

# Vurderinger av vanntemperatur i Aurlandsvassdraget i perioden 2004-2006 og 2010



**Tor Haakon Bakken, Julie Charmasson,  
Atle Harby**

**Februar 2011**

[www.energy.sintef.no](http://www.energy.sintef.no)

**CEDREN**

Centre for Environmental Design of Renewable Energy



**SINTEF Energi AS**

Postadresse: 7465 Trondheim  
Resepsjon: Sem Sælands vei 11  
Telefon: 73 59 72 00  
Telefaks: 73 59 72 50

www.sintef.no/energi

Organisasjonsnr.:  
NO 939 350 675 MVA

# TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

**Vurdering av vanntemperatur i Aurlandsvassdraget i perioden 2004-2006 og 2010**

SAKSBEARBEIDER(E)

Tor Haakon Bakken, Julie Charmasson og Atle Harby

OPPDRAGSGIVER(E)

EnviDORR-prosjektet i CEDREN og E-CO vannkraft

TR NR. <b>TR A7077</b>	DATO 2011-02-22	OPPDRAGSGIVER(E)S REF. Halvor Kristian Halvorsen	PROSJEKTNR. 12X672.26
ELEKTRONISK ARKIVKODE 100309181516	KONTROLLERT AV Lena S. Tøfte <i>Lena S. Tøfte</i>	GRADERING Åpen	
ISBN NR. 978-82-594-3471-5	RAPPORTTYPE	GODKJENT AV (STILLING, NAVN) Knut Samdal, forskningssjef <i>KSa</i>	OPPLAG      SIDER 10            41
AVDELING Energisystemer	BESØKSADRESSE Sem Sælands vei 11	LOKAL TELEFAKS 73 59 72 50	

## RESULTAT (sammendrag)

Dette studiet har hatt som hovedmål å analysere vanntemperaturforholdene i Aurlandsvassdraget med den hensikt å bedre forstå hvilke faktorer som påvirker vanntemperaturen i Aurlandselva, samt foreslå tiltak som vil kunne bedre forholdene for fisk i vassdraget. Basert på vanntemperaturdata fra perioden 2004-2006 og 2010 later det til at temperatursjiktning i liten grad (kun svak gradient) dannes i Vassbygdvatn. Tilført varmeenergi fordeles over hele vannvolumet og hindrer derfor en ønsket oppvarming av overflatevannet i Vassbygdvatn. Analysen viser at det er overflatevannet i Vassbygdvatn som i stor grad bestemmer vanntemperaturen i Aurlandselva. Dannelse av sjiktning med høyere overflatetemperaturer som følge antas å være et meget sentralt tiltak for å bedre forholdene for fisk i Aurlandselva.

Vassbygdelvi bidrar nesten alltid positivt til oppvarming av Vassbygdvatn mens Aurland I alltid bidrar negativt (null-bidrag når Aurland I står). Beregningene viser at Aurland I generelt bidrar mer negativt enn Vassbygdelvi bidrar positivt.

De viktigste forholdene som bestemmer hvorvidt temperatursjiktning kan dannes er trolig:

- Mengden vann som slippes ut fra Aurland I (kraftproduksjon) og hvilken periode dette foregår (innsjøen tåler trolig noe utslipp fra Aurland I hvis sprangsjikt er etablert)
- Vannføring og vanntemperatur i Vassbygdelvi
- Lufttemperaturen/stråling

For å vurdere mulighetene for å forbedre vanntemperaturforholdene i Vassbygdvatn, både ved dagens kjøremønster og ved en framtidig økt effekt-innstallasjon, så anbefales det å utføre en analyse hvor en numerisk modell tilpasses Vassbygdvatn og et antall definerte scenarier simuleres.

## STIKKORD

EGENVALGTE	Vanntemperatur	Sjiktning
	Vannkraftregulering	Aurland

## INNHALDSFORTEGNELSE

	Side
1	INNLEDNING ..... 3
1.1	PROBLEMSTILLING ..... 3
1.2	AURLANDSVASSDRAGET OG REGULERINGEN ..... 3
2	DATAGRUNNLAG OG METODE ..... 6
2.1	VANNTEMPERATURDATA ..... 6
2.2	VANNFØRINGSDATA ..... 8
2.3	ANDRE RELEVANTE DATA ..... 8
2.4	METODE FOR VURDERING AV DATAENE ..... 9
3	DATAANALYSE OG VURDERINGER ..... 10
3.1	VIDDALSVATN OG UTLØP AURLAND I ..... 10
3.2	VASSBYGDELVI ..... 15
3.3	VASSBYGDVATN ..... 17
3.3.1	Vurdering av sjiktmålinger i Vassbygdvatn ..... 17
3.3.2	Forholdet overflatetemperatur, lufttemperatur og produksjonsmønster ..... 21
3.4	AURLANDSELVA ..... 25
3.5	BETYDNINGEN AV VARMEENERGI FRA VASSBYGDELVI OG AURLAND I ..... 29
3.5.1	Betydningen av tilført varmeenergi fra Vassbygdelvi og Aurland I ..... 29
3.5.2	Betydningen av tilført vann versus klima og andre kilder ..... 31
3.6	DANNELSE AV TEMPERATURSJIKTNING ..... 34
3.7	OPPSUMMERENDE VURDERINGER ..... 35
4	ØKT EFFEKTKAPASITET I AURLAND I – FORSLAG TIL NYE ANALYSER ..... 37
5	REFERANSER ..... 39

## **1 INNLEDNING**

### **1.1 PROBLEMSTILLING**

Vanntemperatur er en viktig faktor som styrer mange sentrale biologiske prosesser, som for eksempel vekst hos laksefisk (Jensen, 1990). Vassdragsreguleringer endrer vassdragets naturlige hydrologiske regime og med det også dets naturlige variasjon i vanntemperatur (Morse, 1972; Caissie, 2006) med mulige endringer i biologien som konsekvens.

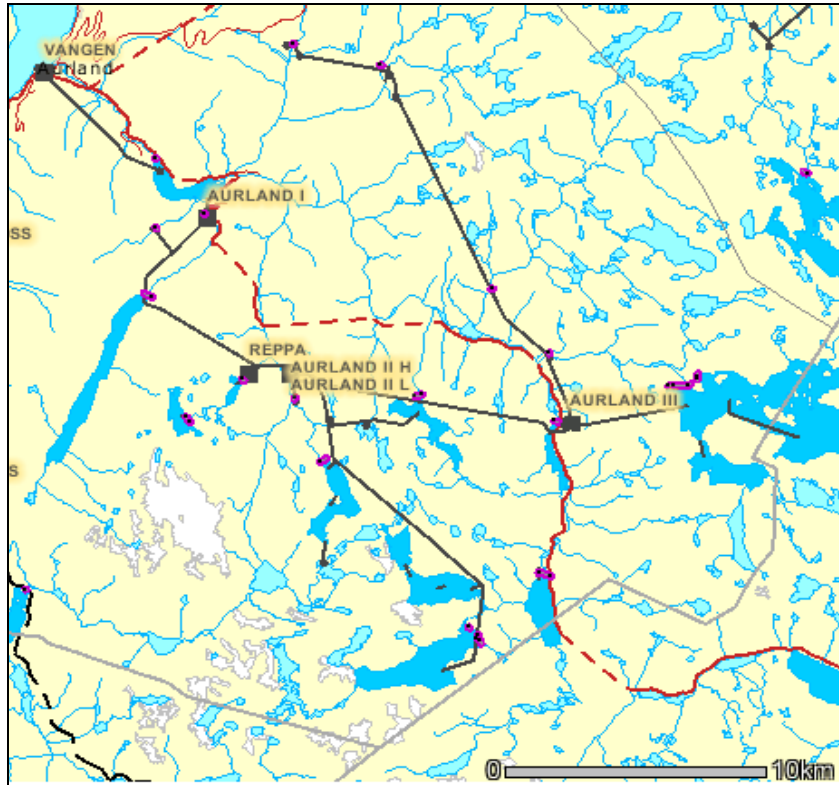
Bakgrunnen for dette studiet er å analysere og bedre forstå vanntemperaturmønsteret i Vassbygdivatn og Aurlandselva gjennom analyse av tilgjengelige vanntemperaturdata og data om forhold som påvirker vanntemperaturen i Vassbygdivatn og Aurlandselva, slik som vanntemperaturen i oppstrøms vannforekomster, produksjonen i Aurland I og variasjoner i klima (lufttemperatur). Videre har E-CO vannkraft planer om å utvide kapasiteten i Aurland I og tilsvarende i Vangen kraftverk som tar vann ut av Vassbygdivatn. Det er ikke ønskelig at etter endret produksjonsmønster eller utvidet kapasitet i Aurland I skal forverre vanntemperaturforholdene i Vassbygdivatn og Aurlandselva. Dette studiet vil kunne brukes til å designe et studieopplegg for å analysere mulige konsekvenser av en tillegginstallasjon i Aurland og identifisere tiltak som kan fremme et optimalt vanntemperaturregime i Vassbygdivatn og Aurlandselva.

En foreløpig rapport om vanntemperaturforholdene ble sendt E-CO i august 2010. Denne rapporten er siden blitt oppdatert med tilleggsmålinger utført i 2010 og foreliggende rapport inkluderer derfor én ekstra sesong med vanntemperaturdata.

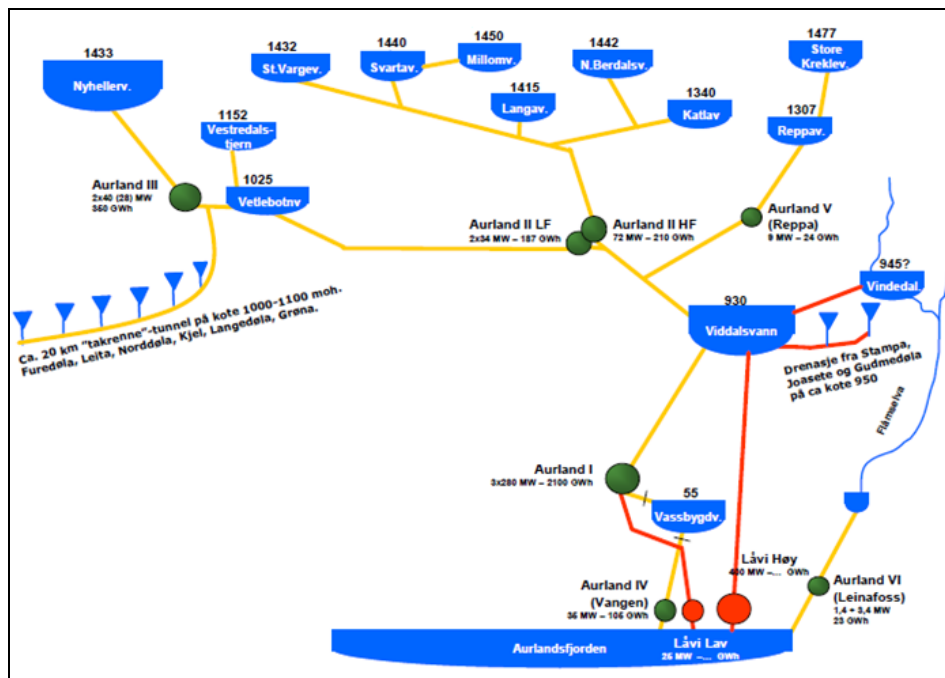
Studiet gjennomføres som en del av EnviDORR-prosjektet gjennom forskningssenteret CEDREN ([www.cedren.no](http://www.cedren.no)).

### **1.2 AURLANDSVASSDRAGET OG REGULERINGEN**

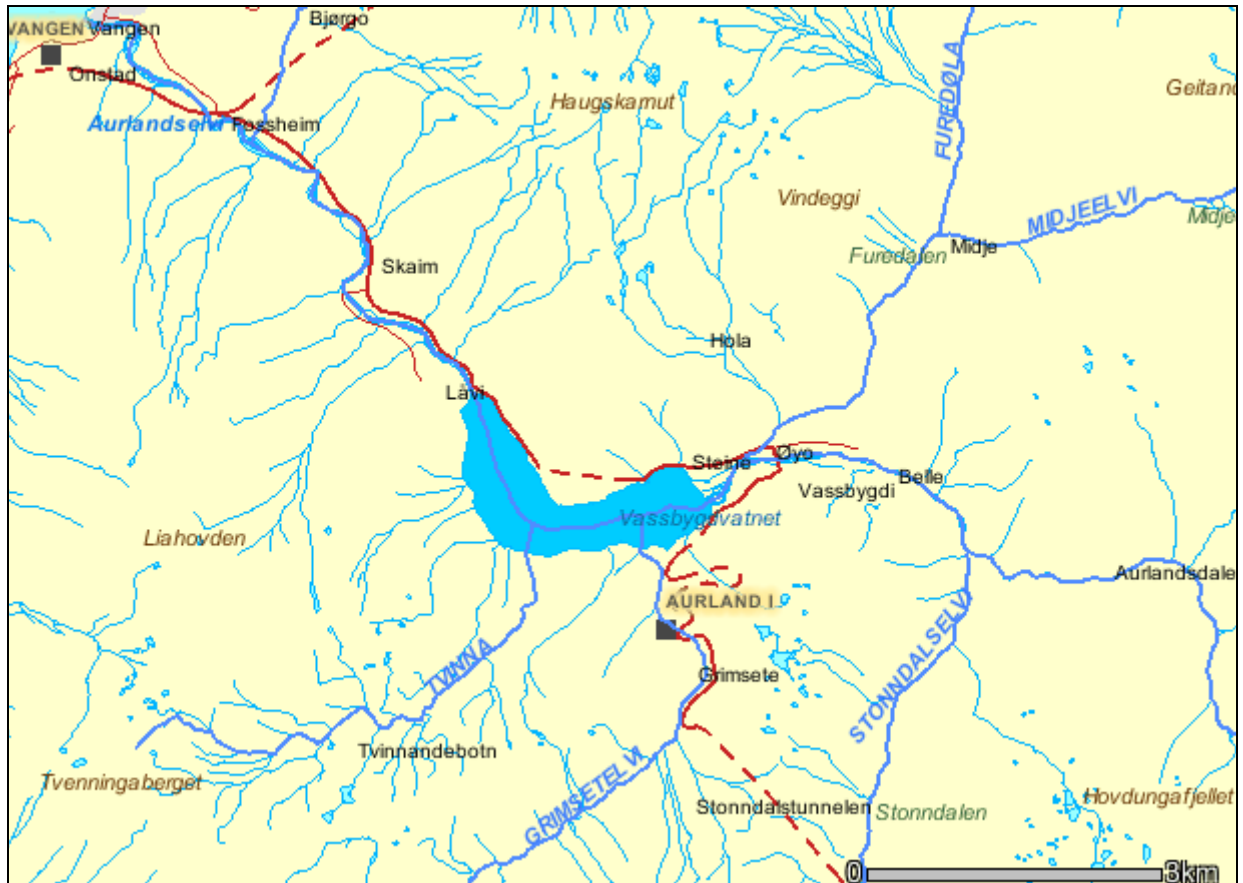
Utbyggingen av Aurlandsvassdraget startet i 1969 og er nå et svært komplekst system av magasiner, inntak og overføringer (se figur 1.1 og 1.2) Det største kraftverket er Aurland I som ble satt i drift i 1973 som pr idag har en installert effekt på 840 MW, produserer i snitt 2015 GWh med en fallhøyde på 870 meter og er Norges 3. største kraftverk (kilde: [www.e-co.no](http://www.e-co.no)). Det er store fiskeinteresser i vassdraget med en god bestand av ørret, men en kraftig desimert laksebestand.



Figur 1.1. Oversikt over de viktigste elementene i den aktuelle reguleringen i Aurlandsvassdraget (kilde: NVE Atlas - <http://arcus.nve.no/website/nve/viewer.htm>).



Figur 1.2. Systemskisse over hele Aurlandsreguleringen. De røde elementene viser foreslåtte tilleggsutvidelser av eksisterende regulering (Låvi Høy og Låvi Lav og overføringer). Disse er imidlertid ikke gjenstand for diskusjon i denne studien (kilde: Notat sendt fra E-CO til SINTEF ved Vassdragslaboratoriet 12.12.2008).



Figur 1.3. Oversikt over de viktigste tilførslene til Vassbygdevatn (kilde: NVE Atlas - <http://arcus.nve.no/website/nve/viewer.htm>).

Som det framgår av figur 1.3 er de viktigste tilførslene til Vassbygdevatn:

- Tvinna fra sør
- Grimsetelvi fra sør
- Vassbygdelvi fra øst (kalt Stonndalselvi på kartet). Denne er den dominerende av disse tilførslene.
- Furedøla/Midjeelvi fra nord-øst

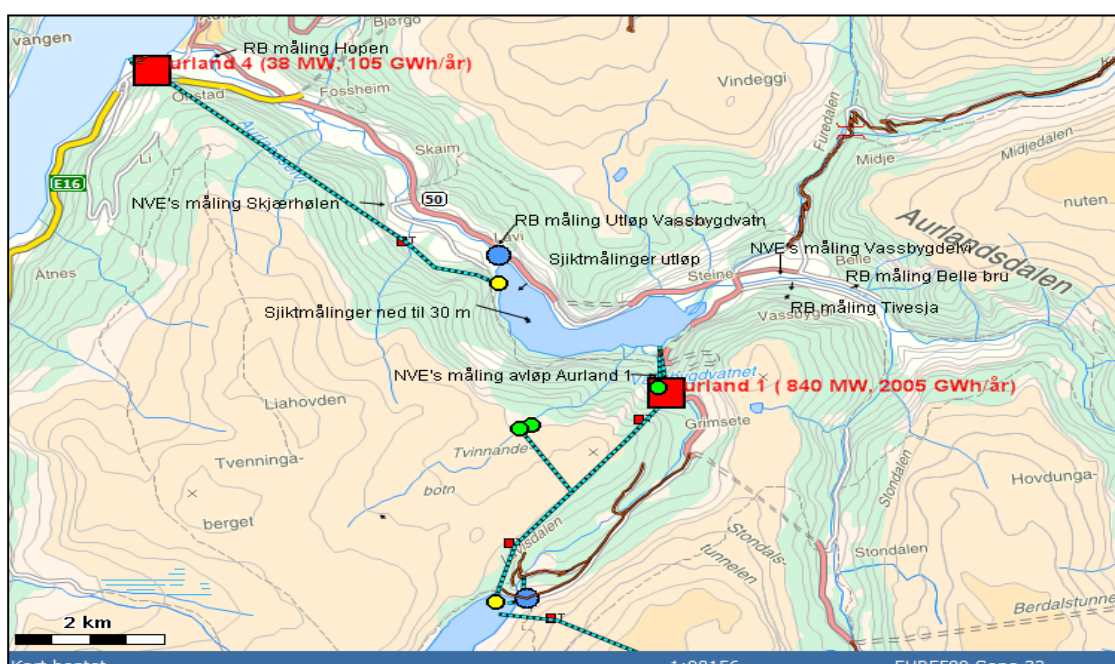
I tillegg er det en del småelver/bekker som renner inn i Vassbygdevatn og Aurlandselva. Det er imidlertid viktig å understreke at det største enkeltbidraget det meste av året er produksjonsvannet fra Aurland I gjennom Vassbygdevatn.

## 2 DATAGRUNNLAG OG METODE

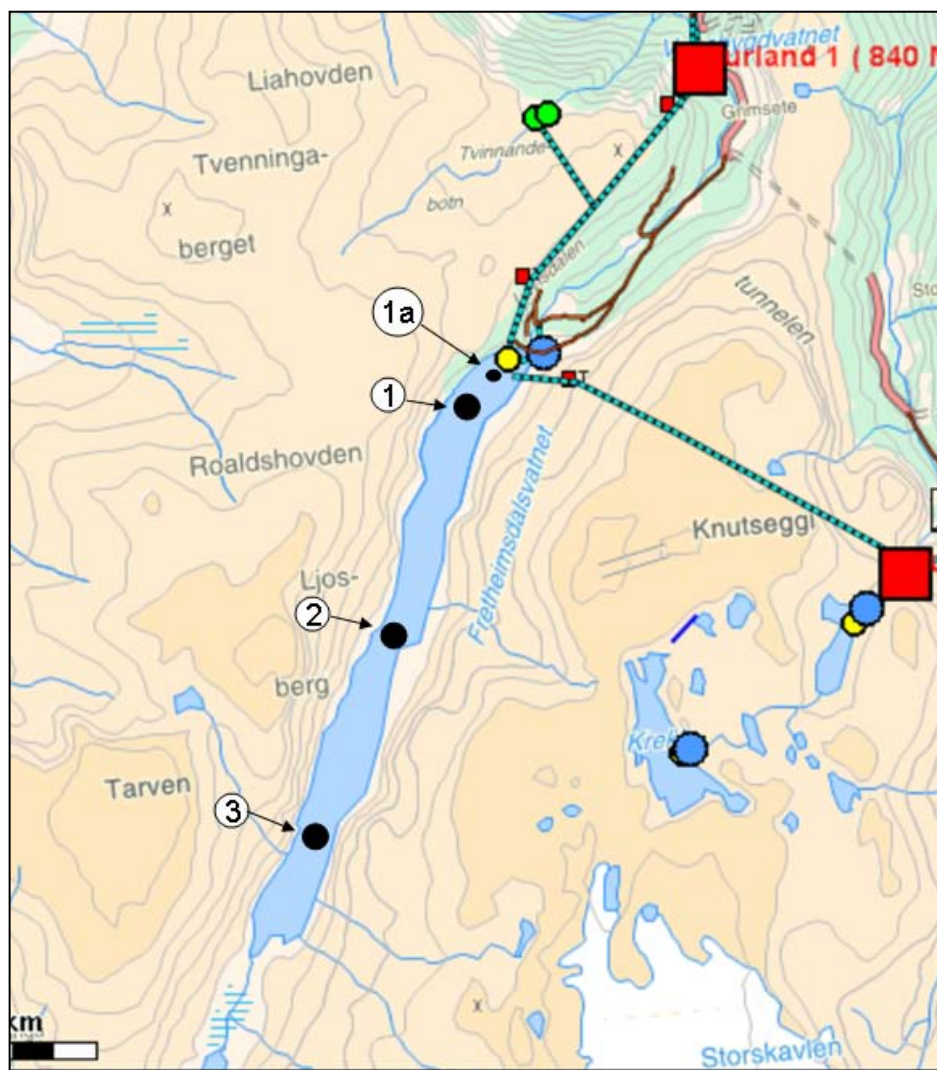
### 2.1 VANNTEMPERATURDATA

Tabell 2.1. Vanntemperaturdata for gitte lokaliteter, tidsperioder og frekvens. Målelokaliteter er nærmere angitt i figur 2.1 og 2.2.

Lokalitet	Periode/frekvens	Kilde
Hopen (nederst i Aurlandselva)	28/06/2001-09/01/2009 døgnerverdier	Rådgivende Biologer
Utløp Vassbygdevatn	28/06/2001-09/01/2009 døgnerverdier	Rådgivende Biologer
Tivesja v/Vassbygdelvi	28/06/2001-09/01/2009 døgnerverdier	Rådgivende Biologer
Belle Bru, Vassbygdelvi	28/06/2001-09/01/2009 døgnerverdier (noen avbrudd mot slutten av 2002)	Rådgivende Biologer
Vassbygdevatn senter – målt på 1m, 5m, 10m, 15m, 20m og 30m dyp (+ 25m, 35m, 4 m og 50m i 2010)	2003-2006 (kun vår-sommer-høst) – døgnerverdier + 2010 (6-timers verdier)	Rådgivende Biologer (gitt som “Sjiktmålinger ned til 30 m dyp” i figur 2.1) + E-CO vannkraft (2010)
Vassbygdevatn utløp – målt på 1m, 5m og 15m dyp	Mai 2004 - november 2006 – døgnerverdier, noen avbrudd	Rådgivende Biologer (gitt som “Sjiktmålinger utløp” i figur 2.1)
Vassbygdelvi (NVEs måling)	24/04/1991-21/11/2008, 6-timers-verdier med noen avbrudd + 20/05-05/11/2010 (døgnerverdier)	NVE / E-CO vannkraft
Aurlandselva, Skjærshølen	24/08/1990-21/11/2008, 6-timers-verdier med noen avbrudd + 20/05-05/11/2010 (døgnerverdier)	NVE / E-CO vannkraft
Utløp Aurland I	25/01/2001-21/11/2008, 3-timers-verdier	E-CO vannkraft
Viddalsmagasinet (4 målepunkt, se figur 2.2)	4 manuelle momentmålinger (vertikalprofil) i perioden 09/06/2009 – 02/10/2009	E-CO vannkraft



Figur 2.1. Oversikt over målepunkt for vanntemperatur i nedre deler av Aurlandsvassdraget (kilde: E-CO).



Figur 2.2. Oversikt over målepunkt for vanntemperatur i Viddalsvatn, kalt Fretheimsdalsvatnet på kartet (kilde: E-CO) benyttet under målekampanje i 2009. Merk at avløpet fra Aurland II (rød firkant til høyre i kart) er i nordenden av Viddalsvatn og nær inntaket til Aurland I.

E-CO har dessuten etablert en ny målestasjon øverst i Aurlandsdalen (Osabrekka på 870 moh., timesverdier) som kan bli interessant på sikt for å vurdere betydningen av temperaturen i resttilsaget. Sammenholdt med målestasjonen i Vassbygdelvi (omlag 70 moh.) viser den utvikling av vannføring og vanntemperatur i den uregulerte delen av feltet i Aurlandsdalen. E-CO vil også legge ut temperaturloggere i et par elver i Flåm i forbindelse med rassikringsprosjektet og mulig overføring til Viddalen. Ingen av disse målingene er imidlertid benyttet som underlag for utarbeidelse av denne rapporten. Tvede (2001) viser dessuten data fra målinger i perioden 1993-2000.



## 2.2 VANNFØRINGSDATA

Tabell 2.2. Vannføringsdata tilgjengelig fra gitte lokaliteter med tilhørende måleperiode/frekvens.

Lokalitet	Periode/frekvens	Kilde
Vassbygdelvi	13/06/2003-03/06/2009 – timesverdier + 20/05-05/11/2010 (døgnverdier)	NVE / E-CO vannkraft
Aurlandselva (Skjærhølen)	1/1/1993 – 15/3/2010 – timesverdier + 20/05-05/11/2010 (døgnverdier)	E-CO vannkraft

Den nylig etablerte målestasjon øverst i Aurlandsdalen (Osabrekka på 870 moh., timesverdier) måler også vannføring sammen med vanntemperatur, men er ikke benyttet i denne studien til vurdering av faktorer som påvirker vanntemperaturen i Vassbygdvatn.

## 2.3 ANDRE RELEVANTE DATA

Tabell 2.3. Produksjonsdata i m<sup>3</sup>/s for gitte kraftverk, tidsperioder og frekvens.

Lokalitet	Periode/frekvens	Kilde
Aurland I	01/01/1994 – 28/05/2009 – timesoppløsning + 20/05-05/11/2010 (døgnverdier)	E-CO vannkraft
Vangen (Aurland IV)	01/01/1994 – 28/05/2009 – timesoppløsning + 20/05-05/11/2010 (døgnverdier)	E-CO vannkraft

Laveste og høyeste regulerte vannstand i Viddalsvatn er henholdsvis 868 moh. og 932 moh. Inntaket til Aurland I er på 859 moh. Magasinet besto opprinnelig av tre vann. Det innerste vannet (i sør) har største dybde på kote 820,3, det midterste på kote 845 og det nærmest dammen på kote 848,6.

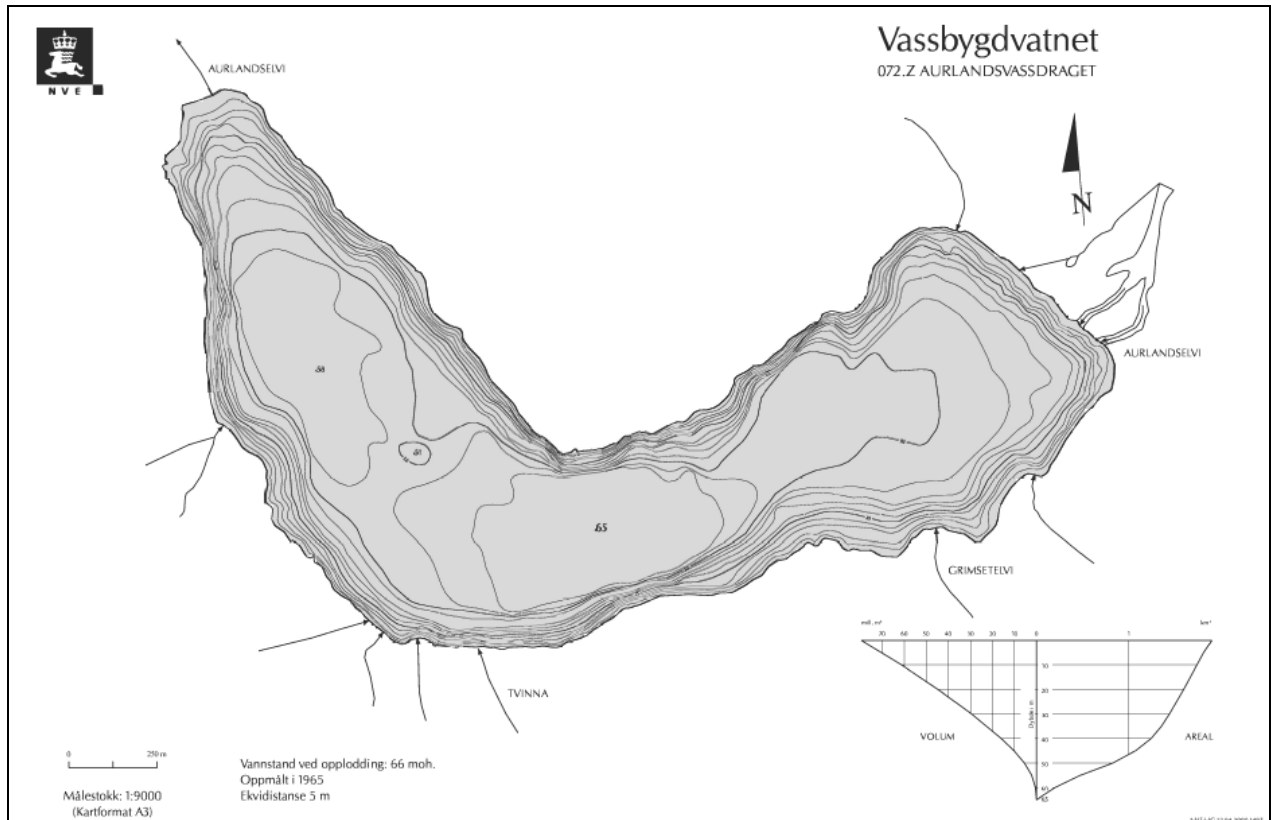
I Vassbygdvatn er bunnen på avløpet fra Aurland I på kote 48, mens laveste regulerte vannstand er 54,0 moh. og høyeste regulerte vannstand er 55,4 moh.

Vassbygdvatn har følgende data (fra NVE Atlas):

- Areal: 1,9 km<sup>2</sup>
- Omkrets: 7,98 km
- Middeldyp: 42 meter
- Maks. dyp: 65 meter
- Volum: 79,5 km<sup>3</sup>
- Teoretisk oppholdstid: 0,07 år, dvs. ca 25 døgn

E-CO har selv målt lufttemperatur i nærheten av Vassbygdvatn, men serien har noen mangler og vi har ikke hatt anledning til å foreta en kvalitetskontroll. Vi har derfor brukt lufttemperaturen fra

klimatestasjon 54120 Lærdal-Moldo med døgndata fra perioden 01/01/1999 – 30/09/2008. Det observeres følgende variable på denne stasjonen: Nedbør, snødybde, snødekke, nedbørslag, middeltemperatur, minimumstemperatur, maksimumstemperatur, vindstyrke, vindretning og skydekke. Da ytterligere klimadata senere ble gjort tilgjengelig ble lufttemperaturdataene fra Skjærshølen nær Vassbygdatn benyttet fra og med 7/10/2004.



Figur 2.3. Figuren viser dybdekart over Vassbygdatn (Kilde: NVE Atlas).

De ordinære minstevannføringskravene i Aurlandselva er som følger:

25 m<sup>3</sup>/s fra 15. juni – 16. juli

30 m<sup>3</sup>/s fra 16. juli – 15. august

Deretter er det gradvis avtrappende minstevannføring fram til midten av september. Fra 14. september til 15. juni er minstevannføringskravet 3 m<sup>3</sup>/s.

## 2.4 METODE FOR VURDERING AV DATAENE

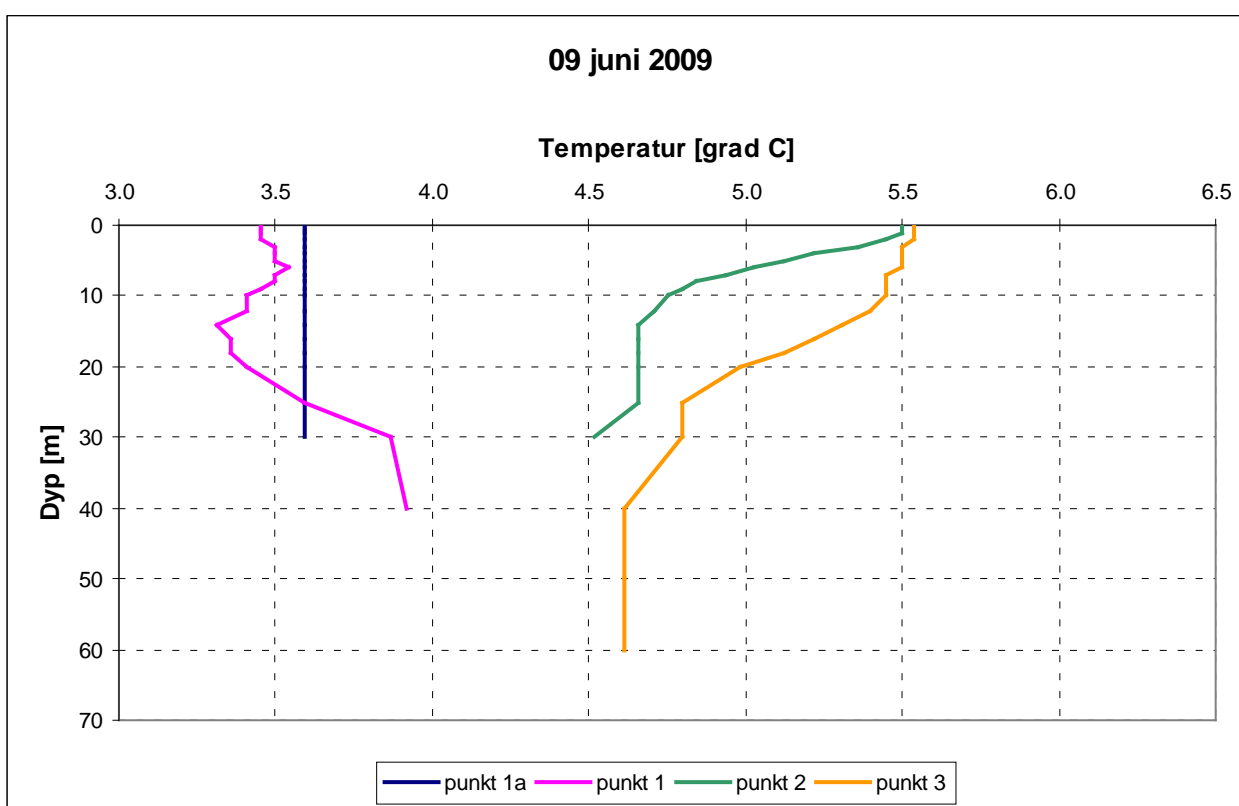
Dataanalysen er primært gjennomført ved å sammenstille, presentere og tolke data grafisk. Valg av data for sammenstilling og tidsperioder er gjort basert på kunnskap om reguleringen og de aktuelle prosessene som forventes å styre resulterende vanntemperatur i Vassbygdatn og Aurlandselva. Ettersom sjiktmålingene i Vassbygdatn er primært utført i perioden 2004-2006 og 2010 (se detaljer i tabell 2.1) er enkeltepisodene som er studert innenfor disse 3 årene. I tillegg er

det utført statistiske beregninger og andre analyser som bruker komponerte parametere for å forstå og forklare påvirkningsfaktorene bedre.

### 3 DATAANALYSE OG VURDERINGER

#### 3.1 VIDDALSVATN OG UTLØP AURLAND I

Viddalsvatn er inntaksmagasin til Aurland I og målingene i Viddalsvatn er basert på en kampanje gjennomført sommeren/høsten 2009. Ved 4 forskjellige tidspunkt ble det målt temperaturprofiler ved 4 forskjellige lokaliteter i Viddalsvatn (se figur 2.2). Lokalitet 1a<sup>1</sup> ligger mellom avløpet fra Aurland II og inntaket til Aurland I.

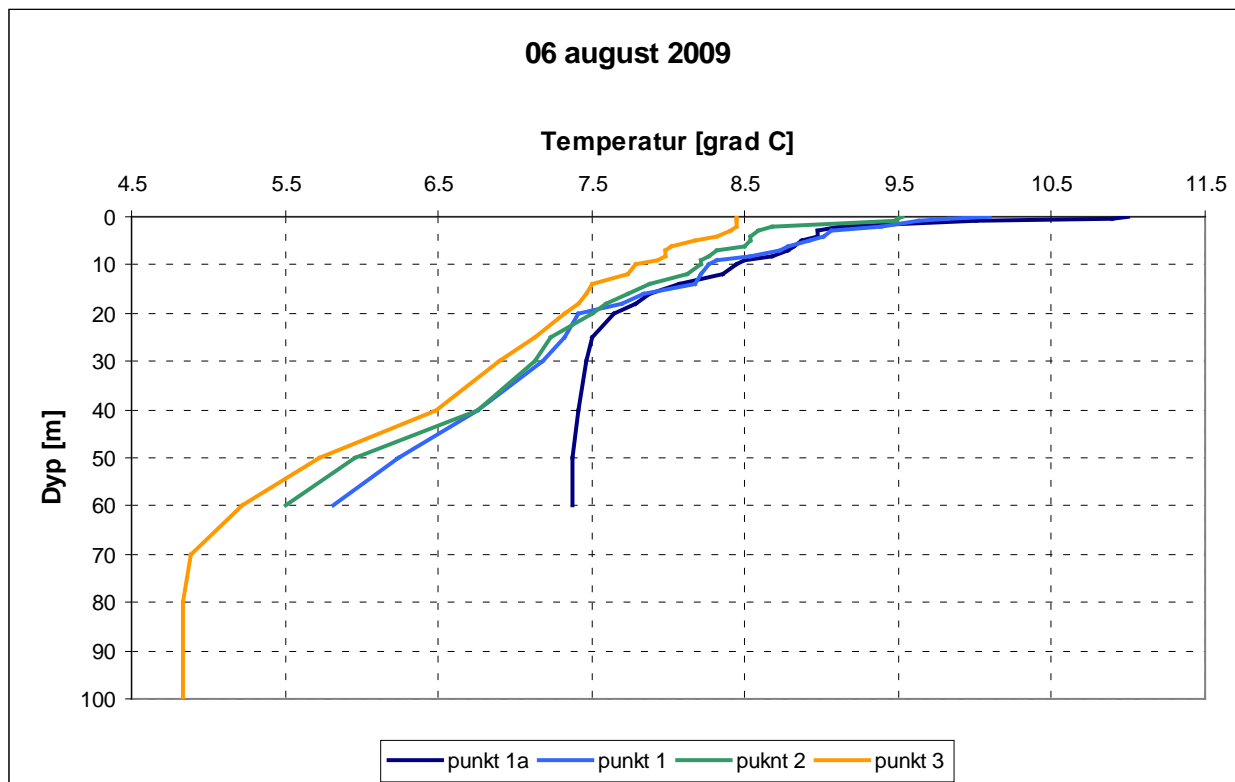


Figur 3.1. Disse temperatur-/dybdeprofilene viser målinger utført 09/06/2009. Temperaturen vises langs horisontal akse og dybde langs vertikal akse. Tallene 1a, 1, 2 og 3 viser til målelokaliteter gitt i figur 2.2. Vannstand ved måling var 892,76 moh, produksjon i Aurland I: 30 m<sup>3</sup>/s, produksjon Aurland II: 30 m<sup>3</sup>/s og antatt lokaltilsig 8 m<sup>3</sup>/s.

Vannstanden i Viddalsvatn er ved målingen 9. juni ganske nær LRV (868 moh). Fra temperaturplottene i figur 3.1 er det verdt å merke seg at det er ingen temperaturgradient over dypet ved lokalitet 1a, noe som er mistenkelig (se fotnote 1). Lokalitet 1 har også liten temperaturvariasjon da differensen mellom høyeste og laveste verdi er kun omlag 0,5 °C. Ved lokalitetene 2 og 3, dvs. lengst unna inntaket til Aurland I, er det en antydning til en

<sup>1</sup> Dataene fra denne lokaliteten ved målingen 09/06/2010 er suspekter da det er påfallende at samtlige måleverdier har nøyaktig samme verdi (se figur 3.1).

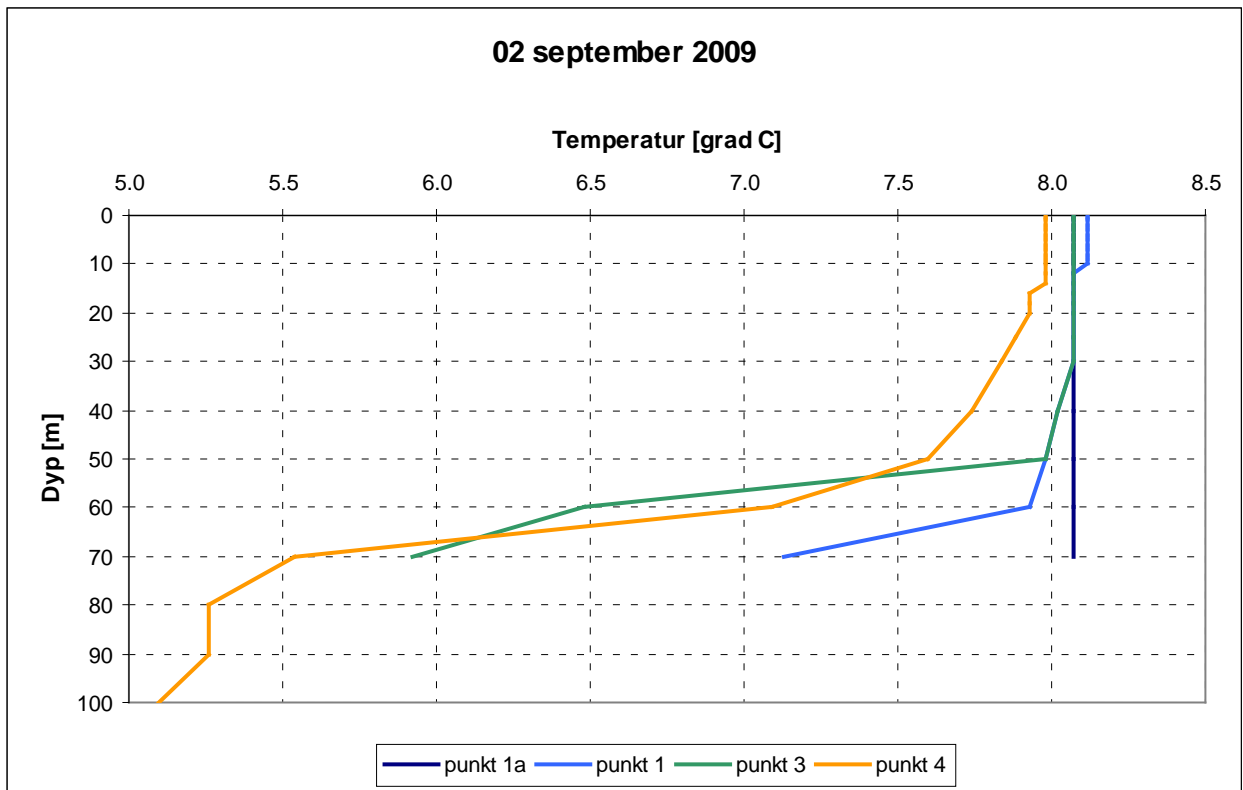
temperaturgradient, men denne er veldig svak og differensen er bare omlag 1 °C mellom høyeste og laveste verdi.



Figur 3.2. Disse temperatur-/dybdeprofilene viser målinger utført 06/08/2009. Temperaturen vises langs horisontal akse og dybde langs vertikal akse. Tallene 1a, 1, 2 og 3 viser til målelokaliteter gitt i figur 2.2. Vannstand ved måling var 922,35 moh, produksjon i Aurland I: 25 m<sup>3</sup>/s, produksjon Aurland II: 25-50 m<sup>3</sup>/s og antatt lokaltilsig 5 m<sup>3</sup>/s.

Det er verdt å merke seg at vannstanden ved dette tidspunktet (06/08/2009) står omlag 30 meter høyere enn ved forrige måling (9. juni), men fortsatt noe under HRV på 932 moh. Det kan observeres en jevn temperaturgradient fra overflaten ned til bunnen ved lokalitetene 1, 2 og 1a, dog med en avtagende gradient mot dypet ved 1a. Ved lokalitet 3 har dypvannet en ganske ensartet temperatur, dvs. på omlag 4,8 °C. Det er imidlertid ingen termoklin, i henhold til termoklin definert som minimum 1 °C temperaturdifferanse pr 1 meter dyp (Høyland og Høyland, 1997), ved noen av målepunktene.

Ettersom magasinet fylles omlag 30 meter i løpet av snaue to måneder vil store deler av vannvolumet i magasinet bestå av vann som har tilkommet de siste to månedene. Dette vannet antas i hovedsak å være smeltevann.

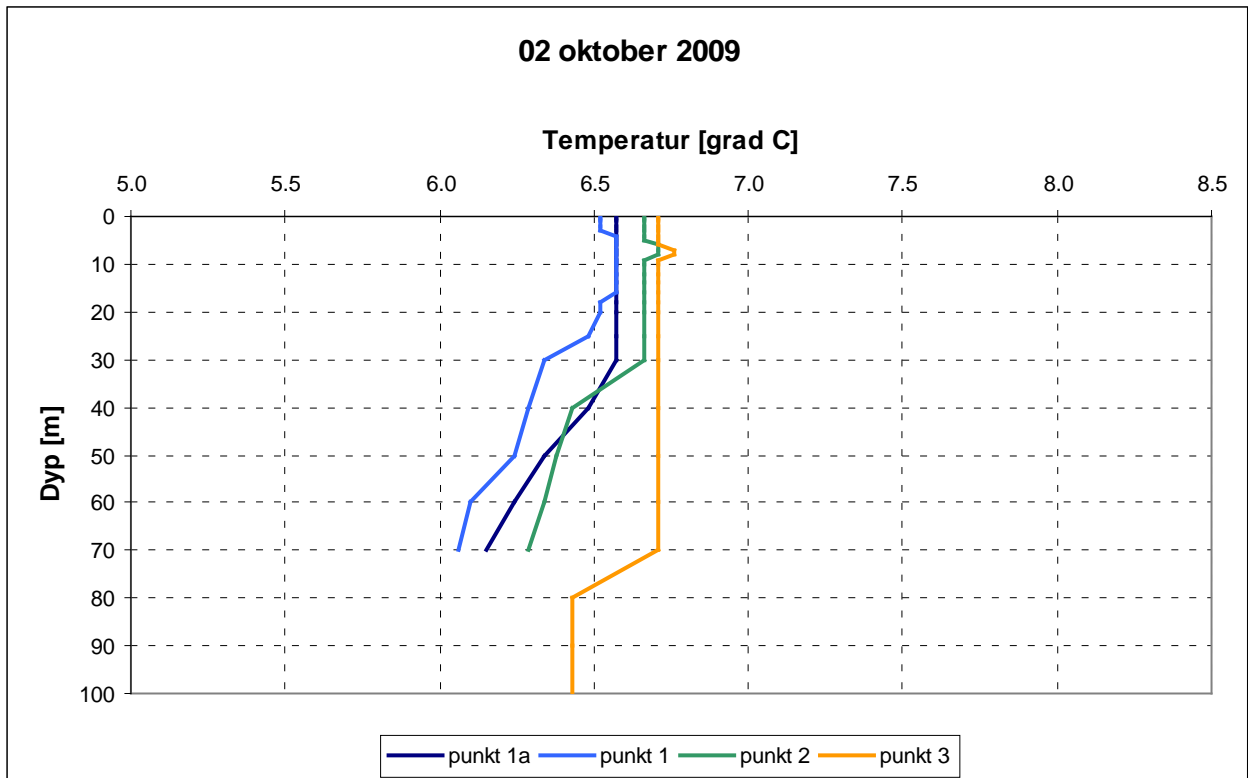


Figur 3.3. Disse temperatur-/dybdeprofilene viser målinger utført 02/09/2009. Temperaturen vises langs horisontal akse og dybde langs vertikal akse. Tallene 1a, 1, 2 og 3 viser til målelokaliteter gitt i figur 2.2. Vannstand ved måling var 927,80 moh, produksjon i Aurland I: 20 m<sup>3</sup>/s, produksjon Aurland II: 65 m<sup>3</sup>/s og antatt lokaltilsig 20 m<sup>3</sup>/s.

Vannstanden i Viddalsvatn er ved målingen 2. september nær HRV (932 moh) og omlag 5 meter høyere enn ved forrige måling (6. august). Fra temperaturplottene i figur 3.3 er det verdt å merke seg at det er ingen temperaturgradient over dypet ved lokalitet 1a<sup>2</sup>. Ved lokalitet 2 er temperaturen i de øvre deler av vannmassene identisk med temperaturen ved lokalitet 1a<sup>3</sup>. Ved lokalitet 1 er det tilsynelatende en ganske skarp gradient, men det er verdt å merke seg at temperaturforskjellen over dypet ikke er mer enn omlag 1 °C. Ved lokalitet 3, dvs lengst unna inntaket til Aurland I, er temperaturforskjellen noe mindre enn 3 °C.

<sup>2</sup> Dataene fra denne lokaliteten er suspekter da det er påfallende at samtlige måleverdier har nøyaktig samme verdi (se figur 3.3).

<sup>3</sup> Det er suspekt at det er nøyaktig samme temperatur ved 1a og 3 (figur 3.3).

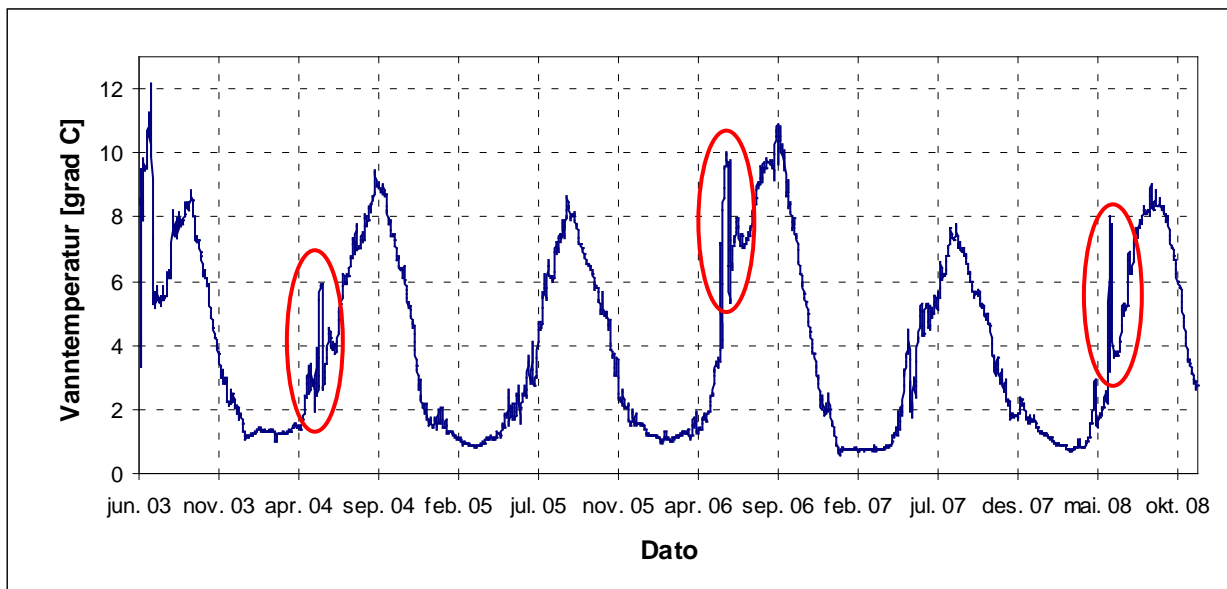


Figur 3.4. Disse temperatur-/dybdeprofilene viser målinger utført 02/10/2009. Temperaturen vises langs horisontal akse og dybde langs vertikal akse. Tallene 1a, 1, 2 og 3 viser til målelokaliteter gitt i figur 2.2. Vannstand ved måling var 927,90 moh, produksjon i Aurland I: 80 m<sup>3</sup>/s, produksjon Aurland II: 40,5 m<sup>3</sup>/s og antatt lokaltilsig 6,5 m<sup>3</sup>/s.

Ved temperaturmålingen 2. oktober (figur 3.4) er det svært beskjedne temperaturvariasjoner og alle målingene ligger mellom 6,1 °C og 6,7-6,8 °C. Det er generelt litt kaldere i dypvannet enn i overflaten, men altså veldig små forskjeller. Det antas derfor at målingene er utført nær tidspunktet for full sirkulasjon av vannmassene selv om temperaturen er noe over 4 °C.

#### Oppsummerende vurdering av dataene fra Viddalsvatn:

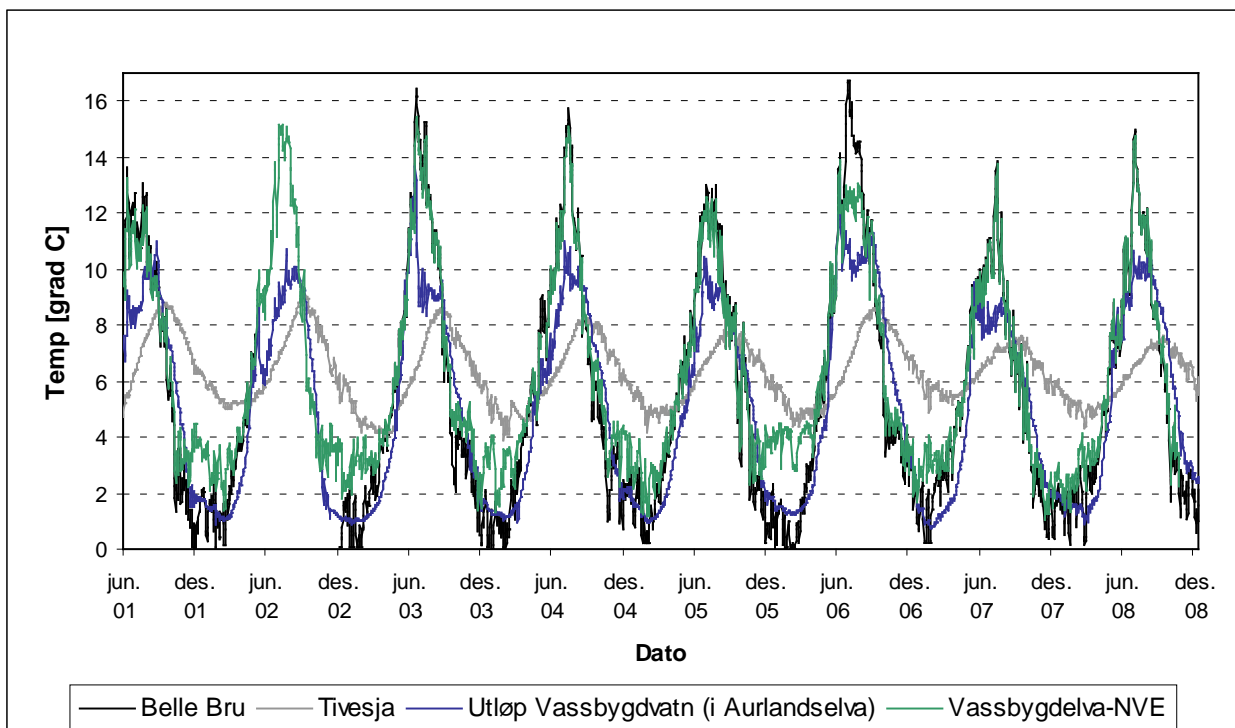
Det er i store trekk små temperaturvariasjoner over dypet i Viddalsvatn bortsett fra målingene utført 6. august, men temperaturforskjellene mellom overflate og dyp kan heller sies å være veldig store ved dette tidspunkt da de er på det meste omlag 5 °C. Ved å se på forskjellene i gradient (over dypet) mellom de ulike målelokalitetene så later det til at det er en svakere gradient over dypet ved lokalitetene i nordenden av magasinet, det vil si nærmest utløpet fra Aurland II og inntaket til Aurland I. Årsaken til at sjiktning ikke oppstår er antagelig forårsaket av turbulens i utløpsvannet fra Aurland II og evt. omrøring forårsaket av inntaket til Aurland I. Dette betyr at det vil være lite å hente på en endring av inntaksdypet til Aurland I, da vannet enten er helt blandet eller har en veldig liten temperaturgradient over dypet.



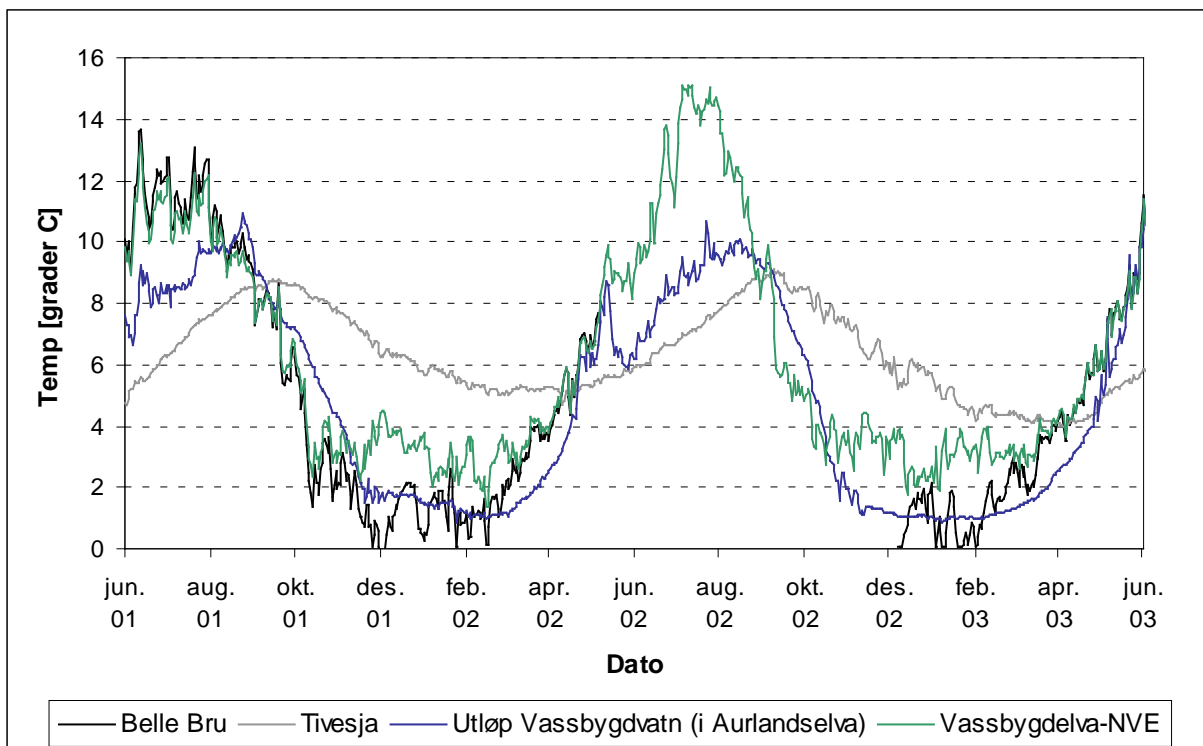
Figur 3.5. Figuren viser målt vanntemperatur gjennom Aurland I for perioden juni 2003 – oktober 2008.

Figur 3.5 viser at temperaturen målt i utløpet (utløpskanalen) fra Aurland I varierer en god del gjennom året. Målt vanntemperatur antas å være tilnærmet identisk med vanntemperaturen ved inntaket i Viddalsvatn. Vanntemperaturen går i enkelte perioder ned til 1 °C og bekrefter dermed bildet fra målingene vist i figurene 3.1-3.4 om at vannmassene lett omrøres med det resultat at sjiktdannelsen er begrenset. Det er verdt å merke seg at det er enkelte kortvarige episoder med plutselig høyere temperaturer (røde ringer i figur 3.5) i dataene. Temperaturmålingene utføres i utløpskanalen fra Aurland I og årsaken til temperaturøkningene er antageligvis at vann blir stående igjen i utløpskanalen når kraftverket står (noe som er tilfellet ved disse episodene, men ikke vist i figur) med påfølgende oppvarming av dette stillestående vannet, evt. kombinert effekten av at varmere vann fra Vassbygdivatn kan slå tilbake i utløpskanalen til Aurland I.

### 3.2 VASSBYGDDELVI



Figur 3.6. Figuren sammenstiller vanntemperaturmålinger i Vassbygdelvi (3 ulike lokaliteter) med vanntemperatur i oppstrøms ende av Aurlandselva ("Utløp Vassbygdvatn") for perioden juni 2001 – desember 2008 (se figur 2.2 for detaljering av målelokaliteter).

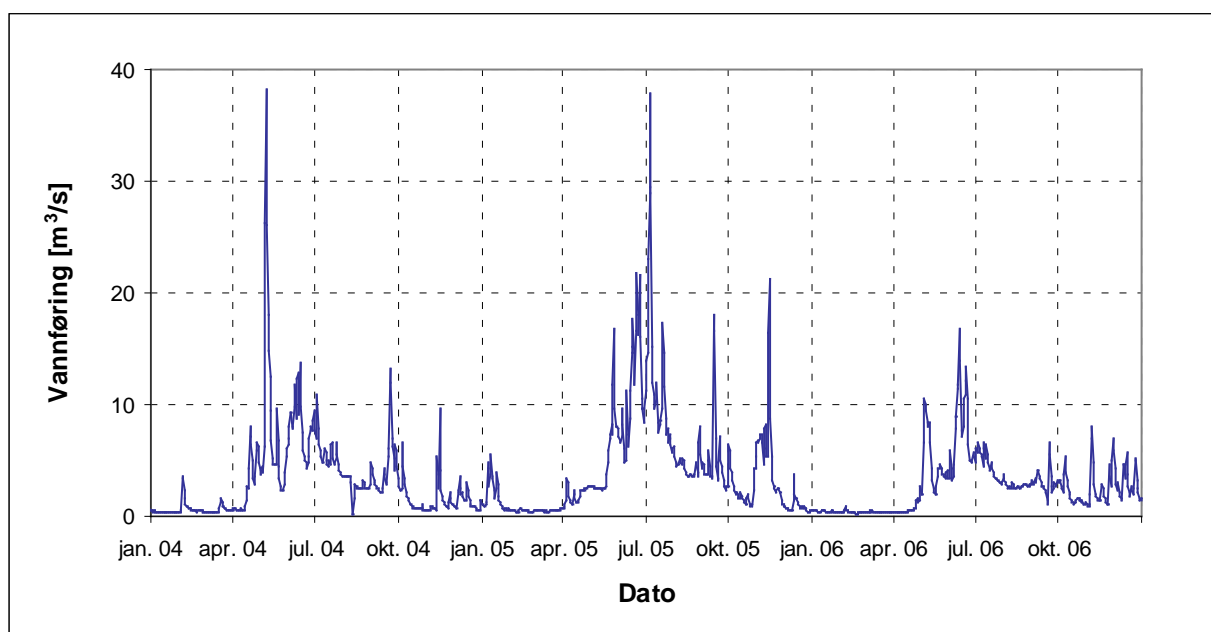


Figur 3.7. Figuren sammenstiller vanntemperaturmålinger i Vassbygdelvi (3 ulike lokaliteter) med vanntemperatur i oppstrøms ende av Aurlandselva ("Utløp Vassbygdvatn") for perioden juni 2001 – juni 2003 (se figur 2.2 for detaljering av målelokaliteter).



NVEs målestasjon i Vassbygdelvi og Belle Bru later til å være de mest representative for de største fluksene av vann inn i Vassbygdvatn, da Tivesja måler hovedsakelig grunnvannstrøm inn i Vassbygdelvi. Fra figurene 3.6 og 3.7 og ved sammenligning av kurvene Vassbygdelvi-NVE og Utløp Vassbygdvatn (i Aurlandselva) så ser vi at vannet i Vassbygdelvi i det alt vesentligste, og særlig perioden tidlig sommer – sen sommer, har en høyere temperatur enn overflatevannet i Vassbygdvatn. Vannet fra elva vil derfor i all hovedsak bidra positivt til heving av vanntemperaturen i Vassbygdvatn. Hvor stor denne netto varmetilførselen til innsjøen er vil avhenge av volumet (vannføringen) i Vassbygdelvi. Dette er ytterligere analysert senere i rapporten (særlig kap. 3.5)

Skulle man vurdere tiltaket å øke vannføringen i Vassbygdelvi for å øke total varmetilførsel til Vassbygdvatn er det imidlertid viktig å huske at netto varmetilførsel neppe vil øke lineært med økende vannføring, da det vanligvis vil ta lengre tid å varme opp et større vannvolum enn et mindre vannvolum, da overflateareal (som primært utveksler energi med omgivelsene) som regel ikke øker like raskt som vannvolumet.



Figur 3.8. Figuren viser vannføring i Vassbygdelvi for perioden 2004 – 2006. Perioden er valgt ut for å sammenfalle med perioden hvor sjiktmålinger er utført (og vist i figur 3.9 – 3.12).

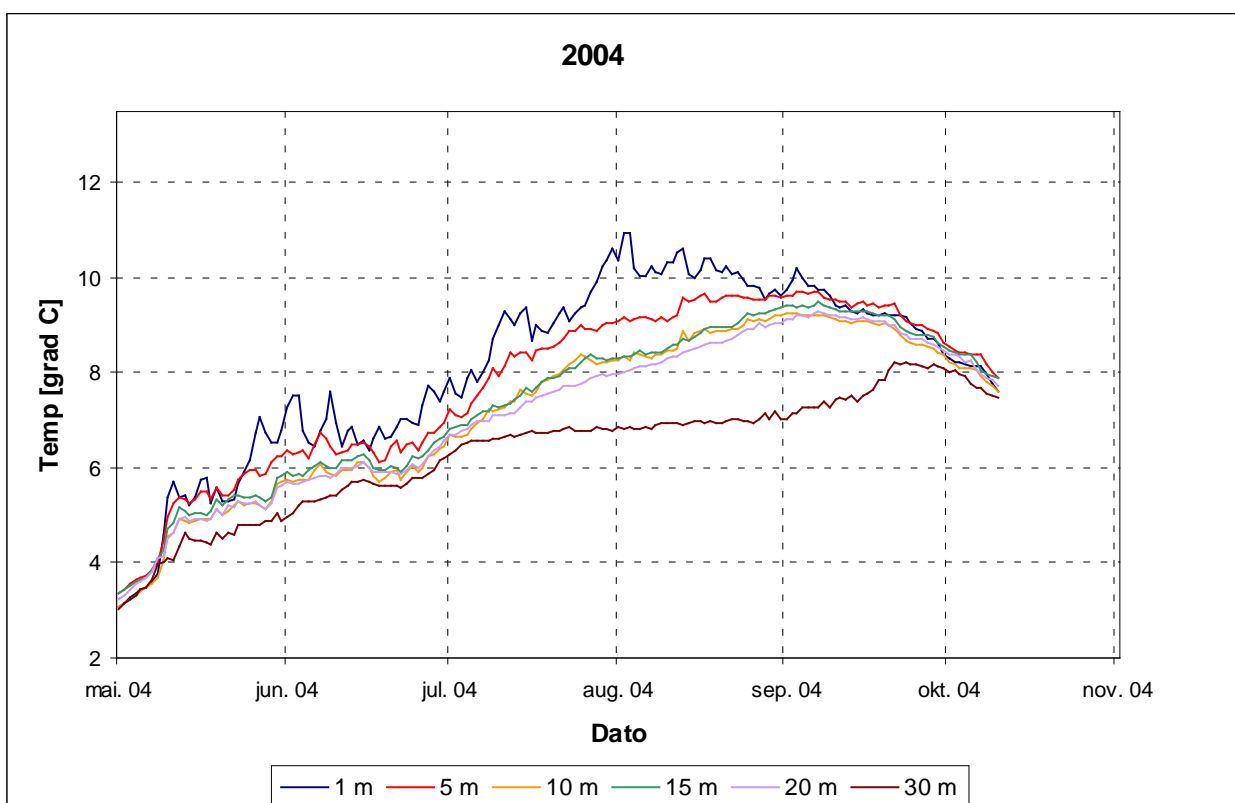
Figur 3.8 viser at vannføringen i den utvalgte perioden er størst i perioder med snøsmeltning (senvåren/sommeren) og lav på vinteren og fram til slutten av april/begynnelsen av mai. Størrelsen på de høyeste toppene i den utvalgte perioden er noe høyere enn gjennomsnittsproduksjonen i Aurland I for perioden januar 1994 – juli 2009, gitt av E-CO<sub>2</sub> produksjonsdata til å være omlag 32,6 m<sup>3</sup>/s. Dette betyr at bidraget fra Vassbygdelvi inn i Vassbygdvatn vil i enkelte perioder være betydelig, mens det i lange perioder av året vil være veldig lite sammenlignet med produksjonsvannet fra Aurland I.

### 3.3 VASSBYGDVATN

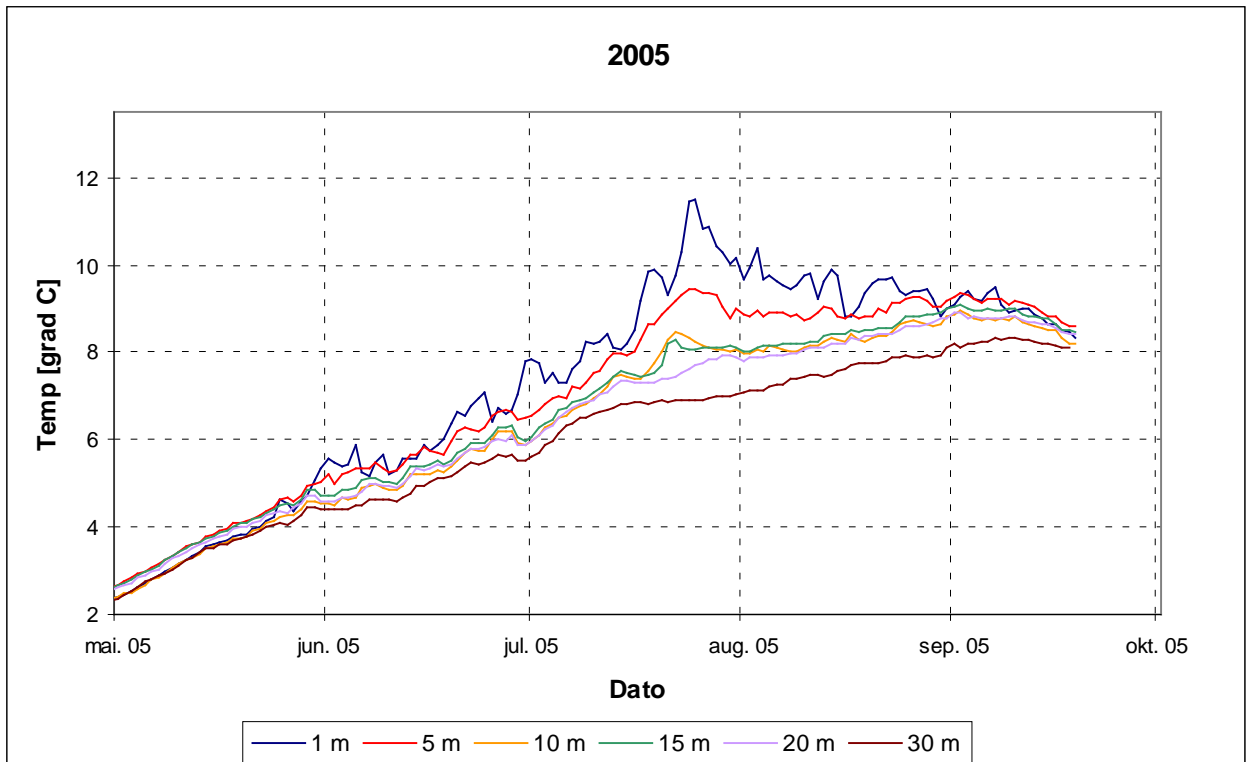
#### 3.3.1 Vurdering av sjiktmålinger i Vassbygdvatn

Det er foretatt sjiktmålinger ved to ulike lokaliteter i Vassbygdvatn (se tabell 2.1 og figur 2.1), begge lokalisert relativt nær utløpet mot Aurlandselva og et stykke unna utløpet fra Aurland I. Disse dataene er i det følgende vurdert og da særlig med hensyn på mulighetene for dannelse av stabil sjikning i sommerperioden for å sikre at Aurlandselva forsynes med varmt vann fra Vassbygdvatn.

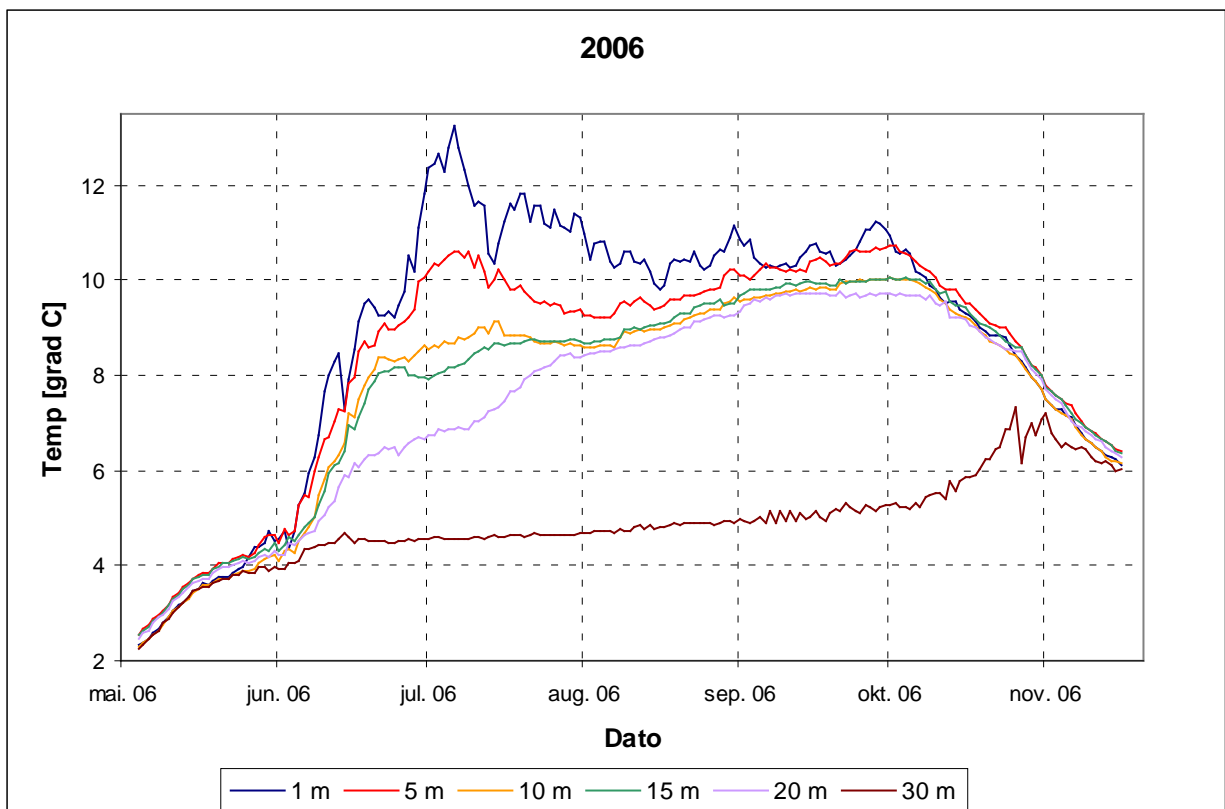
For å vurdere hvilke av dataene fra de 2 målelokalitetene med sjiktmålinger som bør benyttes i analysen er det sjekket hvor godt korrelerte de to målepunktene i Vassbygdvatn er. Det ble funnet en Nash Sutcliffe's  $R^2$  på henholdsvis 0,985, 0,985 og 0,997 (dvs. nær sammenfallende verdier) for årene 2004, 2005 og 2006. I det følgende er det derfor kun benyttet "Vassbygdvatn senter" som målestasjon for analysene.



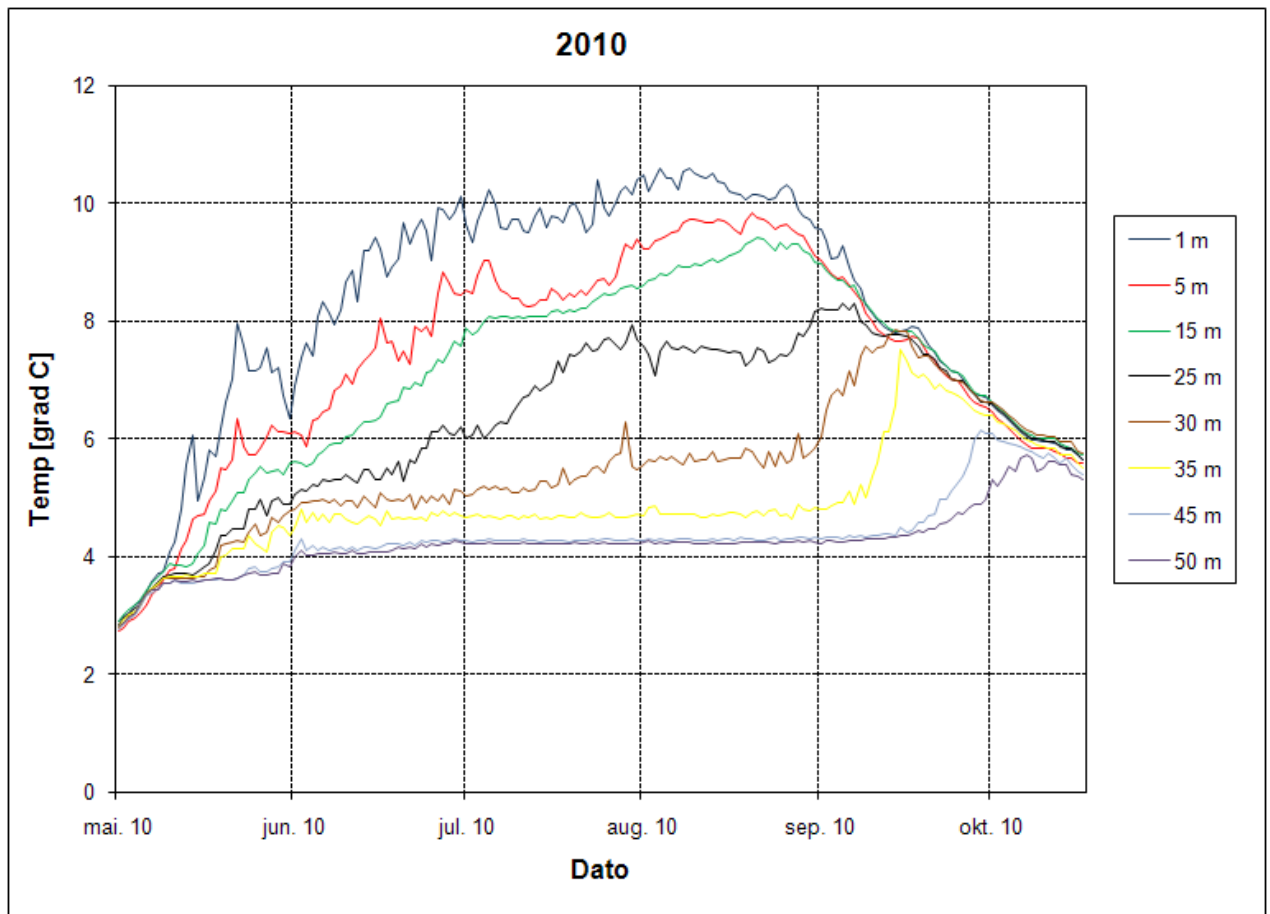
Figur 3.9. Vanntemperatur målt ved lokaliteten nærmest midten av Vassbygdvatn (gitt som "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 2.1) for perioden mai – november 2004.



Figur 3.10. Vanntemperatur målt ved lokaliteten nærmest midten av Vassbygdvatn (gitt som "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 2.1) for perioden mai – oktober 2005.



Figur 3.11. Vanntemperatur målt ved lokaliteten nærmest midten av Vassbygdvatn (gitt som "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 2.1) for perioden mai – desember 2006.



Figur 3.12. Vanntemperatur målt ved lokaliteten nærmest midten av Vassbygdvatn (gitt som "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 2.1) for perioden mai – november 2010.

Vurdering av data gjengitt i figurene 3.9 – 3.12:

Det er i perioden fra starten av målingene (april) fram til noe ut i mai, tilnærmet ingen temperaturforskjell fra overflaten til dypeste måling for alle årene. Fra midt i mai er temperaturen i overflaten preget av spredte episoder hvor temperaturen i overflaten er en god del høyere enn på 5 meters dyp (se spesielt 2004), men det er også perioder hvor temperaturen i overflaten og på 5 meter er sammenfallende. Årsaken til periodevis høyere temperatur synes å være oppvarming fra stråling og følbare varme kombinert med stopp i produksjonen i Aurland I (kun periodevis kjøring av Aurland I). Utvaskingen av temperaturforskjellene synes å skyldes omrøring forårsaket av innkommende vann fra Aurland I. Dette stemmer godt med tilgjengelige meteorologidata og produksjonsdata fra Aurland I (dataene ikke vist her, men vurdert senere i rapporten, se figur 3.14-3.16).

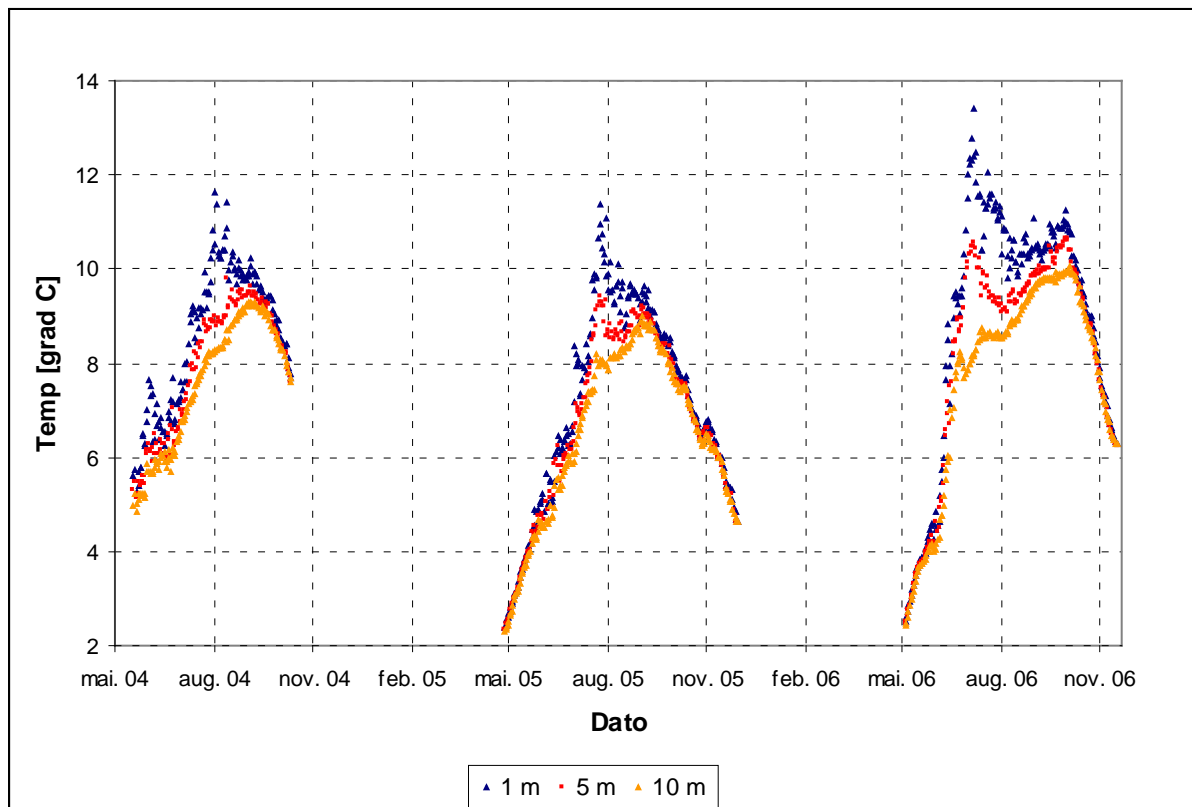
Sommeroppvarming merkes fra juli ved at overflatetemperaturen stiger en god del hvor temperaturen ned til 5 meter til en viss grad følger temperaturen i overflaten. Temperaturen i vannet fra 10-20 meter stiger ensartet (særlig i 2004 og 2005) i hele sommerperioden, men holder seg omlag drøyt én grad lavere enn på 5 meters dyp.

Fra omlag 1. september er temperaturen fra overflaten ned til 20 meter sammenfallende (2004 og 2006) og ganske nær sammenfallende helt ned til 30 meter 2005. Fra slutten av september er temperaturen sammenfallende i alle lag i 2004 og 2005, mens dette skjer senere i 2006 (det dypeste vannet følger etter mye senere enn de foregående år).

Det er også verdt å merke seg at målingene på dypene 10, 15 og 20 meter er tilnærmet like hele analyseperioden både i 2004 og 2005, og det samme mønsteret kan observeres for 2006 hvis vi ser bort fra målingene på forsommeren på 20 meters dyp.

Det generelle inntrykket er imidlertid at det er små temperaturforskjeller over dypet i 2004 og 2005 og i 2006 hvis vi ser bort fra det aller dypeste vannet, og at dypvannet har en høyere temperatur enn den forventede temperaturen på omlag 4 °C i innsjøer med stabil sjikning. Samtidig er overflatelaget kaldt/moderat varmt og dette innebærer at temperaturgradienten nedover i vannmassene er generelt svak og mindre enn man kan forvente i naturlige innsjøer med den konsekvens at sjikning i liten grad oppstår. Den totale varmeenergien later altså til å bli fordelt jevnere over vannmassene/dypet enn i naturlige innsjøer, antageligvis grunnet omrøring. Mønsteret i 2006 skiller seg litt fra de foregående år da dypvannet dette året har en mye tydeligere og lavere temperatur (drøyt 4 °C) enn vannet nærmere overflaten. Vannet i overflaten har dette året (2006) noe høyere maksimalverdier enn de foregående årene og er ved en anledning målt til over 13 °C. Med andre ord, Vassbygdevatn har dette året en bedre utviklet temperatursjikning, som er en ønsket situasjon.

I 2010 er det målt vanntemperatur helt ned til 50 meters dyp i motsetning til perioden 2004-2006 hvor det dypest nivået det ble målt på var 30 meter. Heller ikke i 2010 dannes det noe tydelig sprangsjikt og temperaturen i overflaten var kun en kort periode noe over 10 °C. Det er interessant å se hvordan stadig dypere lag blir fullblandet inn i de øvre lagene utover sensommeren og høsten. Omkring 10. september (den stiplede, vertikaleaksen markerer midt i måneden) øker vanntemperaturen på 25 meters dyp og dette vannet blandes i løpet av noen dager/uker inn i vannet over. Vanntemperaturen i det mer eller mindre homogene (temperatur) vannet fra 0-25 meters dyp blir gradvis nedkjølt. Noen dager senere (omkring 20. september) starter den samme prosessen med vannet på 30 meters dyp. Vanntemperaturen på dette dypet øker og blandes inn i det overliggende vannet. Tilsvarende skjer videre med vannet på 35 meters, 45 meters og 50 meters dyp. Det later altså til at det dypere vannet motstår omrøring så lenge det er en tetthetsforskjell tilsvarende 3-4 °C før omrøring inntreffer. Dette er selvfølgelig en veldig grov betraktning, men indikerer innsjøens evne å holde seg stabile og motstå de ytre påkjenningene (slipp av vann fra Aurland I, vind) så sant det er en tilstrekkelig stor tetthetsforskjell (temperaturgradient) over dypet.

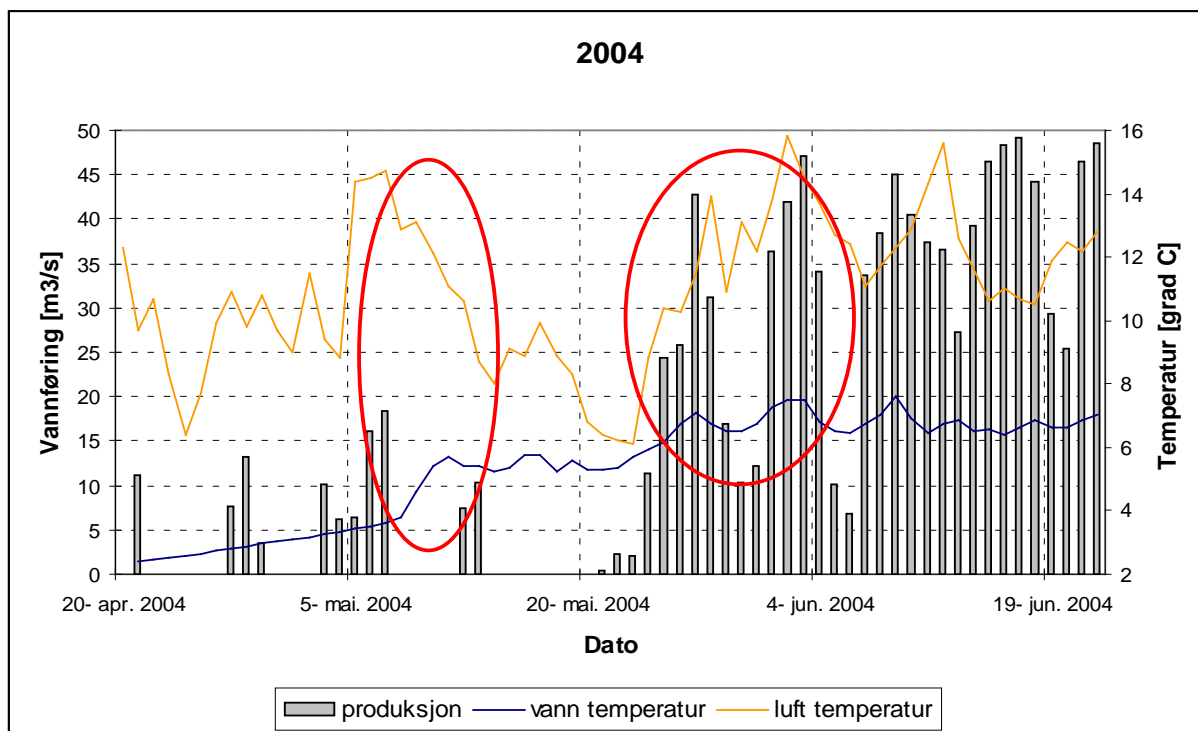


Figur 3.13. Vanntemperatur målt ved lokaliteten nærmest utløpet av Vassbygdvatn (gitt som "Sjiktmålinger utløp" i figur 2.1) for perioden mai 2004 – november 2006.

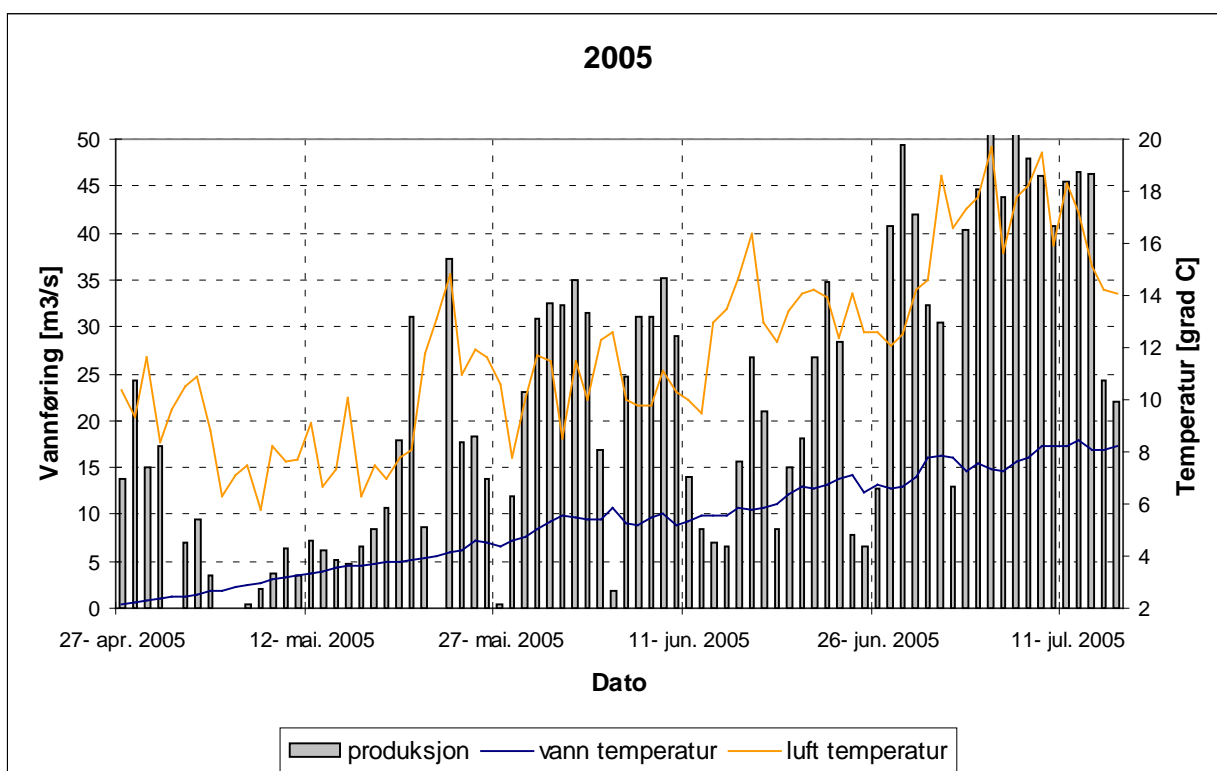
Temperaturmålingen ved målelokaliteten noe nærmere utløpet viser mye av det samme mønsteret som målingene vist i figurene 3.9 – 3.12 hvor dypvannet blir relativt varmt og temperaturen i overflatelaget moderat.

### 3.3.2 Forholdet overflatetemperatur, lufttemperatur og produksjonsmønster

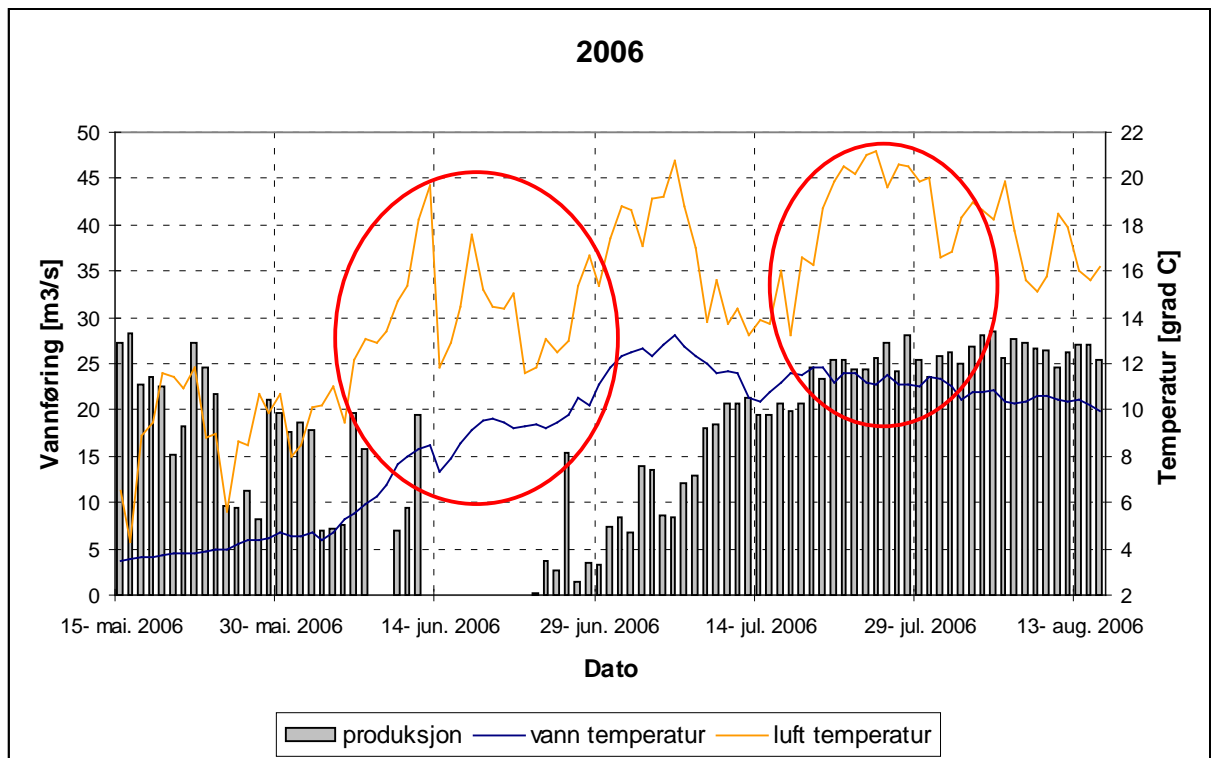
I det følgende er vanntemperaturdata, representert ved overflatemålingen (1 meters dyp) fra målelokaliteten nærmest senteret i Vassbygdvatn (kalt "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 3.1), sammenstilt med lufttemperaturdata fra Skjærshølen, Vassbygdvatn og produksjonsdata fra Aurland I. Det er valgt ut enkelte episoder for å forsøke å avklare hvordan særlig produksjonsmønsteret påvirker sjiktning og overflatetemperatur.



Figur 3.14. Vanntemperatur i overflaten (1 meters dyp) målt ved lokaliteten nærmest senteret i Vassbygdvatn (kalt "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 3.1). Produksjonsdata er vannstrøm ut av Aurland I, men lufttemperaturdataene er døgnmiddelverdier fra Skjærshølen, Vassbygdvatn. Tidsperiode er gitt av akseteksten.

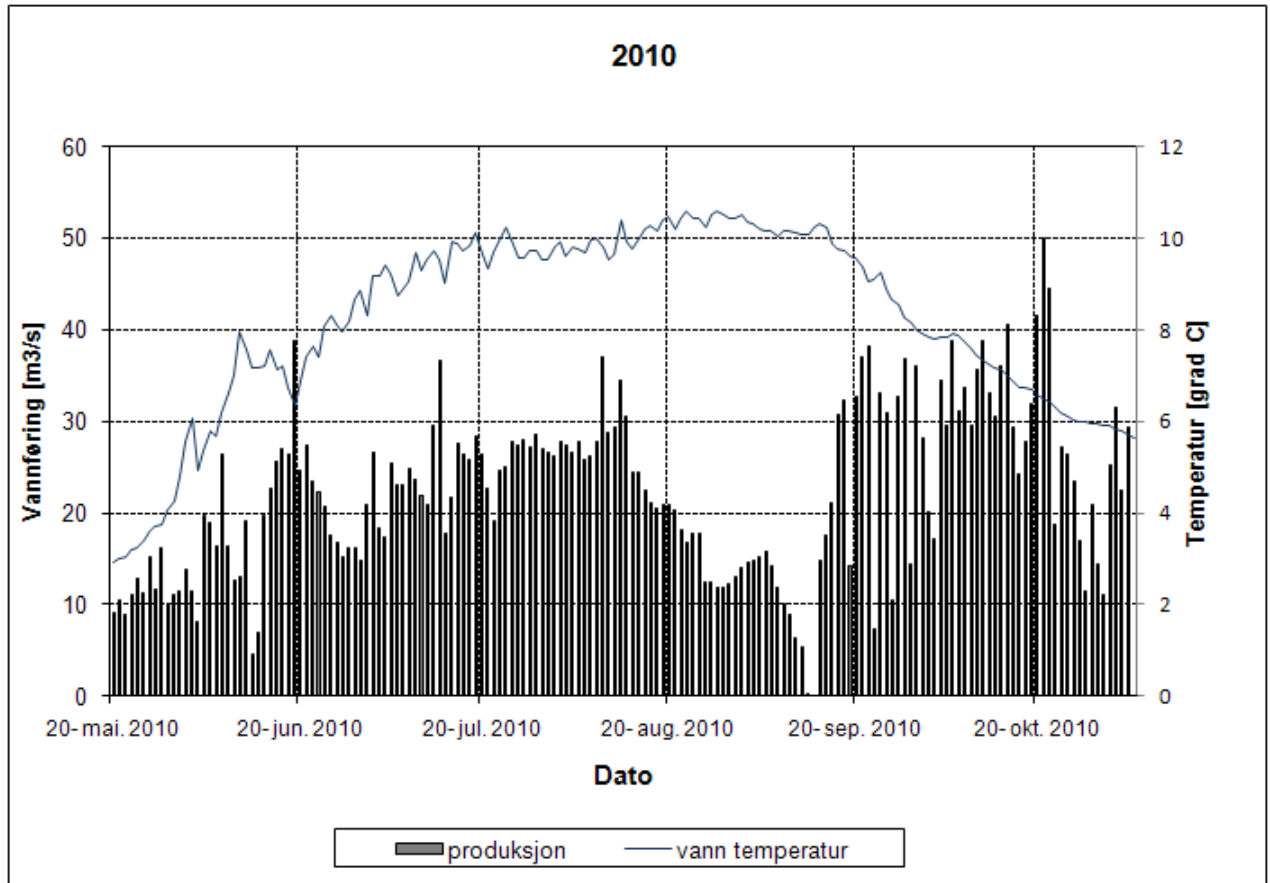


Figur 3.15. Vanntemperatur i overflaten (1 meters dyp) målt ved lokaliteten nærmest senteret i Vassbygdvatn (kalt "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 3.1). Produksjonsdata er vannstrøm ut av Aurland I, men lufttemperaturdataene er døgnmiddelverdier fra Skjærshølen, Vassbygdvatn. Tidsperiode er gitt av akseteksten.



Figur 3.16. Vanntemperatur i overflaten (1 meters dyp) målt ved lokaliteten nærmest senteret i Vassbygdvatn (kalt "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 3.1). Produksjonsdata er vannstrøm ut av Aurland I, men lufttemperaturdataene er døgnmiddelverdier fra Skjærshølen, Vassbygdvatn. Tidsperiode er gitt av akseteksten.





Figur 3.17. Vanntemperatur i overflaten (1 meters dyp) målt ved lokaliteten nærmest senteret i Vassbygdvatn (kalt "Sjiktmålinger ned til 30 m" i figur 3.1). Produksjonsdata er vannstrøm ut av Aurland I. Tidsperiode er gitt av akseteksten.

Vurdering av data gjengitt i figurene 3.14 – 3.17:

Produksjonsdata (vannføring) ut fra Aurland I og lufttemperatur fra Skjærshølen, Vassbygdvatn er visualisert grafisk sammen med vanntemperaturen målt i overflaten av Vassbygdvatn. De viste periodene er valgt ut på bakgrunn av at de later til å være de mest egnede til å vurdere forholdet mellom disse variablene og samtidig være viktige perioder for fisken.

Figur 3.14 (2004): I ringen lengst til venstre er det en interessant episode hvor Aurland I stopper, lufttemperaturen går mye ned og overflatetemperaturen samtidig går opp. I denne perioden er det relativt mye vann i Vassbygdelvi (se figur 3.8) som har høyere temperatur enn produksjonsvannet fra Aurland I og bidrar dermed til å varme opp Vassbygdvatn. I perioden innenfor den andre ringen er produksjonen stor, lufttemperaturen går mye opp, men med en svært begrenset økning i vanntemperaturen. Vassbygdelvi bidrar nå med veldig lite vann (figur 3.8). Forholdet mellom varmebidrag fra Vassbygdelvi, Aurland I og klima er ytterligere analysert i kapittel 3.5.

Figur 3.15 (2005): I hele den viste perioden i sirkel nr. 2, går lufttemperaturen jevnt oppover, produksjonen er ganske stor uten lange avbrudd, og vanntemperaturen går jevnt oppover. Det er imidlertid verdt å merke seg at vanntemperaturen ikke er høyere enn omlag 8 °C. Denne sommeren bærer også preg av relativt høy vannføring i Vassbygdelvi (figur 3.8).

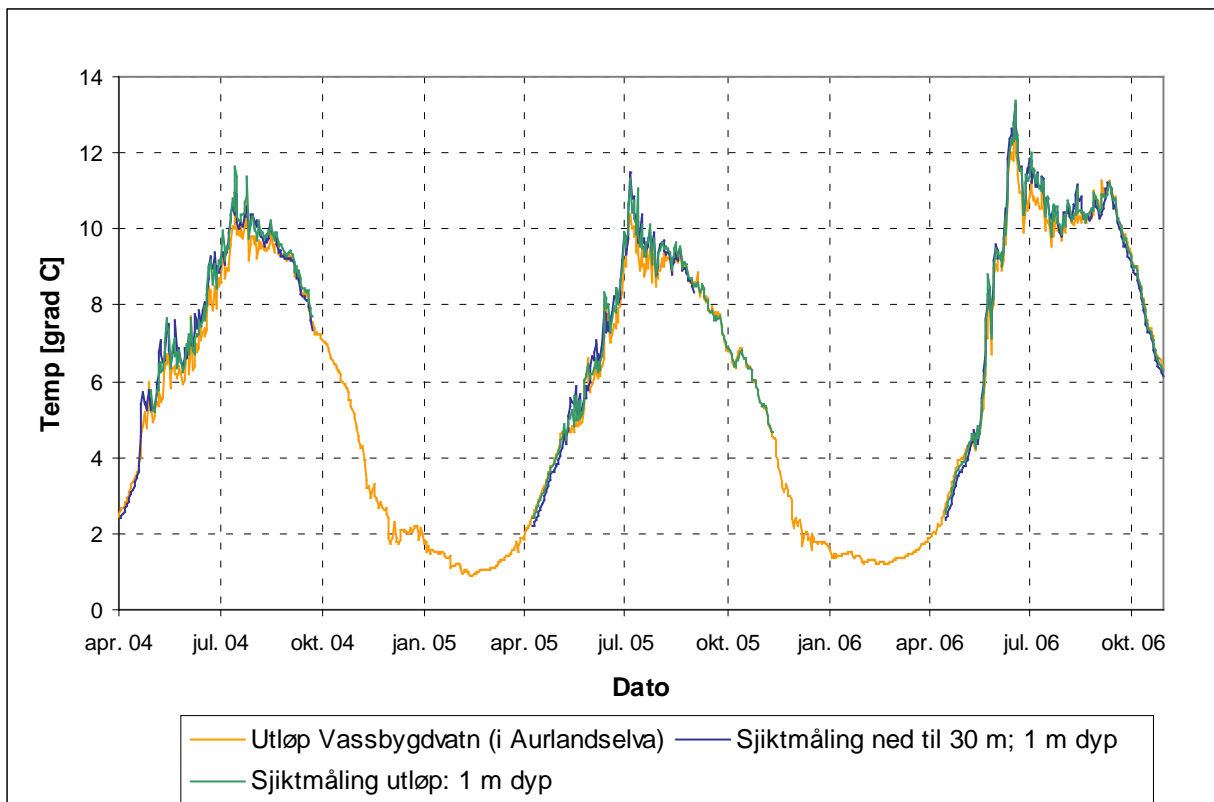
Figur 3.16 (2006): I perioden innenfor ringen til venstre er det en lang stopp/liten produksjon i Aurland I og lufttemperaturen varierende mellom ganske høy og moderat. Dette gir en god stigning i vanntemperaturen i overflatelaget. Vassbygdelvi bidrar i denne perioden med relativt mye vann (figur 3.8). I neste ring har produksjonen gått noen dager, lufttemperaturen er høy og til dels meget høy og vanntemperaturen i vannet går sakte gradvis ned.

Figur 3.17 (2010): Dette året kjører Aurland I hele forsommeren og sommeren og stopper ikke før tidlig i september. Denne stoppen er imidlertid så kort, temperaturfordelingen over dypet er etablert (en viss gradient selv om det ikke er noe sprangsjikt) og mengden tilført energi fra omgivelsen begrenset slik at forholdene i Vassbygdvatn ikke endres som følge av produksjonsstopp.

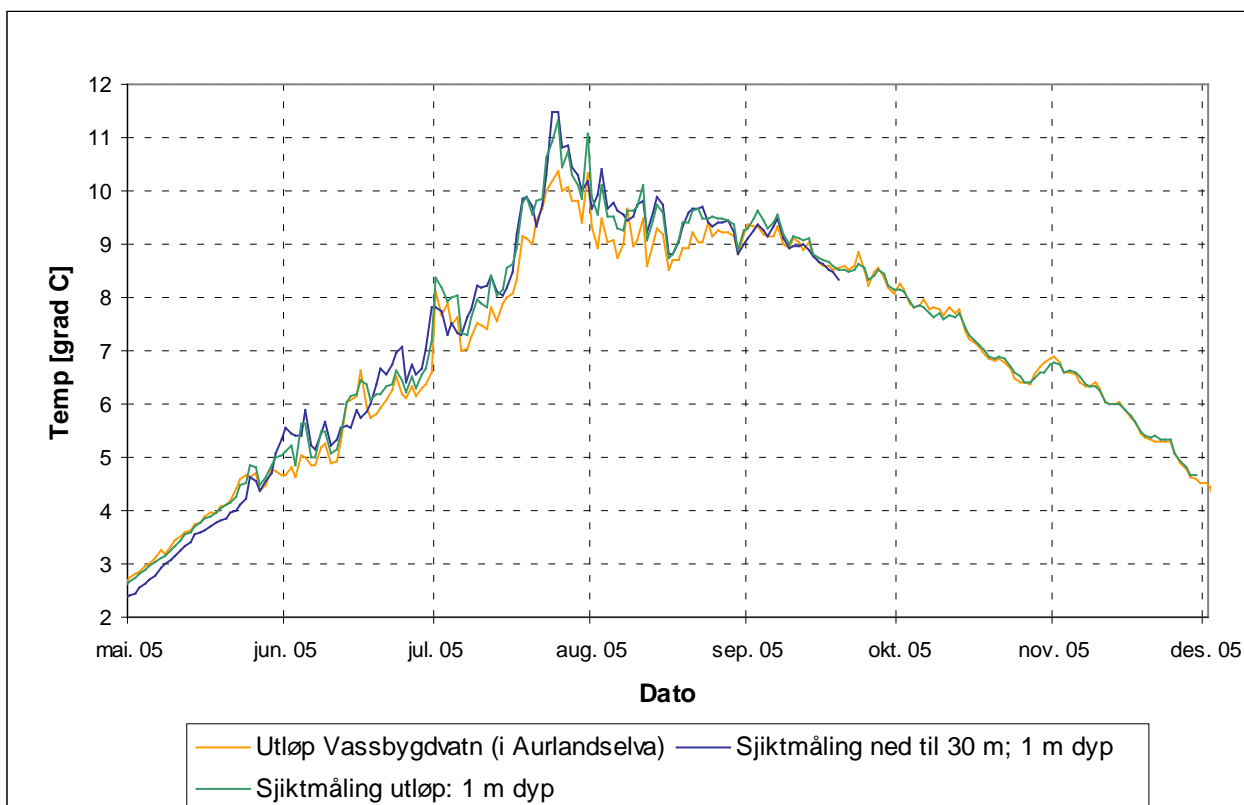
Ut fra disse grafiske analysene av disse episodene later det til å være en sammenheng mellom hvordan Aurland I opereres, lufttemperaturen og resulterende vanntemperatur. Flere analyser av disse forholdene og betydningen av tilførsel av varmeenergi fra Vassbygdelvi inn i Vassbygdvatn er gitt i kapittel 3.5.

### **3.4 AURLANDSELVA**

For å vurdere hvordan Vassbygdvatn påvirker vanntemperaturen i Aurlandselva vil det være nyttig å sammenligne vanntemperaturer i Vassbygdvatn med observerte temperaturer øverst i Aurlandselva. Vi vil da kunne si noe om hvilket sjikt vannet som strømmer inn i Aurlandselva kommer fra.



Figur 3.18. Vanntemperaturmålinger i overflaten av Vassbygdvatn og Aurlandselva for perioden april 2004 – oktober 2006 (se figur 2.1 for detaljering av målelokaliteter).



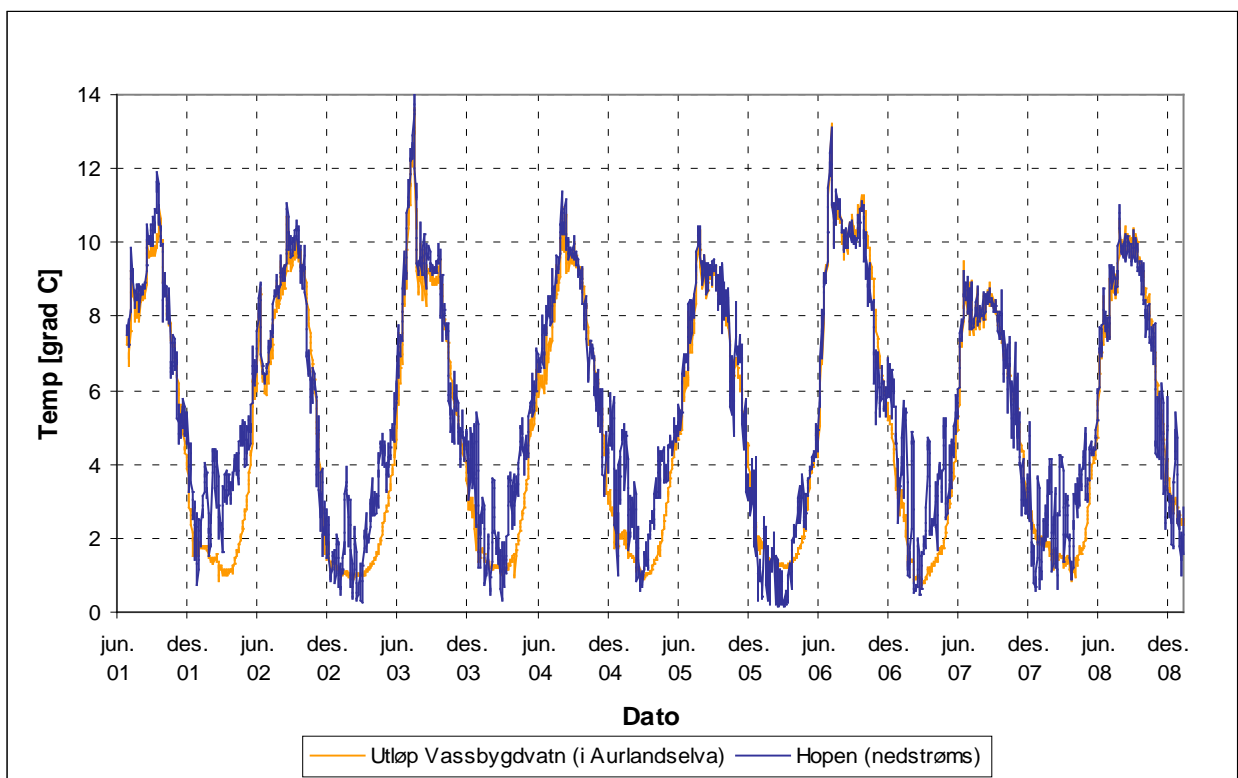
Figur 3.19. Vanntemperaturmålinger i overflaten av Vassbygdvatn og Aurlandselva for perioden mai 2005 – desember 2005 (se figur 2.1 for detaljering av målelokaliteter).

Kommentarer til figurene 3.18 og 3.19:

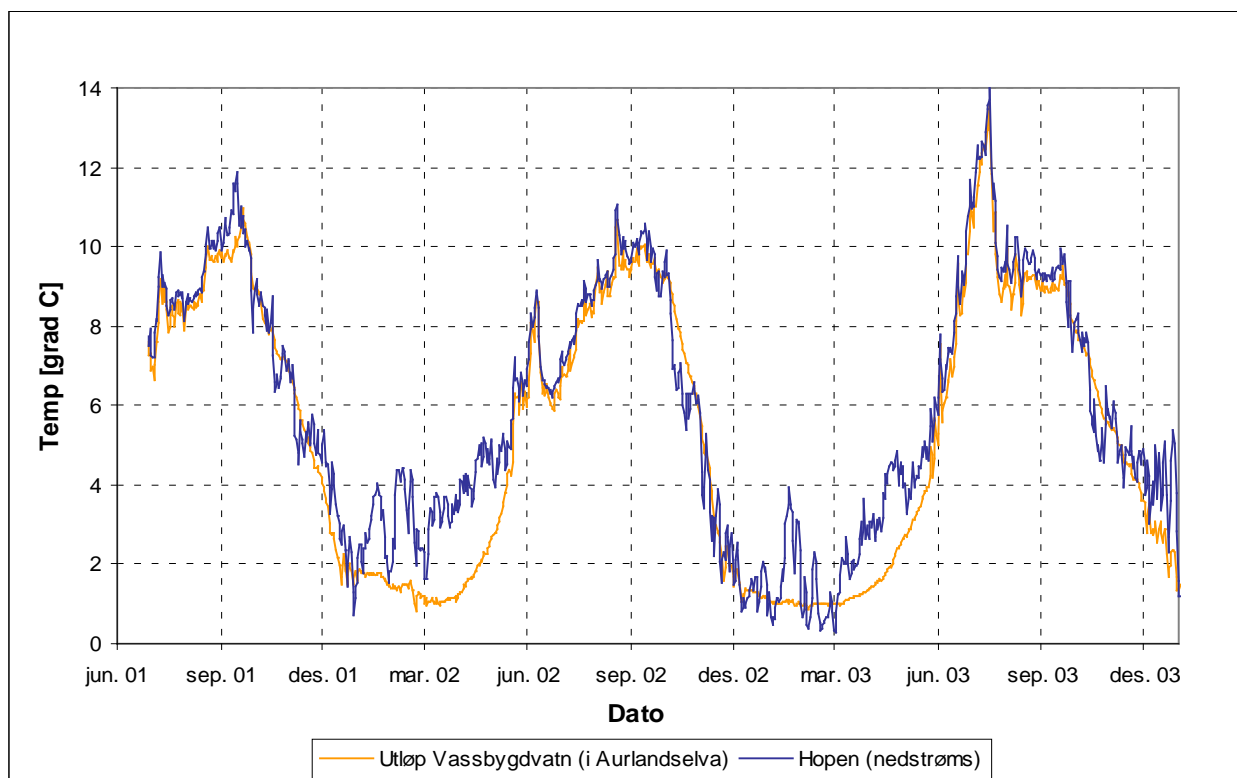
Gul graf er temperatur målt noen meter nede i Aurlandselva, mens både den blå og den grønne er målt i overflaten (1 meters dyp) i Vassbygdvatn, henholdsvis 1 – 1,5 km oppstrøms utløp fra Vassbygdvatn (blå) og 200-300 meter oppstrøms utløp (grønn).

Grafene har generelt et sammenfallende mønster og særlig overflatemålingene i Vassbygdvatn (blå og grønn, korrelasjon gitt i avsnitt 3.3.1). Målingene noe ned i Aurlandselva (gul) er generelt litt lavere enn overflatemålingene. Dette kan forklares med at noe kaldere vann fra noe dypere lag i Vassbygdvatn kan bli trukket med mot utløpet og avkjøler ”miksen” av vann som renner inn i Aurlandselva.

Fra noe ut i september er de tre grafene nærmest helt sammenfallende, noe som stemmer godt med det faktum at sjiktningen i Vassbygdvatn (se avsnitt 3.3) forsvinner i denne perioden.



Figur 3.20. Vanntemperaturmålinger i oppstrøms ende (gul) av Aurlandselva versus nedstrøms ende (blå) for perioden juni 2001 – desember 2008 (se figur 2.1 for detaljering av målelokaliteter).



Figur 3.21. Vanntemperaturmålinger i oppstrøms ende (gul) av Aurlandselva versus nedstrøms ende (blå) for perioden juni 2001 – desember 2003 (se figur 2.1 for detaljering av målelokaliteter).

Kommentarer til figurene 3.20 og 3.21:

Det er naturlig nok generelt sammenfallende temperaturmønstre mellom oppstrøms og nedstrøms ende av Aurlandselva. De største forskjellene later til å være om vinteren hvor Hopen (nedstrøms) har høyere temperatur enn ved utløpet av Vassbygdvatn. Den antatte årsaken til dette er innsig av grunnvann og/eller annet tilsig i restfeltet. Det antas at nedre målepunkt er lokalisert så langt opp i elva at innblanding av ”varmt” sjøvann ikke finner sted. Ut fra en betraktning av vanntemperaturdataene for Aurlandselva synes det klart at det skjer en begrenset oppvarming av vannet fra utløpet av Vassbygdvatn til utløpet i fjorden, bortsett fra perioder om vinteren (hvor det egentlig ikke er noen oppvarming, men innsig av vann med høyere temperatur).

Ut fra de foreliggende data med samtidige målinger i oppstrøms og nedstrøms ende av Aurlandselva ble perioden 1. mai – 30. september valgt ut for alle år (2003-2008) for en kvantitativ analyse. For disse periodene ble alle dataene sortert mhp. vannføring fra laveste til høyeste verdi. De 50 % laveste verdiene ble kategorisert som ”lave Q”, og tilsvarende de 50 % høyeste vannføringsverdiene ble kalt ”høye Q” og gjennomsnittlig temperaturforskjell beregnet. Det er her antatt at transporttiden fra nedre til øvre ende er så kort at samtidige temperaturmålinger kan benyttes.

Tabell 3.1. Beregnet temperaturendring fra øvre til nedre ende av Aurlandselva basert på måledata fra månedene mai-september for årene 2003-2008.

Gjennomsnittsvannføring	Observert temperaturforskjell
~ 15 m <sup>3</sup> /s ("Lave Q")	0,20 °C
~ 40 m <sup>3</sup> /s ("Høye Q")	0,41 °C

Det er verdt å merke seg at det er under høye vannføringer ("Høye Q") temperaturhevingen nedover elva faktisk er størst. Årsaken til dette er at de høye vannføringene er dominerende i perioder (særlig månedene juli og august) hvor det er høye lufttemperaturer og stor innstråling, noe som gir relativt stor oppvarming på tross av at oppvarmingen skal fordeles over et stort vannvolum. Ut fra beregningen over kan det allikevel synes som om anslag gitt i Sweco-rapporten (Tvede, 2001) er vel optimistiske med hensyn på hvilken temperaturheving som kan skje på denne relativt korte strekningen, selv om forutsetningene i deres beregninger er noe forskjellige fra beregningen presentert i tabell 3.1. Det er også uklart om beregningene til Tvede (2001) tar hensyn til innsig fra grunnvann/bekker på strekningen.

Det skal nevnes, noe også Sweco-rapporten (Tvede, 2001) tar hensyn til, at redusert uttapping fra Vassbygdvatn vil øke oppholdstiden i innsjøen, noe som også vil bidra til heving av vanntemperaturen i Aurlandselva. Det er i våre vurderinger i denne rapporten ikke foretatt noen kvantitative vurderinger av størrelsen på en slik effekt.

### 3.5 BETYDNINGEN AV VARMEENERGI FRA VASSBYGDELVI OG AURLAND I

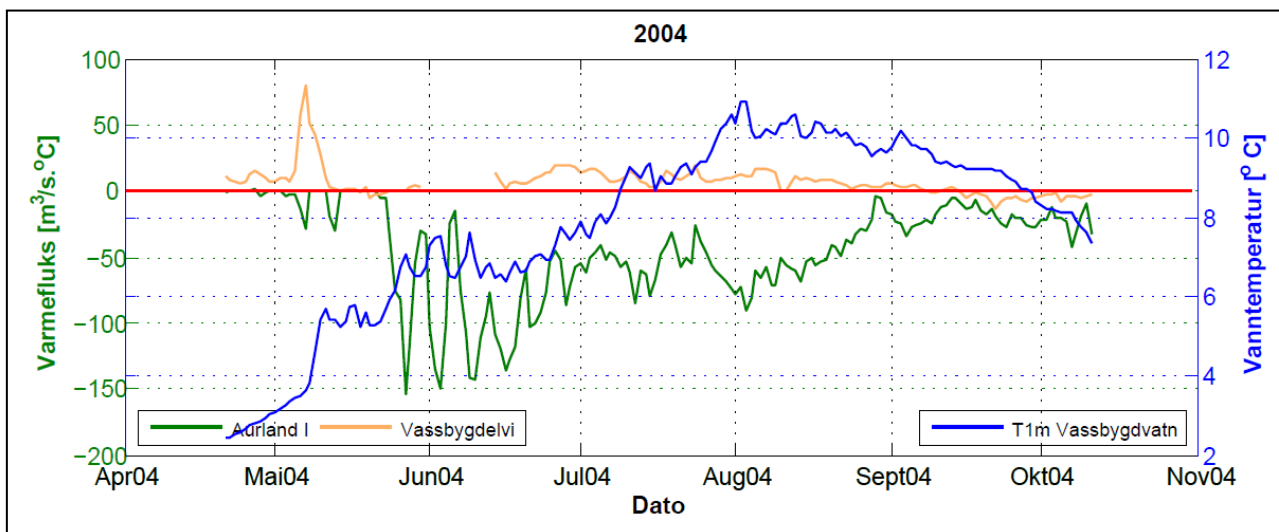
#### 3.5.1 Betydningen av tilført varmeenergi fra Vassbygdelvi og Aurland I

Kombinasjonen av vannmengde og temperatur på vann tilført fra Aurland I og fra Vassbygdelvi vil være med på å bestemme vanntemperaturen i Vassbygdvatn. I dette avsnittet er det gjort en vurdering av betydningen av varmebidraget fra Vassbygdelvi og fra Aurland I på resulterende vanntemperatur i Vassbygdvatn. Kombinasjonen av vannføring og vannmengde definerer vi som varmekraft:

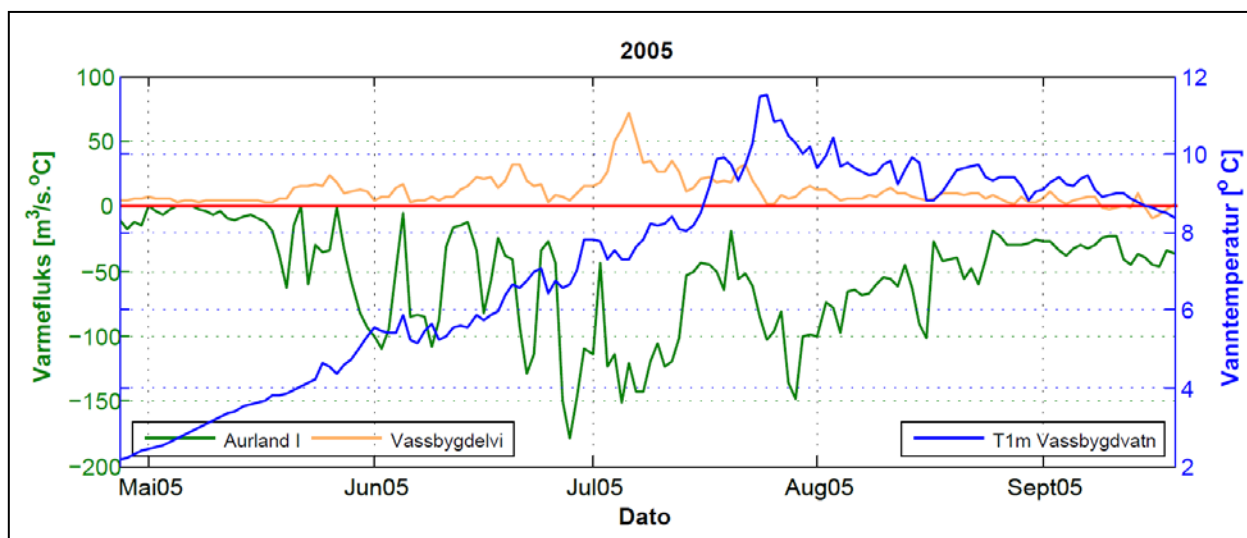
$$H_f = Q * (T_{inn} - T_{Vassbygdvatn})$$

$H_f$	varmekraft [ $m^3/s * °C$ ]
$Q$	vannføring inn i Vassbygdvatn [ $m^3/s$ ]
$T_{inn}$	vanntemperatur på tilført vann [ $°C$ ]
$T_{Vassbygdvatn}$	vanntemperatur i Vassbygdvatn dagen før [ $°C$ ]

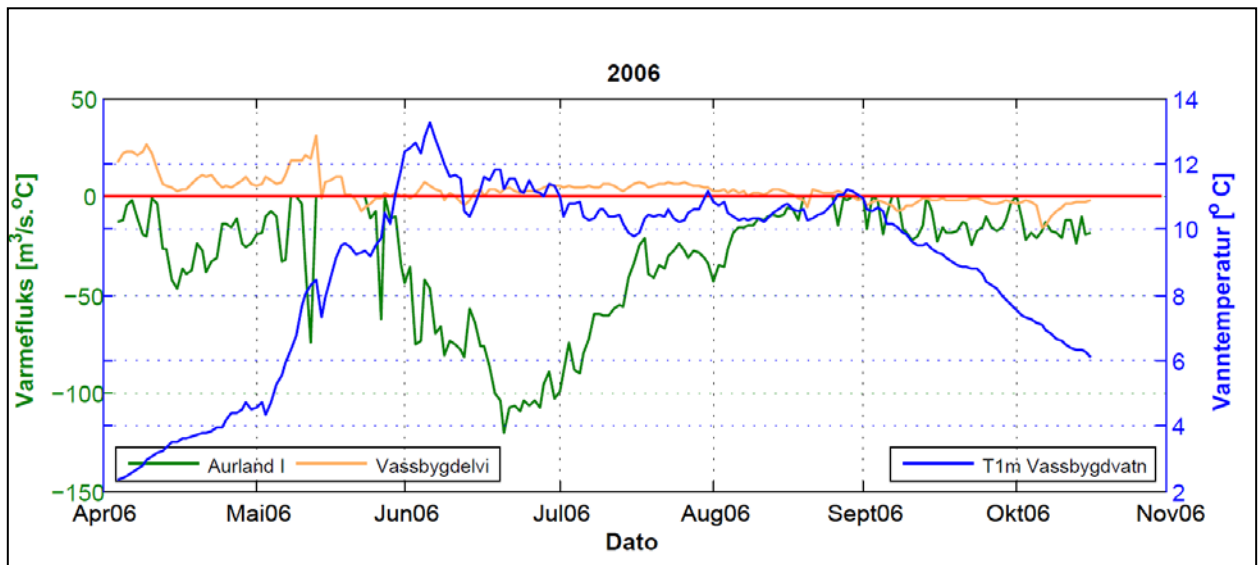
Hvis varmekraften blir positiv ( $H_f > 0$ ), bidrar tilført vann til oppvarming av Vassbygdvatn, mens negativ varmekraft ( $H_f < 0$ ) bidrar til nedkjøling av Vassbygdvatn. For å kunne sammenligne den daglige effekten av tilført netto positiv/negativ varmeenergi, har vi valgt å bruke temperaturen i Vassbygdvatn dagen før i beregningen. Tidsserier for varmekraft fra henholdsvis utløpet av Aurland I og Vassbygdelvi er analysert for 2004-2006 i figurene 3.22-3.24 (årene 2004-2006).



Figur 3.22. Varmeflukt beregnet for tilført vann fra Aurland I (lys grønn) og Vassbygdelvi (mørk grønn) sammenlignet med vanntemperatur i Vassbygdvatn (blå). Den røde streken viser nullpunktet for varmeklukt.



Figur 3.23. Varmeflukt beregnet for tilført vann fra Aurland I (lys grønn) og Vassbygdelvi (mørk grønn) sammenlignet med vanntemperatur i Vassbygdvatn (blå). Den røde streken viser nullpunktet for varmeklukt.



Figur 3.24. Varmefluks beregnet for tilført vann fra Aurland I (lys grønn) og Vassbygdelvi (mørk grønn) sammenlignet med vanntemperatur i Vassbygdvatn (blå). Den røde streken viser nullpunktet for varmefluks.

Figurene 3.22-3.24 viser at varmefluksen fra Vassbygdelvi bidrar nesten alltid positivt til oppvarming av Vassbygdvatn mens Aurland I alltid bidrar negativt (null-bidrag når Aurland I står). Dette betyr at Vassbygdelvi nesten bestandig bidrar til å varme opp Vassbygdvatn mens Aurland I bidrar til å kjøle det ned. Når tilført vannmengde er stor og temperaturforskjellene også store vil fluksen bli størst. Varmefluks fra Aurland I varierer mye, noe som har en sammenheng med variasjoner i produksjonen. Varmefluksen fra Vassbygdelvi er relativt liten bortsett fra perioder med høy vannføring. Utfra beregningene kan vi lese at Aurland I generelt bidrar mer negativt enn Vassbygdelvi bidrar positivt. Det understrekes at det er vanntemperaturmålinger i overflaten av Vassbygdvatn som er benyttet i beregningene og vist i figurene 3.22-3.24.

### 3.5.2 Betydningen av tilført vann versus klima og andre kilder

I dette avsnittet er det forsøkt belyst hvor stort det resulterende varmebidraget fra Vassbygdelvi og Aurland I er sammenlignet med bidraget fra klimaet og andre kilder. For å gjøre dette har vi beregnet temperaturen på totalt innstrømmende vann til Vassbygdvatn (teoretisk verdi) som en funksjon av temperatur og mengde vann tilført fra Vassbygdelvi og Aurland I med følgende formel:

$$T_{\text{inn}} = T_{\text{Vass}} * (Q_{\text{Vass}}/Q_{\text{tot}}) + T_{\text{Aur}} * (Q_{\text{Aur}}/Q_{\text{tot}})$$

der

$T_{\text{inn}}$  beregnet temperatur på totalt innstrømmende vann [°C]

$T_{\text{Vass}}$  vanntemperatur i Vassbygdelvi [°C]

$T_{\text{Aur}}$  vanntemperatur fra Aurland I [°C]

$Q_{\text{Vass}}$  vannføring i Vassbygdelvi [m<sup>3</sup>/s]

$Q_{\text{Aur}}$  vannføring fra Aurland I [m<sup>3</sup>/s]

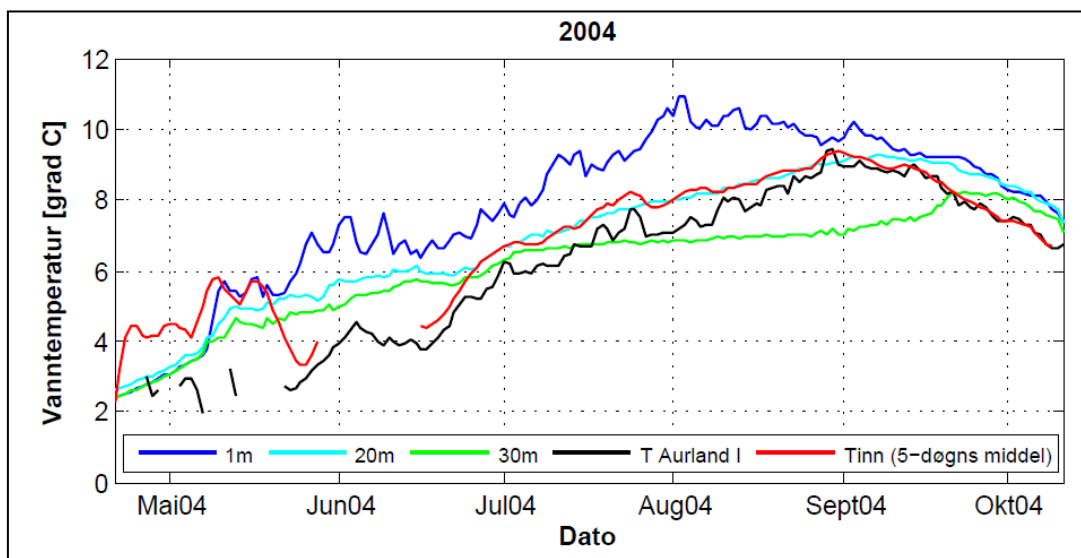
$Q_{\text{tot}}$  total (summert) vannføring i Vassbygdelvi og fra Aurland I [m<sup>3</sup>/s]



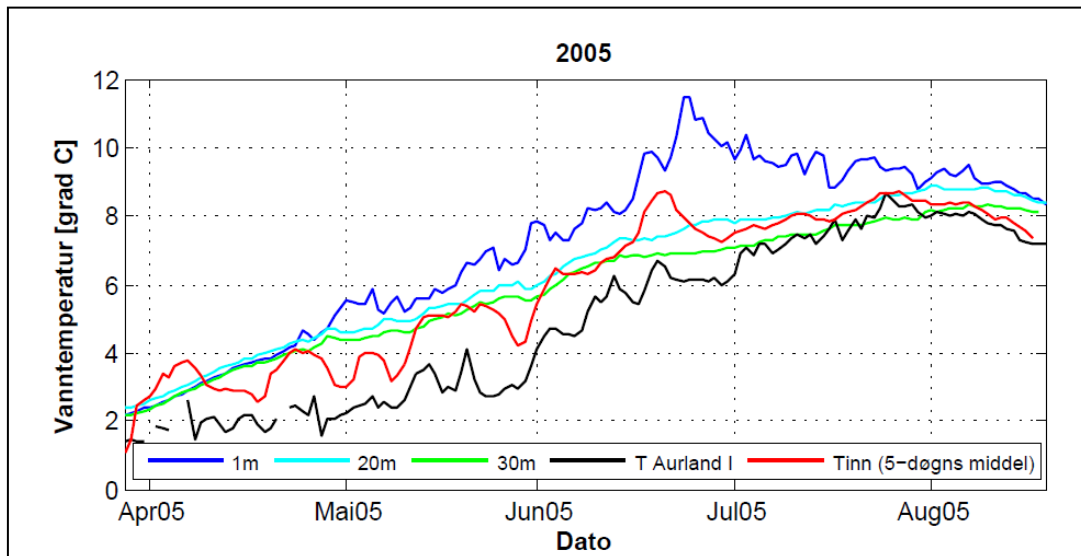
Differensen mellom beregnet temperatur på alt innstrømmende vann og målt temperatur i Vassbygdvatn vil da vise hvor stor oppvarming som finner sted i Vassbygdvatn på grunn av tilført energi fra klima, andre tilløpsbekker, grunnvannstilsig, etc. Disse bidragene kan være både positive og negative.

Korrelasjonen mellom beregnet temperatur på alt innstrømmende vann og målt overflatetemperatur i Vassbygdvatn er lineær og sterk med korrelasjonskoeffisienter for 2004, 2005 og 2006 på henholdsvis 0,894, 0,927 and 0,912. Dette betyr at overflatetemperaturen i Vassbygdvatn er sterkt styrt av temperaturen på innstrømmende vann.

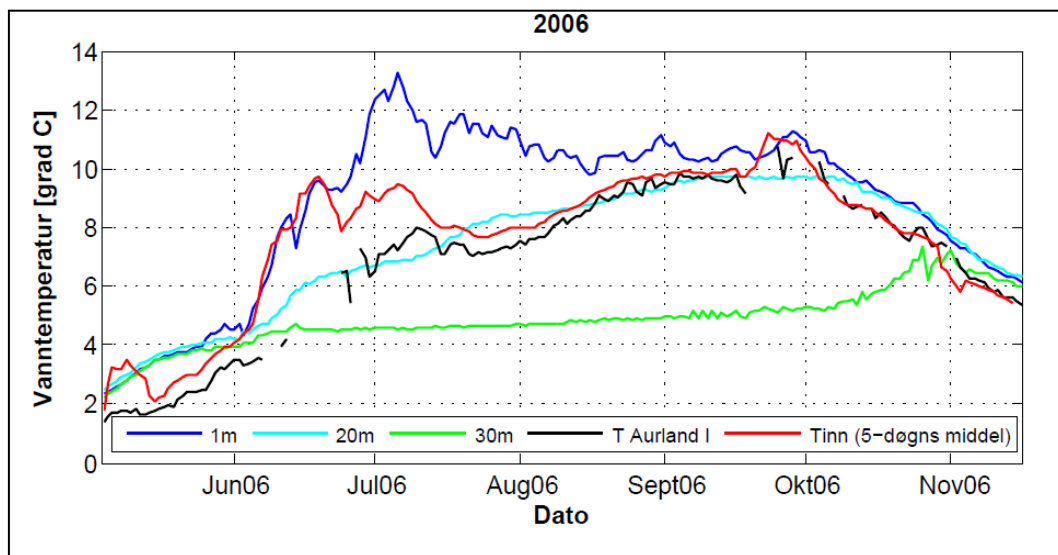
Figur 3.25 – 3.27 viser tidsserier av temperatur i Vassbygdvatn på 1m, 20m og 30m dyp, vanntemperatur fra Aurland I og beregnet temperatur på totalt innstrømmende vann til Vassbygdvatn ( $T_{inn}$ ).



Figur 3.25. Sammenstilling av målte temperaturer ved 3 ulike dyp i Vassbygdvatn, beregnet resulterende vanntemperatur ( $T_{inn}$ ) og vanntemperatur i avløpsvannet fra Aurland I.



Figur 3.26. Sammenstilling av målte temperaturer ved 3 ulike dyp i Vassbygdvatn, beregnet resulterende vanntemperatur (Tinn) og vanntemperatur i avløpsvannet fra Aurland I.



Figur 3.27. Sammenstilling av målte temperaturer ved 3 ulike dyp i Vassbygdvatn, beregnet resulterende vanntemperatur (Tinn) og vanntemperatur i avløpsvannet fra Aurland I.

Resulterende temperatur fra alt innstrømmende vann er lavere enn overflatetemperaturen målt i Vassbygdvatn fra slutten av mai til begynnelsen av september i 2004 og 2005 (figur 3.25 og 3.26), og fra slutten av juni til midten av september i 2006 (figur 3.27). Tabell 3.2 viser beregnet gjennomsnittlig temperaturforskjell mellom overflatevannet i Vassbygdvatn og resulterende innstrømmende vann og mellom overflatevannet og lufttemperaturen. Grunnen til at Vassbygdvatn er varmere enn innkommende vann antas i hovedsak å være positive bidrag fra innkommende stråling og varmeveksling med luft.

Vi har også beregnet differansen i graddager mellom temperaturen i overflaten og på 30 m dyp for hvert år. Vi har beregnet graddagene som summen av temperaturdifferansen så lenge denne er større enn 0,3 °C. Summen av differansen i graddager gjenspeiler både lengde og styrke

sjiktningen har. Denne differansen var 291 °C i 2004, 182 °C i 2005 og 781 °C i 2006, og bekrefter at sjiktningen var mye sterkere i 2006 enn i 2004 eller 2005.

Tabell 3.2. Beregnet gjennomsnittlig temperaturforskjell mellom overflatevannet i Vassbygdvatn ( $T_{1m}$ ) og resulterende innstrømmende vann ( $T_{inn}$ ) og med lufttemperaturen ( $T_{luft}$ ).

Periode	$\Delta$ ( $T_{1m}-T_{inn}$ )	$\Delta$ ( $T_{luft}-T_{1m}$ )	$\Delta$ ( $T_{luft}-T_{inn}$ )	Gj.snitt $T_{1m}$	Gj.snitt $T_{inn}$	Gj.snitt $T_{luft}$
2004 (01.08-20.08)	1,9 °C	7,7 °C	9,6 °C	10,3 °C	8,4 °C	18,0 °C
2005 (25.07-15.08)	2,3 °C	5,3 °C	7,3 °C	10,0 °C	7,7 °C	15,0 °C
2006 (20.07-10.08)	3,0 °C	7,8 °C	10,8 °C	11,0 °C	8,0 °C	18,8 °C

Tabell 3.2 viser at forskjellen mellom gjennomsnittlig resulterende temperatur i overflaten og temperatur på totalt innstrømmende vann er størst i 2006. Oppvarmingen av det innstrømmende vannet (i antall grader målt i overflaten) har altså vært størst dette året (3,0 °C).

Vi ser at det er i 2006 det oppnås størst oppvarmingseffekt fra lufta ettersom det dette året er høyst vanntemperatur i Vassbygdvatn og stor temperaturforskjell mellom innstrømmende vann og overflatevann i Vassbygdvatn. Dette skyldes trolig den gode sjiktningen som har etablert seg i 2006. I tillegg er det mange faktorer som virker inn på energiutvekslingen mellom vann og luft i tillegg til lufttemperaturen. Dette kan være skydekke, vind, stråling, sol/skygge-effekter osv som vi ikke har tatt hensyn til.

### 3.6 DANNELSE AV TEMPERATURSJIKTNING

De viktigste forholdene som bestemmer hvorvidt temperatursjiktning kan dannes er trolig:

- Mengden vann som slippes ut fra Aurland I (kraftproduksjon) og hvilken periode dette foregår (innsjøen tåler trolig noe utslipp fra Aurland I hvis sprangsjikt er etablert)
- Vannføring og vanntemperatur i Vassbygdelvi
- Lufttemperaturen/stråling

Målinger av vanntemperatur i Vassbygdvatn i ulike dyp (figur 3.9 – 3.12) viser at en viss stratifisering (sjiktning/lagdeling) er svak i 2004, ikke finner sted i 2005 og er noe mer framtreddende i 2006. Sommeren 2006 er det stor forskjell (omlag 6 °C) på vanntemperaturen på 30 meters dyp og de øvre lag (figur 3.11) og vi har fått sjiktning (stratifisering)<sup>4</sup>. Dette skyldes trolig flere sammenfallende forhold. Aurland I har ikke produsert i 11 påfølgende dager i juni, og den har vært lav fram til midten av juli (figur 3.16). To varme episoder der både lufttemperaturen og vanntemperaturen i Vassbygdelvi stiger godt finner også sted i starten og slutten av juni. Vannføringen i Vassbygdelvi er også forholdsvis høy (9.2 m<sup>3</sup>/s i gjennomsnitt mellom 4. og 22. juni). Relativt varmt vann fra Vassbygdelvi bidrar da sammen med atmosfæren til å varme opp

<sup>4</sup> Det er en viss temperaturgradient over dypet dette året, men ikke dannelse av termoklin i henhold til definisjon gitt som minimum 1 °C temperaturdifferanse pr 1 meter dyp (Høyland og Høyland, 1997)

overflatevannet i Vassbygdatn. Når så Aurland I starter opp med full produksjon rundt 10. juli har det allerede dannet seg sprangsjikt. Tetthetsforskjellene er da så store at omrøring i kun liten grad finner sted og temperaturen i Vassbygdatn holder seg over 10 °C fram til starten av oktober.

Sommeren 2005 er det imidlertid en veldig svak sjiktning med kun 2.8 °C forskjell mellom overflatevannet og vann på 30m dyp fra midten av juli til midten av august (figur 3.10). I 2005 stoppet ikke produksjonen i Aurland I mer enn to påfølgende dager i juni, og Aurland I bidrar dermed med en tilnærmet konstant strøm av kaldt vann som blander seg i Vassbygdatn og kjøler ned vannmassene. Vannføringen i Vassbygdelvi er høyere enn i 2006, men ikke tilstrekkelig til å varme opp Vassbygdatn nevneverdig. Som en følge av høy lufttemperatur og redusert produksjon i Aurland I blir det likevel en viss oppvarming av overflatevannet i Vassbygdatn i slutten av juli.

I mai 2004 er det liten eller ingen produksjon i Aurland I (figur 3.14), men det er for tidlig på sommeren til å gi en effekt i Vassbygdatn. I denne perioden er også lufttemperaturen lav og det blir ikke dannet sjiktning (figur 3.9). I juli og august er det jevn produksjon i Aurland I på 25 m<sup>3</sup>/s (ikke vist i figur). I starten av august er det høy lufttemperatur og høy vanntemperatur fra Vassbygdelvi som sammen med moderat kraftproduksjon fra Aurland I skaper en viss sjiktning og oppvarming av overflatevannet.

### **3.7 OPPSUMMERENDE VURDERINGER**

Fra vanntemperaturprofilene for Vassbygdatn er det klart at det er relativt mye varmeenergi i vannet, men problemet er at det ikke dannes noen skikkelig termoklin i innsjøene og varmen spres over hele vannsøylen med det resultat at overflatevannet forblir kaldt selv midt på sommeren (~8-10 °C), med unntak av få og korte perioder (figur 3.9 - 3.12).

I henhold til data og analyser for 2004-2006 og 2010 ser det ut som følgende forhold er viktig for å skape sjiktning og oppvarming av overflatevannet i Vassbygdatn:

- Stans i produksjonen i Aurland I over en viss periode
- Relativt høy lufttemperatur
- Middels/høy vannføring i Vassbygdelvi med relativt høy vanntemperatur

Det virker som disse forholdene bør inntreffe samtidig. Effekten blir trolig størst dersom dette inntreffer tidlig på sommeren (typisk tidlig i juni). Det kan virke som om Aurland I bør stå i minst en uke for å skape denne effekten, men varigheten av nødvendig produksjonsstans bør undersøkes nærmere. På bakgrunn av data fra senhøsten 2010 så kan en første hypotese være at det bør være en temperaturdifferanse mellom de øvre og nedre lagene i innsjøen på minst 3-4 °C ved moderat drift av Aurland I og gitt vanntemperaturer høyere enn 5-6 °C (se illustrasjon som viser vannets tetthet ved forskjellige temperaturer i vedlegg), før innsjøen kan motstå omrøring. Det virker også som det ikke vil gi noen vesentlig effekt hvis ikke lufttemperaturen er høy i perioden med produksjonsstans ettersom innsjøen må tilføres energi gjennom overflaten mens kraftverket står for å danne en viss temperaturforskjell over dypet. For å kvantifisere nærmere lengden på

produksjonsstans og nødvendig luft- og vanntemperaturer er det behov for flere år med data og nærmere analyser. Fysiske endringer i utløpskanal (nivå/dyp), vannhastighet, vannvolum vil også kunne bidra til å bedre situasjonen, men må undersøkes nærmere før konkrete tiltak kan foreslås. Forslag til scenarie-analyse er detaljert beskrevet i kapittel 4.

Analyse av spredte måledata fra Viddalsvatn (kun enkeltmålinger i 2009) viser at det er begrenset med sjiktning i magasinet over sommerperioden. Hvis dette er representativt for magasinet og inntaket forblir lokalisert som nå (nordre ende), så later det til å være veldig lite å hente på å bygge et inntak som er fleksibelt mhp på å hente ut vann fra variabelt dyp.

Det må gjøres oppmerksom på at vurderingene er gjort utfra data fra en relativt kort tidsperiode da særlig betraktningene i Vassbygdvatn er mye basert på data i perioden 2004-2006 og 2010. Det er ikke gjort noen vurderinger i forhold til representativiteten til disse årene.

Det er videre heller ikke gjort noen undersøkelser hvorvidt indre bølger (seiches) kan ha funnet sted. For å undersøke dette må data om vindretning og -hastighet og varigheten av disse, samt innsjøenes vindeksponering, ha vært undersøkt. Det antas imidlertid at dette ikke er noe framtreddende fenomen for Vassbygdvatn.

Det er kun lufttemperatur av de meteorologiske variable som er benyttet til vurdering av oppvarming/kjøling av Vassbygdvatn. Dette er en forenkling og særlig kortbølget innstråling kunne ha vært benyttet i tillegg for å få et bedre bilde av netto energiflukt mellom Vassbygdvatn og omgivelsene.

#### 4 ØKT EFFEKTKAPASITET I AURLAND I – FORSLAG TIL NYE ANALYSER

Avløpsvannet fra Aurland I slippes ut nær eller i overflaten av Vassbygdvatn. Dette vannet bidrar gjennom hele sommeren til å kjøle ned Vassbygdvatn (kaldere enn overflatevannet), og det vil være ønskelig om dette vannet ikke blandes med overflatevannet, men slippes inn dypere i innsjøen.

Et viktig tiltak for heving av overflatetemperaturen vil være å sørge for at overflatevannet blir liggende i ro slik at sjiktning oppstår og oppvarmingen kan finne sted uten omrøring av vannmassene. En analyse ved hjelp av et 3-dimensjonalt modellverktøy som kan simulere innlagring av strømmer i innsjøer anbefales i et videre studium. Etter tilpasning (kalibrering) av modellen bør den settes opp for å simulere variasjon i et utvalg inngangsvariable som beskrevet i tabell 4.1. Det understrekes at dette er forslag til en scenarie-analyse som må diskuteres med problemeier (E-CO) før modellarbeidet startes for å sikre at de definerte scenarier beskriver realistiske tiltak og framtidige situasjoner.

Tabell 4.1. Forslag til variable som bør varieres i henhold til foreslåtte minimum- og maksimumverdier for å studere resulterende sjiktning og vanntemperatur i overflatelaget til Vassbygdvatn.

	Scenarie-variabel	Beskrivelse
<i>Kjøremønstre</i>	Produksjonsvolum: Varierende produksjonsvolum i Aurland I (varierende last, inkludert maksimal last)	Aurland I har pr i dag 3 aggregater installert, tilsvarende en maksimal slukeevne på omlag 50 m <sup>3</sup> /s totalt. Det er aktuelt ut å utvide med ytterligere kapasitet med en antatt framtidig total slukeevne på omlag 110 m <sup>3</sup> /s. Det vil da være aktuelt å simulere vanntemperaturen med ny maksimal last.  Det må også defineres flere ”typiske kjøremønstre” for framtidens drift av Aurland I, samt effekten av perioder med stopp i Aurland I hvor det er muligheter for dannelse av sprangsjikt.
	Typiske sesongsituasjoner	Simuleringer bør kjøres for ulike perioder av året. Hele perioden fra mai april til begynnelsen av oktober er aktuell, men særlig periodene hvor sjiktning kan etableres (typisk medio mai og ut juni) er viktig å studere.
	Klimascenarier	Det kan være aktuelt å undersøke hvordan endret klima vil kunne påvirke mulighetene for dannelse av temperatursjiktning i Vassbygdvatn. Klimascenarier for regionen må i så fall framskaffes.
<i>Fysiske</i>	Utslippsdyp	Utløpet fra Aurland I ligger i dag på kote 48, mens LRV og HRV er hhv 54,0 og 55,4 moh. Det vil være aktuelt å simulere lavere utslippsdyp enn dagens nivå. Middeldyp i

		innsjøen er 42 meter, tilsvarende omlag kote 17, mens maksimumsdyp er 65 meter, dvs omlag 10 meter under havnivå. Det bør simuleres utslippsnivå ned til noe under middeldypet slik at man får testet effekten av å variabelt utslippsdyp på vanntemperaturen i Vassbygdvatn.
	Hastigheter på vannet ut av Aurland I	Vannhastighetene ut av Aurland I vil antageligvis påvirke innlagring og omrøring i Vassbygdvatn. Det antas at vannhastighetene kan komme ned mot 0 m/s, gitt riktig utforming av utløpskanal/tunnel/ energidreper. Maksimumshastigheten kan for eksempel settes til 2 m/s, noe som er en hastighet som i dag kan forekomme i avløpskanalen.
	Forskjellige former på utslippsarrangement	Forskjellige form på utløpskanal/-arrangement vil påvirke vannhastighet og spredning av vannstrømmen inn i Vassbygdvatn. Ulike typiske utforminger bør simuleres.
Viddalsvatn/Vangen	Temperatur på inntaksvannet til Aurland I (= vanntemperatur ut av Aurland I), dvs. Viddalsvatn.	Dette bør varieres fra typisk årlig minimumstemperatur til typisk årlig maksimumstemperatur. Basert på måleverdier fra sommeren 2009 kan dette for eksempel varieres fra 2 °C til 10 °C.
	Inntak Vangen	Ettersom det later til å være svært begrenset omrøring ved inntaket til Vangen pr i dag, foreslås det at dette ikke er en faktor som varieres. Det bør imidlertid kontrolleres at omrøring ikke finner sted ved en økt installasjon i Aurland I med påfølgende endret driftsmønster i Vangen.

Ideelt sett burde alle kombinasjoner av disse inngangsvariablene simuleres og resulterende sjiktning/overflatetemperatur vurderes. I dialog med E-CO kan det imidlertid være fornuftig å velge ut de mest sannsynlige kombinasjoner slik at antall scenarier/modellsimuleringer reduseres. Det er også viktig å få fram hvorvidt de foreslåtte scenarier dekker de mulige kombinasjoner scenarier E-CO finner sannsynlige eller om effektene av andre faktorer/variable synes aktuelle å simulere, og evt. supplere scenarie-oppsettet med disse. Det understrekes derfor at de foreslåtte scenarier er kun ment som et utgangspunkt for diskusjon.

Det bør også vurderes om det bør utarbeides et måleopplegg for å sørge for tilstrekkelig kvalitet på inngangsdata og kalibreringsdata for en modellstudie.

SINTEF mottok 10. februar 2010 en skisse fra E-CO ved Halvor Kr. Halvorsen, datert 14. desember 2009 ("Muligheter Aurland"). Denne foreslår installasjon av energidreper for å bremse vannhastighetene inn i Vassbygdvatn. Scenariene definert over bør dekke analyse av effekten av E-COs foreslåtte tiltak. Det foreslås videre etablering av en duk i innsjøen for å hindre blanding av kaldt vann fra Aurland I inn i det varme vannet i Vassbygdvatn. Vi mener at de foreslåtte simuleringsscenariene vil analysere hvorvidt det er behov for å etablere en slik duk. Hvis det er mulig å unngå dette så hadde dette vært det beste da det vil redusere investerings- og operasjonelle kostnader samt unngå nye mulige problemer for fisk/fiske forårsaket av en slik duk.

## 5 REFERANSER

Caissie, D. 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* **51**:1389–1406.

Deas, M.L. and Lowney, C.L. 2000. Water Temperature. Modeling Review, Central Valley. California Water Modelling Forum.

Jensen A.J. 1990. Growth of young migratory brown trout (*Salmo trutta*) correlated with water temperature in Norwegian rivers. *Journal of Animal Ecology* **59**:603–614. .

Morse W.L. 1972. Stream temperature prediction under reduced flow. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, 98, 1031–1047.

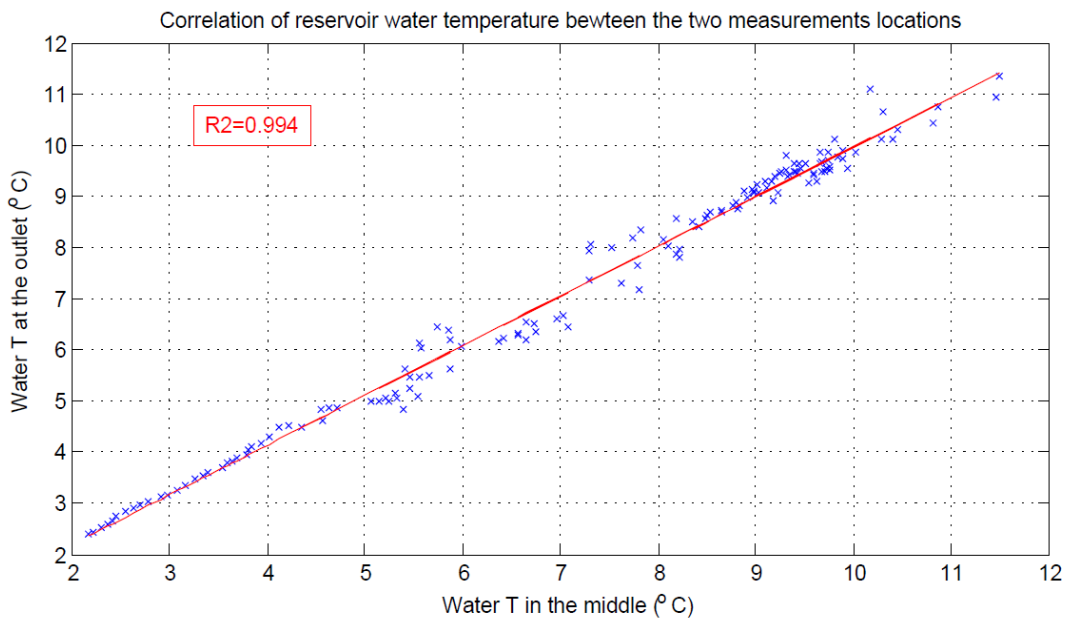
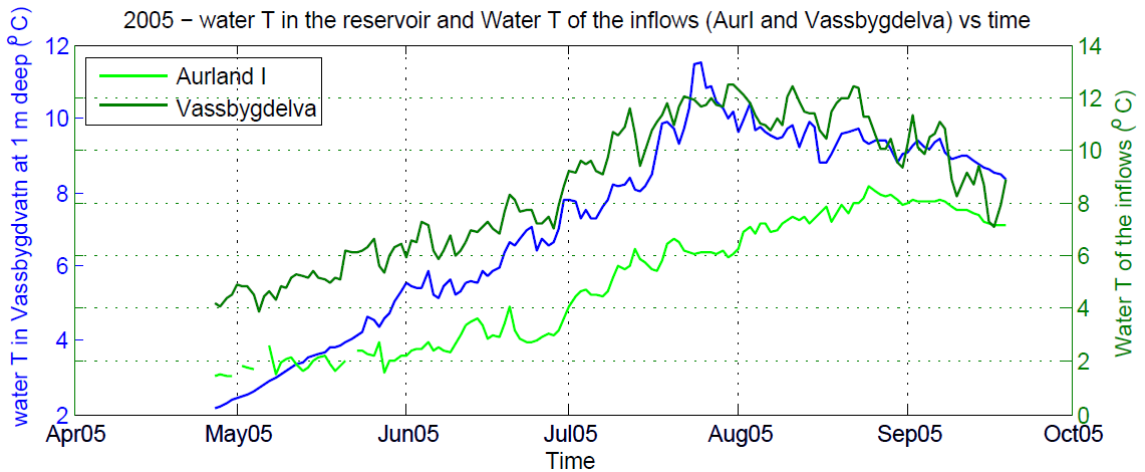
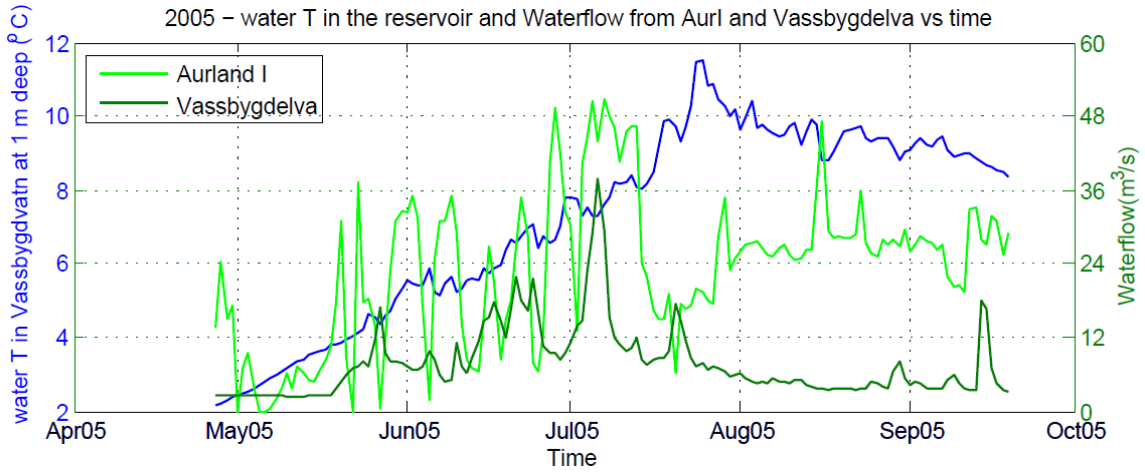
Tvede, A.M.. 2001. Vanntemperaturen i Aurlandselva. Effekten av endret sommervannføring. Statkraft Grøner rapport 2001-130741-01.

Tvede A.M. 1994: Discharge, water temperature and glaciers in the Aurland river basin. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, Vol. 48, nos.1-2.

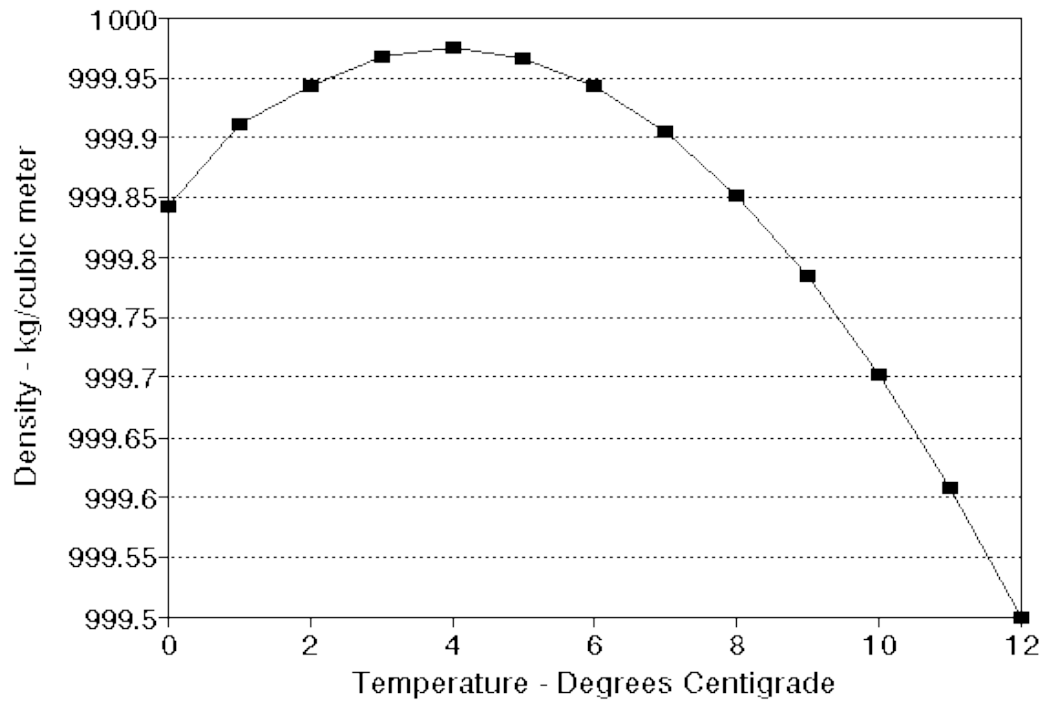
Økland, J. og Økland, K.A. 1998. Vann og vassdrag 3. Kjemi, fysikk og miljø. Vett & Viten AS. ISBN 82-412-0161-2.



**VEDLEGG – EKSTRA FIGURER**



## Density of Freshwater



Density of fresh water versus temperature  
 (from <http://www.marietta.edu/~mcshaffd/aquatic/sextant/physics.htm>)