

Addendum koelwaterstudie

Flevocentrale te Lelystad



januari 2006

Addendum Koelwaterstudie NRG/KEMA Flevocentrale

1 INLEIDING

1.1 Waarom dit Addendum

Dit addendum is geschreven in opdracht van Electrabel om de uitgangspunten en methoden van de modelleringstudie toe te lichten en de gevoeligheid van de uitkomsten als gevolg van die keuzen zichtbaar te maken. In deze tekst passeren diverse modelaspecten de revue, en wordt nader toelichting gegeven op de parameterkeuzen, en op de keuze van het model als zodanig. Ook wordt een aantal zaken uitgebreider toegelicht, voor het geval de rapporttekst zoals die er nu ligt, tot vragen leidt of zou kunnen leiden. Verder zijn er enkele correcties op de rapporttekst vermeld.

1.2 Achtergrond

Electrabel Nederland N.V. heeft het voornemen om op de bestaande locatie Flevocentrale (IJsselmeerdijk 101 te Lelystad) twee bestaande productie-eenheden (Flevo 10 en 20) te vervangen voor twee nieuwe productie-eenheden. De twee nieuwe productie-eenheden zijn aardgasgestookte STEG-eenheden met elk een vermogen van circa 500 MW_e. De geproduceerde elektriciteit zal worden geleverd aan het openbare net. Electrabel is eigenaar en vergunninghouder van de Flevocentrale.

Dit initiatief is m.e.r.-plichtig op grond van het Besluit milieueffectrapportage 1994. De m.e.r.-procedure wordt doorlopen voor het verkrijgen van de vergunningen ingevolge de Wet milieubeheer (Wm), Wet verontreiniging oppervlaktewater (Wvo), Wet op de waterhuishouding (Wwh) en de Wet beheer Rijkswaterstaatwerken (Wbr). Bedrijven die grote hoeveelheden koelwater gebruiken, zijn daarom verplicht om te voorspellen wat de mogelijke (thermische) effecten zijn op de wateren (aquatisch milieu ter plaatse) waarop de lozing plaatsvindt.

De problematiek van de afgelopen warme zomers en de klimaatontwikkelingen zijn de aanleiding geweest voor een nieuwe beoordelingssystematiek, gebaseerd op de waterkwaliteitsaanpak. De oude (ABK) richtlijnen waren gebaseerd op emissie-eisen en de nieuwe

(Europese) wetgeving baseert zich op immissie-eisen. In de nieuwe beoordelingssystematiek spelen de volgende toetsingscriteria:

- de mengzone: gedefinieerd met als gebied tot de isotherm van 30 °C
- de temperatuureffecten in het far-field (systeemgrens watersysteem): dit criterium speelt hier geen rol omdat de voor de hand liggende systeemgrenzen (Afsluitdijk, monding IJssel) te ver van de locatie gelegen zijn.

Verder zijn milieuhygiënisch mogelijk van belang:

- opwarming van de bodem
- eventuele recirculatie: dit leidt tot verdere temperatuurstijging van het lozingswater.

De oude criteria zoals de maximale lozingstemperatuur en de opwarming (ΔT) over de warmtewisselaars, zijn losgelaten.

1.3 Vraagstelling koelwatermodellering

De studie richt zich op de temperatuureffecten in het IJsselmeer die worden veroorzaakt door de koelwaterlozing van de FLEVO-elektriciteitscentrale en de geplande STEG-eenheden nabij Lelystad in de Flevopolder. Vraagstelling is hoe de koelwaterpluim zich gaat gedragen, of wel hoe deze pluim zich in het meer verspreidt onder verschillende klimatologische omstandigheden. Verder wordt vervolgens de berekende verspreiding getoetst aan de nu geldende richtlijnen zoals die nu geformuleerd zijn in de CIW nota.

Om deze vragen adequaat te kunnen beantwoorden, zijn een aantal keuzen gemaakt. Ten eerste is van belang het meteorologische scenario te kiezen voor de modellering. Er is in dit geval gekozen een zogenaamde worst case situatie door te rekenen, waarbij er dan wordt aangenomen, dat elke andere weersituatie tot een gunstigere situatie leidt. Alle andere scenario's zullen gunstiger uitpakken, dus als de modelresultaten voor deze situatie aan de criteria voldoen, zal dit ook voor andere situaties het geval zijn. Teneinde een goede keus te doen is een aantal recente zomers gekozen, die te boek stonden als extreem, en in welke er in Nederland koelwaterbeperking onder de ABK richtlijnen optraden. Er is gekozen voor de zomer van 2003 en die van 2004, waarbij die van 2003 extreem warm was, en die van 2004 bovengemiddeld warm was. In dergelijke zomers zijn dan ook de grootste temperatuureffecten op het meer te verwachten. Een andere aanpak van de meteorologische parameters had kunnen zijn het kiezen van een gemiddeld weerpatroon voor bijvoorbeeld de laatste 10 - 20 jaar, en voor een periode die maar een 2% van de tijd voorkomt. In de studie echter is gekozen voor een zomer die representatief wordt gezien voor een warme, niet voor een

gemiddelde zomer, en voor een extreme zomer, namelijk die van 2003. Wind is uitermate van belang in een meer voor de vorming van de stromingspatronen. Er had hier gekozen kunnen worden voor het doorrekenen van een statistisch verdeeld weer, waarbij elke weersituatie met zijn kans erop wordt bepaald om vervolgens de kans op temperatuuroverschrijding of de temperatuureffecten of overschrijdingen te bepalen als functie van de windrichting en de kans op die windrichting. Dit had echter een behoorlijk groot aantal model-runs tot gevolg gehad en daar is vanwege de gemoeide tijd en kosten niet voor gekozen. In plaats daarvan is voor twee extreme weersequenties gekozen, die op zich al op een klein percentage van de tijd voorkomen. De keuze voor grotere windsnelheden in het model had kunnen leiden tot grotere verspreiding van de warmtepluim, sterkere verticale menging, en dus lagere watertemperaturen. Lagere windsnelheden hadden kunnen leiden tot iets hogere watertemperaturen, maar daar de windsnelheden al zeer laag zijn, is dat niet significant. De keuze van de scenario's leidt dus tot conservatieve resultaten.

De toetsing aan de CIW nota, dwong tot keuzen over de interpretatie van de over het algemeen generiek beschreven richtlijn. Concreet is gezien of aan de nieuwe criteria volgens de nieuwe beoordelingssystematiek van de Commissie Integraal Waterbeheer (CIW) wordt voldaan. Echter, de nieuwe beoordelingssystematiek spreekt zich niet expliciet uit over meren: dat wil zeggen dat er thans geen "harde" - fysische of biologische - eisen worden gesteld aan lozingen op meren. De reden dat voor dit type watersysteem geen aparte regels in de CIW nota zijn opgenomen, was vanwege de grote variatie in type meren in Nederland. Dit betekent dat per meer de algemene CIW regels op een of andere manier per meer moeten worden geïnterpreteerd in samenspraak met het bevoegd gezag. De 25% regel die in de CIW nota is genoemd is niet simpelweg toe te passen op het IJsselmeer omdat deze geldt voor een dwarsdoorsnede haaks op de lozing. Dit zou echter tot een zeer groot oppervlak leiden, waarbij de 25% meer dan 30 °C nooit kan worden overschreden. Keuze van deelddoorsneden zou een optie zijn, maar ook hier weer geldt, dat dit volstrekt arbitrair wordt. Voor de mengzone - het gebied dat boven de 30 °C komt - is een criterium opgesteld in de lijn van de CIW richtlijnen: gezien vanaf het wateroppervlak in de diepterichting mag niet meer dan 25% van de afstand een temperatuur van 30 °C of hoger hebben, zodat de bodemfauna en vissen de gelegenheid hebben te migreren in het geval de temperatuur aan het wateroppervlak oploopt. Deze regel is afgeleid van een regel die ook voor zeeën geldt. Deze aanpak is uitvoerig met RIZA besproken en wordt waarschijnlijk één van de richtlijn-mogelijkheden in de toekomst. Ook had hier gekozen kunnen worden voor het verstoorde wateroppervlak, een aanpak die bijvoorbeeld voor een ander stilstaand water, het Hollandsch Diep wordt gehandhaafd, of voor een maximale temperatuurverhoging aan de waterkant. Dit soort regels zouden echter minder in de lijn van de CIW nota zijn, en zijn derhalve verworpen.

Verder mag de warmtepluim de waterbodem niet bereiken omdat daardoor het bodemleven te zeer beïnvloed zou kunnen worden.

Voor het lozingsgebied (het IJsselmeer behoort tot de Rijkswateren) rondom de Flevocentrale, met een diepte gemiddeld 4 meter, is het beïnvloede (temperatuurverhoging ten opzichte van achtergrond groter dan 3 °C) gebied of reikwijdte van de koelwaterpluim circa 10 km².

1.4 Doel van de modellering

Voor een warmtelozing is het van belang een gedegen keus te doen van het type model. Het doel is het gedrag van de warmte in alle richtingen in kaart te brengen. Daar warmte de neiging heeft door de lagere dichtheid te gaan drijven kon er niet gekozen worden voor een 2D dieptegemiddeld model, hetgeen dus betekent dat er een 3D model moet worden gekozen om deze pluimstijging in beeld te brengen. Het doel van deze gezamenlijke studie van NRG en KEMA is om na te gaan of de toekomstige koelwaterlozing en de daaruit voortvloeiende temperatuurverhoging binnen de gestelde richtlijn vallen. Een model moet de invloed van de Flevocentrale op de watertemperatuur van het IJsselmeer in beeld brengen. Er wordt dus aangenomen, dat er geen andere warmtebronnen in het meer aanwezig zijn, afgezien van de atmosferische warmteflux en van de instromende warmtehoeveelheid vanuit het Ketelmeer (die verwaarloosbaar is zoals verderop in dit addendum wordt beargumenteed).

Deze laatste invloed is overigens gering, doordat het snelstromende water uit de IJssel in het Ketelmeer wordt afgeremd; het Ketelmeer is immers breder dan de IJssel. De temperatuur van het Ketelmeer zal net als voor het IJsselmeer het geval is, voornamelijk worden bepaald door de atmosfeer.

1.5 Keuze model

Voor de bovengenoemde taak is gekozen voor het gerenommeerde en gevalideerde model POM, dat voorzien is van een kromlijng raster ("Princeton Oceanographic Model" ofwel afgekort "POM"). Dit internationaal geaccepteerde model is reeds vele malen toegepast en gevalideerd in een groot aantal studies. Het is een model dat in staat is om de verspreiding van de voorziene koelwaterlozingen te berekenen, zowel in de horizontale als in de verticale richting, alsmede eventuele recirculatie van het koelwater om het schiereiland heen naar de

inlaat (kortsluiting) in beeld te brengen. De versie die in deze studie is toegepast is het model "POM2K", uitgebracht in 2004.

De keuze voor POM is een pragmatische geweest daar een ander door RWS geaccepteerd model THREETOX op dat moment van de studie nog geen kromlijinig raster bevatte (hetgeen inmiddels overigens wel het geval is) en POM wel. Door toepassing van een kromlijinig raster kan met gelijke rekentijd namelijk een grotere nauwkeurigheid bereikt worden dan met een rechthoekig raster.

Andere opties voor modellen zouden geweest zijn: THREETOX of Delft-3D-Flow (gelijksoortige modellen), CFD modellering (bijvoorbeeld CFX of StarCD) en CORMIX (geen model maar een expertsysteem), of een bij NRG voorhanden zijnde non-hydrostatic model speciaal voor de nearfield effecten. De modellen THREETOX en Delft-3D-Flow zijn niet gekozen maar zouden ongeveer dezelfde resultaten hebben gegeven, op enige verschillen na, die ontstaan door een meer complex warmtemodel en door een ander model voor turbulentie dan in POM wordt gebruikt. Dit zou getest kunnen worden in aanvullende studies. Een CFD model is niet geschikt voor een groot meer als het IJsselmeer daar dit extreem lange rekentijden zal vergen. Alleen voor de directe omgeving zou dit een optie zijn voor een precieze modellering van de uitlaatstromen. Ook hier worden geen significante andere voor deze MER belangrijke resultaten verwacht, behalve dan een precieze modellering van pluim in de buurt van het uitlaatwerk. Dit leek ons een weinig zinvolle exercitie in dit geval, omdat dit voor de beoordeling van de pluimverspreiding niet tot nieuwe conclusies zal leiden. Een andere keuze is het kiezen van een non-hydrostatic model, dat inderdaad een iets ander resultaat kan geven. Dit type model heeft nauwelijks effect op de warmteverspreiding op het hele IJsselmeer zoals in internationale studies is aangetoond, bijvoorbeeld voor het Balaton meer in Hongarije. Vlak bij de lozing kan dit wel tot iets andere resultaten leiden, maar gezien de uitkomsten die nauwelijks kritisch te noemen zijn, leek ons deze exercitie weinig toevoegen aan de conclusies die zijn getrokken aan de hand van de POM modelresultaten. Opgemerkt moet worden dat een dergelijke exercitie altijd kan worden overwogen indien er interesse is in precies inzicht in de gedetailleerde effecten vlakbij de uitlaat van de centrale. CORMIX is een expertsysteem en leek ons te grof voor deze koelwatermodellering, aangezien een expertsysteem niet daadwerkelijk de pluimverandering berekent, maar een afschatting van de evenwichtssituatie geeft op grond van de configuratie van de uitlaat en de morfologie van het meer, terwijl het doel van deze studie is om de dynamiek in beeld te brengen. Daartoe is een 3D model als POM geschikter, en deze toepassing ligt binnen het bereik van deze studie door de snelheid van computers. Uiteraard kan CORMIX worden toegepast om de resultaten mee te vergelijken, maar dit leek ons gezien de betrouwbaarheid van een 3D model als POM geen toegevoegde waarde op te leveren.

Enige specifiekere informatie met betrekking tot POM wordt hierna weergegeven. POM is een geavanceerd driedimensionaal model voor hydrodynamische simulaties van oppervlaktewater. De hydrodynamische situatie wordt dientengevolge gesimuleerd op basis van dit driedimensionale, tijdafhankelijke, gelaagde, model met een vrij oppervlak. De prognostische variabelen van de hydrodynamische code zijn: de drie componenten van de snelheidsvelden, de temperatuur en de verhoging van het waterniveau. Het concept van turbulente viscositeit en diffusie wordt gebruikt om de turbulentiespanningen en -stromingen te definiëren. De turbulente viscositeit en diffusie zijn berekend aan de hand van het q^2 - q^2_l turbulentiemodel. Om de oppervlaktestromingen van momentum en de warmte te berekenen, zijn standaard meteorologische gegevens nodig (luchttemperatuur aan het wateroppervlak, windsnelheid en windrichting) en bij de uitlaat zijn de lozingssnelheid en -temperatuur nodig. Er is bij deze modellering een kromlijng raster gebruikt. Dit heeft als voordeel dat de kustlijn en dieptevariaties worden afgevlakt. Tevens is er een fijne resolutie in de nabijheid van de Flevo-centrale mogelijk terwijl op de grote afstand een grovere resolutie mogelijk is zodat de modelleeractie in één slag kan worden uitgevoerd.

1.6 Resultaten

De belangrijkste resultaten die volgen uit de koelwaterstudie zijn:

- de warmtepluim in de meteorologische 'worst case' situatie strekt zich uit over een gebied van circa 10 km². In het lozingsgebied dicht tegen de uitlaat van de centrale wordt de temperatuur van 30 °C slechts in enkele gevallen lokaal aan het wateroppervlak overschreden. De vooropgezette richtlijn van geen overschrijding van 25% over de verticaal met een temperatuur van 30 °C of hoger in het IJsselmeer wordt nergens overschreden. In alle andere gevallen is het effect dus minder sterk
- door de thermische stratificatie van de koelwaterpluim is er geen significante temperatuurverhoging waargenomen tegen de bodem van het meer
- in extreme gevallen is recirculatie mogelijk; het effect is echter minder dan één graad Celsius.

2 BELANGRIJKSTE MODELLERINGSASPECTEN

2.1 Afbakening van de studie

Elke modelstudie heeft zijn afbakening nodig. Een aantal vragen die zouden kunnen worden gesteld bij de toepassing van het 3D model is de kwaliteit van de input, de validatie van het model, en bij deze studie in het algemeen kan worden afgevraagd of er rekening is gehouden met zaken als een veranderend klimaat of waterkwaliteitsfactoren zoals algenbloei. In dit hoofdstuk wordt op deze punten ingegaan.

2.2 Toetsing aan meetwaarden: modelvalidatie

Idealiter zou modellering getoetst worden onder de omstandigheden waaronder de voorspelling gemaakt wordt. Dit zouden gegevens van enkele hete tot zeer hete zomers vergen, waarbij zo mogelijk ook een aanzienlijke thermische lozing plaatsvindt. Uiteraard kan de FLEVO-lozing niet worden geverifieerd daar deze niet plaatsvindt. Wat in principe wel zou kunnen worden uitgevoerd is een vergelijking van temperatuurmetingen en modelresultaten voor een langere periode voor het hele IJsselmeer, over een periode van bijvoorbeeld enkele jaren. Gedetailleerde gegevens van een beperkt aantal meetlocaties zijn hiervoor voorhanden bij RWS-Dienst IJsselmeer.

Bij de modellering is gebruik gemaakt van metingen in het IJsselmeer in de periode augustus 2003 en 2004. Deze metingen werden gebruikt om het water een starttemperatuur te geven. En daar de lozing voornamelijk directe temperatureffecten heeft, is er ook voor gekozen een meetpunt ver van de lozing, Kornwerderzand, te vergelijken met het modelresultaat op dit punt. Dit is dus vergelijking van het model met een meetserie over de gehele maand augustus in 2004 om een beeld te krijgen van de kwaliteit van het model op deze toepassing. Uiteraard zal de temperatuur iets afwijken van de gemodelleerde temperatuur omdat deze de lozing bevat. Door de grote afstand tussen de meetlocatie en lozing kwam de gemodelleerde temperatuur en de trend erin redelijk overeen met gemeten temperatuur.

Er is hierbij aangenomen dat nergens op het meer warmtelozers aanwezig zijn, ook deze aanname leidt er toe dat een te lage watertemperatuur wordt gemodelleerd.

De wezenlijke vraag is uiteraard of met meer veldgegevens andere conclusies te verwachten zouden zijn. Daarbij moet ook worden opgemerkt, dat de kritische punten dicht bij de centrale gelegen zijn. Dit geldt met name voor de eventuele opwarming van de bodem en de

30 °C-zone. Aangenomen mag worden dat op geen van beide parameters andere gegevens een wezenlijke invloed zouden hebben.

Een andere manier om het gedrag van de pluim in beeld te krijgen is door verschillende situaties te modelleren, ofwel voor verschillende parameterwaarden voor meteorologische, hydrologische, en andere parameterwaarden voor het model. Variatie van operationele parameters is gedaan met de 10 verschillende scenario's en voor twee verschillende meteo-hydrologische omstandigheden. Daarbij wordt er op gewezen dat de maximale lozingen (vol vermogen van alle eenheden) zijn bezien. Bedrijfsmatig komen dergelijke omstandigheden zeer zelden tot nooit voor. Dit biedt in combinatie met warme tot zeer warme zomers een zeer conservatieve benadering. In het MER is aangetoond dat zelfs onder deze omstandigheden geen significante effecten op het milieu te verwachten zijn. Om die reden wordt het ook niet zinvol geacht om aanvullende operationele parameters door te rekenen, of nog meer scenario's door te rekenen.

2.3 Klimatologische veranderingen en de effecten op de modelresultaten

Vrij algemeen wordt aangenomen dat de gemiddelde temperatuur op aarde de komende decennia zal stijgen. Zeker is dit echter niet. Deze temperatuurstijging zal ongelijk over de aarde verdeeld zijn. Hoe de temperatuurstijging van de lucht in het stroomgebied van de Rijn en boven het IJsselmeer zal zijn, is niet bekend. Nog minder is bekend wat de temperatuurstijging van de IJssel en het IJsselmeer gedurende de levensduur van de nieuwe eenheden zal zijn. Relevant is feitelijk de ontwikkeling van de temperatuur van het IJsselmeer gedurende de warme zomers. Deze is volstrekt onbekend. Zou men als zeer ruwe eerste benadering een temperatuurstijging van 0,5 °C aannemen, dan is duidelijk dat een dergelijke stijging geen invloed van betekenis heeft op de 30 °C-zone en op de opwarming van de bodem.

2.4 Detailonderzoek naar de (kans op) kortsluitstromen van uitlaat naar inlaat

Een belangrijk aspect bij het bedrijven van een elektriciteitscentrale met doorstroomkoeling is de mate waarin kortsluitstromen ontstaan, ofwel in welke mate de geloosde warmte de inlaat kan bereiken. De modelstudie wijst uit, dat recirculatie onder zeer specifieke meteorologische omstandigheden en lozingshoeveelheden voorkomt. In deze situatie is er geen maximale thermische belasting van de bodem of de IJsselmeerdijk te verwachten, daar dit vooral optreedt bij maximale lozingsdebieten, waardoor de temperatuuroptename ten opzichte van de inlaat minimaal wordt beïnvloed door de grotere hoeveelheid water die op dat

moment voor de koeling wordt gebruikt. Het belangrijkste effect van recirculatie is een mogelijke rendementsdaling van de centrale voor de kortstondige periode dat recirculatie daadwerkelijk optreedt. Gezien het sporadische voorkomen is er nauwelijks een rendementsdaling te verwachten, laat staan een sterke milieu-impact. Verder dient opgemerkt te worden dat de door het model geproduceerde stromingsvelden gezien de bathymetrie en berekende snelheden niet onwaarschijnlijk zijn qua orde van grootte. Deze kunnen aan metingen worden geverifieerd als deze voorhanden zouden zijn.

2.5 De gevolgen voor waterkwaliteit en aquatische biologie, in het bijzonder algenbloei

Deze effecten waren geen onderwerp van de koelwaterstudie. Zij staan beschreven in paragraaf 5.3 van het MER. Daar zijn de gevolgen voor waterkwaliteit en aquatische biologie, in het bijzonder algenbloei, getoetst aan effectennota zoetwater, de onderliggende studie voor de nieuwe koelwaterbeoordelingssystematiek. Er zijn geen waterkwaliteitsveranderingen te verwachten en die zijn de afgelopen 25 jaar met de bestaande eenheden in bedrijf ook niet opgetreden. Algenbloei is een fenomeen waarbij de temperatuur een ondergeschikte rol speelt aan nutriënten. Algenbloei, en met name blauwalgen zijn eerder een regionaal dan een lokaal probleem en verhoogde algenbloei rondom de centrale Flevo is niet bekend uit het verleden.

2.6 Slot

Naast bovengenoemde algemene aspecten zijn een aantal specialistische vragen te stellen. Het betreft keuze van simulatiesystemen, parameterkeuze et cetera. Deze punten zijn zeer specialistisch van aard. De belangrijkste worden in bijlage I behandeld.

Samengevat zijn de belangrijkste modelaspecten in het voorgaande toegelicht. Aangevend is dat er redelijkerwijs geen twijfel hoeft te bestaan aan het voldoen aan de CIW-criteria voor koelwaterlozingen, ook niet bij een andere modelkeuze, andere aannamen van de modelparameters en bij mogelijke klimatologische ontwikkelingen gedurende de komende 30 à 40 jaar dat de nieuwe STEG's in bedrijf zullen zijn.

BIJLAGE I Specialistische modelaspecten

1 Warmteflux modellering: complex versus eenvoudig

De juiste modellering van de warmteuitwisseling met de atmosfeer is in deze studie van groot belang. In onderstaande Engelstalige paragraaf wordt ingegaan op het gebruikte heat flux model in POM waarmee wordt aangetoond dat het gebruik van een simpel atmosferisch warmtemodel geen meerwaarde heeft ten opzichte van een complex warmte flux model zoals in THREETOX of in andere 3D modellen wordt gebruikt. Er wordt in het onderstaande naast de beschrijving van de heatflux modellering in het gebruikte model, tevens een vergelijking POM met dit eenvoudige warmteflux model met hetzelfde POM model met een complexer heatflux model gegeven. Er is aangetoond dat het voor de meteorologie afdoende is om alleen de windsnelheid, windrichtingen en luchttemperatuur te gebruiken door deze parametrisatie te vergelijken met een complexer warmteoverdrachtmodel, waarbij wel gebruik is gemaakt van andere atmosferische parameters zoals luchtvochtigheid, luchtdruk en bewolgingsgraad.

HEATFLUX model as used in POM

For heat flux calculation simple formula was used:

$$Q = C_t (T_a - T_s)$$

where C_t - empirical coefficient, which includes the effects of turbulent fluxes and radiation. In calculation we used $C_t = 2 \cdot 10^{-5}$, which allowed to reproduce existing measurements in IJsselmeer.

For validation of heat flux coefficient we implemented complex heat flux model, which includes short wave radiation, turbulent fluxes, evaporation and long wave radiation:

$$Q = Q_s + Q_e + Q_h + Q_b$$

where Q_s - sun radiation, Q_e - evaporation flux, Q_h - turbulent flux, Q_b - long wave radiation flux.

Short wave sun radiation flux:

$$Q_s = \begin{cases} \alpha'(1-\alpha)K \left(\frac{(\cos\eta + 2.7) \cdot r \cdot e(T_a)}{P_a S_0 \cos^2 \eta} + \frac{1.085 \cos\eta + 0.1}{S_0 \cos^2 \eta} \right)^{-1} \left(\frac{\bar{d}}{d} \right)^2, & \cos\eta \geq 0 \\ 0, & \cos\eta \leq 0 \end{cases}$$

Here S_0 - sun constant, $\alpha' = 0.9$, $\alpha = 0.06$ - albedo, η - angle of sun rays, T_a - air temperature, T - surface temperature, P_a - air pressure, r - humidity, $e(T_a)$ - saturated vapor pressure, n - cloudness, d - current distance between Sun and Earth, $\bar{d}$ - average distance between Sun and Earth.

For long wave radiation the next formula was used:

$$Q_b = \sigma_T \left[0.98T_s^4 - 0.732T_a(1 - \exp(-0.47e_a)) \cdot (1 - 0.067n + 0.301n^2) \right]$$

where σ_T - Stephan-Boltzman constant, e_a water vapor pressure.

Turbulent heat flux:

$$Q_h = C_p \rho_a \kappa u_* \frac{T_a - T_s}{\ln \frac{z_a}{z_0} - \psi_h}$$

where ρ_a - air density, z_a - height of measurements above water surface, C_p - air heat capacity, κ - Von Karman constant, z_0 - roughness height (calculated by Charnok relation).

Evaporation flux:

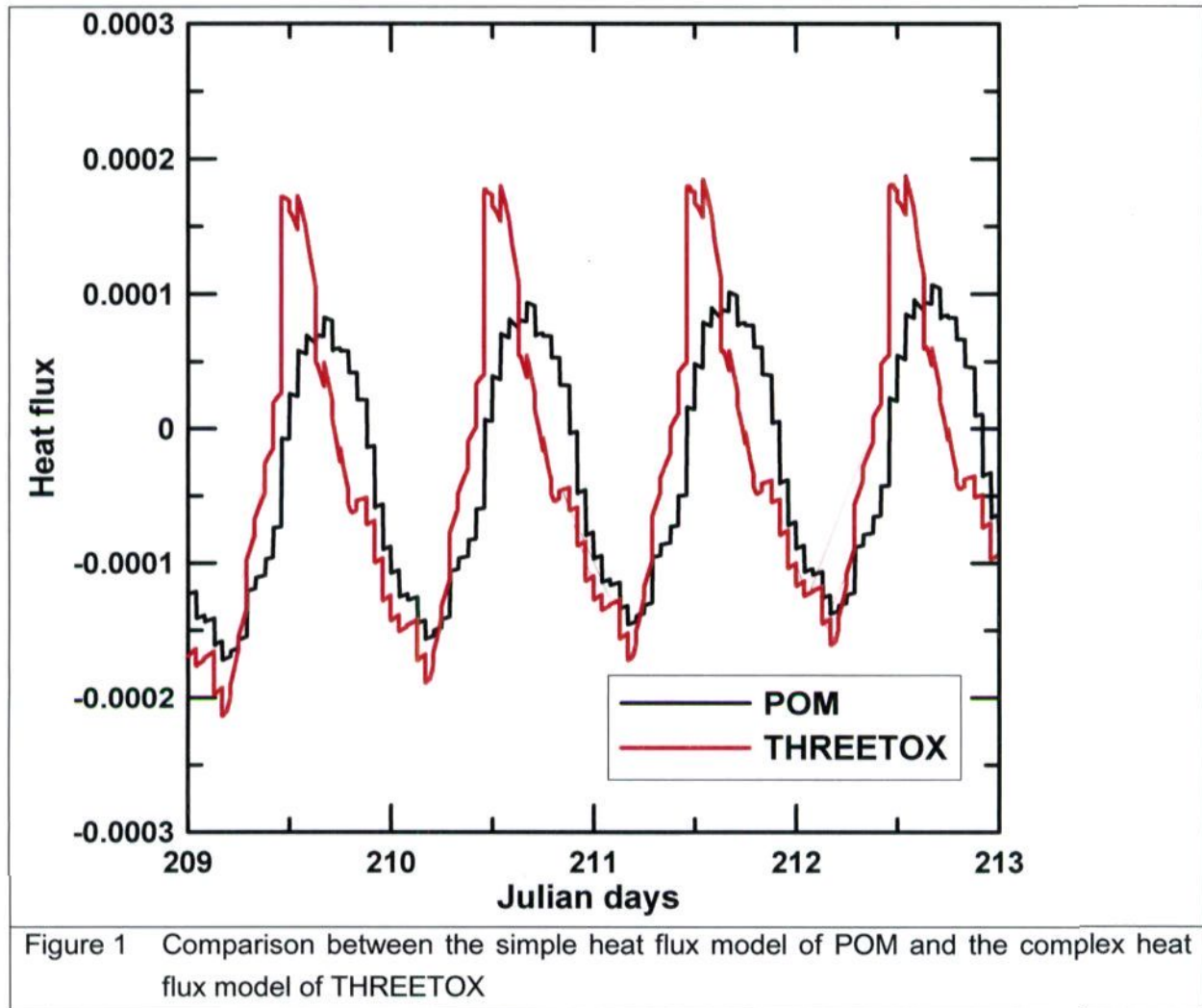
$$Q_e = \rho_a L_v \kappa u_* \frac{q_a - q_s}{\ln \left(\frac{\kappa u_* z_a}{\chi_a} + \frac{z_a}{z_0} \right) - \psi_h}$$

q_a, q_s - specific humidity on the height z_a and near surface, χ_a - air molecular diffusivity, L_v - evaporation heat, ψ_h, ψ_m - non-dimensional functions of Richardson number and $\ln \frac{z_a}{z_0}$.

Opmerking: de bovenstaande vergelijkingen zijn volledig gebaseerd op meetwaarde parameterwaarden, en waar dit niet het geval is, is gebruik gemaakt van algemeen erkende relaties om deze af te schatten. Zo is bijvoorbeeld voor de adsorptie diepte (secchi diepte) een waarde gekozen die standaard is voor open oceanen.

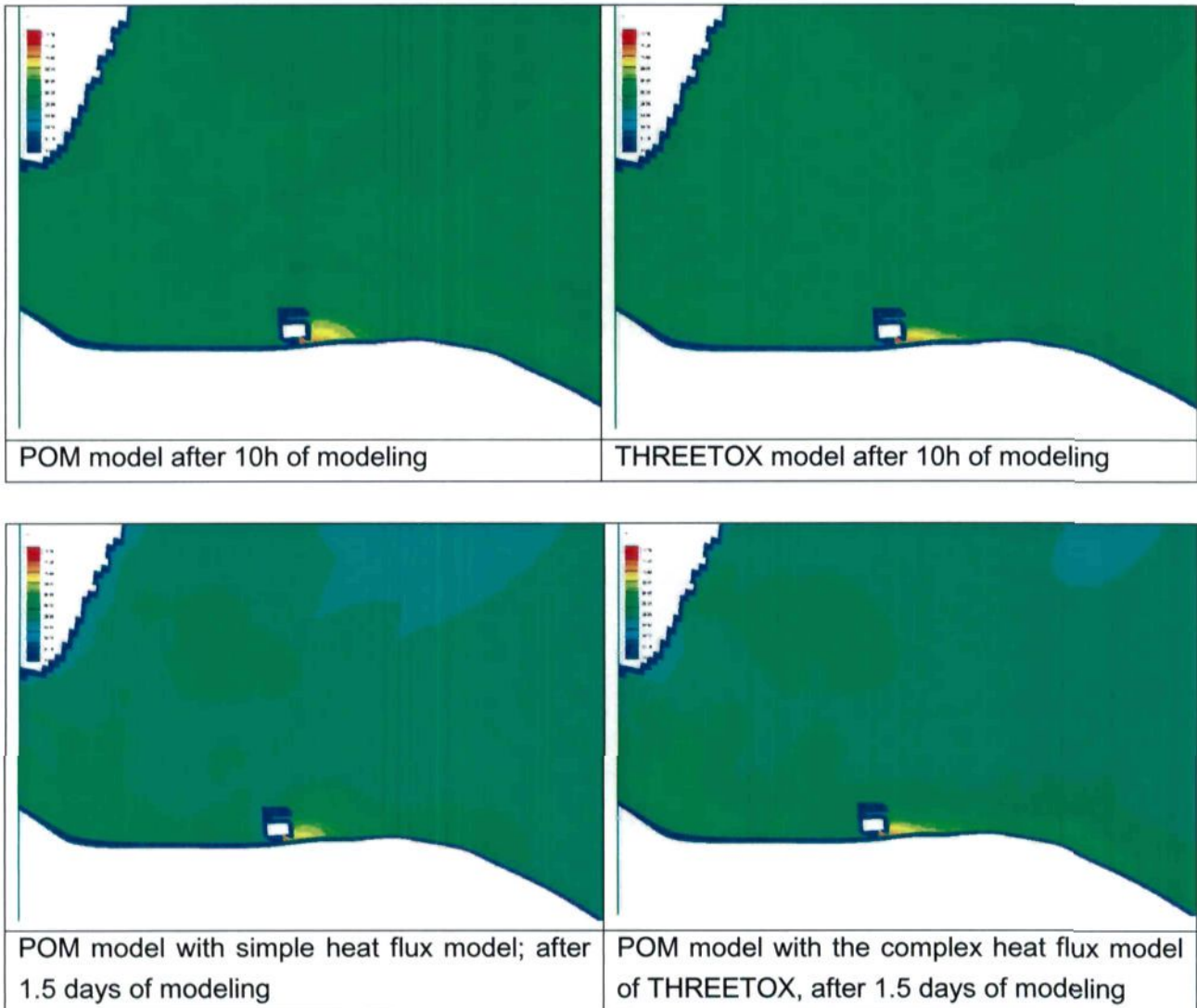
We compared total heat fluxes on the first four spin-up days of modeling.

On the next figure one can see the total heat flux comparison calculated by both heat flux models. In this figures "POM" indicates the use of the above described heat flux model. The THREETOX model has a more detailed description of the heat transfer, which is not given here. This complex model has been added to the current POM release, and model results of both heat flux models are compared with the original POM including the original simple heat flux model. The result is presented in this figure. THREETOX in the legend stands for results of POM with the complex heat flux model of THREETOX.



The difference in daytime maximum and phase difference are mainly because of sun radiation.

On the next pictures comparison between surface water temperatures is shown:



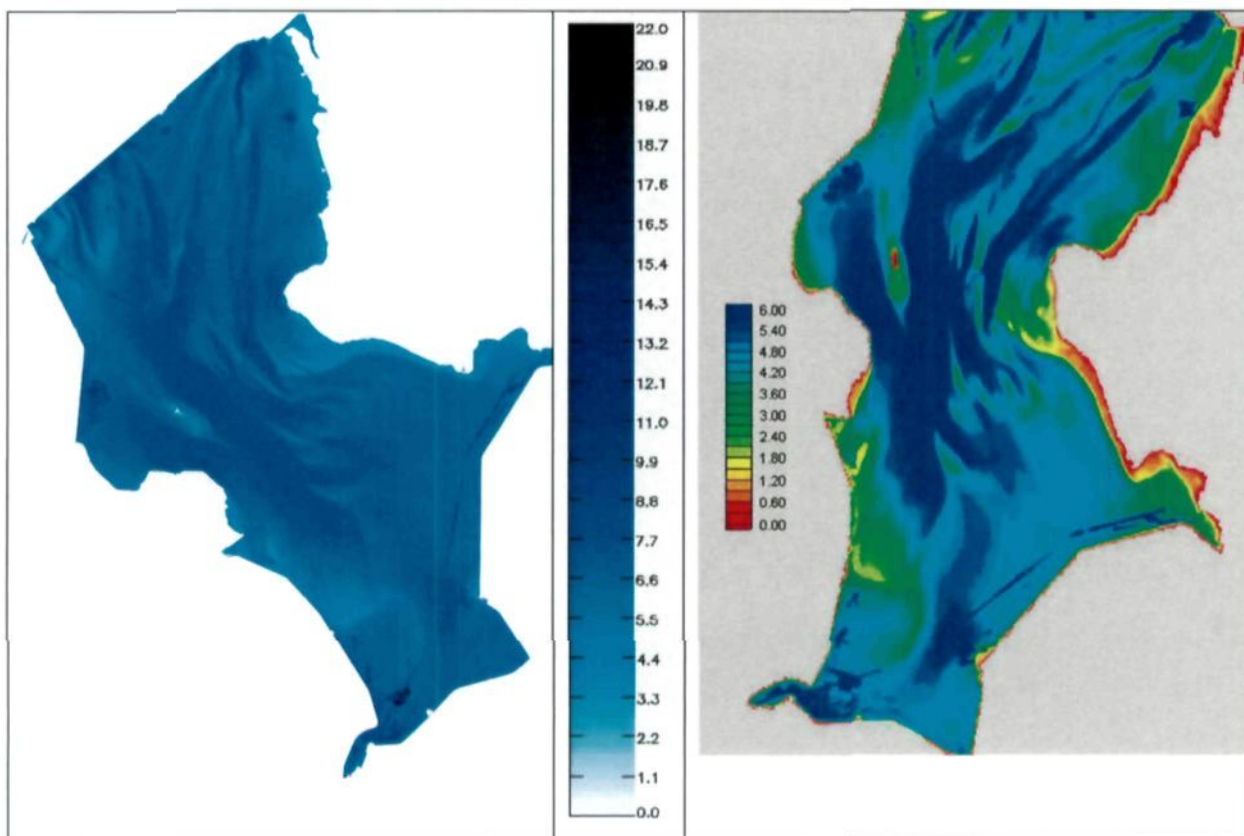
So, the conclusions are:

- 1 the simple heat flux model (as used in POM) is able to reproduce the results of more complex heat models and reproduces the results of field measurements rather well. The POM heat flux model has been used to calibrate and to reproduce the lake water temperatures on the basis of measurements
- 2 evaporation obviously doesn't play a significant role regarding the similarity of both model results. The reason is that in August the winds were not strong in such extent that evaporation is a significant process.

2 Roosterkeuze en bathymetrie

In de studie is gebruik gemaakt van een kromlijinig grid in de plaats van een rechthoekig grid en de bathymetrie is opgebouwd op de 10 x 10 lodingen van Rijkswaterstaat. De grid-grootte van 80 m x 80 m rondom de centrale en grover op grote afstand van de centrale. De reden is dat op grotere afstand van de centrale geen grote gradiënten in de temperatuur te verwachten zijn. De 80 m x 80 m grid rondom wordt geacht voldoende te zijn voor een adequate modellering van situatie. Van een kleinere grid wordt geen grotere detaillering in de warmteverspreiding verwacht ten opzichte van de huidige grid. Wanneer de scheidingsdam preciezer wordt ingebouwd in het model kan dit andere patronen in de in- en uitlaatzone geven. De vraag is of dergelijke preciezere modellering met een hogere ook tot nieuwe inzichten leidt. Er worden geen grotere horizontale gradiënten verwacht, zodanig dat er ook geen andere resultaten worden verwacht als de gridresolutie wordt verkleind. Verder wordt aangenomen dat er in de omgeving horizontale menging over de 80 m x 80 m plaatsvindt maar niet over de diepte. Dit is gezien het feit dat de pluim wordt gevolgd over afstand in orde van grootte van een factor tien van de breedte van het eiland een aanmerkelijke keuze.

Keuze van 10 sigma lagen in de verticale richting is afdoende voor het onderhavige probleem, laagdikte van sigma-lagen vlak bij het oppervlak is relatief kleiner in verband met fluxen voor warmte en impuls (wind) en de te verwachten verticale gradiënt. De sigma lagen worden kleiner naarmate de diepte van het meer kleiner wordt.



Figuur 1 Dieptekaart van het IJsselmeer. De afbeelding links is het originele raster met een resolutie van 10 x 10 m en rechts het kromlijnige raster met 500 x 300 rasterpunten. De dieptekaart rechts is geroteerd vanwege de modelschematisatie

3 Definitie van lozing en uitlaat en optreden van kortsluitstromingen

Uit het bovenstaande 'de gridkeuze' blijkt dat een keuze van een fijner grid dus niet noodzakelijkerwijs tot een ander recirculatiepatroon leidt en bovendien moet worden opgemerkt, dat de recirculatie slechts sporadisch en kortstondig optreedt en het effect kleiner is dan 1 °C dat rendementtechnisch niet belangrijk is. Meer inspanning zal geen significant andere resultaten opleveren voor de verhoging van de inlaat- en dus de uitlaattemperatuur. Verder worden in- en uitlaat gescheiden door een dam welke in het model is vereenvoudigd tot een dam haaks op de dijk (brug). Voor een verre veld studie is deze keuze gerechtvaardigd, voor een nearfield studie is een hogere resolute niet noodzakelijkerwijs beter, tenzij er interesse is in de nabij de uitlaatpijpen aanwezige turbulente stromingspatronen. Dit is echter niet het doel van de studie.

4 Windaandrijving

Er is gewerkt met een relatief lage frictie aan het wateroppervlak en een hogere frictie aan de bodem is conservatief geweest en leidt tot een lichte onderschatting van de stroomsnelheid en een overschatting van de temperatuurverhoging. Dit wordt voor de studie als acceptabele en veilige bovengrens geacht. Er zijn geen meetseries aanwezig met betrekking tot windpatronen op het IJsselmeer, en er kon derhalve geen verificatie van de windvelden plaatsvinden. Verder werd er in het model gekozen voor de windgegevens van het station Lelystad, en deze werden toegepast voor het hele meer, dit werd gezien de relatief korte afstand van het meer een redelijke aanname geacht.

5 Thermische forcering

In de paragraaf betreffende de warmteflux modellering wordt gewag gemaakt van de gebruikte warmteoverdrachtsvergelijkingen.

Er is gebruikt gemaakt van het q^2l turbulentie - model, dat in POM aanwezig is, dat het risico met zich mee zou kunnen brengen, dat er een te grote gelaagdheid ontstaat door onderdrukking van de verticale menging. Dit is mogelijk, en een test met THREEETOX, dat een $k-\varepsilon$ model bevat, zou deze berekening ook kunnen worden herhaald om te zien of deze daadwerkelijk andere resultaten geeft. Uit eerdere ervaring met het $k-\varepsilon$ model in THREEETOX blijkt dat dit warmtemodel juist een te sterke verticale menging oplevert. Dus het gebruik van het q^2l turbulentie-model leidt wellicht tot een grotere gelaagdheid, maar geeft dus hogere temperaturen op het oppervlak dan in het geval van het $k-\varepsilon$ model. Dit leidt tot overschatting van de maximale temperaturen aan het oppervlak, hetgeen in een studie als deze acceptabel is. Wel kan hierdoor de bodemtemperatuur lichtelijk worden onderschat, een CIW criterium in deze studie.

In de beschrijving van het eenvoudige warmteflux model (zie sectie 1, warmteflux-modellering) en de vergelijking met het complexere warmteflux model blijkt dat er een minimaal verschil in de watertemperaturen optreedt. Het eenvoudige warmteflux model is gebruikt om de IJsselmeertemperaturen te kalibreren (zie ook sectie 8, verificatie). De test met het gebruik van het complexere model in POM werd zonder kalibratie uitgevoerd, en gaf vrijwel dezelfde resultaten. Waaruit kan worden geconcludeerd dat het eenvoudige warmteflux model afdoende is om de watertemperaturen te beschrijven. Bij de vergelijking tussen de twee warmtemodellen heeft een standaardkeuze voor adsorptiediepte niet tot afwijkingen geleid, waaruit kan worden afgeleid dat een verdere studie naar de gevolgen van

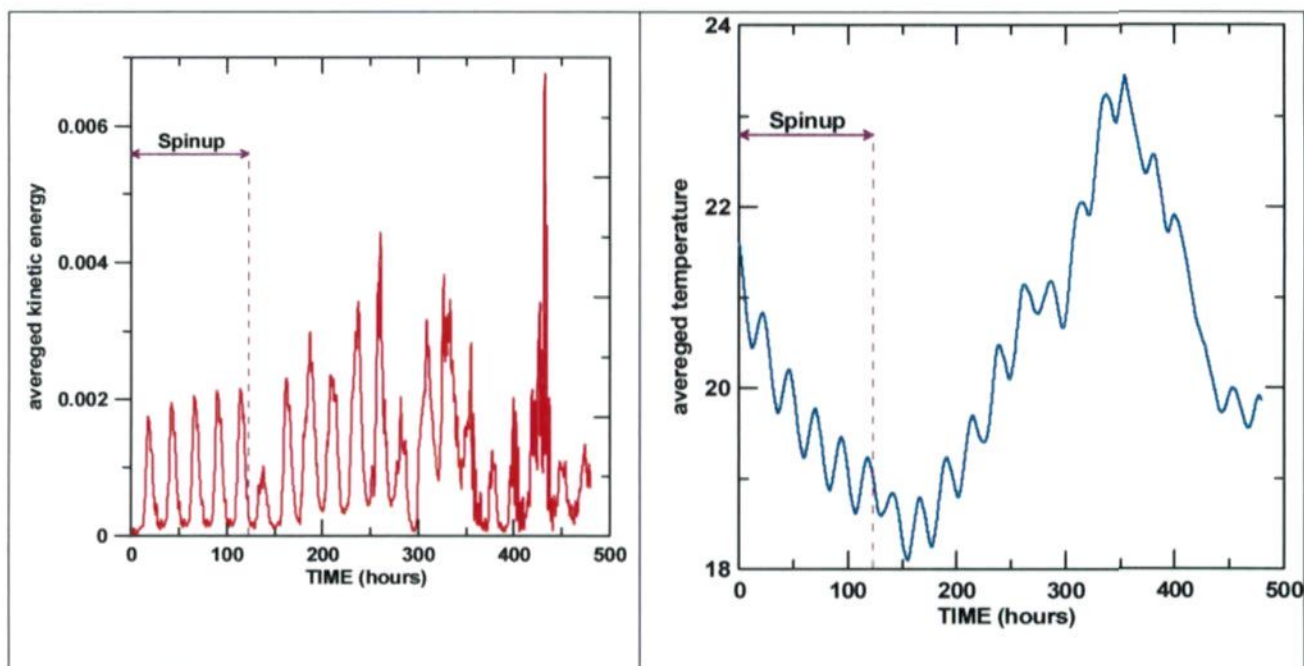
turbiditeit op de adsorptiediepte (seicchi diepte) geen verdere verhoging van de modelkwaliteit oplevert. Het eenvoudige warmtemodel dat in POM is toegepast, negeert verdamping. Deze kan over het algemeen een rol spelen, bij deze lage windsnelheden zoals in beide scenario's voorkomen, heeft verdamping een minimaal effect.

6 Overige randvoorwaarden voor warmte- en volumefluxen

Aan de modelranden moet de temperatuur worden bepaald als model invoer. Bij IJsselinstroming, en in het Ketelmeer worden met lage frequentie door Rijkswaterstaat de watertemperaturen gemeten. De IJssel-temperatuur als zodanig is niet bruikbaar vanwege de lage frequentie, en vanwege de afkoeling in de daaropvolgende afkoeling het Ketelmeer - de gemeten temperaturen waren daar lager dan in de IJssel. De Ketelmeer-temperaturen waren niet afwijkend van de IJsselmeer-temperaturen waaruit kan worden geconcludeerd, dat die temperaturen worden bepaald door de zonne-instraling. Dit houdt in dat er geen warmteflux vanuit het Ketelmeer te verwachten is. Daarom werd de gemiddelde temperatuur die POM berekent ook aan de rand opgelegd, zodat het enige effect van de Ketelmeer-instroom een hydrodynamische, en geen thermische is.

7 Spin-up tijden

Een spin-up tijd van vijf dagen is voldoende om het model in evenwicht te brengen. De grafische presentaties laten zien dat de spin-up tijd van vijf dagen voldoende is.

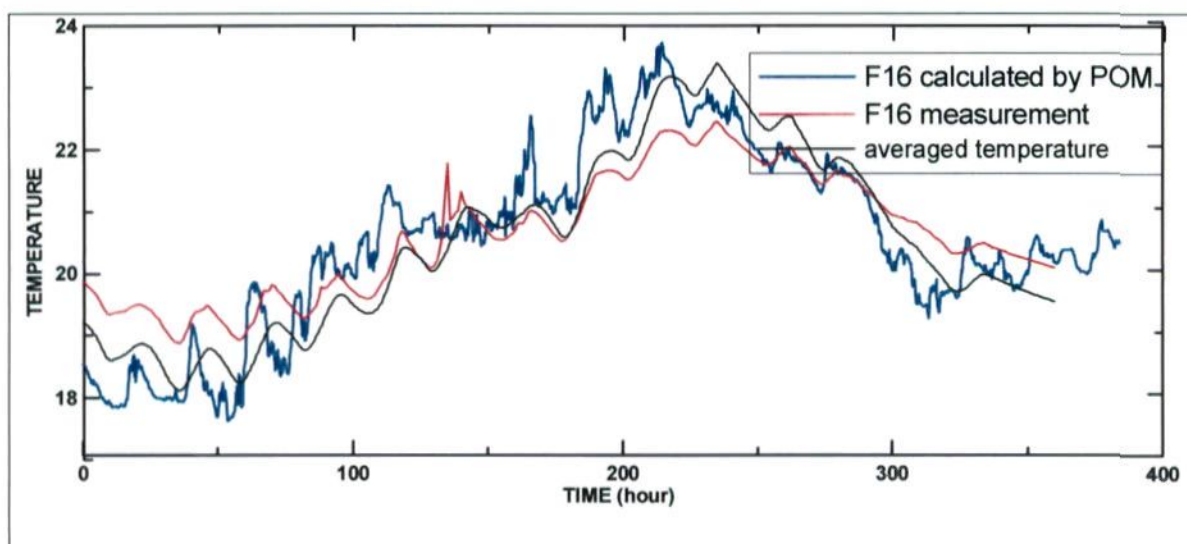


Figuur 2 Spin-up van de model run. Links: het verloop van de kinetische energie; rechts: het verloop van de temperatuur

8 Verificatie en kalibratie

Verificatie van modelresultaten aan de hand van metingen is natuurlijk altijd een belangrijke zaak. In wezen zou het model aan de hand van jaarseries worden getest, maar in dit project is een dergelijke intensieve test niet gepland noch voorzien. Er is een poging gedaan met behulp van metingen van RWS het model te testen. Het model is gekalibreerd aan de hand van temperatuurmetingen van RWS in de augustusmaanden van 2003 en 2004 door middel van kalibratie van het heatflux model. De temperatuur zoals gemeten is in de buurt van Enkhuizen in augustus 2004 werd als initialisatie temperatuur voor het hele meer gebruikt (meetpunt FL 26) gedurende een run van vijf dagen; vervolgens werd het model voor de augustusperiode gedraaid, en de modelvoorspelling bij Kornwerderzand vergeleken met de daadwerkelijke meetwaarde op die locatie voor augustus 2004 (FL16, zie figuur 3). Tevens werd aangegeven wat de gemiddelde door POM berekende meertemperatuur was (zie figuur 3). Bij een dergelijke vergelijking moet natuurlijk worden opgemerkt, dat het hier om een trend gaat, de gridgrootte op de locatie Kornwerderzand is aan de modelrand en heeft daar een gridcelgrootte van 300 x 300 meter, terwijl de meting een puntlocatie is. Verder is er met deze vergelijking in ieder geval een poging gedaan een indruk te geven van model-uitvoer in vergelijking met de werkelijke temperaturen op een beperkt aantal locaties.

Uiteraard zou nader onderzoek en meer meetgegevens tot een betere kalibratie hebben geleid of kunnen leiden.



Figuur 3 Vergelijking van de berekende gemiddelde temperatuur van het meer met de meting op locatie FL16 (Kornwerderzand) en de temperatuur die door het POM-model in kaart is gebracht op de locatie FL16. Augustus 2004

Opgemerkt moet worden dat de bovenstaande grafiek ook in het rapport vermeld is, maar met een foutief en niet compleet onderschrift. De benaming in de oorspronkelijke grafiek van FL16 moet Kornwerderzand zijn, niet Den Oever zoals in het hoofdrapport het geval was. Ook was het jaartal niet aangegeven.

9 Aanvulling op de conclusies van de studie

Naast de eerder genoemde conclusies (zie hoofdrapport, en dit addendum) kan hier opnieuw worden opgemerkt dat indien grote windsnelheden in het model waren gebruikt de stratificatie zou zijn verstoord. Dat zou dan leiden tot een verticale menging over de gehele diepte van het meer, hetgeen opwarming van de bodem zou kunnen betekenen, hetgeen onwenselijk is. Echter door de toplaag te mengen over de gehele diepte leidt dit tot een dieptegemiddelde temperatuur die lager ligt dan de gemiddelde temperatuur van alle lagen die nu zijn gemodelleerd, om de simpele reden dat bij grote windsnelheden de pluim verder wordt ver-

spreid en er meer verdamping dus afkoeling plaatsvindt. Dan wordt de 30 °C grens over meer dan 25% zeker niet overschreden, hetgeen nu alleen het geval is binnen de bedrijfs-grenzen, en dat voor een korte tijd. Op het meer zal ook niet de 3 °C verhoging aan de bodem plaatsvinden wanneer er met grotere windsnelheden wordt gerekend.

Verder kan er in bepaalde gevallen een grotere kortsluitstroom ontstaan dan in de modellering te zien was. Er is in de modellering voor twee specifieke situaties gekozen. Doorrekenen van een groot aantal verschillende windsequenties met bijbehorende frequentieverdeling zou tot een afgewogen oordeel kunnen leiden wat betreft de kans op een kortsluitstroom (recirculatie); dit gaat echter buiten het kader van deze studie. Bovendien zou de recirculatie kunnen optreden, maar de warmte is dan door de grotere windsnelheden sterk verdund tegen de tijd dat de inlaat wordt bereikt. Verder blijkt dat de recirculatie vooral optreedt als er meer water wordt gebruikt voor de koeling, hetgeen sowieso tot lagere DT's over de condensors leidt.

Omdat de meteorologie de belangrijkste reden van toekomstige opwarming is, meer nog dan een verhoogde of verlaagde wateraanvoer, zal het variëren van de luchttemperaturen kunnen leiden tot een beter beeld van de toekomstige situatie. Dergelijke studie zal kunnen worden uitgevoerd, desnoods met toevoeging van verlaagde debieten, en dus langere hydrologische verblijftijden in het IJsselmeer, maar zal zeer waarschijnlijk niet tot andere conclusies leiden.

Arnhem, 18 januari 2006.