



Temperaturforhold i elver og innsjøer

Tiltak for regulering av temperatur
Simuleringsmodeller

Kjetil Arne Vaskinn, Sweco Norge AS

3
2010



RAPPORT MILJØBASERT VANNFØRING

Rettet utgave

FoU-programmet Miljøbasert vannføring

Programmet Miljøbasert vannføring skal styrke det faglige grunnlaget for god forvaltning av regulerte vassdrag. Det skal bidra til at miljøhensyn blir ivaretatt på en balansert og åpen måte med spesiell fokus på fastsettelse av minstevannføring og andre avbøtende tiltak.

Miljøkunnskap er aktuelt i forbindelse med nye vassdragskonsesjoner, revisjon av vilkår i gamle konsesjoner, miljøtilsyn og oppfølging av vannressursloven og EUs vanndirektiv. Programmet finansieres av Olje- og energidepartementet, og er forankret i Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE).

Programmets fase II har en tidsramme på fem år (2007-2011). Programmet er organisert med en styringsgruppe, bestående av representanter fra NVE, Direktoratet for naturforvaltning og energibransjen. Ressurspersoner fra nasjonale og regionale myndigheter bistår med fagkompetanse. Den daglige ledelsen av programmet er knyttet til Skred- og vassdragsavdelingen i NVE.

Temperaturforhold i elver og innsjøer

Tiltak for regulering av temperatur
Simuleringsmodeller

Rapport nr. 3 - 2010

Temperaturforhold i elver og innsjøer

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Forfatter: Kjetil Arne Vaskinn, Sweco Norge AS

Trykk: NVEs hustrykkeri

ISSN: 1502-234X

ISBN: 978-82-410-0729-3

Forsidefoto: Storfjelltjønnna ved Tosbotn på Helgeland
Kjetil Arne Vaskinn, Sweco Norge AS

Sammendrag: Rapporten gir en oversikt over hvilke faktorer som naturlig påvirker temperaturforholdene i elver og innsjøer og tiltak som kan settes i verk for å endre på temperaturforholdene. Regulering av vassdrag med magasinering av vann og tapping fra dypere lag kan føre til uønskede temperaturendringer på strekninger i vassdraget. Det finnes en rekke muligheter for å motvirke eller redusere slike endringer. Rapporten gir også en oversikt over mulige tiltak og referanser på hvor slike tiltak er brukt. Valg av metode vil avhenge av en rekke forhold som temperatur, tappemønster og topografi.

Målinger av temperaturforholdene kombinert med simuleringer med matematiske modeller vil være gode verktøy for å vurdere mulige effekter av aktuelle tiltak. Det finnes en rekke tilgjengelige modeller for dette formålet, som rapporten gir en oversikt over. Valg av modell krever kjennskap til de lokaliteter som skal modelleres.

Emneord: Temperatur, temperaturendring, tiltak, reguleringsmagasin, matematiske modeller, miljøbasert vannføring.

Norges vassdrags- og energidirektorat
Drammensveien 211
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Desember 2010

Innhold

Forord	5
1. Sammendrag	7
2. Vanntemperatur og betydning for økologiske prosesser	9
3. Teoretisk grunnlag og definisjoner	11
Energibalanse og temperatur	11
4. Temperaturutvikling i innsjøer	14
Generelt.....	14
Energibudsjettet	15
Stråling.....	16
Fordampning og kondensasjon	16
Vind	16
Direkte inn- og utstrømning.....	18
Sesongvariasjon.....	18
Eksempler fra noen norske innsjøer	19
5. Vanntemperatur i elver	23
6. Endringer av temperatur som følge av inngrep	28
7. Tiltak for å styre eller regulere temperaturen i et vassdrag	31
Endring av temperaturen nedstrøms et magasin.....	31
Selektiv tapping.....	31
Destratifisering	34
Erfaringer.....	35
Kostnader	36
Pumper/propeller i overflaten	36
Erfaringer.....	37
Regulerbart inntaksrør	38
Erfaringer.....	40
Kostnader	40
Dykkede overløp/dykkede gardiner.....	40
Erfaringer.....	40
Bruk av hevert	40
Dempningsmagasin eller fordrøyningsmagasin	42
Erfaringer.....	42
Kostnader	42

Modifiserte ledekurver	42
Erfaringer.....	43
Kostnader	43
Andre metoder.....	43
Bruk av terskler.....	43
Tapping fra magasin med gunstigste temperatur	43
Endre vannføringen	43
Kantvegetasjon	43
Nedkjøling med snøkanoner, innpumping av kald luft.....	43
Avkjølings-/oppvarmingstårn.....	44
Oppsummering av metoder	44
8. Modeller for simulering av temperatur	46
Modelltyper	47
Hydrodynamisk beskrivelse	47
Numeriske løsningsmetoder	48
Kalibrering og verifisering.....	48
Usikkerhet.....	49
Modeller for elver.....	49
Modeller for innsjøer og magasin	50
3D CFD modeller	50
Valg av modell	50
Mulige anvendelser av temperaturmodeller i Norge	52
9. Oppsummering	53
10. Referanser.....	55
VEDLEGG 1	57
Modeller for elver.....	57
VEDLEGG 2	68
Modeller for innsjøer og magasin	68
VEDLEGG 3	79
3D-CFD - Modeller for innsjøer og magasin	79
VEDLEGG 4	86
Rutine for beregning av med-rivning ved bruk av boblegardin (Morgan, P. and Elliot, S.P (2002)).....	86

Forord

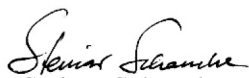
Vassdragsreguleringer endrer de naturlige temperaturforholdene i vassdragene. Endringene gjelder både sommer og vinter. Mange magasiner i Norge har inntak av vann på relativt store dyp. Dette fører ofte til lavere sommertemperatur og høyere vintertemperatur i elva nedstrøms kraftverket enn i en uregulert situasjon. Overføring av vann fører også til endringer i temperaturen, spesielt på strekninger med redusert vannføring.


I noen tilfeller kan temperaturen være vel så viktig som vannføring for de økologiske forholdene i regulerte vassdrag. Høy temperatur om vinteren kan for eksempel føre til unormalt rask utvikling av rogn i elva og for tidlig klekking av yngelen på våren. Temperatur kan også påvirke fiskens vandringsmønster.

Tappemønsteret fra reguleringsmagasin, både tidspunkt for tapping og vertikal plassering av tappeluke, vil påvirke temperaturforholdene.

Denne rapporten gir en oversikt over hvilke faktorer som er bestemmende for temperaturdynamikken i innsjøer og i elver, og hvordan vannkraftregulering kan påvirke temperaturen. Ulike avbøtende tiltak er vurdert, og det gis en oversikt over modeller som kan brukes for å simulere temperaturforhold. Vi håper resultatene fra prosjektet kan bidra til å øke kunnskapen om temperaturforhold i regulerte vassdrag, og hvilke avbøtende tiltak som kan gjennomføres.

Prosjektet er gjennomført av SWECO Norge AS med prosjektleder Kjetil Arne Vaskinn.


Steinar Schanche
leder styringsgruppe


Anja Skiple Ibrek
programleder

1. Sammendrag

Vanntemperaturen er bestemmende for mange fysiske, kjemiske, biologiske og økologiske prosesser i innsjøer, magasin og elver. Den påvirker fysiologi og atferd til bunndyr og fisk. For fisk generelt er vanntemperaturen viktig for gytetidspunkt og eggutvikling og er sammen med næringstilgang den viktigste faktoren for fiskevekst i rennende vann. Løseligheten av oksygen varierer med temperaturen. Kaldt vann har mest oksygen, men turbulens gjør at oksygen sjelden er begrensende faktor i rennende vann (Saltveit, 2006).

I Norge og internasjonalt har det vært mye fokus på temperaturens betydning for laksebestanden. Det er publisert mange artikler med fokus på dette. Jensen med flere (2002) gir en meget omfattende oversikt over dette temaet. Rapporten har sammenfattet kunnskap om effekten av temperatur og temperaturendringer på de ulike livshistoriestadiene til Atlanterhavslaks (*Salmo salar*) og danner et godt grunnlag for å vurdere hvilke effekter temperaturforandringer i forbindelse med vassdragsreguleringer kan ha på laks.

Endringer av vanntemperatur i vassdrag som følge av inngrep i form av reguleringer er et område som i Norge og andre steder har fått stor oppmerksomhet.

Vassdragsreguleringer påvirker ca. 1/3 (185 av 640) av alle norske lakseførende vassdrag. I 106 av de 185 berørte vassdragene er reguleringen vurdert som en trussel mot laksebestanden (NOU 1999). Fylkesmennenes miljøvernmyndigheter vurderer vassdragsreguleringer som en trusselfaktor i 16 % av de norske lakseelvene (NOU 1999). Berørte elver utsettes for fysiske og hydrologiske endringer, som for eksempel endringer i vannføring og temperatur. Graden av endringer varierer sterkt.

Denne rapporten gir en oversikt over hvilke faktorer og forhold som er bestemmende for temperaturforholdene i elver og innsjøer og magasin. Dette omfatter meteorologiske, hydrologiske, topografiske og andre forhold.

Med utgangspunkt i oversikten gis det beskrivelse av mulige tiltak for å styre tappingen av vann fra magasiner, slik at en oppnår mest mulig optimale forhold i vassdragene nedstrøms utslippet. I utgangspunktet er det to prinsipielt forskjellige måter en kan endre temperaturen i vann fra et magasin eller innsjø. Enten kan en utnytte lagdelingen i innsjøen/magasinet, eller så kan en søke å bryte ned lagdelingen. Den første situasjonen bygger på en teknikk som i litteraturen kalles selektiv tapping. Dette betyr at en tapper vann fra lag i innsjøen med ønsket temperatur. Ved hjelp av denne metoden kan en både heve og senke temperaturen i vannet hvor en slipper vannet ut.

Når den andre metoden benyttes, installeres en eller annen anordning for kunstig destratifisering. Dette kan skje ved at luft blir pumpet inn i bunnlagene, eller ved hjelp av en eller annen form for mekanisk blanding.

Metodene som er beskrevet, vil også kunne benyttes i situasjoner der vann som tappes skal benyttes i industriell sammenheng, for eksempel i forbindelse med fiskeoppdrett.

Det er utviklet et stort antall modeller for simulering av temperaturforhold i elver og innsjøer/magasin. Mange av modellene som benyttes for å simulere temperatur, gir også mulighet for simulering av vannkvalitetsparametre. Modellene som er tatt med i oversikten, er modeller som kan tilpasses de fleste typer vassdrag gjennom inngangsdata og krever derfor ikke kunnskap om programmering. Den viktigste forutsetningen for å benytte en modell er at man har grunnleggende kunnskap om de forhold som en vil simulere. I rapporten er det tatt med oversikt over operative modeller som kan benyttes til simuleringer av virkningen av foreslåtte tiltak. Oversikten omfatter modeller for både elver og innsjøer.

2. Vanntemperatur og betydning for økologiske prosesser

Vanntemperaturen er bestemmende for mange fysiske, kjemiske, biologiske og økologiske prosesser i innsjøer, magasin og elver. Den påvirker fysiologi og atferd til bunndyr og fisk. For fisk generelt er vanntemperaturen viktig for gyttidspunkt og eggutvikling, og er sammen med næringstilgang viktigste faktorer for fiskevekst i rennende vann. Løseligheten av oksygen varierer med temperaturen. Kaldt vann har mest oksygen. Turbulens gjør at oksygen sjelden er begrensende faktor i rennende vann (Saltveit, 2006). Vanntemperaturens betydning for det økologiske system er presentert i en rekke artikler.

I Norge og internasjonalt har det vært mye fokus på temperaturens betydning for laksebestanden og mange artikler er presentert med fokus på dette. Jensen et al. (2002) gir en meget omfattende oversikt over dette. Rapporten har sammenfattet kunnskap om effekten av temperatur og temperaturendringer på de ulike livshistorie-stadiene til Atlanterhavslaks (*Salmo salar*). Den danner et godt grunnlag for å vurdere hvilke effekter temperaturforandringer kan ha på laks i forbindelse med vassdrags-reguleringer.

Lakseegg ligger nedgravd i elvegrusen gjennom vinteren. Utviklingstiden for egg er temperaturavhengig, og eggene klekker på våren/forsommeren. I de første ukene etter klekkingen oppholder yngelen seg nede i grusen og ernærer seg av plommesekken. Varigheten av dette stadiet er også temperaturavhengig. Når plommesekken nesten er brukt opp, svømmer yngelen opp fra grusen og begynner å ta til seg føde. Egg og plommeseckyngel er sårbare med hensyn til temperatur.

Utviklingen av fiskefosteret påvirkes av flere faktorer der vanntemperatur og oksygentilgang er blant de viktigste.

Vanntemperaturen påvirker ikke bare eggutviklingstiden, men også rekkefølgen i dannelse av organer, utviklingsstadium og størrelse på klekkesidspunktet, klekkeprosessen samt dannelse og vekst av muskelceller (Jensen et al. 2002).

Det er utviklet modeller for estimering av klekkesidspunkt for laks. Disse kan gi svært viktig informasjon både innen oppdrettsnæringen og i ville bestander og gir mulighet til å forutsi endringer i klekkesidspunkt som følge av temperaturforandringer.

Endringer av temperaturregimet i et vassdrag, for eksempel som følge av en regulering, kan påvirke klekkesidspunktet for laks. Tiden det tar fra yngelen klekker til den kommer opp av grusen og begynner å ta til seg mat er temperaturavhengig og synker med økende temperatur. Menneskelige inngrep som endrer vanntemperaturforholdene kan endre klekkesidspunktet.

Optimal temperatur for vekst av yngel og parr av laks ligger mellom 16 og 20 °C.

Temperatur er en viktig faktor som er med på å styre atferden til laks knyttet til fødeaktivitet, habitatvalg og migrasjon.

Både vannføring og vanntemperatur kan være utløsende faktorer for utvandring av laksesmolt. Hvilken faktor som har størst betydning kan variere fra elv til elv, men det kan også være et samspill mellom de to faktorene.

Økende vannføring er den viktigste initierende faktoren for oppvandring av laks fra sjøen og inn i et vassdrag. Vanntemperaturen har stor betydning for laksens passering av vandringshindre. Den laveste kritiske vanntemperaturen som er nødvendig for at laksen skal kunne passere et vandringshinder varierer fra lokalitet til lokalitet. Den er således ikke en fast verdi, men varierer avhengig av hindringens størrelse og form. Vanntemperaturer under 5 °C gjør det vanskelig for laks å passere selv små hindringer. Når temperaturen i elvene overstiger 20-25 °C, avtar oppvandringen av laks.

Vanntemperaturer opp mot 20 °C kan gi høy dødelighet. I enkelte norske lakseelver kan det være så høye vanntemperaturer i fiskesesongen.

Vassdragsreguleringer påvirker ca. 1/3 av alle norske lakseførende vassdrag (NOU 1999). De berørte elvene utsettes for fysiske og hydrologiske endringer, som for eksempel forandringer i vannføring og temperatur. Graden av endringer varierer sterkt og er blant annet avhengig av om det er elvekraftverk eller magasinkraftverk. Selv om laksebestanden har gått tilbake i noen elver som følge av regulering, har mange lakse- og sjøørretbestander i regulerte elver holdt seg godt.

3. Teoretisk grunnlag og definisjoner

Temperatur er en fysisk faktor som påvirker mange av vannets egenskaper. Dette gjelder både ferskvann og saltvann. Det meste av biologisk aktivitet påvirkes derfor direkte og indirekte av temperatur.

Den mest åpenbare er temperaturen hvor vannet fryser til is. Dette betegnes ved vannets smeltepunkt og er forskjellig i ferskvann og saltvann. For ferskvann er smeltepunktet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens det for rent sjøvann er $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Høy fordampningsvarme er en annen viktig egenskap ved vann. En stor varmemengde fjernes ved fordampning framfor å gi økt oppvarming av vannet. Et annet forhold som motvirker oppvarming av vann er sammenhengen mellom fordampningshastigheten og metningsunderskuddet for vanndamp i luft.

Metningsstrykket for vanndamp i luft øker raskt med stigende temperatur. Dette gjør at metningsunderskuddet for vann, og dermed varmeavgangen gjennom fordampning, er høy ved høy temperatur. En temperaturøkning går derfor tregere ved høy enn ved lav temperatur, og denne effekten bidrar vesentlig til å motvirke en temperaturstigning i vann utover $25\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vannets viskositet er også avhengig av temperatur. Enhver temperaturendring er likevel relativt langsom i vann sammenliknet med luft. Dette skyldes at vann har en høy spesifikk varmekapasitet.

En annen viktig temperaturavhengig egenskap er vannets evne til å løse oksygen. Når temperaturen stiger, synker vannets løselighet for oksygen raskt. Vannets oksygeninnhold ved $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ er bare halvparten av innholdet ved $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette betyr at det blir mindre tilgjengelig oksygen i vannet med økende temperatur, samtidig som mange organismer har raskt økende forbruk av oksygen med økende vanntemperatur.

Av de parametrene som brukes til å karakterisere vannkvalitet (f.eks. vanntemperatur, oppløst oksygen, suspendert stoff, pH, næringsstoffer og metaller) er temperatur en av de enkleste og billigste parametre å overvåke i felt. Ethvert forsøk på å beskrive temperatur og kvalitetsforholdene i en vannforekomst bør derfor starte med måling av temperatur.

Dette kapitlet gir et kort sammendrag av fundamentale prinsipper for å beregne temperaturforhold i vassdrag, dvs. den styrende energibalanse (varmeoverføring og transport).

Energibalanse og temperatur

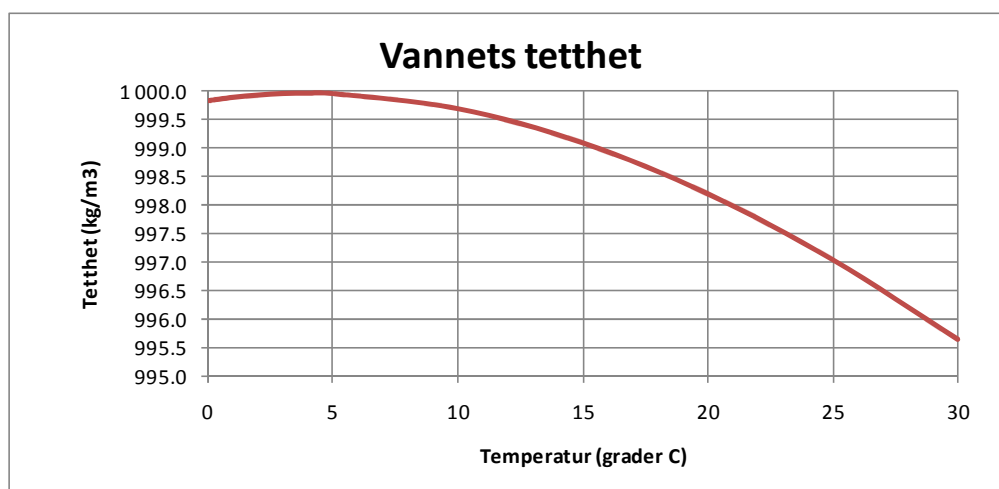
Temperatur uttrykkes i grader Celsius ($^{\circ}\text{C}$). I utenlandsk litteratur benyttes også grader Kelvin (K) eller Fahrenheit (T_F). Forskjellen mellom Celsius- og Kelvin-skalaene er

at 0 °C tilsvarer 273,16 K. En grad økning i temperatur på Celsius-skalaen tilvarer 1 grad økning på Kelvin-skalaen. I mange internasjonale publikasjoner benyttes Fahrenheit. Omregningen fra den ene skalaen til den andre er vist i Tabell 1.

Tabell 1 Omregning mellom Celsius og Fahrenheit

Grader Celsius (T_C) til Fahrenheit (T_F)	$T_F = 9/5 * T_C + 32$
Grader Fahrenheit (T_F) til Celsius (T_C)	$T_C = 5/9 * (T_F - 32) \text{ } ^\circ\text{C}$

Vanntemperaturen er bestemmende for vannets tetthet. For ferskvann er forholdet mellom temperatur og tetthet vist i Figur 1. Til sammenlikning viser Tabell 2 tettheten på luft og vann.



Figur 1 Tettheten på ferskvann som funksjon av temperatur

Tabell 2 Tettheten på luft og vann (kg/m^3)

Materiale	Temperatur			
	0 (°C)	10 (°C)	20 (°C)	30 (°C)
Luft	1.292	1.246	1.204	1.164
Ferskvann	999.87	999.73	998.23	995.68
Saltvann 3,1 %	1028.11	1026.95	1024.76	1021.73

Varme og temperatur måles ikke med de samme enhetene. Enhetene knyttes sammen gjennom spesifikk varme til materialet. Den formelle sammenhengen beskrives med følgende ligning:

$$\Delta T = \Delta H / (\rho V C_s)$$

H (Joule) = Varmeenergien i volumet V

C_s = spesifikk varmekapasitet

Tabell 3 Spesifikk varme for luft og vann (J/kgK)

Materiale	Temperatur			
	0 (°C)	10 (°C)	20 (°C)	30 (°C)
Luft	1006	1006	1006	1006
Vann	4218	4192	4182	4179

Når temperatur skal modelleres, benyttes som regel ligninger for energibalanse for å beregne overflatetemperaturer. Disse ligningene uttrykker energioverføring, f.eks. joule pr. sekund eller watt.

4. Temperaturutvikling i innsjøer

Generelt

Blanding av vann i innsjøer og magasin styres i stor grad av lagdelingen (stratifiseringen). Stratifisering reduserer utveksling vertikalt i vannmassene og kan føre til økt horisontal utveksling. Stratifiseringen i innsjøer og magasin skyldes ulik temperatur, oppløste stoffer og suspendert partikulært materiale i vann. De to siste komponentene er generelt sett neglisjerbare i innsjøer og magasin. Dette betyr at stratifiseringen er dominert av temperaturvariasjoner. Denne er i neste omgang en funksjon av energibalansen og blandingsprosesser i vannmassene.

Dette kapitlet gir en diskusjon av utviklingen av lagdeling, fulgt av en beskrivelse av energitilførselen til innsjøer og magasin. Tilførsel av energi til en innsjø eller magasin følger et årlig mønster: Innsjøene er lagdelt om vinteren og om sommeren og har perioder med full blanding (omlagring) om høsten og våren. Det er viktig å forstå prosessen med stratifisering og blanding for å kunne forstå tiltak for å gi ønsket temperatur på vannet i elver og tappeløp nedstrøms regulerte innsjøer og magasin. Det blir derfor gitt en oversikt over viktige prosesser som påvirker temperaturutviklingen i innsjøer.

Det forskes mye på dynamikken i magasin med tanke på blanding og stratifisering. Detaljene i disse prosessene kan være svært kompliserte. Dette gjelder for eksempel utvekslingen av energi mellom sedimenter og vann som følge av seiches (indre bølger i sprangsjiktet), utveksling mellom grunnvann og fritt vann i innsjøer og magasin, reduksjons- og oksydasjonsprosesser, turbulens og stratifisering. Flere klassiske bøker er tilgjengelig på dette området, f.eks. Imboden og Wüest (1995) og Fisher et al. (1979).

De fleste vannforekomster er til en viss grad lagdelte. Stratifiseringen i innsjøer og magasin er sterk nok til å spille en dominerende rolle i blandingsprosessene. Ettersom vann i innsjøer og magasin for en stor del består av ferskvann, er termisk stratifisering en dominerende faktor. Lokalt kan imidlertid andre prosesser være dominerende. Dette gjelder for eksempel der elver kommer inn i innsjøene, og hvor det er store konsentrasjoner av oppløst eller suspendert materiale som øker tettheten. Her vil sterke gradienter av konsentrasjon være dominerende.

Utvikling av lagdeling i innsjøer påvirkes av tre hovedfaktorer:

1. Innsjøer og magasin har forholdsvis liten gjennomstrømning med lave strømningshastigheter, ofte laminær strømming. Resultatet av dette er at blandingen ofte skjer ved molekylær diffusjon, med unntak av det øverste laget hvor vinden dominerer. Dette gjør det mulig å opprettholde stabile gradienter for temperatur og tetthet.
2. Vann i innsjøer og magasin har lange oppholdstider. Dette er viktig fordi oppvarming og avkjøling er prosesser som tar lang tid. Kjemiske

prosesser bidrar også, men er i denne sammenheng ikke viktig. Dersom oppholdstiden i et reservoar eller en innsjø er for kort, så er det ikke tilstrekkelig tid til at det kan utvikles lagdeling. Den turbulente blandingen er i slike situasjoner dominerende.

3. Innsjøer og magasin er relativt ofte dype i forhold til overflatearealet. Dette reduserer ofte påvirkningen fra overflaten til bunnen. Vertikal lagdeling er således viktigere dess dypere innsjøene er.

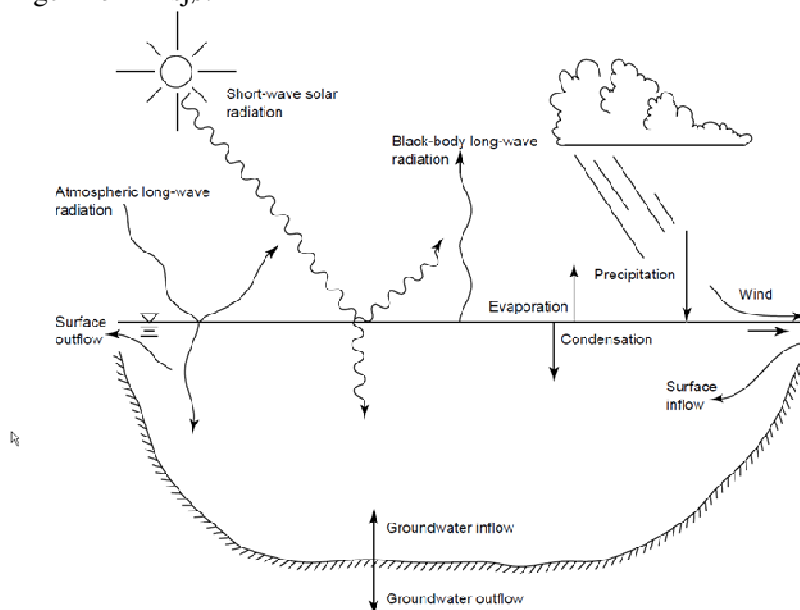
Med andre ord: Vertikal lagdeling øker med oppholdstid, dybde og vindskjerming. I innsjøer med kort oppholdstid, små dybder og kraftig vindpåvirkning vil en ha mindre stratifisering, i mange tilfeller ingen.

Energibudsjettet

Den totale energiutvekslingen mellom en innsjø og omgivelsene er summen av termisk E_t og mekanisk energi. Den mekaniske energien består av to komponenter; potensiell energi E_p og kinetisk energi E_k . Følgende ligning kan derfor settes opp:

$$dE_{tot}/dt = dE_p/dt + dE_k/dt + dE_t/dt$$

E_{tot} er det totale energiinnholdet i en innsjø. Den potensielle energien er vanligvis definert som forskjellen mellom aktuell tilstand i en innsjø og den potensielle energien i en fullstendig blandet innsjø. Siden den potensielle energien i en fullstendig blandet innsjø (complete mixed) er høyere enn det en har i en lagdelt innsjø, er denne differansen alltid negativ. Den kinetiske energien i en innsjø beskriver energien i vannet som er i bevegelse i innsjøen. Den termiske energien er varmeinnholdet i innsjøen. Figur 2 viser hovedkomponentene som påvirker stratifiseringen i en innsjø.



Figur 2 Prosesser som påvirker temperaturforholdene i en innsjø (Socolofsky, S.A., and Jirka, G.H. 2004)

Noen av disse påvirkningene, som f.eks. solstråling (solar radiation), varmer vannet direkte, og gjennom dette skapes det kraftigere stratifisering. Andre av disse komponentene setter vannet i bevegelse og skaper blanding som i neste omgang resulterer i redusert stratifisering. Dette gjelder primært vind. Noen av komponentene kan både øke og redusere stratifiseringen.

Stråling

Det er to typer stråling som er viktig: kortbølget stråling fra sola og langbølget stråling. Noe av strålingen fra sola reflekteres i vannoverflata, den resterende delen trenger ned i vannmassene. Det meste av strålingen som trenger ned i vannet omvandles til varme. Hvor langt ned i vannmassene strålingen trenger, avhenger av bølgelengden. Blått lys beveger seg raskest og trenger dypest ned i vannmassene. Den blå delen av lyset kan avbøyes og gå ut av vannmassene mot atmosfæren igjen. Dette kan gi innsjøer en blålig farge.

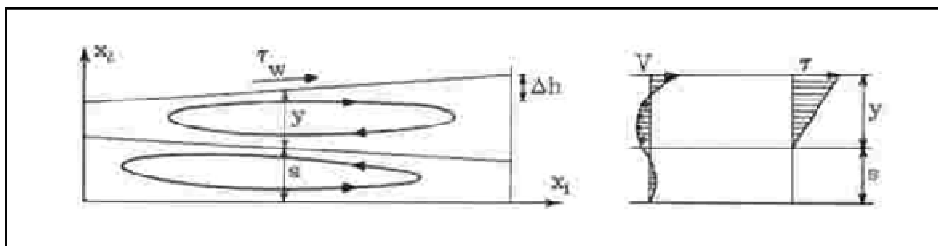
Alle legemer stråler ut langbølget stråling. Dette gjelder både innsjøer og atmosfære. Dersom en har skyer eller høy fuktighet i luften, vil denne strålingen fra atmosfæren være spesielt stor. Langbølget innstråling til et reservoar blir delvis reflektert fra overflaten. Den strålingen som trenger ned i vannet øker energiinnholdet og fører derfor til temperaturøkning. Utstrålingen fra en innsjø fører til tap av energi og dermed redusert temperatur i overflaten.

Fordampning og kondensasjon

Ved fordampning overføres vann til vanndamp, og dette krever varme. Ved kondensasjon skjer det motsatte – vanndamp overføres til vann og fordampningsvarmen frigis. I tillegg til å påvirke energibalansen, påvirker disse prosessene vannbudsjetten. Spesielt i tropiske strøk kan fordampning fra innsjøer og magasin være betydelig.

Vind

Vinden er den viktigste faktoren som påvirker blandingen. Vinden tilfører kinetisk energi til innsjøene og påvirker på den måten stratifiseringen. Vinden påvirker innsjøene og reservoarene gjennom skjærspenning i overflaten. Dette kan skape strømning i samme retning som vinden blåser i overflaten. Hastigheten på strømmen i overflaten er ofte ca. 1-2 % av vindhastigheten. Dette skaper overflatebølger og fører til en helning av overflaten. Overflaten vippes opp i den enden av innsjøen som vinden blåser mot. Denne helningen skaper en intern strøm i reservoaret eller innsjøen som går i motsatt retning i dyplagene (kompensasjonstrøm).

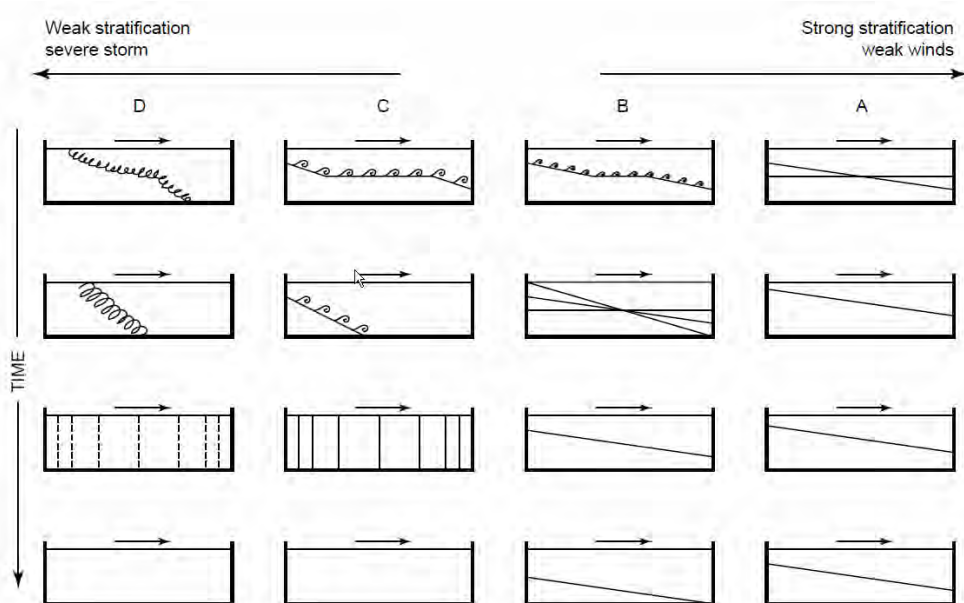


Figur 3 Sirkulasjonsstrømmer pga. vind (Engelund og Christensen, 1969)

Figur 3 viser et skjematisk bilde av en innsjø med et øvre og nedre lag. Den vertikale aksens angir dybden, mens den horisontale gir et bilde av variasjonen på langs av magasinet. Skjærspenningen som følger av vind (τ_w), fører til en heving av vannstanden i enden av magasinet og vippes opp med en høyde Δh . Dette skjer ved at vinden skaper en strøm i overflaten, med retur i nedre deler av det øvre laget. På grunn av friksjonen mellom det øvre og nedre laget skapes det en tilsvarende strøm i det nedre laget.

Selv om helningen på overflaten bare er noen få millimeter, vil dette resultere i betydelig større helning av tetthetsflater/sprangsjikt nede i vannmassene. Når vinden avtar, vil disse helningene av overflate og sprangsjikt resultere i indre svingninger av sprangsjiktet, såkalte seiches. Disse interne svingningene resulterer i senkning av sprangsjiktet.

Figur 4 gir en skjematisk framstilling av hvordan vind kan påvirke stratifisering/blandingen i en innsjø. Hver liten boks i figuren gir et skjematisk bilde av en innsjø. Strekene som går diagonalt representerer sprangsjiktet. Krøllene på disse angir grad av turbulens langs sprangsjiktet. Ved sterk stratifisering og svak vind vil en få en vipping av sprangsjiktet. Jo sterkere vind det er, dess sterkere vil kompensasjonsstrømmene som settes opp bli. Det vil etter hvert danne seg bølger på de interne tetthetsflatene. Dette vil øke blandingen mellom det øvre laget over sprangsjiktet og vannmasser i de dypere lagene. Dersom vinden varer lenge og stratifiseringen er svak, vil slik vind kunne føre til at vannmassene blandes helt. I forbindelse med sterk vind på en stratifisert innsjø vil sprangsjiktet kunne vippes så mye at dyplagene kommer opp til overflaten.



Figur 4 Virkningen av vind på sprangsjiktet (Socolofsky, S.A., and Jirka, G.H. 2004)

Dersom dette skjer slik at dyplagene kommer opp ved utløpet av elv, vil det kunne gi raskt fall i temperaturen på elvevannet. Eksempler er Vorma nedenfor Mjøsa og Nidelva nedenfor Selbusjøen. Dersom en har et inntak som ligger dypt og under sprangsjiktet, som for eksempel et drikkevannsinntak, vil det kunne bli store endringer i temperaturen.

Når vinden avtar eller slutter, vil sprangsjiktet kunne pendle eller svinge fram og tilbake. Denne bevegelsen vil gi som resultat at vann fra det øverste laget blandes ned i underliggende vannmasser.

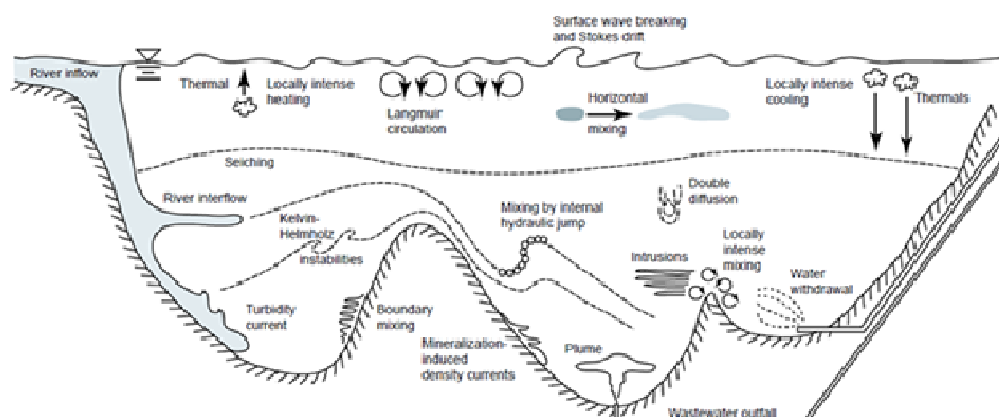
Direkte inn- og utstrømning

Direkte innstrømning til et reservoar eller innsjø inkluderer elver og bekker, grunnvann, innstrømning fra overføringstunneler og nedbør.

Utstrømning fra magasin eller innsjøer kan være elver i overflaten, grunnvann eller uttapping fra tunneler eller rør til drikkevann eller overføringer til kraftverk.

Hver av disse prosessene fører til varmekraft eller varmestrøm. Disse kan være positive (tilføre energi) eller negative (fjerne energi). Det viktigste i denne sammenhengen er inn- og utstrømning av elver og overføringer i tunneler til for eksempel vannkraftverk.

Når inn- og utstrømning resulterer i ustabile gradienter, som for eksempel når det faller kaldt regn på overflaten til en innsjø, introduseres det tetthetsstrømmer som fører til økt blanding.

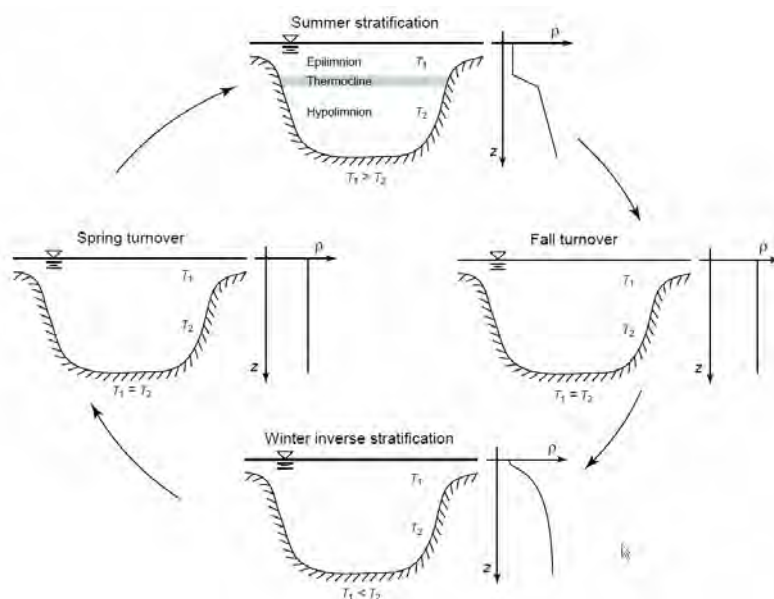


Figur 5 Blandingsprosesser i en innsjø eller magasin (Socolofsky, S.A., and Jirka, G.H. 2004)

Sesongvariasjon

Innsjøer og magasin har årlige sykluser når det gjelder stratifisering og blanding. Dette skyldes den sesongmessige variasjonen i innstråling fra solen. I Figur 6 er det vist et skematisk bilde av denne variasjonen.

Om sommeren er det kraftig innstråling fra sola. Dette, sammen med varm luft, fører til at det i de fleste innsjøene bygges opp ei sterk lagdeling. Overflatelaget er nå



Figur 6 Årssyklus i innsjø eller reservoar (Socolofsky, S.A., and Jirka, G.H. 2004)

varmere enn de dype lagene. Vinden resulterer i at det øverste laget, kalt epilimnion, blandes godt. Under dette laget dannes det et lag med stor temperaturgradient. Dette laget blir kalt sprangsjiktet eller termoklinen. Under sprangsjiktet ligger et lag med temperaturer på ca. 4 grader, men med en svak temperaturgradient.

Sprangsjiktet danner en sperre for transport av materiale mellom epilimnion og hypolimnion og mellom atmosfæren og hypolimnion. Når innstrålinga fra sola blir svakere og temperaturen i lufta blir lavere, starter avkjølingen av overflatelaget. Denne nedkjølingen fortsetter til temperaturen i epilimnion nærmer seg temperaturen i hypolimnion. Når dette skjer, er vannmassene i reservoarene og innsjøene relativt ustabile (ikke stratifisert). I denne situasjonen vil selv svake vinder føre til at all vannmasse blandes. Denne situasjonen kalles høstsirkulasjonen. Hvor lenge en har denne situasjonen, avhenger helt av temperatur og vindforholdene og av dybden på innsjøen.

Eksempler fra noen norske innsjøer

De fleste innsjøene og magasinene i Norge har et mønster for variasjon av temperaturen og dermed tetthetsforholdene over året, slik som det er beskrevet ovenfor. Dette skyldes at vannets tetthet er dominert av temperaturforholdene:

- Vannet har maksimal tetthet over frysepunktet når temperaturen er 3,94 °C ved 1 atmosfære trykk.
- Is har lavere tetthet enn vann.
- Tetthetsdifferansen pr. grad øker når temperaturen stiger over 4 °C og synker fra 4 til 0 °C.

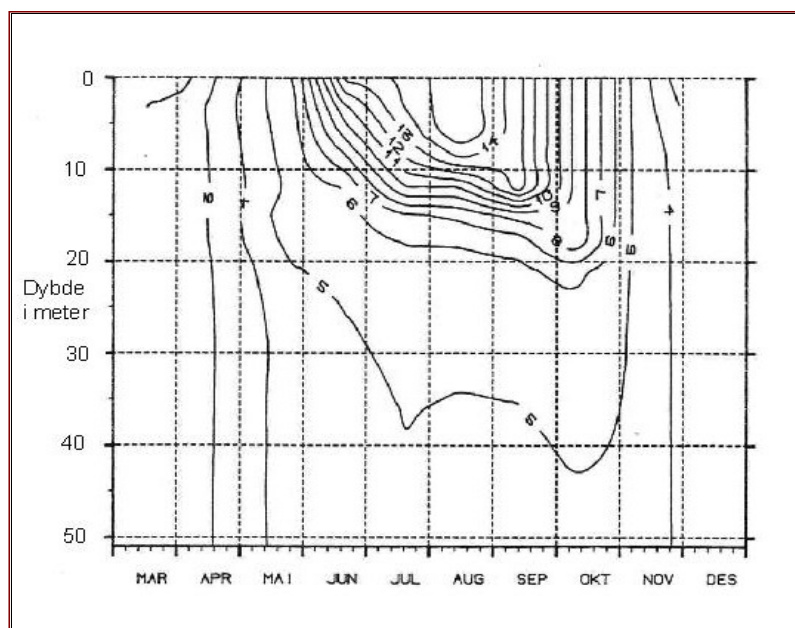
Dette gjør at man om sommeren vil få utviklet markerte sjiktninger i vannmassene, med vann med høy temperatur øverst og relativt kaldt vann i de dypere lagene. Hvor tykt det øverste sjiktet blir, avhenger av de prosesser som fører til blanding av de ulike lagene.

I vintersituasjonen vil en ha tilsvarende lagdeling. I denne situasjonen skyldes lagdelingen at vann med temperatur lavere enn $3,94\text{ }^{\circ}\text{C}$ er lettere enn vann med denne temperaturen. I Figur 5 er det vist en skisse over ulike blandingsprosesser i en innsjø.

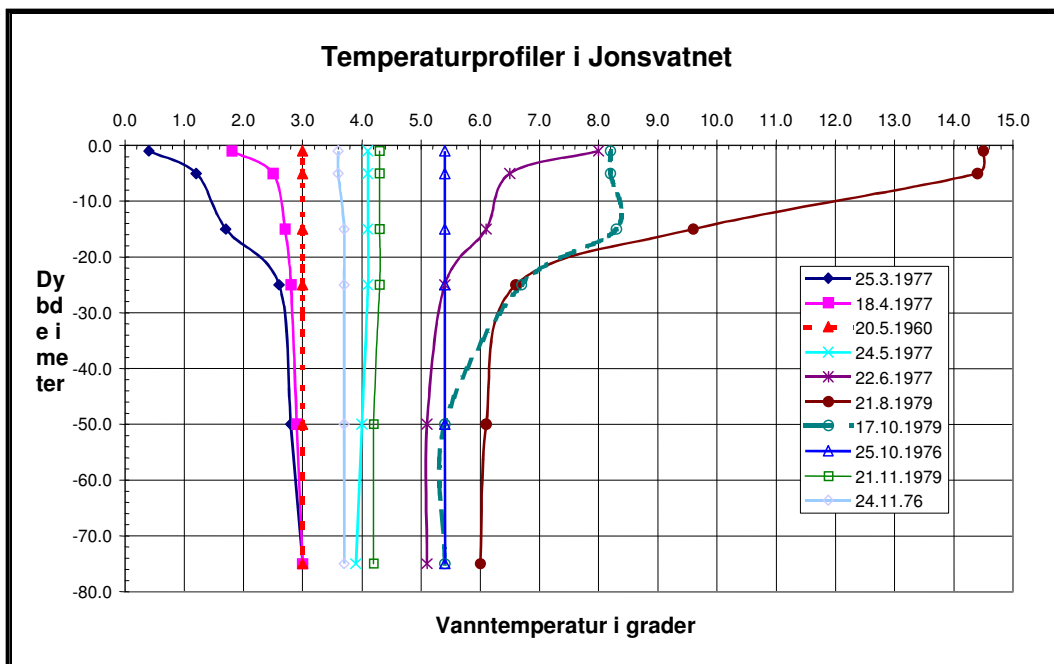
De viktigste naturlige blandingsprosesser er:

- vår- og høstsirkulasjon
- blanding pga. vind
- blanding pga. innløp av elver og bekker

Så lenge temperaturen i vannmassene er i nærheten av $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, er forholdene labile slik at selv svake vinder kan gi sirkulasjon og turbulens i vannmassene. I slike situasjoner er det normalt med samme temperatur fra bunn til overflate. Data for temperatur i innsjøer kan presenteres på en rekke måter. En vanlig måte er å benytte isolinjer. Eksempel på en slik presentasjonsmåte er vist i Figur 7. Figuren viser tydelig når på året man har lagdeling og når man har sirkulasjon.



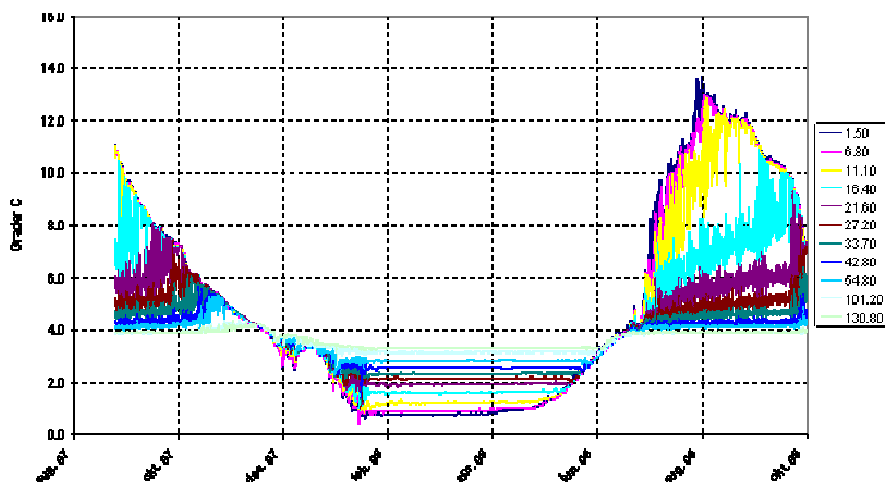
Figur 7 Isolinjer for temperatur (Vaskinn, 1983)



Figur 8 Temperaturprofiler i Jonsvatnet

Data kan også presenteres som temperaturprofiler som vist i Figur 8. Data for Jonsvatnet er brukt som eksempel. Sirkulasjonene forekommer i april/mai og november/desember.

Vind kan gjøre at vår- og høstsirkulasjonen fortsetter til vannet har temperatur på flere grader over eller under 4, før de dype lagene begynner å stagnere. Målinger i Jonsvatnet viser temperaturer på 3 °C i de dypeste lagene etter høstsirkulasjonen i 1977 og 1960 og temperaturer på 5 til 6 °C etter vårsirkulasjonen i 1976 og 1979. Liknende forhold vises også ved data fra andre innsjøer, for eksempel Femunden, hvor en har målt temperaturer på 1,5 °C på 120 meters dyp. I vindutsatte innsjøer og magasin blir temperatursjiktningen om sommeren svakere. I situasjoner med sterk vind vil noe varme grunnet turbulens i sprangsjiktet transporteres ned i de øverste vannlagene i hypolimnion og varme opp disse. En annen måte å presentere temperaturforholdene i en innsjø er vist i Figur 9.

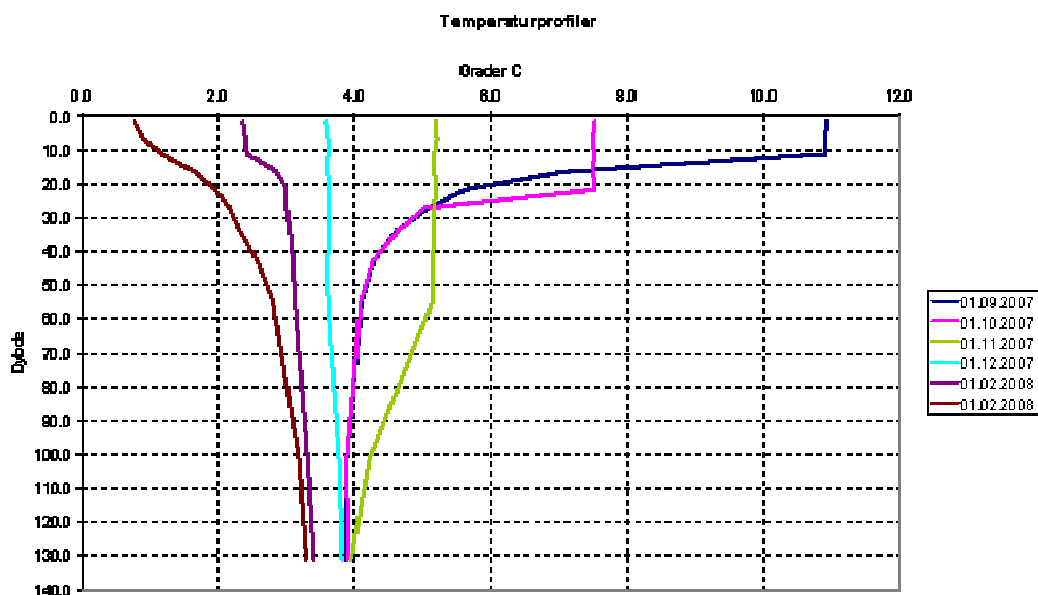


Figur 9 Temperaturforholdene i Forsnavatnet i Nordland

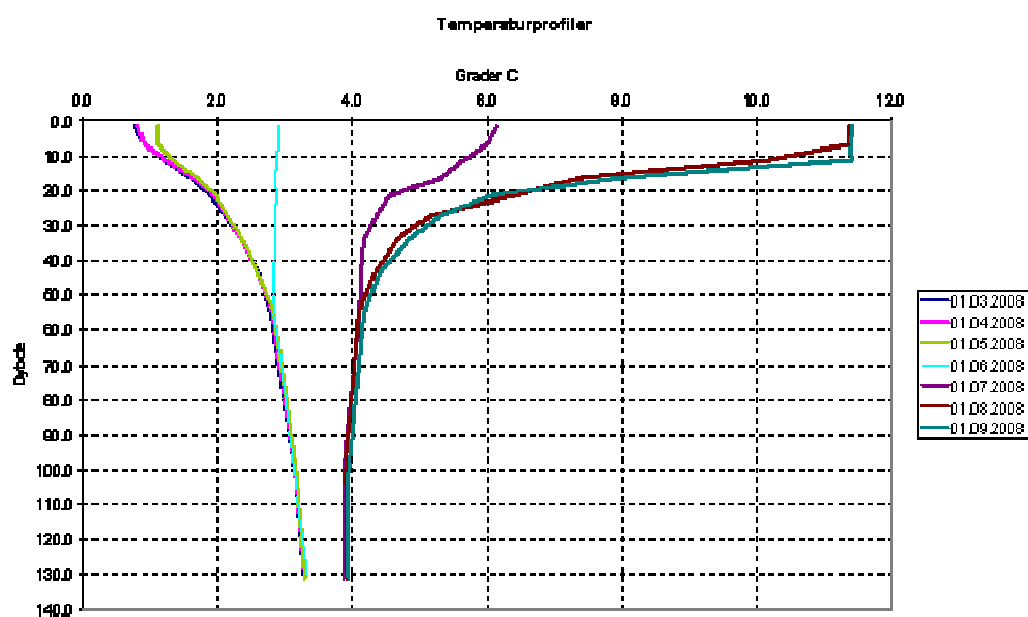
Figuren viser perioden fra august 2007 til oktober 2008. I denne perioden er det tre perioder med lagdeling:

1. fram til ca. 1. november
2. perioden fra ca. 1. januar til ca. 1. mai
3. perioden fra 1. juli til måleperiodens slutt.

I perioden fra 1. januar til ca. 1. mai er temperaturlinjene helt parallelle. Dette skyldes at i denne perioden har vannet et islag, slik at temperaturforholdene ikke blir påvirket av vind.



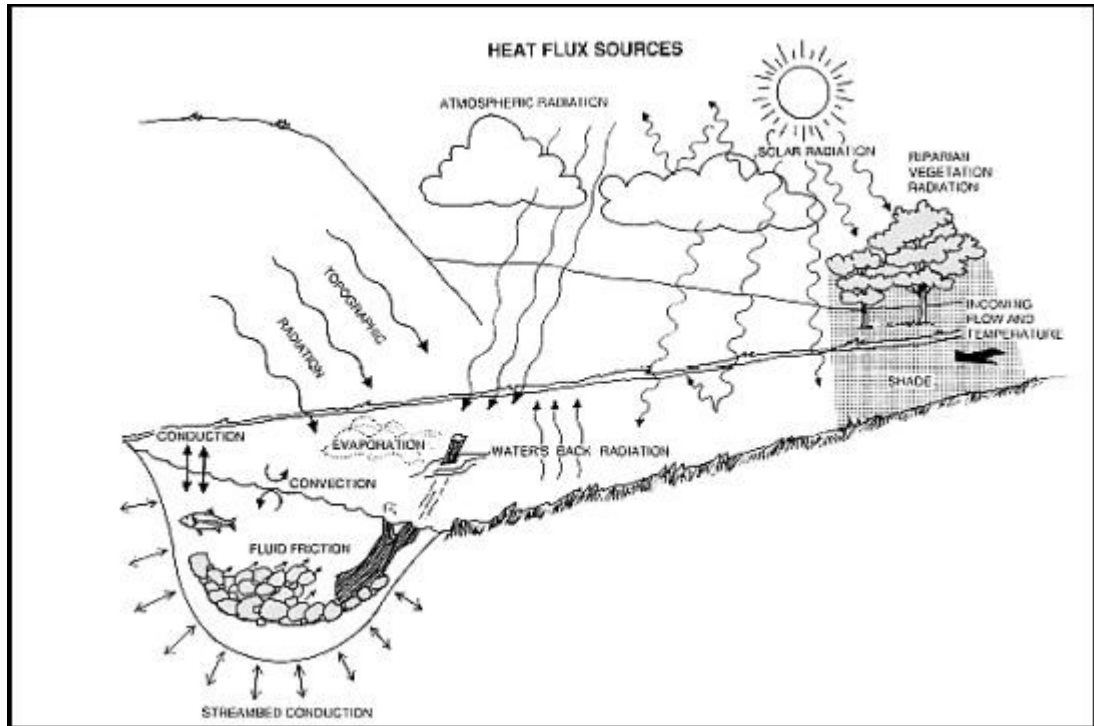
Figur 10 Temperaturer i Forsanvatnet som profiler (1.9.2007 til 1.2.2008)



Figur 11 Temperaturer i Forsanvatnet som profiler (1.3.2008 til 1.9.2008)

5. Vanntemperatur i elver

I Figur 12 er det gitt en oversikt over energifluksen mellom ei elv og omgivelsene.



Figur 12 Varmebalanse for ei elvestrekning (Bartholow 1989)

For å gjøre en realistisk vurdering av de mulige endringer av temperaturen på ei elvestrekning nedstrøms et reservoar eller innsjø, må en i tillegg til å ta hensyn til temperaturfordelingen i reservoaret også ta hensyn til mulige endringer av temperaturen på elvestrekninger. For å kunne gjøre dette må en ta hensyn til varmembalansen for den aktuelle elvestrekningen. Temperaturen i nedstrøms ende av ei strekning avhenger av temperaturen i oppstrøms ende og av energitilførsel eller tap på strekningen.

Man benytter følgende notasjon:

$T_{D/S}$ = temperatur i nedstrøms ende

$T_{U/S}$ = temperatur i oppstrøms ende

Q_{solar} = kortbølget stråling fra sola

$Q_{evapoation}$ = fordamping/evaporasjon

$Q_{conduction}$ = konduksjon/ledning

$Q_{longwave}$ = langbølget stråling

Δt	= tid som vannet trenger på strekningen
A	= overflateareal
V	= volum av strekningen
ρ	= tettheten på vann
c_p	= varmekapasiteten til vann
H	= midlere dybde

Ligning for temperaturen i nedstrøms ende av ei elvestrekning:

$$T_{D/S} = T_{U/S} + (Q_{\text{solar}} + Q_{\text{conduction}} + Q_{\text{evapoation}} + Q_{\text{longwave}}) A \Delta t / (V \rho c_p)$$

Antar vi at vi har en rektangulær kanal er $A/V=1/H$. Dette betyr at temperatur-
endringen er omvendt proporsjonal med vanndybden.

I et konkret tilfelle bør en gjøre overslagsberegninger med denne formelen for å se på
hva det er mulig å oppnå av temperaturendringer. Det er i kapittel 8 vist en modell
(SNTEMP) som kan benyttes til å gjøre enkle overslag over hvilke endringer i
vanntemperatur som en kan forvente som funksjon av endringer i de ulike leddene i
energibalanseligningen.

Innblanding av vann med annen temperatur skjer mest tydelig der elver møtes og
vannmassene blandes. Ved stort fall skjer blandingen raskt, mens det på stille partier
kan gå flere hundre meter før vannmassene er sammenblandet.

I tillegg til de leddene som er tatt med i denne ligningen, er det tre andre forhold som
vil påvirke temperaturen, men som ikke alltid blir tatt med i simuleringsmodeller:
grunnvann, energiomdanning og døgnvariasjoner.

En kilde for vann- og energiutveksling er grunnvann. Vanligvis tilføres elva grunn-
vann fra sidene, men i korte perioder kan også strømmen gå fra elva til grunnen. Selv
om de enkelte grunnvannskildene som regel er små sammenliknet med sidevassdrag,
kan de ha vesentlig påvirkning på vanntemperaturen da temperaturen i store deler av
året avviker betydelig fra temperaturen på overflatevann, og særlig når vannføringen
fra overflatevann er liten.

Som alle andre legemer har vannet i kraft av sin høyde over havet en potensiell
energi. Det er energi som frigjøres når vannet faller mot havet. Potensiell energi går
over til bevegelsesenergi og akselererer vannet. Friksjon i vannet taper det for energi
og varmer opp vannmassene. Fra vannets tetthet kan en regne ut at frigjøringen av
denne energien tilsvarer en oppvarming på nær én grad pr. 400 høydemeter.
Fallopvarmingen er spesifikk, den avhenger ikke av vannmengden. Når vannet
forholdsvis raskt går gjennom et rør/tunnel til en turbin skjer det derimot ingen
temperaturøkning, da energien tas ut som elektrisk kraft (Kvambekk et al., 2006).

Det tredje punktet som må understrekes, er at det ikke er mulig å etterlikne variasjonen over døgnet i ei naturlig elv dersom en ikke også prøver å etterlikne de naturlige variasjonene i vannføring. Døgnvariasjonen i temperatur i ei elv avtar med økende vannføring fordi vannmassene som må oppvarmes/nedkjøles øker. I Figur 13, Figur 14 og Figur 15 er det vist temperaturvariasjon over ei strekning av Osaelva på Fosen i Sør-Trøndelag. Kurvene viser hvordan temperaturen på de to stedene varierer over døgnet. I første del av perioden er vannet i den øverste delen av elva stort sett varmere enn i den nedre delen. I siste del av perioden er situasjonen motsatt.

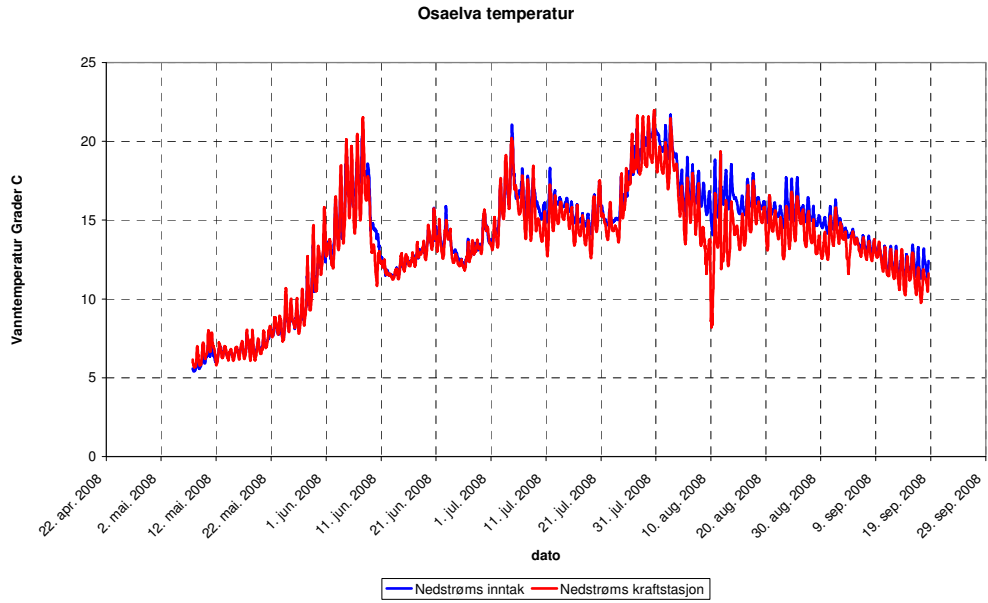
Forskjellene skyldes endringer i energibalansen for den aktuelle strekningen. I første del av perioden (vår og forsommer) viser figurene at det er en positiv energibalanse for strekningen, med stort sett høyere temperatur i den nedre delen enn den øvre. Det er spesielt to ledd i energibalansen som bidrar mye til dette:

- kortbølget innstråling
- konduksjon/ledning fra følbare varme

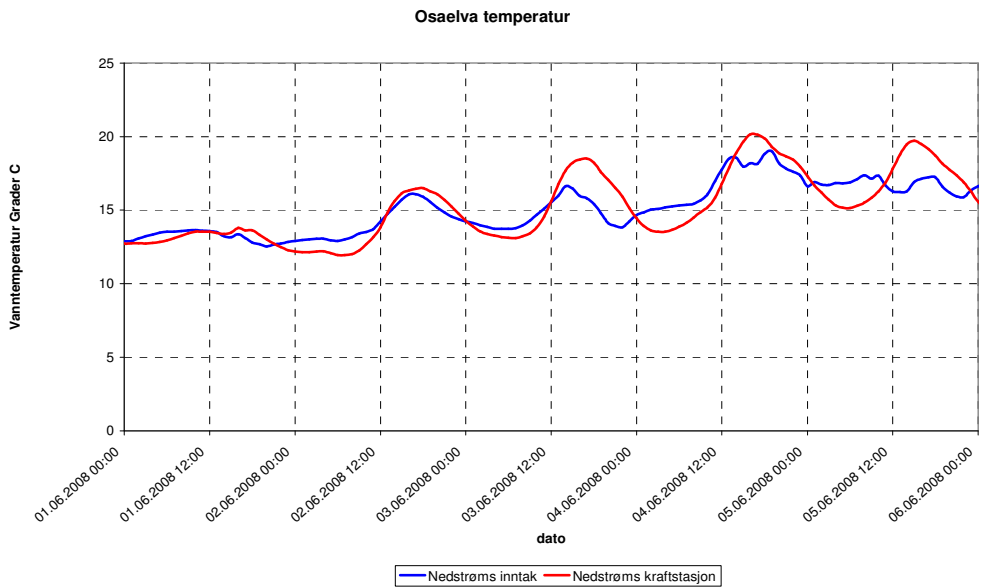
På ettersommeren/høsten er trenden motsatt. Nedover langs elva senkes temperaturen. Dette skyldes at strålingsbalansen blir negativ, dvs. det er større utstråling fra vannmassene enn innstråling, og at følbare varme ofte gir negativt bidrag til energibalansen.

Temperaturen i vann endrer seg generelt sett langsomt pga. relativt høy varmekapasitet. Dette gjør at vanntemperaturen i ei elv generelt sett vil endre seg langsomt nedover i vassdraget. Et kaldt utslipp høyt oppe i ei elv vil derfor gi relativt kaldt vann i ei lang strekning nedstrøms utslippet. Dersom elva er smal og dyp vil endringen være langsommere enn i ei elv som er bred og grunn. Ei bred og grunn elv har et stort overflateareal i forhold til volumet. Dette gjør at energiutvekslingen går raskere enn i ei dyp og smal elv.

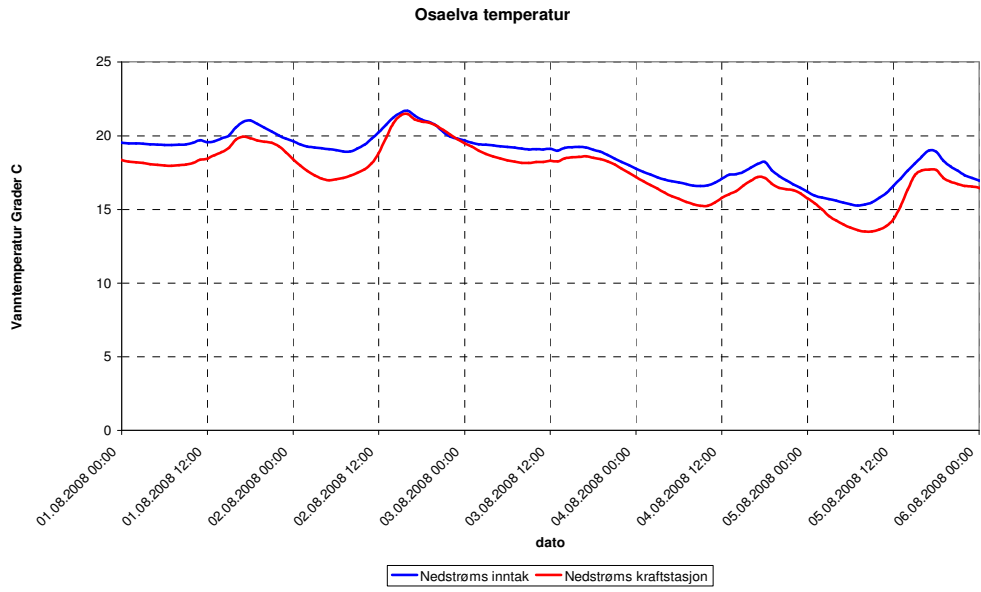
Det er publisert en rekke rapporter og artikler om temperaturforholdene i norske elver og innsjøer. Dette gjelder for eksempel Arve Tvede sitt kapittel om vanntemperatur og isforhold i Saltveit et al. (2006), Kvambekk et al. (2006), Kvambekk (2008) og Asvall (2007).



Figur 13 Temperaturvariasjoner over 1,5 km av Osaelva i Sør-Trøndelag



Figur 14 Temperaturvariasjoner over 1,5 km av Osaelva i Sør-Trøndelag



Figur 15 Temperaturvariasjoner over 1,5 km av Osaelva i Sør-Trøndelag

6. Endringer av temperatur som følge av inngrep

I naturlige innsjøer vil en stort sett ha avrenning av overflatevann gjennom hele året. Dette betyr at en i sommerhalvåret har relativt høy temperatur på vannet, mens en i vinterhalvåret har lav temperatur. Det vanligste inngrepet i vassdrag i Norge er kraftverksreguleringer.

I magasinkraftverkene samles vannet i ett eller flere magasin i vannrike perioder av året og slippes gjerne ut om vinteren, men også i tørre perioder ellers i året. Overføring av vann fra ulike deler av vassdraget og mellom nabovassdrag er vanlig (f.eks. Ulla-Førre, Lyse, Røssåga, Svartisen og Kobbelv). Utløpet fra kraftverket kan være direkte i fjorden (f.eks. Lyse, Blåfalli I, Jostedøla) eller i den regulerte elva (f.eks. Brokke (Otra), Røssåga, Surna). Utløpet kan også gå ut i et magasin (f.eks. Kvilldal kraftverk (Ulla-Førre)). Tvede (1993).

Rene elvekraftverk har forholdsvis liten utbredelse i Norge og er stort sett lokalisert i de nedre delene av vassdragene (f.eks. Glomma, Nidelva og Numedalslågen), men er vanlige i f.eks. Sverige. I elvekraftverkene benyttes det vannet som til enhver tid er tilgjengelig. I den grad det finnes noe inntaksmagasin er dette ofte lite, og effekten på vannføring og vanntemperatur er mindre enn ved magasinkraftverk.

Den vanligste effekten av magasinkraftverk på elvestrekningen nedstrøms utslippet fra kraftverket er økt vannføring og høyere temperatur om vinteren og lavere temperatur om sommeren i forhold til naturlig tilstand (Figur 17). Dette er for eksempel situasjonen på en ca. 10 km lang strekning nedstrøms Alta kraftverk i Alta-Kautokeinovassdraget, strekningen i Surna på Nord-Møre nedstrøms Trollheimen kraftverk (Harby, 2007) og en rekke andre elver med kraftverksinntak i dypere vannmasser og med tapping om vinteren.

Økt vintertemperatur kommer av at magasin vannet tappes fra dypere lag av magasinet som har en høyere temperatur enn overflatelagene. Om sommeren medfører dette imidlertid lavere vanntemperatur, da de dypere lagene av magasinet har en lavere temperatur enn overflatelagene.

Forskjellen i temperatur mellom de øvre og nedre lagene varierer fra innsjø til innsjø avhengig av en rekke faktorer:

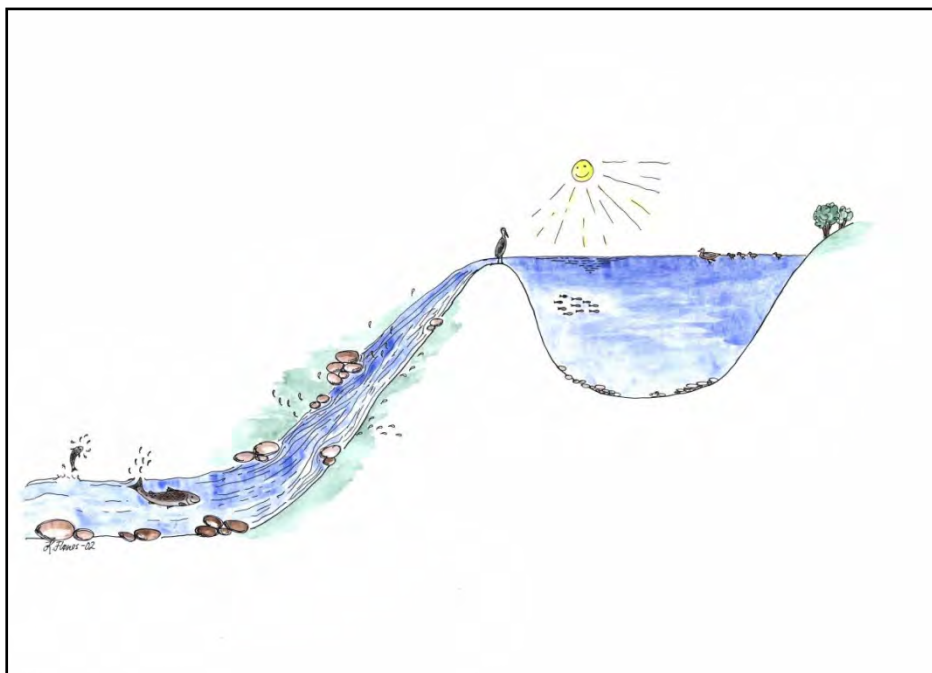
- klimatiske forhold (temperatur, innstråling, vind, nedbør etc.)
- topografi (dybdeforhold)
- hydrologiske forhold (tilrenning, avløp)
- tappemønster

Mellom magasinet og utslippet fra kraftverket er ofte vannføringen redusert hele året, mens temperaturen gjerne er høyere om sommeren og lavere om vinteren enn før regulering.

I vassdrag der kraftverket slipper driftsvannet rett i fjorden, eller der deler av nedbørsfeltet er overført til et annet nedslagsfelt, bidrar bare restfeltet til vannføringen. Vannføringen reduseres da gjennom hele året. Resultatet blir ofte høyere vanntemperatur om sommeren og lavere om vinteren. Redusert vintervannføring kan imidlertid gjøre at grunnvannstilsiget til elva utgjør en forholdsvis større andel av vannføringen. Dette kan gi høyere vintertemperaturer enn ventet (Sima, Vassbygd-elva). Imidlertid kan vannføringen bli svært høy også i slike vassdrag i perioder dersom det forekommer overløp fra dammer som ligger oppstrøms (Storåna, Otra, Røssåga), eller dersom kapasiteten i bekkeinntakene overskrides (Gluggvasselv). En grundig gjennomgang av de hydrologiske endringene som følge av vassdragsreguleringer er gitt av Tvede (1993).

I en del litteratur omtales temperaturendringer som fører til redusert temperatur som "cold water pollution" (Sherman 2000).

I forbindelse med inngrep i vassdrag vil det derfor være behov for å få vurdert hvilke endringer som kan forekomme og hvilke tiltak som kan iverksettes for å redusere eventuelle skadevirkninger av reguleringen.



Figur 16 Temperaturforhold i uregulert vassdrag. Tegner K. Flønes



Figur 17 Temperaturforhold i regulert vassdrag. Tegner K. Flønes

7. Tiltak for å styre eller regulere temperaturen i et vassdrag

Det er gjennomført et litteraturstudium for å få oversikt over hvilke tiltak som har vært forsøkt for å få den ønskede temperaturen på vann som tappes fra innsjøer/magasin. Det er relativt få artikler som er publisert på dette området. De som er publisert omhandler varme, tempererte innsjøer. Sherman (2000) gir en fin oversikt over ulike tiltak i forbindelse med vurderinger av et konkret vassdrag i Australia. Hall (1986a) gir en oversikt over de hydrauliske betraktninger som bør gjøres i forbindelse med konstruksjoner for selektiv tapping. I Norge er det gjort tiltak for å endre temperaturforholdene etter reguleringer. Dette gjelder for eksempel i forbindelse med Altautbyggingen, Asvall (2007). I forbindelse med Trollheimen kraftverk har det vært sett flere alternative tiltak for å få bedret temperaturforholdene nedstrøms kraftverket. Harby (2007).

Endring av temperaturen nedstrøms et magasin

I utgangspunktet er det to prinsipielt forskjellige måter en kan endre temperaturen i vann fra et magasin eller innsjø:

- Utnytte lagdelingen i innsjøen/magasinet.
- Bryte ned lagdelingen.

Den første situasjonen bygger på en teknikk som i litteraturen kalles selektiv tapping (selective withdrawal). Dette betyr at en tapper vann fra lag i innsjøen med ønsket temperatur. Ved hjelp av denne metoden kan en både heve og senke temperaturen i vannmassen hvor en slipper vannet ut.

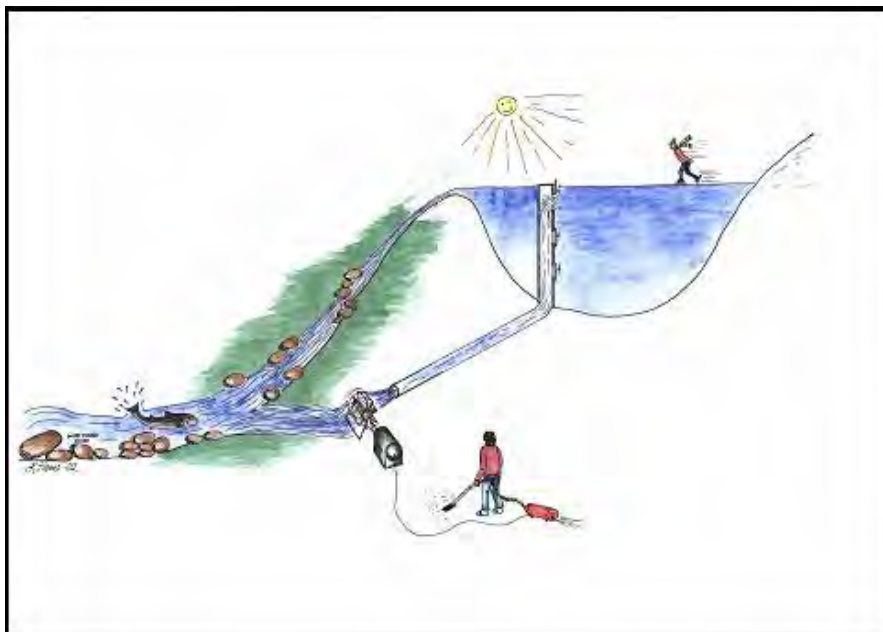
Når den andre metoden benyttes, installeres det en anordning for kunstig destratifisering. Dette kan skje ved at luft blir pumpet inn i bunnlagene eller ved hjelp av en eller annen form for mekanisk blanding.

Selektiv tapping

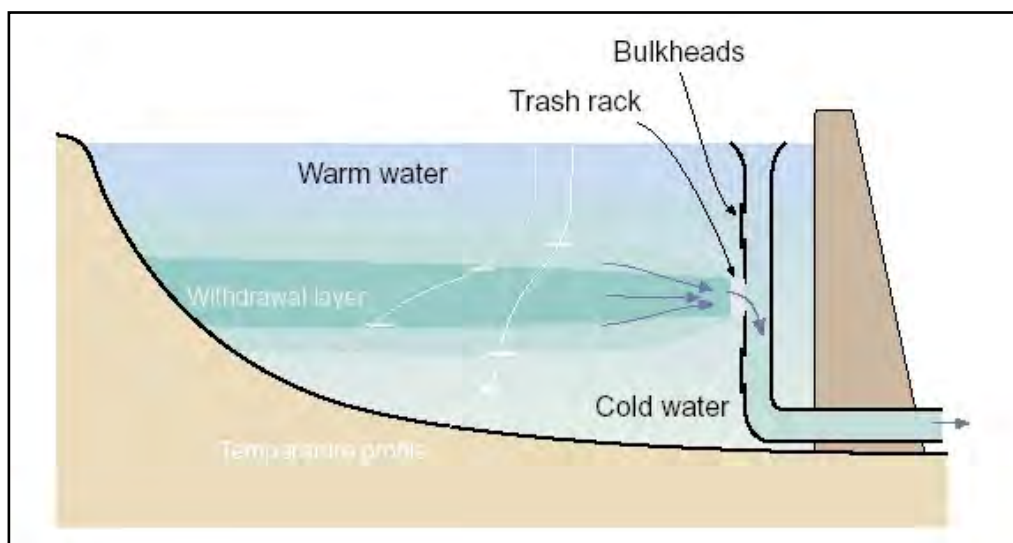
Når vann tappes fra en innsjø med sjiktning, og en kan anta at vannmengden som tappes er relativt liten i forhold til volumet i innsjøen, vil tetthetsgradienten begrense området som det trekkes vann fra. Ved økende vannføring vil hastigheten på vannet øke og dermed vil også medrivningen av vann øke. Resultatet er at vann trekkes fra et ”tykkere” område enn hva som er tilfellet med lav vannføring.

Som eksempel kan en anta at lagtykkelsen som vann trekkes fra varierer fra 3 til 15 meter når stratifiseringen varierer fra sterk ($1,2\text{ °C/m}$) til svak ($0,07\text{ °C/m}$). For å ha kontroll på temperaturen i vannet vil nivået som vannet trekkes fra variere, slik at området det trekkes fra har den ønskede temperaturen. Vanligvis gjøres dette ved å konstruere en anordning hvor tapping skjer fra ønsket nivå, såkalt ”multilevel outlet

strukture” (MLO). Denne har som regel flere åpninger i faste nivåer, og vann trekkes fra en eller flere av disse åpningene.



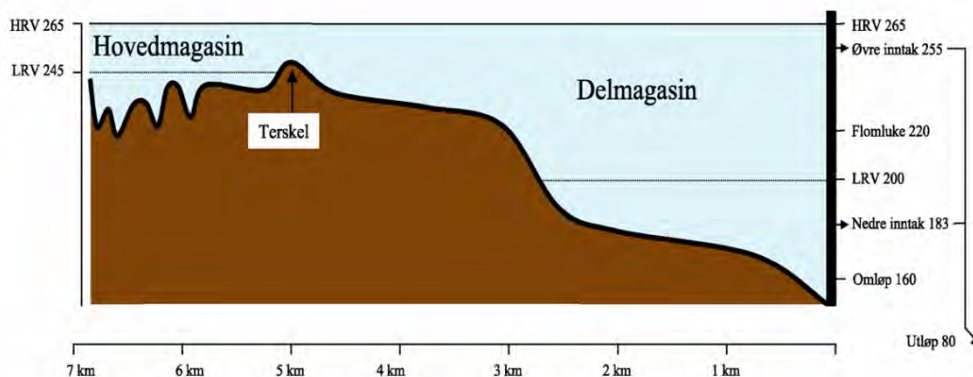
Figur 18 Selektiv tapping. Tegner K. Flønes



Figur 19 Selektiv tapping fra magasin ved hjelp av MLO (multilevel outlet). (Sherman 2000)

Selektiv tapping er den mest benyttede metoden for å kontrollere temperaturen i vannet fra innsjøen. Spesielt i USA er det bygd mange slike konstruksjoner. MLO-konstruksjoner er enkle i bruk og virker i samsvar med teorien. De kan imidlertid være litt vanskelige å operere, og det går relativt mye tid med for å omstille tappingen fra et utløp til et annet.

I Norge finnes det få kostnadstall for bygging og drift av slike konstruksjoner. Et anlegg i Norge som er bygget med slik inntakskonstruksjon er Altadammen.



Figur 20 Snitt gjennom Altadammen med vanninntakene og deler av Virdejavrimagasinet. Asvall, 2005

I den endelige konsesjonen til byggingen av Alta kraftverk ble det pålagt å bygge inntak i to forskjellige nivåer i reguleringsmagasinet Virdejavri. Dette vedtaket ble begrunnet med hensynet til laksen i Altaelva i sommersesongen, som en fryktet ville bli skadelidende pga. for lav sommertemperatur dersom avløpsvannet bare kom fra et tradisjonelt bunninntak. Det øvre inntaket ble lagt med tunnelsåle på kote 255 m og det nedre inntaket på kote 183 m. HRV i Virdejavri er på kote 265 m og LRV er på 200 m, se ellers Figur 20 og foto på Figur 21. Byggingen av det ekstra øvre inntaket ble beregnet til å koste ca. 10 millioner kr i 1978. Justert etter Statistisk sentralbyrås konsumprisindeks tilsvarer dette ca. 36 millioner kr i 2009.



Figur 21 Øvre inntak i fjellet like oppstrøms Altadammen 5.5.2004. Foto Arve Tvede, Statkraft

Forskning på laksebestanden i Altaelva utover på 1990-tallet viste at vinter-temperaturen i elva nedstrøms kraftverket ble så høy at elva stort sett gikk åpen ned til Sautsovatnet (Asvall, 2005). Dette var uheldig for vinteroverlevelsen av lakseunger. Et tiltak for å øke isdekket på elva ble derfor testet ut ved å bruke de to inntakene på en noe annen måte enn opprinnelig tenkt. Etter høstomveltningen på seinhøsten brukes det nedre inntaket for å tappe ut relativt varmt bunnvann før en går over til å bruke det øvre inntaket fra rundt midten av desember. Da synker tappevann-temperaturen og gir muligheter for å få til en islagt elv dersom værforholdene er de rette. Det øvre inntaket tilstrebes så brukt fram til ca. 1. april for å holde isdekket på elva. På den tid er vanligvis også vannstanden i Virdnejavri kommet så lavt at det øvre inntaket begynner å ligge tørt. Overgangen til det nedre inntaket medfører ca. 1 °C høyere temperatur, og isen på øvre del av elva brytes raskt opp. Denne måten å variere mellom de to inntakene har vært praktisert siden 2002 (Asvall, 2007a) og er også nedfelt i det endelige manøvreringsreglementet for Alta kraftverk fra 2010.

Ut over Altadammen finnes ingen kostnadstall for bygging og drift av slike konstruksjoner i Norge. For å gi en indikasjon på kostnadsnivået er det valgt å ta med en oversikt fra ulike dammer i Australia.

Tabell 4 Estimerte kostnader for å tilpasse utstyr/konstruksjon for selektiv tapping fra flere lag. Kostnadene fra Shasta Dam er virkelige kostnader. Prosentangivelsen viser hvor stor del av volumet i sjøen som benyttes for tapping (Sherman 2000)

Dam	Volum (mill. m ³)	Estimerte kostnader
Blowering	1631	NOK 50 mill. (85 %) NOK 75 mill. (100 %)
Burrendong	1190	NOK 25 mill. (55 %) NOK 125 mill. (100 %)
Wyangala	1281	NOK 25 mill. (60 %) NOK 50 mill. (100 %)
Keepit	426	NOK 50 mill. (95 %)
Copeton	1361	NOK 50 mill. (80 %) NOK 150 mill. (100 %)
Caroar	36	NOK 15 mill. (85 %) NOK 25 mill. (100 %)
Shasta Dam	5400	NOK 560 mill. (virkelig)

Destratifisering

Innsjøer og magasin kan bli destratifisert på kunstig måte. Dette gjøres ved å introdusere en storskalasirkulasjon mellom bunn og overflate. Sirkulasjonen drives enten ved pumping av luft inn i de dypeste lagene eller ved bruk av propeller i overflaten. I begge tilfellene blir vann pumpet fra bunnen og opp i de øvre lagene. Dette vil om sommeren føre til en senkning av temperaturen i de øvre lag og heving av temperaturen i de dypere lagene.

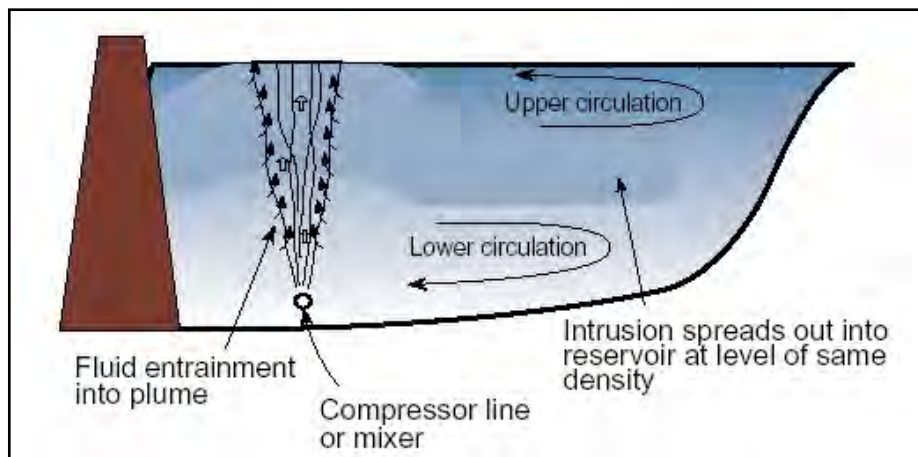
I prinsippet er det to metoder som benyttes for å oppnå denne blandingen:

1. Pumping av varmt overflatevann ned til dypet og så å slippe det ut gjennom en diffusor.
2. Pumping av luft ned i dypet og så å slippe det ut gjennom en boblegenerator.

I begge disse tilfellene vil en oppnå at vann vil stige opp over utslippet og sette i gang sirkulasjon. Et typisk sirkulasjonsmønster er vist i Figur 22.

Som det går fram vil en få en sirkulasjon i det øvre laget (epilimnion) og en i det nedre laget (hypolimnion). Når vann som stiger opp når overflaten, vil det ha en temperatur mellom temperaturen på vannet i det dype laget og vannet i overflaten, altså noe tyngre enn det opprinnelige overflatevannet. Vannet vil, når det når overflaten, spre seg utover til sidene før det synker ned til et dyp med temperatur som er lik temperaturen det har.

Mulighetene for å kunne gjennomføre denne type destratifisering avhenger i stor grad av de lokalklimatiske forholdene og størrelsen på reservoaret som skal destratifiseres. Jo større reservoar en ønsker å destratifisere, dess større anlegg må en investere i. I Lorenzen og Fast (1977) er det presentert en tommelfingerregel for bestemmelse av nødvendig mengde luft som må til for å destratifisere en vannmasse. Den sier at en trenger 150 l/s med komprimert luft pr. 100 ha reservoar overflate. I vedlegg 4 er det vist en mer detaljert beregningsmetode som er benyttet i flere simuleringmodeller.



Figur 22 Typisk sirkulasjonsbilde ved destratifisering ved hjelp av luftinnblåsing (Sherman 2000)

Erfaringer

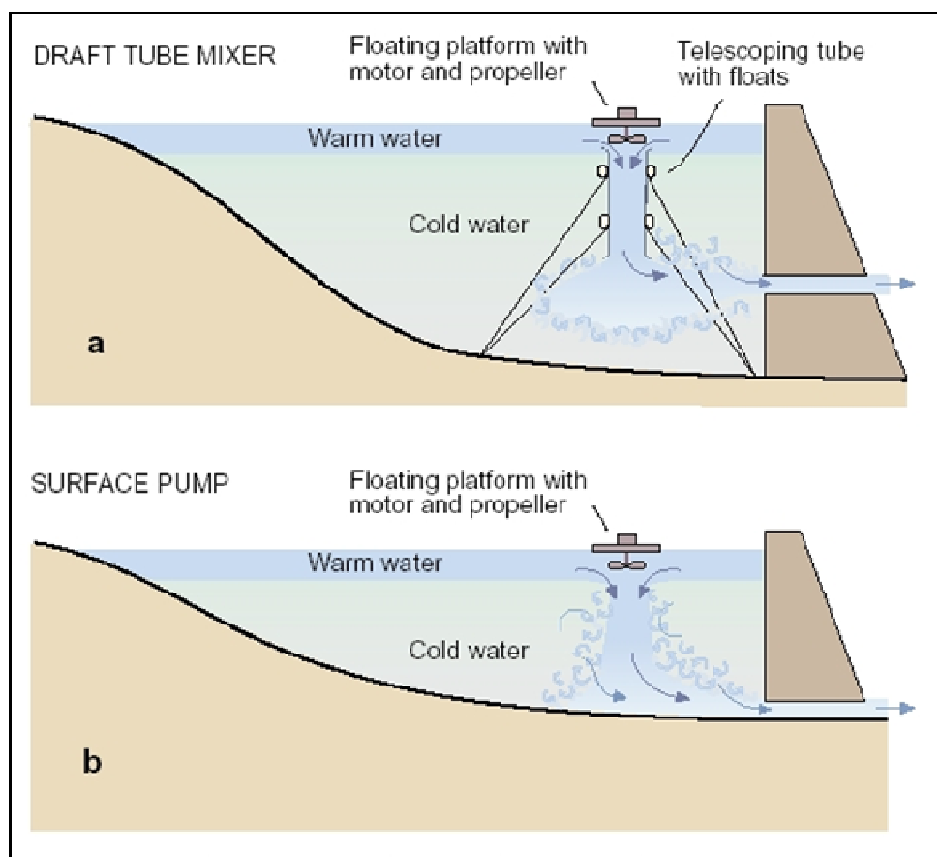
Destratifisering eller nedbrytning av lagdeling har vært benyttet i flere situasjoner, både i Norge og i utlandet. Hovedhensikten med de fleste systemene som er installert i Norge, har vært å sørge for forbedringer av kvaliteten av bunnvannet. I forbindelse med Altadammen har det vært benyttet for å endre temperaturforholdene. Fra litteraturen refereres det stort sett om vellykket bruk av destratifisering som tiltak for å forbedre vanntemperaturforholdene nedstrøms et magasin.

Kostnader

Kostnadene med disse anleggene avhenger i veldig stor grad av størrelsen på det magasinet som skal destratifiseres. Som eksempel kan nevnes North P Dam. Det er et stort reservoar på ca. 350 millioner m³. Kostnadene for installasjon er på om lag NOK 400 000, med driftskostnader på ca. NOK 500 000 pr. år.

Pumper/propeller i overflaten

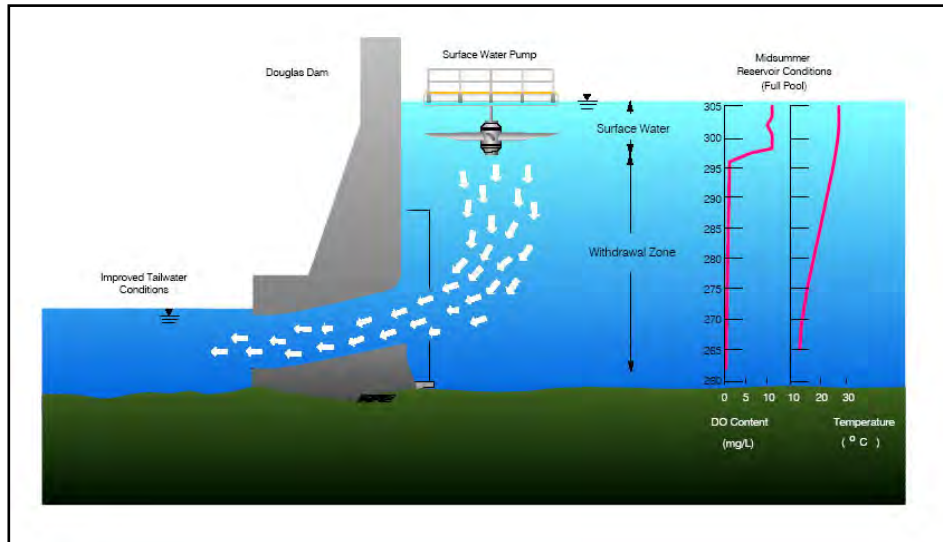
Pumper som står montert i overflaten blir gjerne brukt for å bryte ned sprangsjiktet og sørge for blanding av epilimnion og hypolimnion i området nært inntaket av vann. Prinsippet for dette er vist Figur 23 b og Figur 24.



Figur 23 Lokal destratifisering ved hjelp av pumper (Sherman 2000)

Pumpene setter i gang en strøm ned mot dypet. Når vannet beveger seg nedover, river det med mer vann. Middelhastigheten reduseres slik at impulsen bevarer. Resultatet av denne hastighetsreduksjonen er at muligheten for at det varme overflatevannet skal trenge gjennom termoklinen reduseres. For å øke muligheten til at en skal få blandet inn overflatevannet i hypolimnion, kan pumpene forlenges med et utløpsrør som vist i Figur 23 a.

Når vannstanden i reservoaret reduseres, reduseres også avstanden fra pumpene til inntaket. I en driftsituasjon må en ta hensyn til dette.



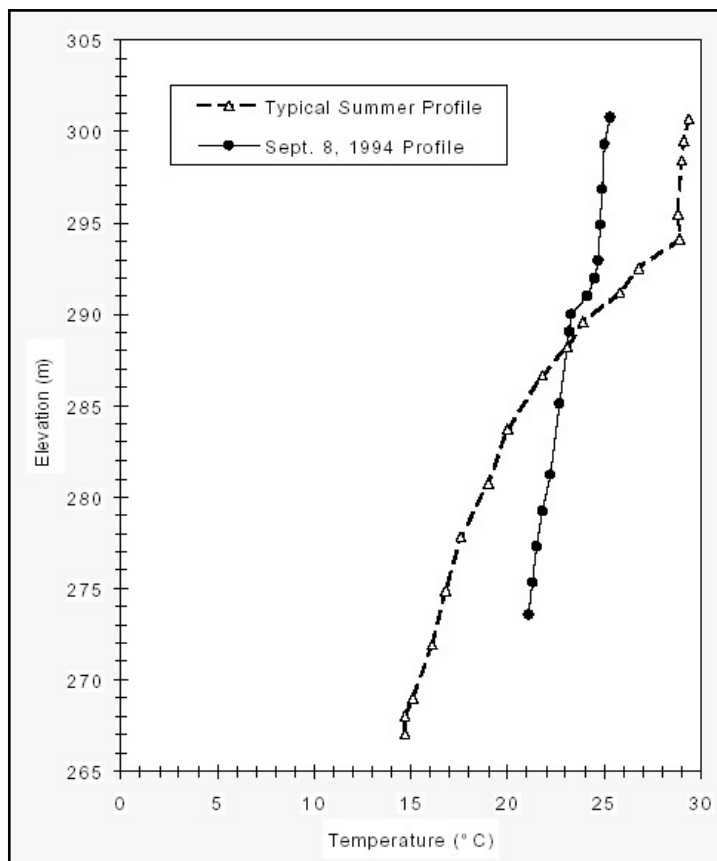
Figur 24 Destratifisering ved hjelp av overflatepropell (Mobley et al. 1995)

Ved design av et slikt system er det en del viktige hensyn som må tas:

- vannstandsendringer
- bølgekrefter
- pumpekapasitet
- sikkerhetshensyn
- drivgods
- hærverk

Erfaringer

Mobley (1995) har laget den mest relevante oversikten over erfaringer med pumper. I denne rapporten presenteres detaljer om konstruksjon og drift og resultater fra bruken av disse pumpene ved Douglas Dam i Tennessee. Normal vannføring fra kraftstasjonen er $450 \text{ m}^3/\text{s}$, og pumpene er dimensjonert for å sørge for at $173 \text{ m}^3/\text{s}$ av den totale vannstrømmen skal komme fra overflaten. Systemet består av 9 propeller eller pumper, hver med en diameter på 4,6 meter. Kapasiteten på hver pumpe er på $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Systemet er bygget for å tåle 19 meter variasjon i vannstanden. Hovedhensikten med dette systemet er å øke oksygeninnholdet i vann ved inntaket. Pumpene har fungert uten større problemer etter installasjonen, se Figur 25.



Figur 25 Effekten på vanntemperaturen som følge av pumper i overflaten (Mobley 1995)

I Figur 25 angir kurven som er kalt ”Typical Summer Profile” en typisk situasjon før tiltak, mens kurven kalt ”Sept. 8, 1994 Profile” viser situasjonen etter blanding.

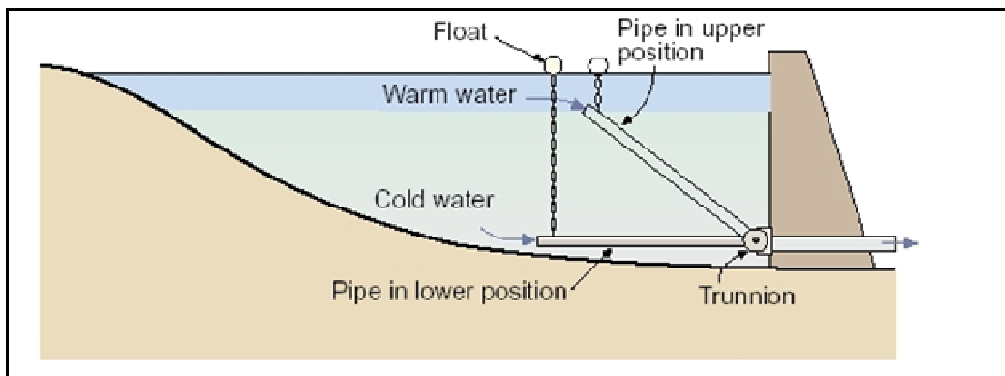
Regulerbart inntaksrør

En annen måte å sørge for selektiv tapping er å benytte et svingbart eller fleksibelt utløpsrør (Figur 26 og Figur 27).



Figur 26 Fleksibelt inntaksrør. Tegner K. Flønes

Et svingbart utløpsrør er hengslet ved dammen. Den frie enden er festet til en flåte eller noe annet som flyter. Enden heves eller senkes ved å justere lengden på kjettingen eller kabelen mellom røret og overflaten. Ved bruk av fleksibelt rør trenger en ikke hengslingen. Denne type utløpsanordninger er begrenset til magasin med relativt små uttak ettersom kostnaden ved konstruksjonen øker ved økende diameter. Lengden på de hengslete utløpsrørene er i størrelsesorden 25-30 meter. Dette setter en grense på hvor store dybder en kan variere uttaket på.



Figur 27 Svingbart inntaksrør (Sherman 2000)

Erfaringer

I Australia er det installert en rekke slike anordninger i mindre dammer. Det er i det alt vesentlige benyttet hengslete utløp. Dersom en slik utløpsanordning skal virke etter hensikten, er det viktig å justere dybden som inntaket skjer fra, både som følge av temperaturutviklingen i dammen og avhengig av hvilken vannstand en har i reservoaret.

Den største konstruksjonen som er laget i Australia består av to utløpsrør med diameter 700 mm. Disse har en kapasitet på 0,10 mill. m³/døgn som tilsvarer 1,2 m³/s. Hvert rør er 25 meter langt og dekker et dybdeområde på 15-20 meter.

I Norge har fleksible uttak vært benyttet i forbindelse med uttak av vann til fiskeoppdrettsanlegg (Steinsvik, 2003).

Kostnader

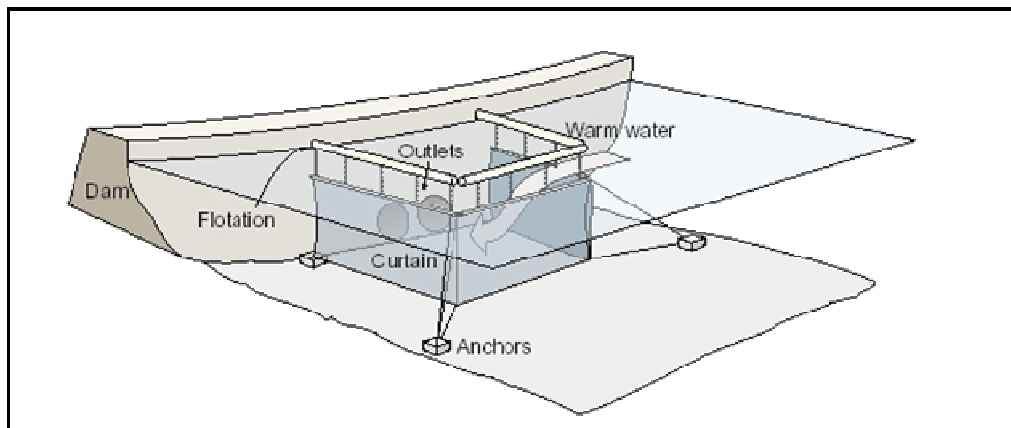
Det er ikke funnet data over kostnadene ved installasjon av slike anordninger. Med uttak/tapping av relativt små vannmengder vil dette være en rimelig konstruksjon.

Dykkede overløp/dykkede gardiner

Dykkede gardiner er laget av robust polymer og holdes i posisjon ved hjelp av anker festet til bunnen og flottører på overflaten. Ved å regulere dybden/nivået de er plassert på, kan vann trekkes fra forskjellige nivå. En prinsippskisse for dette er vist i Figur 28.

Erfaringer

Det er ikke rapportert erfaringer med bruk av dykkede gardiner.



Figur 28 Dykket gardin tvinger vann fra det varmeste laget inn i utløpet. (Sherman 2000)

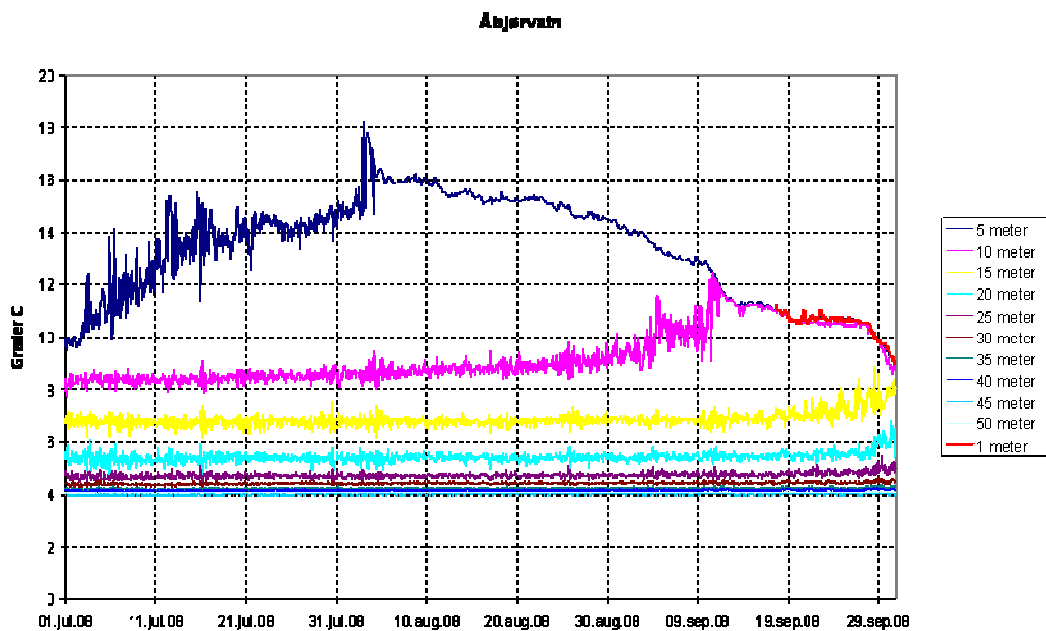
Bruk av hevert

Åbjøra i Nord-Trøndelag er regulert og har fått fraført vann i forbindelse med kraftverksutbyggingen i Kolsvik. Dette har ført til redusert vannføring i elva nedstrøms

inntakene. Den reduserte vannføringen har ført til at temperaturen i Åbjøra i perioder kan bli høyere enn hva som er ønsket. For å avbøte dette problemet er det satt i gang et prosjekt der en ser på mulighetene av å slippe kaldt vann fra de dypeste lagene i Åbjørvatn nedover elva i stedet for det varme overflatevannet. Tappingen av kaldt vann er foreslått gjort ved hjelp av hevert.

For å se på mulighetene for dette ble det blant annet gjennomført målinger av temperaturen i ulike lag i Åbjørvatn.

Resultatet fra disse målingene er vist i Figur 29.



Figur 29 Temperaturforholdene i Åbjørvatn i perioden 1.7.2008 til 1.10.2008.

Som figuren viser har Åbjørvatn markert sjiktning. Fra 20 meter og dypere er det bare mindre endringer i temperaturen sammenliknet med lagene over 20 meter. Dette er tilfellet gjennom hele måleperioden. Basert på resultatene fra temperaturmålingene er det anbefalt å legge inntaket av vann i Åbjørvatn på ca. 30 meters dyp. Ved å gjøre dette er en sikret rikelig tilgang på kaldt vann til slipping nedover Åbjøra.

Bunntopografien fra utløpet og innover vannet er kartlagt med tanke på å finne hvor langt innover i vannet en må gå for å nå den ønskede temperaturen. Bunntopografien sammen med temperaturmålingene på ulike dyp har vist at lengden på inntaksledningene blir på 375 m. Kortere inntaksledning gir mindre friksjonstap i ledningen og følgelig mindre krav til høydeforskjell over terskelen som drivende kraft.

Terskelen og elveløpet nedstrøms vannet er også oppmålt og modellert. Elva går med lite fall nedstrøms terskelen. Vannspeilet er bestemt av flere naturlige terskler. Tersklene ble målt inn ved oppmålingen. Det er høydeforskjellen over utløpstterskelen som er den drivende kraften for et gravitasjonssystem med inntaksledninger og

utslipp like nedstrøms terskelen. Topografien nedover elva tilsier at vannspeilet nedstrøms terskelen ikke vil gå mye ned ved vannføring lavere enn 10 m³/s. Resultatet fra simuleringer av vannstanden nedstrøms terskelen ved varierende vannføringer viser hvordan høydeforskjellen over terskelen varierer ved ulike vannføringer. Ved 10 m³/s, som er den vannmengden en har beregnet å være dimensjonerende, gir vannstandsforskjellen over terskelen stor nok drivende kraft til 375 m lange inntaksledninger for å slippe kaldt bunnvann nedover Åbjøra.

Kostnadene for et slikt anlegg er beregnet til ca. 11 millioner NOK (kostnadsnivå 2008).

Tapping av bunnvann gjennom rør ved lav vannstand, i tillegg til vannføringen over terskelen, vil føre til at mer vann renner ut av Åbjørvatnet enn i dagens situasjon. Hvis det medfører at vannstanden synker for raskt i tørkeperioder, kan terskelen bygges om for å redusere vannføringen over terskelen og kompensere for tappingen av bunnvann.

Dempningsmagasin eller fordrøyningsmagasin

Hensikten med et magasin eller basseng nedstrøms utløpet er å forsinke transporten videre nedover i vassdraget og dermed gi mulighet for at temperaturen vil endre seg i retning lufttemperaturen. Denne teknikken kan benyttes både til å heve og redusere temperaturen. Når volumet av fordrøyningsmagasinet øker, økes oppholdstiden i bassenget og dermed mulighetene til å påvirke temperaturen. Ved gitt volum vil endringen av temperaturen øke som funksjon av økende overflateareal ettersom utvekslingen av energi pr. m² er den samme uavhengig av volum.

En tommelfingerregel er at en kan øke temperaturen med 1 °C/døgn med et basseng på 1 km² og en gjennomstrømning på 1 millioner m³/døgn (11,6 m³/s).

Erfaringer

Kjøle-/oppvarmingsbassenger er mye brukt i en rekke industrielle sammenhenger. I disse situasjonene er det som regel mindre vannvolumer som skal behandles sammenliknet med det som er situasjonen i vannkraftsammenheng. Kjøle-/oppvarmingsbasseng er benyttet i en del situasjoner i sammenheng med irrigasjon.

Kostnader

Det er ikke funnet kostnadstall for denne type bassenger, men vil kunne bestemmes i konkrete situasjoner.

Modifiserte lededekurver

Modifisering av tappestrategien til reservoar har vært benyttet for å bedre temperaturforholdene nedstrøms utløpet fra kraftverket.

Erfaringer

Denne metoden vil bare i liten grad kunne påvirke temperaturforholdene ved utslippsstedet. På den andre side kan en oppnå større temperaturendring nedover vassdraget ved å redusere tappingen. Best virkning vil en få dersom en kan kombinere tapping fra flere magasiner.

Kostnader

Kostnadene med metoden vil i stor grad avhenge av hvor stor endring en vil ha i driftsform. Ingen kostnadstall er funnet i litteraturgjennomgangen.

Andre metoder

Bruk av terskler

På samme måte som at fordrøyningsbasseng eller dempningsbasseng vil øke arealet for utveksling av energi mellom vannet og lufta, kan arealet, og dermed energiutvekslingen, økes ved bruk av terskler.

Terskler har blitt anvendt på en rekke steder i Norge for å bevare et vannspeil ved redusert vannføring i vassdrag. Effekten av terskler er dokumentert i Kvambekk et al. (2006).

Tapping fra magasin med gunstigste temperatur

I vassdrag der en har magasin med forskjellige temperaturforhold, kan man velge tapping fra de magasin som har gunstigste temperaturforhold i forhold til ønsket temperatur i elva nedstrøms utslippet.

Endre vannføringen

Som påpekt tidligere vil endringen i temperatur på en elvestrekning være tilnærmet proporsjonal med vandybden. Dette betyr at dersom en har mulighet til å endre vannføringen, vil en kunne påvirke temperaturforholdene i vassdraget. Om vinteren med kaldt vær vil høy vannføring gi relativt lite nedkjøling av vannet, mens lav vannføring vil gi lavere temperatur. Om sommeren med relativt høy lufttemperatur, vil høy vannføring gi lite oppvarming, mens lav vannføring vil gi høyere temperatur.

Kantvegetasjon

Tett kantvegetasjon vil redusere inn- og utstråling og varmeutvekslingen mellom elv og luft. I områder med tett kantvegetasjon vil en dermed ha relativt mindre variasjon i vanntemperatur enn det en vil kunne få i områder hvor det ikke er kantvegetasjon eller der denne er fjernet. Effekten av kantvegetasjon avtar jo bredere elven er.

Nedkjøling med snøkanoner, innpumping av kald luft

Tilførsel av snø og is gjennom bruk av snøkanoner, eller gjennom tilkjøring av snø til steder hvor en ønsker å redusere temperaturen, har også vært foreslått benyttet. Det er imidlertid ikke funnet referanser til konkret bruk av denne metoden. Effekten av naturlig snødrift inn i ei elv er derimot beskrevet av Asvall (2007b) i forbindelse med

Einunna kraftverk. Tapping av varmt vann (1-3 °C) fra dypere lag av Fundin medfører at Einunna går åpen hele vinteren et stykke nedover fra Fundin. I dette fjellområdet er det ofte svært lave lufttemperaturer og mye snødrev. Dette fører til rask nedkjøling av vannet.

Avkjølings-/oppvarmingstårn

Dersom det er mindre mengder vann som skal avkjøles eller eventuelt oppvarmes, kan kjøle-/oppvarmingstårn benyttes. Dette er en metode som er i bruk i industriell sammenheng, men det er ikke funnet referanser til bruk av metoden for nedkjøling/oppvarming av elver/bekker.

Oppsummering av metoder

Tabell 5 gir en oversikt over noen aktuelle metoder for å endre temperaturen i et vassdrag. Ved valg av metode er det flere faktorer som spiller inn. To meget viktige er:

- 1) Temperaturforholdene
- 2) Bunntopografien

Før valg av metode bør derfor disse to faktorene kartlegges. Videre vil det være nyttig å modellere de eksisterende temperaturforholdene og ved hjelp av modellene simulere hvilke virkninger tiltaket vil ha.

Tabell 5 Oversikt over ulike metoder for endring av temperatur

Tiltak	Egnet for	Anvendt i Norge/ aktuelt for norske forhold	Effekt	Kostnader
Selektiv tapping	Sterkt lagdelte/stratifiserte innsjøer	Alta med tapping fra to nivåer	Gir forventet effekt på temperaturen nedstrøms utslippet	Relativt kostbar installasjon
Destratifisering ved pumping av overflatevann ned i dypet	Innsjøer hvor en ønsker å bedre oksygenforholdene i de dypeste lagene i tillegg til å endre temperatur/tetthets-sjiktningen	Kan være aktuelt for Norge	Forbedrer både temperatur- og oksygenforholdene	
Destratifisering ved luftinnblåsing i dypet	Innsjøer hvor en ønsker å bedre oksygenforholdene i dyplagene i tillegg til å endre temperatur-/tetthets-sjiktningen. Brukes også til å holde vann åpent om vinteren	Anvendt i form av boblegardin	Forbedrer både temperatur- og oksygenforholdene	Rimelig installasjon og driftskostnader
Pumper/propeller i overflaten	Innsjøer hvor en ønsker å bedre oksygenforholdene i dyplagene i tillegg til å endre temperatur-/tetthets-sjiktningen	Ikke anvendt i Norge	Bryter ned sprangsjiktet	
Fleksibelt/regulerbart inntaksrør	Sterkt lagdelte/stratifiserte innsjøer	Anvendt i Norge for uttak av vann til blant annet fiskeoppdrett	Ønsket effekt på temperaturen	For små installasjoner er det relativt rimelig. Kostbart ved store uttak

Dykkede overløp/gardiner	Sterkt lagdelte/stratifiserte innsjøer med begrenset mektighet på øvre lag	Kan være aktuelt for Norge	Benyttes for å tappe vann med ønsket temperatur	For små til mellomstore installasjoner er den relativt rimelig i installasjon og drift
Hevert	Lagdelte/stratifiserte innsjøer med begrenset mektighet på øvre lag	Foreslått anvendt i Åbjørvatn	Benyttes for å tappe vann med ønsket temperatur	Kostnader ved installasjon avhenger veldig mye av topografiske forhold i magasinet
Dempningsmagasin eller fordrøyningsmagasin	Spesielt for bruk i industriell sammenheng		Endring av temperaturen i retning luft-temperaturen	Avhengig av magasinets størrelse
Modifiserte lederkurver	Tapping fra års- eller flerårsmagasin der tappingen er fleksibel	Aktuelt for Norge	Endringer av temperaturen er mulig	
Bruk av terskler	Endring av temperatur på elvestrekninger	Brukt i Norge	Ingen endring av temperaturforholdene ved utslippsstedet. Større effekt nedover i vassdraget	Kostnader avhenger av lokale forhold som topografi og grunnforhold. Lave driftskostnader
Tapping fra magasin med gunstigste temperatur	Større systemer med flere magasiner i ulike høyder	Aktuelt for Norge	Avhenger av lokale forhold	Ikke anleggs-kostnader, men driftskostnader
Endre vannføringen	Tapping fra års eller flerårsmagasin der tappingen er fleksibel	Aktuelt for Norge	Liten endring av temperturforholdene ved utslippstedet. Større effekt nedover i vassdraget	
Kantvegetasjon	Egnet for små elver/bekker			
Nedkjøling med snøkanoner, innpumping av kald luft	Egnet for små elver/bekker	Kjenner ikke til aktiv bruk i Norge, men effekten dokumentert under naturlige forhold i Norge		
Avkjølings-/oppvarmingstårn	Egnet for små vannmengder	Kjenner ikke til bruk i Norge		

8. Modeller for simulering av temperatur

Det finnes en rekke modeller for å beskrive temperatur både i elver og innsjøer/magasin. Formålet med å benytte en modell kan være å få bedre forståelse av et vassdrag, å definere tiltak som er nødvendig for å oppnå et ønsket temperaturregime i et vassdrag, eller vurdere virkninger på temperaturen ved et planlagt inngrep. I Tabell 6 nedenfor er det satt opp en oversikt over mulige formål med modellering og analyse.

Tabell 6 Aktuelle formål med modellering.

Analyse	Eksempel på anvendelse
Karakterisering av eksisterende termisk regime til elver og innsjøer/magasin med utgangspunkt i historiske forhold	<ul style="list-style-type: none"> - Generere data som beskriver historiske forhold i vannforekomsten
Vurdering av responsen på eksisterende eller foreslåtte magasin av endringer i meteorologiske forhold	<ul style="list-style-type: none"> - Vurderinger av effekten av tørke eller økt nedbør - Effekten av global oppvarming
Analyse av det termiske regimet i et vassdrag som følge av endringer i driftsstrategi av magasin	<ul style="list-style-type: none"> - Endring av driftsstrategi, tappestrategi - Selektiv tapping
Vurdering av effekten på magasin og elv som følge av endringer i magasinet	<ul style="list-style-type: none"> - Økt magasinvolum - Introduksjon av konstruksjoner for styring av temperatur på vann som tappes - Fjerning av dammer
Bestemmelse av effekten av innstrømning og uttak på temperaturen i hovedelva	<ul style="list-style-type: none"> - Påvirkning fra sideelver - Påvirkning av grunnvannstilstrømning - Overføringer fra hovedelva - Vannkraftutbygging, uttak til vanning, vannforsyning etc.
Sanntidssimuleringer for bestemmelse av driftsstrategier	<ul style="list-style-type: none"> - Optimal temperatur på strekninger av elva
Tiltak på nedbørsfeltnivå	<ul style="list-style-type: none"> - Vurdering av effekten av tiltak langs elvene for å endre temperaturforholdene ved f.eks. planting/fjerning av kantskog, terskelbygging, endringer av elveløp – kanalisering – dekanalisering.

Modelltyper

Matematiske modeller for elver og innsjøer/magasin kan grovt sett deles inn i tre typer:

- Fysisk baserte
- Empiriske
- Blandet (semi-empiriske)

Fysisk baserte modeller bygger på ligninger for transport av varme og væskebevegelse for å simulere temperaturvariasjoner. Modellene trenger data for å beskrive topografien/de geometriske forholdene (f.eks. form på elveløpet, helning), vannføringsforholdene og nødvendige klimaparametre. En fysisk basert modell kan anvendes i en rekke ulike situasjoner/system og vil kunne beskrive temperaturforholdene i de aller fleste situasjonene. Dette gjelder for eksempel i situasjoner med ekstreme vannføringsforhold eller ekstreme klimatiske forhold. Videre vil slike modeller kunne beskrive eksisterende og framtidige forhold i innsjøer og magasin, forutsatt at man har de nødvendige inngangsdata tilgjengelig.

Noen modeller for elver har begrensninger i måten de hydrauliske forhold simuleres, slik at man ikke kan simulere overkritiske forhold. Dette gjør at modellen ikke kan benyttes for å simulere forhold i bratte elver.

Empiriske modeller er på den andre siden statistiske sammenhenger mellom to eller flere parametre som beskriver systemet. Det enkleste eksemplet er en lineær regresjonsmodell mellom observert temperatur og vannføring. Disse modellene vil helt innlysende ikke kunne simulere endringer i parametre og forhold som ikke er med i modellen. Dette gjelder for eksempel endringer i elveløp som påvirker oppholdstiden, endringer i kantskog etc.

De fleste modellene er bygget opp som en blanding av fysisk baserte ligninger og empiriske ligninger. Det er ingen klar generell regel som skiller mellom de ulike modelltypene. Modelloversikter, brukermanualer og ulike rapporter gir en oversikt over hvordan modellene er bygd opp. Når en skal velge en modell for å løse et eksisterende eller mulig framtidig problem i en vannforekomst, er det viktig å kontrollere at den modellen en velger kan benyttes for å løse det aktuelle problemet eller gi svar på de aktuelle spørsmål en ønsker svar på. I denne oversikten er det lagt vekt på å beskrive fysisk baserte modeller.

Hydrodynamisk beskrivelse

Vanntemperaturmodeller har to hovedkomponenter:

- 1) Hydrodynamisk eller hydrologisk komponent
- 2) Vanntemperaturkomponent (som beskriver varmekraft og varmetransport)

Begge disse komponentene er viktige for å kunne beskrive de termiske forholdene i elver og innsjøer på en effektiv måte. Viktige parametre for å beskrive forholdene i elver er:

- Vannføring
- Dybde
- Arealet på flaten mellom luft og vann
- Arealet på flaten mellom bunn og vann
- Helning på elveleiet

I modeller for innsjøer og magasin er følgende parametre viktige:

- Vannføring ut og inn
- Volum
- Dybde
- Overflateareal
- Temperatur

Det tas direkte og indirekte hensyn til temperatur og tetthet for å simulere virkningen av stratifisering og for å beregne temperaturen på vann som tas ut av reservoaret.

Hydrodynamiske og hydrologiske modeller omtales ikke her utenom det som er nødvendig for å forstå temperaturutviklingen.

Numeriske løsningsmetoder

De styrende ligninger som anvendes i fysisk baserte hydrodynamiske modeller og vanntemperaturmodeller, er komplekse differensialligninger. Disse kan ikke løses direkte ved bruk av klassisk matematikk, med unntak av de enkleste modeller. I tilfeller der ligningene ikke kan løses direkte, benyttes ulike numeriske løsningsmetoder. For å sikre gode resultater fra modellarbeidet er målte verdier nødvendig uansett formål med modelleringen.

Det er utviklet en rekke modeller for innsjøer og magasin med det formål å kunne simulere både temperaturutviklingen og dermed utviklingen av lagdelingen. Flere av disse modellene har også innebygd muligheter til å simulere effekten av selektiv tapping av vann. Ved bruk av modeller for innsjøer i kombinasjon med modeller for elver vil en kunne foreta simuleringer av temperaturforholdene nedover i et vassdrag som følge av ulike strategier for å påvirke temperaturen.

Kalibrering og verifisering

De fleste modeller krever justeringer av parametre som kontrollerer prosesser for å tilpasse beregnede størrelser til observasjoner. Denne prosessen kalles kalibrering. Modelltilpasning, parameterbestemmelse eller parameterestimering er andre betegnelser på dette. Feil i selve programstrukturen kan også forekomme. Det er derfor viktig at modellbrukere er våkne for mulige feil i modellresultatene.

For å kunne kalibrere en modell trenges det inngangsdata og data for de sentrale parametrene som en ønsker å simulere for samme periode. Når det gjelder temperaturmodeller, er det spesielt meteorologiske, hydrologiske og vanntemperaturdata som er sentrale.

Vanntemperatur er meget enkel å måle. Det finnes en rekke sensorer og loggere tilgjengelig i markedet for dette. Disse kan programmeres til å registrere temperaturen ved de ønskede tidsstegene. Flere av sensorene tåler relativt høyt trykk, slik at de kan benyttes til å registrere temperaturen på ulike dyp i innsjøer og magasin.

Kalibrering av modeller kan enten utføres manuelt ved ”prøve- og feilemetoden”, eller en kan benytte automatiske rutiner. En fordel med manuell kalibrering av modeller er at en gjennom kalibreringsprosessen lærer seg hvordan modellsystemet virker.

Verifisering har som formål å kontrollere om modellen er godt tilpasset til det systemet som skal modelleres. Den ferdig kalibrerte modellen kjøres da mot et nytt datasett for å se hvor god overensstemmelse det er mellom modellresultatene og virkeligheten.

Usikkerhet

Kalibrering og verifisering brukes ofte for å komme fram til et mål på hvor godt modellen er tilpasset systemet. Det kan ofte være en stor utfordring å modellere et naturlig system med matematiske modeller. Tre hovedutfordringer er:

1. Tilfeldigheter/usikkerheter i inngangsdata.
2. Feil ved innsamling av data som benyttes i modellen.
3. Feil forståelse av fysiske prosesser og andre prosesser i systemet.

Tilfeldigheter/usikkerheter i inngangsdata i forbindelse med modellering av vanntemperatur har først og fremst sin årsak i usikkerheten som ligger i hydrologiske og meteorologiske hendelser. Det er altså svært vanskelig å forutsi framtidige temperaturforhold når de hydrologiske og meteorologiske forhold er ukjente. I tillegg kommer usikkerhet som skyldes menneskelige feil i forbindelse med innsamling av data og ved oppsett av modellene. Innsamlingen av nødvendige data for oppsett av modeller blir av økonomiske og tidsmessige årsaker ofte begrenset i tid, noe som også gir usikkerheter.

Modeller for elver

I vedlegg 1 er det gitt en detaljert oversikt over aktuelle operative modeller til bruk ved simulering av temperaturforhold i elver. Følgende modeller er tatt med:

- CEQUAL-RIV1
- QUAL2E Enhanced Stream Water Quality Model
- HSPF, HYDROLOGICAL SIMULATION PROGRAM-FORTRAN Enhanced Stream Water Quality Model

- SNTEMP
- WQRRS
- HEC5-Q
- CE-QUALW-2
- HEC-RAS

Modeller for innsjøer og magasin

Det finnes et stort antall modeller som kan benyttes for å simulere innsjøer og magasin. I vedlegg 2 er det tatt med et utvalg av typiske modeller. Følgende modeller er tatt med:

- CEQUAL-R1
- CE-QUALW-2
- HEC5-Q
- WQRRS
- Water temperature-ecological (WT-ECO)
- BETTER Temperature Model
- 3-D TEMPEST - (Transient Energy Momentum and Pressure Equations Solution in Three Dimensions)
- MASS2 - (Modular Aquatic Simulation System)
- QUAL-2EU - (Water Quality Model - Enhanced)
- DYRESM

3D CFD modeller

3D eller såkalte CFD modeller benyttes i stadig større grad. En oversikt over disse er gitt i vedlegg 3. Følgende modeller er tatt med:

- FLOW-3D model
- AQUADYN model
- TELEMAC model
- Delft3D model
- MIKE 3 model
- SSIIM

Andre 3-D modeller som ikke er beskrevet i vedlegg

- CFX model
- CH3D model
- TABS models
- PHOENICS model

Valg av modell

Modellene som er tatt med i denne oversikten er generelle eller universelle modeller som vil kunne tilpasses de fleste innsjøer/magasin eller elver. Ingen av modellene

krever kunnskap i programmering. Det som er viktig er at modelleringsarbeidet utføres av personer med grunnleggende kjennskap til innsjø- og elvehydraulikk.

Ved valg av modell for både elv og innsjø er det en rekke faktorer som må tas i betraktning. En del spørsmål som bør stilles av den som skal utføre modelleringsarbeidet er:

- Er modellen i stand til å gi svar på det eller de problem som en ønsker svar på?
- Hvilke data er nødvendig for å bruke modellen og er disse data tilgjengelig?
- Er modellen fritt tilgjengelig eller ikke?
- Er det begrensninger i hva modellen kan simulere?
- Hvor ressurskrevende er det å benytte modellen (tid, penger, ekspertise)?

En modell er et verktøy som skal benyttes for å gi svar på/løse et problem. Det er derfor viktig å forsikre seg om at modellen som en velger, virkelig kan gjøre dette. I denne forbindelse er ei vurdering av hva som er nødvendig å ha tilgang til av inngangsdata og kalibreringsdata for modellen viktig å ta i betraktning.

Egenskaper til modellen og nødvendige data for denne er vanligvis dokumentert i brukermanualene som følger med modellene. En gjennomgang av dokumentasjonen for modellen samt brukermanualen gir vanligvis tilstrekkelig informasjon til å avgjøre om en modell er aktuell eller ikke.

Ved vurdering av modeller vil en ofte se at modellene gir muligheter til å simulere flere parametre enn det som en trenger i et aktuelt tilfelle. For eksempel gir mange modeller som kan benyttes for å simulere temperatur også mulighet til å simulere flere vannkvalitetsvariabler. Det er viktig at man ved valg av slike modeller forsikrer seg om at modellen kan benyttes uten at man må ha data for prosesser som en ikke er interessert i.

Det finnes svært mange modeller tilgjengelig for simulering av vannkvalitet og temperatur. Dette gjelder både modeller som er fritt tilgjengelige, og modeller hvor en må betale en avgift. Svært mange av de som er fritt tilgjengelige er utviklet i USA.

For norske elver vil en endimensjonal modell være tilstrekkelig. De fleste av modellene som er nevnt i oversikten over vil være aktuelle. En modell som skiller seg fra andre modeller er SNTTEMP. Denne har et enkelt brukergrensesnitt som egner seg fint for raske overslagsberegninger

Ved valg av modeller for innsjøer er det viktig å vite om det er markert horisontal lagdeling i magasinet/innsjøen eller om den er preget av stor gjennomstrømning med mindre horisontal lagdeling. Den beste måten å finne ut hvordan temperaturforholdene og lagdelingen i et magasin eller innsjø er, vil være å gjennomføre temperaturmålinger på et par steder i magasinet. Dersom det er sterk horisontal lagdeling i innsjøen, kan denne modelleres med en endimensjonal modell. Dette forutsetter at tidssteg på simuleringen er 1 døgn eller lenger. Gyldigheten av en

antakelse av at magasinet kan modelleres endimensjonalt, bør testes mot innsjøens stabilitetstall LN (Lake Number) (Imberger and Patterson, 1990). LN angir forholdet mellom stabiliteten til lagdelingen og vindkreftene som virker på overflaten. Se (Imberger and Patterson, 1990) for den matematiske definisjonen av dette.

Tilsvarende er det laget kriterier som viser hvor stabil lagdelingen er i forhold til innstrømning fra elver og overføringstunneler.

Dersom magasinet eller innsjøen har en stabil horisontal lagdeling, kan endimensjonale modeller benyttes. Av disse er WQRRS og DYRESM to meget anvendte modeller.

Flerdimensjonale modeller benyttes spesielt der man ønsker detaljerte simuleringer over korte perioder. Eksempel på dette kan være simuleringer av utforming av inntakskonstruksjoner.

Mulige anvendelser av temperaturmodeller i Norge

Matematiske modeller for simulering av temperaturforhold i elver og innsjøer brukes i dag for norske forhold.

Tabell 7 Eksempler på modellanvendelse

Formål	Mulige resultater
Karakterisering av eksisterende termisk regime i elver og innsjøer/magasin med utgangspunkt i historiske forhold	Generere data som beskriver historiske forhold i vannforekomsten som grunnlag for å beskrive en førsituasjon ved inngrep i vassdraget
Analyse av endringer i det termiske regimet i et vassdrag som følge av utbygging/regulering	Data for mulige temperaturendringer
Analyse av det termiske regimet i et vassdrag som følge av endringer i driftsstrategi	Data for mulige temperaturendringer i vassdraget
Bestemmelse av kompensierende tiltak for å motvirke uønskede temperatureffekter i magasin og på elvestrekninger	Optimale tiltak for å oppnå ønskede temperaturregime
Bestemmelse av effekten av innstrømning og uttak av vann fra elver og bekker på temperaturen i hovedelva	Vurdering av påvirkning fra sideelver, av grunnvannstilstrømning, overføringer fra hovedelva
Bestemmelse av optimalt/optimale inntaksnivå ved uttak av vann til industrielt formål, f.eks. fiskeoppdrett	Best mulige inntaksnivåer
Vurdering av responsen på eksisterende eller foreslåtte magasin av endringer i meteorologiske forhold/klimaendringer	Vurderinger av effekten av global oppvarming på de termiske forholdene i vassdrag

9. Oppsummering

Vanntemperaturen er bestemmende for mange fysiske, kjemiske, biologiske og økologiske prosesser i innsjøer, magasin og elver. Den påvirker fysiologi og atferd til bunndyr og fisk. For fisk generelt er vanntemperaturen viktig for gyttidspunkt og eggutvikling og er sammen med næringstilgang den viktigste faktoren for fiskevekst i rennende vann. Løseligheten av oksygen varierer med temperaturen. Kaldt vann har mest oksygen, men turbulens gjør at oksygen sjelden er begrensende faktor i rennende vann (Saltveit, 2006).

I Norge og internasjonalt har det vært mye fokus på temperaturens betydning for laksebestanden. Det er publisert mange artikler med fokus på dette. Jensen et al. (2002) gir en meget omfattende oversikt over dette temaet.

Endringer av vanntemperatur i vassdrag som følge av inngrep i form av reguleringer, er et område som har fått stor oppmerksomhet i Norge og andre steder.

I magasinkraftverkene samles vannet i ett eller flere magasin i vannrike perioder av året og slippes gjerne ut om vinteren, men også i tørre perioder ellers i året. Overføring av vann fra ulike deler av vassdraget og mellom nabovassdrag er vanlig (f.eks. Ulla-Førre, Lyse, Røssåga, Svartisen og Kobbelv). Utløpet fra kraftverket kan være direkte i fjorden (f.eks. Lyse, Blåfalli I, Jostedøla) eller i den regulerte elva (f.eks. Brokke (Otra), Røssåga, Surna). Utløpet kan også gå ut i et magasin (f.eks. Kvilldal kraftverk (Ulla-Førre)). Tvede (1993).

Den vanligste effekten av magasinkraftverk på elvestrekningen nedstrøms utslippet fra kraftverket er økt vannføring og høyere temperatur om vinteren og lavere temperatur om sommeren i forhold til naturlig tilstand. Dette er f.eks. situasjonen på en ca. 10 km lang strekning nedstrøms Alta kraftverk i Alta-Kautokeinovassdraget, strekningen i Surna på Nordmøre, nedstrøms Trollheimen kraftverk og en rekke andre elver med kraftverksinntak i dypere vannmasser og med tapping om vinteren.

Forskjellen i temperatur mellom de øvre og nedre lagene varierer fra innsjø til innsjø avhengig av en rekke faktorer:

- klimatiske forhold (temperatur, innstråling, vind, nedbør etc.)
- topografi (dybdeforhold)
- hydrologiske forhold (tilrenning, avløp)
- tappemønstre

I vassdrag der kraftverket slipper driftsvannet rett i fjorden, eller der deler av nedbørsfeltet er overført til et annet nedslagsfelt, bidrar bare restfeltet til vannføringen. Vannføringen reduseres da gjennom hele året. Resultatet blir ofte høyere vanntemperatur om sommeren og lavere om vinteren. Redusert vintervannføring kan imidlertid gjøre at grunnvanntilsetningen til elva utgjør en forholdsvis større andel av vannføringen. Dette kan gi høyere vintertemperaturer enn ventet (Sima, Vassbygd-elva). Imidlertid kan vannføringen bli svært høy også i slike vassdrag i perioder

dersom det forekommer overløp fra dammer som ligger oppstrøms (Storåna, Otra, Røssåga), eller dersom kapasiteten i bekkeinntakene overskrides (Gluggvasselv).

Det finnes en rekke tekniske muligheter for å endre temperaturen på utløpsvann fra et reservoar. Flere av disse er tatt i bruk rundt omkring i verden. De fleste referansene er fra USA, men også i Australia er disse metoder i bruk. Alle metodene som er foreslått, kan benyttes i Norge.

Den mest utprøvde metode er bruk av konstruksjon med mulighet for tapping fra forskjellige nivåer (selektiv tapping). Disse konstruksjonene er meget kostbare å installere og krevende i bruk. I Alta er en konstruksjon med tapping fra 2 nivåer i bruk. Effekten av denne tappingen er i tråd med forventningene.

Ved uttak av små vannmengder kan enkle konstruksjoner benyttes. Dette er for eksempel gjort i forbindelse med fiskeoppdrettsanlegg, hvor inntaksrøret er forlenget med en plastslange, og hvor en regulerer dybden vannet trekkes fra ved å heve og senke slangen.

Forut for bygging av spesielle konstruksjoner for regulering av temperaturen på vannet bør en foreta beregninger eller simuleringer av hvilken effekt et slikt tiltak vil ha. Til hjelp i et slikt arbeid kan en benytte alt fra enkle overslagsmetoder til avanserte modeller. Svært mange modeller er utviklet med dette for øye og er tilgjengelig på internett. Disse modellene er presentert i vedlegget til denne rapporten.

10. Referanser

- Asvall, R.P. 2007 Altautbyggingen. Vanntemperatur- og isforhold om vinteren (2006-07). NVE Oppdragsrapport 2007-14.
- Asvall, R.P. 2007b Utvidelse av Einunna kraftverk og nytt magasin i Markbulia. Virkninger på vanntemperatur- og isforhold. NVE Oppdragsrapport 2007-13.
- Asvall R.P. 2005 Altautbyggingen. Vanntemperatur- og isforhold ved bruk av øvre inntak om vinteren. Oppdragsrapport A 21- 2005, NVE.
- Bartholow J.M. 1989 Stream Temperature Investigations: Field and Analytic Methods. Instream Flow paper no. 13. US Fish and Wildlife Service, National Ecology Research Centre, 2627 Redwing road, Fort Collins, Co 80526-2899.
- Ben Hodges, B. and Cheri Dallimore, S. 2001 ESTUARY AND LAKE COMPUTER MODEL, ELCOM Science Manual Code Version 1.5.0.
http://www2.cwr.uwa.edu.au/~ttfadmin/cwrsoft/doc/elcom_science/ch9.html
- Bender, M.D., G.E. Hauser, M.C. Shiao, and Proctor, W.D. 1990 A two-dimensional reservoir water quality model. Technical Reference and User's Guide. Tennessee Valley Authority Engineering Laboratory, Norris, Tennessee. Corvallis, Oregon.
- Boles, G.L. 1985 Temperature and Control in Lewiston Reservoir for Fishery Enhancement at the Trinity River Hatchery in Northern California. California Department of Water Recourses, Red Bluff, CA.
- Deas, M.L. and Lowney, C.L. 2000 Water Temperature Modelling Review, Central Valley, Sponsored by the Bay Delta Modelling Forum, September 2000.
- Engelund og Christensen 1969 Lagdelte og inhomogene vædskers hydraulikk. Polyteknisk forlag, København.
- Fischer, H.B., List, E.G., Koh, R.C.Y., Imberger, J. & Brooks, N.H. 1979 Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, New York, NY.
- Hall, F. 1986 Hydraulic design of selective withdrawal structures at the Elk Creek Dam. In Proceedings: CE Workshop on Design and operation of Selective Withdrawal Intake Structures June 24-28, 1985. San Francisco, CA, May 1986, pp 26-27.
- Harby, A. 2007 Bedre vannføringer i Surna. Foredrag. EBL-Kompetanse 2007. [dok.ebl-kompetanse.no /Foredrag/2007/Vassdragsdrift/Harby2.pdf](http://dok.ebl-kompetanse.no/Foredrag/2007/Vassdragsdrift/Harby2.pdf)
- Holtan, H. 1960 Selbusjøen og Jonsvatnet. En limnologisk undersøkelse. NIVA, Oslo.
- Hosomi, M., Saigusa, T., Yabunaka, K., Okubo, T. and Murakami, A. 1996 Development of a water temperature-ecological model to stimulate global warming effects on lake ecosystem. Water Science and Technology Vol 34, No 7-8, pp 237-244, IWA Publishing 1996.

- Imberger, J. and Patterson, J.C. 1990 Physical limnology. *Advances in Applied Mechanics*, 27: 303-455.
- Imboden, D.M. & Wuest, A. 1995 Mixing mechanisms in lakes, in A. Lerman, D.M. Imboden & J.R. Gat, eds. 'Physics and Chemistry of Lakes', Springer Verlag, pp. 83-138.
- Jensen, C.S., Gravem, F.R. og Poléo, A.B.S. 2002 Laks og temperatur – en litteraturgjennomgang. Suldalslågen Miljørapport nr. 13.
- Kvambekk, Å.S. Vestsideelvene i Jostedalen. Virkning på vanntemperatur og isforhold. NVE. Oppdragsrapport A 12-2008.
- Kvambekk, Å.S., Melvold, K., Berthling, I. Temperaturforhold i elver ved redusert vannføring. NVE Rapport nr. 11-2006.
- Mobley, M., Tyson, W., Webb, J. and Brock, G. 1995 Surface water pumps to improve dissolved oxygen content of hydropower releases. Tennessee Valley Authority, Scientific Literature.
- Morgan, P. and Elliot, S.P. 2002 Mechanical desertification for reservoir management. In <http://www.wears.com.au/pdfs/mech.pdf>
- NOU 1999 Til lags åt alle kan ingen gjera? Om årsak til nedgangen i de norske villaksbestandene og forslag til strategier og tiltak for å forbedre situasjonen. NOU nr. 1999: 9.
- Risholt L.P., Vaskinn K.A. og Støwer, B. 2003 Tiltak for å sikre vannkvaliteten i Jonsvatnet. Statkraft Grøner rapport SG560081. Trondheim 2003.
- Saltveit, S.J. 2006 Økologiske forhold i vassdrag – konsekvenser av vannføringsendringer. En sammenstilling av dagens kunnskap. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.
- Sherman, B. 2000 Scoping Options for Mitigating Cold Water Discharges from Dams. CSIRO Land and Water, Canberra. Consultancy Report 00/21, May 2000.
- Socolofsky, S.A. and Jirka, G.H. 2004 "Large Scale Flow Structures and Stability in Shallow Flows", *J. Environmental Engineering and Science, Can. Soc. Civ. Eng.*, 3, 451-462.
- Steinsvik, K. 2003 Personlig meddelelse.
- Tvede, A. 1993 Hydrologi. I: Inngrep i vassdrag; Konsekvenser og tiltak - en kunnskapsoppsummering. Faugli, P.E., Erlandsen, A.H. & Eikenæs, O. (red.), s. 66-95. Norges vassdrags- og energiverk.
- Vaskinn, K.A. 1983 Anvendelse av deterministisk matematiske modeller for bestemmelse av temperatur i vassdrag. Avhandling for graden Dr.ing., NTNU, Institutt for vassbygging. Trondheim.

VEDLEGG 1

Modeller for elver

Navn	CEQUAL-RIV1
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional <u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> dynamic <u>Time Step:</u> sub-daily <u>Heat Budget Formulation:</u> full heat budget and equilibrium temperature method <u>Capabilities:</u> CE-QUAL-RIV 1 is a one-dimensional (longitudinal) fully dynamic hydraulic and water quality simulation model intended for modeling highly unsteady streamflow conditions, such as associated with peaking hydroelectric tailwaters. The model also allows simulation of branched river systems with multiple control structures such as reregulation dams and navigation locks and dams. The model has two parts, hydrodynamics and water quality. Output from the hydrodynamic model is used to drive the water quality model. Temperature is a primary constituent that can be modeled, but other water quality constituents include dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, nitrogen and phosphorous species and transforms, coliform bacteria, dissolved iron and manganese, and the effects of algae and macrophytes.</p> <p>The model was originally developed at the Ohio State University for the US Environmental Protection Agency for predicting water quality associated with storm water runoff. The model was revised during the 1980's by Ohio State University and the USACE Waterways Experiment Station (WES). The current version has been tested and applied in several studies at WES.</p>
Tilgjengelig	US Army Corps of Engineers, Model Availability: generally available on request: http://www.wes.army.mil/el/elmodels/index.html#wqmodels
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	Environmental Laboratory. 1995. CE-QUAL-RIV1: A dynamic, one-dimensional (longitudinal) water quality model for streams: User's Manual, Instructional Report EL-95-2, U.S. Army Corps of Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Navn	QUAL2E Enhanced Stream Water Quality Model
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional <u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> steady-state <u>Time Step:</u> sub-daily <u>Heat Budget Formulation:</u> full heat budget <u>Capabilities:</u> QUAL2E permits simulation of several water quality constituents in a branching stream system using a finite difference solution to the one-dimensional advective dispersive mass transport and reaction equation. It is intended as a water quality planning tool for developing total maximum daily loads (TMDLs) and can also be used in conjunction with field sampling for identifying the magnitude and quality characteristics of nonpoint sources. The QUAL2E Windows interface was developed to make the model more user friendly. The interface provides input screens to facilitate preparing model input, executing the model, and graphical viewing of both input data and model results. Help screens are provided. The conceptual representation of a stream used in the QUAL2E formulation is a stream reach that has been divided into a number of subreaches or computational elements equivalent to finite difference elements. For each computational element, a hydrologic balance in terms of flow, a heat balance in terms of temperature, and a materials balance in terms of concentration is written. Both advective and dispersive transport are considered in the materials balance. Mass can be gained or lost from each element by transport processes, external sources and sinks (e.g., waste discharges or withdrawals) or by internal sources and sinks (e.g., benthic sources or biological transformations). These equations are then solved for the steady flow, steady state condition in a classical implicit backwards difference method. Mass transport in the QUAL2E computer program is handled in a relatively simple manner. The forcing function used for estimating transport is the streamflow rate, which, as mentioned above, is assumed to be constant. Stream velocity, cross-sectional area, and depth are computed from streamflow.</p> <p>QUAL2E-UNCAS is an enhancement allowing users to perform three types of uncertainty analysis: sensitivity analysis, first order error analysis, and Monte Carlo simulation. The computer program uses pre- and post-processing algorithms to select the input variables and/or parameters to be altered without the user having to manually restructure the input data set and to store and manipulate only the output of interest. The modeler is free to select the important variables and locations in the stream network where uncertainty effects are desired. QUAL2E requires some degree of modeling sophistication and expertise on the part of a user. The user must supply more than 100 individual inputs, some of which require considerable judgment to estimate. The uncertainty analysis procedures incorporated in the computer program serve both to guide the user in the calibration process as well as to provide information about the uncertainty associated with the calibrated model.</p>

	<p><u>Remarks:</u> QUAL2E is one of the most widely used general stream water quality models in the United States. Used in a wide range of regulatory and water quality management applications for rivers, lakes, and estuaries.</p>
Tilgjengelig	<p><u>QUAL2E Model (DOS):</u> Center for Exposure Assessment Modeling 960 College Station Road, Athens, Georgia 30605-2700 706-355-8400</p> <p>ceam@epamail.epa.gov Download: http://www.epa.gov/ceampubl/softwdos.htm (DOS version) Diskette Exchange: at above address Via ftp: ftp.epa.gov (see website for instructions)</p> <p><u>QUAL2E Windows Interface:</u> Exposure Assessment Branch (4305) 401 M Street, S.W., Washington, DC 20460 Download: http://www.epa.gov/OST/BASINS/bsnsdocs.html (interface runs under Windows Version 3.1, Windows 95, or Windows 98. It does not run under Windows-NT)</p>
Utvikler	USEPA
Dokumentasjon	<p>L.C. Brown and T.O. Barnwell. 1987. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User's Manual. EPA/600/3-87/007, EPA Environmental Research Laboratory. MAY (NTIS PB87-202-156) (available via the Web).</p>

Navn	HSPF, HYDROLOGICAL SIMULATION PROGRAM – FORTRAN
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> channel routing</p> <p><u>Time Step:</u> sub-daily</p> <p><u>Heat Budget Formulation:</u> full heat budget</p> <p><u>Capabilities:</u> HSPF simulates the hydrologic, and associated water quality, processes on pervious and impervious surfaces and in streams and well-mixed impoundments for extended periods of time. HSPF uses continuous rainfall and other meteorological records to compute streamflow hydrographs and pollutographs. HSPF simulates interception soil moisture, surface runoff, interflow, base flow, snowpack depth and water content, snowmelt, evapo-transpiration, ground-water recharge, temperature, as well as a host of other water quality parameters (e.g., dissolved oxygen, biochemical oxygen demand (BOD), pesticides, conservatives, fecal coliforms, sediment transport, pH, nutrients, phytoplankton, and zooplankton). Program can simulate one or many pervious or impervious unit areas discharging to one or many river reaches or reservoirs. Frequency-duration analysis can be done for any time series. Any time step from 1 minute to 1 day that divides equally into 1 day can be used. Any period from a few minutes to hundreds of years may be simulated. HSPF is generally used to assess the effects of land-use change, reservoir operations, point or nonpoint source treatment alternatives, flow diversions, etc. Programs, available separately, support data preprocessing and postprocessing for statistical and graphical analysis of data saved to the Watershed Data Management (WDM) file.</p>
Tilgjengelig	<p>1. U.S. Geological Survey Hydrologic Analysis Software Support Program 437 National Center, Reston, VA 20192 h2osoft@usgs.gov</p> <p>2. U.S. Environmental Protection Agency (http://www.epa.gov/ceampubl) USGS Official versions of U.S. Geological Survey water-resources analysis software are available for electronic retrieval via: http://water.usgs.gov/software/ and via anonymous File Transfer Protocol (FTP) from: water.usgs.gov (path: /pub/software).</p> <p>The WWW page and anonymous FTP directory from which the HSPF software can be retrieved are, respectively: http://water.usgs.gov/software/hspf.html and /pub/software/surface_water/hspf</p> <p>EPA versions are available: http://www.epa.gov/ceampubl/hspf.htm</p>

Utvikler	USGS
Dokumentasjon	<p>Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jr., Donigian, A.S., Jr., and Johanson, R.C., 2001, Hydrological Simulation Program-Fortran: User's manual for version 12: U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, Ga., EPA/600/R-97/080, 831 pp.</p> <p>Related Documentation: Flynn, K.M., Hummel, P.R., Lumb, A.M., and Kittle, J.L., Jr., 1995, User's manual for ANNIE, version 2, a computer program for interactive hydrologic data management. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4085, 211 p.</p>

Navn	SNTEMP
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> Steady-state</p> <p><u>Time Step:</u> Daily to monthly</p> <p><u>Heat Budget Formulation:</u> Equilibrium temperature method</p> <p><u>Model Capabilities:</u> SNTEMP is a mechanistic, one-dimensional heat transport model that predicts the daily mean and maximum water temperatures as a function of stream distance and environmental heat flux. Net heat flux is calculated as the sum of heat to or from longwave atmospheric radiation, direct short-wave solar radiation, convection, conduction, evaporation, streamside vegetation (shading), streambed fluid friction, and the water's back radiation. The heat flux model includes the incorporation of groundwater influx. The heat transport model is based on the dynamic temperature-steady flow equation and assumes that all input data, including meteorological and hydrological variables, can be represented by 24-hour averages.</p>
Tilgjengelig	<p>Model Availability: Johnson Controls World Services P.O. Box 270308, Fort Collins, CO 80527 970-226-9413</p> <p>Download at http://www.mesc.usgs.gov/rsm/more_temp.html</p>
Utvikler	MESC, Biological Resources Division, USGS
Dokumentasjon	<p>U.S. Fish and Wildlife Service. 1984. Instream Water Temperature Model. Instream Flow Information Paper: No. 16. In cooperation with the U.S Soil Conservation Service. FWS/OBS-84/15. September. Available at: http://www.mesc.usgs.gov/rsm/more_temp.html</p>

Navn	WQRRS (Både elv og innsjøer kan modelleres)
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> dynamic (see “Capabilities” below)</p> <p><u>Time Step:</u> sub-daily</p> <p><u>Heat Budget Formulation:</u> full heat budget (upwelling long wave, evaporation, and conduction terms are linearized) or equilibrium temperature approach</p> <p><u>Capabilities:</u> The WQRRS package consists of the programs SHP, WQRRSQ, and WQRRSR that interface with each other. The Stream Hydraulics Package (SHP) and the Stream Water Quality (WQRRSQ) programs simulate flow and quality conditions for stream networks that can include branching channels and islands. The Reservoir Water Quality (WQRRSR) program is a one-dimensional model wise to evaluate the vertical stratification of physical, chemical and biological parameters in a reservoir. The SHP provides a range of optional methods for computing discharges, velocities and depths as a function of time and location in a stream system. The hydraulic computations can be performed optionally using input stage discharge relationships, hydrologic routing, kinematic routing, steady-flow equations of the full unsteady flow St. Venant equations (finite element method). The WQRRSR and the WQRRSQ programs provide capabilities for analyzing temperature and over a dozen chemical, physical, biological and organic constituents.</p> <p><u>Remarks:</u> The US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center does not formally Support WQRRS at this time.</p>
Tilgjengelig	<p>Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers 609 Second Street, Davis, CA 95616</p> <p>http://www.wrc-hec.usace.army.mil/software/index.html</p>
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	United States Army Corp of Engineers – Hydrologic Engineering Center (USACEHEC). 1986. WQRRS Water Quality for River-Reservoir Systems, User’s manual. Hydrologic Engineering Center. October 1978, revised 1986.

Navn	HEC-5Q
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> hydrologic routing</p> <p><u>Time Step:</u> sub-daily</p> <p><u>Heat Budget Formulation:</u> equilibrium temperature approach</p> <p><u>Capabilities:</u> HEC-5Q utilizes the flow simulation capabilities of HEC-5. HEC-5 simulates multiplepurpose multiple reservoir systems in essentially any stream tributary configuration using a variable computational interval. The water quality simulation module (HEC-5Q) computed the vertical distribution of temperature, as well as other constituents, in the reservoirs and the water quality in the associated downstream reaches. The model also determines the gate openings got reservoir selective withdrawal structures to meet user specified water quality objectives at downstream control points. If the downstream quality objectives cannot be satisfied by selective withdrawal, the model will determine if the objectives can be satisfied by an increase in flow quantity.</p> <p><u>Remarks:</u> HEC-5 is widely used; however HEC-5Q has been applied in relatively few studies. At this time HEC-5Q is being updated by the US Army Corps of Engineers and in the interim there is no formal support for the model. No timeline is provided for completion.</p>
Tilgjengelig	<p>Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers 609 Second Street,109 Davis, CA 95616 http://www.wrc-hec.usace.army.mil/software/index.html</p>
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	<p>The HEC-5Q water quality features are documented by an appendix to the HEC-5 users manual. A training document and several papers on specific application of the water quality model are also available from the Hydrologic Engineering Center. HEC-5 Simulation of Flood Control and Conservation Systems, Appendix on Water Quality Analysis. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, Draft 1987.</p>

Navn	CE-QUAL-W2
Beskrivelse	See discussion under “Reservoirs,” below
Tilgjengelig	
Utvikler	
Dokumentasjon	

Navn	HEC-RAS
Beskrivelse	<p>HEC-RAS is designed to perform one-dimensional hydraulic calculations for a full network of natural and constructed channels.</p> <p>The user interacts with HEC-RAS through a graphical user interface (GUI). The main focus in the design of the interface was to make it easy to use the software, while still maintaining a high level of efficiency for the user.</p> <p>The HEC-RAS system contains four one-dimensional river analysis components for: (1) steady flow water surface profile computations; (2) unsteady flow simulation; (3) movable boundary sediment transport computations; and (4) water quality analysis. A key element is that all four components use a common geometric data representation and common geometric and hydraulic computation routines. In addition to the four river analysis components, the system contains several hydraulic design features that can be invoked once the basic water surface profiles are computed.</p> <p>The water quality component of the modeling system is intended to allow the user to perform riverine water quality analyses. An advection-dispersion module is included adding the capability to model water temperature. This new module uses the QUICKEST-ULTIMATE explicit numerical scheme to solve the one-dimensional advection-dispersion equation using a control volume approach with a fully implemented heat energy budget. Transport and Fate of a limited set of water quality constituents is now also available in HEC-RAS.</p>
Tilgjengelig	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/

VEDLEGG 2

Modeller for innsjøer og magasin

Navn	CEQUAL-R1
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1- dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> water balance</p> <p><u>Time Step:</u> sub-daily</p> <p><u>Heat Budget Formulation:</u> full heat budget (upwelling long wave radiation and water surface saturation vapor pressure terms are linearized)</p> <p><u>Capabilities:</u> CE-QUAL-R1 simulates the vertical distribution of thermal energy and chemical and biological materials in a reservoir through time. The models are used to study water quality problems and the effects of reservoir operations on water quality. A reservoir is conceptualized as a vertical sequence of horizontal layers with thermal energy and materials uniformly distributed in each later. The distribution of inflows among the horizontal layers is based on density differences. Vertical transport of thermal energy and materials occurs through entrainment and turbulent diffusion. The interactions of numerous biological and chemical factors are reflected in the model. The model simulates the dynamics of over two dozen water quality variables, computing both inpool and downstream release magnitudes. Materials in the sediments can also be represented. Reservoir outflows may occur in the model according to a specified schedule of port releases. Alternatively the model may select port releases based on user specification of total release and desired release temperatures. Water quality conditions that can be addressed include prediction and analysis of thermal stratification, location of withdrawal ports required to meet downstream temperature objectives, analysis of storm events, upstream land use changes, or reservoir operational changes on in-pool release water quality.</p> <p><u>Remarks:</u> The model is an extension/outgrowth of WQRRS</p>
Tilgjengelig	<p>Water Quality and Contaminant Modeling Branch Environmental Laboratory U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MI 39180</p> <p>http://www.wes.army.mil/el/elmodels/index.html#wqmodels</p>
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	CEQUAL-R1: A Numerical One-Dimensional Model of Reservoir Water Quality, User's Manual, Instruction Report E-82-1, Environmental Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI. July 1986.

Navn	CE-QUALW-2
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 2 - dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> dynamic</p> <p><u>Time Step:</u> sub-daily</p> <p><u>Heat Budget:</u> equilibrium temperature method</p> <p><u>Capabilities:</u> CE-QUAL-W2 was developed for reservoirs, but has also been applied to rivers and estuaries. The two-dimensional model determines the vertical and longitudinal distributions of thermal energy and selected biological and chemical materials in a system through time. The models provides capabilities for assessing the impact of reservoir design and operations on the water quality variables. The model determines in-pool water volumes, surface elevations, densities, vertical and longitudinal velocities, temperatures, constituent concentrations as well as downstream release concentrations. The unsteady hydrodynamic model accommodates variable density effects on the flow field. The water quality model simulated the dynamics of up to 20 constituents in addition to temperature.</p> <p><u>Remarks:</u> An updated version (V 3.0) will be available soon</p>
Tilgjengelig	<p>Water Quality and Contaminant Modeling Branch Environmental Laboratory U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MI 39180</p> <p>http://www.wes.army.mil/el/elmodels/w2info.html</p>
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0, User Manual. Instructional Report NE-86-5, Environmental Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MI. June 1995.

Navn	HEC-5Q
Beskrivelse	See HEC-5Q under “River Model,” above
Tilgjengelig	
Utvikler	
Dokumentasjon	

Navn	WQRRS (Både elv og innsjøer kan modelleres)
Beskrivelse	<p><u>Dimension:</u> 1-dimensional</p> <p><u>Hydrodynamics/hydraulics:</u> water balance, hydrologic floodrouting</p> <p><u>Time Step:</u> sub-daily</p> <p><u>Heat Budget:</u> full heat budget (upwelling long wave, evaporation, and conduction terms are linearized) or equilibrium temperature approach</p> <p><u>Capabilities:</u> WQRRS (similar to CE-QUAL-R1) simulates the vertical distribution of thermal energy and chemical and biological materials in a reservoir through time. The models has used to study water quality problems and the effects of reservoir operations on water quality. A reservoir is conceptualizes as a vertical sequence of horizontal layers with thermal energy and materials uniformly distributed in each later. The distribution of inflows among the horizontal layers is based on density differences. Vertical transport of thermal energy and materials occurs through entrainment and turbulent diffusion. The interactions of numerous biological and chemical factors are reflected in the model. The model simulates the dynamics of over a dozen water quality variables, computing both in-pool and downstream release magnitudes. Reservoir outflows may occur in the model according to a specified schedule of port releases. Alternatively the model may select port releases through a suboptimization procedure based on user specification of total release and desired release temperatures. Water quality conditions that can be addressed include prediction and analysis of thermal stratification, location of withdrawal ports required to meet downstream temperature objectives, analysis of storm events, upstream land use changes, or reservoir operational changes on in-pool release water quality. Reservoirs can be represented as two formulations: well mixed or prone to stratification – defined by a densimetric Froude number.</p> <p><u>Remarks:</u> The US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center does not formally support WQRRS at this time.</p>
Tilgjengelig	<p>Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers 609 Second Street, Davis, CA 95616</p> <p>http://www.wrc-hec.usace.army.mil/software/index.html</p>
Utvikler	US Army Corps of Engineers
Dokumentasjon	United States Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center (USACEHEC). 1986. WQRRS Water Quality for River-Reservoir Systems, User’s manual. Hydrologic Engineering Center. October 1978, revised 1986.

Navn	Water temperature-ecological (WT-ECO)
Beskrivelse	<p>Water temperature-ecological (WT-ECO) model is employed to simulate the effects of global warming on lake and reservoir ecosystems. The WT model includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) variations in the eddy diffusion coefficient based on the degree of thermal stratification and the velocity of wind (ii) a sub-model for simulating the freezing and thawing processes of surface water, water temperatures, and the mixing rates between two adjacent layers of water. <p>The ECO model then uses these results to calculate the resultant effect on a lake's ecological dynamics, e.g., composition of phytoplankton species, their respective concentrations, and nutrient concentrations. When the model was benchmarked against Lake Yunoko, a dimictic lake, fairly good agreement was obtained over a 4-yr period; thereby indicating it is suitably calibrated. In addition, to assess the effects of global warming on a lake ecosystem, changes in Lake Yunoko's water temperature/quality were simulated in response to an increase in air temperature of 2 - 4°C. Results indicate that such an increase will:</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) increase thermal stratification in summer, which increases the nutrient concentrations in bottom water due to nutrient release from bottom sediment (ii) increase the concentration of phytoplankton at the beginning of the autumn circulation period, and (iii) change the composition of phytoplankton species.
Tilgjengelig	Tokyo University of Agriculture and Technology Koganei, Tokyo 184 Japan, Lake Biwa Research Institute Otsu, Shiga 520 Japan
Utvikler	Tokyo University of Agriculture and Technology Koganei, Tokyo 184 Japan, Lake Biwa Research Institute Otsu, Shiga 520 Japan
Dokumentasjon	

Navn	BETTER Temperature Model
Beskrivelse	<p>The 2-D Box Exchange Transport Temperature Ecology Simulation of the development of temperature stratification and mixing of layers. Consist of a temperature model and a 3-D hydrodynamic model.</p> <p>Relative ease of use, reasonable computer run times for long (annual) simulations, and the availability of a post-processor to facilitate evaluation and interpretation of model output.</p>
Tilgjengelig	
Utvikler	Tennessee Valley Authority (TVA)
Dokumentasjon	Bender et al. 1990.

Navn	3-D TEMPEST - (Transient Energy Momentum and Pressure Equations Solution in Three Dimensions)
Beskrivelse	<p>Can be used to illustrate 3-dimensional, time-dependant fluid flow and heat transfer.</p> <p>Generally used in fluid dynamics problem solving related to waste and chemical processing, nuclear energy generation, containment transport, and thermal plume tracking.</p> <p>Has been applied to a variety of surface-water hydrodynamics and water quality problems in rivers, reservoirs, and estuaries.</p>

Navn	MASS2 - (Modular Aquatic Simulation System
Beskrivelse	<p>General purpose reservoir and riverine, unsteady 2-dimensional model.</p> <p>Internal utilization of depth-averaged hydrodynamics and transport.</p> <p>Simulates time-varying distributions of the depth-averaged velocities, water temperature and total dissolved oxygen.</p> <p>Represents the river/reservoir as a system of cells in a computational grid using shoreline and bathymetry.</p>
Tilgjengelig	
Utvikler	
Dokumentasjon	

Navn	QUAL-2EU - (Water Quality Model - Enhanced
Beskrivelse	<p>Can be a steady-state or dynamic model for conventional pollutants in branching streams and well mixed reservoirs.</p> <p>Widely used for waste load allocations, discharge permit determinations, and other pollutant evaluations.</p> <p>Allows for modeling effects of diurnal variations in meteorological data on water quality (temperature and DO).</p> <p>Model enhancement includes an ‘uncertainty analysis’ which include a sensitivity analysis, first order error analysis, and Monte Carlo simulation.</p> <p>Can simulate up to 15 water quality variables.</p> <p>The model is capable of supporting a dendritic system of tributaries and withdrawals.</p> <p>Contains no module for shade effect.</p>

Navn	DYRESM (DYnamic REServoir Simulation Model)
Beskrivelse	<p>DYRESM is a one-dimensional hydrodynamics model for predicting the vertical distribution of temperature, salinity and density in lakes and reservoirs satisfying the one-dimensional approximation. The one-dimensional approximation is valid when the forces acting to destabilize a water body (wind stress, surface cooling or plunging inflows) do not act over prolonged periods of time. The dynamics of many lakes and reservoirs, viewed over time scales longer than those of extreme events such as storms and floods, are well described using this approximation. DYRESM provides quantifiably verifiable predictions of the thermal characteristics in such systems over time scales ranging from several weeks to tens of years. The model thus provides a means of predicting seasonal and inter-annual variability of lakes and reservoirs as well as sensitivity testing to long-term changes in environmental factors or watershed properties. DYRESM can be run either in isolation for purely hydrodynamic studies or coupled to CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model) for investigations involving biological and/or chemical processes. The computational demands of DYRESM are quite modest and multi-year simulations can be carried out on PC platforms under Windows or Linux.</p> <p>The DYRESM computer model parameterizes the important physical processes leading to temporal changes in the temperature, salinity and density distributions in lakes and reservoirs. The model relies on parameterizations derived from detailed process studies (both from the field and in the laboratory) and thus draws on the internationally recognized strengths of the Centre for Water Research in analytical, laboratory and field measurement of density-stratified flows. The resulting model is unique in that reliable predictions are obtained without calibration.</p> <p>The set of science procedures and data structures were designed and built as an object-oriented (OO) core to DYRESM. This provides good encapsulation for the code, readily allows extension and matches closely the abstract conceptualization of the DYRESM model.</p>
Tilgjengelig	Centre for Water Research University of Western Australia
Utvikler	Centre for Water Research University of Western Australia
Dokumentasjon	Imerito, A.: DYNAMIC RESERVOIR SIMULATION MODEL DYRESM, v 4.0 Science Manual. Centre for Water Research University of Western Australia. February 20, 2007.

VEDLEGG 3

3D–CFD - Modeller for innsjøer og magasin

Navn	FLOW-3D model
Beskrivelse	<p>FLOW-3D is a CFD tool for developing design and implementation options over a wide range of issues facing hydraulics engineers, from large hydroelectric power projects to small municipal wastewater treatment systems. Simulation can play a crucial role for testing design options, helping to reduce complexity and focus efforts on optimized solutions. The valuable insights derived from numerically testing different design options can save considerable time and money.</p> <p>FLOW-3D specializes in transient, free-surface flows making it the ideal tool for simulating fluid where the surface varies spatially and is either constant or varying in time by employing numerical algorithms.</p> <p>Modeling Spillways, Hydraulic Jumps and Structures. Free-surface flows are those with a distinct interface between fluids with a high degree of density variation such as water and air. Modeling free surface flows requires advanced algorithms combined with general flow equations and turbulence modeling. This capability enables FLOW-3D to capture the trajectory of flow from a spillway, hydraulic jumps and surface variations formed by flow about submerged structures.</p>
Tilgjengelig	http://www.flow3d.com/
Utvikler	FLOW3D
Dokumentasjon	http://www.flow3d.com/apps/wat/app_water-overview.html

Navn	AQUADYN model
Beskrivelse	<p>AquaDyn is a powerful and easy-to-use hydrodynamic simulation model essential for water resources engineering studies, risk assessment, and impact studies. AquaDyn allows the complete description and analysis of hydrodynamic conditions (e.g., flow rates and water levels) of open channels such as rivers, lakes, or estuaries. Engineers, specialists, and decision-makers can use the specialized modules of the simulation package to predict impacts on water flow conditions. For instance, AquaDyn provides a reliable way to forecast the consequences of different activities such as dredging or building dikes, bridges piers, and embankments. AquaDyn can be used to model steady and unsteady flows in supercritical as well as subcritical conditions and therefore permits the user to take into account and study the effects of weirs, contractions, and tidal waves.</p> <p>AquaDyn Methods AquaDyn simulates the flow of the open channel by solving the two-dimensional shallow water equations using the finite-element method. It takes into account the Bed Elevation of the water course, water friction with the Bed, Wind stress, Gravity force, Coriolis force, turbulence dissipation and the complex geometry of the open channel.</p> <p>Input parameters and solution available in a single project file. A simulation can be restarted, modified and visualized at a later time by simply loading one project file. Import and Export ASCII file for compatibility with other software. Preprocessor, Postprocessor and the solver integrated in one executable; no need to transfer data file from one program to another one.</p>
Tilgjengelig	http://www.scisoftware.com/products/aquadyn_overview/aquadyn_overview.html
Utvikler	
Dokumentasjon	http://www.scisoftware.com/products/aquadyn_overview/aquadyn_overview.html

Navn	TELEMAC model
Beskrivelse	<p>TELEMAC version 6.0 (freeware version)</p> <p>The software suite Telemac, dedicated to free surface flows, has seen a growing success since 1993 and has been widely distributed throughout the world, with more than 200 licences and several hundreds of users. Telemac is used at EDF for dimensioning and impact studies, where safety is prevailing and, for this reason, reliability, validation and a worldwide recognition of our tools are of utmost importance. To meet these goals, and to improve access to Telemac, consultants, and to the whole community of researchers, EDF R&D has decided to move to freeware and open source. This important change has been achieved with the help of Telemac distributors, Sogreah and HR-Wallingford, and in full agreement with historical partners such as the Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF, France) and Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Germany). EDF, the distributors and historical partners are the first members of a co-developers consortium that will steer Telemac developments. As the quality of assistance, maintenance and hotline support are also very important to professional users, a special effort is being made to offer a broad range of fee-paying services.</p>
Tilgjengelig	http://www.telemacsystem.com/
Utvikler	http://www.telemacsystem.com/
Dokumentasjon	http://www.telemacsystem.com/

Navn	Delft3D model
Beskrivelse	Delft3D is a 2D/3D modelling system to investigate hydro-dynamics, sediment transport and morphology and water quality for fluvial, estuarine and coastal environments.
Tilgjengelig	delft3d.support@deltares.nl
Utvikler	Delft Hydraulics
Dokumentasjon	

Navn	MIKE 3 model
Beskrivelse	<p>MIKE 3 is a 3D modelling system for free surface flows, including advection-dispersion, water quality, heat exchange with the atmosphere, heavy metals, eutrophication, flooding and drying of intertidal areas, and sediment processes.</p> <p>MIKE 3 hydrodynamic module solves the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The user can choose between a hydrostatic pressure assumption and a generalised sigma coordinate transformation, and a nonhydrostatic pressure formulation and a z-level coordinate formulation. A total of five different turbulent closures can be employed: constant eddy viscosity, Smagorinsky subgrid scale model, k model, k-e model, or a mixed Smagorinsky/k-e model.</p> <p>Water quality modules simulate the fate and transport of conservative or linearly decaying constituents, eutrophication processes including nutrient cycling, phytoplankton, zooplankton, and benthic vegetation growth, processes affecting dissolved oxygen, exchange of metals between the bed sediments and the water column, and sediment transport/deposition/erosion.</p> <p>MIKE 3 is conceptually similar to MIKE 11 and MIKE 21, thus there is a high degree of compatibility, e.g. MIKE 21 output can be used directly as boundary data in MIKE 3.</p> <p>MIKE 3 is a commercial software package. Support is provided by DHI and other service centers worldwide. Available in a number of different languages.</p>
Tilgjengelig	<p>DHI Software Support Center Phone: +45 45 179 333/+45 45 179 333 E-mail: software@dhi.dk</p>
Utvikler	Danish Hydraulic Institute (DHI)
Dokumentasjon	User Manuals, Reference Manual and Scientific Background are provided for each module within the MIKE 3 package, along with help menus.

Navn	SSIIM
Beskrivelse	<p>SSIIM is an abbreviation for Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option. The program is designed to be used in teaching and research for hydraulic/river/sedimentation engineering. It solves the Navier-Stokes equations using the control volume method with the SIMPLE algorithm and the k-epsilon turbulence model. It also solves the convection-diffusion equation for sediment transport, using van Rijn's formula for the bed boundary. Also, a water quality module (include water temperature) is included.</p> <p>The program has an interactive graphical grid editor creating a structured grid. The post-processor includes vector graphics, contour plots, profiles etc. which can run simultaneously with the solver, enabling viewing of intermediate result.</p> <p>The programs have been compiled on different operating systems. The main user interface is made in Windows. The Windows version has been reported to also run on Linux using Wine. Native versions compiled on Linux have also been made, but they do not have a user interface. SSIIM versions have also been made for 64 bits operating systems. These versions are necessary for modelling grids larger than around 4 million cells. There is also an older version of SSIIM for OS/2. The input files for the examples included with the OS/2 version can be used on the other operating systems.</p> <p>As an academic institution NTNU unfortunately do not have the resources to give user support for SSIIM.</p>
Tilgjengelig	http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/
Utvikler	Professor Nils Reidar Olsen, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim
Dokumentasjon	http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/

VEDLEGG 4

**Rutine for beregning av med-
rivning ved bruk av boblegardin
(Morgan, P. and Elliot, S.P (2002))**

The bubble plume destratification in ELCOM is based on the routine in DYRESM. The model uses the simple buoyant plume equations, and assumes the plumes are circular and multiple plumes in any grid cell are non-interacting. Air is pumped to depth, and released into the water column via a diffuser. The bubbles rise, entraining ambient water. When the upwards buoyancy flux due to the air bubbles is equal to the downwards force (due to gravity) of the entrained ambient water, the bubble plume sheds the entrained water. This water is immediately routed to its neutrally buoyant level, without entrainment.

The bubble plume then begins to entrain ambient water again, until it reaches the surface where any entrained water is shed, and again routed to its neutrally buoyant level. Water insertion and entrainment is carried out by modifying the euler-lagrange momentum source term in the insertion and entrainment cells such that the total horizontal flow out of or into the cell is equal to the insertion or entrainment flow predicted. The divergence equation used to get the vertical velocities is also modified to account for this flow.

The bubbler is initialised by first computing the upwards buoyancy flux due to the air, as (Fischer et al. 1979, eqn 9.7)

$$B_{air} = gQ_{diff}$$

Note that the air flow rate MUST be that at the level of the diffuser, not the free-air flow rate of the compressor. The correction can be made by assuming that air is in ideal gas and is adiabatically compressed according to (Wallace and Hobbs 1977, p89)

$$Q_{diff} = Q_{air} \left(\frac{P_{air}}{P_{diff}} \right)^{0.71}$$

where:

- Q_{air} = the free air flow rate of the compressor,
- P_{air} = the air pressure (usually taken as 101.3 kPa),
- P_{diff} = the pressure at the level of the diffuser due to both the atmosphere and the depth of water, and
- Q_{diff} = the diffuser air flow rate.

Once the value of Q_{diff} is passed into the model, it is divided by the number of ports (or clusters) to determine the flow rate per port. All subsequent calculations are done on a per port basis, then multiplied by the total number of ports to get the total effect of the destratification system.

The flow rate of entrained water is computed as (Fischer et al.

$$Q_p = \alpha \frac{6\pi}{5} b_1 L_R B^{1/3} z^{4/3}$$

1979, eqns 9.28, 9.30, 9.107)

where:

B = the buoyancy flux [m^4/s^3]

z = the bottom layer thickness [m]

b_1 = a constant (= 4.7 - Fischer et al. 1979, p329)

L_R = the plume aspect ratio (plume radius to plume length, assumed to be a constant of 0.1)

α = is an entrainment coefficient.

$$Q_i = Q_{i-1} \left(\frac{P_{i-1}}{P_i} \right)^{0.71}$$

The first step is to compute the flow rate of air, which will increase due to decreasing pressure leading to adiabatic expansion of the bubbles. The new flow rate (due to adiabatic expansion) in layer i can be calculated as

where layer $(i-1)$ refers to the layer below, and pressure P has units of Pascals. The combined buoyancy flux of the air bubbles and entrained water is calculated as

$$B_i = gQ_i - g \left(\frac{\rho_i - \rho_p}{\rho_i} \right) Q_p$$

where:

ρ_i = the density of the current layer

Q_p = is the flow rate of the entrained volume.

The second term is the reduction in buoyancy flux due to the entrained water the plume is dragging with it.

The flow rate of the entrained volume in layer i is calculated as

$$Q_P = \alpha \frac{6\pi}{5} b_1 L_R B_i^{1/3} (z_i^{5/3} - z_{i-1}^{5/3}) + Q_{P,i}$$

When the combined buoyancy flux (equation 9.5) becomes negative, the entrained water detrains from the air plume. It is then routed to its neutrally buoyant level instantaneously.

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i rapportserien **Miljøbasert vannføring, fase II**

- Nr. 1-09 Brian Glover, John Brittain og Svein Jakob Saltveit: Evaluering av ordningen med prøvereglement (49 s.)
- Nr. 2-09 Knut Alfredsen, Tommi Linnansaari, Atle Harby, Ola Ugedal: Pilotstudie tilsigsstyrt minstevassføring (41 s.)
- Nr. 3-09 Lars Størset: Miljøvirkninger av vannkraft - forslag til undersøkelsesmetodikk (51 s.)
- Nr. 4-09 Odd Inge Vistad, Joar Vittersø, Oddgeir Andersen, Hogne Øian, Tore Bjerke: Hvor viktig er vatn og vassføring for friluftsliv? Brukerstudier om aktiviteter, opplevelser, holdninger, kraftutbygging og konsesjonsvilkår (84 s.)
- Nr. 5-09 Atle Harby (red.): Modeller for simulering av miljøkonsekvenser av vannkraft (51 s.)
- Nr. 1-10 Eva B. Thorstad (red.): Ål og konsekvenser av vannkraftutbygging - en kunnskapsoppsummering (135 s.)
- Nr. 2-10 Gunn E. Frilund (red.): Etterundersøkelser ved små kraftverk. Sumvirkninger på landskap. Botaniske verdier og småkraft, Bunndyr og småkraft, Konsesjonsfrie mikro- og minikraftverk (113 s.)
- Nr. 3-10 Kjetil Vaskinn: Temperaturforhold i elver og innsjøer. Tiltak for regulering av temperatur. Simuleringsmodeller (89 s.)



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen,
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
Internett: www.nve.no

