

Temperaturen i vandløb: empiri og modeller

Temperaturen er en nøgleparameter, der regulerer alle biologiske processer og organismers udbredelse. Alligevel beskæftigede få forskere sig med temperaturen og dens biologiske betydning i perioden 1960-1995. Men nu er interessen vendt tilbage pga. de globale klimaændringer. Vi viser her, hvorledes temperaturgangen ændrer sig fra kilde til nedre å og fra opstrøms til nedstrøms indskudte søer i nordsjællandske vandløb. Simple modeller kan ret præcist forudsige temperaturen og endog estimere vandløbenes temperaturer anno 2070.

NIELS LAGERGAARD PEDERSEN
KAJ SAND-JENSEN

Da det er ret enkelt at måle temperatur skulle man tro, at litteraturen flød over med sådanne målinger, men bortset fra målinger i meteorologiske hytter anbragt 180 cm over jorden, er det langt fra tilfældet. Målinger i nærmiljøet nede i jorden, i forskellige højder i landvegetationen samt på det lave vand i søer, fjorde og vandløb er fåtallige. Faktisk er der os bekendt ikke før publiceret en eneste årsserie for noget dansk vandløb.

Da temperaturen ændrer sig meget fra sted til sted og over tid, var det tidligere yderst besværligt at opnå en nogenlunde dækkende beskrivelse af temperaturen vha. punktmålinger eller udlagte maksimum-minimum termometre. Men de små integrerede temperaturmålere og loggere, som nu er på markedet, måler snildt med en præcision på 0,1 °C og den ønskede tidsopløsning for en pris på blot 1200 kr. per styk (Onset Computer Corporation). Vi har udlagt sådanne temperaturloggere ned gennem Pøleå med tre indskudte søer, ned gennem Havelse Å samt i to kildebække i Grib Skov (se fig. 1). Da loggerne gik tabt ved den øverste station i Pøleå (P1) og den nederste station i Havelse Å (H4) har vi ikke temperaturdata derfra.

De simple formål var at beskrive temperaturgangen over de enkelte dage for et helt år

på disse vandløbslokaliteter for at vurdere: 1) ændringer ned gennem vandløbene, 2) indskudte søers betydning for enkelte lokaliteter og vandløbssystemer som helhed, og 3) forskelle mellem skyggede skovbække og vand-

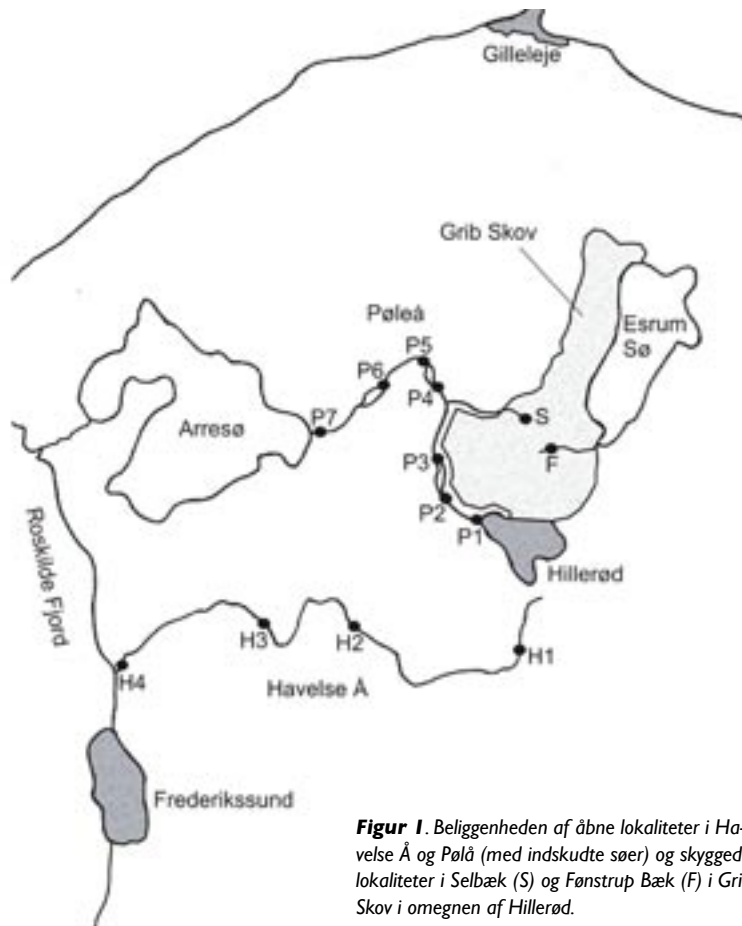
løb i åbent land. Temperaturens betydning for stofnedbrydningen i vandløbene vurderes i artikel /1/, men vi kommenterer her ganske kort, hvorledes søers markante ændringer af temperaturen kan påvirke iltforholdene og dyrenes levevilkår.

Vi vurderer endvidere tre simple empiriske modellers evne til at beskrive temperaturen i vandløbene ud fra meteorologiske målinger af global indstråling, lufttemperatur, nedbør og luftfugtighed og kendskab til vandløbslokaliteternes vandføring og beliggenhed (se boks 1). En af modellerne har vi brugt til at forudsige vandløbenes maksimale temperaturer i et scenarie for et varmere klima beregnet af DMI /2/.

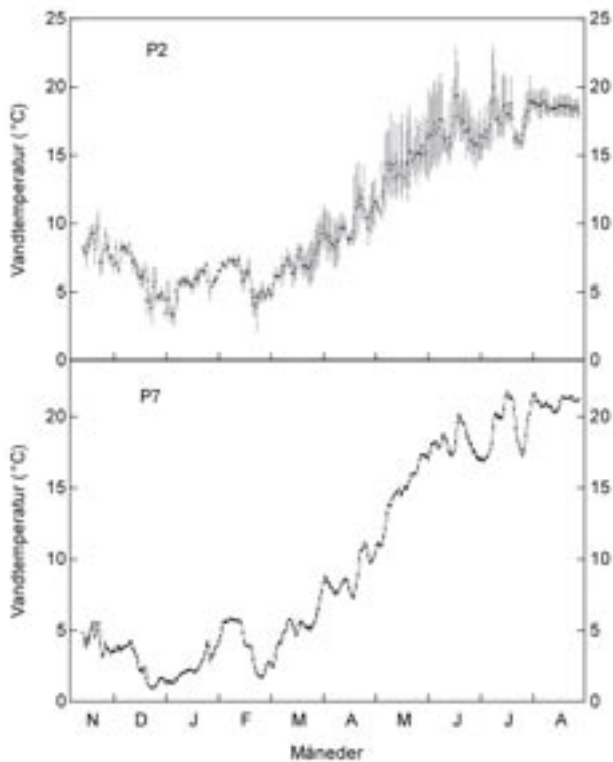
Vi fravalgte at opstille en fælles fysisk model for alle vandløb under et, fordi der mangler information om en række nøgleparametre såsom indstråling direkte på vandløbsoverfladen, vandtilførsel og temperatur af grundvand og markvand samt luftfugtighed og temperatur umiddelbart over vandløbet. Derfor er det meget nemmere at måle temperaturen fremfor at forudsige den vha. komplicerede målinger og beregninger.

Temperaturen ned gennem vandløbene

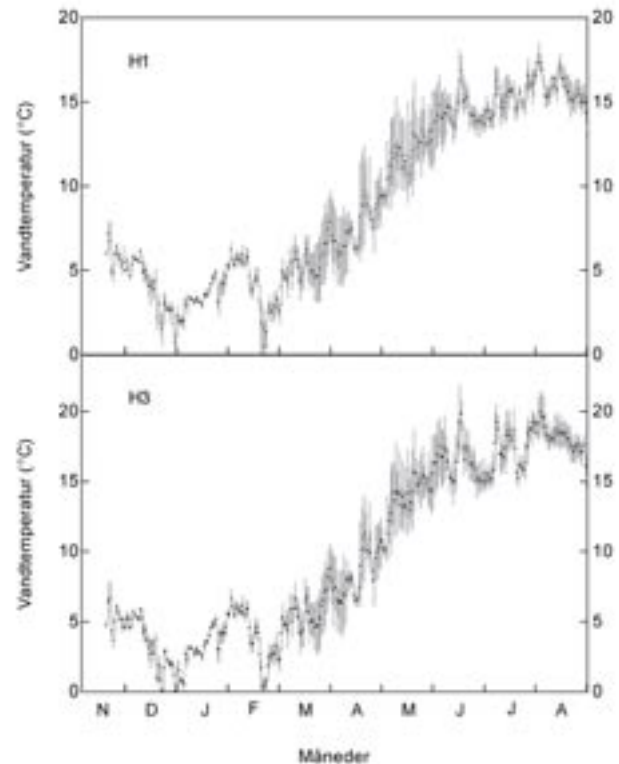
Pøleå begynder som en lille bæk gennem det vestlige Hillerød (se fig. 1), og modtager 2 km efter udspringet meget vand fra Centralrense-



Figur 1. Beliggenheden af åbne lokaliteter i Havelse Å og Pøleå (med indskudte søer) og skyggede lokaliteter i Selbæk (S) og Fønstrup Bæk (F) i Grib Skov i omegnen af Hillerød.



Figur 2. Daglig middeltemperatur (pinde: minimum-maksimum) i den øvre (P2) og nedre del (P7) af Pølse.



Figur 3. Daglig middeltemperatur (pinde: minimum-maksimum) i den øvre (H1) og mellemste del (H3) af Havelse Å.

anlægget. Pølse passerer tre nyoprettede, lavvandede engsøer efter henholdsvis 3, 7 og 10 km, inden den 15 km længere nede løber ud i Arresø. Ændringerne i temperaturen undervejs kan vurderes ved at sammenligne den øverste station, P2, 1 km efter renseanlægget, med den nederste station, P7 umiddelbart før Arresø. Ved P2 er vandløbet ca. 1,8 m i bundbredde og middelvandføringen 330 L/s, mens vandløbet ved P7 er 6,0 m bredt og middelvandføringen 1135 L/s.

Toppe og dale på kurven over daglige middeltemperaturer er de samme på de to stationer (se fig. 2). Men vintertemperaturer er 2-3 °C højere, og sommertemperaturer er 2-3 °C lavere på den øverste station, som er præget af den mere konstante temperatur i ledningsnettet og dermed i afløbet fra renseanlægget, mens vandet ved den nederste station har haft en langvarig kontakt med luften, og derfor bliver kølet ned om vinteren og opvarmet om sommeren. Stigende vandvolumen og vanddybde ned ad vandløbet dæmper døgnsvingninger i temperaturen. Så mens temperaturen om sommeren typisk varierer 2-6 °C over døgnet ved P2, er døgnvariationen under 0,5 °C ved P7.

Havelse Å løber fra Hillerød stik vest over 20 km til Roskilde Fjord. Åen har ingen indskudte øer, så vandets transporttid er meget

kortere og ændringer ned ad vandløbet meget mindre end i Pølse. Ved den øverste station, H1 er vandløbet 1,0 m i bundbredde og middelvandføringen 95 L/s, mens H3 14 km længere nede er ca. 3,0 m i bundbredde og fører 975 L/s. Vintertemperaturer er en smule lavere og sommertemperaturer markant højere (ca. 2 °C) på H3 end H1 (se fig. 3). Døgnsvingninger er også dæmpet en smule af de større vandmængder og dybder ved H3 sammenlignet med H1.

Søers påvirkning af temperatur og levevilkår

Vandtemperaturen ændres meget markant ved passage af den øverste sø i Pølse, mindre ved passage af den næste sø og ikke målbart ved passage af den tredje sø. Ved passage af den øverste sø falder temperaturen om vinteren typisk med 3-4 °C, mens temperaturen om sommeren stiger med 2-4 °C (se fig. 4). Til gengæld dæmpes døgnsvingningerne noget af søernes store vandmasse.

Indskudte søer giver som ventet anledning til markant højere sommertemperaturer i Pølse sammenlignet med Havelse Å (se fig. 5). Sammenlignes stationer med omtrent samme afstand fra udspringet er middeltemperaturen typisk 4-6 °C højere om sommeren i Pølse og 0,5-1 °C lavere om vinteren.

Levevilkårene for smådyr og fisk, der foretrækker koldt vand og et højt iltindhold, forringes derfor markant ved tilstedeværelse af indskudte søer. Mens ørred kan leve i Havelse Å, er temperaturen for høj i Pølse. De forværedede iltforhold ved højere temperaturer efter søer skyldes et samspil af mindst fire faktorer: 1) iltens opløselighed falder med øget temperatur, 2) iltforbruget i vandløbet stiger med temperaturen, 3) søerne øger iltforbruget ved at tilføre store mængder let omsætteligt organisk stof, og 4) dyrenes iltbehov stiger med temperaturen. Det er en uheldig cocktail, som kan gøre dyrene groggy og få dem til at forsvinde. Det er især ørred, som nævnt, og rentvandsinsekter blandt andet biller, døgnfluer, slørvinger og vårflyer, der ikke overlever sådanne forhold.

Tre simple modeller for vandløbenes temperatur

Model 1 benytter simpel lineær regression til at forudsige vandtemperaturen ud fra lufttemperaturen (se fig. 6). Modellen fungerer udmærket for såvel minimum, middel og maximum temperatur for den enkelte dag eller for en uge ad gangen. For den daglige middeltemperatur er forklaringskraften for de 11 undersøgte lokaliteter mellem 90,3 og 94,7%; for den ugentlige middelværdi er

Tabel 1. Multiple regressioner for sammenhængen mellem daglige middelværdier for vandtemperatur (y, °C) på en række lokaliteter og lufttemperatur (a, °C), indstråling (b, MJ/m²/dag), relativ luftfugtighed (c, %), nedbør (d, mm/dag), vandføring (e, L/s).

| Station | Ligning | R ² (%) |
|---------|---|--------------------|
| P2 | $Y = 0,677 + 0,6a + 0,01b + 0,064c - 0,004e$ | 95,7 |
| P3 | $Y = -3,946 + 0,813a + 0,022b + 0,069c + 0,052d - 0,002e$ | 96,7 |
| P4 | $Y = -2,909 + 0,802a + 0,019b + 0,061c + 0,058d - 0,002e$ | 96,9 |
| P5 | $Y = -4,443 + 0,912a + 0,022b + 0,061c + 0,066d - 0,002e$ | 96,1 |
| P6 | $Y = -3,196 + 0,832a + 0,017b + 0,061c - 0,001e$ | 96,6 |
| P7 | $Y = -1,684 + 0,826a + 0,014b + 0,047c + 0,09d - 0,001e$ | 94,1 |
| H1 | $Y = -4,364 + 0,596a + 0,013b + 0,077c$ | 94,0 |
| H2 | $Y = -4,179 + 0,665a + 0,012b + 0,072c$ | 95,0 |
| H3 | $Y = -3,971 + 0,72a + 0,015b + 0,073c - 0,0004e$ | 96,3 |
| F | $Y = -2,798 + 0,73a + 0,007b + 0,069c + 0,05d$ | 95,2 |
| S | $Y = 4,004 + 0,283a + 0,017c + 0,037d$ | 93,3 |

forklaringskraften endnu højere. Men i alle tilfælde afviger vandtemperaturen systematisk fra det lineære forløb ved både lave temperaturer, hvor vandtemperaturen ligger over linien, og ved høje temperaturer, hvor den ligger under linien.

Denne S-formede tendens beskrives bedre med den logistiske Model 2 (se fig. 6). Her ved forsvinder næsten hele tendensen til systematisk afvigelse mellem målte og estimerede daglige middeltemperaturer, og forklaringskraften stiger til mellem 92,7 og 96,3% for de 11 lokaliteter.

Model 3 - den multiple regression - har en endnu højere forklaringskraft for samtlige lokaliteter på mellem 93,3 og 96,9% (se tab. 1). Billedet er det samme, hvis den ugentlige

middeltemperatur estimeres, men forklaringskraften er højere (97,4-99,1%). I alle tilfælde bidrager lufttemperaturen mest til modellen, fulgt i 10 af 11 tilfælde af solindstrålingen. Derefter følger marginale bidragsydere såsom relativ luftfugtighed, nedbør og vandføring. I den overskyggede skovkilde, Selbæk, bidrager indstrålingen som ventet ikke til at forbedre forudsigelsen af vandtemperaturen ud fra lufttemperaturen, mens relativ luftfugtighed ved at påvirke fordampningen og nedbøren ved at påvirke vandtilførslen bidrager en smule. Fønstrup Bæk udspringer på en lysåben skoveng, så også her bidrager indstrålingen til forudsigelsen, selv om bækken ellers løber gennem skov.

De tre modellers evne til at forudsige den

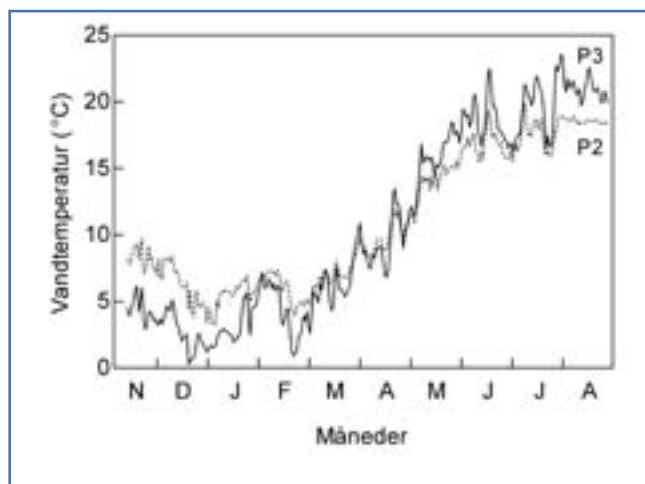
daglige middeltemperatur over året er vist med en station i Pølå som eksempel (se fig. 7). Alle tre modeller forudsiger større udsving i middeltemperaturen fra dag til dag, end der observeres. Det skyldes ganske enkelt, at udsvingene i vandtemperatur er mere dæmpede end udsvingene i lufttemperatur, der er hovedgrundlaget for modellerne. Både den simple lineære og den multiple model forudsiger fejlagtigt negative vandtemperaturer i januar, mens den logistiske model ikke gør det. Bortset fra januar er den multiple model bedre til at forudsige udsvingene i vandtemperaturen. Især skyder den ikke i samme grad over og under temperaturudsvingene i februar-maj, som den lineære og den logistiske model gør.

Bortset fra de negative vandtemperaturer er den multiple model bedst til at forudsige temperaturgangen, og det må især skyldes, at inddragelse af solindstråling som forklaringsparameter dæmper de fejlagtige forudsigelser af pludselige udsving i vandtemperaturen. Det skyldes sandsynligvis, at selv om lufttemperaturen statistisk bidrager mest til at forudsige vandtemperaturen, så er det især indstrålingen, der reelt opvarmer vandet.

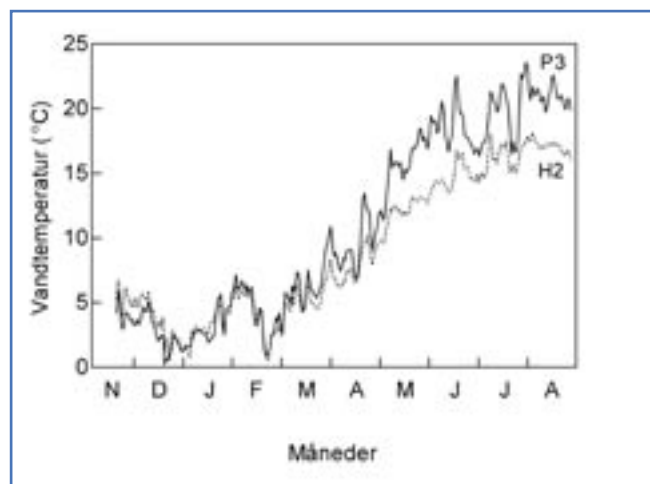
Lufttemperaturens egnethed til forudsigelse beror til gengæld på, at den afspejler klimaets og solindstrålingens generelle årsforløb og derfor giver et bedre tidsintegreret billede end solindstrålingen, der kan variere voldsomt fra dag til dag.

Vandtemperaturen på samtlige lokaliteter

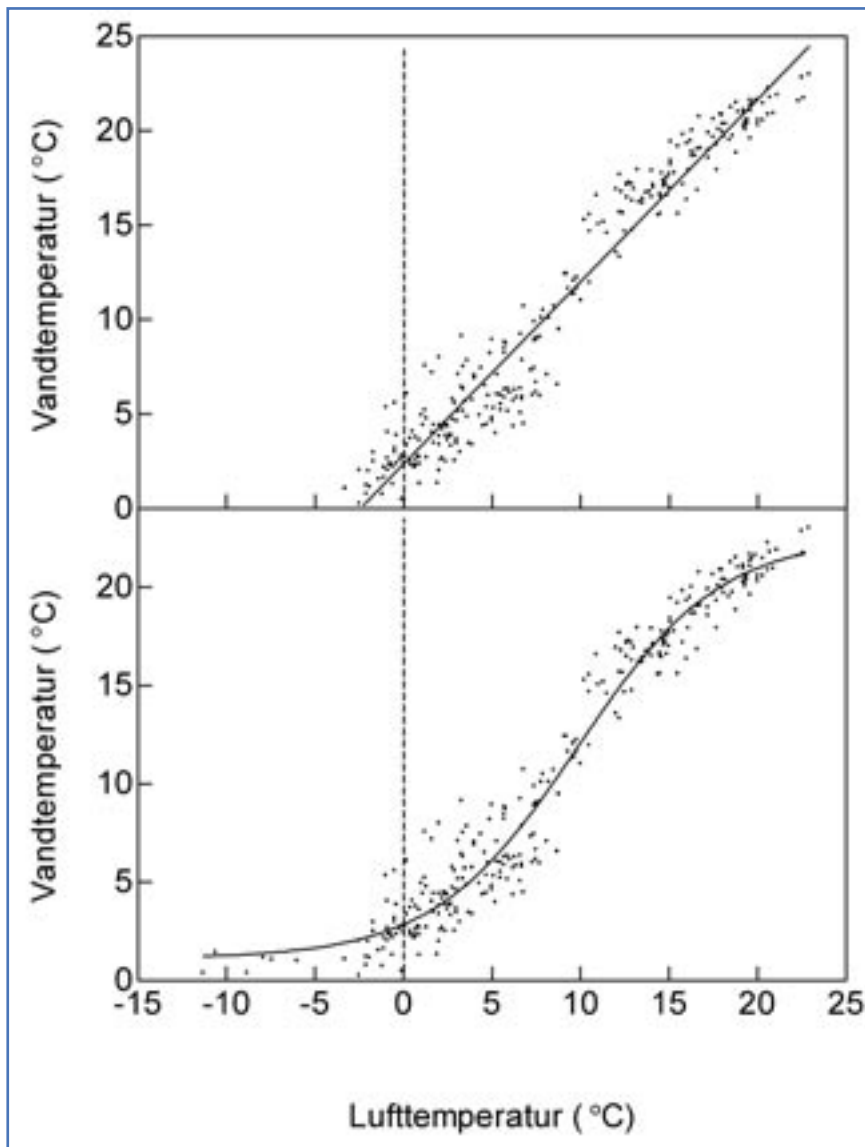
Vandtemperaturens sammenhæng med lufttemperaturen både i den lineære (se fig. 8) og den multiple model (se tab. 1) giver et udmærket overblik over forskellene mellem de 11 vandløbslokaliteter. I Pølå er stigningstak-



Figur 4. Daglig middeltemperatur på to stationer i Pølå henholdsvis før (P2) og efter (P3) Strødam Engså, den øverste sø i systemet.



Figur 5. Daglig middeltemperatur på stationer i Pølå (P3) og Havelse Å (H2) med nogenlunde samme afstand fra udspringet.



Figur 6. Sammenhængen mellem daglig middel vandtemperatur for station P4 i Pølse og daglig middel lufttemperatur beskrevet med lineær regression (øverst) og logistisk regression (nederst). Lufttemperaturer under -5°C indgår ikke i den lineære regression.

ten i vandtemperaturen med øget lufttemperatur (dvs. liniens hældning) som ventet mindst øverst i vandløbet nær renseanlægget med det store og ret ensvarme vandbidrag, og stigningstakten er større efter indskudte søer end før søerne.

Stigningstakten i vandtemperaturen øges som ventet ned gennem Havelse Å (0,60 til 0,72, ifølge Model 3 i tab. 1) parallelt med længere opholdstid for vandet, og stigningstakten i Havelse Å er gennemgående mindre end i Pølse (0,60-0,91), som har lang opholdstid. Med den lineære Model 1 er stigningstakten højere i Havelse Å (0,67-0,82) og Pølse (0,69-1,10). I den uskyggede skovkilde er vandtemperaturen relativt konstant over året, og stigningstakten i vandtemperaturen med øget lufttemperatur er lav (0,28). De maksimale vandtemperaturer er da også lav-

est i Selbæk ($12,8^{\circ}\text{C}$), mellemhøje i Havelse Å ($18,5$ - $21,8^{\circ}\text{C}$) og allerhøjest i Pølse ($21,8$ - $26,5^{\circ}\text{C}$).

Vandtemperatur og biologi i 2070-2100

Danmarks Meteorologisk Institut har publiceret et fremtidsscenarie for 2070-2100 med ca. en fordobling af atmosfærens CO_2 -indhold ifølge hvilket, lufttemperaturen forventes at stige 5°C i perioden marts til august og 4°C resten af året i forhold til nu. Med den logistiske model ekstrapoleret til lidt højere lufttemperaturer end de aktuelle målinger har vi estimeret vandtemperaturene på stationer i Pølse og Havelse med det nuværende forløb i lufttemperaturen anno 2004 og et fremtidigt temperaturforløb anno 2070, hvor 4 - 5°C er lagt oven i. Estimerterne skal tages med det

Boks 1. Tre empiriske modeller for vandtemperatur

Alle tre opstillede modeller benytter alment tilgængelige meteorologiske og vandløbs data. Modellernes egnethed vurderes vha. forklaringskraft (r^2 -værdier), signifikans-niveau og fravær af systematisk afvigelse mellem målte og forudsagte værdier i de forskellige temperaturområder.

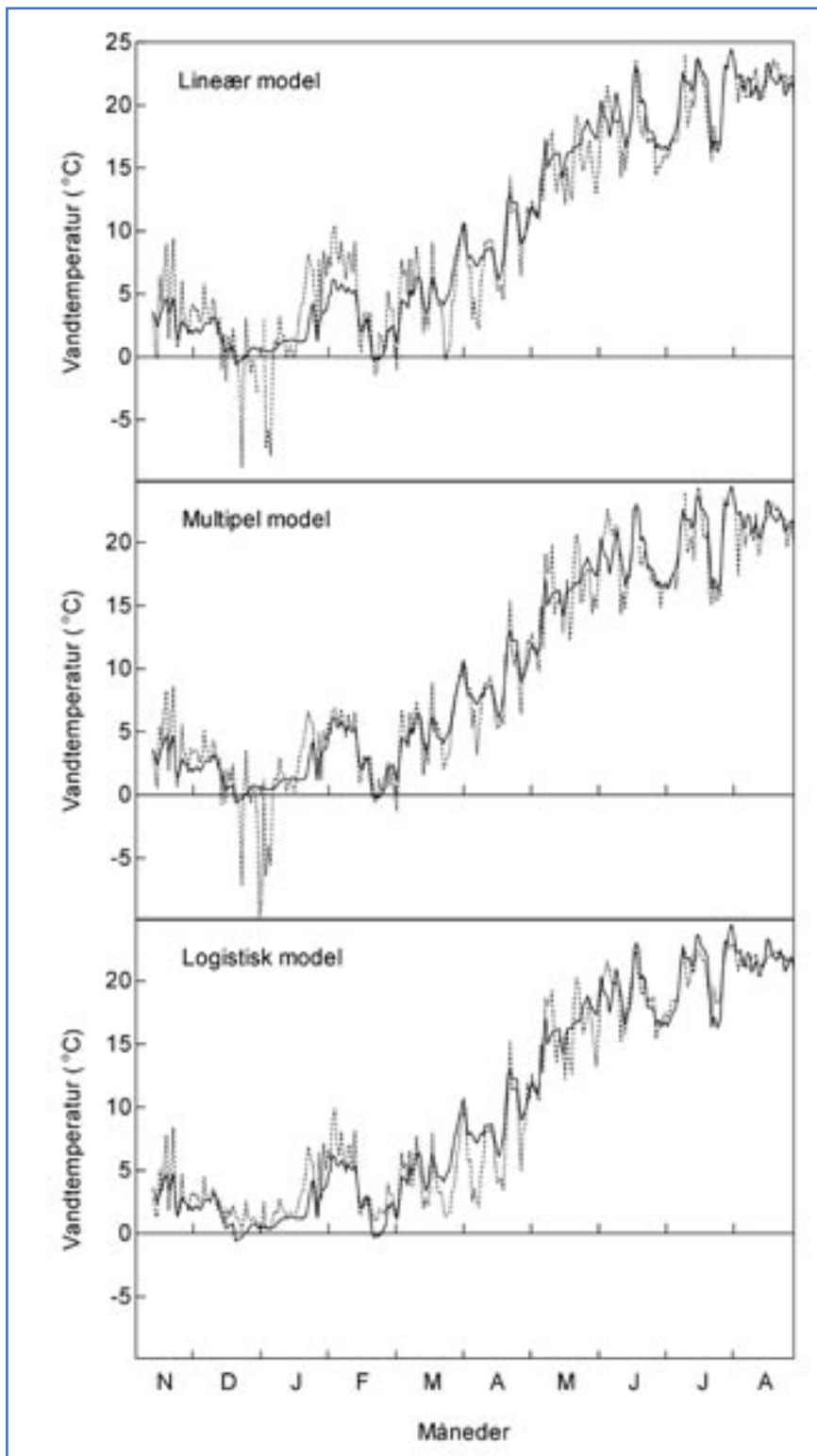
Model 1 og model 2 benytter alene daglig middel lufttemperatur til at forudsige daglig middel vandtemperatur på de forskellige stationer.

Model 1 benytter sig af simpel lineær regression for sammenhængen mellem vand- og lufttemperatur /3, 4/. Model 2 adskiller sig ved at benytte en logistisk (S-formet) sammenhæng /5/, fordi vandtemperaturen i forhold til lufttemperaturen falder mindre (ikke under 0) ved lav lufttemperatur, og den stiger mindre ved høj lufttemperatur, da vandtemperaturen dæmpes af øget varmetab ved fordamning og tilbagestråling.

Model 3 er en multipel lineær regression, der udover lufttemperaturen inddrager solindstråling, luftfugtighed, relativ luftfugtighed, nedbør og vandføring som grundlag for at forudsige vandtemperaturen /6/. Parametrene inddrages en efter en i modellen, indtil forklaringskraften ikke forbedres yderligere ved at vælge den næste parameter.

forbehold, at det fastlagte logistiske forløb med nutidens temperaturer også gælder ved de fremtidige højere temperaturer.

Den største effekt af den globale opvarmning estimeres om foråret med op til 7°C højere temperaturer i Pølse og 5°C i Havelse, mens mindre temperaturstigninger med op til 2 - 3°C estimeres om vinteren og i højsommeren (se fig. 9). Tidligere afhandlinger har foreslået, at grundvandsfødte vandløb kun i ringe grad vil påvirkes af global opvarmning /7/. Det er forkert, da grundvandstemperaturen erfaringsmæssigt ligger tæt på områdets middel lufttemperatur, så en stigning i denne på 5°C kan forventes at udløse en tilsvarende stigning i grundvandstemperaturen. Det er iøvrigt også i overensstemmelse med den logistiske model, at der hersker ligefrem proportionalitet mellem luft- og vandtemperatur



Figur 7. Sammenhængen mellem den observerede daglige middeltemperatur i Pølse (P5) og den forudsagte temperatur vha. tre modeller.

Øverst: Ved lineær regression med lufttemperaturen. Mellemst: Ved multipel regression med flere klimatiske variable.

Nederst: Ved logistisk regression med lufttemperaturen.

Den optrukne linie er de observerede og den stiplede linie de forudsagte temperaturer.

med deres forplantning eller fødesøgning. Og en række vandløbsplanter (fx. adskillige vandaksarter), hvis vækst idag først starter i maj ved vandtemperaturer over 10 °C /9/, vil kunne vokse frem 1-2 måneder tidligere.

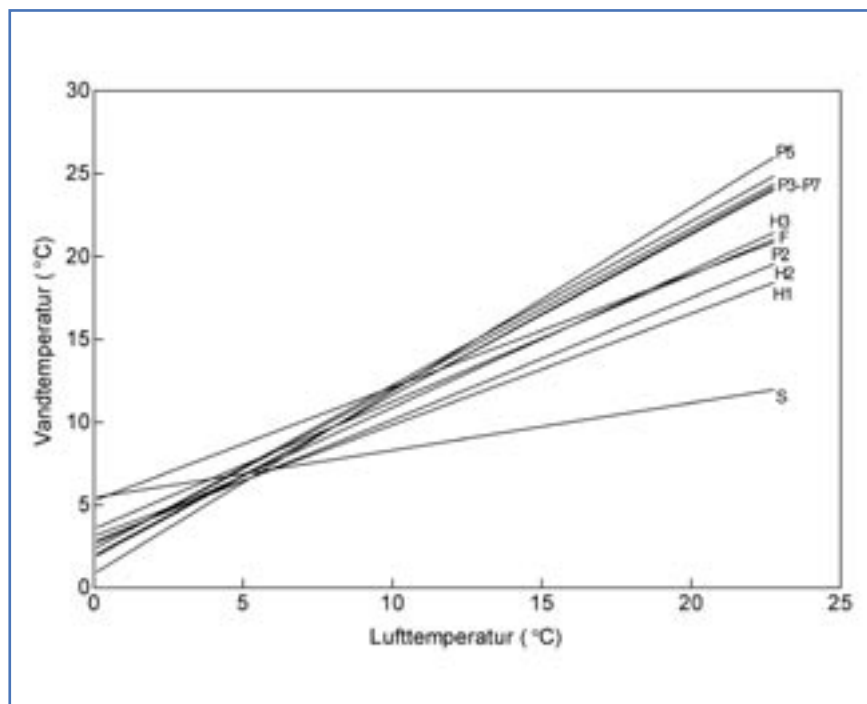
REFERENCER

- /1/ Pedersen, N. L. & Sand-Jensen, K. 2005: Indskudte søer i nordsjællandske vandløb øger temperatur, organisk stof og iltforbrug. *Vand & Jord* 2: 54-57, submitted.
- /2/ DMI 2004: www.dmi.dk
- /3/ Jeppesen, E. and Iversen, T.M. 1987: Two simple models for estimating daily mean water temperatures and diel variations in a Danish low gradient stream. *Oikos* 49: 149-155.
- /4/ Erickson, T.R. and Stefan, H.G. 2000: Linear air/water temperature correlations for streams during open water periods. *J. Hydrol. Engin.* 5: 317-321.
- /5/ Mohseni, O., Erickson, T.R. and Stefan, H.G. 2002: Upper bounds for stream temperatures in the contiguous United States. *J. Environ. Engin.* 128: 4-11.
- /6/ Webb, B.W., Clack, P.D. and Walling, D.E. 2003: Water-air temperature relationship in a Devon river system and the role of flow. *Hydrol. Process.* 17: 3069-3084.
- /7/ Mackey, A.P. and Berrie, A.D. 1991: The prediction of water temperatures in chalk streams from air temperatures. *Hydrobiologia* 210: 183-189.
- /8/ Pedersen, N.L. 2004: Iltomsætning af organisk stof som funktion af temperatur og stofsammensætning i vandløb med eller uden indskudte søer. MSc-thesis, Syddansk Universitet; udarbejdet ved Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.

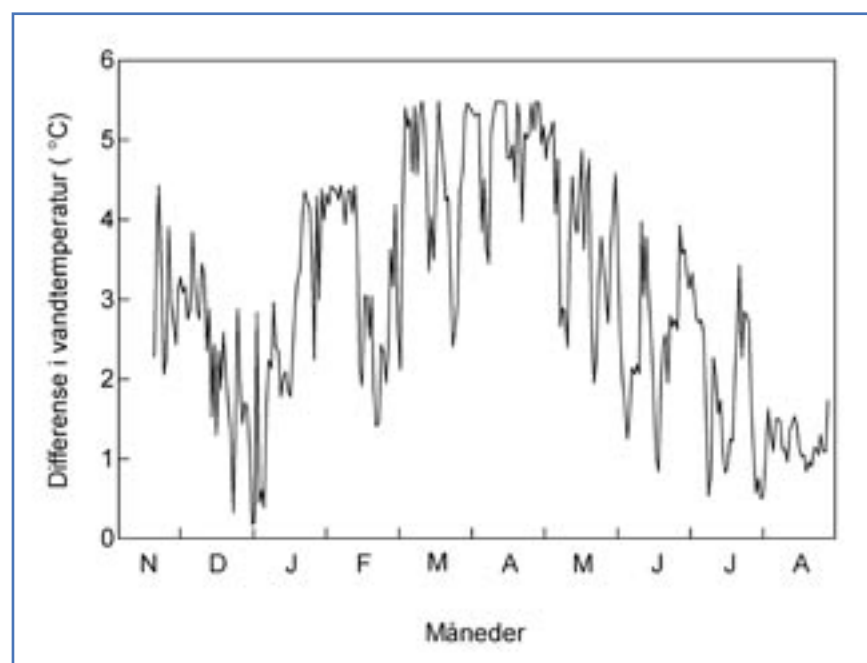
ved de intermediære temperaturer, som grundvand har. Så de grundvandsfødte danske kildebække kan i DMI-scenariet forventes at blive 12-13 °C i 2070-2100.

Implikationerne af disse temperaturændringer er klare. Dels vil en række dyr og planter, der lever nær deres øvre temperaturtolerance få problemer med at overleve, mens varmekædende arter, der allerede lever i Danmark, vil gå frem. Arter, der lever syd for os, vil lettere

kunne indvandre. De øgede temperaturer vil øge iltstresset i lighed med indskudte søers effekt på vandløb, og det vil især ramme rentvandsorganismer med store iltkrav. Vores estimater viser en stigning i iltforbruget alene som følge af temperaturstigningen på 130% om foråret og 30% om sommeren i Pølse /8/. Endelig indebærer de større temperaturstigninger om foråret, at forårsaktive dyr vil komme meget tidligere igang efter vinteren



Figur 8. Den lineære sammenhæng mellem daglig middel vandtemperatur og lufttemperatur i de undersøgte vandløb (se fig. 1). Regressionslinierne beskrev 90,3-94,7% af variationen.



Figur 9. Differensen i vandtemperaturen i Havelse Å (H3) mellem et fremtidigt klimascenario i 2070-2100 og det øjeblikke klima anno 2004.

/9/ Sand-Jensen, K., Jeppesen, E., Nielsen, K., van der Bijl, L., Nielsen, L.W., Hjermand, A-L. and Iversen, T.M. 1989: Growth of macrophytes and ecosystem consequences in a lowland Danish stream. *Freshwater Biology* 22: 15-32.

NIELS LAGERGAARD PEDERSEN er forskningsassistent ved Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Biologisk Institut, Københavns Universitet, Helsingørgade 51, 3400 Hillerød (E-mail: nlpedersen@bi.ku.dk) med speciale i vandløbsbiologi og temperaturmodeller. KAJ SAND-JENSEN er professor samme sted (ksandjensen@bi.ku.dk).

Tak til Frederiksborg Amt for oplysninger og til CONWOY for økonomisk støtte.