

# Hvilke endringer i Mjøsas temperatur- og strømforhold kan forventes som følge av en utbygging i Jotunheimen?

Av Arve Thendrup

Arve Thendrup er siv.ing. fra NTH 1971 og ansatt ved Vassdrags- og havnelaboratoriet ved NTH.  
Han er for tiden engasjert av Statens Forurensningstilsyn.

## INNLEDNING

En eventuell utbygging av vassdragene fra Jotunheimen for kraftformål vil berøre store naturområder. Det er derfor naturlig at det stilles spørsmål til hvor store endringer som kan forventes fra den normaltilstand vi har i dag. Ett av de mange spørsmål som er reist er om forurensningsituasjonen i Mjøsa vil bli forverret som følge av vassdragsreguleringen. For å besvare dette spørsmålet trenger vi bidrag fra mange fagområder. Denne artikkelen tar for seg et par sider ved de fysiske forhold i innsjøen.

Det kan innledningsvis være nyttig å ha klart for seg at Mjøsa på grunn av sin størrelse og kompleksitet stiller helt andre krav til omfanget av et undersøkelsesopplegg enn de fleste andre norske innsjøer. Størrelsesmessig (se fig. 1) er Mjøsa mer å sammenligne med våre større fjorder. F.eks. er Mjøsas overflateareal to ganger så stort som Oslofjordens areal innenfor Drøbak. Sett på denne bakgrunn er det som er utført av fysiske målinger i Mjøsa til nå ikke tilstrekkelig til å besvare alle de spørsmål som stilles med en rimelig grad av sikkerhet.

Denne artikkelen tar for det meste utgangspunkt i data for 1974. Det skyldes at det dette året ble samlet inn relativt mye data for temperatur i Mjøsa.

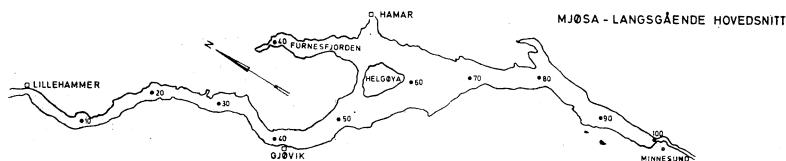
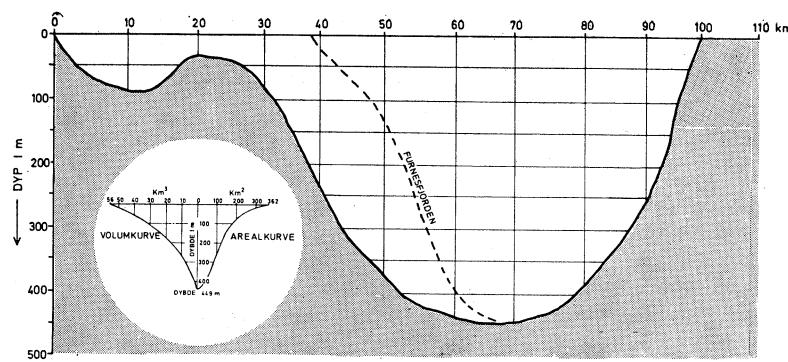
## TEMPERATURFORHOLDENE

Det er flere grunner til å studere temperaturforholdene i innsjøen. De forteller bl.a. også mye om de strømningsmessig og spredningsmessige forhold i innsjøen. De naturlige variasjonene i temperaturen kan være ett grunnlag for vurdering av eventuelle påførte endringer.

Temperatur- og strømningsmessig sett kan Mjøsa deles inn i flere områder. Her er det funnet hensiktsmessig å vurdere to områder adskilt. Det er:

1. Området Lillehammer — Gjøvik
2. Området Gjøvik — Helgøya — Furnesfjorden — Minnesund.

Området nord for Gjøvik synes å ha temperatur- og strømforhold som er vesentlig dominert av atmosfæriske forhold samt påvirkninger fra Lågen. Området syd for Gjøvik synes å ha temperatur-



#### MJØSA (data)

Lengde	117 km
Bredde	14 km (9 km)
Største dyp	449 m
Overflateareal	362 km <sup>2</sup>
Volum	$56240 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Middel dybde	153 m

Fig. 1. Noen topografiske data for Mjøsa.

og strømforhold som er vesentlig dominert av atmosfæriske forhold samt tilstedevarelsen av indre bølger. Disse to områdene synes derfor å kunne beskrives på hver sitt vis.

Flere sett med målinger støtter opp om en slik inndeling. Fig. 2 viser et lenge-

snitt for den vertikale temperaturfordelingen fra Lillehammer til Minnesund 6. — 9. april 1976. Det går frem at mens området nord for Gjøvik kan betraktes som et estuarområde med stadig innblanding av varmt vann fra Mjøsa i den kalde Lågen, var det mer homogene vannmasser i området syd for Gjøvik.

LILLEHAMMER

MINNESUND

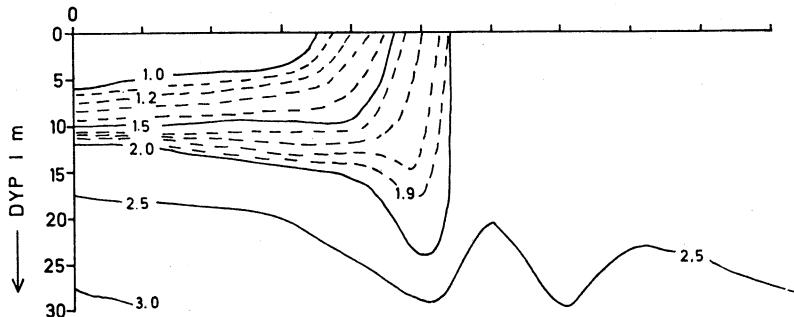


Fig. 2. Lengdesnitt for temperatur fra Lillehammer til Minnesund i perioden 6. — 9. april 1976.

Temperaturforløpet i Mjøsas hovedbaseng er vist i fig. 3 for perioden 1972—1976. Temperaturen i overflaten kan over et år variere mellom 0°C og ca. 18°C. Temperaturforholdene under 100 meters dyp er i motsetning til overflaten mer ensartet og varierer kun mellom ca. 3.2°C og 4.3°C. Da temperaturen for vannets

maksimum tetthet (Tmt) er avhengig av trykket, avviker Tmt i dype innsjøer noe fra 4°C.

På vårparten medfører oppvarmingen at vannsøylen blir ustabil. Det oppstår en vertikal sirkulasjon som resulterer i våromveltningen. Denne stopper først når temperaturen er lik eller overstiger Tmt.

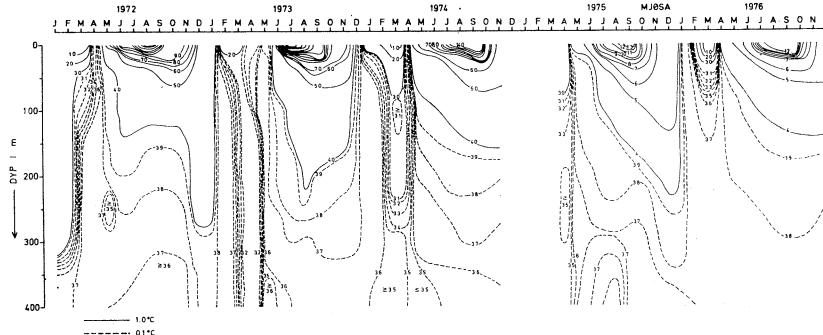


Fig. 3. Isolinjer for temperatur som funksjon av dyp og tid. Dataene er fra IHD-stasjonen noe syd for Helgøya. (Datamaterialet er innsamlet av NIVA.)

Ut over våren opphører de vertikale sirkulasjonene, og oppvarmingen av et forholdsvis tynt overflatelag skjer nå hurtig. 10°C isolermen når ned til mot 20 m dybde i august—september.

Med synkende lufttemperatur og økende vindaktivitet avkjøles overflatevannet fra august/september og utover høsten.

## INDRE BØLGER

Temperatur- og strømforholdene i Mjøsa syd for Gjøvik er i høy grad preget av forekomsten av indre langperiodiske bølger. Vi vil derfor se nærmere på dette forholdet.

Når vinden blåser over en vannflate, forårsaker den en skjærspenning på overflaten. Dette medfører at vann blir revet med og strøm oppstår. Dersom en stabil vind blåser over innsjøen over en viss tid, vil bevegelsen av vannmassene føre til at vann blir sjøvet opp i den ene enden av innsjøen. Oppstuvingen finner sin likevekt når helningen på vannspeilet kompenserer for den skjærspenning som vinden forårsaker.

I en lagdelt innsjø vil den helningen på vannspeilet som en vind setter opp bli større enn i en homogen innsjø fordi sprangsjiktet virker som en falsk bunn i innsjøen. Av denne grunn kan høydeforskjellen mellom Furnesfjorden og Minnesund komme opp i 5 cm.

Nå vil imidlertid ikke sprangsjiktets beliggenhet være upåvirket av vindstresset over overflaten. Sprangsjiktet vil stille seg skrått med helning motsatt til overflatenes helning. Helningen til sprangsjiktet kan også anslås dersom man antar hydrostatisk likevekt og at det ikke er skjærspenninger ved sprangsjiktet. Da

kan man sette at helningen til sprangsjiktet er lik overflatens helning multiplisert med faktoren  $\frac{p}{\Delta p}$  er her vannets tethet, mens  $\Delta p$  er forskjellen i tethet på vannmassene over og under sprangsjiktet.

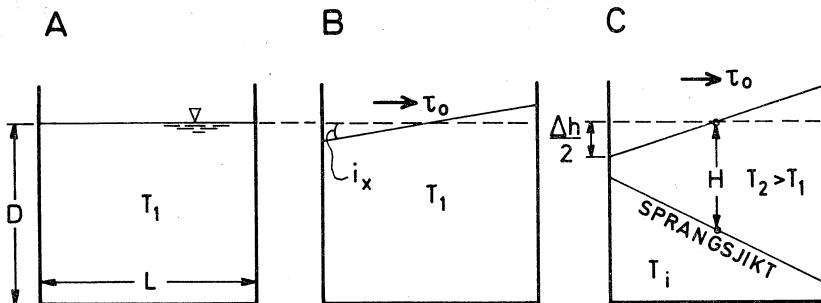
I innsjøer vil det være temperaturforskjellen som forårsaker forskjellen i tethetene, og setter vi at forskjellen i temperatur ligger i området 5–15°C, så

vil forholdet  $\frac{p}{\Delta p}$  variere i området 600 til 4 000. Det er derfor tydelig at sprangsjiktets heldning kan bli stor. Ved sørlige vinder kan de dypere og kaldere vannmasser periodevis komme til overflaten rundt Minnesund og slippe kjølig vann ut i Vorma.

I fig. 4 er forholdene omtalt over vist skjematiskt.

Når vinden opphører (eller snur) vil den etablerte likevekten med vindstresset opphøre og det settes opp strømmer som virker slik at skråstillingen går tilbake igjen i vannrett posisjon. P.g.a. vannets treghet vil imidlertid helningen gjenoppstå, denne gang med motsatt fortegn, og man vil på denne måten få en svingning som står og pendler fram og tilbake i innsjøen. Svingninger av denne type er blitt illustrert på fig. 5.

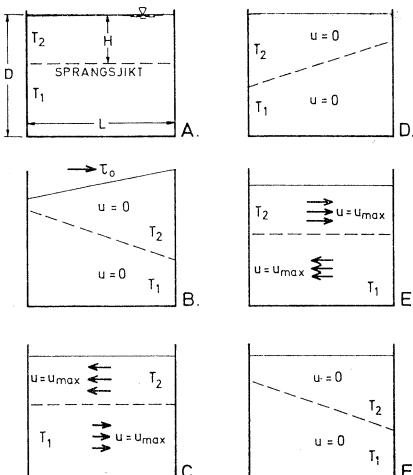
Perioden på disse indre bølgene kan anslås ved hjelp av en formel som tar utgangspunkt i et rektangulært basseng. Denne form passer dårlig med Mjøsas fasong, men erfaring viser at slike formler allikevel gir et godt bilde av periodene til de indre svingningene dersom man setter typiske tallverdier for innsjøens lengde og dyde inn i formelen.



Figur 4. Illustrasjon av hvordan vindstresset virker inn på helningen av overflaten og sprangsjiktet. A. Homogent basseng og ingen vind. B. Homogent basseng med vindstress. Svak oppstuvning av overflaten. C. Lagdelt basseng med vindstress. Større oppstuvning av overflaten. Spangsjiktet skråstilles.

Figur 5.

Illustrasjon av de strømmer og helningene av tetthetsflatene som de indre bølgene setter opp. A) Innsjøens vannmasser i ro. B) En vind stuver opp vannmassene med temperatur  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ) opp til høyre side i innsjøen. C) Vinden opphører. Vannmassene renner tilbake forbi sin likevektsstilstand. D) Vannmassene med temperatur  $T_2$  er struvet opp på venstre side av innsjøen p.g.a. sin treghet. E) Vannmassene renner tilbake forbi sin likevektsstilstand. F) En periode er nå gått fra tilstand B til tilstand F.



Perioden  $P_i$  til den indre svingningen kan settes lik

$$P_i = 2L \sqrt{\frac{\rho}{\Delta\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{\frac{D}{H(D-H)}}$$

hvor

L er innsjøens lengde

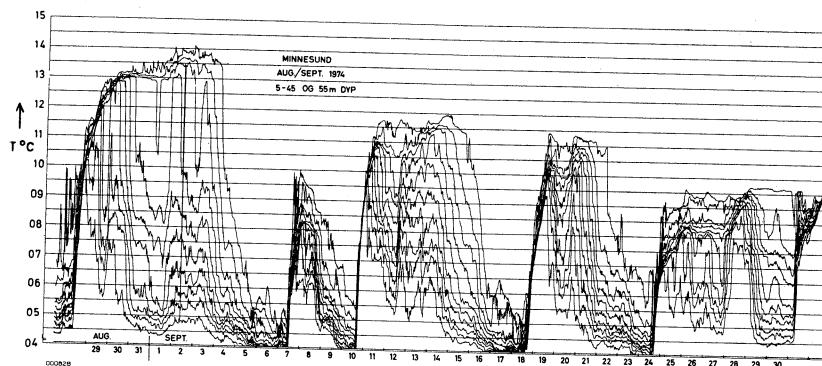
D er innsjøens dybde

H er dypet til sprangsjiktet

g er tyngdens akselerasjon

Disse svingningene i sprangsjiktets beliggenhet kommer tilsyns i temperatur-observasjonene. Dette vises i fig. 6 der

temperaturen fra overflaten og ned til 55 m dyp er tegnet ut for Minnesund.



Figur 6. Temperaturen i forskjellige dyp (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 og 55 m) som funksjon av tiden. (Datamaterialer er innsamlet av NIVA).

Det er vist data for perioden 28. august til 30. september 1974.

Figuren viser at det var stor svingningsaktivitet ved Minnesund, og temperaturen i overflaten sank her ved et tilfelle fra 14°C til 5°C over et tidsrom på bare 2 dager.

Som det framgår av fig. 6 er det også betydelige mer kortperiodiske svingninger i temperaturen. Årsaken til disse kan være flere, og det vil føre for langt å gå nærmere inn på dette her. Det kan imidlertid nevnes at den høyeste frekvensen er bestemt ved den såkalte Brunt-Vässälä-frekvensen, f

$$\text{der } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$

$$\text{og } \frac{\partial \rho}{\partial z} = \text{tetthetsgradienten}$$

Perioden på disse svingningene er fra noen få minutter (ved sprangsjiktet) til noen timer (i dypet).

#### **FAKTORENE SOM BESTEMMER INNSJØENS VARMEINNHOLD**

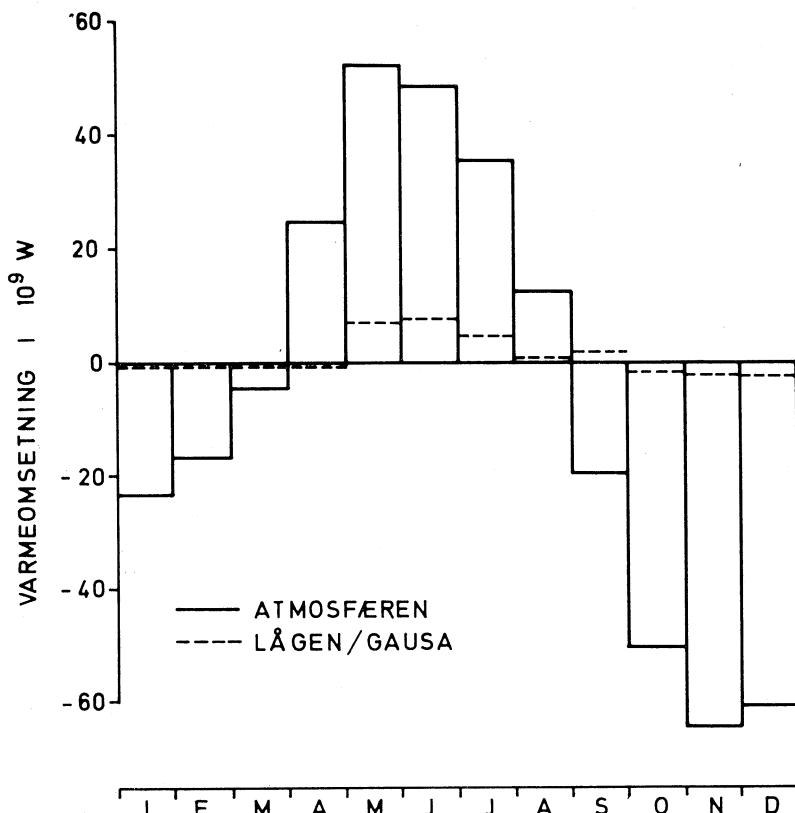
Varmeutvekslingen for innsjøen foregår ved vannoverflaten til og fra atmosfæren og via elver som renner inn og ut av innsjøen. For dype innsjøer som Mjøsa kan en i alminnelighet se bort fra varmeutvekslingen med bunnsedimentene.

Med bakgrunn i meteorologiske data fra Kise meteorologiske stasjon på Nes er varmeutvekslingen med atmosfæren beregnet. I fig. 7 er denne sammenlignet med netto varmetilskudd fra gjennomstrømningen. Det går tydelig fram at varmeutvekslingen med atmosfæren står

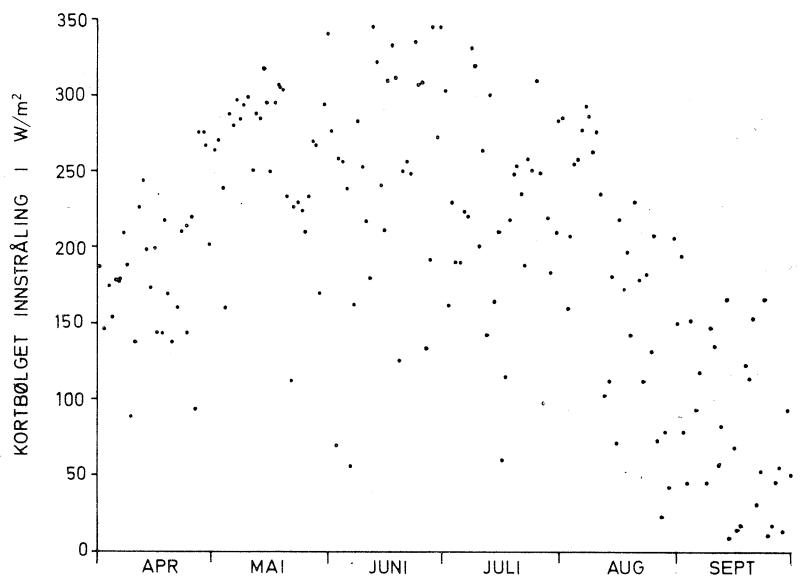
for den langt større del av varmeomsetningen i innsjøen.

Av de enkelte leddene som inngår i varmeutvekslingen vann/atmosfære (kortbølget innstråling, langbølget inn- og utstråling, fordampning og varmeledning) er det særlig den korthølgede innstråling som

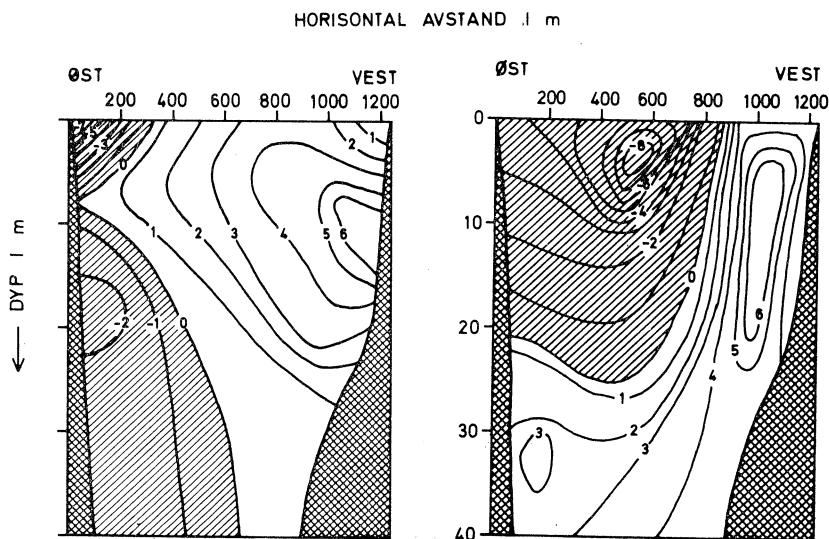
varierer kraftig med tiden (fig. 8). Det framgår av fig. 8 at differansen i kortbølget innstråling for en klarværsdag og en overskyet dag kan være  $300 \text{ W/m}^2$  i juni/juli. Multiplisert med innsjøens overflateareal tilsvarer dette over  $100 \cdot 10^9 \text{ W}$ .



Figur 7. Bidrag fra atmosfæren og gjennomstrømningen til Mjøsas varmebudsjett.



Figur 8. Døgnlige verdier for korthølget innstråling ved Kise meteorologiske stasjon i 1974. (Datamaterialet er innsamlet av Meteorologiske institutt.)



Figur 9. Strømhastigheter i cm/s i et snitt ved Vingrom kirke. Positiv strøm mot syd. Observasjonene skriver seg fra 14.5. 1974 (til venstre) og 4.11. 1975.

## STRØMFORHOLDENE

Som tidligere nevnt, kan området mellom Lillehammer og Gjøvik mer eller mindre betraktes som et estuarområde. Dette kommer også tilsyn i strømforholdene i området. Fig. 9 viser strømprofiler ved Vingrom kirke, et par kilometer syd for Lillehammer. Vann fra Mjøsa blandes inn i Lågen ved innløpet, og vi får en kompensasjonsstrøm nordover (skravert på figuren). Lågen sammen med det medrevne vann strømmer så mot syd. På grunn av jordrotasjonens avbøyende effekt vil både nordgående og sydgående strøm presses mot høyre side i fartsgrensing.

Strømsituasjonen beskrevet over vil bli modifisert på grunn av vindgenererte

strømmer og topografiens innvirkning på strømmene.

I området fra Gjøvik/Furnesfjorden til Minnesund vil de indre bølgende føre til en betydelig volumtransport på sensommeren og høsten. Med utgangspunkt i en ren kontinuitetsbetrakting er de hastigheter som er vist i tabell 1 beregnet. Hastighetene synes å nå sitt maksimum rundt 1. september (for 1974) med maksimale hastigheter på omlag 15 cm/s over sprangsjiktet.

To Aanderaa strømmålere som målte i sep./okt. omlag 3 km øst for Helgøya 1977 i 8 og 40 m dyp viste at disse svingningene dominerte strømningsbildet. Strømmålerne viste også at de mest hypotiske forekommende hastigheter var 10—15 cm/s i både 8 og 40 m dyp.

TIDSEPOKE	SPRANG-SJIKT-DYP H	TEMPERA-TURSPRANG OVERSPRANG SJKT ΔT	TEORETISK PERIODE Pi	OBSERV. PERIODE Pi	STRØM-HASTIG- HET u max.
Rundt 1. juli	~10 m	5°C	9,2 døgn	-	
Rundt 1. aug.	~15 m	8°C	5,1 døgn	~5 døgn	7 cm/sek
Rundt 1. sept.	~20 m	8°C	4,4 døgn	~4-5 døgn	16 cm/sek
Rundt 1. okt.	~40 m	6°C	4,0 døgn	~6-8 døgn	5 cm/sek
Rundt 1. nov.	50 m	3°C	5,4 døgn	-	

Tabell 1. Noen karakteristiske data for indre bølger i Mjøsa basert på data for 1974.

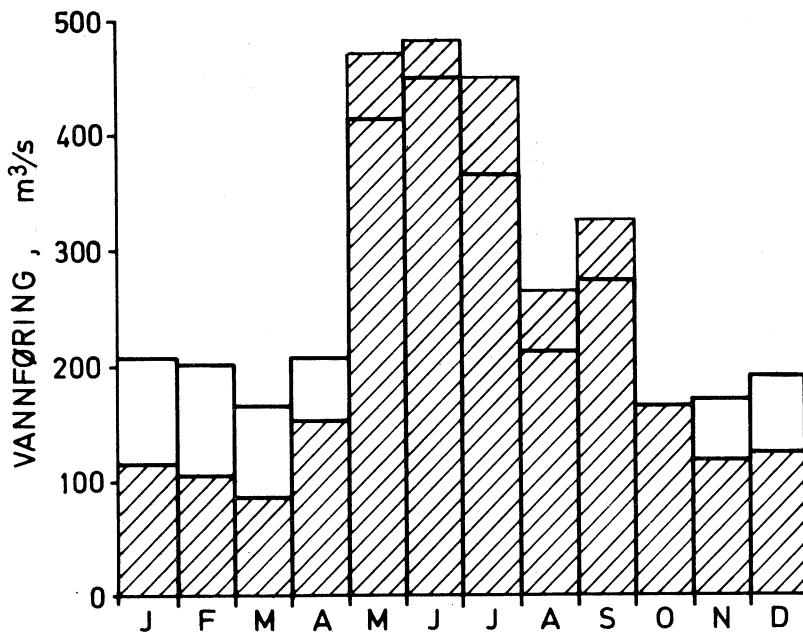
I perioder da de indre bølger ikke opptrer i samme omfang (dvs. vinter, vår og sommer) er trolig strømmene bestemt av vind, sjiktning og topografi. Ut fra energi- og impulsbetraktninger er det lite tenkelig at Lågens gjennomstrømning vil dominere det horisontale strømningsbildet i området syd for Gjøvik.

### VASSDRAGSREGULERINGEN

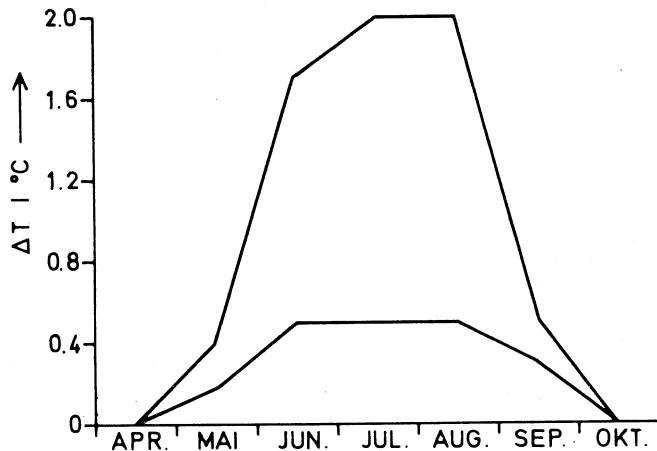
I fig 10 er vist månedsmidler for registrert og simulert vannføring for 1974.

De simulerte dataene tar utgangspunkt i alternativet øst mot øst.

Den reduserte vannføring om sommeren vil medføre en hevning av Lågens temperatur. Denne temperaturøkning er beregnet av Iskontoret/NVE og er vist i fig. 11. Den lave kurven viser sannsynlig temperaturøkning, og den øvre kurven viser høyeste anslag for temperaturøkningen i Lågen.



Figur 10. *Observerte (skraverte stolper) og simulerte månedsmidler for vannføringen i Lågen og Gausa i 1974. De simulerte verdiene er oppgitt av NVE/Statskraftverkene.*



Figur 11. Beregnede temperaturøkninger i Lågen ved Lillehammer som følge av en utbygging i Jotunheimen. Nedre kurve viser sannsynlig temperaturøkning, og den øvre kurven viser et høyt anslag for temperaturøkningen.

## STØRRESESBETRAKTNINGER

Basert på forutsetningene i figurene 10 og 11 er endringene i Lågens varmetilførsel regnet ut. Resultatet vises i fig. 12. Om vi sammenholder denne figuren med fig. 7, ser vi at de påførte endringer er små i forhold til den totale varmeutvekslingen for innsjøen.

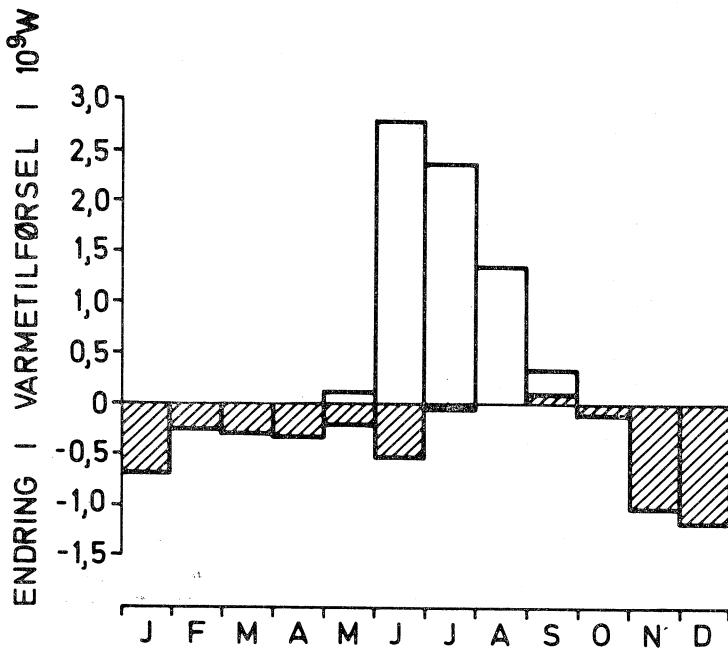
Det kan være av interesse å sette indringene i fig. 12 opp mot de mer tilfeldige endringer i varmeomsetningen, se fig. 8. En endring i varmetilførselen på  $0.5 \cdot 10^9 \text{ W}$  utgjør omlag  $1.5 \text{ W/m}^2$  fordelt over hele innsjøens overflate. Endringen i varmetilførselen på grunn av en eventuell kraftverksregulering er som det sees liten i forhold til den endringer som tilfeldigheter i værforholdene forårsaker. Det må imidlertid påpekes at endringer som følge av eventuell kraft-

utbygging er av mer systematisk karakter og derfor ikke direkte sammenlignbar med tilfeldige variasjoner. Det er biologenes oppgave å besvare om selv små endringer i innsjøens temperaturforhold kan være av betydning for eutrofieringsforholdene.

## MODELLBEREGNINGER

En numerisk modell kan, om den beskriver de viktigste fysiske prosesser som inngår tilnærmet riktig, gi nyttig informasjon om innsjøen. Den kan da også være et redskap til å vurdere eventuelle endringer som følge av naturinngrep.

Dersom en setter som målsetting å vurdere de storstilte endringer i innsjøens temperatur over en lang periode som et år, er den modelltypen som er anvendbar



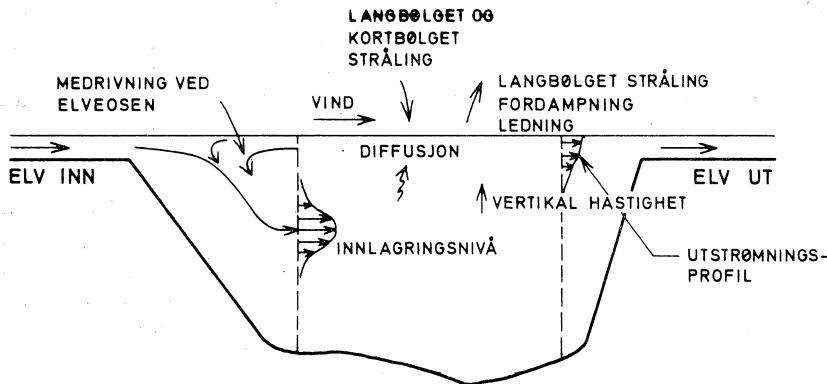
Figur 12. Beregnede endringer i varmetilførselen til Mjøsa. Skraverte stolper tar utgangspunkt i sannsynlig temperaturokning i Lågen, de åpne i høyt anslag for temperaturokningen.

i dag såkalte termokline modeller i en dimensjon. Slike modeller beregner det vertikale temperaturprofilen som funksjon av tiden. En prinsippskisse som viser de fysiske forholdet det tas hensyn til i modellen er vist i fig. 13.

I en så stor innsjø som Mjøsa oppstår det vanskeligheter når en forsøker å beskrive temperaturbildet i kun én dimensjon. Det har vært særlig viktig å beskrive forholdene ved innløpet og utløpet mest mulig korrekt for å få et riktig varmebudsjett for medellområdet. Det vil føre for langt å gå inn på dette her. In-

teresserte henvises derfor til VHL-rapporten nevnt i referansen.

I fig. 14 er vist beregnede og observerte temperaturer. De observerte temperaturer er fra noe syd for Helgøya. Denne stasjonen er valgt som representativ for Mjøsa syd for Gjøvik fordi temperaturbildet her er lite forstyrret av indre bølger. Det er bare vist resultater for perioden mai–november p.g.a. at det bare finnes kontinuerlige temperaturregistreringer for denne perioden. De beregnede temperaturer i overflatelaget viser bra overensstemmelse med de observerte fram til oktober.

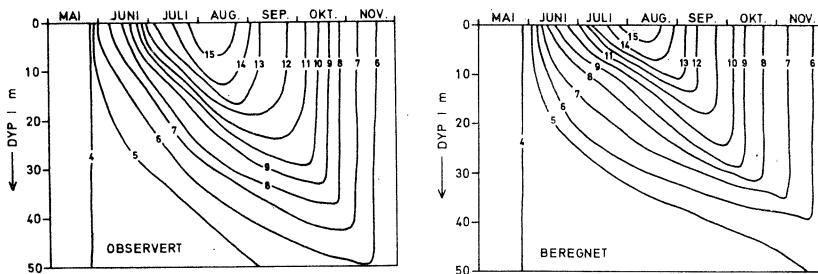


Figur 13. Prosesser a v betydning for det vertikale temperaturbilde i en innsjø.

Fra denne tiden er den virkelige avkjølingen av vannmassene raskere enn den beregnede avkjølingen. For hele perioden gis der at varme blir transportert hurtigere ned i dypet (under 20 m) enn hva modellen beregner.

Dersom endringene i temperaturen som følge av en vassdragsregulering er små, er det rimelig å anta at forhold som diffusjonskoeffisienten i overflaten, interne bølger, blanding i innløpsosen o.l. ikke

endres nevneverdig ved regulering. Det er fordi disse forholdene i det vesentlige antas å være styrt av meteorologiske og topografiske parametre (som må forutsettes å bli endret lite ved regulering) og av sjiktningen i recipienten. Dersom forutsetningene over er oppfylt er det videre rimelig å anta at beregningen av endringer i temperaturen er mer nøyaktig enn beregningen av absoluttverdien siden feil i inngangsparametrene gjentas og opphever



Figur 14. Observerte og beregnede temperaturer i Mjøsa, 1974.

hverandre. En numerisk beregning kan også, selv om noen av disse forutsetningene ikke holder, gi bidrag til en kvalitativ forståelse av de endringer en eventuell vassdragsregulering påfører Mjøsa.

Resultatene av modellberegningene er vist i fig. 15. Bortsett fra endrede data for vannføring (fig. 10) og endrede data for Lågens temperatur (fig. 11) er alle inngangsdata beholdt uendrede.

Vårsirkulasjonen inntrer noe senere med de simulerte vannføringer og temperaturer, og temperaturkurven blir derfor liggende noe lavere i alle dyp i juni og juli. Det er imidlertid kun tale om en forskyvning i tid, og maksimaltemperaturen endres lite over 10 m. Den senere oppstartingen av sommersjiktningen skyldes at den økte vintervannføring fører til et lavere temperaturnivå i innsjøen på våren.

Den viktigste konklusjonen fra beregningene er at endringer som følge av den simulerte vassdragsregulering på Mjøsas temperaturforløp er små i forhold til naturlige temperaturvariasjoner.

## KONKLUSJONER

Temperatur- og strømningsmessig sett vil endringene i Mjøst syd for Gjøvik som følge av en eventuell kraftverksregulering (alternativ øst mot øst) være små

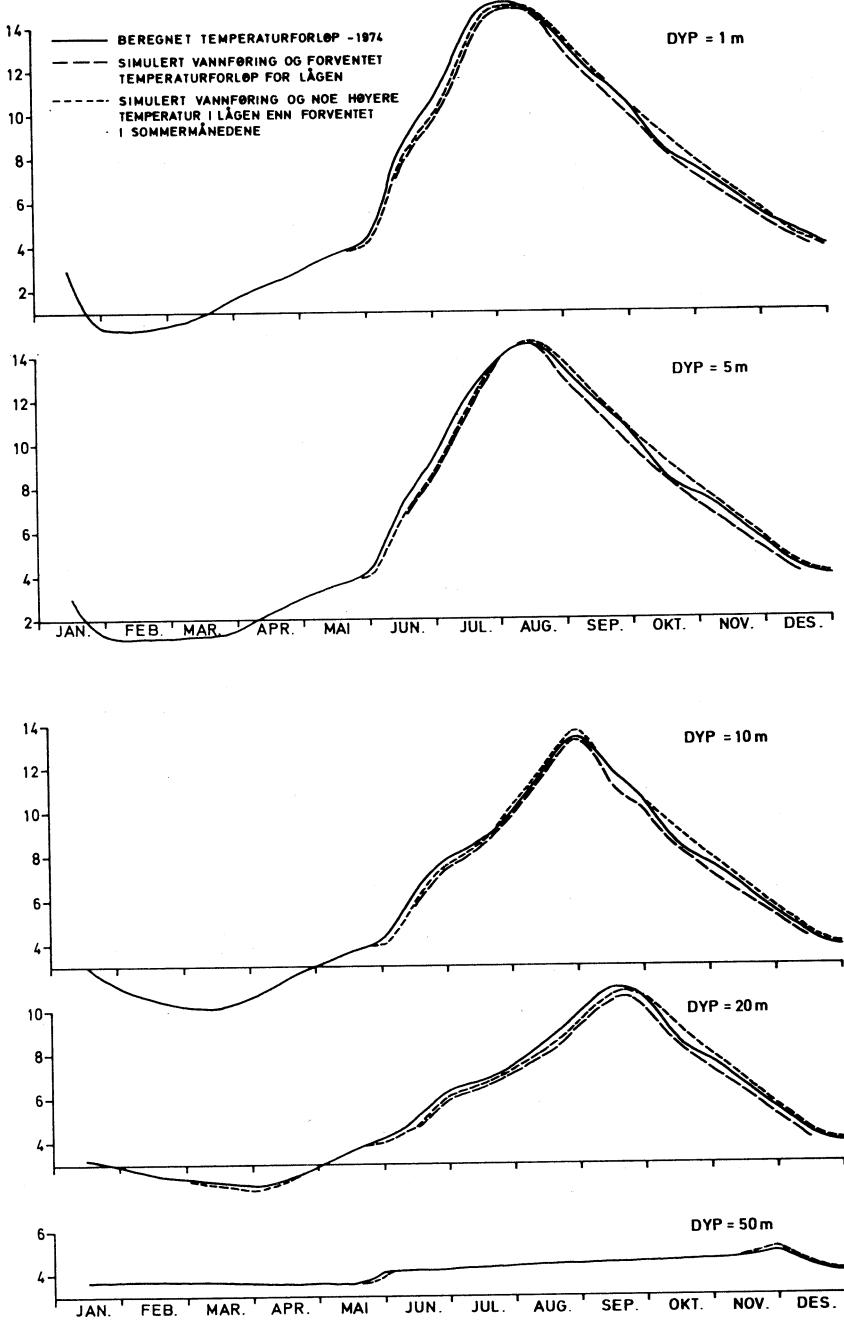
i forhold til de naturlige flktuasjoner. Nord for Gjøvik vil forholdene være mer preget av Lågens gjennomstrømning. Endringene i temperaturen her vil være maksimalt lik endringen i elvetemperaturen (ved Lillehammer).

En forutsetning for vurderingene over er at isforholdene i Mjøsa ikke endres vesentlig som følge av en eventuell regulering. En endring av isforholdene kan føre til større konsekvenser for Mjøsas varmebudsjett enn en vassdragsregulering isolert sett.

Det er grunn til å presisere at det er flere viktige forhold av betydning for eutrofieringsforholdene i Mjøsa som ikke er behandlet i denne artikkelen. Bl.a. nevnes forhold som bestemmer gjennomskinneligheten av vannmasser, transport av næringssalter gjennom sprangsjiktet og oppholdstid for vannmassene i forskjellige dyp og områder.

## REFERANSE

- P. Jacobsen, H. Rye & A. Thendrup,  
«Hydrofysiske undersøkelser i  
Mjøsa. Innledende vurderinger av  
temperatur- og strømforhold. Noen  
fysiske virkninger av en eventuell  
vassdragsregulering». VHL, Trond-  
heim, 1978.



Figur 15. Beregnede endringer i temperaturen for Mjøsa 1974.