

Thermische aspecten van de Rijn

Voordracht uit de 14e Vakantiecursus in behandeling van afvalwater: 'de Rijn', die op 19 en 20 april 1979 werd gehouden aan de TH-Delft.

Deel I: Probleemstelling

1. Inleiding

Rijnwater wordt voor talloze doeleinden gebruikt, variërend van drinkwatervoorziening tot rioolwaterverdunding, van bron van recreatiegoeden tot drager van intensieve scheepvaart. Bij geen enkele toepassing wordt echter in kwantitatieve zin zoveel water ingenomen, gebruikt en weer geloosd als bij de opwekking van elektriciteit. De gemiddelde afvoer van de Rijn bij Lobith bedraagt 2200 m³/s, circa 20 % daarvan is het afgelopen jaar door de



DRS. H. E. SWEERS
afd. Milieu Onderzoek
NV KEMA, Arnhem

koelwatercircuits van elektrische centrales gepasseerd en opgewarmd. Terecht wordt dan ook veel aandacht besteed aan de mogelijke invloed hiervan op de kwaliteit van het Rijnwater.

Elektrische centrales gebruiken grote hoeveelheden water voor koeling: per 1000 MW opgewekt vermogen passeert door een conventionele centrale circa 40 m³/s en door een kerncentrale ruim 50 m³/s koelwater. Dit water wordt tijdens passage door de condensor opgewarmd en vervolgens weer gemengd met het overige water van de rivier. Voor een goed begrip van de mogelijke invloeden van centrales op het ontvangende water is het belangrijk de volgende drie aspecten te scheiden:

- Het koelwater passeert zeven en pompen en wordt vervolgens met vrij hoge snelheden (1,5 à 2 m/s) door de condensor geperst. Welke gevolgen heeft deze mechanische behandeling?
- In de condensor wordt het passerende water in enkele seconden met circa 7 °C opgewarmd en na lozing weer vermengd met het koudere ontvangende water. Welke gevolgen heeft deze temperatuurschok?
- Tenslotte mengt het geloosde koelwater zich met de rivier, waardoor de rivier als geheel een of enkele graden opgewarmd kan worden. Hoe lang blijft de rivier warm en welke gevolgen heeft deze opwarming?

Deze bijdrage aan de vakantiecursus is door een fysisch geschreven, daarom zal voornamelijk aandacht besteed worden aan de fysische aspecten van koelwaterlozingen. Daarbij worden achtereenvolgens behandeld het begrip temperatuur, de verspreiding en afkoeling van het geloosde koelwater,

de maatregelen die genomen worden om warmtelozingen te reguleren en de controleerbaarheid daarvan. Tot slot doet zich dan de vraag voor welke gevolgen het koelwatergebruik heeft voor de kwaliteit van het ontvangende water en voor de daarin levende organismen. Daarbij wordt aandacht besteed aan de mechanische zowel als aan de thermische aspecten.

In strikt fysische zin is het aantal potentiële probleemgebieden beperkt. De voornaamste zijn waterverlies door verdamping, mistvorming en waterloopkundige problemen samenhangend met de inname en uitlaat van grote hoeveelheden koelwater. Dit laatste aspect valt buiten het kader van dit artikel.

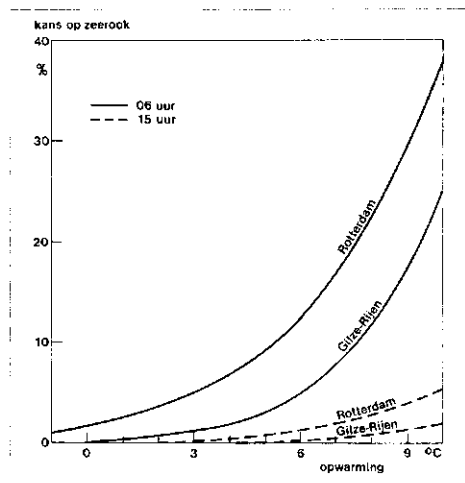
Waterverlies door verdamping is alleen in droge gebieden kwantitatief van belang, in het stroomgebied van de Rijn kan het verwaarloosd worden. In 1976 is de warmtelozing van het bovenstrooms van Lobith geproduceerde vermogen ($\pm 12.600 \text{ MW}_e$) geschat op 12.000 tot 20.000 MW_{th} , afhankelijk van het gebruik van koeltorens (IRC, 1978). Indien al deze warmte door verdamping aan de lucht afgevoerd zou worden, dan is daarvoor nodig

1
— 4000 = 8 m³/s, minder dan 0,5 %
540

van de gemiddelde afvoer van de Rijn bij Lobith. In de praktijk is het minder omdat een deel van de surplus-warmte door convectie en straling afgegeven wordt. Zelfs bij lage Rijnafoeren is de verdamping onder de huidige omstandigheden dus verwaarloosbaar klein.

Mistvorming kan optreden als de luchttemperatuur daalt onder het dauwpunt. Er is weinig bekend over de relatie tussen opwarming van een wateroppervlak en de kans op mist. Wessels (1976) heeft een theoretische schatting gemaakt van de invloed van koelwaterlozingen bij de Amercentrale te Geertruidenberg op de frequentie van mistvorming boven de Amer. Daarbij heeft hij speciaal gekeken naar de invloed op de zogenaamde zeerook, een vorm van mist die ontstaat als koude lucht over een warmer wateroppervlak strijkt. In een poging tot kwantitatieve uitspraken te komen heeft hij gebruik gemaakt van de meteorologische waarnemingen van twee nabij gelegen meteo-stations: Vliegveld Rotterdam en Gilze-Rijen en van de temperatuur van de Maas gemeten te Heesbeen.

Fig. 1 is gebaseerd op de resultaten van zijn berekeningen. De kans op zeerook als functie van de opwarming neemt slechts langzaam toe tot een opwarming van 4 à 6 °C, om daarna sneller te gaan stijgen.



Afb. 1 - Kans op zeerook in de Amer als functie van de opwarming, berekeningen gebaseerd op meteorologische waarnemingen in Gilze-Rijen en bij de Luchthaven Rotterdam.

Als de Amer 3 °C opgewarmd wordt, neemt de kans op voor de scheepvaart hinderlijke zeerook in de vroege ochtenduren toe van 0 à 1 % tot 1 à 5 %, midden op de dag blijft de kans kleiner dan enkele promilles. De laagste van deze getallenparen is steeds gebaseerd op weersomstandigheden zoals in Gilze-Rijen, de hoogste zoals bij de Luchthaven Rotterdam.

Het blijkt dat de werkelijke kans op zeerookvorming zo sterk afhankelijk van de klimatologische omstandigheden ter plaatse dat op basis van dit voorbeeld geen algemene uitspraken voor de Rijn gedaan mogen worden. Verder landinwaarts zijn de klimatologische omstandigheden gunstiger dan aan de kust omdat de luchtvochtigheid in het algemeen lager is. Bovendien variëren breedte en ligging van de Rijn in stroomopwaartse richting. Over het algemeen is zij veel smaller dan de Amer; gedeeltelijk stroomt zij door betrekkelijk vlak landschap, gedeeltelijk door soms vrij diepe dalen. Beide factoren hebben invloed op de vorming van zeerook.

2. Enkele definities en formules

De actuele temperatuur van het water op een gegeven plaats en tijdstip hangt af van vele factoren, zoals inkomende en uitgaande warmtestraling, verdamping en convectie, en stromingen in het water. Om deze processen te kunnen beschrijven worden de volgende begrippen gedefinieerd:

— *Evenwichts-temperatuur.* Dit is de temperatuur die het water aanneemt als het in evenwicht is met zijn omgeving. De evenwichts-temperatuur is een temperatuur die in de vrije natuur nooit bereikt wordt, omdat de omstandigheden voortdurend wijzigen. Het weer verandert van uur tot

uur, onder andere door de dag-nacht cyclus, en van dag tot dag. In water met een diepte van 4 m zou de evenwichts-temperatuur pas na enkele weken bereikt worden bij gelijkblijvende weersomstandigheden en afwezigheid van een dag-nacht cyclus. Dat komt in de werkelijkheid niet voor.

— *Natuurlijke temperatuur.* Dit is de in tijd en plaats variërende temperatuur die het water in werkelijkheid heeft indien er geen door de mens veroorzaakte warmtelozingen plaatsvinden. De natuurlijke temperatuur wordt bepaald door de meteorologische omstandigheden, de diepte van het water en door eventuele stromingen in het water. Hoe ondieper het water, hoe dichter deze temperatuur de evenwichts-temperatuur zal benaderen. De natuurlijke temperatuur kan beïnvloed worden door waterstaatkundige werken, zoals de aanleg van dammen, het veranderen van stromingspatronen en het baggeren van geulen of zandgaten.

— *Achtergrond-temperatuur.* Dit is de temperatuur bij afwezigheid van specifieke, met name genoemde, menselijke invloeden. Het is als het ware de achtergrond waartegen de opwarming tengevolge van een gegeven warmtebron bepaald wordt. Bijv.: als er op een rivier bovenstrooms van A nergens warmte geloosd is, dan zijn de natuurlijke en de achtergrondtemperatuur ter plaatse gelijk aan elkaar. Als daarentegen bovenstrooms van A wel warmte geloosd wordt, dan is de achtergrond-temperatuur bij A in principe hoger dan de natuurlijke temperatuur (tenzij de geloosde warmte ondertussen geheel aan de atmosfeer afgegeven is).

Het thermische gedrag van een rivier of meer kan beschreven worden met behulp van de warmtebalans:

$$H_t = H_n + H_f \quad (1)$$

waarin:

H_t = verandering van de warmte-inhoud van een kolom water in $W \cdot m^{-2}$

H_n = warmtetransport door het grensvlak van lucht en water

H_f = warmtetransport in het water (turbulente diffusie en stroming)

De eerste term aan de rechterkant kan verder uitgesplitst worden:

$$H_n = H_b + H_e + H_c + H_1 + H_s \quad (2)$$

waarin:

H_b = uitgaande warmtestraling

H_e = energie-overdracht door verdamping en condensatie

H_c = convectieve energie-overdracht

H_1 = inkomende warmtestraling van de atmosfeer

H_s = inkomende kortgolfige straling van de zon (globale straling)

De eerste drie termen zijn afhankelijk van de oppervlaktetemperatuur T_s , de laatste twee worden volledig bepaald door de atmosferische omstandigheden. Voor een nadere uitwerking van de individuele termen van de warmtebalans wordt verwezen naar een samenvattend en evaluerend overzicht door Sweers (1976).

Indien de stromingsterm H_f niet beïnvloed wordt door kunstmatige warmtelozingen, dan is in principe de natuurlijke temperatuur aan de oppervlakte te berekenen uit de warmtebalans. Deze berekeningen stellen echter hoge eisen aan de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens, omdat de meeste van de termen in het rechterlid groot zijn ten opzichte van H_n , zie tabel I. Ter vergelijking: de verandering van de netto warmte-inhoud H_n in een kolom water van 3 m die $0,5^\circ C$ opwarmt is $625 J \cdot cm^{-2}$.

TABEL I - Voorbeeld van een warmtebalans, berekend voor de maand-gemiddelde weersomstandigheden in juli respectievelijk januari in De Bilt.

parameter	zomer	winter
watertemperatuur in $^\circ C$	20,0	2,0
luchttemperatuur in $^\circ C$	17,0	1,7
windsnelheid in m/s	3,0	4,0
vochtigheid in mg/l	15,0	6,4
H_b in $J \cdot cm^{-2} \cdot dag^{-1}$	-3500	-2720
H_e in $J \cdot cm^{-2} \cdot dag^{-1}$	-700	-70
H_c in $J \cdot cm^{-2} \cdot dag^{-1}$	-160	-20
H_1 in $J \cdot cm^{-2} \cdot dag^{-1}$	+2780	+2580
H_s in $J \cdot cm^{-2} \cdot dag^{-1}$	+1580	+230

Wessels (1973) heeft deze methode toegepast: hij heeft de natuurlijke temperatuur van de Rijn berekend met behulp van meteorologische gegevens uit De Bilt en vergeleken met de bij Lobith gemeten temperaturen om de invloed van warmtelozingen bovenstrooms van Lobith op de temperatuur aldaar te bepalen. De resultaten van zijn werk worden in het volgende hoofdstuk besproken.

Om de natuurlijke temperatuur van het water zo te berekenen zijn veel en zeer nauwkeurige metingen van een aantal verschillende parameters nodig. Zelfs als voldoende gegevens voorhanden zijn is het nog de vraag of de natuurlijke temperatuur met de gewenste nauwkeurigheid berekend kan worden. Uit vele gedetailleerde metingen blijkt dat de temperatuur van onverstoorde water soms grote horizontale en verticale variaties vertoont. Dit zal in hoofdstuk 3 geïllustreerd worden aan de hand van enkele metingen. De afkoeling van een kunstmatig opgewarmd water wordt daarom meestal op een andere wijze beschreven. De warmte-uitwisseling door de

wateroppervlakte wordt gedefinieerd als functie van de kunstmatige opwarming met behulp van de formule:

$$H_n = AF\theta \quad (3)$$

waarin:

A = warmte-uitwisselingscoëfficiënt in $W \cdot m^{-2} K^{-1}$

F = oppervlak in m^2

θ = opwarming van het water boven de evenwichtstemperatuur; in de praktijk wordt vaak gerekend met dag-gemiddelden en wordt θ bepaald ten opzichte van de natuurlijke temperatuur.

De temperatuurverandering van het water wordt beschreven door:

$$H_n = \rho cz \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

waarin:

ρ = soortelijk gewicht van water in $kg \cdot m^{-3}$, waarde $\approx 1,0 \times 10^3$

z = diepte van het water in meters

t = tijd in seconden

Eliminatie van H_n uit (3) en (4) geeft na integratie:

$$\theta_t = \theta_0 \exp\left(-\frac{At}{\rho cz}\right) \quad (5)$$

Voor een eenvoudig riviermodel kan deze vergelijking op verschillende manieren herschreven worden. Stel dat de looptijd t van het water tussen 2 punten a en b beschreven kan worden met:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{Fz}{Q}$$

waarin:

V = volume van de rivier tussen a en b in m^3

F = oppervlakte van de rivier tussen a en b in m^2

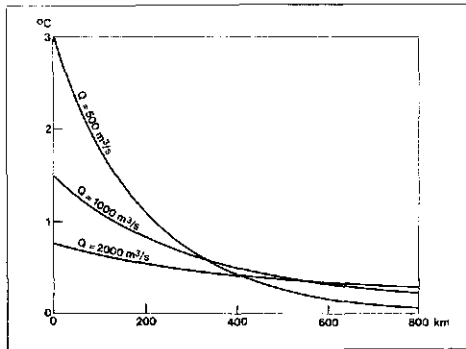
Q = debiet in $m^3 \cdot s^{-1}$

Dan kan (5) herschreven worden als:

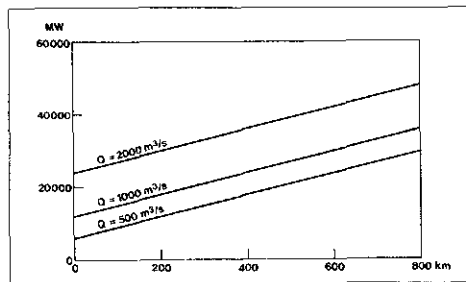
$$\theta_b = \theta_a \exp\left(-\frac{AF}{\rho cQ}\right) \quad (6)$$

In de praktijk blijkt de oppervlakte F slechts weinig te variëren met de afvoer Q , tenminste zolang de uiterwaarden niet onder water staan. Voor afvoeren variërende van 600 tot 3000 $m^3 \cdot s^{-1}$ bij Lobith varieert F niet meer dan 20 % (Verwolf, 1977). In eerste benadering mag F dus als een constante beschouwd worden. Dat heeft enkele interessante consequenties die het best aan een voorbeeld geïllustreerd kunnen worden:

Stel een rivier met karakteristieken als de Rijn in Duitsland: diepte 4 m, breedte 250 m, debiet variërend van 500 tot



Afb. 2 - Resterende opwarming in een 250 m brede en 4 m diepe rivier, op verschillende afstanden van het lozingspunt.



Afb. 3 - Koelend vermogen van een 250 m brede en 4 m diepe rivier, als functie van de lengte van het beschouwde segment.

2000 m³ · s⁻¹ en een warmtelozing van 1500 Mcal · s⁻¹. De gemiddelde opwarming van de rivier ter plaatse van de lozing is dan 3, 1,5 en 0,75 °C respectievelijk bij een debiet van 500, 1000 en 2000 m³/s. Het temperatuurverloop benedenstrooms van het lozingspunt wordt geschetst in figuur 2, uitgaande van een A-waarde van 40 W · m⁻²K⁻¹ die karakteristiek is voor de gemiddelde zomer-situatie. Hoewel de opwarming bij het lozingspunt uiteraard groter is naarmate het debiet kleiner wordt, blijkt dit op grote afstand niet meer zo te zijn: 400 km benedenstrooms het lozingspunt is de resterende opwarming het laagst bij het kleinste debiet.

Uit het voorgaande voorbeeld mag niet geconcludeerd worden dat het koelend vermogen van de rivier kleiner zou zijn naarmate het debiet groter is. Het maximale koelende vermogen van een rivier is de som van de warmte-afgifte aan de atmosfeer en de met het debiet getransporteerde warmte:

$$W_{\max} = AF\theta + \rho c Q \theta \quad (7)$$

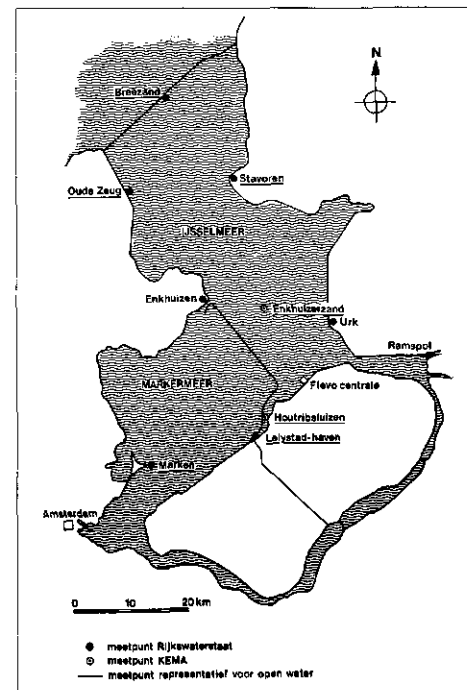
Voor een maximale opwarming van 3 °C kan W_{max} berekend worden, zie figuur 3. Hoe groter het debiet van een rivier, hoe groter het koelend vermogen omdat de transportterm ρcQθ lineair toeneemt met Q. Voor een gegeven waarde van A en van de maximaal toegestane opwarming θ_{max} geeft de term AFθ de toename van het

koelend vermogen als functie van de lengte (dus het doorlopend koelend oppervlak F) van de rivier. Hoe hoger de toegestane opwarming, hoe hoger het koelend vermogen.

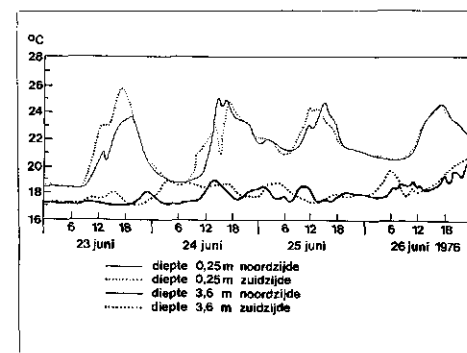
Het is goed bij het voorgaande op te merken dat de coëfficiënt A in werkelijkheid geen constante is maar een grootte die varieert met de meteorologische condities (zie bijv. Sweers, 1976). De mens kan hierop geen invloed uitoefenen. De warmte-uitwisseling per oppervlakte-eenheid kan alleen vergroot worden met kunstmiddelen die het contact-oppervlak tussen water en lucht vergroten zoals fontein en natte koeltorens.

Met deze twee voorbeelden worden enkele aspecten van de afkoeling in rivieren geïllustreerd. In werkelijkheid is de dynamiek van het systeem veel ingewikkelder, de

Afb. 4a - Locatie meetpunten in het IJsselmeer gebruik ter bepaling van de variatie in de natuurlijke temperatuur.



Afb. 4b - Vergelijking temperatuurverloop bij twee op korte afstand geplaatste meters in het IJsselmeer.



grondprincipes blijven echter gelijk. In hoofdstuk 5 worden de resultaten besproken van enkele berekeningen uitgevoerd met een meer realistisch model van de Rijn.

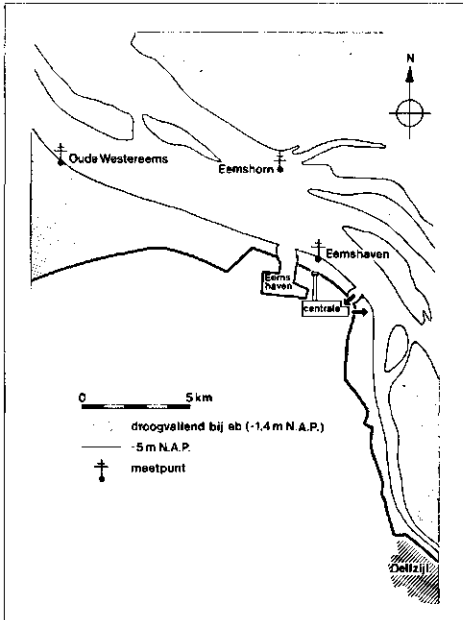
3. De natuurlijke temperatuur

In theorie kan de natuurlijke temperatuur van water berekend worden als de verschillende termen van de warmtebalans voldoende nauwkeurig bekend zijn. In de praktijk echter blijkt de temperatuur van het water vaak grote horizontale en verticale inhomogeniteiten te vertonen, die niet door locale omstandigheden verklaard kunnen worden. De KEMA heeft hier de laatste jaren veel onderzoek aan gedaan, zowel in het IJsselmeer als in de Waddenzee. Het blijkt dat het in deze wateren vaak niet mogelijk is om de instantane natuurlijke temperatuur op een punt x te bepalen door metingen in een op enige afstand gelegen punt y, zelfs al zijn de punten zodanig gekozen dat de seizoen-gemiddelde temperaturen wel aan elkaar gelijk zijn.

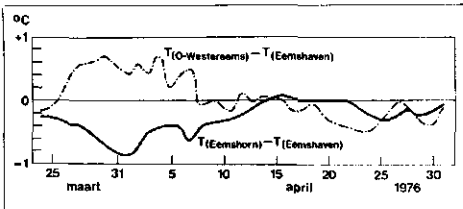
Uit onderzoek (Sweers, 1978 en 1979) in het IJsselmeer in de zomers van 1974-1976 is gebleken dat de gemiddelde temperatuur in de zomer toeneemt van noord naar zuid: Breezand 18,1 °C, Oude Zeug en Stavoren 18,3 °C, Marken en Lelystad 18,5 en 18,6 °C (zie fig. 4a voor de ligging van de meetpunten). De dagelijkse waarnemingen, gedaan om 8h 's ochtends, kunnen daarentegen meerdere graden uiteen lopen.

Een ander voorbeeld van de problemen die kunnen optreden bij het bepalen van de temperatuur op een gegeven plaats en diepte wordt gegeven in fig. 4b. Op een ponton midden in het IJsselmeer ter hoogte van het Enkhuizerzand is de temperatuur continu geregistreerd aan de noord- en aan de zuidzijde op een onderlinge afstand van circa 8 meter. Tijdens een periode met rustig en warm weer blijken over deze korte afstand af en toe temperatuurverschillen oplopend tot 2 °C op te treden. In dit geval worden de verschillen vermoedelijk veroorzaakt doordat de poten van het ponton de waterbeweging enigszins verstoren.

Tot slot een voorbeeld uit de Waddenzee (Sweers, 1977). In het voorjaar van 1976 is de temperatuur continu gemeten op een drietal meetpunten in de omgeving van de Eemshaven (zie fig. 5a en 5b). De Eemscentrale loosde in die periode nog geen warmte. Over de periode van 23 maart t/m 30 april verschillen de hoogste en de laagste waarde van de over de gehele periode gemiddelde temperatuur slechts 0,33 °C. De dag-gemiddelde temperaturen, gebaseerd op waarnemingen om de 20 minuten, lopen tot 1,5 °C uiteen in diezelfde periode.



Afb. 5a - Locatie van de meetpunten in de Eems gebruik ter bepaling van de variatie in de natuurlijke temperatuur.



Afb. 5b - Verschil tussen de dagelijks gemiddelde temperaturen gemeten op een drietal meetpunten in de Eems.

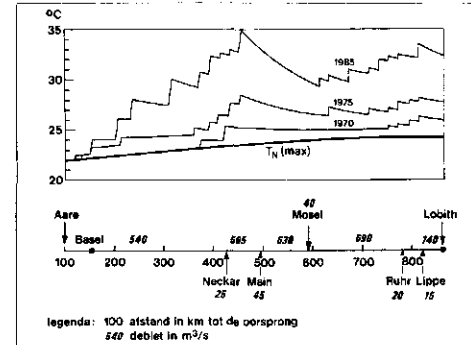
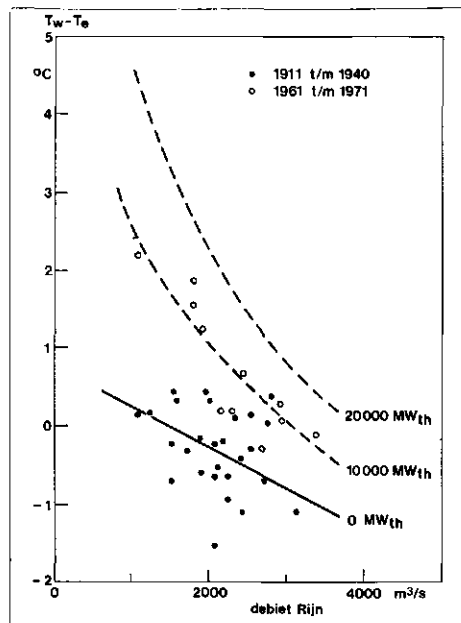
De variabiliteit van de temperatuur in een snel stromende, relatief goed gemengde rivier als de Rijn is over niet te grote afstanden vermoedelijk kleiner dan in de genoemde wateren. In de bovenloop van de Rijn zal de natuurlijke temperatuur in stroomafwaartse richting toenemen, in de benedenloop zal de natuurlijke temperatuur vermoedelijk weer enigszins afnemen, evenals in de Maas. Nader onderzoek is echter nodig om de bestaande inhomogeniteiten in de grote rivieren beter te kwantificeren.

Het geciteerde onderzoek illustreert dat zelfs over korte afstanden de temperatuur van het water grote variaties kan vertonen, vooral op betrekkelijk rustige, warme dagen. De instantane temperatuur op een gegeven punt wordt daardoor sterk beïnvloed door toevallige omstandigheden. Het is onmogelijk om bij een berekening van de natuurlijke temperatuur rekening te houden met deze toevallige, niet voorspelbare omstandigheden. Berekende waarden van T_N zijn daarom onderworpen aan een foutmarge die minstens gelijk is aan de spreiding van de waargenomen temperaturen (1 à 2 °C).

4. Huidige situatie

Wessels (1973) heeft de opwarming van de Rijn bij Lobith geschat door de berekende evenwichts-temperatuur te vergelijken met de in werkelijkheid gemeten temperatuur. Deze methode geeft redelijke resultaten, mits toegepast over langere perioden. Berekeningen van de evenwichts-temperatuur zijn nog onvoldoende nauwkeurig om de instantane natuurlijke temperatuur op een willekeurig moment te bepalen. De resultaten van Wessels worden weergegeven in fig. 6. De getrokken lijn geeft het verschil tussen de berekende evenwichts-temperatuur T_e en de waargenomen temperatuur T_w als functie van het debiet voor de jaren 1911 t/m 1940. Aangenomen wordt dat de totale warmtelozing in deze jaren nog verwaarloosbaar klein is, zodat de waargenomen temperatuur gelijk is aan de natuurlijke. In theorie zou $T_w - T_e$ dan niet mogen afhangen van het debiet; Wessels geeft geen verklaring voor de gevonden relatie omdat dit buiten het kader van de doelstelling van zijn onderzoek viel. De punten geven de spreiding van de waarnemingen rond het gemiddelde, de cirkels geven de waargenomen temperaturen in de jaren 1961 t/m 1971. De gestippelde lijnen geven de temperatuur bij Lobith als de Rijn opgewarmd is met 10.000 MW_{th} respectievelijk 20.000 MW_{th} . Bij een debiet van 1000 $m^3 \cdot s^{-1}$ geeft dit een opwarming van 2,4 °C, bij 2000 $m^3 \cdot s^{-1}$ van 1,2 °C. De waarnemingen voor de periode 1961 t/m 1971 suggereren een gemiddelde warmtelast in de zomer van circa 9000 MW_{th} . Wessels heeft eenzelfde analyse doorgevoerd

Afb. 6 - Verschil tussen de gemeten temperatuur T_w en de berekende evenwichtstemperatuur T_e van de Rijn bij Lobith bij een warmtelast van 0, 10.000 en 20.000 MW_{th} (volgens Wessels, 1973).



Afb. 7 - Maximale opwarming van de Rijn bij extreem lage afvoer in de zomer volgens LAW A (1971). De prognose voor 1985 geeft een weinig realistisch beeld, gezien recente ontwikkelingen in het energieverbruik. Een zo grote toename van de Rijntemperatuur zou ook door de Nederlandse Elektriciteitsbedrijven zeer betreurd worden.

voor de winter, en komt dan tot een gemiddelde warmtelast van 16.000 MW_{th} .

De Studiegroep Koelwater van de Werkgroep T van de Internationale Rijncommissie heeft de thermische belasting van de Rijn proberen te beschrijven met behulp van modellen waarmee de natuurlijke temperatuur en de afkoeling berekend worden uit meteorologische parameters. De zeer gedetailleerde en arbeidsintensieve berekeningen bleken niet altijd tot betrouwbare resultaten te leiden, en zijn daarom niet geschikt als grondslag voor het uitstippelen van een beleid. De uitkomsten van dit werk zijn niet gepubliceerd. Thans heeft de werkgroep een geheel andere benadering gekozen. Uitgaande van de geschatte warmtelozing zal, met behulp van formule (6) de resterende opwarming berekend worden als functie van de afstand tot het lozingspunt. De gemiddelde opwarming van de rivier wordt met behulp van een computerprogramma bepaald, waarin de hydrologische karakteristieken, de warmtelozingen en de afkoelingscoëfficiënt A als randvoorwaarden ingevoerd worden. De natuurlijke temperatuur wordt niet berekend, maar is volgens deze werkwijze gelijk aan het verschil tussen de waargenomen temperatuur en de berekende resterende opwarming.

Enkele jaren geleden is door de Duitse Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 1971) reeds een berekening uitgevoerd gebaseerd op de warmtebalans. Gebaseerd op de toen hooggespannen verwachtingen over de toename van het langs de Rijn opgestelde vermogen berekende men dat de opwarming in het warmste punt 's zomers toe zal nemen van 2 °C in 1970 tot 4,5 °C in 1975 en bijna 12 °C in 1985 bij afwezigheid van koeltorens (fig. 7).

De berekening is uitgevoerd voor de zogenaamde maatgevende afvoer, dat wil zeggen de laagste waarde die het 20-daagse

glijdende gemiddelde van de afvoer aangenomen heeft in de periode 1942 t/m 1966 ($740 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bij Lobith). Bij normale afvoeren ($2200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) is de opwarming aanzienlijk lager.

De LAWA ging uit van opgestelde vermogens van 6000 MW in 1970, 17.100 MW in 1975 en 43.000 MW in 1985 volledig gekoeld op de Rijn. Deze uit ongeveer 1970 stammende voorspelling is achterhaald door de feitelijke ontwikkelingen.

In Nederland bijv. gaf de in 1970 opgestelde prognose voor 1985 een totaal opgesteld vermogen aan van 28.000 MW, in de meest recente prognose (SEP, 1978) is dit gedaald tot 16.600 MW. Voor Duitsland is er geen recent overzicht van de langs de Rijn ge-projecteerde centrales, het is echter te verwachten dat daar een soortgelijke afremming van de groei plaatsvindt als in Nederland.

5. Koeltorens, een panacee voor alle problemen?

De opwarming van de Rijn kan beperkt worden door het gebruik van koeltorens. Ogenshijnlijk is dit een zeer voor de hand liggende oplossing: de restwarmte wordt direct aan de lucht afgevoerd en niet via de rivier. Koeltorens hebben echter enkele belangrijke nadelen:

- een koeltoren is aanzienlijk duurder dan een conventioneel koelcircuit.
- het redement van een op koeltorens gekoelde centrale ligt 3 à 4 % lager dan van een op de rivier gekoelde centrale. Dat betekent een hoger brandstofverbruik bij opwekking van een gelijk vermogen.
- een hoger brandstofverbruik betekent grotere luchtverontreiniging.
- door hun omvang kunnen koeltorens niet overal landschappelijk verantwoord ingepast worden.
- onder bepaalde weersomstandigheden kan de koeltoren lange mistpluimen veroorzaken.
- de noodzakelijke spui van 1 tot 5 % van het in omloop zijnde koelwater met de daarin opgeloste chemicaliën.
- minder mogelijkheden tot beluchting van de rivier.

Het is duidelijk dat beslissingen ten aanzien van het al dan niet gebruiken van koeltorens genomen moeten worden in afweging van alle voor- en nadelen zowel van de open-circuit-koeling als van de koeltoren-koeling. In een periode waarin de begrenzingen van de beschikbare hoeveelheid primaire energie steeds duidelijker worden, mag een dergelijke beslissing niet

eenzijdig, vanuit koelwater-overwegingen genomen worden zonder ook de energiepositie van ons land mee te wegen. En in een tijd waarin overgeschakeld moet worden van schone brandstoffen als aardgas naar vuile brandstoffen als kolen, dient naast de invloed op de waterkwaliteit ook de invloed op de kwaliteit van de ons omringende atmosfeer afgewogen te worden bij de keuze van een koelsysteem.

De voorgaande regels vormen geen pleidooi tegen het gebruik van koeltorens, maar een pleidooi voor een meer bewuste keuze tussen de mogelijke alternatieven. Het is echter duidelijk dat bij de Rijn het gebruik van koeltorens in bepaalde kritische perioden op den duur onvermijdelijk is als het langs de rivier opgestelde vermogen blijft groeien. Ook al zou men bij een zorgvuldige afweging van de gevolgen een iets grotere opwarming dan de thans voorgestelde $3 \text{ }^\circ\text{C}$ toelaten, een opwarming van de gehele rivier met meer dan $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (zoals berekend door de LAWA) zal niemand voorstellen!

6. Normering van koelwaterlozingen

Uit het voorgaande blijkt dat koelwaterlozingen een belangrijke invloed hebben op de warmtehuishouding van de Rijn. De volgende vraag is dan op welke wijze deze invloed beperkt kan worden. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de thans geldende (voorlopige) normen. Tot slot komt dan de vraag aan de orde in hoeverre de Rijn als eco-systeem schade ondervindt van de koelwaterlozingen. Deelvragen daarbij zijn of de normen optimaal geformuleerd zijn om schade aan levende organismen te beperken en of zij te ruim dan wel te strikt zijn.

In Nederland moeten koelwaterlozingen voldoen aan een drietal voorlopige normen, voorlopig omdat van verschillende kanten uitdrukkelijk vastgesteld is dat de normen gewijzigd kunnen worden als nader onderzoek daar aanleiding toe geeft. Deze normen zijn:

- de temperatuur in een open koelcircuit mag nergens hoger zijn dan $30 \text{ }^\circ\text{C}$.
- het koelwater mag in de condensor 's zomers niet meer dan $7 \text{ }^\circ\text{C}$, 's winters niet meer dan $15 \text{ }^\circ\text{C}$ opgewarmd worden.
- de Rijn mag gemiddeld over het totale debiet nooit meer dan $3 \text{ }^\circ\text{C}$ opgewarmd worden.

De eerste twee normen zijn eenvoudig te hanteren. Om te bepalen of de temperatuur in een koelcircuit niet boven de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ komt, kan achter de condensor een goede registrerende thermometer geplaatst worden. Om

de opwarming in de condensor te meten, kunnen twee registrerende thermometers gebruikt worden, geplaatst in de inlaat en de uitlaat. Deze metingen zijn relatief eenvoudig uit te voeren omdat de juiste locatie voor de te gebruiken thermometers direct uit de voorlopige norm volgt.

De laatste norm is minder goed te controleren. Om te bepalen of een rivier niet meer dan $3 \text{ }^\circ\text{C}$ opgewarmd wordt, kan alleen volstaan worden met een eenvoudige vergelijking van de warmtelozing met het rivierdebiet als er bovenstrooms van het lozingspunt geen andere warmtelozingen zijn. In Duitsland staan echter al centrales langs de Rijn. De natuurlijke temperatuur kan dus niet meer gemeten worden bij Lobith. Bovendien zagen we in het voorgaande dat de natuurlijke temperatuur ook niet met de gewenste nauwkeurigheid berekend kan worden. Dat betekent in feite dat de referentie, ten opzichte waarvan de 3-graden-norm gedefinieerd is, niet nauwkeurig bepaald kan worden zodat controle op deze norm door middel van temperatuurmetingen in de rivier onmogelijk is.

De consequenties hiervan kunnen geïllustreerd worden aan een voorbeeld: de maximaal toelaatbare warmtelozing van de centrale Gelderland bij Nijmegen hangt af van de opwarming van de Rijn bij Lobith. Als de Rijn bij Lobith reeds $3 \text{ }^\circ\text{C}$ opgewarmd is, dan wordt de maximale warmtelozing bij deze centrale uitsluitend bepaald door het koelend vermogen van Rijn en Waal tussen Lobith en Nijmegen. Dat is vrijwel onafhankelijk van de afvoer en bedraagt circa $225 \text{ Mcal} \cdot \text{s}^{-1}$ (het koelend oppervlak tussen Lobith en Nijmegen is circa $7,5 \text{ km}^2$). Zou de opwarming bij Lobith slechts $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bedragen, dan varieert de maximale warmtelozing van $475 \text{ Mcal} \cdot \text{s}^{-1}$ bij een afvoer in de Waal van $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ tot $1225 \text{ Mcal} \cdot \text{s}^{-1}$ bij een afvoer van $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en nog meer bij hogere afvoeren. De consequenties van de 3-graden-norm voor de centrale Nijmegen zijn dus uiterst gevoelig voor de gehanteerde uitgangspunten.

De eerste twee normen verschillen nog op een ander principieel punt van de derde: de maximale uitlaattemperatuur en de maximale temperatuursprong ΔT over de condensor worden bepaald zowel door de hoeveelheid te lozen warmte W als door het verpompte koelwaterdebiet Q . Een verhoging van Q bij een gegeven W geeft (bij afwezigheid van recirculatie) automatisch een verlaging van zowel de maximale lozingstemperatuur als van de temperatuursprong. Hierdoor ontstaat een vrijheidsgraad bij het ontwerp van centrales. De derde norm echter hangt alleen samen met de maximaal te lozen hoeveelheid warmte

W en is onafhankelijk van het koelwater-debiet.

De 3-gradennorm geeft een bovengrens aan de maximale warmtebelasting van de Rijn zonder in te grijpen op de technische uitvoering van de condensor. De 7-gradennorm schrijft een minimaal debiet voor bij een gegeven warmtelozing; onder invloed van de 30-graden-norm kan onder bepaalde omstandigheden een vergroting van het debiet dan wel een verkleining van het geproduceerde vermogen opgelegd worden.

In het hierna te bespreken biologische onderzoek wordt met name ingegaan op de vraag of onder invloed van de 7- en de 30-graden-normen wel een optimale afweging ontstaat ten aanzien van de schade aan het milieu. De resultaten van recent onderzoek suggereren dat onder bepaalde omstandigheden, uitgaande van een gegeven warmtelozing, minder schade ontstaat als het debiet verlaagd en de toegestane opwarming en/of maximum temperatuur verhoogd worden.

7. Effecten van thermische lozings

Zoals in de inleiding reeds is opgemerkt, worden de biologische effecten van koelwatergebruik bepaald door een drietal aspecten: Mechanische invloeden, de temperatuurschok en de blijvende opwarming in het uitlaatgebied. Ieder van deze aspecten wordt uitgebreid onderzocht. In dit artikel wordt slechts een zeer summier overzicht gegeven van de voornaamste resultaten, voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar de literatuur (Rijks-waterstaat, 1977, en publikaties van Donze, Hadderingh, Koops en Willemsen).

7.1 Mechanische schade

Het koelwater passeert achtereenvolgens een grof rooster (maaswijdte 4 cm of meer), een fijn rooster (maaswijdte 0,2 à 0,6 cm), de pompen en de condensor met vrij hoge

snelheden (circa $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), zie figuur 8. Kleine organismen zoals plankton en vislarven worden met het water meegevoerd door het gehele systeem, grotere organismen zoals vis worden bij de inlaat op de zeven opgevangen. In het eerste geval kan mechanische schade ontstaan door de heftige turbulentie van het water en door botsingen met obstakels zoals de zeef enzovoorts. In het tweede geval kan sterfte optreden doordat de vis te lang tegen de zeef aangedrukt en/of afgevoerd en vernietigd wordt.

De hoeveelheid vis die op de zeven blijft hangen varieert sterk met de tijd van het jaar en de locatie van een centrale. De roosters en zeven dienen om grof vuil op te vangen en zodoende te voorkomen dat de pompen defect of de condensorpijpen verstopt raken. Afhankelijk van de locatie worden per week minder dan één tot enkele containers afval, zoals landbouwplastic, planken, lege flessen en losgeslagen planten, opgevangen. Grotere vissen die ingezogen worden komen hierin terecht en worden meestal afgevoerd en vernietigd. Bij enkele centrales, bijvoorbeeld bij Bergum, wordt de vis van de zeven afgespoeld en weer teruggevoerd naar het omringende water. Ook dan sterft bij Bergum gemiddeld nog circa 60 % van de ingezogen vis. De sterfte hangt sterk af van de soort en de grootte van de vis en varieert van bijvoorbeeld 100 % voor spiering tot slechts enkele procenten voor paling en de driedoornige stekelbaars (Hadderingh, 1978). De hoeveelheid ingezogen vis, en daarmee de vissterfte, neemt evenredig toe met de ingenomen hoeveelheid koelwater.

Met het koelwater worden alle kleinere organismen (< 1 tot 5 cm) meegevoerd die zich niet kunnen verzetten tegen de stroom. De voornaamste groepen zijn het fytoplankton (plantaardig plankton), het zoöplankton (dierlijk plankton), de vislarven en de jonge vis voor zover zij de zeven kunnen passeren.

Bij het plankton is, ondanks intensief onderzoek bij vele soorten (Koops, 1975) nog nooit mechanische schade aangetoond, zelfs niet bij fragiele kolonievormende fytoplanktonsoorten. Bij vislarven en jonge vis ligt dit anders. Door mechanische schade ontstaat een sterfte die bij de Flevo-centrale varieert van 50 % voor spiering tot minder dan 20 % voor baarsachtigen en karperachtigen. Het onderzoek naar de invloed van de sterfte in het koelcircuit op de vispopulatie in het oppervlaktewater is zeer gecompliceerd. Hierbij moet bedacht worden dat met name vislarven en jonge vis van nature reeds zeer hoge sterftepercentages hebben. In de naaste toekomst zal hier meer aandacht aan besteed worden.

7.2 Thermische schok

Als niet alleen de pompen werken, maar de centrale ook warmte loost, dan worden passerende organismen onderworpen aan een thermische schok: in de loop van enkele seconden worden zij tijdens passage door de condensor met circa 7°C opgewarmd. Plankton, zowel het plantaardige als het dierlijke blijkt geen schade te ondervinden van een thermische schok van 7 á 8°C bij lozingstemperaturen oplopend tot 30 à 32°C . Dit is aangetoond met uitgebreid veldonderzoek bij de centrales Bergum en Flevo (Koops, 1975) en door onderzoek met micro-ecosystemen in de koelcircuits van de centrales Harculo (Donze, 1978) en Bergum en door onderzoek met water uit het Hollands Diep bij Shell Moerdijk (nog niet gepubliceerd).

Vooral uit het onderzoek met micro-ecosystemen blijkt duidelijk dat plankton betrekkelijk ongevoelig is voor kortstondige opwarming. Bij dit onderzoek wordt water van de inlaat en van de uitlaat gedurende twee weken ingesloten in een in het water drijvend vat van 2 m^3 . De ontwikkeling van de planktonpopulaties wordt gevolgd met dagelijkse bemonsteringen. De resultaten van dit onderzoek zijn samengevat in tabel II. Het blijkt dat pas bij temperaturen van 34°C bij enkele soorten beperkte sterfte optreedt. Voor de meeste soorten ligt de kritische temperatuur hoger, voor sommige zelfs boven de 40°C .

TABEL II - Sterfte van plankton bij kortdurende temperatuurschokken oplopend tot 40°C .

soort	sterfte bij een maximum temperatuur van:			
	30°C	32°C	34°C	40°C
<i>zoöplankton:</i>				
Cladocera	$< 5\%$?	$50-80\%*$	100%
Copepoda	0%	0%	0%	95%
Rotatoria	0%	0%	0%	50%
<i>fytoplankton:</i>				
Diatomeeën	0%	?	$< 25\%**$	$> 50\%**$
Overige soorten	0%	0%	0%	0%

* herstel in 5 dagen.

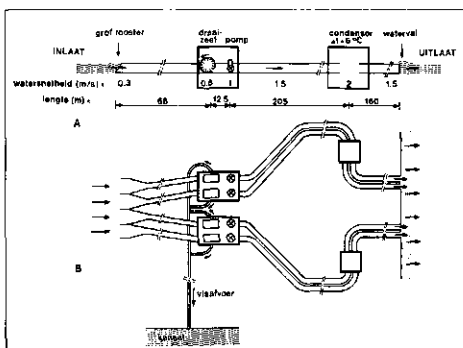
** sterfte slechts bij enkele typische voorjaarssoorten, op de meeste soorten geen significant effect.

De temperatuurschok heeft wel enige invloed op vislarven en jonge vis. Met temperatuurschokken van circa 7°C en bij temperaturen onder de 30°C is de gecombineerde sterfte door mechanische en thermische invloeden circa 25% groter dan alleen door mechanische invloeden. Bij hogere temperaturen zal de schade vermoedelijk toenemen.

7.3 Effecten van langdurige opwarming

Bij Nederlandse centrales zijn weinig

Afb. 8 - Schema van het koelwatersysteem van de Centrale Bergum.
A overlangs doorsnede
B bovenaanzicht



effecten gevonden veroorzaakt door de blijvende opwarming met enkele graden Celsius in het uitlaatgebied. Zeer plaatselijk, binnen enkele honderden meters van de uitlaat, zijn enige verschuivingen vastgesteld in de samenstelling van de op of in de bodem levende macrofauna (slakken, wormen, muggenlarven, enz.; zie Hadderlingh, 1975). Voor de overige organismen, zoals plankton en vis, zijn geen verschuivingen gevonden. Wel blijken vele vissoorten een voorkeur te hebben voor het opgewarmde water nabij de uitlaat, zodat daar vaak zeer hoge visconcentraties voorkomen. Het is niet geheel duidelijk of deze vis in water met ongezond hoge temperaturen zo lang blijft zitten dat de conditie negatief beïnvloed wordt. Op zich zelf zijn te hoge concentraties van vis echter ongewenst in verband met de verspreiding van infectieziekten.

Uit onderzoek van het Rijks Instituut voor Visserij Onderzoek blijkt dat sommige vissoorten, zoals baars en snoekbaars, sneller groeien bij hogere temperaturen dan normaal in het Nederlandse oppervlaktewater voorkomen (Willemsen, 1978). Bij snoekbaars is een duidelijk positieve correlatie gevonden tussen de sterkte van de jaar- klassen en de gemiddelde watertemperatuur in de zomer (Willemsen, 1977). Een geringe opwarming van het Nederlandse oppervlaktewater zou daarom weleens een positieve invloed kunnen hebben op de totale visstand, afgezien van de mogelijke negatieve effecten in de kleine gebiedjes met vrij sterke opwarmingvlak bij de uitlaat van centrales.

8. Vermindering van schadelijke effecten

De drie-graden-norm voor de gemiddelde opwarming van de Rijn is destijds min of meer gevoelsmatig gekozen. Een belangrijke factor bij deze keuze was het toenemende zuurstofgebruik bij hogere temperaturen in het sterk verontreinigde Rijnwater. Door de versnelde afbraak van organische verontreinigingen daalt het zuurstofgehalte in de rivier benedenstrooms van een warmte-lozing. De organische verontreiniging wordt echter langzaam teruggedrongen door de bouw van zuiveringsinstallaties in Duitsland en in ons land. De invloed van opwarming op het zuurstofgehalte wordt daardoor minder.

De zeven-graden-norm voor de maximale temperatuursprong 's zomers in de condensor is gekozen omdat bij grotere opwarming schade verwacht werd aan de met het koelwater meegevoerde organismen, zeker als daarbij de maximale temperatuur boven de 30 °C ligt. Inmiddels is uit het onderzoek gebleken dat bij de thans ge-

bruikelijke bedrijfsvoering van centrales schadelijke effecten beperkt blijven tot de sterfte van ingezogen vis en vislarven. Thermische effecten spelen daarbij een ondergeschikte rol, de sterfte wordt voornamelijk bepaald door mechanische effecten.

De mechanische schade kan verminderd worden door minder koelwater te gebruiken. De opwarming in de condensor zal dan evenredig hoger worden. Het onderzoek is er thans op gericht om, uitgaande van een gegeven warmtelozing, te bepalen bij welke combinatie van debiet en opwarming de totale schade minimaal is. Daarnaast wordt uiteraard ook onderzocht of op andere wijze voorkomen kan worden dat veel vis met het koelwater mee gezogen wordt, en wordt gezocht naar mogelijkheden om de mechanische schade aan ingezogen vis te beperken. Het tot nu toe uitgevoerde onderzoek duidt erop dat de schade al direct beperkt kan worden door het koelwaterdebiet te verkleinen en een hogere opwarming te accepteren dan thans volgens de voorlopige normen toegestaan is (Koops, 1978). Uiteraard gaat deze verhoging van de temperatuursprong in de condensor ten koste van het brandstofgebruik: een hogere temperatuursprong geeft een hogere uitlaattemperatuur en daarmee een wat lager rendement bij de omzetting van warmte in elektriciteit.

In alle gevallen is het van belang te komen tot een goede afweging van de vele, vaak tegenstrijdige belangen. Zoals reeds betoogd bij de beschouwingen over koeltorens, moet ook hier niet alleen het element waterkwaliteit bekeken worden, maar ook de invloed van voorgestelde maatregelen op het brandstofverbruik, en daarmee zulke uiteenlopende aspecten als luchtverontreiniging, de betalingsbalans van ons land, de kosten van de opgewekte elektriciteit enz.

IRC, 1978; Internationale commissie ter bescherming van de Rijn tegen vervuiling: *Programma de travail a long terme*.
LAWA, 1971; Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: *Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern*.
SEP, 1978; Samenwerkende Electriciteits-Productiebedrijven, Arnhem: *Electriciteitsplan 1983-1984*.
Sweers, H. E., 1976: *A nomogram to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of windspeed and temperature; a critical survey of some literature*.
Sweers, H. E., 1977: *Watertemperaturen in de Eems nabij de Eemscentrale maart t/m augustus 1976; verslag van continue registraties op een viertal vaste meetpunten*. KEMA-rapport VII/MO-K/77-40.
Sweers, H. E., 1978: *De natuurlijke temperatuur in het IJsselmeer: Enkele beschouwingen naar aanleiding van metingen in de zomers van 1974 t/m 1976*. KEMA-rapport VII/MO-K/77-84.

Sweers, H. E., 1979: *De natuurlijke temperatuur . . . Wat is dat?* H₂O, 1979 - 1.
Verwolf, G., 1977: *Kunstmatige opwarming in het noordelijk deltabekken*. Rijkswaterstaat, rapport WH-76.29.
Wessels, H. R. A., 1973: *Verandering van de Rijn-temperatuur; een meteorologische analyse*. De Ingenieur 85 (5), pp 88 - 90.
Wessels, H. R. A., 1979: *Verdampingsmist boven de Amer*. KNMI-rapport W.R. 76 - 10.
Rijkswaterstaat, 1977: *Hydrobiologisch koelwater-onderzoek in Nederland, stand van zaken juni 1977*. Commissie Koelwater Normen, nota WH 77.14.
Donze, M., 1978: *Measurements of the effect of heating on survival and growth of natural plankton populations*. Verh. Int. Verein Limnol. 20, pp 1822 - 1826.
Hadderlingh, R. H., 1975: *Effects of the cooling water discharge on the macro-invertebrates and fish populations around Flevo power station*. Verh. Int. Verein Limnol. 19, pp 1827 - 1823.
Hadderlingh, R. H., 1978: *Mortality of young fish in the cooling water system of Bergum power station*. Verh. Int. Verein Limnol. 20, pp 1827 - 1832.
Koops, F. B. J., 1975: *Plankton investigations near Flevo power station*. Verh. Int. Verein Limnol. 19, pp 2207 - 2213.
Koops, F. B. J., 1978: *Some problems in finding good standards for cooling water*. Verh. Int. Verein Limnol. 20, pp 1833 - 1836.
Willemsen, J., 1976: *Percids in The Netherlands*. Percid Symposium Canada 1976, paper 415.
Willemsen, J., 1978: *The influence of temperature in feeding, growth and mortality of pike-perch and perch*. Verh. Int. Verein Limnol. 20.

Fosfatennota levert weinig bezwaren op

De Tweede Kamer kan zich verenigen met de doelstellingen van de Fosfatennota: het gefaseerd (tot 1985) terugdringen van fosfaten in wasmiddelen, het plaatsen van derdetrapzuiveringsinstallaties in de regio's en het streven in 1985 de wasmiddelen geheel vrij van fosfaten in de handel te brengen.

Tijdens de openbare commissievergadering over de fosfatennota op 4 februari jl. kreeg minister Ginjaar een aantal moties voorgelegd waarin werd gevraagd hoge voorrang te geven aan het terugdringen van de fosfaatbelasting van ons oppervlaktewater (D'66) en onderzoek te doen naar de effecten op het milieu van fosfaatvervangers in wasmiddelen (CDA/VVD). In een motie van de PvdA werd gesteld dat het gebruik van afvalvermalers voor keukenafval met rioolwater een ontoelaatbare wijze van het zich ontdoen van afvalstoffen is. Alleen de fractie van de VVD stelde zich enigszins terughoudend op. Erica Verkerk-Terpstra meende dat niet moet worden besloten tot het uitbannen van fosfaten voordat er een duidelijke en volledige afweging is van risico's en voordelen. Overigens wees zij defosfatering niet op voorhand af.