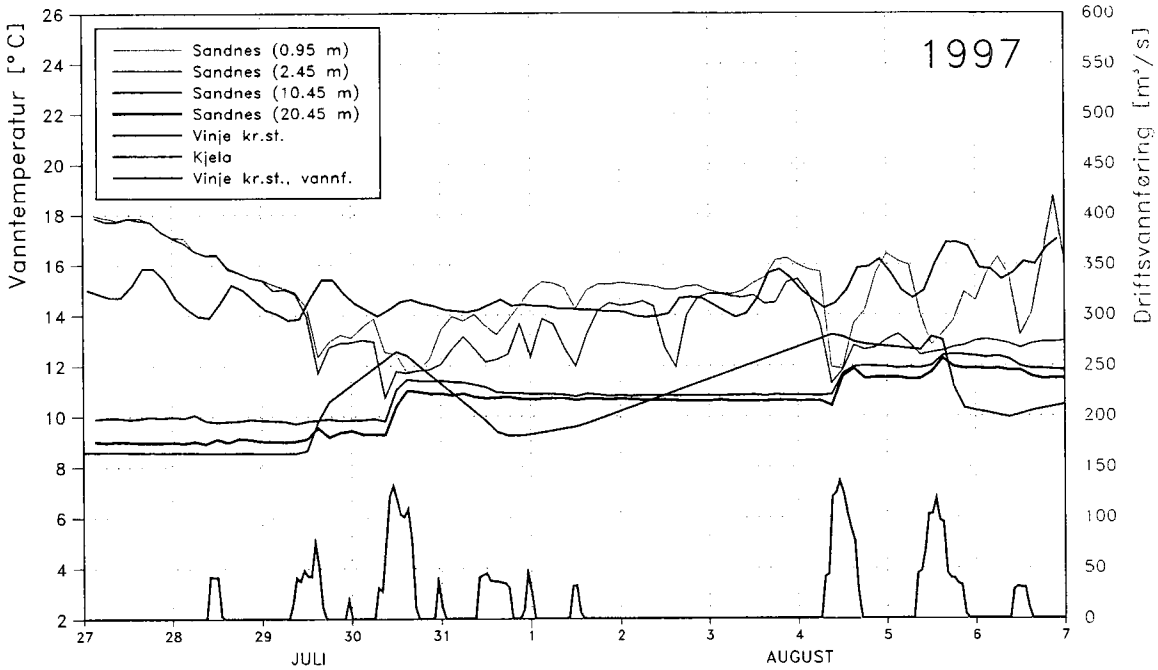


Fig. 3.8 Vanntemperaturen i flere dyp i Vinjevatn ved Sandnes samt vanntemperaturen i Kjela (tilnærmet lik Smørkleppåi) og i Vinje kraftverk i juli/august 1997 under perioder med plutselig sterk kjøring av kraftverket Det er også plottet driftsvannføring i Vinje kraftverk.

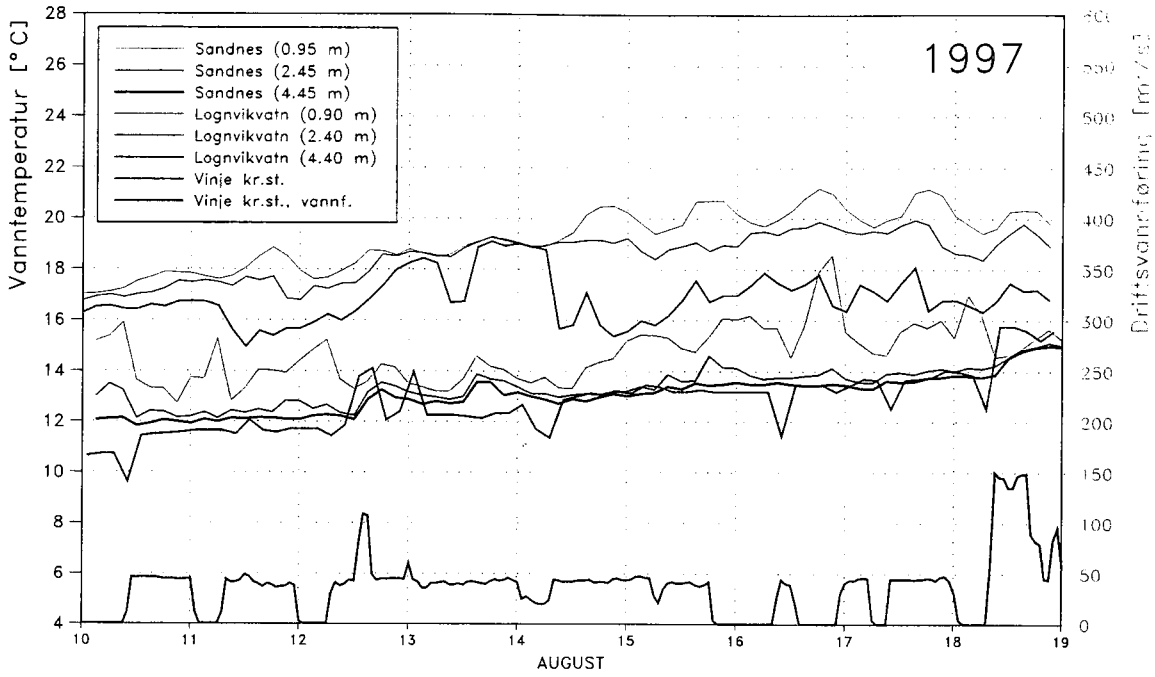


Fig. 3.9 Vanntemperaturen i øvre lag i Vinjevatn ved Sandnes og Lognvikvatn samt vanntemperatur og driftsvannføring i Vinje kraftverk 10-18 august 1997 under forholdsvis jevn kjøring.

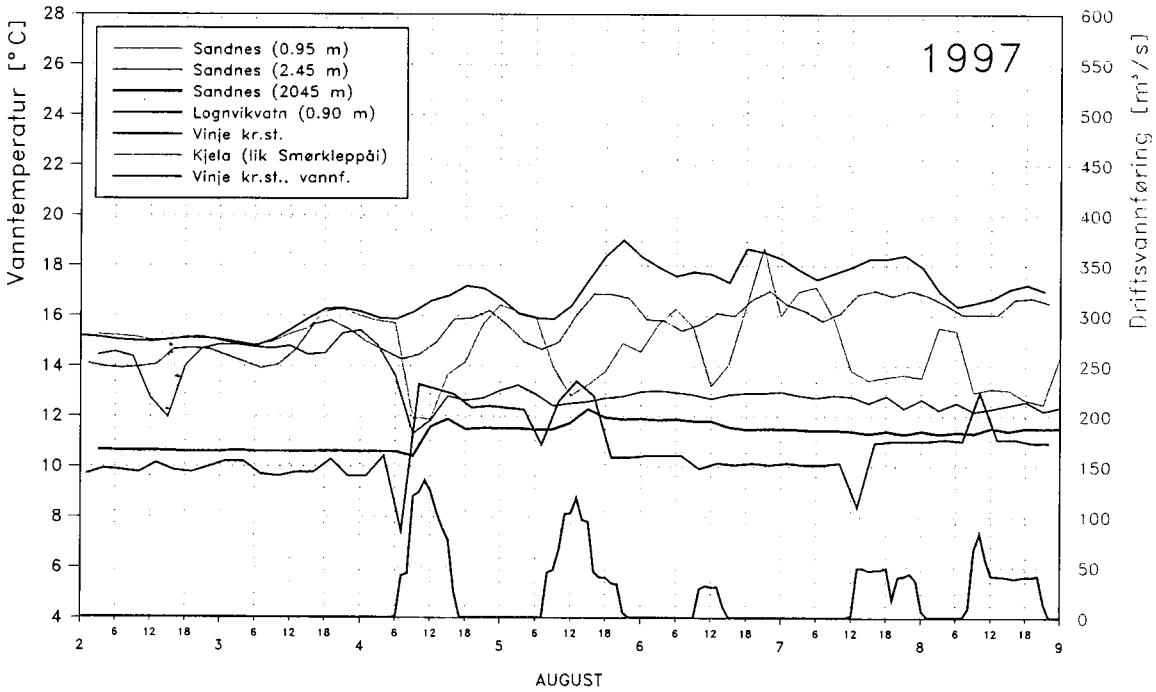


Fig. 3.10 Vanntemperaturen i øvre lag i Vinjevatn ved Sandnes og Lognvikvatn samt vanntemperatur og driftsvannføring i Vinje kraftverk 2-8 august 1997.

Ved kjøring med mindre enn anslagsvis 40 m³/s legger da elvevannet seg på toppen og kraftverksvannet i et midlere lag. Når vannføringen øker kan kraftverksvannet spores i alle dyp. Fig. 3.8 viser hvordan kjøring med stor vannføring 30 juli og 4 august 1997 blandet kraftverksvann i alle dyp. Kjela er en nærliggende elv med forholdsvis like temperaturer som Smørkleppåi på denne årstiden (sammenlignet for tilsvarende periode i 1998).

Når temperaturforskjellen mellom overflaten og dypet er liten, vil kraftverksvannet også blande seg i overflaten ved svak kjøring. Fig. 3.9 viser et av de få tilfellene av jevn sommerkjøring. Det er kun døgnvariasjoner i de øverste 2 metrene, og de er av samme størrelsesorden som i det uregulerte Lognvikvatn (1-2 °C).

I fig. 3.9 legger vi også merke til en plutselig temperaturøkning på 2 °C på driftsvannet 12 august når driftsvannføringen økes. Det skyldes at øket driftsvannføring drar med seg mer overflatevann fra Våmarvatn, og det er varmere på den årstiden. Disse økningene er størst etter en lengre periode med lav driftsvannføring slik at det har fått bygd seg opp et varmere overflatelag. Ved kontinuerlig høy driftsvannføring, eller ved effektkjøring, vil en ikke få så store økninger. De første 1-2 timer etter full stans hender det også at det måles et temperaturfall før temperaturen stiger (fig. 3.10 den 4 og 7 august). Det kommer nok av at kraftverket startes forsiktig slik at det først trekker vann fra samme nivå som inntaksdypet. Etter hvert øker vannføringen i kraftverket og turbulensen drar med seg vann fra flere dyp, fortrinnsvis høyere oppe. Dette tar tid, og i mellomtiden er det kaldere vann fra dypet som dominerer. Sammenlignet med halvparten så stor jevn kjøring vil derfor driftsvannets temperatur ved effektkjøring om sommeren være inntil 2 °C kaldere de første 1-2 timer etter oppstart. Temperaturen stiger så slik at vanntemperaturen i resten av driftsperioden vil være noen tideler varmere enn ved jevn kjøring.

Fig. 3.10 viser effektkjøring om sommeren i Vinjevatn. En ser til dels betydelige temperatursprang i de øverste 2 m, større enn ved det uregulerte Lognvikvatn. Årsaken er at varmt vann fra Smørkleppåi legger seg i det øvre laget når kraftverket står, mens vi får full blanding i alle sjikt når kraftverket går. Temperaturendringene i de øverste 2 m ved effektkjøring er omtrent 3-4 °C i Vinjevatn om sommeren, avhengig av temperaturforskjellen mellom driftsvannet i Vinje kraftverk og Smørkleppåi.

Høst

Denne årstiden er godt dekket av forsøkskjøringsperiodene. Smørkleppåi fører til at det observeres døgnamplituder på omtrent 1 °C i dypet utenfor Sandnes. Nedstrøms Sandnes er vannmassene gjennomblandet og har kun variasjon nær overflaten som skyldes været.

Vinter

Vinterstid er driftsvannets temperatur 1-3 °C, kaldest sent på vinteren. Vannet fra Smørkleppåi er like over frysepunktet og er derfor lettere enn driftsvannet. Ved stans i kraftverket vil derfor vannet fra Smørkleppåi legge seg i overflaten. Ved kjøring av kraftverket blandes elvevannet med kraftverksvannet og gjør at innsjøvannet ved Sandnes er litt kaldere enn driftsvannet (fig. 3.11). I tillegg kommer avkjøling av overflaten. Fig. 3.11 viser også at overflatevannet ved målepunktet påvirkes vesentlig mindre av kraftverksvannet når driftsvannføringen er "liten", her mindre enn anslagsvis 50 m^3/s.

Ved instrumentering måtte vi ta hensyn til slitasje pga. isen, så instrumentene ble plassert trygt under en forankret flytende bøye. De øverste temperaturmålingene er derfor i 95 cm dyp utenfor Sandnes. Iskartene viser at situasjonen som er vist i fig 3.11 var en situasjon hvor råken ble mindre og det ble islagt ved målepunktet. Lufttemperaturen lå stort sett godt under –10 °C. 12 desember var det isfritt mens isen hadde lagt seg 16 desember. Isen ble liggende i lang tid til tross for nesten 3 °C i 1 m dyp. Under vinterforsøket (beskrives senere) fikk vi islegging på Vinjevatn etter en kald og vindstille natt med stans i kraftverket. Temperaturen i 95 cm dyp var likevel 0.9 °C. Laget som må avkjøles til frysepunktet kan derfor være svært tynt dersom det er vindstille.

Ved effektlignende kjøring om vinteren observerte vi 1-3 °C i vanntemperaturendringer i 1 m dyp, mest tidlig på vinteren når driftsvannet er "varmt". Endringen avtok med dypet, og dypere enn 5 m var det kun små variasjoner. Nær overflaten faller temperaturen raskt til frysepunktet når det er vindstille og kraftverket stopper helt opp. Blåser det, får vi blanding i et tykkere lag slik at temperaturendringene blir mindre nær overflaten og større i dypet enn under vindstille forhold.

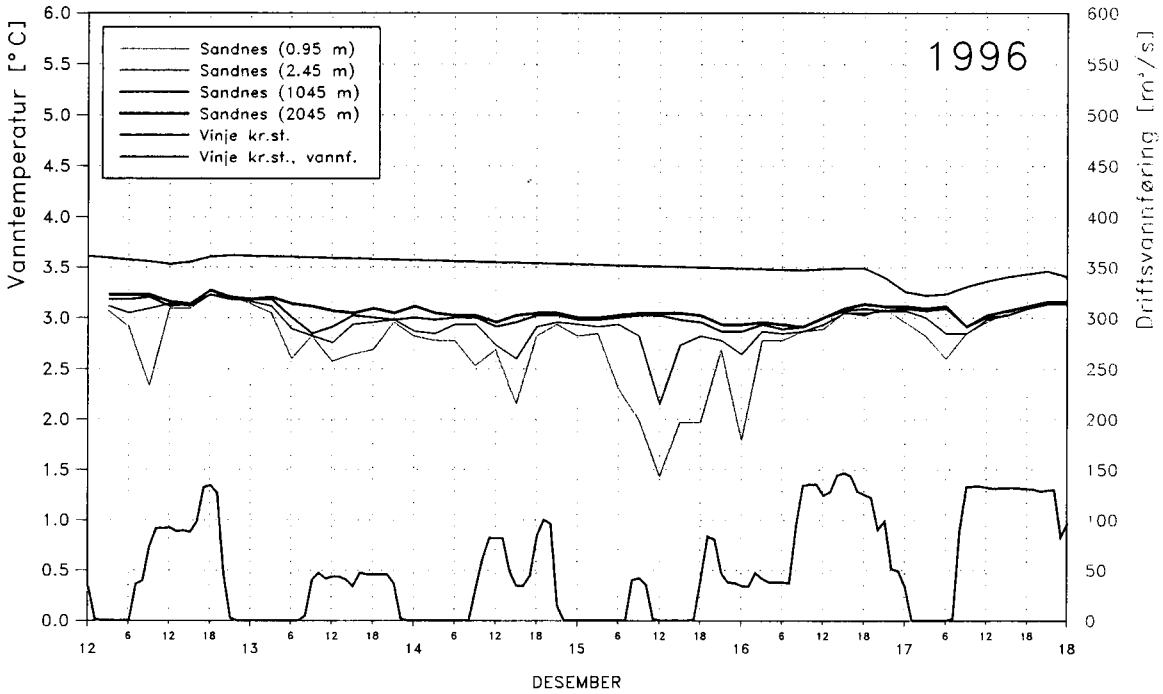


Fig. 3.11 Vanntemperaturen i flere dyp i Vinjevatn ved Sandnes og driftsvannets temperatur i Vinje kraftverk under effektlignende kjøring i desember 1996. Det er også plottet driftsvannføringen i Vinje kraftverk. Vanntemperaturen i Smørkleppåi er ikke målt, men antas å være svært nær 0 °C.

3.1.4 Samlet resultat fra Vinjevatn

Figur 3.12 viser en skjematisk oversikt over temperaturendringene gjennom ett døgn som vi observerte i Vinjevatn ved Sandnes under effektkjøring i Vinje kraftverk. Det må presiseres at en vesentlig grunn til de temperaturendringene vi fant var at Vinjevatn har et forholdsvis stort tilsig i Smørkleppåi. Driftsvannet fra Haukeli kraftverk renner i Smørkleppåi, så selv vinterstid er det en betydelig vannføring der.

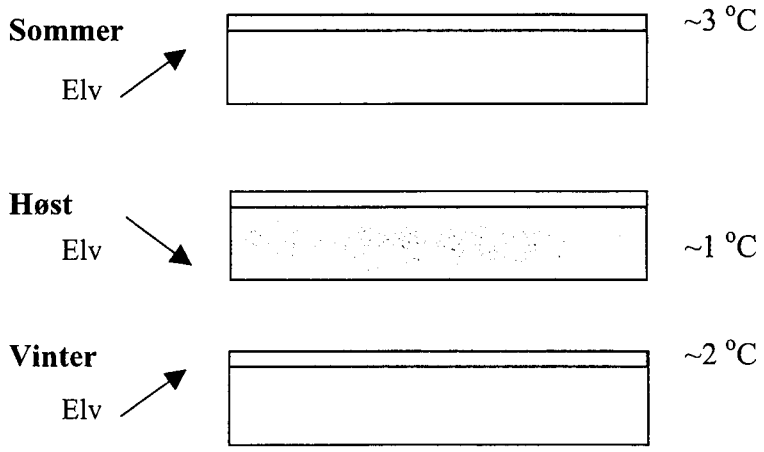


Fig. 3.12 Døgnamplituder i vanntemperaturen i Vinjevatn ved Sandnes ved de ulike årstidene under effektkjøring. Vinjevatn er symbolisert med en boks og endringene skjer hovedsakelig i den skraverte delen av dypet. Pilen viser om elvevannet legger seg i overflaten (pil oppover) eller om det er tyngre og synker ned i dypet (pil nedover). Tallene til høyre viser omtrentlige døgnamplituder.

3.2 Isforhold

3.2.1 Observerte isforhold

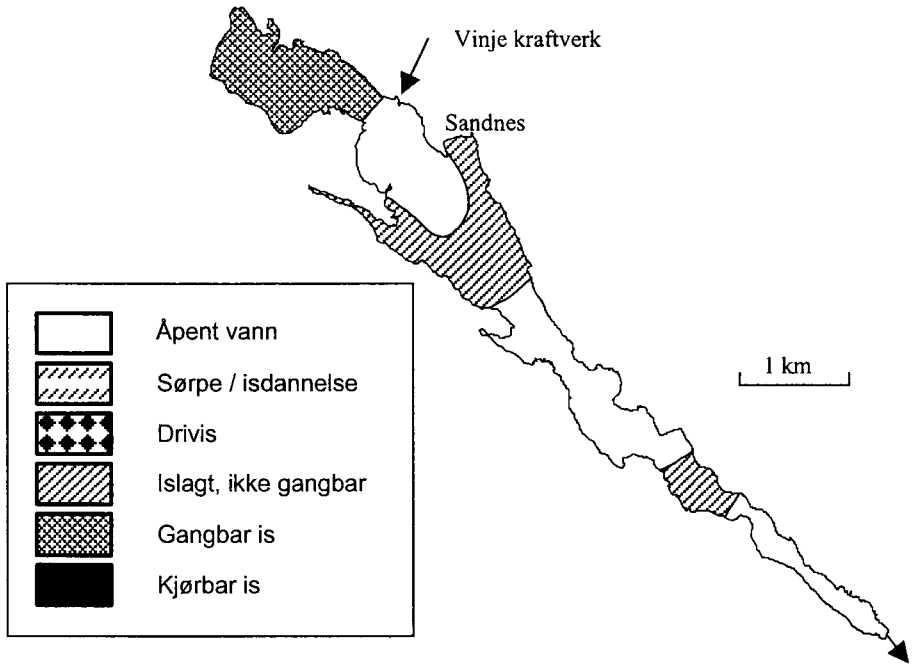


Fig. 3.13 "Normale" isforhold midtvinters når kraftverket går oglufttemperaturen ligger rundt –5 °C.

Oppstrøms Vinje kraftverk islegges Vinjevatn med et stabilt isdekke som blir mer enn en halv meter tykt. Under prosjektperioden isla Vinjevatn seg omtrent i midten av november. Utenfor Vinje kraftverk er det alltid en råk når Vinje kraftverk går. Størrelsen på råken varierer med været og temperaturen på driftsvannet. Etter nyttår, når driftsvannet er omtrent 1 °C, er råken vanligvis minst. Store deler av bassenget utenfor Sandnes islegges i kalde perioder, men det er som oftest isfritt ved terskelen nedstrøms Sandnes (fig. 2.2 viser dybdeforholdene). Neste basseng er enda oftere islagt enn bassenget ved Sandnes. Driftsvannet har da fått kjølt seg noe ned, og bassenget er så stort at strømhastigheten blir liten. Lenger nede minner Vinjevatn mye om en elv. I de milde vintrene vi har hatt under prosjektperioden gikk denne strekningen stort sett åpen. Hvis det legger seg is på strekningen, så er den i følge lokalbefolkningen svært variabel og utrygg å ferdes på. Fig. 3.13 viser en typisk issituasjon midtvinters i Vinjevatn, mens fig. 3.14 viser situasjonen i sterk kulde, begge med drift av Vinje kraftverk. Isløsningen i området oppstrøms Vinje kraftverk var i prosjektperioden i første halvdel av mai.

3.2.2 Helgestansen februar 1999

Vi ønsket å se virkningen på isforholdene i Vinjevatn ved en døgnregulering gjennom en uke, dvs. på om dagen og av om natten hele arbeidsuken og full stans fra fredag kveld til mandag morgen. Forsøket startet med en helgestans og fortsatte med døgnpendling fra mandagen.

Rett før helgen 30-31 januar 1999 var det kaldt og prognosene tydet på at det skulle fortsette. Kraftverket ble stanset som planlagt fredag kveld (29 januar) mens det var omtrent –15 °C ved Vinjevatn. Issituasjonen før stans er vist i fig. 3.14. Allerede kl. 3 på natten hadde det frosset et tynt islag på de tidligere isfrie delene av vannet. Om morgenen var isen blitt litt mindre enn 2 cm tykk, og det var islagt på alle steder som kunne observeres fra bil, trolig over hele vannet.

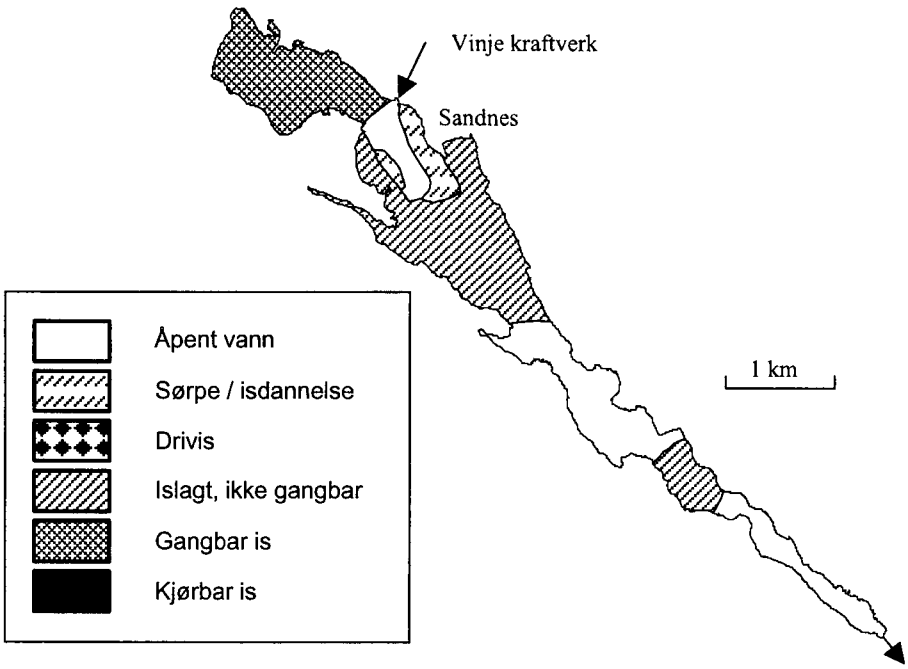


Fig. 3.14 Isforholdene i Vinjevatn 29 januar 1999 før helgestansen i vinterforsøket. Lufttemperaturen hadde ligget nær -20 °C i to døgn.

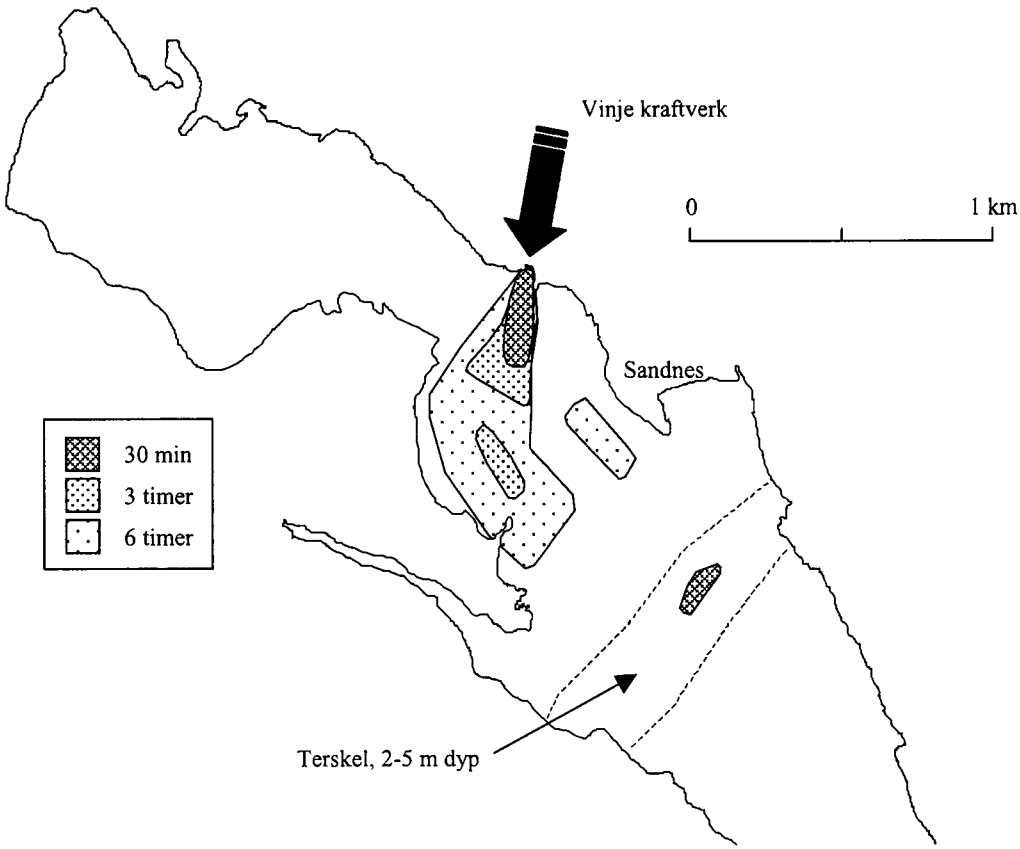


Fig. 3.15 Tidsutviklingen for hvor råken utenfor Sandnes åpnet seg etter helgestansen 29 januar til 1 februar.

Det skyet over og ble markert mildere med lett snøvær. Om kvelden var det bris og 1 °C. Søndag var det 4 °C og frisk bris. Snøen (kun 1 cm) smeltet og ga overvann. Til tross for mildværet smeltet ikke isen nevneverdig, og etter en natt med klarvær og –1 °C hadde isen blitt litt over 2 cm tykk.

Mandag morgen (2 februar) var det på nytt mildvær med 6 °C og frisk bris. Kraftverket startet opp kl.10. Fig 3.15 viser hvordan råken i Vinjevatn åpnet seg. De første 200 m gikk fort, deretter tok det flere timer å få råken større, til tross for +6 °C og frisk bris i kastene. Det ble ingen vesentlig opphoping av isflak langs kanten av råken, og isflakene som brakk opp i strømmen smeltet tilsynelatende ganske raskt. Fra Midtsæ og nedover vannet hadde all ny is forsvunnet til kl 13.30. Gammel is lå fortsatt mellom Midtsæ og Særendsgrend. Ved Sandnes var råken mindre enn før stansen, men vokste fortsatt. 6 timer etter oppstart hadde den gamle råken åpnet seg og også deler av området med begynnende isdannelse før oppstart (fig. 3.14).

Fig. 3.16 viser vanntemperaturmålinger i de øverste 5 m av Vinjevatn under helgestansen og oppstarten. Som nevnt tidligere er den øverste sensoren i 95 cm dyp, og dette er alt for dypt til å registrere temperaturer ved frysepunktet. Vi får en svak temperatursenking i det øverste laget, men etter at isen la seg natt til 30 januar ble det ingen blanding pga. vind og temperaturene holdt seg stabilt i dyp under 2 m. Forholdene endret seg etter oppstart om morgenen 2 februar med større strøm og oppbrekking av islaget slik at den kraftige vinden kunne blande de øverste lagene.

Det tok altså 6 timer før vi hadde gjenvunnet isforholdene fra før stansen. Det må betegnes som overraskende lang tid når en tar i betraktning at det var 6 °C og frisk bris. Mesteparten av istykkelsen kom første natten i omtrent –15 °C. Forholdene ved oppstart var derfor omtrent som ved daglig effektkjøring i sterk kulde. Ved slik kjøring vil en typisk drift vare 12-15 timer. Spørsmålet blir da om dette er nok tid til å åpne råken til samme størrelse som den var da kraftverket stanset kvelden før.

Hvis ikke vil råken bli mindre om dagen og helt borte om natten i sterk kulde. Dette diskuteres nærmere i kapittel 5.2.2.

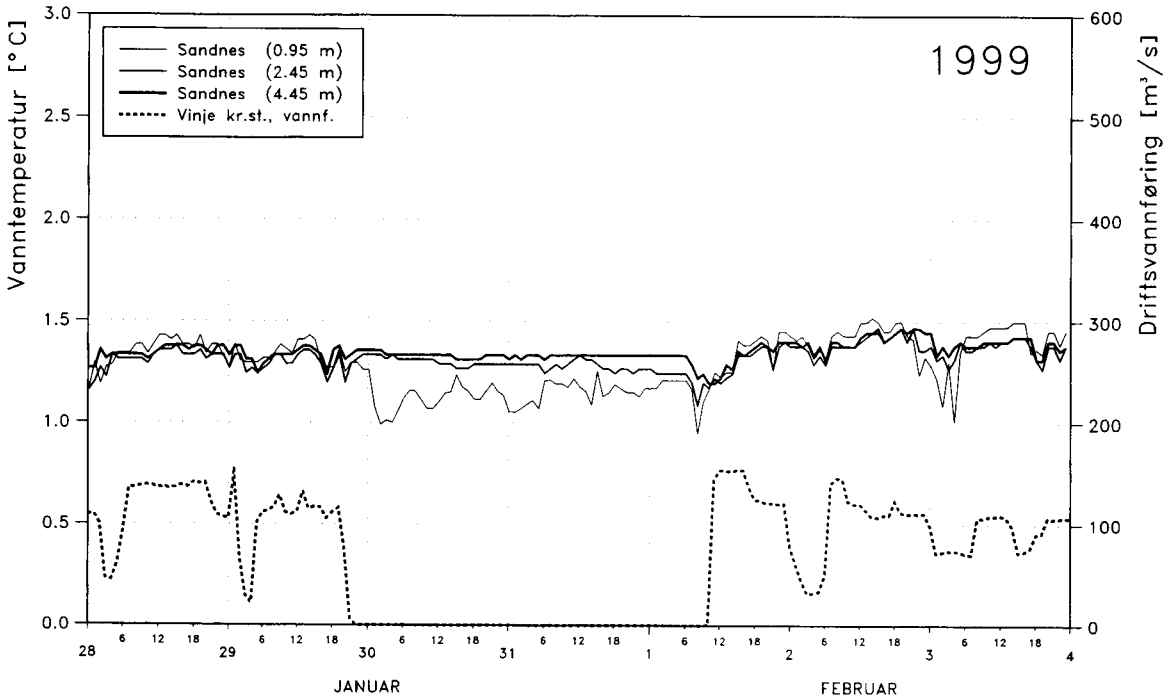


Fig. 3.16 Vanntemperaturen i de øverste 5 meter i Vinjevatn ved Sandnes under helgestansen fra 29 januar kl. 19 til 2 februar kl. 10. Driftsvannføringen i Vinje kraftverk er også plottet.

4. Målinger og resultater i Våmarvatn

4.1 Vanntemperatur

Våmarvatn er inntaksmagasin til Vinje kraftverk og er forbundet med Totak med en tunnel slik at vannstanden i de to vannene i prinsippet skal være like. På grunn av at overføringstunnelen er for trang, vil vannstanden i Våmarvatn pendle vesentlig opp og ned under effektkjøring. Overføringstunnelen tar vann fra 10-20 m dyp i Totak og inntaket til Vinje kraftverk i andre enden av Våmarvatn ligger også i 10-20 m dyp.

Fig. 3.2 viser hvor temperaturmålingene ble foretatt. Under forsøkskjøringene var det kun loggeren ved Landsverk som var i drift i Våmarvatn. Loggeren lå 0.8 km oppstrøms inntaket til Vinje kraftstasjon og 2.7 km nedstrøms forbindelsestunnelen til Totak. Før vinterforsøket ble det også plassert en logger ved Grytebekken som er bare 1 km fra forbindelsestunnelen til Totak. Vi la også ut en logger ved utløpstunnelen for å måle temperaturen på vannet fra Totak

Strømningsforholdene ved utløpet av tunnelen fra Totak avhenger av vannstanden i Våmarvatn. Ved gjennomgang av målingene ved utløpet ser det ut til at vi ikke klarte å måle temperaturen i vannet fra Totak annet enn ved lav vannstand, slik det var ved utsetting. Dette var særlig tydelig om sommeren da vi fikk døgnvariasjoner på 4 °C, noe en ikke finner i inntaksvann fra 10-20 m dyp. Målingene lå nærmere temperaturene målt i de øverste meterene ved Grytebekken og Landsverk. Dette viser at loggeren har blitt liggende i vannmasser hvor energiutveksling i overflaten har vært dominerende for vanntemperaturen.

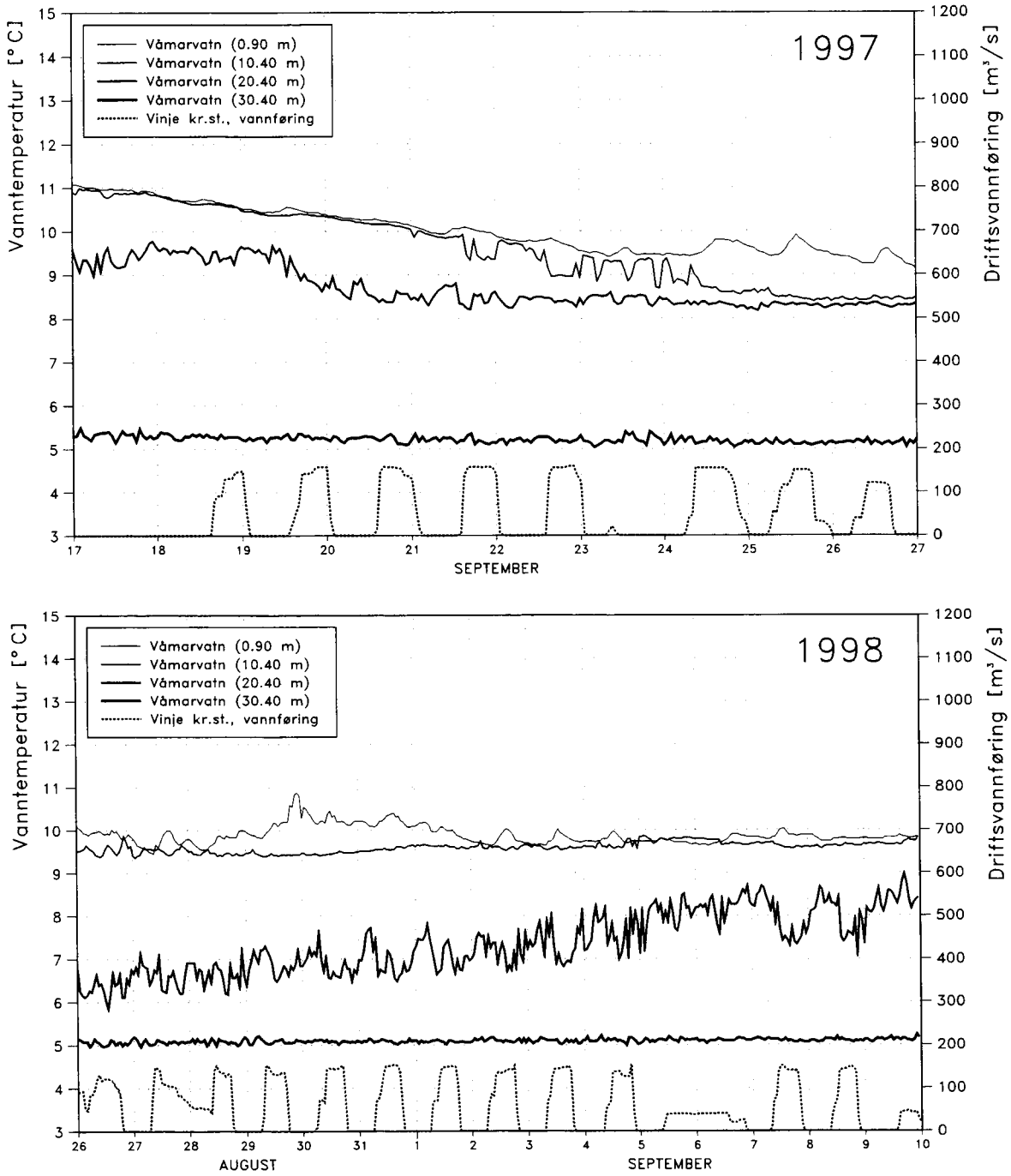


Fig. 4.1 Vanntemperaturen i 4 dyp i Våmarvatn ved Landsverk i prøvekjøringsperiodene i 1997 og 1998. Det er også plottet driftsvannføringen i Vinje kraftstasjon.

Fig. 4.1 viser temperaturforløpet i Våmarvatn samt driftsvannføringen i Vinje kraftverk under forsøkskjøringene høsten 1997 og 1998. Dypene representerer de øvre, midtre og nedre lag av vannmassene. Fra 30-50 m er det liten endring med dypet. I de øverste lagene er det ikke mulig å se noen virkning av effektkjøringen på vanntemperaturen. I 1998 er det karakteristiske variasjoner i 0.9 m dyp som følger samme trend som i det uregulerte Lognvikvatn (Fig. 3.7). Det er mye 'støy' (turbulens) i vanntemperaturene lenger ned i dypet nær strømmen av Totak-vann. I forsøkskjøringen i 1998 kan en i tillegg til 'støyen' ane døgnvariasjoner på nær 1 °C i 20 m dyp. Temperaturen synker når kraftverket startes. Dette skyldes trolig at sensoren ligger i et område hvor temperaturen endrer seg brått med dypet (termoklinen). Når Vinje kraftverk går for fullt et halvt døgn, synker vannstanden i Våmarvatn med nesten en meter. Vannet tappes fra lagene i 10-20 m dyp, så temperatursensoren i 20

m dyp synker en meter lengre ned i kaldere 'uberørte' vannmasser. Trolig har termoklinen ligget noen meter dypere i 1997, for utslagene er verken så kraftige eller systematiske som i siste forsøkskjøring.

Da loggeren ved Landsverk sviktet i siste måleperiode, har vi ingen overlappende målinger ved Landsverk og Grytebekken. Målingene fra vinteren 1997/98 ved Landsverk og 1998/99 ved Grytbekken fulgte likevel svært nær det samme mønsteret bortsett fra at vannmassene var gjennomblandet til litt større dyp ved Grytbekken. Sommerstid har vi ikke målinger ved Grytbekken.

4.2 Isforhold

Vannet som fraktes gjennom overføringstunnelen fra Totak kommer fra 10-20 m dyp hvor temperaturen sjelden går under 1.5 °C om vinteren. Overtemperaturen og den sterke strømningen gjør at det er åpent 0.5-1.5 km nedstrøms tunnelmunningen selv på kalde dager. Innen vannet når det dype bassenget i sør, har overflatelaget blitt tilstrekkelig avkjølt til at det dannes et solid isdekke i løpet av vinteren. Fig. 4.2 viser en typisk issituasjon midtvinters i Våmarvatn mens fig. 4.3 viser en situasjon i sterk kulde, begge med drift av Vinje kraftverk.

I prosjektperioden la isen seg i det sørlige bassenget i første halvdel av desember og isløsningen var omtrent midt i mai. Isleggingen og isløsningen i vika oppstrøms tunnelutløpet var omtrent samtidig, mens det var noe kortere sesong for kantisen i de midtre delene av vannet.

Under planleggingen av prosjektet undervurderte vi kapasiteten til overføringstunnelen.Ved en helgestans hadde vi ventet oss islegging i Våmarvatn. Som beskrevet i kapittel 3 gjennomførte vi en helgestans fra kl. 19 fredag 29 januar til kl. 10 mandag 1 februar. I forkant hadde det vært hard kjøring i Vinje kraftverk slik at Våmarvatn var nesten 2 m lavere enn Totak. Når Vinje kraftverk stanset, så fortsatte vannstrømmen inn i Våmarvatn for å utjevne høydeforskjellen. Det tok mer enn ett døgn før vannstrømmen stanset, og da var kuldeperioden over. Trolig ville vi fått islegging dersom kulden

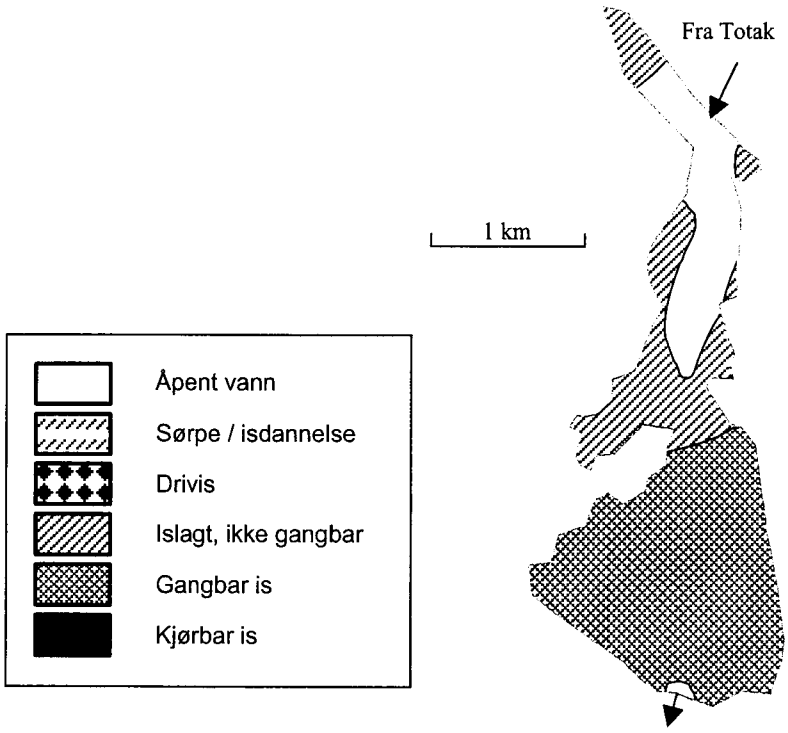


Fig. 4.2 Typisk issituasjon midtvinters i Våmarvatn med drift i Vinje kraftverk.

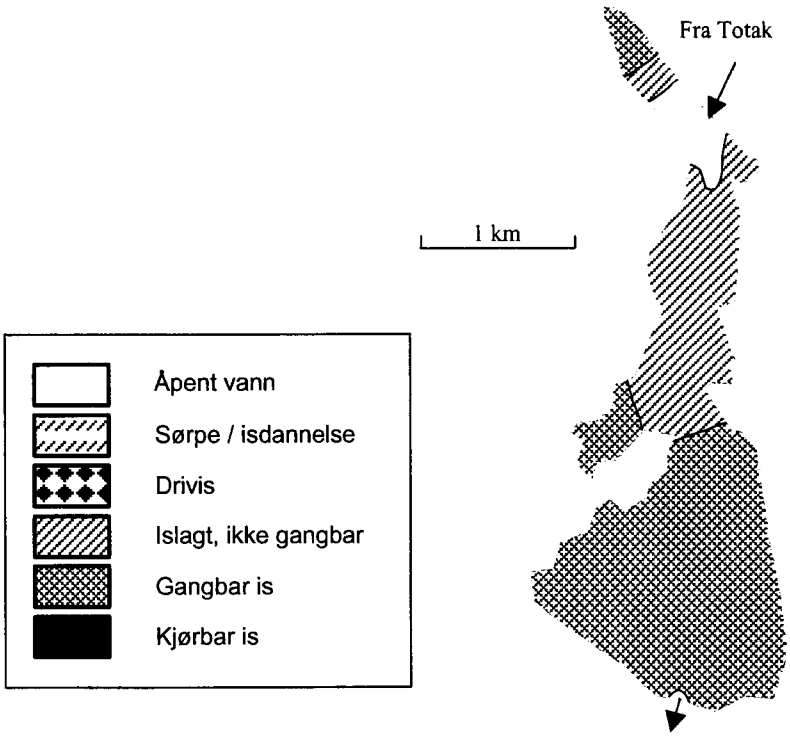


Fig. 4.3 Typisk issituasjonen midtvinters i Våmarvatn under sterk kulde og drift i Vinje kraftverk.

hadde fortsatt, men ved daglig effektkjøring vil vi ikke få islegging i råken i Våmarvatn da det vil fortsette en stund å strømme 'varmt' vann fra Totak gjennom tunnelen også når kraftverket står.

5. Generalisering

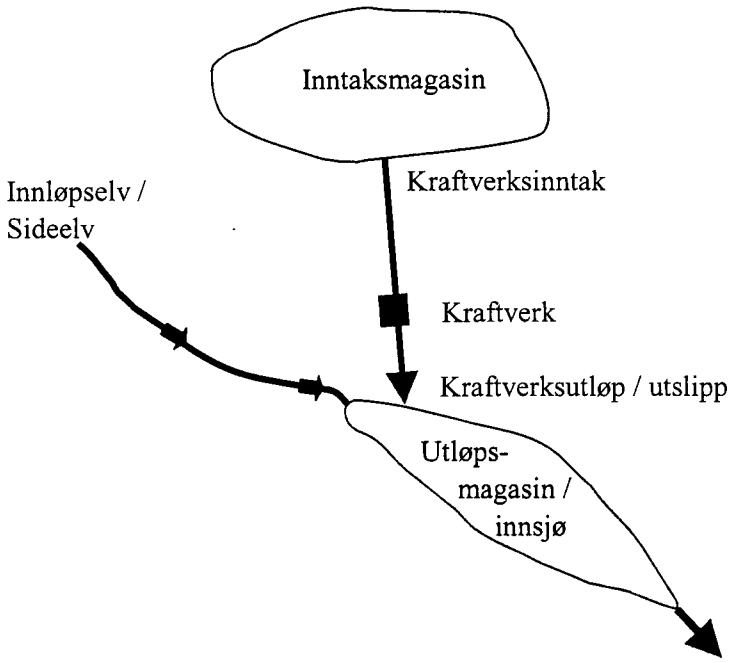


Fig. 5.1 Prinsippskisse som viser begrepene inntaksmagasin, utløpsmagasin (evnt. uregulert innsjø), innløpselv (sideelv), kraftverk, kraftverksinntak og kraftverksutløp (kraftverksutslipp).

I dette kapittelet beskrives generell kunnskap om vanntemperatur og isforhold ved reguleringer som går fra et magasin til en innsjø eller et nytt magasin. Fig. 5.1 viser en skjematisk skisse av begrepene inntaksmagasin, utløpsmagasin, inntakselv(sideelv), kraftverksinntak og kraftverksutslipp.

Forsøkene i Vinje viste oss at en innløpselv kan ha en vesentlig innvirkning på temperaturforholdene dersom den renner inn i utløpsmagasinet oppstrøms kraftverksutslippet og har en retning på vannstrømmen forbi kraftverket. Når vi i teksten bruker ordet innløpselv eller sideelv, så tenker vi på en elv som ligger slik i forhold til kraftverksutslippet.

Forholdet mellom driftsvannføringens størrelse og innsjøens (utløpsmagasinets) størrelse er avgjørende for hva som skjer i innsjøen. Er driftsvannføringen stor i forhold til innsjøen, renner kraftverksvannet raskt gjennom og vi betegner det som en gjennomstrømningssjø. Etter som forholdet avtar øker oppholdstiden til kraftverksvannet og vannet kan lettere påvirkes av værforholdene. Når en fjerner seg fra utslippsstedet, blir forholdene da mer og mer lik forholdene i en vanlig innsjø. I dette kapittelet gis det en kort beskrivelse av det som kjennetegner sesongmessig regulering og effektregulering. Det tenkes på kraftverk av en viss størrelse i beskrivelsene. Blir driftsvannføringen liten nok, vil også en gjennomstrømningsjø endre karakter til en sjø som er lite påvirket av kraftverket.

5.1 Sesongmessig regulering

Sesongmessig regulering er den vanligste reguleringsformen i Norge. Magasinene dimensjoneres da for å fange opp smeltevann om våren og regnvann om sommeren/høsten. Er magasinet optimalt, kan en fordele vannforbruket gjennom sesongen slik at forbruket er størst når energibehovet er størst. Et typisk magasin fylles opp i løpet av snøsmeltingen og er fullt på sensommeren. Utover vinteren synker vannstanden jevnt ettersom tilsiget er mindre enn forbruket. Magasinet er lavest rett før snøsmeltingen starter med ny oppfylling.

5.1.1 Vanntemperatur

Inntaksmagasin

I et inntaksmagasin legges vanligvis inntaket noen meter under laveste regulerte vannstand (LRV). Et inntak i dette dypet må en ha for å kunne tappe ned til LRV, og av kostnadshensyn blir det som regel bare bygd ett inntak. Noen få magasiner har flere inntaksmuligheter, og kan for eksempel hente ut varmere overflatevann om sommeren med et høyt inntak. Her vil vi kun ta for oss magasinene med ett inntak.

Temperaturforholdene i et inntaksmagasin er vanligvis svært lik de en finner i en tilsvarende innsjø uten regulering. Det dannes et varmt overflatelag om sommeren og et kaldt om vinteren. Tykkelsen på lagene avhenger først og fremst av vindforholdene om sommeren og vindforholdene før isleggingen om vinteren. Jo mer det blåser, desto tykkere blir overflatelaget.

Vanntemperaturen på driftsvannet avhenger derfor mest av inntaksdyp og vindforhold. Ytterligere kompliserende faktorer er utformingen av inntaket og hvor mye vann som skal hentes ut. Ved stor driftsvannføring hentes det vann fra større dybdeintervall enn ved små vannføringer. Om sommeren kan stor driftsvannføring gi høyere temperaturer da vi tar med mer varmt overflatevann. Om vinteren kan det omvendt bli litt lavere temperaturer, men forskjellene er da mindre. Når vannstanden endrer seg, endres også inntaksnivået relativt til overflaten. Grovt sett endres temperaturprofilet lite ved vannstandsendringer, så endret vannstand kan sammenlignes med endring av inntaksdypet.

Om sommeren er vannstanden vanligvis høy og svakt stigende. For hvert tilfelle av kraftig vind fraktes det mer varme ned i dypet, så sommertemperaturen på driftsvannet er vanligvis svakt stigende med et maksimum nær månedsskiftet august/september. Det skjer en nedkjøling utover høsten, oppbygging av et kaldt overflatelag og islegging. Utover vinteren synker vannstanden slik at inntaksdypet rykker stadig nærmere det kalde overflatelaget. I et vann med sesongmessig regulering synker derfor driftsvannets temperatur utover vinteren til et minimum en måneds tid før isløsningen.

En terskel i inntaksmagasinet kan føre til mer homogene vannmasser nedstrøms terskelen.

Innsjø eller magasin med utløp fra kraftverk

Blandingen av kraftverksvann inn i innsjøvannet avhenger av topografien i innsjøen, utslippsdypet, driftsvannets temperatur, driftsvannføringen og temperatursjiktningen i innsjøen. I tillegg kan det være tilførsel av større elver til innsjøen som påvirker forholdene.

Vi antar at kraftverket kjører med jevn effekt. Nær kraftverksutløpet vil det være en sone hvor vanntilførselen primært er kraftverksvann og dermed er temperaturen som i kraftverksvannet. Etter hvert som en fjerner seg fra utløpet, blandes driftsvannet mer og mer med innsjøvannet og vannhastigheten avtar. Kraftverksvannet legger seg så i det nivået som tettheten tilsier og strømmer gjennom innsjøen i dette nivået. Ved stor gjennomstrømming i fjordlignende sjøer vil jordrotasjonen dreie strømmen over på høyre side og det transporterende laget blir tykkest der.

Når driftsvannføringen øker, øker også innblandingssonen nær kraftverket og tykkelsen på det transporterende laget. Ved dykket utslipp vil det være mindre forstyrrelser av overflatelaget nær kraftverket enn ved overflateutslipp, da innblandingen skjer under overflaten. Ved sterk strøm i forhold til dypden på utslippet, eller ved små vertikale temperaturforskjeller, vil strømmen likevel nå overflaten. Dykket utslipp er et komplisert system som det ikke har vært fokusert på i dette prosjektet.

I grunne gjennomstrømningssjøer er det større strømhastigheter og mer blanding av vannmassene enn i dype. Over terskler blandes vannmasser, ofte fra større dyp enn terskeldypet. Nedstrøms tersklene er derfor vannmassene mer homogene, men de øverste lagene påvirkes av været. I et grunt gjennomstrømningsbasseng er det ofte flere terskler med dypere bassenger i mellom. I det første bassenget er det på grunn av driftsvannets hastighet ofte såpass turbulens at vannmassene blandes. I bassengene lenger ned kan tyngre vann ligge igjen på bunnen, men det avhenger både av topografi og strømhastigheter. I Hallingdalselva ved Bromma er det flere slike bassenger. Varmt vann fra sommeren ligger igjen på bassengbunnen hele vinteren, men blir gradvis kaldere ettersom det blandes med det strømmende elvevannet (Kanavin, 1969). I Vinjevatn er strømmen så sterk at den ganske tidlig på vinteren drar med seg vannet fra bassengbunnene. I Hjartsjå blir derimot bunnvannet liggende forholdsvis urørt i det nederste bassenget (Kanavin, 1969).

I dype gjennomstrømmingssjøer blandes driftsvannet lite med omgivelsene og kan renne gjennom innsjøen i det dypet det stabiliserte seg på. Er innsjøen islagt er det nesten ingen påvirkning av været slik at vannet renner ut igjen i den andre enden med tilnærmet samme temperatur. Om sommeren derimot blir vannet vanligvis varmet litt opp på sin vei gjennom sjøen.

I innsjøer med liten gjennomstrømning vil været påvirke kraftverksvannet slik at forholdene blir omtrent som i en uregulert sjø når en fjerner seg fra kraftverksutslippet.

Dersom innsjøen har en betydelig innløpselv oppstrøms kraftverksutslippet (fig. 5.1) vil elvevannet blande seg med kraftverksvannet. Temperaturen på blandingsvannet vil avhenge av temperaturene på elvevannet og kraftverksvannet samt størrelsen på vannføringene. Ved dykket utslipp og lettere elvevann kan blandingen bli liten.

5.1.2 Isforhold

Inntaksmagasin

Ved sesongmessig regulering legger isen seg i perioden november til januar på forholdsvis høy vannstand. Utover vinteren synker vannstanden og isen som ligger nærmest land blir liggende tørt. Isen sprekker opp , og særlig i bratte strandsoner kan sprekkene være sjenerende for ferdsel på isen. Snøsmeltingen, og dermed oppfyllingen av magasinet, begynner vanligvis før isen forsvinner. Isflak i strandsonen begynner å flyte igjen når vannet stiger, og det blir farlig å krysse den oppsprukne sonen langs land.

Dersom det er grunne terskler i magasinet, blir det sterk strøm over disse etter hvert som magasinet tappes ned. Det blir ofte usikker is over slike terskler, særlig utover vinteren når vannstanden blir lavere.

Ved kraftverksinntaket blir det gjerne en råk i isen på grunn av strøm og blanding av vannmasser. Råken er som oftest såpass liten at det skaper små problemer for ferdsel på isen, men det er farlig når sikten er dårlig.

Innsjø eller magasin med utløp fra kraftverk

Ved utløpet i en innsjø dannes det nesten alltid en råk da kraftverksvannet tas fra dypet i et magasin og derfor har en temperatur godt over frysepunktet, vanligvis 1-3 °C. Størrelsen på råken avhenger først og fremst av været, men også av driftsvannets temperatur, driftsvannføringen, utløpsdypet og topografien i innsjøen. Størst råk får en ved stor driftsvannføring og overflateutslipp i et grunt magasin. Råkens størrelse avhenger lite av vannstanden bortsett fra i magasiner som kan betegnes som dype når vannstanden er nær HRV og grunne ved vannstand nær LRV.

Ved jevn driftsvannføring varierer råkens størrelse med værforholdene. I kapittel 5.3.2 beskrives dette nærmere.

5.2 Effektregulering

Et kraftverk som er bygd for effektkjøring har større slukeevne enn et som er bygd for jevn kjøring. Det er samme vannmengde en skal forbruke i løpet av året, men ved effektkjøring varierer kjøringen over korte tidsrom. I dette prosjektet har vi sett på døgnregulering hvor kraftverket går om dagen og står om natten og i helgen. Vi har antatt dobbel vannføring av jevn kjøring som en forenkling.

5.2.1 Vanntemperatur

Inntaksmagasin

Temperaturforholdene i inntaksmagasinet blir også ved effektkjøring svært lik de en finner i en uregulert innsjø av samme størrelse. Værforholdene avgjør temperaturfordelingen i innsjøen.

Når kraftverket skifter mellom av og på skjer dette gradvis for å unngå trykkbølger i rørsystemet og generatoren. Ved lave driftsvannføringer trekkes vann fra samme nivå som inntaksdypet. Når driftsvannføringen øker tas det inn vann fra et større dybdeintervall. Om sommeren kan dette føre til at det første driftsvannet etter oppstart er forholdsvis kaldt før temperaturen øker når mer overflatevann tas inn. Temperaturforskjellen avhenger av sjiktningen i inntaksmagasinet og er størst hvis det er vesentlig varmere vann over inntaksnivået. I Vinjevatn målte vi om sommeren av og til 2 °C kaldere vann de første 1-2 timer etter oppstart.

Når kraftverket går med dobbel vannføring av jevn kjøring, dras det ofte med mer overflatevann slik at driftsvannets temperatur blir høyere. I Vinjevatn observerte vi inntil 2 °C økning når driftsvannføringen ble doblet (fig. 3.10). Det er viktig å merke seg at driftsvannføringen i forkant hadde vært lav slik at det hadde bygd seg opp et varmt overflatelag i inntaksmagasinet (Våmarvatn). Ved langvarig effektkjøring forbrukes nok det varme overflatevannet (avhengig av værforholdene) slik at temperaturøkningen blir mindre.

Innsjø eller magasin med utløp fra kraftverk

Kraftverksvannet blandes med innsjøvannet når kraftverket går og forholdene blir som ved jevn kjøring. Når kraftverket står, blir forholdene som i en vanlig innsjø. Om natten er det som oftest negativt energibudsjett i vannoverflaten. Vi må da regne med en avkjøling av overflatelaget, også i blandingssonen nær kraftverksutslippet når kraftverket står om natten. Vanlig avkjøling om sommeren

er omtrent 1 °C i den øverste meteren og avtar raskt med dypet. Om vinteren er kaldt vann lettest, så en kan få avkjøling til frysepunktet i et tynt lag. Er det vind vil det avkjølte laget bli tykkere, men temperaturfallet vil bli mindre.

Dersom innsjøen som kraftverket renner ut i er et magasin for et nedenforliggende kraftverk, kan strømningsforholdene og vannstanden variere mye i innsjøen avhengig av hvordan kraftverkene kjøres. I et smalt og grunt magasin, slik som Vinjevatn, vil vannet strømme relativt raskt gjennom og vannstanden holdes jevnest dersom kraftverkene kjøres i fase. På grunn av størrelsen på det første bassenget og blandingen over tersklene, er det liten virkning av effektkjøringen nedstrøms det første bassenget. Vannmassene er gjennomblandet, men temperaturen i det øverste laget varierer med været.

Er magasinet stort og uten terskler vil blandingen avta når en fjerner seg fra kraftverksutslippet. Et stykke ut i magasinet vil værforholdene bli viktigst for temperaturprofilet, og forholdene blir tilnærmet som i en tilsvarende innsjø uten kraftverksutslipp. At kraftverket stanses om natten, får derfor liten virkning på temperaturprofilet når en er langt nok unna utløpsstedet, men i blandingssonen vil en som nevnt få en avkjøling av overflaten om natten når kraftverket står.

Ved tilførsel av større elver til innsjøen oppstrøms kraftverket (fig. 5.1) vil blandingsforholdene avhenge av om kraftverket går eller står. I perioder hvor det er stor temperaturforskjell mellom kraftverksvannet og elvevannet, vil elvevannet dykke hvis det er tyngst, eller omvendt legge seg i overflaten. En kan da få flere grader i temperaturforskjeller i løpet av et døgn i et og samme dyp. Endringene blir størst dersom elven og kraftverket har omtrent samme vannføring. Endringene er også større ved store enn ved små vannføringer. Et stykke nedstrøms kraftverksutslippet vil døgnvariasjonene i dypet forsvinne på grunn av diffusjon eller blanding over terskler.

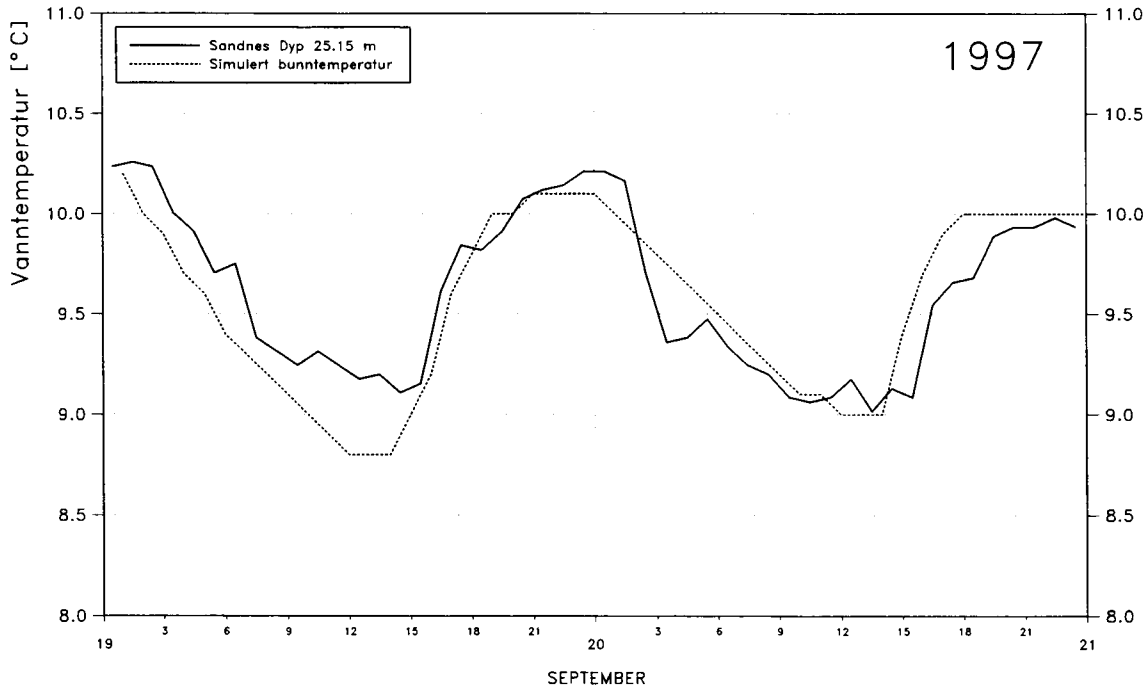


Fig. 5.2 Målt og simulert vanntemperatur i dypet av bassenget utenfor kraftverksutslippet ved Vinje kraftstasjon. Temperaturen er simulert ved å blande vannmassene i fra kraftverket og Smørkleppål innenfor en boks på 300 m x 300 m x 20 m som tilsvarer dypeste del av bassenget.

Dersom en kan anslå arealet på det området hvor kaldt elvevann vil samle seg, dvs. bunnen av et basseng, kan en simulere temperaturendringene ved en enkel blandingsmodell. Fig. 5.2 viser simulert blandingstemperatur sammenlignet med observert vanntemperatur i 25 m dyp ved Sandnes under prøvekjøringen 19-20 september 1997. Det var da flere graders forskjell mellom vannet fra kraftverket

og elva. Det er antatt at nedre del av bassenget der blandingen skjer er 300 m × 300 m × 20 m. Ved hvert tidsskritt er det sluppet inn i boksen kjente vannmengder fra kraftverket og elva og sluppet ut tilsvarende vannmengde med "gammel" temperatur. Alt er så blandet og "ny" temperatur er beregnet. Når temperaturforskjellene er mindre blir døgnvariasjonen mindre, og når elvevannet blir lettere og spres i overflaten kan en ikke lenger bruke en slik enkel modell.

5.2.2 Isforhold

Inntaksmagasin

Dersom inntaksmagasinet er lite, kan en få vesentlig variasjon i vannstanden i løpet av døgnet. Det vil derfor bli mer oppsprukket is og mer overvann ved land. Ved store magasiner blir isforholdene ganske lik de en får ved jevn kjøring.

Innsjø eller magasin med utløp fra kraftverk

Særlig dersom innsjøen er liten kan en også her få variasjoner i vannstanden. Det kan føre til oppsprukket is og overvann ved land. Over terskler får vi øket strømhastighet når kraftverket går, så isen blir mer variabel og usikker.

Råken ved kraftverksutløpet vil variere mye ved effektkjøring. I kaldt og stille vær vil hele råken fryse igjen under stansen, og det tar flere timer å bryte opp råken igjen etter oppstart. Råken vil derimot ikke fryse til dersom det effektkjøres slik at kraftverket ikke stanses helt om natten, men går med en lav vannføring. Råken vil heller ikke fryse igjen ved svak kulde (eller mildvær) eller vind. Se kapittel 5.3.2 for mer detaljer om råkstørrelser.

5.3 Forskjeller mellom sesongmessig regulering og effektregulering

Vi sammenligner her jevn kjøring av et kraftverk og effektkjøring med omtrent dobbel driftsvannføring om dagen og stans om natten og i helgen.

5.3.1 Vanntemperatur

Inntaksmagasin

Det er små forskjeller i temperaturforholdene i et inntaksmagasin som forsyner et effektregulert kraftverk og et kraftverk med jevn kjøring. Svært nær kraftverksinntaket blir det imidlertid noe mer sammenblandete vannmasser når en kjører dobbel vannføring (effektkjøring).

Dersom det er grunne terskler i magasinet, kan en få mer blandete vannmasser nedstrøms terskelen når vannføringen er stor (effektkjøring).

Innsjø eller magasin med utløp fra kraftverk

Kraftverksvannet og innsjøvannet blandes i en sone nær kraftverksutslippet. Nærmest kraftverket er vannmassene gjennomblandet, mens det oftest er temperatursjiktninger når en kommer lenger vekk. Temperaturforskjellene skyldes værforholdene, spesielt vind, stråling og lufttemperatur. Ved angitt effektkjøring er det omtrent dobbel vannføring om dagen. Det gir sterkere strøm nærmest kraftverket og over terskler, men på dypere vann skjer transportøkningen mest som en økning av tykkelsen på det transporterende laget.

Om sommeren varmes overflatelaget om dagen, bortsett fra aller nærmest kraftverket hvor det stadig tilføres vanligvis kaldere kraftverksvann. Temperaturvariasjonene i løpet av et døgn kan være flere grader i den øverste meteren, men avtar fort med dypet. Vinden kan når som helst på døgnet gripe inn og blande vannmassene. Da kan en få flere tidels grader temperaturendring enda dypere, men

temperaturen går ikke tilbake til utgangspunktet når det slutter å blåse. Vindens effekt er derfor primært en engangs oppvarming/nedkjøling av dypere vannmasser.

Ved effektkjøring øker sonen med gjennomblanding noe. Samtidig får vannmassene ro om natten når kraftverket står, så en får avkjøling (unntaksvis oppvarming) av den øverste meteren også nærmest kraftverksutslippet. Nær kraftverket må vi altså vente noe større døgnvariasjoner i overflatelaget, i størrelsesorden 1 °C om sommeren. Om vinteren kan vanntemperaturen i overflaten variere fra 0 °C om natten (med islegging) til 2-3 °C (driftsvannets temperatur) om dagen.

Om sommeren når det er betydelig varmere vann over inntaket i inntaksmagasinet, kan vi få et temperaturfall på inntil 2 °C de første 1-2 timer etter oppstart på grunn av at mesteparten av driftsvannet tas fra inntaksdypet. Deretter kan vi få høyere temperatur på driftsvannet, periodevis 1-2 °C varmere enn ved jevn kjøring. Det skyldes at mer varmt overflatevann dras med. Resten av året er det små temperaturforskjeller fra inntaksdypet og opp, så da blir det liten forskjell på driftsvannets temperatur ved effektkjøring og jevn kjøring. Dersom inntaket ligger svært dyp (anslagsvis < 30 m) vil det trolig ikke rives med overflatevann selv ved sterk kjøring, så driftsvannets temperatur vil ikke avhenge så mye av kjøringen.

Dersom innsjøen har en innløpselv oppstrøms kraftverksutløpet som er av nær samme størrelsesorden som driftsvannføringen, vil vi derimot få vesentlig større temperaturvariasjoner i nærområdet til kraftverksutløpet ved effektkjøring enn ved jevn kjøring. Variasjonene er størst når temperaturforskjellen mellom de to vannkildene er størst, vanligvis sent på høsten og midt på sommeren. Temperaturforskjellen avhenger av nedbørfeltene (høyde over havet, snø- og bre-andel) og inntaksdypet i inntaksmagasinet.

Når elvevannet er tyngst får en temperaturvariasjon i dypet. Det er vist i kapittel 5.2.1 at vanntemperaturen i dypet kan beregnes ved hjelp av en enkel blandingsmodell når temperaturene og vannføringene på vannkildene kan anslås. Når elvevannet er lettest, må en også ta hensyn til værforholdene og kan ikke lenger bruke en slik enkel modell.

Med innløpselv fant vi i Vinjevatn 2-3 °C døgnvariasjoner i et tynt overflatelag ved effektlignende kjøring om sommeren og vinteren, mens det var 1 °C i døgnvariasjon i dypet ved effektkjøring om høsten. Dette virker som tall en kan forvente andre steder også, men må tilpasses med tanke på innløpselvas størrelse og ikke minst driftsvannets temperatur.

5.3.2 Isforhold

Inntaksmagasin

Dersom inntaksmagasinet er lite kan en få vesentlig variasjon i vannstanden ved effektkjøring, både opp og ned. Ved jevn kjøring er det jevnt avtagende vannstand utover vinteren bortsett fra under eventuelle vinterflommer. Det vil derfor bli mer oppsprukket is og mer overvann ved land ved effektkjøring. Ved store magasiner blir isforholdene derimot ganske lik de ved jevn kjøring.

Innsjø eller magasin med utløp fra kraftverk

Kraftverksvannet har som tidligere nevnt en temperatur som vanligvis ligger i området 1-3 °C. Der dette slippes ut nær overflaten vil vannmassene i overflaten bli for varme til at vannet islegges selv i streng kulde. Vannet transporteres så vekk fra utslippspunktet og avkjøles i kuldeperioder. Når vanntemperaturen når frysepunktet, vil det dannes is og vi får etablert en iskant. Dersom en kjenner overflatehastigheten på vannet kan en beregne avstanden x til iskanten fra utrykket

$$x = -\frac{\rho c U D}{h_{wa}} \ln \frac{-T_a}{T_w - T_a} \qquad (5.1)\ \text{(Ashton, 1980)}$$

der ρ er tettheten, c er spesifikk varme for vann, U er midlere hastighet, D er dypet på det transporterende laget, h_{wa} er energitapet fra vann til luft pr. grad temperaturforskjell, T_w er vannets utgangstemperatur (her etter blanding med innsjøvann) og T_a er lufttemperaturen. I perioder med sterk kulde vil vannet tidligere nå frysepunktet og iskanten nærmer seg kraftverksutslippet (råken blir mindre).

Dersom det allerede eksisterer en iskant, kan denne iskanten opprettholdes selv om vanntemperaturen er over null. Det må bare være kaldt nok til at varmen som avgis fra vannet balanseres av varmetapet fra overflaten. En iskant som dannes i en periode med sterk kulde kan derfor holde seg på samme sted selv om det blir mindre kaldt. Vi kan beregne avstanden x til iskanten fra utrykket

$$x = -\frac{\rho c U D}{h_{wa}} \ln \frac{\left(1 + \frac{h_{ia}}{h_{wi}}\right)(T_m - T_a)}{T_w - T_a} \qquad (5.2)\ \text{(Ashton, 1980)}$$

der h_{ia} og h_{wi} er energitapet pr. grad temperaturforskjell fra henholdsvis is til luft og vann til is og T_m er temperaturen på isens underside (tilnærmes til 0°C).

Disse formlene er best egnet på elver hvor man har mer kontroll på hastigheten. Nedstrøms et kraftverksutslipp er det kraftig strøm som avtar raskt og utvider seg i bredden. Det er vanskelig å anslå både hastighet og tykkelse på det transporterende laget. Vi tar likevel et eksempel for å se på forskjellene mellom formel 5.1 og 5.2:

ρ = 1000 kg/m³
c = 4180 J/kg K
U = 0.05 m/s
D = 2 m
$h_{wa}=h_{ia}$ = 25 W/m² K
h_{wi} = $1622 \cdot U^{0.8}/D^{0.2}$ = 148 W/m² K
T_a = -10 °C
T_w = 1.5 °C

Formel 5.1 gir avstand til nydannelse av iskant lik	2.3 km
Formel 5.2 gir avstand til eksisterende iskant lik	0.0 km

Nå er jo strømmen mye større enn 5 cm/s nær kraftverksutslippet slik at formel 5.2 gir feilaktig svar. Vi ser altså at energiutvekslingen mellom vann og is er så liten ved så lave hastigheter at vannet godt kunne holdt 1.5 °C bare det var –10 °C i lufta. Hvis vi effektkjører, vil både strømhastigheten og tykkelsen på det transporterende laget øke når kraftverket går for dobbel effekt. Setter vi U=0.08 m/s og D=2.5 m finner vi at avstanden til iskanten kan være 300 m.

Resultatene er veldig følsomme rundt disse verdiene. Nærmer vi oss –20 °C avtar avstanden fort, og avstanden øker fort ved høyere hastigheter.

Ved effektkjøring vil en få islegging i stille og kalde netter når kraftverket står. Når kraftverket starter opp igjen, vil isen brekke opp og/eller smelte vekk i hovedstrømmen. Lenger vekk avtar strømmen og det vil oppstå en likevekt ved iskanten hvor vannet kan være over frysepunktet. I streng kulde kan vanntemperaturen være vesentlig over null, mens den ligger nær null i svak kulde. Også ved jevn

kjøring kan en ha situasjoner hvor vanntemperaturen er over null ved iskanten, men da må det nylig ha vært en enda strengere kuldeperiode for å bygge opp isdekket.

Tabell 5.1 Virkning av effektkjøring på råkstørrelsen på grunn av øket strømhastighet og tilfrysing av råken om natten. + betyr større råk, 0 betyr uforandret råk og – betyr mindre råk. Tabellen viser til råkstørrelsen ved slutten av dagen før stans av kraftverket.

	Økt strømhastighet med kortere tid til iskanten	Tilfrysing om natten og iskanten tåler overtemperatur	Samlet effekt
Sterk kulde	+	– –	–
Moderat kulde	+	–	0
Svak kulde/mildvær	+	0	+

Effektkjøring gir økt strømhastighet (når kraftverket går) og dermed kortere tid for energiutveksling med atmosfæren. I samme avstand fra kraftverket vil derfor overflatevannet være varmere ved effektkjøring enn ved svakere jevn kjøring når det er kaldt. Tabell 5.1 viser samlet virkning av økt strømhastighet og det at et isdekke tåler overtemperatur på vannet i kulde. I sterk kulde kan vi derfor forvente at råken som oftest blir mindre ved effektkjøring enn ved jevn kjøring. Ved moderat kulde blir råken av omtrent samme størrelse, mens den vil bli større ved svak kulde og mildvær. Under moderat og sterk kulde får vi islegging om natten, så midlet over døgnet blir det vesentlig mindre åpent vann som igjen virker dempende på frostrøyken. Dersom kraftverket ikke slås helt av om natten, eller det av andre grunner er en strøm av "varmt" vann, vil det ikke bli nevneverdig islegging om natten. Råken vil da kunne bli større ved effektkjøring også ved moderat og sterk kulde.

Det må presiseres at dette er teoretiske betraktninger som ikke er observert, da det ikke var værforhold til å gjennomføre forsøkskjøringen om vinteren i Vinjevatn.

Som nevnt har vi ikke fokusert på dykket utslipp i dette prosjektet. I Norge er det svært lite brukt da det er større kostnader forbundet med det. Dykket utslipp har vært brukt ved utslipp i fjorder for å unngå ferskt overflatelag med ofte tilhørende islegging, og det har vært brukt i ferskvann for å redusere råken og dermed frostrøyken. Virkningen på isdekket er altså forskjellig i saltvann og ferskvann, men begge steder ønsker en å holde kraftverksvannet unna overflaten. Ved effektkjøring med dobbel vannføring av jevn kjøring vil det bli mer turbulens og større sjanse for at overflaten blir påvirket. Effektkjøring vil derfor kunne redusere virkningen av et dykket utløp. Enkelte steder kan nok likevel et dykket utslipp være et avbøtende tiltak ved effektkjøring.

Ved effektkjøring blir det som oftest også varierende vannstand i utløpsmagasinet/innsjøen. Det blir mer oppsprekking av strandsonen med overvann. Dette gir først og fremst problemer der strandsonen er bratt. Over terskler får vi øket strømhastighet når kraftverket går, så isen blir mer usikker i slike områder.

5.3 Magasintypen og andre innvirkninger

Størrelse og form på magasinene har stor innvirkning på utviklingen av vanntemperaturen og isforholdene. I tillegg er det en del andre faktorer som har betydning. Tabell 5.2 og 5.3 sammenfatter faktorer/egenskaper og deres innvirkning på vanntemperaturen og isforholdene. Det er ikke tatt med uvesentlige faktorer/egenskaper i tabellene.

Tabell 5.2 Faktorer/egenskaper som påvirker vanntemperaturen i magasiner ved effektregulering. X som er understreket (X) markerer at dette er spesielt viktig ved effektregulering. Tall i parantes må anses som et grovt anslag og vil avhenge av flere faktorer, spesielt driftsvannføringen.

Faktorer/ Egenskaper	Svært viktig	Kan være viktig	Virkning på vanntemperaturen	
Inntaks-magasinet				
Tilsig	X		Bretilsig gir svært kaldt vann i sommerhalvåret.	
Høyde over havet		X	Magasiner høyt til fjells er kaldere pga. værforholdene.	
Reg. høyde	X		Inntaksdypet målt i forhold til overflaten varierer med magasinhøyden til enhver tid.	
Inntaksdypet	X		Dypt inntak gir kaldere vann om sommeren og varmere vann om vinteren enn inntak nærmere overflaten. Det er inntaksdypet i forhold til overflaten som er avgjørende. Ved dypt inntak (< 30 m) vil ikke nevneverdig overflatevann rives med og driftsvannets temperatur blir ikke så avhengig av driftsvannføringen.	
Areal / Dybde	X		En stor innsjø er utsatt for vind så blandingslaget blir tykkere. Er innsjøen i tillegg dyp vil det akkumuleres mye varme i løpet av sommeren. Magasinet islegges da senere, så det blir mer tid til å avkjøle dypere lag. Ved dype inntak (< 20 m) vil et stort magasin derfor gi kaldere driftsvann om vinteren og varmere driftsvann om sommeren enn et lite magasin.	
Kraftverket				
Slukeevne	X		Stor slukeevne på kraftverket øker strømmen og innblandingen i utløpsmagasinet. Kraftverksvannet får mer innflytelse på vanntemperaturen i utløpsmagasinet ved stor driftsvannføring. Driftsvannets temperatur kan være anslagsvis 1-2 °C høyere på varme dager om sommeren ved effektkjøring dersom inntaket ikke ligger for dypt (10-20 m). Det skyldes medriving av varmt overflatevann.	
Driftsstans	X		Døgnvariasjonen i overflatetemperaturen, særlig nær kraftverksutslippet, øker med øket driftsstans.	
Utløps-magasinet (innsjø)				
Areal	X		Et stort magasin har en blandingssone nær kraftverket, mens resten av vannet er mindre påvirket av om det kjøres effekt eller jevn kjøring.	
Bredde		X	Et trangt magasin kan gi større strømhastigheter og mer blanding av vannmassene, særlig når det er grunt.	Det blir små temperaturforskjeller mellom overflaten og bunnen av blandingslaget.
Topografi/ dybdeforhold	X		Terskler i magasinet blander vannmassene. Hvis de er svært grunne (< 5 m) blandes også overflatelaget, noe avhengig av bredde og vannføring.	
Reg. høyde		X	Kan ha betydning ved at terskler blir grunnere. Også lokal temperaturendring i reguleringssonen.	
Utslippsdyp	X		Ved utslipp i store dyp kan en unngå/redusere virkninger i overflaten.	
Høyde over havet		X	Magasiner høyt til fjells er kaldere om sommeren pga. værforholdene.	
Sideelver oppstrøms	X		Når sideelvenes temperatur er forskjellig fra driftsvannets temperatur vil vannet fra de to kildene legge seg i forskjellige lag. Om høsten dykker elvevannet og kan gi døgnvariasjoner i temperaturen i dypet som ikke oppstår i en naturlig innsjø (størrelsesorden 1 °C). Om vinteren og sommeren kan en få 2-3 °C variasjon i de øverste 1-2 m, raskt avtagende med dypet.	
Årstid	X		Betydning for temperaturutviklingen i vannet generelt, og spesielt i blandingssonen når kraftverket stanser for natten. Viktig for oppførselen til sideelver og kraftverksvannets blanding.	

Tabell 5.3 Faktorer/egenskaper som påvirker isforholdene i magasiner ved effektregulering. X som er understreket (X) markerer at dette er spesielt viktig ved effektregulering. Tall i parantes må anses som et grovt anslag og vil avhenge av flere faktorer, spesielt driftsvannføringen.

Faktorer/ Egenskaper	Svært viktig	Kan være viktig	Virkning på isforholdene	
Inntaks-magasinet				
Tilsig	X		Grunnvannstilsig kan gi råk langs land. Stort tilsig kan gi råk ved inntaket og øket gjennomstrømning kan svekke isen ved terskler.	
Høyde over havet	X		Magasiner høyt til fjells er kaldere pga. værforholdene og issesongen er lenger.	
Reg. høyde	X		Oppsprekking av isen i strandsonen, særlig der det er bratt. Inntaksdypet målt i forhold til overflaten varierer med magasinhøyden til enhver tid.	
Inntaksdypet	X		Dypt inntak gir varmere vann om vinteren enn inntak nærmere overflaten. Det er inntaksdypet i forhold til overflaten som er avgjørende.	
Kraftverket				
Slukeevne	X		Stor slukeevne på kraftverket øker strømmen og innblandingen i utløpsmagasinet. Kraftverksvannet får mer innflytelse på vanntemperaturen i utløpsmagasinet og råken ved utløpet og over terskler blir større ved stor driftsvannføring.	
Driftsstans	X		Muligheten for islegging om natten om vinteren øker med lengden på driftsstansen under effektkjøring.	
Utløps-magasinet (innsjø)				
Areal	X		Et stort magasin har en blandingssone nær kraftverket med åpen råk, mens resten av vannet er mindre påvirket av om det kjøres effekt eller jevn kjøring.	
Bredde		X	Et trangt magasin kan gi større strømhastigheter og mer blanding av vannmassene, særlig når det er grunt.	I blandingssoner fraktes "varmt" vann til overflaten og området blir isfritt eller får usikker is.
Topografi/ dybdeforhold	X		Terskler i magasinet blander vannmassene. Hvis de er svært grunne (< 5 m) blandes også overflatelaget, noe avhengig av bredde og vannføring.	
Reg. høyde	X		Oppsprekking av isen i strandsonen, særlig der det er bratt. Kan også ha betydning ved at terskler blir grunnere (se over).	
Utslippsdyp		X	Ved utslipp i store dyp kan en unngå/redusere råken i isen.	
Stans om natten	X		Når kraftverket stanses helt, og det ikke er annen tilførsel av "varmt" vann, vil en få islegging i sterk kulde. Er det en strøm av "varmt" vann vil det som regel ikke islegges om natten.	
Høyde over havet		X	Magasiner høyt til fjells er kaldere om sommeren pga. værforholdene og issesongen er lenger.	
Sideelver oppstrøms		X	Det dannes en råk ved utløpet i vannet, ofte bare noen titalls meter stor. Om vinteren vil elvevannet legge seg på toppen når kraftverket står og kan bidra til raskere nedkjøling og islegging.	
Luft-temperatur	X		Det kreves lufttemperaturer godt under null (anslagsvis minst –5 til –10 °C) for å få islegging om natten under effektkjøring.	
Vind	X		Dersom det blåser blandes overflatevannet og en får ikke islegging i løpet av natten under effektkjøring. Vinden kan også bryte opp et eksisterende isdekke, særlig utvide råker.	

6. Avbøtende tiltak

Det er få tiltak en kan sette inn for å påvirke vanntemperatur- og isforholdene. Problemene med vanntemperatur er oftest at den blir for lav om sommeren da vannet tas fra dypet i et magasin. I et lite utløpsmagasin kan vanntemperaturen bli flere grader kaldere enn uten kraftverket. Det enkleste tiltaket for å heve temperaturen i magasinet er å redusere vannføringen, men dette er sjeldent ønskelig. Et annet tiltak er å konstruere flere alternative inntaksdyp. Om sommeren kan en da bruke et uttak som ligger nær overflaten.

Dersom forholdene tillater det, kan en konstruere et dykket utslipp for å minimalisere temperaturendringene i overflaten. Et slikt inntak må være forholdsvis dypt da det blir mye turbulens rundt utløpet, og tetthetsforskjellene i ferskvann vanligvis er små. Vi vil ikke her sette noen tall på dypet da det er et studium i seg selv. Dersom det er en terskel nedstrøms utslippstedet har et dykket utslipp ingen virkning nedstrøms terskelen.

Om vinteren har problemene ofte knyttet seg til sarrdannelse på inntaksristene til kraftverket. Da vi ikke forventer noe større råk i sterk kulde, vil vi ikke få noen større sarrproblemer ved effektkjøring enn ved jevn kjøring.

En må forvente at det blir vanskeligere å ferdes på isen der det effektkjøres, da strandsonen vil bli mer oppsprukket. Over terskler kan isen bli mer usikker da strømhastigheten øker i perioder. Dersom utløpsmagasinet er inntaksmagasin til et nytt kraftverk, kan en kjøre disse i fase for å holde vannstanden mest mulig stabil. Oppsprekkingen i strandsonen vil da reduseres. Ved samtidig å holde vannstanden så høy som mulig reduserer en isproblemene over terskler.

7. Modeller

I Norge er det mange fagmiljøer som driver med modellering av transport i vann. Den største aktiviteten er knyttet til hav eller fjord, og oftest på større skala enn det som trengs for å løse det som skjer ved effektkjøring. Utslipp fra et kraftverk og innblanding på grunne partier er problemer som krever høy oppløsning, mens oppløsningen kan reduseres på dypere og rolige partier.

De beste løsningene får en ved 3-dimensjonale modeller, men resultater med nytteverdi kan en også få fra enklere 2-dimensjonale eller 1-dimensjonale modeller. 3-dimensjonale modeller krever stor regnekraft, og kjørt på kraftige PC'er er beregningstiden for tiden typisk på skalaen dager.

Da miljøene i Norge ofte er ganske små, blir kunnskapen personavhengig. Aktiviteten er til dels avhengig av oppdragsmidler, så miljøene er sårbare når personer slutter eller etterspørselen avtar. Vi har forespurt miljøene om tidligere og nåværende aktivitet på modellering i innsjøer. Nedenfor er et kort resyme av aktiviteten vi har klart å spore opp på innsjømodellering.

SINTEF/NTNU:

Da dette er et typisk "ingeniør"-problem er det ikke uventet stor aktivitet i Trondheimsmiljøet. Nils Reidar Bø Olsen ved NTNU-vassbygging har utviklet en full 3D-modell som han har kalt SSIIM. Han har brukt modellen i tre innsjøer i Norge: Sperillen, Tyrifjorden og Mjøsa. Sperillen er en typisk gjennomstrømningssjø hvor strømningsforholdene og temperaturgradienter ble studert. I Tyrifjorden var det et punktutslipp som ble modellert, og i Mjøsa ble det studert turbiditet under flommen i 1995. Modellen har vist seg å takle problemer på små skalaer og ble utviklet for å studere sedimentasjon og erosjonsproblemer. I dag brukes den aktivt i England for å beregne algekonsentrasjoner i innsjøer. I Norge benyttes den av SINTEF til å beregne fiskehabitat i elver.

Torbjørn Utnes ved SINTEF simuleringsteknologi har utviklet modellen GEOSIM som er en kvasi 3D-modell. Den er utviklet for hav/fjord, men er i samarbeid med Bård Brørs også brukt på innblanding der en elv renner ut i en innsjø, her et idealisert firkantet basseng. De jobber med å effektivisere modellen ved parallell prosessering.

Ved SINTEF er det også en fysisk modelltank hvor utslipp fra kraftverk har blitt modellert, blant annet i forbindelse med dykket utslipp ved Lomen kraftverk. De har utviklet en stråleberegningsmodell (S-JET) som håndterer nærsonen og finner innblandingsdypet i fjernsonen. Modellen sier noe om forholdene ved jevn kjøring, men kan ikke brukes til å finne temperaturendringer ved effektkjøring. Kontaktperson er Thomas Mcclimans.

DNMI:

De besitter mye kompetanse på modellering, men jobber i dag med større skalaer enn det som kreves ved modellering av kraftverksutslipp, og arbeidsfeltet er hovedsakelig hav og fjorder. Modellene er hovedsakelig kvasi 3D-modeller. For å forbedre de mest detaljerte atmosfæremodellene må de legge mer arbeid i hydrologidelen, i hvert fall på større innsjøer. Fagansvarlig er Lars Petter Røed.

UiO:

Ved Universitetet i Oslo, Institutt for matematikk, er det et miljø for modellering. De har varierte problemstillinger, men det er lenge siden det ble modellert i innsjøer. Midt på 80-tallet ble det tatt to doktorgrader på modellering i innsjøer. Temaene var indre bølger i Mjøsa og elv inn i et lagdelt vann. Kontaktperson er Bjørn Gjevik.

UiB:

Jarle Berntsen på Matematisk institutt ved Universitetet i Bergen har utviklet en full 3D-modell som er brukt på nærstudier av et dykket kraftverksutslipp i en fjord. Modellen er brukt til å simulere et utslipp på dypt vann i Samnangerfjorden. Deler av driftsvannet ved Tysse kraftverk tenkes ført ut i fjorden gjennom en slange og vil føre til en vertikalstrøm som stimulerer produksjonen i fjorden. En tilsvarende fysisk modell er bygd ved SINTEF og resultatene er sammenlignet, også med enklere modeller. 3D-modellen kan også brukes i innsjøer og vil kunne hanskes med effektkjøring. I dag begrenser de modellene til 1 million gridflater på grunn av prosesseringstiden.

NVE:

NVE har brukt en modell som heter FIDAP til å modellere nedre del av Suldalsvatnet. Problemstillingen var å se på transporten av kaldt vann fra Kvilldal kraftverk. FIDAP er en full 3D-modell og er et kommersielt produkt med lisenser. NVE sluttet å bruke det av kostnadshensyn da de måtte gå over fra forskningslisens til kommersiell lisens. Ellers bruker NVE TEMPREG som er en endimensjonal modell, men modellen virker dårlig om vinteren, og kan heller ikke gi den romlige oppløsningen som kreves ved effektkjøring.

NIVA:

Torulv Tjomsland har jobbet sammen med Nils Reidar Bø Olsen med SSIIM i Tyrifjorden. Bruker ellers FINNCO som er en endimensjonal modell for å studere temperaturfordelingen i dypet og endringer i alger og kjemikalier.

Veritas:

Det er et aktivt modelleringsmiljø på vann ved Veritas. De disponerer 2D-modeller som kan brukes på innsjøer. Hittil har de ikke modellert innsjøer, men fjorder og hav. Kontaktperson er Anders Rudberg.

Det er altså flere miljøer i Norge som kan løse oppgaven med å simulere en effektregulering med utslipp i en innsjø, men ingen miljøer kan hevde at de har god erfaring med dette. Det er trolig at det er mer erfaring på ferskvannsmodellering i andre land, for eksempel Sverige ved SMHI. Vi har ikke undersøkt dette nærmere da vi kan konkludere med at det er ekspertise nok i Norge. Men en slik modellering vil være ganske kostnadskrevende, da det vil være et visst preg av utvikling over arbeidet.

8. Metodeutvikling

Numerisk modellering av noen utvalgte situasjoner ville være en naturlig videreføring av prosjektet. Målet måtte da være både verifisering av modellen og oppbygging slik at den forholdsvis lett kunne flyttes til andre magasiner.

Ved utslipp i et større basseng antar vi at virkningen av effektregulering viskes ut forholdsvis fort på grunn av diffusjon. Det ville vært en stor fordel å fått dette bekreftet ved å måle en periode dersom en fant et slikt kraftverk som kjørte effekt.

Under arbeidet med virkningene på is var det et stort savn at de teoretiske betraktningene ikke kunne bekreftes med målinger. Et videre arbeide kunne inneholde målinger fra et sted hvor det effektkjøres jevnlig og kraftverket slås helt av om natten slik at en kan få isdannelse.

9. Litteraturliste

Ashton, G.D., 1980: Freshwater ice growth, motion and decay. In Dynamics of snow and Ice masses (S.C.Colbeck, Ed.). Academic Press, New York, pp. 261-304.

Kanavin, E.V., 1969: Isforhold i Norske Vassdrag. Kompendium utarbeidet av Iskontoret, Kap. A-C. NVE, Hydrologisk avdeling.

Figur- og tabell-liste

Fig. 2.1 Kart over magasiner, kraftverk og tunneler i Tokkevassdraget nær Vinje kraftverk. 9

Fig. 2.2 Gjennomsnittelig strøm over terskler i Vinjevatn ved (a) full drift av Vinje kraftverk og stans i Tokke kraftverk, og (b) full drift av Tokke kraftverk og stans i Vinje kraftverk. Vannstanden i Vinjevatn er 1 m under HRV og det kommer 20 m^3/s inn fra Smørkleppåi. Skraveringen angir dybdeforholdene der mørkt er dypest..... 10

Fig. 3.1 Driftsvannføringen i kraftverkene og vannstanden i Vinjevatn under forsøkskjøringen 17-26 september 1997. 11

Fig. 3.2 Målepunkter som er benyttet i prosjektperioden 12

Fig. 3.3 Vanntemperaturen i Vinjevatn ved Sandnes og Engesgrovbekken i forsøkskjøringsperioden (18-26 september 1997). Det er også plottet vannføringen i Vinje kraftverk og Smørkleppåi. 12

Fig. 3.4 Vanntemperaturer og vannføringer som påvirket forholdene i bassenget utenfor Vinje kraftverk (Sandnes) under forsøkskjøringen 17-26 september 1997..... 13

Fig. 3.5 Driftsvannføringen i kraftverkene og vannstanden i Vinjevatn under forsøkskjøringen 26 august – 9 september 1998. 14

Fig. 3.6 Vanntemperaturen i Vinjevatn på bunnen av terskelen ved Evja i forsøkskjøringsperioden 26 august – 9 september 1998. Det er også plottet vanntemperaturen på det innkommende vannet fra Vinje kraftstasjon og fra Smørkleppåi , samt vannføringen i Vinje kraftstasjon og i Smørkleppåi..... 15

Fig. 3.7 Vanntemperaturen nær overflaten i Vinjevatn og i Lognvikvatn i forsøkskjørings-perioden i 1998. 15

Fig. 3.8 Vanntemperaturen i flere dyp i Vinjevatn ved Sandnes samt vanntemperaturen i Kjela (tilnærmet lik Smørkleppåi) og i Vinje kraftverk i juli/august 1997 under perioder med plutselig sterk kjøring av kraftverket Det er også plottet driftsvannføring i Vinje kraftverk..... 16

Fig. 3.9 Vanntemperaturen i øvre lag i Vinjevatn ved Sandnes og Lognvikvatn samt vanntemperatur og driftsvannføring i Vinje kraftverk 10-18 august 1997 under forholdsvis jevn kjøring..... 17

Fig. 3.10 Vanntemperaturen i øvre lag i Vinjevatn ved Sandnes og Lognvikvatn samt vanntemperatur og driftsvannføring i Vinje kraftverk 2-8 august 1997..... 17

Fig. 3.11 Vanntemperaturen i flere dyp i Vinjevatn ved Sandnes og driftsvannets temperatur i Vinje kraftverk under effektlignende kjøring i desember 1996. Det er også plottet driftsvannføringen i Vinje kraftverk. Vanntemperaturen i Smørkleppåi er ikke målt, men antas å være svært nær 0 °C..... 19

Fig. 3.12 Døgnamplituder i vanntemperaturen i Vinjevatn ved Sandnes ved de ulike årstidene under effektkjøring. Vinjevatn er symbolisert med en boks og endringene skjer hovedsakelig i den skraverte delen av dypet. Pilen viser om elvevannet legger seg i overflaten (pil oppover) eller om det er tyngre og synker ned i dypet (pil nedover). Tallene til høyre viser omtrentlige døgnamplituder 20
Fig. 3.13 "Normale" isforhold midtvinters når kraftverket går oglufttemperaturen ligger rundt –5 °C. 20
Fig. 3.14 Isforholdene i Vinjevatn 29 januar 1999 før helgestansen i vinterforsøket. Lufttemperaturen hadde ligget nær -20 °C i to døgn. 21
Fig. 3.15 Tidsutviklingen for hvor råken utenfor Sandnes åpnet seg etter helgestansen 29 januar til 1 februar 22
Fig. 3.16 Vanntemperaturen i de øverste 5 meter i Vinjevatn ved Sandnes under helgestansen fra 29 januar kl. 19 til 2 februar kl. 10. Driftsvannføringen i Vinje kraftverk er også plottet. 23
Fig. 4.1 Vanntemperaturen i 4 dyp i Våmarvatn ved Landsverk i prøvekjøringsperiodene i 1997 og 1998. Det er også plottet driftsvannføringen i Vinje kraftstasjon. 24
Fig. 4.2 Typisk issituasjon midtvinters i Våmarvatn med drift i Vinje kraftverk. 25
Fig. 4.3 Typisk issituasjonen midtvinters i Våmarvatn under sterk kulde og drift i Vinje kraftverk. 26
Fig. 5.1 Prinsippskisse som viser begrepene inntaksmagasin, utløpsmagasin (evnt. uregulert innsjø), innløpselv (sideelv), kraftverk, kraftverksinntak og kraftverksutløp (kraftverksutslipp) 26
Fig. 5.2 Målt og simulert vanntemperatur i dypet av bassenget utenfor kraftverksutslippet ved Vinje kraftstasjon. Temperaturen er simulert ved å blande vannmassene i fra kraftverket og Smørkleppåi innenfor en boks på 300 m × 300 m × 20 m som tilsvarer dypeste del av bassenget. 30

Tabell 2.1 Noen data for magasinene rundt Vinje kraftverk 9
Tabell 2.2 Største mulige driftsvannføring for kraftverkene ved Vinjevatn 9
Tabell 5.1 Virkning av effektkjøring på råkstørrelsen på grunn av øket strømhastighet og tilfrysing av råken om natten. + betyr større råk, 0 betyr uforandret råk og – betyr mindre råk. Tabellen viser til råkstørrelsen ved slutten av dagen før stans av kraftverket. 34
Tabell 5.2 Faktorer/egenskaper som påvirker vanntemperaturen i magasiner ved effektregulering. X som er understreket (X) markerer at dette er spesielt viktig ved effektregulering. Tall i parantes må anses som et grovt anslag og vil avhenge av flere faktorer, spesielt driftsvannføringen. 35
Tabell 5.3 Faktorer/egenskaper som påvirker isforholdene i magasiner ved effektregulering. X som er understreket (X) markerer at dette er spesielt viktig ved effektregulering. Tall i parantes må anses som et grovt anslag og vil avhenge av flere faktorer, spesielt driftsvannføringen. 36

Rapporter utgitt i serien Rapport fra Effektregulering – Miljøvirkninger og konfliktreduserende tiltak:

1. Analyse av frostrøykobservasjonar vinteren 1996/97 over Bandak og Våmarvatnet i Tokkevassdraget.

2. Forsøkskjøring i Vinjevatn september 1997 – virkninger på fysiske og biologiske forhold – foreløpige resultater.

3. Innsamling og systematisering av erfaringsdata.

4. Effektregulering – turbiditetsøkning og biologiske virkninger i sjø.

5. Effektregulering – virkninger på laksefisk og bunndyr i elv, og bruk av vassdragssimulatorens habitatmodell.

6. Effektkjøring og elveerosjon - analyser og tiltak.

7. Prøvekjøring i Vinjevatn august/september 1998 Virkninger på fysisk og biologiske forhold – foreløpige resultater.

8. Effektregulering – virkninger på bunndyr og plankton i Vinjevatn.

9. Effektregulering – ferskvannsinnblanding i fjorder og algevekst

10. Frostrøyk ved Våmarvatnet i Tokkevassdraget vintrane 1996/97 – 1998/99.

11. Effektregulering- virkninger på vannvegetasjon av prøvekjøringene i Vinjevatn 1997 og 1998.

12. Effektkjøring og grunnvannserosjon – analyser og tiltak.

13. Miljøkonsekvenser og metoder for verdsetting.

14. Verknader av ope vatn på lufttemperaturen rundt råker i is.

15. Virkninger av effektregulering på vanntemperatur og is i vannkraftmagasiner og innsjøer.

EnFO

NVE

DIREKTORATET FOR NATURFORVALTNING

Statkraft