

Modellering van koelwaterlozingen en watertemperatuur met TRIWAQ

**Welke aanpassingen in TRIWAQ zijn nodig?
29 juli 2005
RIKZ/KW/2005.117W**

Modellering van koelwaterlozingen en watertemperatuur met TRIWAQ

Welke aanpassingen in TRIWAQ zijn nodig?

27 juli 2005

R.J. Vos

Inhoudsopgave

1.	Inleiding 4
1.1	Achtergrond 4
1.2	Probleemstelling en doelstelling koelwatermodel 6
1.2.1.	Probleemstelling 6
1.2.2.	Doelstelling 7
1.3	Leeswijzer 7
1.4	Acknowledgement 7
1.5	Disclaimer 7
2.	Modellen voor koelwater en watertemperatuur in WAQUA/TRIWAQ 8
2.1	Inleiding 8
2.2	Transportmodellering van temperatuur met TRIWAQ 10
2.2.1.	Midfield modellering 10
2.2.2.	Aansturing vanuit een near-field model 12
2.3	Heat-exchange module 13
2.4	Heat-balance module 15
2.4.1.	Inleiding 15
2.4.2.	Warmte-instraling van zon 16
2.4.3.	Warmte-instraling van atmosfeer 17
2.4.4.	Warmteverlies door verdamping 19
2.4.5.	Warmteverlies door convectie 21
2.4.6.	Warmteverlies door temperatuurstraling van het wateroppervlak 22
3.	Gewenste aanpassingen in TRIWAQ 26
3.1	Inleiding 26
3.2	Overzicht huidige programmastructuur 26
3.2.1.	Koproutines en rekenroutines 26
3.2.2.	Functie WASHTU uit WAQUA voor warmteverlies 27
3.2.3.	Functie TRSHEA uit TRIWAQ/TEM voor warmteverlies 29
3.3	Gewenste aanpassingen in programmastructuur 31
3.3.1.	Aanpassingen voor WASHTU in TRIWAQ 31
3.3.2.	Opname van TRSHEA uit TRIWAQ/TEM in moederversie 32
3.4	Gewenste aanpassingen in preprocessor en invoerfile 33
4.	Conclusies en aanbevelingen 34
4.1	Conclusies 34
4.2	Aanbevelingen 35
	Referenties 37
A.1	Voorbeeld van invoerbestand en resultaat van een warmtelozing met TRIWAQ (zonder koeling aan wateroppervlak) op de Westerschelde 39

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

De waterbeheerder staat momenteel gesteld voor vragen omtrent koelwaterlozingen en omtrent het beheer van slecht gemengde watersystemen. In het algemeen speelt bij deze stratificatie het zout de voornaamste rol maar voor een gebied als b.v. de Noordzee of het Veerse meer is ook temperatuur van belang.

De vragen vanuit de koelwaterlozingen betreffen:

- Het waterbeheer zelf;
- Een nieuwe vergunningverlening op basis van een nieuw te implementeren beoordelingssystematiek voor warmtelozingen (CIW, 2004).

Onder de eerste categorie vallen de volgende items:

- Bepalen van optimale verdeling van koelwatergebruik. Waar kan ik het beste als eerste de lozing reduceren in periode van droogte?
- Vroegtijdig waarschuwen bij op handen zijnde problemen.
- Inschatten van de effectiviteit van mogelijke maatregelen.

Onder de tweede categorie vallen de volgende items:

- Handvaten bij de beoordeling van vergunningen.
- Kwaliteitscontrole van door lozers uitgevoerde lokale berekeningen.
- Vaststellen van de achtergrondtemperatuur en de locatie van de doorsnede waar de mengzone wordt berekend.

In de nieuwe systematiek voor vergunningverlening van CIW staat het ontvangende watersysteem centraal. Waar in het verleden de temperatuur van de lozing sterk bepalend was wordt nu meer gekeken naar de warmte (de vergunning wordt gerelateerd aan het vermogen in MW en het lozingsdebiet in m^3/s). Hierdoor komen de grote koelwaterlozers die gebruik maken van koeling met doorstroomwater meer onder druk te staan. Daarentegen krijgen de kleine lozers die direct hun proceswater afgeven meer speelruimte.

Met behulp van modellen wordt inzicht verschaft in de werking van het watersysteem en de effecten van warmtelozingen hierop. In de nieuwe systematiek zal de aanvrager van een vergunning zelf opdracht geven tot modellering en hierover rapporteren aan de waterbeheerder die de vergunning afgeeft. Zowel bij opzet van de modelberekening, bij keuze van een aantal aan de vergunning gerelateerde parameters (achtergrondtemperatuur en mengzone) als bij kwaliteitscontrole op de modelresultaten dient daarbij consensus bereikt te worden tussen

vergunningverlener en aanvrager. De vergunningverlener bij de regionale directie Noord-Holland heeft recent aangegeven dat hiervoor schaduw gedraaid moet worden met modellen van een voldoende kwaliteit om de aanvrager te woord te kunnen staan.

In het Noordzeekanaal en de Buitenhaven bij IJmuiden is sprake van sterke gelaagdheid van het watersysteem. Daarom moet hier gebruik gemaakt worden van *volledige 3-d hydrodynamische modellen*. De 3-d modellen hebben een sterke voorspelkracht mits ze goed zijn gecalibreerd en er betrouwbare randvoorwaarden en meteo-gegevens (wind etc.) beschikbaar zijn.

De 1-d modellen zijn voor gelaagde systemen niet geschikt en zullen een sterke onderschatting geven van de temperatuur boven in de waterkolom (en een overschatting van de temperatuur onder in de waterkolom). Hetzelfde geldt ook voor de zeer eenvoudig spread-sheet berekeningen van het 'Rekenmodel Koelwater nieuwe systematiek' (25-11-2004). Ten onrechte wordt soms opgemerkt dat deze modellen een worst case scenario beschrijven. Het is echter een 'best case' met betrekking tot de temperatuur in de bovenste waterlaag.¹

Maar ook de in Nederland bekende *quasi 3-d* modellen (TRIWAQ, Delft3D, Thretox, Mike3, Coherens,...) zijn ook niet volledig aangezien ze het near-field niet goed beschrijven. Hierop wordt kort nader in het volgende hoofdstuk ingegaan. Van TRIWAQ is recentelijk een speciale projectversie (M. Zijlema, project SBW, 2005) gereed gekomen die het near-field gedeeltelijk kan beschrijven maar ook dit model is nog niet *volledig*.

Voor de 3-d modellering bij de regionale directie Noord Holland is het hydrodynamische model TRIWAQ uit het modellenpakket SIMONA van de Rijkswaterstaat geselecteerd. Hiervan zijn al modelschematisaties gereed en toepassingen uitgevoerd in eerdere en lopende projecten, te weten:

- Een schematisatie voor het Noordzeekanaal vanuit het project *Systeemanalyse Noordzeekanaal*. Deze applicatie wordt ook ingezet voor andere beheersvragen als waterkwaliteit, diepe putten en slibhuishouding. Het model is al ingezet voor 3d-zoutmodellering (van Reen et al., 2003) en recent ook voor bestudering van het effect van diepe putten.
- Een schematisatie voor de Buitenhaven is aanwezig in het IJmond model vanuit het project Nautilus. Deze schematisatie werd ingezet voor de scheepvaartbegeleiding

¹ Vanuit de ecologie wordt wel geredeneerd dat dit gunstig is daar de vissen dan onderlangs kunnen ontsnappen. De vraag is of dit echter zo is indien de onderlaag zout is en relatief weinig zuurstof bevat (vissen hebben nl. veelal last van het zuurstoftekort in de hete wateren a.g.v. van verminderde oplosbaarheid van zuurstof bij hoge temperatuur, indien de zoute onderlaag ook zuurstofarm is door een hoge *bodemzuurstofvraag*, dan is er echter geen ontsnapping mogelijk. Verder zijn sommige soorten niet gesteld op zout). Ook mag men er vanuit gaan dat de koelwaterlozing *permanent* is (stationair) en dat dien ten gevolge een groot gebied onleefbaar dreigt te worden.

en de hoogwatervoorspelling. Voor koelwatermodellering dient hij nog lokaal verfijnd te worden wat relatief eenvoudig kan middels *domein decompositie* met horizontale verfijning wat aanwezig is in de moederversie van TRIWAQ.

Een nadeel van de 3d-modellen is de grote hoeveelheid rekentijd die nodig is, vaak in de orde van dagen of soms zelfs weken. Met TRIWAQ is deze rekentijd sterk in te perken middels het principe van *parallel rekenen*. Hierin is TRIWAQ wat betreft efficiëntie vrijwel ongeëvenaard (Vollebregt et al., 2003). Zo is aangetoond bij een toepassing voor de Westerschelde door Vortech Computing in opdracht van WL Borgerhout te Antwerpen dat een vrijwel lineaire versnelling gehaald kan worden op een Beowulf-cluster van 20 processoren (versnellingsfactor 16 voor 20 processoren).

Problemen zijn er echter ook met TRIWAQ. Deze worden in de volgende paragraaf besproken. Dit rapport geeft vervolgens oplossingsrichtingen.

1.2 Probleemstelling en doelstelling koelwatermodel

1.2.1. Probleemstelling

Het model TRIWAQ kent wat betreft koelwatermodellering de volgende problemen:

1. Het warmteverlies aan het wateroppervlak is momenteel te berekenen in het 2-d model (WAQUA) en niet in TRIWAQ (zelfs niet voor 1 laag);
2. De documentatie is niet 'up-to-date' wat betreft de gebruikte formuleringen voor koelwatermodellering in WAQUA (Technische documentatie) als de invoerfile (User Guide);
3. Near-field modellering is niet mogelijk. Het dichtst bij dit *volledige* model is een recente TRIWAQ project versie uit het SBW project (M.Zijlema,2005).

Wat betreft temperatuurmodellering op seizoensschaal is er het volgende probleem:

4. In een speciale versie van TRIWAQ, genaamd TRIWAQ/TEM (de Goede, WL IDelft Hydraulics) is een heat-balance model aanwezig dat gevalideerd is voor temperatuurmodellering² van de Noordzee (de Goede et al., 2000, Delhez et al., 2004). Hoe werkt het en is deze bruikbaar voor de moederversie?

² Temperatuurmodellering speelt zich af op seizoensschalen (winter-zomer-winter) en heeft daarom een andere insteek dan koelwatermodellering waarbij de tijdschaal van modellering enkele dagen bedraagt. De onderliggende modellen zijn echter sterk gelijkend. In het algemeen kunnen de temperatuurmodellen ook gebruikt worden voor koelwatermodellering maar het omgekeerde geldt niet altijd.

1.2.2. Doelstelling

1. Beschrijving van de WAQUA-formuleringen voor warmteverlies ten behoeve van de Technische documentatie;
2. Aangeven hoe deze in TRIWAQ relatief eenvoudig kunnen worden geïmplementeerd;
3. Beschrijven wat er moet worden aangepast in de preprocessor en de invoerfile van WAQUA/TRIWAQ;
4. Aangeven of en hoe de tekortkomingen in het near-field zo goed mogelijk kunnen worden opgelost.
5. Aangeven hoe de warmtemodule uit de speciale TRIWAQ/TEM versie werkt en hoe deze in de TRIWAQ moederversie kan worden opgenomen.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de huidige transportmodellering van temperatuur in de moederversie van WAQUA/TRIWAQ en de warmteuitwisselingsmodules in WAQUA en in de speciale versie TRIWAQ/TEM.

Hoofdstuk 3 geeft een technische beschrijving van gewenste aanpassingen in TRIWAQ voor koelwatermodellering en temperatuurmodellering.

Hoofdstuk 4 geeft conclusies en aanbevelingen.

1.4 Acknowledgement

De auteur is Marcel Zijlema en Edwin Spee (beide werkzaam bij het RIKZ) zeer erkentelijk voor het reviewen van het document en het aanleveren van materiekennis.

1.5 Disclaimer

Dit werkdocument wordt uitgegeven om geïnteresseerden de gelegenheid te bieden kennis te nemen van de voortgang van het desbetreffend onderzoek, technisch advies of meetrapportage. Benadrukt wordt dat de gezichtspunten in dit werkdocument niet noodzakelijk overeen behoeven te komen met de officiële gezichtspunten of het beleid van de Directeur-Generaal van Rijkswaterstaat. Met de in dit werkdocument gegeven informatie dient derhalve met de nodige voorzichtigheid te worden omgegaan, aangezien de hierin vermelde conclusies in de loop van verder onderzoek of anderszins mogelijk herzien dienen te worden.

Het Rijk sluit iedere aansprakelijkheid uit voor schade die het gebruik van de in dit werkdocument opgenomen gegevens mocht voortvloeien.

2. Modellen voor koelwater en watertemperatuur in WAQUA/TRIWAQ

2.1 Inleiding

Temperatuurmodellering speelt zich af op seizoensschalen (winter-zomer-winter) en heeft daarom een andere insteek dan koelwatermodellering waarbij de tijdschaal van modellering enkele dagen bedraagt. De onderliggende modellen zijn echter sterk gelijkend. In het algemeen kunnen de temperatuurmodellen ook gebruikt worden voor koelwatermodellering maar het omgekeerde geldt niet altijd.

Het hydrodynamische model voor berekenen van watertemperaturen kent in grote lijnen de volgende componenten:

- De hydrodynamische module voor de waterbeweging;
- De transport module voor transport van temperatuur, zout en turbulentie;
- De warmte-uitwisselingsmodule wat de uitwisseling van warmte van de waterkolom met de atmosfeer beschrijft.

Deze 3 Het hydrodynamische wordt hier verder niet besproken in dit rapport.

Wat betreft het *transport* van temperatuur bij koelwatermodellering en temperatuurmodellering worden in het algemeen 3 type van modellen onderscheiden:

1. *Near-field model*: Het model kan de warmwaterpluim beschrijven vanaf het moment dat het warme water uit de diffusor komt. Hiervoor is een waterbewegingsmodel nodig met *volledig* 3-d transport van turbulente grootheden (kinetische energie 'k' en dissipatie van kinetische energie ' ϵ '), van zout 'S' en van temperatuur 'T'. Ook moet er niet-hydrostatisch gerekend kunnen worden (Zijlema, 2000; Stelling en Zijlema, 2003; Zijlema en Stelling 2005), moeten alle Reynold-stress termen worden meegenomen en moet afbraak van temperatuur aan het wateroppervlak worden meegenomen. Zowel TRIWAQ-in-SIMONA als Delft3D-FLOW voldoen niet aan al deze criteria. Een speciale projectversie van TRIWAQ die recentelijk beschikbaar is gekomen voldoet hieraan *gedeeltelijk* wel aan (Zijlema, SBW project, 2005). Daarin is echter het k- ϵ model nog niet volledig 3-d, bevat geen diffusie termen en bevat niet alle zgn. productietermen voor turbulente kinetische energie. Verder ontbreekt de functionaliteit van domein decompositie. Wel kan men parallel rekenen wat belangrijk is voor het intensieve rekenwerk met dit soort toepassingen.

-
2. *Mid-field model:* Het model kan de warm waterpluim beschrijven vanaf het moment dat het warme water op de waterkolom drijft in evenwicht met de zwaartekracht. In het algemeen is dit op 100-250 m afstand van de diffusor. Hiervoor is een 3-d waterbewegingsmodel nodig met transport van de turbulente grootheden in de verticaal in combinatie met transport van zout en van temperatuur. Er kan eventueel niet-hydrostatisch worden gerekend mits op een andere wijze de temperatuurverdeling in het near-field in het model kan worden gebracht. Wel moet afbraak van temperatuur aan het wateroppervlak worden meegenomen. TRIWAQ voldoet wel aan het transportcriterium maar heeft geen afkoeling aan het wateroppervlak. Delft3D-FLOW voldoet aan beide criteria
 3. *Far-field model:* Het model beschrijft de warm-waterpluim vanaf het moment dat de temperatuur van de pluim zelf weinig meer bijdraagt aan zijn soortelijk gewicht. Dit is op afstand van naar schatting 1 km van de bron maar voor grote lozers natuurlijk verder weg. Op die afstand hoeft slechts het transport van turbulente grootheden en zout nog te worden berekend maar niet van temperatuur. Wel moet afbraak van temperatuur aan het wateroppervlak worden meegenomen maar kan eventueel als eerste orde benadering worden verwaarloosd aangezien het temperatuurverlies aan het oppervlak op 1km afstand van de bron kleiner 10% is van de excess-temperatuur³. Zowel TRIWAQ (mits verwaarlozing afbraak) als Delft3D-FLOW zijn hiervoor inzetbaar. Ook Delft3D-WAQ gekoppeld aan een hydrodynamisch model is hiervoor bruikbaar en vanwege efficiëntie verdient dit mogelijk de voorkeur indien er veel scenario's moeten worden doorgerekend.

Wat betreft de *warmte-uitwisselingsmodule* aan het wateroppervlak zijn er 2 soorten van formuleringen gangbaar:

1. *Heat-exchange formulering:* zij beschrijven slechts de afkoeling van het water middels warmteverlies aan het oppervlak, maar verwaarlozen de opwarming door zonneinstraling en andere atmosferische straling. De benadering is gebaseerd op de veronderstelling dat het watersysteem bij nul excess-temperatuur in evenwicht is met zijn natuurlijke omgeving. De dagelijkse fluctuaties van het systeem worden verwaarloosd ten opzichte van het effect van de koelwaterlozing. *Voor grote koelwaterlozingen die plaats vinden op tijdschalen van een aantal dagen waarbij de achtergrondtemperatuur van het watersysteem niet teveel fluctueert is dit een geoorloofde benadering.* Voordeel is tevens

³ Ter vergelijking: inzet van een 3d-model geeft naar schatting een beperking van het beschikbare volume van de warmte van een factor 3, oftewel 300% verhoging van de excess temperatuur. Het verschil met de benadering van verwaarlozing van de afkoelingsterm is dan een factor 30. Wat dat betreft zijn de eenvoudige spreadsheet modellen van de CIW-beoordelingssystematiek die uitgaan van volledige menging dus onbetrouwbaar voor gelaagde systemen.

dat men niet alle meteorologische gegevens goed hoeft te kennen. Een bekend voorbeeld is het model van Sweers (1976) waarbij alleen de windsnelheid en de achtergrondtemperatuur van het water vereist zijn.

2. *Heat-balance modellen*: deze modellen beschrijven de volledige warmtebalans aan het wateroppervlak, dus inclusief de zonne-instraling en andere atmosferische straling. Zij zijn tevens geschikt voor seizoensmodellering en worden dan ook vaak ingezet voor de temperatuursmodellering van de Noordzee op jaarbasis (bv. de Goede et al., 2000, Delhez et al., 2004). Nadeel is dat men alle meteorologische gegevens goed moet kennen. Met name bij gebrek aan data van de bewolgingsgraad kan dit tot onnauwkeurigheden op seizoensschaal leiden (Vos et al., 1999).

De problematiek van het ontbreken van het near-field model voor koelwatermodellering wordt verder toegelicht in sectie 2.2. Tevens wordt daar het midfield model in TRIWAQ nader toegelicht.

WAQUA bevat 1 type heat-exchange model (Sweers, 1976) en 1 type heat-balance model (WL Delft, 1996; Ludikhuizen 1996) en heeft daarmee voldoende mogelijkheden voor koelwatermodellering. Deze zitten echter beide niet in TRIWAQ. Verder is er een speciale TRIWAQ/TEM versie met een afwijkend heat-balance model (Lane, 1991) wat ook in de moederversie kan worden opgenomen. Wel zijn er enige beperkingen met betrekking tot temperatuurmodellering. Op de Noordzee en op grotere tijdschalen dienen meteo-parameters te variëren in ruimte en tijd en dit is met WAQUA momenteel niet mogelijk en ook de speciale versie TRIWAQ/TEM versie kent hier beperkingen.

In sectie 2.3 wordt het heat-exchange model beschreven en in sectie en 2.4 worden de heat-balance modellen worden beschreven. Deze 2 modellen kunnen relatief eenvoudig in TRIWAQ worden geïmplementeerd.

2.2 Transportmodellering van temperatuur met TRIWAQ

2.2.1. Midfield modellering

Nader onderzoek heeft geleerd dat TRIWAQ de koelwatermodellering in de midfield-range kan modelleren. Hiervoor zijn nodig:

1. Transport van zout gekoppeld aan de dichtheid van water;
2. Transport van temperatuur gekoppeld aan de dichtheid van water;
3. Transport van turbulente kinetische energie en zijn dissipatie in de verticaal middels een $k-\epsilon$ turbulentiemodel. Gradiënten in dichtheid van water hebben hier een belangrijke en zelfs bepalende invloed.

In TRIWAQ zijn al deze aspecten aanwezig, ook al is de huidige technische (SIMONA report 99-01, version 2.2 November 2001) en gebruikersdocumentatie met betrekking tot het transport van temperatuur hierover niet duidelijk.

Hieronder volgt een korte beschrijving van de invoer. In de invoer dient men 2 stoffen te definiëren die zout en temperatuur voorstellen:

```
TRANSPORT
PROBLEM
CONSTITUENTS
CO 1:
  POLUTANT = 'SALINITY'
  PUNIT    = ' kg/m**3      '
CO 2:
  POLUTANT = 'TEMPERAT'
  PUNIT    = ' degCel  '
SALINITY
CO 1
TEMPERATURE
DELTAT =0.5
TEMPMODEL = 3
CLOUDFRACT = 0.
AREAWATER =1.0
ABSORPTION =0.
PRESSURE =0.
MASSTRANSFER =0.
CO 2
```

De koppeling met dichtheid wordt bewerkstelligd middels de statements:

```
SALINITY
CO 1
TEMPERATURE
CO 2
```

Onder 'TEMPERATURE' staan nog zeven keywords die invoer zijn voor de routine WASHTU welke het warmtemodel bevat. De keywords zijn wel vereist (*Mandatory*)⁴ in de invoer maar hebben geen effect aangezien TRIWAQ niet gekoppeld is aan het warmtemodel (ze genereren slechts een WARNING in de message-file van WAQPRE).

Voor het aanzetten van het heat-exchange model volgens Sweers (1976) zijn nog 5 extra keywords nodig onder FORCINGS, INITIAL:

```
FORCINGS
INITIAL
  FLUXRAD = 0.0
  DRYBULB = 20.0
  RELHUMID = 0.8
  TMEASURING = 15.0
```

⁴ Deze informatie is terug te vinden in de zgn. referentietabel genaamd 'waquaref.tab' die staat in de subdirectory /special/tabels van SIMONA.

$$QSC = 750.0$$

Zie verder Tabel 1 (Hfd 3) voor de verklaring van de keywords. Alle keywords zijn Mandatory maar het model zelf is Optional. Gebleken is dat alle parameters slechts als *constants* kunnen worden meegegeven (dus geen tijdseries).

Merk verder op dat in het geval van koppeling de temperatuur verder niet meer als constant mag worden beschouwd (er is onder een commentaarteken '#' voor gezet) bij het berekenen van de dichtheid:

DENSITIES		
CEQSTT	=	0.6980
# TEMPWATER	=	10.0000
RHOREF	=	1.0000

Indien de koppeling van temperatuur met dichtheid zou worden uitgezet moet de # voor 'TEMPWATER' worden verwijderd en moet een gemiddelde temperatuur worden opgegeven. Zie verder Bijlage 1 met een voorbeeld-invoerfile en enige kleurenfiguren voor een warmtelozing op de Westerschelde.

2.2.2. Aansturing vanuit een near-field model

Ook indien de vergunningverlener niet geïnteresseerd is in het near-field (<100 a 250 m van de warmtebron) dient de modelleur toch rekening te houden met de invloeden van het near-field op de berekening. Zo kan men verwachten dat er een verschil is in resultaat indien de lozing onder de spronglaag (zoet-zout overgang) plaatsvindt, dan wel boven de spronglaag. In het eerste geval zal het water naar boven schieten aangezien het door zijn warmte lichter is dan het omgevingswater. Tijdens dat proces wordt veel omgevingswater aangezogen door onderdruk in de verticale pluim (entrainment) en dit leidt tot effectieve afkoeling van de bron. Ook in het midfield kan dit zijn uitstraling hebben ook al is niet exact te zeggen hoeveel dit precies is.

Het belangrijkste fundamentele gebrek aan TRIWAQ voor modellering van dit effect is de *hydrostatische druk* benadering. Hierbij wordt de zogeheten verticale versnelling van het water op een waterelement verwaarloosd. De verticale druk op dit element wordt bepaald middels de druk van de daarboven aanwezige waterkolom (zgn. hydrostatische druk). Dit leidt tot te snelle opstijging van de warm waterpluim daar deze niet door de verticale versnellingsterm kan worden afgeremd. Gevolg is een foutief startpunt van de midfieldberekening, al is de grootte van de fout bij een continue lozing niet goed bekend.

Dergelijke fouten vinden ook plaats bij stroming van zout van ondiepe platen in diepe geulen of putten. Daarom is destijds in het project 'De Kier' voor de gedeeltelijke opening van de Haringvlietsluizen door M. Zijlema (20002) een *niet-hydrostatische druksolver ontwikkeld*. Deze is in 2005 ingebouwd in een recente TRIWAQ versie uit het droogvalproject (versie fase 3 droogvalproject) in kader van het project

SBW (de SBW project versie is genaamd NONHYD-01). Deze geeft een veel rustiger gedrag voor het opstijgen van een relatief licht waterelement. Nadeel is momenteel dat:

1. Deze solver niet aanwezig is in de moederversie van TRIWAQ. Opname kost enige tientallen Keuro's en is niet binnen korte tijd realiseerbaar;
2. De solver is in een projectversie zonder domeindecompositie. Hiernaar is nog een onderzoek nodig.
3. Het $k-\varepsilon$ model niet volledig 3-d is, geen diffusie termen bevat en niet alle productietermen bevat.
4. Niet duidelijk is of speciale effecten zoals het Coanda-effect (kleven van opstijgende pluim tegen de kade door onderdruk) wel goed gemodelleerd kunnen worden.

Vanwege deze bezwaren tegen de niet-hydrostatische druksolver in genoemde TRIWAQ-projectversie dient momenteel naar andere oplossingen te worden gezocht. Een mogelijk goede oplossing is TRIWAQ op te starten middels een initiële verdeling van de warm waterpluim rondom de puntbron:

- Deze initiële verdeling dient men te verkrijgen met het ruimtelijk discretiseren van de lozing na de initiële opmengtijd (ongeveer 1 uur). De initiële verdeling moet worden verkregen middels een ander near-field model (bv CORMIX van de EPA of JET-3D van WLDelft Hydraulics) of uit een afschattingsformule ('back-of-the-envelope').
- De puntbron dient niet te liggen op de werkelijke diepte maar op een *virtuele* diepte na 1 uur van menging, dat wil zeggen in het hart (x,y,z) van de opgegeven ruimtelijke verdeling of een aantal puntbronnen met gezamenlijk het juiste vermogen en debiet langs een verticale lijn in het hart (x,y).
- Men kan ook een initiële verdeling ontwerpen op basis van metingen. Voor het Noordzeekanaal zijn in opdracht van RIZA Lelystad in 2004 uitgebreide temperatuursmetingen in het near-field gedaan voor de grootste energiecentrales.

2.3 Heat-exchange module

De heat-exchange module in WAQUA is volgens Sweers (1976).

Dit model heeft de volgende kenmerken:

- Gaat uit van de excess-temperatuur ten opzichte van een niet variërende natuurlijke achtergrond. Dus verwaarloosd alle instralingstermen.
- Relateert middels een evenwichtsdampspanning van water het warmteverlies door verdamping aan de watertemperatuur. Bij neerslag is dit model waarschijnlijk niet betrouwbaar.
- Relateert convectie aan de excess-temperatuur middels een vaste verhouding met verschil in dampspanning bij beide temperaturen (Bowen ratio $\gamma=0.65 \text{ mbar K}^{-1}$).

- Hangt slechts af van wind en watertemperatuur. De windafhankelijkheid is anders voor windmetingen boven water en land en hangt af van de hoogte van de windmeting.

Het warmteverlies per oppervlakte-eenheid is gegeven door:

$$\Delta H = -A(T_s - T_e)$$

$$A = (4.48 + 0.049T_s) + f(W)(1.12 + 0.0180T_s + 0.00158T_s^2)$$

$$f(W) = \left(\frac{5.0 * 10^6}{S} \right)^{0.05} (a + bW)$$

met:

ΔH = warmteverandering van het watersysteem in $W m^{-2}$;

A = heat-exchange coefficient in $W m^{-2} \text{ } ^\circ C$;

T_s = watertemperatuur in $^\circ C$;

T_e = watertemperatuur voor natuurlijk evenwicht in $^\circ C$;

W = windsnelheid in $m s^{-1}$;

S = oppervlak van het watersysteem in m^2 ;

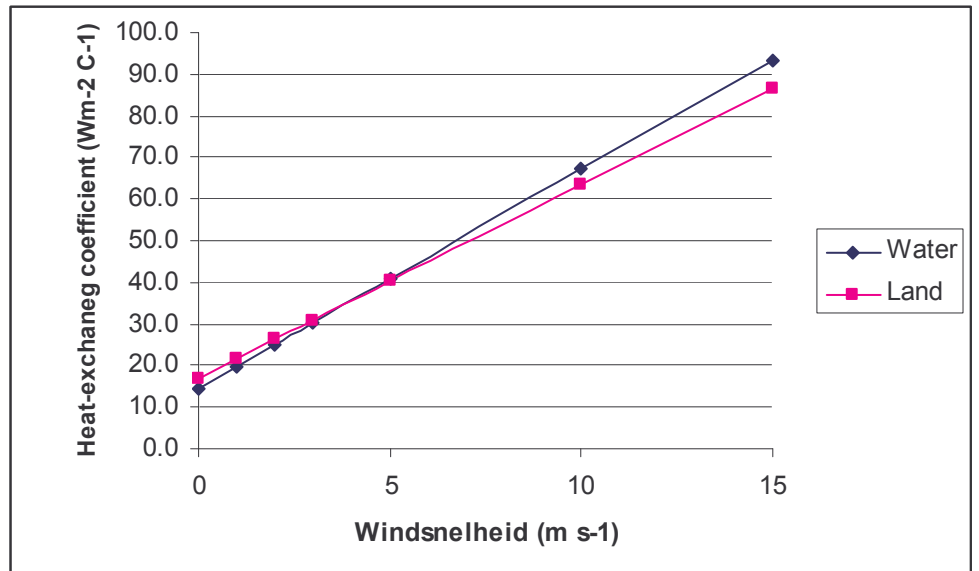
a, b = fitconstanten afhankelijk van de locatie (water of land, hoogte) van de winddata.

De oppervlakteterm geeft aan dat boven grote wateren wind meer effect heeft op het water. Meestal is deze term echter verwaarloosbaar. De fitconstanten gebruikt in WAQUA ($a= 3.5$; $b= 2.05$) zijn afkomstig van WL I Delft Hydraulics (1996) en zijn voor wind boven water op 10m hoogte.

Mogelijk moet voor toepassing op het Noordzeekanaal uitgegaan te worden van parameters voor wind boven land ($a=4.4$; $b= 1.82$ voor wind op 10m hoogte). Dan dient ook de voorfactor in $f(W)$ met macht 0.05 te worden weggelaten.

Een voorbeeld van de heat-exchange coefficient A is in Figuur 1 gegeven voor wind op 10 meter boven water of land. De verschillen zijn zo klein dat de keuze niet erg belangrijk is.

In het rekenmodel van de CIW beoordelingssystematiek wordt uitgegaan van $A = 40 W m^{-2} \text{ } ^\circ C$. Uit de grafiek volgt dat dit volgens Sweers geldt voor een wind van ongeveer $5 m s^{-1}$.



Figuur 1. Heat-exchange coëfficiënt A in $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ als functie van 2 windformules (1 voor data boven land, en 1 voor boven water, zie tekst). Watertemperatuur is $25 \text{ } ^\circ C$ en evenwichtstemperatuur is $15 \text{ } ^\circ C$.

2.4 Heat-balance module

2.4.1. Inleiding

Dit type model beschrijft de volledige warmtebalans aan het wateroppervlak, dus inclusief de zonne-instraling en andere atmosferische straling. Zij zijn tevens geschikt voor seizoensmodellering. Uitgangspunt is dat zowel opwarmingstermen als verliestermen worden meegenomen:

$$\Delta H = H_{in} - H_{out}$$

$$H_{in} = H_{sun} + H_{atm}$$

$$H_{out} = H_{evap} + H_{conv} + H_{brad}$$

met:

ΔH	= warmteverandering van het watersysteem in $W m^{-2}$;
H_{sun}	= warmte-instraling van zon in $W m^{-2}$;
H_{atm}	= warmte-instraling van de atmosfeer in $W m^{-2}$;
H_{evap}	= warmteverlies door verdamping in $W m^{-2}$;
H_{conv}	= warmteverlies door convectie in $W m^{-2}$;
H_{brad}	= warmteverlies door temperatuurstraling (backradiation) in $W m^{-2}$;

Bovenstaande indeling wordt algemeen in de literatuur gehanteerd.

Er zijn in SIMONA twee versies aanwezig:

1. Het hier besproken WAQUA model 'WASHTU' is aanwezig in de moederversie van WAQUA en is conform WL I Delft

Hydraulics (1996), maar wordt in een recent overzicht van het WL (2003) besproken als het WAQUA-model van RIZA (Ludikhuizen, 1996). Het is niet gedocumenteerd in de WAQUA User Guide.

2. Tevens is er een model TRIWAQ/TEM (de Goede, 2000) in een speciale maar sterk verouderde TRIWAQ versie. Deze is gevalideerd met in-situ en remote sensing metingen (de Goede et al., 2000; Vos et al., 1999). Het model is tevens in het EU-project NOMADS-2 vergeleken met andere temperatuurmodellen (Delhez et al., 2004). Dit TRIWAQ/TEM model is op verzoek van Rijkswaterstaat door WL in TRIWAQ geïmplementeerd voor temperatuurmodellering van de Noordzee maar heeft helaas niet zijn weg gevonden naar de TRIWAQ moederversie. De oorspronkelijke temperatuurmodellering is volgens Lane (1989) die een model van Gill (1982) heeft aangepast voor de Noordzee. De FORTRAN routines zijn afkomstig van Lane van POL (nov 1991) en zijn door WL in TRIWAQ gehangen. De code is niet gedocumenteerd in SIMONA en voldoet niet aan de SIMONA normen.

2.4.2. Warmte-instraling van zon

Warmte-instraling van *kortgolvlige* zonnestraling is in WAQUA gemodelleerd middels:

$$H_{sun} = (1 - \alpha)E_0(1 - 0.65F_c^2)$$

met:

H_{sun} = warmte-instraling van zon in $W\ m^{-2}$;

α = reflectie coëfficiënt (0.06);

E_0 = irradiantie van de zon in $W\ m^{-2}$ bij heldere atmosfeer;

F_c = bewolgingsgraad of fractie van de hemel bedekt door wolken (-);

De hier gekozen afhankelijkheid van bewolgingsgraad is volgens Ryan en Harleman (1973). In TRIWAQ/TEM wordt gebruikt gemaakt van een functie volgens Gill (1982) met een sterker effect van bewolking (zie Boderie en Dalgarno, 2003):

$$H_{sun} = (1 - \alpha)E_0(1 - 0.4F_c - 0.38F_c^2)$$

De reflectie coëfficiënt α is in zowel WAQUA en TRIWAQ/TEM gelijk aan 0.06. Dit is reflectie aan wateroppervlak en aan gesuspendeerd materiaal. In sommige modellen wordt een deel van de kortgolvlige zonnestraling geabsorbeerd in de waterkolom afhankelijk van de verticale diffuse verzwakking coëfficiënt K (bv. P. Luijten, Coherens, 2000). Hier is dat echter niet gebeurd.

De irradiantie E_0 is een functie van zonnehoek die afhangt van breedtegraad en tijd van de dag. *In WAQUA moet deze helaas echter expliciet worden opgegeven.* Handig daarbij is gebruik te maken van de

formulering in TRIWAQ/TEM (de Goede, 2001) waarvan het aan te bevelen is deze in WAQUA routine 'WASHTU' over te nemen:

$$E_0 = 0.76E_{top} \sin \gamma$$

$$\sin \gamma = f(\phi, \omega_0, \omega_1, t)$$

$$f(\phi, \omega_0, \omega_1, t) = \sin \delta \sin\left(\frac{\pi\phi}{180}\right) - \cos \delta \cos\left(\frac{\pi\phi}{180}\right) \cos(\omega_1 t)$$

$$\delta = \frac{23.5\pi}{180} \cos(\omega_0 t - 2.95)$$

met:

E_{top} = irradiantie aan de top van de atmosfeer (=1365 Wm⁻²);

ϕ = breedtegraad of latitude (graden);

ω_0 = frequentie van de jaarlijkse variatie;

ω_1 = frequentie van de dagelijkse variatie;

t = tijd;

Een technisch lastig probleem hierbij is berekening van de breedtegraad ' ϕ '. Deze is afhankelijk van het type rooster (bolcoördinaten, rijksdriehoek etc.) en daarom lastig te standaardiseren. In TRIWAQ/TEM is slechts het gebruik van bolcoördinaten mogelijk en zijn de roosterparameters '*hard*' gecodeerd. Daarom (en om andere redenen) voldoet TRIWAQ/TEM niet aan de SIMONA normen.

2.4.3. Warmte-instraling van atmosfeer

Warmte-instraling van *de atmosfeer* is langgolvig en wordt gemodelleerd middels een variant op de Plankse straling van een zwart lichaam:

$$H_{atm} = (1 - \alpha_w) \varepsilon \sigma T_{ak}^4 (1 + 0.17 F_c^2)$$

met:

H_{atm} = warmte-instraling van atmosfeer in W m⁻²;

α_w = reflectie coëfficiënt van het wateroppervlak (0.03);

ε = emissiviteit;

σ = 5.67 E-8 W m⁻² K;

T_{ak} = *lucht*temperatuur in K;

E_0 = irradiantie van de zon in W m⁻² bij heldere atmosfeer;

F_c = bewolgingsgraad of fractie van de hemel bedekt door wolken (-);

De afhankelijkheid van bewolgingsgraad is volgens Brunt (1932). De emissiviteit is verder volgens Brutsaert (1975):

$$\varepsilon = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_{ak}} \right)^{1/7}$$

met:

e_a = actuele dampdruk van water in lucht (mbar);

Middels de bekende relatie tussen dampdruk en verzadigingsdampdruk:

$$e_a(T_{ak}) = F_{hum} e_s(T_{ak})$$

met:

F_{hum} = relatieve luchtvochtigheid ($0 < F_{hum} < 1$);

en een polynoom tussen e_s en T_{ak} is dit eenvoudig uit te rekenen:

$$e_s(T_{ak}) = 23.38 \exp(18.1 - 5303.3/T_{ak})$$

De formulering is in WAQUA gelineariseerd en bovendien zijn bekende waarden voor α en een gemiddelde waarde voor e_a (bij 15°C) met $F_{hum} = 1$ ingevuld met als resultaat:

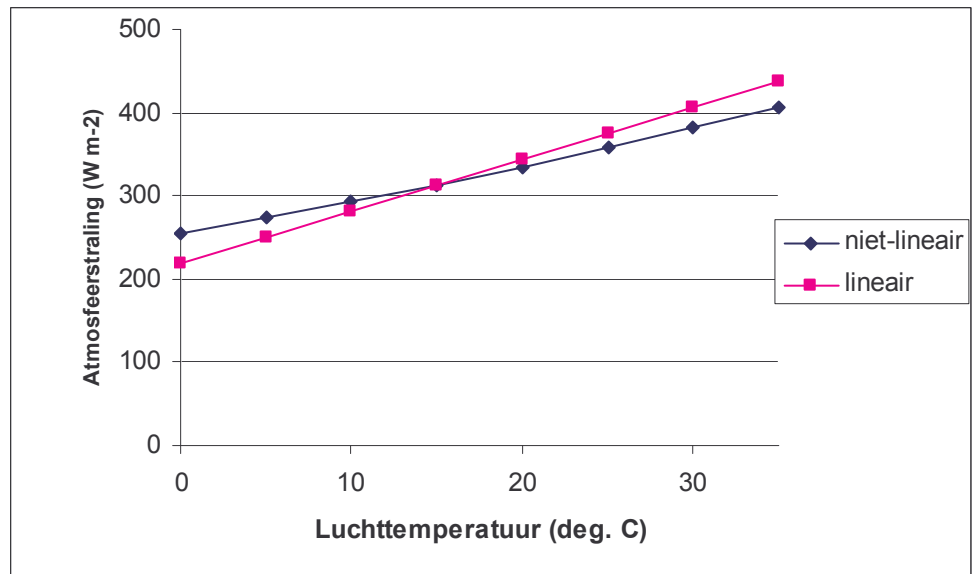
$$H_{atm} = (218 + 6.3T_a) (1 + 0.17F_c^2)$$

met:

T_a = luchttemperatuur in °C;

In Figuur 2 wordt een vergelijking gemaakt tussen de gelineariseerde formule en de oorspronkelijke formule.

In TRIWAQ/TEM is de atmosferische instraling geprogrammeerd samen met de langgolvlige temperatuurstraling van het wateroppervlak als een zogenaamde 'effective infra-red back-radiation'. Zie hiervoor sectie 2.4.6. Deze formule is overigens onjuist daar instraling afhangt van de luchttemperatuur en back-radiation van de watertemperatuur. Deze 2 termen zijn dus in principe niet in 1 formule met 1 temperatuur samen te nemen.



Figuur 2. Atmosfeerstraling in $W m^{-2}$ voor een lineaire formule en een niet-lineaire formule. Watertemperatuur is $15\text{ }^{\circ}C$, $F_{hum} = 1$ in de niet-lineaire formule en bewolgingsgraad is '0'.

2.4.4. Warmteverlies door verdamping

In WAQUA is deze verliesterm gegeven door:

$$H_{evap} = f(W)(e_s(T_{sk}) - e_a(T_{ak}))$$

met:

- H_{evap} = warmteverlies door verdamping in $W m^{-2}$;
- e_s = verzadigingsdampdruk van water in lucht (mbar);
- e_a = actuele dampdruk van water in lucht (mbar);
- $f(W)$ = windfunctie;

De windfunctie is volgens Sweers (1976) en is gegeven in sectie 2.3.

De functies e_a en e_s zijn gegeven in 2.4.3, zij het dat nu bij berekening van e_s de watertemperatuur moet worden gebruikt. Indien e_a groter is dan e_s wordt gesproken van condensatie en blijft de formule bruikbaar al is niet bekend hoe goed dit is.

In het TRIWAQ/TEM model van de Goede et al. (2000) wordt een ingewikkelder verdampingsmodel gebruikt:

$$H_{evap} = C_e W L_v(T_s) \rho_{dry} (q_s(e_s, P_{atm}) - q_a(e_a, P_{atm}))$$

met:

- L_v = latente verdampingswarmte van water afhankelijk van de watertemperatuur;

ρ_{dry}	= dichtheid van droge lucht (1.25 kg m^{-3});
q_s	= specifieke vochtigheid bij verzadiging van water in lucht;
q_a	= specifieke vochtigheid van water in lucht;
P_{atm}	= atmosferische druk (mbar);
C_e	= Dalton getal 1.5 E-3 ;
W	= wind snelheid (m s^{-1})

De specifieke vochtigheid is gegeven door:

$$q_{a,s}(e_{a,s}, P_{atm}) = \frac{\varepsilon e_{a,s}}{(P_{atm} - (1 - \varepsilon)e_{a,s})}$$

met $\varepsilon = 0.62197$.

Deze functie hangt tevens af van de atmosferische druk. De windfunctie (die het product is van C_e met W) is volgens Gill (1982).

De dampdrukken zijn gegeven door de volgende polynoom:

$${}^{10}\log e_s(T_s) = \frac{0.7859 + 0.03477T_s}{1.0 + 0.00412T_s}$$

$$e_a(T_a) = F_{hum} e_s(T_a)$$

met:

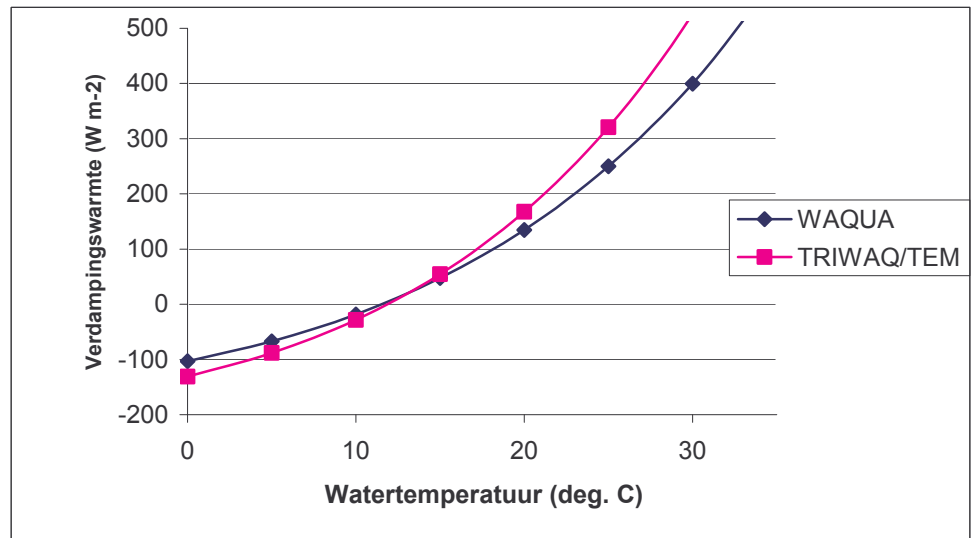
T_s	= watertemperatuur in graden celcius;
T_a	= luchttemperatuur in graden celcius.

In Sweers (1976) wordt voor de term e_s een polynoom gebruikt die niet afhangt van de relatieve luchtvochtigheid. Deze is een goed alternatief indien de relatieve luchtvochtigheid niet bekend is.

De latente verdampingswarmte is gegeven door:

$$L_v = (2.5 \cdot 10^{+6} - 2.3 \cdot 10^{+3} T_s)$$

In Figuur 3 wordt een vergelijking gemaakt tussen het WAQUA model en het TRIWAQ/TEM model.



Figuur 3. Verdampingswarmte in $W m^{-2}$ voor WAQUA en TRIWAQ/TEM formuleringen als functie van de watertemperatuur. Luchttemperatuur is $15\text{ }^{\circ}C$, $F_{hum} = 0,8$ en windsnelheid is 5 m s^{-1} .

2.4.5. Warmteverlies door convectie

Soms wordt hier gesproken van warmtegeleiding tussen water en atmosfeer maar hetzelfde wordt daarmee bedoeld als convectie.

In WAQUA is deze verliesterm gegeven door:

$$H_{conv} = f(W)\gamma(T_s - T_a)$$

met:

- H_{conv} = warmteverlies door verdamping in $W m^{-2}$;
- γ = Bowen constant ($mbar K^{-1}$);
- $f(W)$ = windfunctie;

De windfunctie is volgens Sweers (1976) en is gegeven in sectie 2.3.

in WAQUA wordt voor de Bowen constant genomen $\gamma = 0.61\text{ mbar K}^{-1}$ en in Sweers (1976) $\gamma = 0.65\text{ mbar K}^{-1}$.

In TRIWAQ/TEM wordt de convectie (ook wel *sensible heat flux* genoemd) gegeven door:

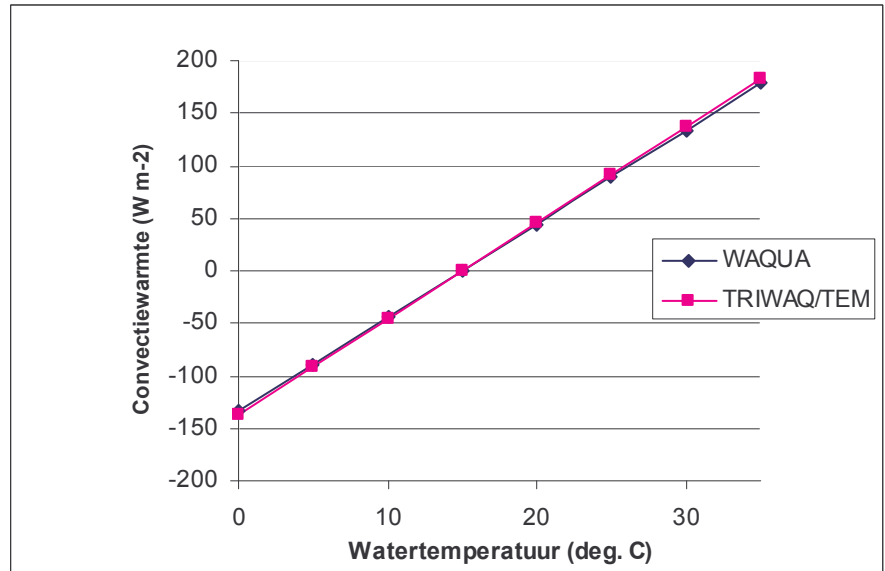
$$H_{conv} = \rho_a C_h c_p W (T_s - T_a)$$

met:

- ρ_a = dichtheid van lucht ($kg m^{-3}$)
- C_h = Stanton getal (= $1.45 E-3$)
- c_p = warmtecapaciteit van lucht ($1004\text{ J }^{\circ}C^{-1}$)
- W = wind snelheid ($m s^{-1}$)

De hier gebruikte windfunctie (product C_h met W) is volgens Gill (1982).

In Figuur 4 wordt een vergelijking gemaakt tussen het WAQUA model en het TRIWAQ/TEM model.



Figuur 4. Convectiewarmte in $W m^{-2}$ voor WAQUA en TRIWAQ/TEM formuleringen als functie van de watertemperatuur. Luchttemperatuur is $15\text{ }^{\circ}C$, en windsnelheid is 5 m s^{-1} .

2.4.6. Warmteverlies door temperatuurstraling van het wateroppervlak

Temperatuurstraling van *het water* is langgolvig en wordt ook gemodelleerd middels een variant op de Planckse straling van een zwart lichaam:

$$H_{brad} = \varepsilon \sigma T_{sk}^4$$

met:

- H_{brad} = temperatuurstraling van water in $W m^{-2}$;
- ε = emissiviteit (0.97 voor water);
- σ = $5.67\text{ E-}8\text{ W m}^{-2}\text{ K}$;
- T_{sk} = watertemperatuur in K;

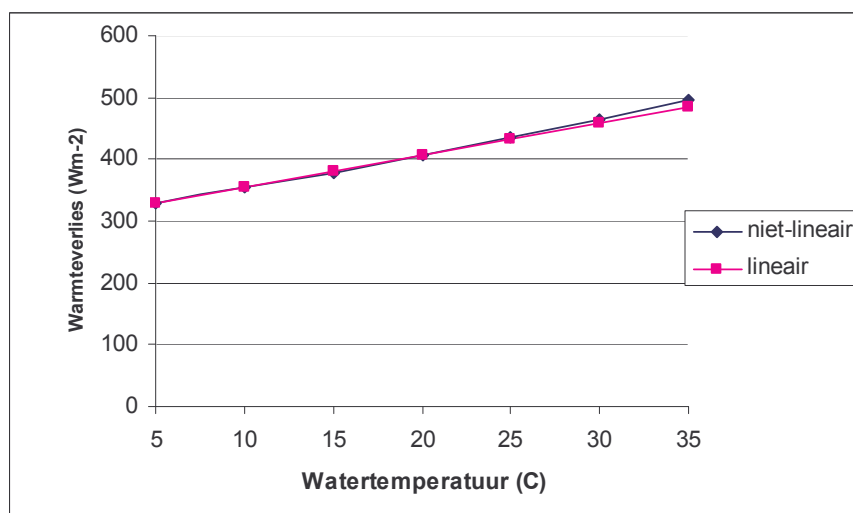
In WAQUA is deze formule gelineariseerd en gegeven door:

$$H_{brad} = (303 + 5.2T_s)$$

met:

- T_{sk} = watertemperatuur in $^{\circ}C$;

In Figuur 5 is het verschil gegeven tussen de gelineariseerde formule en de niet-lineaire formule. Het verschil is verwaarloosbaar.



Figuur 5. Warmteverlies door temperatuurstraling van het water in $W m^{-2}$ voor een lineaire formule en een niet-lineaire formule.

In TRIWAQ/TEM is de atmosferische instraling geprogrammeerd samen met de langgolvlige temperatuurstraling van het wateroppervlak als een zogenaamde 'effective infra-red back-radiation' (de Goede et al., 2000, p.A-7). De effectieve terugstraling zorgt bij positief teken voor afkoeling van de waterkolom.

$$H_{brad-eff} = \epsilon \sigma T_{sk}^4 \left(0.39 - 0.05 \sqrt{e_a(T_{ak})} \right) (1 - 0.6 F_c^2)$$

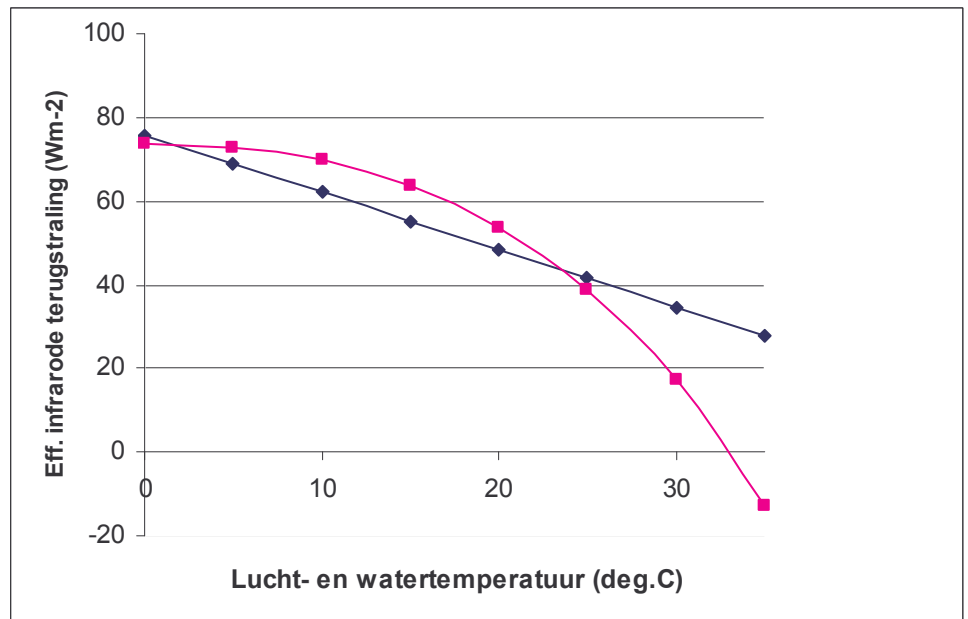
Deze formule is niet juist daar atmosferische instraling afhangt van de luchttemperatuur en hier gerelateerd wordt aan de watertemperatuur. De afhankelijkheid van bewolgingsgraad heeft ook een geheel andere invloed (tegengesteld van teken) als bij WAQUA (zie sectie 2.4.3). Overigens zijn er goede resultaten met dit model gehaald voor de Noordzee voor klimaatmodellering. *Onduidelijk is of dit ook kan bij koelwatermodellering waar de watertemperatuur vaak veel hoger kan zijn dan de luchttemperatuur.*

In Figuur 6 worden beide heat-balance modellen (WAQUA versus TRIWAQ/TEM) vergeleken voor 'effective infra-red back-radiation' (effectieve infrarode terugstraling). In Figuur 6 is verondersteld dat watertemperatuur en luchttemperatuur gelijk zijn. In TRIWAQ/TEM is het warmteverlies veel *lager* dan WAQUA voor temperaturen boven de 30 °C.

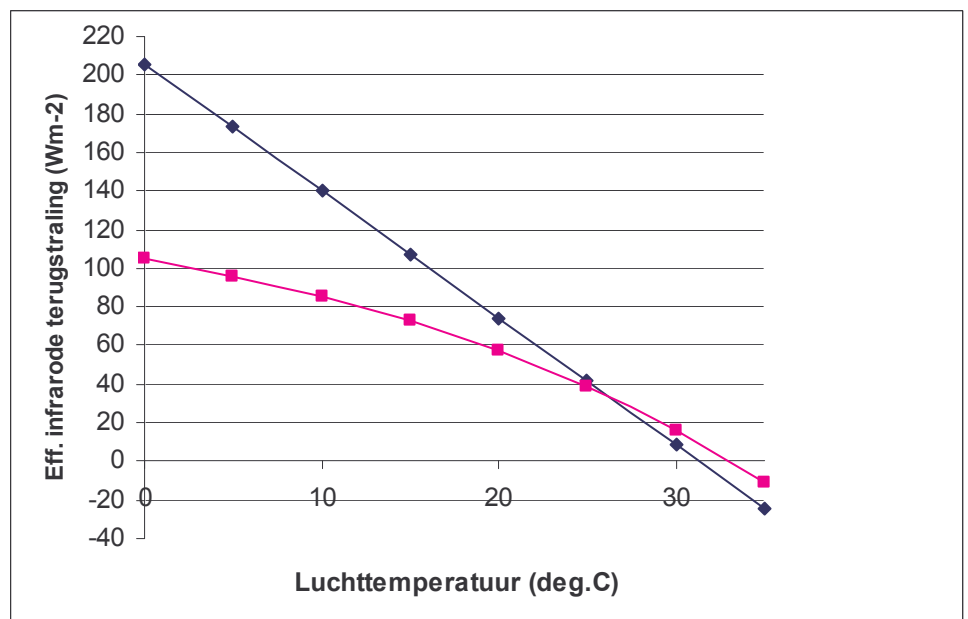
In Figuur 7 is nogmaals een run gedraaid maar voor een constante watertemperatuur van 25 °C in WAQUA. In TRIWAQ/TEM is het warmteverlies veel *lager* dan WAQUA voor luchttemperaturen beneden de 20 °C.

In Figuur 8 is nogmaals een run gedraaid maar voor een constante luchttemperatuur van 20 °C in WAQUA. In TRIWAQ/TEM is het warmteverlies veel *vlakker* dan WAQUA.

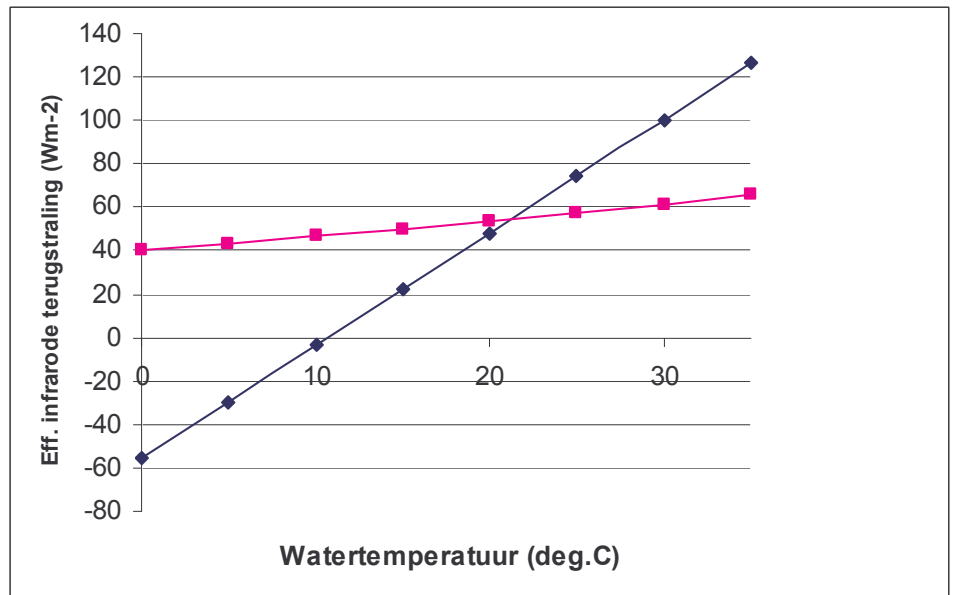
De TRIWAQ/TEM benadering geeft dus afwijkingen indien de luchttemperatuur veel lager is dan de watertemperatuur.



Figuur 6. Effectieve infrarode terugstraling voor WAQUA (blauw, diamonds) vs. TRIWAQ/TEM (roze, vierkantjes) voor bewolingsgraad $F_c=0.5$. De watertemperatuur in WASHTU is gelijk gesteld aan de luchttemperatuur maar minimaal 1°C en maximaal 25°C.



Figuur 7. Als Figuur 6 maar met watertemperatuur in WAQUA constant 25°C. WAQUA (blauw, diamonds) vs. TRIWAQ/TEM (roze, vierkantjes).



Figuur 8. Als Figuur 6 maar met luchttemperatuur in WAQUA constant 20°C. WAQUA (blauw, diamonds) vs. TRIWAQ/TEM (roze, vierkantjes).

3. Gewenste aanpassingen in TRIWAQ

3.1 Inleiding

In de TRIWAQ moederversie zijn de volgende tekortkomingen voor koelwatermodellering:

- Er ontbreekt een warmteverliesterm aan het oppervlak. Deze is echter wel in WAQUA aanwezig;
- Er is geen enkele documentatie van het temperatuurmodel (dit geldt ook voor WAQUA);
- Het model is niet geschikt voor near-field modellering vanwege de hydrostatische drukaanname en een aantal andere aannames genoemd in sectie 2.1.

Het eerste en tweede probleem zal worden besproken in dit hoofdstuk. Het derde probleem vereist nader onderzoek voor het kan worden aangepakt. Hiervoor is in sectie 2.2 een pragmatische oplossing aangegeven voor de modelopzet. Deze oplossing heeft geen consequenties voor de TRIWAQ software en komt hier dus niet meer aan de orde.

3.2 Overzicht huidige programmastructuur

3.2.1. Koproutines en rekenroutines

WAQUA/TRIWAQ is feitelijk 1 computerprogramma bestaande uit een preprocessor WAQPRE en een processor WAQPRO. Hier wordt slechts een overzicht gegeven van WAQPRO.

Het programma WAQPRO leest de data van de door WAQPRE aangemaakte SDS-file in de routine WASINS (deze data zijn door de pre-processor WAQPRE op de SDS-file gezet) en gaat vervolgens rekenen in WASSIM.

De routines WASINS en WASSIM zijn voor WAQUA en TRIWAQ gelijk. *Data voor een temperatuurmodel op de SDS-file voor een WAQUA routine zijn dus ook beschikbaar voor TRIWAQ en dit vergemakkelijkt de implementatie van de WAQUA-routine WASHTU in TRIWAQ.*

Daaronder zitten nog een aantal andere koproutines die voor beide programma's gelijk zijn⁵, te weten:

1. de FLOW routines WASSPU en WASSPV;
2. de stof-TRANSPORT routines WASTRU en WASTRV;

⁵ Vanwege het ADI-schema zijn er altijd twee routines, 1 voor de u-richting impliciet (WASSPU, WASTRU) en 1 voor de v-richting impliciet (WASSPV, WASTRV). De u-richting is evenwijdig aan x (in computational space) en de v-richting is evenwijdig aan y.

De solvers voor oplossing van de impuls- en continuïteitsvergelijkingen. Zijn in WAQUA anders dan in TRIWAQ:

- In WAQUA (imodel = 1) heten deze WASUXC en WASSUC;
- In TRIWAQ (imodel =3) heten TRSCUE en TRSSUW (en TRSUMO)

De routine voor oplossing van de transportvergelijking heet:

- In WAQUA heet deze WASDFC (deze bevat expliciet ook de solver van het stelsel) en
- In TRIWAQ heet deze TRSDIF (de solver gebruikt in TRSDIF zit in een aparte subroutine genaamd TRSJAC).

De routine WASDFC heeft daarbij wel een afbraak term voor warmte, maar TRSDIF heeft dit niet.

3.2.2. Functie WASHTU uit WAQUA voor warmteverlies

De warmtemodule (een fortran functie overigens) in WAQUA is genaamd WASHTU en bevat:

- het heat-balance model (KTEMP =1 of KTEMP = 2)⁶ of
- het heat-exchange model (KTEMP = 3)

Deze zijn beide beschreven in het vorige hoofdstuk. WASHTU rekent per gridcel een waarde uit voor de *warmteflux per seconde en per m²*. WASDFC vult de warmteflux in het stelsel vergelijkingen in (in de zgn. d-term uit het stelsel vergelijkingen die ook andere source en sink-termen bevat).

De warmteflux wordt alleen uitgerekend indien de stof 'l' gelijk is aan ltemp (het stofnummer voor temperatuur). In de warmtemodule wordt de temperatuur gehaald uit array rp en in de variabele templ gestopt:

$$\text{templ} = \text{rp}(\text{nm}, \text{ltemp})$$

met 'nm' het celnummer (gecontroleerd op droogval).

Daarbij dient te worden opgemerkt dat:

- in WASDFC de flux WASHTU wel vermenigvuldigt wordt met de halve tijdstap hdt, maar niet met het celoppervlak gsqs(nm). *Dit lijkt niet correct te zijn.* Voor andere globale source en sink-termen in WASDFC die zitten in de arrays 'gsour' en 'gsink' gebeurt dit namelijk wel.
- Het is aan te bevelen vanwege numerieke stabiliteit de source term gsour in array d (right-hand-side van het stelsel dus expliciet gediscrètiseerd) te vullen en de sink term gsink in array b (diagonaal van de matrix van het stelsel; impliciet gediscrètiseerd) te plaatsen. Bij het

⁶ Het verschil tussen deze heat-balance modellen is dat bij ktemp=2 de som van zonne-instraling en atmosfeerstraling volgt uit een door de gebruiker te specificeren waarde. Bij ktemp = 1 worden deze termen gemodelleerd volgens de formuleringen in sectie 2.3.

warmtemodel WASHTU verdwijnt de verliesterm altijd in het array 'd' en dit geeft een andere en mogelijk minder stabiele numerieke afhandeling van deze termen (voor TRIWAQ is de benaming mogelijk anders van deze arrays).

- De parameters voor de warmtemodule aanwezig in array *zwnd* niet variëren per gridcel en dus blijkbaar constant, *dwz ruimtelijk uniform over het gebied worden verondersteld.*
- Voor de wind een globale wind gebruikt die niet gelijk is aan de ruimtelijk variabele wind die in WAQUA/TRIWAQ kan worden gespecificeerd. Hoe de globale wind precies wordt verkregen is op dit moment nog niet helemaal duidelijk;
- In de pre-processor WAQPRE zijn volgens de zgn. referentietabel de waarden voor de meteo-parameters in array 'zwnd' constant in ruimte en tijd. Deze beperking moet worden verwijderd middels toepassing van een meer generieke datastructuur. Deze aanpassing heeft effect op WAQPE en de WAQPRO transportroutines maar niet op WASHTU.
- Er kunnen geen tijdreeksen worden opgegeven.
- Merk hierbij op dat het array *rp* een 2-d array is in WAQUA en een 3-d array in TRIWAQ. Bij verhuizing naar TRIWAQ dient bovenstaand array dus te worden uitgebreid. De temperatuur dient dan uit de eerste laag te worden genomen.

Invoerparameters

Het array *zwnd* bevat de invoerparameters voor het warmtemodel en deze zijn gegeven door:

<i>zwnd</i> (1)	: global windspeed W (gebruikt voor $ktemp = 1,2,3$);
<i>zwnd</i> (2)	: global wind angle (wordt niet gebruikt!);
<i>zwnd</i> (3)	: net. Radiation incoming flux (wordt niet gebruikt!);
<i>zwnd</i> (4)	: air temperature T_a (gebruikt voor $ktemp = 1,2$);
<i>zwnd</i> (5)	: relative humidity (gebruikt voor $ktemp = 1,2$);
<i>zwnd</i> (6)	: background watertemp. T_e (gebruikt bij $ktemp = 3$);
<i>zwnd</i> (7)	: clear sky solar radiation (gebruikt bij $ktemp = 1$)

De overige invoerparameters die van belang zijn maar die niet in array *zwnd* zitten zijn:

Sarea:	de parameter 'S' uit de Sweers formule die het representatief oppervlak van het watersysteem voorstelt moet ook door de gebruiker worden opgegeven.
Fclou:	De parameter 'F _c ' (bewolkingsgraad) die ook door de gebruiker moet worden opgegeven.

In Tabel 1 worden de parameters vereist voor de invoerfile van WAQUA nader gespecificeerd. De KEYWORDS van de openstaande

vraagtekens moeten nog worden uitgezocht binnen WAQPRE. Verder moet nog bekeken worden hoe de globale wind wordt ingevoerd:

- apart onder TRANSPORT;
- via de wind die de hydrodynamica aanstuurt.

Het laatste lijkt meer voor de hand liggend en heeft tevens als voordeel dat deze wind ruimtelijk afhankelijk is en dynamisch kan zijn.

In sectie 2.2 is een voorbeeld gegeven van een (deel van de) invoerfile.

Tabel 1. Invoerparameters voor de routine WASHTU.

Fortran	Functie	Model*	Keyword	NKEY**	Eenheid
ktemp	Temperatuur model	1,2,3	TEMPMODEL	6,1,3	-
zwnd(1)	Global windspeed	1,2,3	WSPEED	3,1	m s-1
zwnd(2)	Global windangle	Niet gebruikt	WANGLE	3,1	degrees
zwnd(3)	Net. Radiation flux	Niet gebruikt	FLUXRAD	6,2,4,1	-
zwnd(4)	Air temperature	1,2	DRYBULB	6,2,4,1	Deg .C
zwnd(5)	Relative humidity	1,2	RELHUMID	6,2,4,1	-
zwnd(6)	Background watertemp.	3	TMEASURING	6,2,4,1	Deg. C
zwnd(7)	Clear sky solar irradiation	1,2	QSC	6,2,4,1	W m-2
sarea	Representatief oppervlak watersysteem	3	AREAWATER	6,1,3	m2
fclou	Bewolgingsgraad	1, 3	CLOUDFRACT	6,1,3	-

* 1, 2= heat-balance model; 3 = heat-exchange model.

** NKEY geeft de locatie weer in de invoerfile en referentietabel, bv (6,1,3) = (TRANSPORT,PROBLEM, TEMPERATURE) en (6,2,4,1) = (TRANSPORT,FORCINGS,TEMPERATURE,INITIAL)

3.2.3. Functie TRSHEA uit TRIWAQ/TEM voor warmteverlies

De warmtemodule (een fortran functie overigens) in de speciale TRIWAQ/TEM versie is genaamd TRSHEA en bevat 1 heat-balance model

Deze is beschreven in het vorige hoofdstuk. TRSHEA rekent per gridcel een globale source term of sink term voor de warmte uit. Deze wordt in de *koproutines* WASTRU en WASTRV aangeroepen en de heatflux wordt in TRSHEA in de arrays 'gsour' of 'gsink' geladen. De reden waarom dit alles niet in de TRIWAQ-transport routine TRSDIF gebeurt is onduidelijk. TRSHEA roept ook alle segmenten tegelijk aan, terwijl WASHTU uit WAQUA dit slechts voor 1 segment doet.

De keuze van source-term (gsour) of sink (gsink) hangt af van het teken:

- Een positieve flux (warmtetoevoer) is een source term en verdwijnt in de werkvector 'd' aan de rechterkant van het lineaire stelsel.

-
- Een negatieve flux (warmteverlies) is een sink term en verdwijnt in de diagonaal 'b' van de matrix van het lineaire stelsel. Bovendien wordt hier geschaald met de watertemperatuur van het vorige tijdstip wat feitelijk inhoudt dat de term lineair in de tijd wordt meegenomen in het stelsel vergelijkingen. Dit is niet nauwkeurig bij grote afkoelingsvariaties maar maakt wel dat het stelsel stabiel (robuuster) is in dat geval.

In de source code van TRSHEA (maar hoort in TRSDIF) is dit als volgt geprogrammeerd:

```
heatex = heatex / ( cp * rhow )  
c  
    if ( heatex .gt. 0 ) then  
        gsour(nm,1) = heatex  
        gsink(nm,1) = 0.0  
    else  
        gsink(nm,1) = -heatex / max(1e-5,  
            rp(nm,1,lmax))  
        gsour(nm,1) = 0.0  
    endif
```

De warmtefluxberekening wordt dus alleen uitgevoerd in de oppervlaktelaag. Verder is de temperatuur verondersteld gelijk te zijn aan de laatste constituent (lmax), en dit is niet volgens SIMONA normen.

Ook wordt in de aanroep het assenstelsel (bolcoördinaten) hard gecodeerd voor berekening van de breedtegraad voor zonneinstraling. Dit voldoet niet aan de SIMONA normen.

Ook de invoer van het model is hard gecodeerd in de code en ook dat zou moeten worden herzien. De volgende parameters worden als tijdreeks (*maar ruimtelijk uniform*) ingelezen:

- Tijdstap
- Windsnelheid (m/s);
- Druk (mbar);
- Bewolkingsgraad (-);
- Luchttemperatuur (°C);
- Relatieve luchtvochtigheid (-);

Het tijdstelsel wordt hard gecodeerd per run en alleen geldig voor de hier geldende tijdzone. De gegevens worden lineair geïnterpoleerd tussen de tijdstippen.

Het model beschouwt dus tijdreeksen van ruimtelijk uniforme waarden, volgens de Goede et al. (2000) per 6 uur gespecificeerd. Alleen de zonneinstraling wordt per tijdstap en per gridcel bepaald, zij het met ruimtelijk uniforme bewolkingsgraad.

3.3 Gewenste aanpassingen in programmastructuur

3.3.1. Aanpassingen voor WASHTU in TRIWAQ

De warmteverliesterm dient ook geïmplementeerd te worden in TRIWAQ. Dit kan geschieden door aanroep van WASHTU vanuit de TRIWAQ routine TRSDIF. Aangezien TRSDIF weer wordt aangeroepen vanuit een koproutine (WASTRU of WASTRV, afhankelijk van de impliciete richting in de ADI transportsolver) zijn alle benodigde arrays reeds aanwezig.

In routine WASHTU is in het droogvalproject (2004) de LGRID-tabel reeds verwijderd. Deze aangepaste routine is inmiddels opgenomen in de moederversie (export 2005-H1) en daarom eenvoudig te koppelen met TRIWAQ waar immers geen LGRID-tabel wordt gebruikt.

Het array 'rp' bevat in TRIWAQ in subroutine TRSDIF 3 dimensies (rp(mnmaxk,kmax,ltemp)) en in WAQUA slechts 2 (rp(mnmaxk, ltemp)). Bij verhuizing naar TRIWAQ dient het 2-d array in WASHTU dus te worden aangepast. De temperatuur dient dan uit de eerste laag te worden genomen: templ = rp(nm, 1, ltemp). Dit alles zou betekenen dat de routine moet worden aangepast voor TRIWAQ en gaat verschillen van WAQUA. Dit kan echter worden opgelost omdat WASHTU slechts de watertemperatuur van 1 segment 'nm' in de bovenlaag gebruikt. De aanroep dient dus niet te gebeuren met het array 'rp', maar met een hulpvariabele bv rptemp. Deze moet dan buiten de routine in TRSDIF (en WASDFC) uit het array rp worden gehaald. In WASDFC wordt dit:

```
rptemp = rp(nm,ltemp)
```

en in TRSDIF wordt dit:

```
rptemp = rp(nm,1,ltemp)
```

Dit vereist aanpassingen in zowel WASTRU als TRSDIF als WASDFC.

Gekeken moet worden of de warmteflux alleen expliciet toegevoegd zal worden aan de rechterkant van het stelsel (RHS) of ook impliciet in de diagonaal term van de (penta-diagonale) matrix. Dit laatste volgens de methode gebruikt in TRIWAQ/TEM (zie vorige paragraaf) maar dan bij voorkeur met vulling van gsour en gsink in TRSDIF en niet in WASHTU zelf. Bij toevoeging op de diagonaal moet de flux geschaald worden met de watertemperatuur. Waarschijnlijk is expliciet discretiseren voldoende daar warmteverlies-termen altijd relatief klein zijn.

Niet moet worden vergeten de flux nog te vermenigvuldigen met het celoppervlak wat in array 'gsqs' is opgeslagen. *Dit is in de huidige moederversie van WAQUA in WASDFC onjuist gedaan en zal moet worden gecorrigeerd.*

In WAQPRE moeten de grootheden voor het temperatuurmodel ook als tijdreeksen kunnen worden opgegeven. Voor het Sweers model wat gebruikt zal worden voor koelwatermodellering op relatief korte tijdschalen van enige dagen is dit minder noodzakelijk maar voor het heat-balance model wat ook gebruikt wordt voor temperatuurmodellering is dit een vereiste. Voor grotere watersystemen moeten de gegevens tevens ruimteafhankelijk (in matrix-vorm) kunnen worden opgegeven. Dit vereist een aanpassing in WAQPRE, in de referentietabel en in WAQPRO.

Zoals in Hfd 2 al werd opgemerkt zou voor temperatuurmodellering de constante en uniforme globale wind vervangen moeten worden door de ruimteafhankelijke en dynamische wind die de hydrodynamica aanstuurt.

3.3.2. Opname van TRSHEA uit TRIWAQ/TEM in moederversie

Het is aan te bevelen om het heat-balance model van POL (Lane, 1989) als een optie (KTEMP=4) op te nemen in de routine WASHTU en die volgens 3.3.1 ook in TRIWAQ te hangen. Deze module is uitgebreid gevalideerd voor de Noordzee (de Goede et al., 2000; Delhez et al., 2004). Hiervoor zijn dan wel een aantal aanpassingen nodig in WAQPRE en de inleesroutines van WAQPRO. Problemen hierbij zijn:

1. Invoer van of berekening van de latitude. Dit is een lastig punt want hangt af van het coördinatenstelsel. Als beperking geldt tevens dat de tijdzone alleen geldig is voor de in Nederland en omgeving geldende tijdzone;
2. De luchtdruk (in mbar) ontbreekt nu geheel in de invoer;
3. Wind wordt globaal bepaald maar dit moet lokaal met de ruimteafhankelijke en dynamische wind die de hydrodynamica aanstuurt gebeuren;
4. Idem moeten alle overige meteo-parameters ruimteafhankelijke en dynamisch kunnen worden opgegeven.

Probleem 1 is lastig oplosbaar. Een oplossing voor alle tot nu toe bekende RWS-modellen is het gebruik van de interne parameter 'kurflg'. Voor kurflg = 1 wordt een normaal curvilineair rooster verondersteld en deze zijn bij RWS allemaal in rijkdriehoek-coördinaten (RD). Voor kurflg = 2 wordt een bolcoördinaten rooster verondersteld en deze zijn altijd in zgn. lat-lon coördinaten waar dus geen conversie nodig is. Uitgaande van deze conventie is dus voor kurflg = 1 een conversie van RD naar lat-lon de programmeren. De conversie kan op 2 manieren gebeuren:

1. Door transformatie van het rooster naar lat-lon;
2. Door transformatie van de instralingformule van lat-lon naar het gegeven coördinatenstelsel;

De tweede manier is eenvoudiger te implementeren en heeft daarom de voorkeur. Indien in de code een check worden ingebouwd op het type co-ordinaten; wat ook zou kunnen middels een extra *keyword* in de invoerfile; kan de juiste formule worden geselecteerd. Deze is dan te

generaliseren voor alle internationaal gangbare coördinatenstelsels zoals b.v het UTM stelsel.

Het zal in vergelijking met de opname van WASHTU in TRIWAQ een relatief grote inspanning zijn de TRIWAQ/TEM routine in de moederversie van WAQUA/TRIWAQ op te nemen en te documenteren aangezien de data hard gecodeerd zijn of van file worden ingelezen.

3.4 Gewenste aanpassingen in preprocessor en invoerfile

In Tabel 1 zijn KEYWORDS gegeven voor routine WASHTU. Niet alle keywords zijn nog uitgetest en dit moet nog gebeuren.

Ook is de functie van keywords als DELTAT, ABSORPTION en PRESSURE (onder NKEY = 6,1,3) gegeven in het voorbeeld van sectie 2.2 niet duidelijk, mogelijk kunnen deze worden verwijderd.

Verder moet nog bestudeerd worden hoe de globale wind wordt ingevoerd:

- apart onder TRANSPORT ;
- of via de wind die de hydrodynamica aanstuurt.

Momenteel wordt het temperatuurmodel TRSHEA in TRIWAQ niet gebruikt en dit wordt gemeld middels een WARNING in de message-fiile van WAQPRE. Deze WARNING moet worden verwijderd.

De grootheden kunnen nu alleen als constanten worden ingevoerd. Voor het gebruik van de heat-balance modellen moeten dit minimaal tijdreeksen zijn, en wat betreft solar irradiation moet deze berekend worden op basis van tijd, tijdzone en breedtegraad. Dit alles vereist de nodige aanpassingen in WAQPRE.

Voor het heat-exchange model WASHTU kan voorlopig met een eenvoudig uniform en tijdsafhankelijke meteo-forcering worden volstaan.

Eventuele extra invoergegevens voor TRIWAQ/TEM zijn gegeven in de vorige paragraaf.

Tot slot moet dit alles in de gebruikersdocumentatie en technische documentatie worden opgenomen.

4. Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

TRIWAQ heeft een goede basis voor 3d-temperatuurmodellering daar:

- Het zout- en temperatuur koppelt aan dichtheid en een $k-\epsilon$ turbulentiemodel gebruikt;
- Het zeer goede performance heeft vanwege parallel rekenen wat vereist is voor omvangrijke 3d-berekeningen voor het Noordzeekanaalmodel en het IJmond-model of andere 3-d modelschematisaties als bv. Zeedelta.
- In het IJmond-model is bovendien voor de Buitenhaven domein decompositie met horizontale verfijning vereist. Dit is in TRIWAQ aanwezig en ook eenvoudig met de IPW (Interactieve Preprocessor WAQUA) uit de bestaande schematisatie te maken.

In TRIWAQ is de volgende tekortkoming voor *koelwatermodellering* geconstateerd:

- Er ontbreekt een warmteverliesterm aan het oppervlak. Deze is echter wel aanwezig in de functie WASHTU maar is slechts gekoppeld aan de WAQUA routine WASDFC. Verder is de routine niet gedocumenteerd. De functie WASHTU moet worden gekoppeld aan TRIWAQ in de routine TRSDIF.
- Het WAQUA/TRIWAQ model is niet geschikt voor near-field modellering vanwege de hydrostatische drukaanname. Er is een projectversie met een niet-hydrostatische druksolver maar deze is nog niet geschikt voor koelwatermodellering. De volgende tekortkomingen zijn hieraan geconstateerd: het $k-\epsilon$ model is nog niet volledig 3-d, het bevat geen diffusie termen en bevat niet alle zgn. productietermen voor turbulente kinetische energie. Verder ontbreekt de functionaliteit van domein decompositie. De inspanning voor verbetering van de code wordt groot geacht aangezien er een vooronderzoek nodig is naar de numerieke stabiliteit van de diffusie termen in het $k-\epsilon$ model (Zijlema, pers.comm.). Wel is het zo dat TRIWAQ op dit gebied verder gevorderd is dan andere 3-d modellen als Delft3D-FLOW of Threetox en dus een goed startpunt is voor een *volledig* 3-d hydrodynamisch model.

In de toepassing voor WAQUA zit er in de verwerking van de heat-flux in de WAQUA routine WASDFC vermoedelijk een fout, nl. de warmteflux is niet vermenigvuldigd met het celoppervlak. Dit moet worden gecontroleerd en indien nodig worden verbeterd.

De invoerparameters die WASHTU aansturen kunnen nu alleen als constanten worden ingevoerd. Voor het gebruik van de heat-balance modellen voor *temperatuurmodellering* moeten dit minimaal

tijdreeksen zijn en liefst ook ruimteafhankelijk kunnen worden ingevoerd. Wat betreft solar irradiation moet deze berekend worden op basis van tijd, tijdzone en breedtegraad. Dit alles vereist de nodige aanpassingen in WAQPRE.

Voor het heat-exchange model in WASHTU (Sweers, 1976) t.b.v *koelwatermodellering* op het Noordzeekanaal kan voorlopig met een eenvoudig uniform en tijdsafhankelijke meteo-forcering worden volstaan.

Het model TRIWAQ/TEM is weliswaar gevalideerd voor de Noordzee maar is deels hard gecodeerd waardoor het relatief veel meer werk is het op te nemen in de moederversie (vereist ook diverse aanpassingen in WAQPRE). Ook wordt getwijfeld aan de juistheid van het gebruik van 'effectieve back-radiation' warmteflux. Onderzocht moet worden of dit onderdeel van het warmteflux model kan worden verbeterd.

4.2 Aanbevelingen

Koelwatermodellering

Voor *koelwatermodellering* met TRIWAQ betreft het in het algemeen relatief kleine watersystemen en tijdschalen van enige dagen. Voor deze modellering dient het volgende te worden gedaan:

- De functie WASHTU moet worden gekoppeld aan TRIWAQ in de routine TRSDIF. In WAQPRE zullen kleine aanpassingen nodig zijn, en de documentatie zal moeten worden aangepast.
- Het strekt voor koelwatermodellering aanbeveling het heat-exchange model van Sweers (1976) te gebruiken vanwege zijn eenvoud. In WASHTU (voor $k_{temp}=3$) kan voorlopig met een eenvoudig uniform en tijdsafhankelijke meteo-forcering worden volstaan en zijn vrijwel geen aanpassingen in de preprocessor WAQPRE nodig.
- Het nearfield effect van de lozing moet empirisch worden meegenomen door keuze van een goede initiële conditie van de temperatuur van de modelsimulatie. Dit kan bv op basis van 3-d in-situ metingen in het nearfield.

Op de *korte termijn* is er een koelwatermodel nodig voor toepassing op het Noordzeekanaal. Bovenstaande aanbevelingen zullen worden uitgevoerd binnen het project Systeemanalyse Noordzeekanaal. Na afloop van het project dient de projectversie uit dat project te worden opgenomen in de moederversie van SIMONA.

Temperatuurmodellering

Bij *temperatuurmodellering* gaat het meestal om seizoensvariaties en grotere watersystemen zoals de zuidelijke Noordzee. Op de *middenlange termijn* dient een dergelijk model ook in TRIWAQ te komen. In dat geval dient ook met het volgende te worden uitgevoerd:

-
- Voor het heat-balance model WASHTU moet de zonneinstraling (solar irradiation) geprogrammeerd worden volgens de Goede et al. (2000) waarbij een methode moet worden bedacht om de breedtegraad mee te nemen.
 - Ook moeten de andere invoerparameters (meteo-parameters) als tijdreeksen of eventueel tijdsafhankelijke en ruimteafhankelijke velden kunnen worden ingevoerd.
 - De wind moet worden gerelateerd aan de ruimtelijke en dynamische wind die de hydrodynamica aanstuurt.
 - Het is aan te bevelen in de toekomst ook het model TRIWAQ/TEM op te nemen in WASHTU als een extra model (KTEMP=4) daar dit destijds uitgebreid is gevalideerd met metingen (zie de Goede et al., 2000) zij het wel dat de formule voor back-radiation in die studie niet juist lijkt te zijn. Voor de huidige studies op het Noordzeekanaal lijkt dit model niet nodig.

Bovenstaande aanpassingen kunnen mogelijk worden uitgevoerd voor de opname van de projectversie van Systeemanalyse Noordzeekanaal in de moederversie. Of dit nog in 2005 kan worden gerealiseerd hangt af van de voortgang in het project Systeemanalyse Noordzeekanaal.

Near-field modellering

Op de *lange termijn* is het te overwegen een volledig ('state-of-the-art') nearfield koelwatermodel beschikbaar te komen (*volledige* 3-d hydrodynamische modellering) in TRIWAQ op te nemen. Hiertoe kan als uitgangspunt dienen de niet-hydrostatische TRIWAQ versie (NONHYD-01) uit het SBW project. Voor verbetering van dit model moet allereerst een vooronderzoek worden opgestart naar de numerieke stabiliteit van de diffusie termen in het $k-\varepsilon$ model. Voorts moet een volledig 3-d $k-\varepsilon$ model met alle productietermen worden opgenomen in TRIWAQ.

Referenties⁷

Boderie B. en L. Dalgarno. Warmtelozing in oppervlaktewater en uitwisseling met de atmosfeer. WL IDelft Hydraulics Report Q3315. Maart 2003.

CIW Beoordelingssystematiek, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 12 november 2004.

Coherens, Coupled Hydrodynamical Ecological Model for Regional Shelf Seas, <http://www.mumm.ac.be/~patrick/mast/coherens.html>.

Delft3D-FLOW manual version 0.1, August 1996. WL IDelft Hydraulics.

Delhez E.J. M., P. Damm, E. de Goede, J.M. de Kok, F. Dumas, H. Gerritsen, J.E. Jones, J. Ozer, T. Pohlmann, P.S. Rasch, M. Skogen, R. Proctor - Variability of shelf-seas hydrodynamic models: lessons from the NOMADS2 Project. *Journal of Marine Systems* 45 (2004) 39-53.

Gill. A.E. Atmosphere-Ocean dynamics. Int. Geophysics series vol.30. Academic Press. 1982.

Goede E.D. de, J.N. Roozekrans, J.M. de Kok, R.J. Vos en R.E. Uittenboogaard. REST3D: Remote sensing sea surface temperature for 3D North Sea modeling. 2000. BCRS Report 00-16, NRSP-2.

Lane A. The heat-balance of the North Sea. Proudman Oceanographic Laboratory report no. 8. 1989.

Ludikhuizen D. Modelling natuurlijke temperatuur oppervlaktewater. RIZA 1996.

van Reen M.J., G. van Banning, H. Hartsuiker. Calibratie en validatie Model Noordzeekanaal. Gevoeligheidsanalyse en verificatie. Rapport Fase 2. Alkyon rapport no. A1215R2r1. November 2003.

Stelling, G. and Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*; **43**:1-23.

Sweers H.E.. A nomogram to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *J. of Hydrology*. 30, (1976), 375-401.

⁷ ontbrekende referenties zijn te vinden in de overzichtartikelen van Sweers (1976) of Boderie en Dalgarno (2003).

TRIWAQ-three dimensional shallow water flow model. Technical documentation. SIMONA report number 99-01. Version 2.2. November 2001.

Vollebregt E.A.H., M.T.R. Roest and J.W.M. Lander. Large scale computing at Rijkswaterstaat. *Parallel Computing* 29 (2003) 1-20.

User Guide WAQUA/TRIWAQ 2004.

Vos R.J., E.D. de Goede en R.E. Uittenboogaard. Validation of a 3D temperature model for the North sea with in-situ data and remote sensing data. WL I Delft Hydraulics Report Z2506, 1999.

Zijlema, M. (2000). Computing non-hydrostatic free-surface flows with TRIWAQ using a pressure correction technique. Werkdocument RIKZ /OS/2000.137X, National Institute for Coastal and Marine Management, The Hague, The Netherlands.

Zijlema, M and Stelling, G..S. (2005). Further experiences with computing non-hydrostatic free-surface flows involving water waves. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*; **48**:169-197.

A.1 Voorbeeld van invoerbestand en resultaat van een warmtelozing met TRIWAQ (zonder koeling aan wateroppervlak) op de Westerschelde

Hieronder is een werkende invoer gegeven voor de blokken 'FLOW' en 'TRANSPORT'.

```
FLOW
PROBLEM
TIMEFRAME
  DATE = '1 FEB 2003'
  TSTART = 60.00000
#  TSTOP = 5760.00000
  TSTOP = 420.00000
METHODVARIABLES
  TSTEP = 1.00000
  ITERCON = 16
  ITERMOM = 2
  ITERACCURACY = 0.00050
SMOOTHING
  TLSMOOTH = 60
DRYING
  IDRYFLAG = 1
  DEPCRIT = 0.20000
  DUPWND = 999999.00000
FRICTION
GLOBAL
  TICVAL = 10.00000
  FORMULA = 'Manning'
UDIREC
GLOBAL
  CONST_VALUES = 0.02200
LOCAL
BOX: MNMN = ( 2, 26; 58, 75) Const_values
= 0.02200 # OS14
BOX: MNMN = ( 25, 76; 83, 125) Const_values
= 0.02200 # RPBTN
BOX: MNMN = ( 15, 126; 50, 295) Const_values
= 0.02200 # STAVNSE
BOX: MNMN = ( 51, 126; 83, 250) Const_values
= 0.02200 # BERGSDSS
BOX: MNMN = ( 90, 67; 119, 99) Const_values
= 0.01900 # WESTKPLE
BOX: MNMN = ( 120, 67; 150, 99) Const_values
= 0.01900 # CADZD
BOX: MNMN = ( 87, 100; 150, 136) Const_values
= 0.02000 # VLISSGN
BOX: MNMN = ( 87, 137; 150, 174) Const_values
= 0.02100 # TERNZN
BOX: MNMN = ( 92, 175; 150, 224) Const_values
= 0.02000 # HANSWT
BOX: MNMN = ( 100, 225; 160, 235) Const_values
= 0.02100 # BAAL
BOX: MNMN = ( 100, 236; 160, 295) Const_values
= 0.02200 # BATH
BOX: MNMN = ( 161, 225; 190, 295) Const_values
= 0.02600 # LIEF
```

```

BOX: MNMN = ( 191, 66; 212, 295) Const_values
= 0.04000 # ANTW
BOX: MNMN = ( 160, 66; 190, 221) Const_values
= 0.03500 # SCHELLE
VDIREC
GLOBAL
CONST_VALUES = 0.02200
LOCAL
BOX: MNMN = ( 2, 26; 58, 75) Const_values
= 0.02200 # OS14
BOX: MNMN = ( 25, 76; 83, 125) Const_values
= 0.02200 # RPBTN
BOX: MNMN = ( 15, 126; 50, 295) Const_values
= 0.02200 # STAVNSE
BOX: MNMN = ( 51, 126; 83, 250) Const_values
= 0.02200 # BERGSDSS
BOX: MNMN = ( 90, 67; 119, 99) Const_values
= 0.01900 # WESTKPLE
BOX: MNMN = ( 120, 67; 150, 99) Const_values
= 0.01900 # CADZD
BOX: MNMN = ( 87, 100; 150, 136) Const_values
= 0.02000 # VLISSGN
BOX: MNMN = ( 87, 137; 150, 174) Const_values
= 0.02100 # TERNZN
BOX: MNMN = ( 92, 175; 150, 224) Const_values
= 0.02000 # HANSWT
BOX: MNMN = ( 100, 225; 160, 235) Const_values
= 0.02100 # BAAL
BOX: MNMN = ( 100, 236; 160, 295) Const_values
= 0.02200 # BATH
BOX: MNMN = ( 161, 225; 190, 295) Const_values
= 0.02600 # LIEF
BOX: MNMN = ( 191, 66; 212, 295) Const_values
= 0.04000 # ANTW
BOX: MNMN = ( 160, 66; 190, 221) Const_values
= 0.03500 # SCHELLE
VISCOSITY
EDDYVISCOSITYCOEFF = 30.000

```

```

BARRIERcoefficients
INCLUDE FILE
='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvoer/kustzuid/kustzuid_versie2.barcoef'

```

```

FORCINGS
INITIAL
WATLEVEL
GLOBAL
CONST_VALUES = 1.00

```

```

BOUNDaries

```

```

INCLUDE
FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvoer/kustzuid/bound-flow-hc'

```

```

TIMESERIES
INCLUDE
FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvoer/kustzuid/ts_schelle_rivier'

```

```

        INCLUDE
        FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvo
        er/kustzuid/rvw-hc-met'

        BARRIERS
        INCLUDE
        FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvo
        er/kustzuid/kustzuid_versie2.barr-ini'

        DISCHARGES
        SOURCE : P195 SERIES = 'irregular' LAYER = 1
            TIME_AND_VALUE = 0 0:00 100.0
        SOURCE : P281 SERIES = 'irregular' LAYER = 1
            TIME_AND_VALUE = 0 0:00 100.0

        CHECKPOINTS
        LEVELSTATIONS
        INCLUDE
        FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvo
        er/kustzuid/kustzuid_versie2.ckpt_level'
        CURRENTSTATIONS
        INCLUDE
        FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvo
        er/kustzuid/kustzuid_versie2.ckpt_current'
        VSECTIONS
        INCLUDE
        FILE='/project/dh/simona/SIMONA_SYS/droogval/modelinvo
        er/kustzuid/kustzuid_versie2.ckpt_crossv'

        TRANSPORT
        PROBLEM
        CONSTITUENTS
        CO 1:
            POLUTANT ='SALINITY'
            PUNIT    =' kg/m**3      '
        CO 2:
            POLUTANT ='TEMPERAT'
            PUNIT    =' degCel  '
        SALINITY
        CO 1
        TEMPERATURE
        DELTAT =0.5
        TEMPMODEL = 3
        CLOUDFRACT = 0.
        AREAWATER =1.0
        ABSORPTION =0.
        PRESSURE =0.
        MASSTRANSFER =0.
        CO 2
        METHODVARIABLES
            THETA= 0.500000
        TURBULENCE_TRANS
        ENERGY
        DISSIPATION
        FORCINGS
        INITIAL
        CONSTITUENTS
            INCLUDE FILE='kustzuid_v2t.trconst'

```

```
BOUNDaries
  INCLUDE FILE='kustzuid_v2t.bound-tran'

DISCharges
  INCLUDE FILE='kustzuid_v2t_3d.dis-tran'

CHECKPOINTS
  CONSTITUENT_STATIONS
    INCLUDE FILE='kustzuid_v2t.ckpt_const'

DENSITIES
  CEQSTT           =    0.6980
# TEMPWATER       =    10.0000
  RHOREF           =    1.0000
```

Het bestand 'kustzuid_v2t_3d.dis-tran' bevat de geloosde hoeveelheden:

```
SOURCE : CO 1, P195, SERIES='irregular'
         TIME_and_concentration=  0  0:00 30000E-5
SOURCE : CO 2, P195, SERIES='irregular'
         TIME_and_concentration=  0  0:00 33000.0
```

Voor temperatuur (stof 2) wordt een massa geloosd van $33000 \text{ }^\circ\text{Cm}^3\text{s}^{-1}$ wat voor een lozing van 33°C betekent dat er een debiet is $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De lozing is hier voor alle lagen. De achtergrondtemperatuur is 10°C .

Het geloosde vermogen van de centrale is $4023.0 \cdot (33-10) \cdot 1000.0 = 92 \text{ MW}$. Bij een rendement van 33% betekent dit dat de centrale een vermogen had van 138 MW.

Hieronder volgt een resultaat van zout en temperatuur voor de Westerschelde. Het resultaat is 360 minuten na begin van de berekening.

