



Thermische lozingen Maasvlakte 1 & 2

Verandering van de watertemperatuur in de havenbekkens door de aanleg van Maasvlakte 2 en de toename van koelwatergebruik

Definitief Rapport

Vertrouwelijk | Confidential

J.E.S. Ballot

TU Delft – Faculteit Civiele Techniek & Geowetenschappen
Havenbedrijf Rotterdam – Projectorganisatie Maasvlakte 2
Deltares – WL | Delft Hydraulics

April 2008

Thermische lozingen Maasvlakte 1 & 2

De verandering van de watertemperatuur in de havenbekkens door de aanleg van de 2^e Maasvlakte en toename van koelwatergebruik

Eindrapport (april 2008)

Vertrouwelijk / Confidential

J.E.S. Ballot

Naam: J.E.S. Ballot
Studienummer: 1025147
Periode: juli 2007 t/m april 2008

Afstudeercommissie

| | |
|---------------------------|------------------------------------|
| Prof. Ir. H. Ligteringen | (TUDelft) |
| Ir. T. Vellinga | (TUDelft / Havenbedrijf Rotterdam) |
| Dr. Ir. W.S.J. Uijttewaal | (TUDelft) |
| Ir. R.J. Labeur | (TUDelft) |
| Dr. Ir. F. Kleissen | (Deltares) |
| Ing. M. Bresser | (Havenbedrijf Rotterdam) |

VOORWOORD

In opdracht van het Havenbedrijf Rotterdam N.V. heb ik dit afstudeerverslag geschreven als afsluiting van mijn master in *'Hydraulic Engineering'* aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het onderwerp valt binnen de richting *'Ports & Waterways'*, maar heeft echter veel sterke raakvlakken met de afstudeerrichting *'Environmental Fluid Mechanics'*.

Het afstudeerproject behandelt de problematiek rond de thermische lozingen in de Rotterdamse haven in verband met de aanleg van de 2^e Maasvlakte en de geplande toename van koelwatergebruik in het Maasvlaktegebied. Met behulp van het numerieke model Delft3D-FLOW worden voorspellingen gedaan over de warmteverspreiding en worden tevens mogelijke oplossingsrichtingen benaderd om de temperatuurverhoging te reduceren.

Bij dezen wil ik mijn afstudeercommissie bedanken voor hun hulp gedurende mijn afstudeerproject: professor Ligteringen (TUDelft) voor het efficiënt voorzitten van de afstudeercommissie, de heer Vellinga (TUDelft en Havenbedrijf Rotterdam) voor het aanbieden van deze afstudeerplek bij het Havenbedrijf, de heer Kleissen (Deltares) en de heer Bresser (Havenbedrijf Rotterdam) voor de vele leuke en leerzame gesprekken, de heer Labeur (TUDelft) voor zijn vele kritische maar zeer nuttige opmerkingen waar ik veel van geleerd heb en de heer Uijtewaal (TUDelft) voor een second opinion vanuit de sectie vloeistofmechanica. Mijn dank is groot voor de medewerking die ik van de afstudeercommissie gekregen heb, en ook van de heer Konter (Havenbedrijf Rotterdam) voor het meekijken en denken vanaf de zijlijn.

Daarnaast wil ik mijn mede-afstudeerders bij WL en het Havenbedrijf bedanken voor de nuttige tips, de vele leuke gesprekken en vele koppen koffie tijdens 'cookie time'. Hetzelfde geldt voor mijn twee huisgenoten. Speciaal wil ik mijn ouders bedanken voor alle hulp en steun en natuurlijk Melissa voor het geduldig aanhoren van alle afstudeerperikelen. Zonder deze steun was het een stuk lastiger geweest.

Ik hoop dat u met plezier dit rapport zal lezen.



Jochem Ballot

Delft, april 2008

SAMENVATTING

Inleiding en doelstelling onderzoek

Door de aanleg van Maasvlakte 2 zal de E.ON-centrale niet meer in de Noordzee lozen, maar in de toekomstige havenbekkens. In combinatie met een geplande toename van het koelwatergebruik in het Maasvlaktegebied (met een totale warmtelast van ongeveer 4200 MWth) zal de watertemperatuur in de havenbekkens verhogen.

Deze verhoging kan mogelijk leiden tot nadelige ecologische effecten, problemen met de vergunningverlening voor koelwatergebruik (gebaseerd op de zogeheten CIW-richtlijn) en/of rendementsverlies van de koelwatergebruikers zelf.

De hoofddoelstelling van deze studie is het voorspellen van het effect van de cumulatieve warmtelozingen in de Maasvlakte 1 & 2 op de stijging van de watertemperatuur in de havenbekkens, het in kaart brengen van de mogelijke effecten hiervan en analyseren hoe deze temperatuurstijging eventueel gereduceerd kan worden.

Belang van onderzoek

Door koelwatergebruik treden mogelijk ecologische effecten op in koelwaterketen zelf (onttrekking van juveniele vis), of in het ontvangende watersysteem (bijvoorbeeld wildgroei van exoten). Hierop is de CIW-richtlijn voor de vergunningverlening gebaseerd met een drietal criteria: voor de onttrekking, de mengzone en de opwarming. Over de grootte van de mengzone bestaat enige onduidelijkheid. Van belang is of het water voor schelpdierachtigen of voor karperachtigen gekenmerkt wordt. In het eerst geval is de maximale temperatuurverhoging buiten de mengzone 2°C en de maximaal toegestane absolute temperatuur 25°C, voor karperachtigen respectievelijk 3°C en 28°C.

Wanneer de watertemperatuur jaargemiddeld ongeveer 1°C opwarmt bij de inlaat van een energiecentrale kan dit leiden tot een rendementsverlies in de orde van enkele miljoenen euro per jaar.

Warmtetransportprocessen

De volgende processen zijn verantwoordelijk voor het transport van warmte in de havenbekkens:

- Menging van een thermische lozing in het ontvangende water;
- Meevoering (advectie) van een warmtepluim door de aanwezige stroming in het ontvangende water (onder andere t.g.v. de getijbeweging, zoetwaterafvoer en het lozingsdebiet zelf).
- Afkoeling of opwarming van water door warmteuitwisseling met de atmosfeer.

Warmtegeleiding via de waterbodem is te verwaarlozen. Uit eerste schattingen (met behulp van volumeverhoudingen, verblijftijden van warmte in de havenbekkens en een warmtebalans) blijkt dat het getij verreweg de grootste invloed heeft op de afkoeling van de watertemperatuur in de havenbekkens en niet de afkoeling naar de atmosfeer.

De stratificatie in de havenbekkens van het Maasvlaktegebied blijkt een belangrijke rol te spelen bij het near-field gedrag van thermische lozingen in dit gebied. Een thermische lozing is in de meeste gevallen – ondanks de temperatuurverhoging – door het hogere zoutgehalte toch zwaarder dan het ontvangende water, waardoor een ontstane warmtepluim in evenwicht komt rond het interne zoet-zout grensvlak enkele meters onder het wateroppervlak. Alleen in de buurt van de lozingslocatie van de E.ON-centrale, de Oostelijke Yangtzehaven, zal de warmtepluim aan het oppervlak komen en vindt lokaal relatief veel afkoeling naar de atmosfeer plaats. Bij weinig stratificatie zullen de warmtepluimen voornamelijk opdrijvend zijn.

Mogelijke effecten van het zakken van de warmtepluimen zijn een vermindering van afkoeling door warmteuitwisseling met de atmosfeer en mogelijk hogere innametemperaturen (t.g.v. recirculatie) bij

de inlaatlocaties, indien ingenomen wordt op dezelfde diepte als waar de warmtepluim een neutraal drijfvermogen heeft.

Verder blijkt uit de warmtebalans dat de temperatuurverhoging bij een uniforme spreiding van de warmte in het Maasvlaktewater ongeveer 1,5°C te bedragen in een gemiddelde zomersituatie. Vanwege overschrijdingsgevaar van de CIW-richtlijn en mogelijk rendementsverlies door een significante temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties van koelwater, geeft dit aanleiding tot een verdere analyse van de warmteverspreiding met behulp van een 3D-numeriek stromingsmodel.

Opzet model

De warmteverspreiding is gemodelleerd met het hydrostatische Delft3D-FLOW model. Deltares heeft hiermee in opdracht van het Havenbedrijf in het verleden reeds enkele studies naar de warmteverspreiding in de havenbekkens mee gedaan.

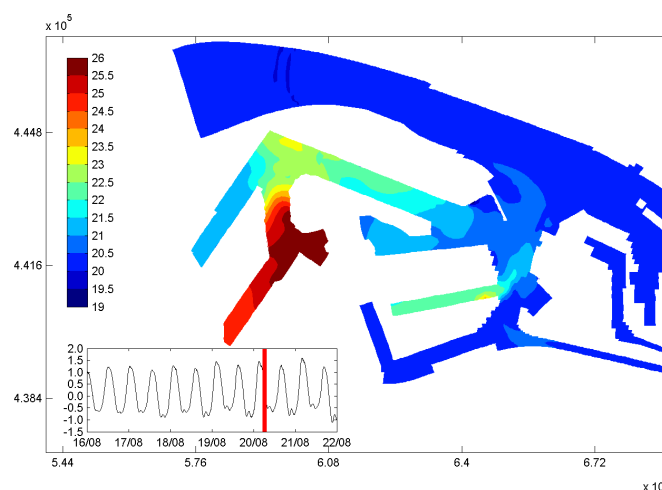
De randen van het model liggen in de Noordzee, in de Nieuwe Waterweg en in het Hartelkanaal. Als randvoorwaarde aan de Noordzeekant wordt de waterstand verlopend van een doortij naar een springtij opgelegd. Door de aanname van hydrostatische druk in het hier gebruikte Maasvlakte 2 model, worden de optredende verticale versnellingen in het near-field gebied van een lozing niet juist weergegeven. De thermische lozingen zijn daarom op hun te verwachten evenwichtshoogte in het model geïmplementeerd.

Het model is gevalideerd met metingen en na enkele aanpassingen blijkt het de waterstand en stroomsnelheden voldoende nauwkeurig weer te geven, maar vertoont het een teveel lineair verlopend verticaal saliniteitsverloop. De warmte wordt nu over een grotere laagdikte ingesloten in vergelijking met de werkelijkheid.

Modelresultaten

De getijbeweging is dominant voor de verspreiding en afkoeling van de warmtelasten. Door de geometrie van de havenbekkens is of het springtij of het doortij maatgevend voor extra opwarming, afhankelijk van de te beschouwen locatie. In combinatie met de getijbeweging blijkt ook de zoetwaterafvoer invloed op de advectie en afkoeling van de warmtepluimen te hebben. Hoe groter de zoetwaterafvoer, des te hoger het netto transport van warmte uit het Maasvlaktegebied, dus des te lager de temperatuurverhoging in de havenbekkens.

De hoogste temperaturen treden op in de oostelijke Yangtzehaven ten gevolge van de E.ON/Lyondell/chemie-lozing, namelijk gemiddeld 5°C aan het wateroppervlak. Hier speelt de afkoeling naar de atmosfeer een relatief grote rol, in tegenstelling tot bij de rest van de havenbekkens.



Voorbeeld van de warmteverspreiding in het havenbekken.

Toetsing aan de CIW-richtlijn

Om te kunnen voldoen aan de CIW-richtlijn met de huidige toekomstplannen voor koelwatergebruik in het Maasvlaktegebied, moet de mengzonegrens van de E.ON/Lyondell/Chemie-lozing of bij de monding van de Yangtzehaven gekozen worden, of bij de monding van de Europahaven. Het laatste geeft meer lozingsruimte, bijvoorbeeld in het geval dat er ooit vier E.ON-units tegelijkertijd operationeel zijn.

De monding van de Amazonehaven als mengzonegrens voor de Electrabel lozing blijkt geen problemen op te leveren, zelfs niet als in de toekomst een tweede unit in gebruik wordt genomen.

De EnecoGen/LionGas mengzone zal voldoen aan het mengzonecriterium van maximaal 25% van de dwarsdoorsnede ter plaatse van het lozingspunt.

Op de lange termijn moet ook rekening worden gehouden met de klimaatverandering. De kans op overschrijding van de maximaal toegestane achtergrondtemperatuur neemt bij een ongewijzigde CIW-richtlijn dan steeds meer toe, met als gevolg dat over 40 jaar de elektriciteitsproductie jaarlijks gemiddeld enkele dagen moet worden teruggedraaid (clipping).

Toetsing aan economische effecten

Recirculatie, oftewel een verhoging van de temperatuur bij de inlaatpunten, is vooral te verwachten bij de E.ON-inlaat. De jaargemiddelde temperatuurverhoging t.g.v. recirculatie is ongeveer 0,7°C, maar kan in een zomerperiode tijdens springtij en een lage zoetwaterafvoer oplopen naar ruim 1°C. Mogelijk toekomstige chemie op de Maasvlakte 2 zal 1,5 tot 3°C warmer koelwater innemen, sterk afhankelijk van de innamediepte. Het lijkt erop bij de EnecoGen-centrale, dat bij een innamediepte van -12mNAP (directe) recirculatie mogelijk met regelmaat kan voorkomen. Om meer uitsluitel te kunnen geven over de directe recirculatie tussen de inlaat en uitlaat van EnecoGen, is nader onderzoek nodig. De jaargemiddelde temperatuurverhoging bij Electrabel is laag, rond de 0,3°C, voornamelijk ten gevolge van de eigen recirculatie.

Schade ten gevolge van rendementsverlies zal voornamelijk bij de E.ON-centrale voorkomen (chemie op Maasvlakte 2 buiten beschouwing gelaten), en wordt geschat op ongeveer twee miljoen euro per jaar op basis van in dit rapport gehanteerde uitgangspunten. Verlies door het verplicht moeten terugdraaien van de elektriciteitsproductie (clipping) zal waarschijnlijk zelden hoeven te gebeuren. Er geldt echter dat door klimaatverandering op de lange termijn wel enkele dagen per jaar clipping nodig is.

Reductie temperatuurverhoging

In eerste instantie hoeven dus geen (dure) maatregelen getroffen te worden om de temperatuur bij de mengzonegrenzen te verlagen. Eventuele knelpunten concentreren zich rond de E.ON & Lyondell-lozing, zowel in de gehele Yangtzehaven als bij de inname locatie. De koelwaterlozingen van Electrabel en EnecoGen lijken nauwelijks nadelige effecten op te leveren.

Een maatregel om de inname temperatuur van de E.ON-centrale te verlagen kan alleen rendabel zijn, als de kosten ervan op den duur kleiner zijn dan de te verwachten rendementsverliezen.

Na analyse en afweging van alle mogelijke maatregelen, blijven de volgende reële opties over:

- Nulalternatief: niets doen en het rendementsverlies van E.ON-centrale afkopen
- Dieper innemen bij de E.ON inlaat, bij voorkeur met variabele diepte-inname: zowel bovenin als onderin de waterkolom een innamepunt.
- Vestiging van thermische lozers in het Maasvlaktegebied minimaliseren, of plaatsen op de buitencontour van Maasvlakte 2 met inname uit en lozing in de Noordzee.
- By-pass bij koelwatercircuit van de E.ON-centrale toepassen, indien de temperatuurverhoging in de Oostelijke Yangtzehaven of bij de inlaat van toekomstige chemie op de Maasvlakte 2 verlaagd moet worden. Het omdraaien van de inlaat en uitlaat van de E.ON-centrale is in dit geval nog veel effectiever, maar ook duurder in uitvoering.

INHOUDSOPGAVE

| | |
|---|-----------|
| VOORWOORD | III |
| SAMENVATTING | V |
| FIGUREN | XIII |
| TABELLEN | XVII |
| | |
| 1 INLEIDING | 1 |
| 1.1 Algemeen | 1 |
| 1.2 Leeswijzer | 2 |
| 2 PROBLEEMANALYSE | 3 |
| 2.1 Huidige situatie thermische lozingen | 3 |
| 2.2 Toekomstige situatie thermische lozingen | 4 |
| 2.3 Probleemstelling | 6 |
| 2.4 Doelstellingen | 6 |
| 2.5 Aanpak onderzoek | 6 |
| 3 EFFECTEN EN BEPERKINGEN TOEKOMSTIGE LOZINGEN | 9 |
| 3.1 Geplande ontwikkelingen thermische lozingen Maasvlaktegebied | 9 |
| 3.2 Ecologische effecten opwarming havenbekkens | 11 |
| 3.2.1 <i>Effecten in de koelwaterketen (van inlaat tot uitlaat)</i> | 11 |
| 3.2.2 <i>Effecten in het oppervlaktewater</i> | 11 |
| 3.3 Wetgeving koelwaterlozingen | 12 |
| 3.4 Economische gevolgen opwarming havenbekkens | 14 |
| 3.4.1 <i>Rendementsverlies</i> | 14 |
| 3.4.2 <i>Clipping</i> | 15 |
| 3.5 Nautische beperkingen aan thermische lozingen | 16 |
| 3.6 Overige effecten thermische lozingen | 17 |
| 4 OMGEVINGSCONDITIES | 19 |
| 4.1 Dimensies havenbekkens | 19 |
| 4.1.1 <i>Bergend oppervlak</i> | 19 |
| 4.1.2 <i>Gemiddelde diepte en volume</i> | 20 |
| 4.2 Waterbeweging | 20 |
| 4.2.1 <i>Getij Beerkanaal</i> | 20 |
| 4.2.2 <i>Komberging havenbekkens</i> | 21 |
| 4.2.3 <i>Zoetwaterafvoer</i> | 22 |
| 4.2.4 <i>Stroomsnelheden</i> | 24 |
| 4.2.5 <i>Windcirculatie</i> | 25 |
| 4.3 Watertemperaturen | 26 |
| 4.3.1 <i>Dieptegemiddelde temperaturen</i> | 26 |
| 4.3.2 <i>Verticale temperatuursgradiënten</i> | 27 |
| 4.4 Saliniteit van het oppervlaktewater | 28 |
| 4.4.1 <i>Horizontale saliniteitsgradiënten</i> | 28 |
| 4.4.2 <i>Verticale saliniteitsgradiënten</i> | 29 |
| 4.5 Stratificatie in de havenbekkens | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | WARMTETRANSPORTPROCESSEN IN HAVENBEKKENS | 33 |
| 5.1 | Algemene hydrodynamische transportprocessen..... | 33 |
| 5.2 | Transport en menging in het ontvangende watersysteem..... | 34 |
| 5.2.1 | <i>Advectie van warmte door stroming.....</i> | 34 |
| 5.2.2 | <i>Verblijftijden koelwater in havenbekkens.....</i> | 35 |
| 5.2.3 | <i>Directe recirculatie.....</i> | 36 |
| 5.2.4 | <i>Turbulente diffusie van een warmtepluim.....</i> | 37 |
| 5.2.5 | <i>Volumeverhouding koelwaterlozing, komberging & zoetwaterafvoer.....</i> | 38 |
| 5.3 | Warmteuitwisseling met de atmosfeer | 39 |
| 5.3.1 | <i>Absolute temperatuur modellen.....</i> | 40 |
| 5.3.2 | <i>Exces temperatuur modellen.....</i> | 40 |
| 5.3.3 | <i>Relatie tussen verblijftijden en uitwisseling met atmosfeer.....</i> | 41 |
| 5.4 | Warmtegeleiding via de waterbodem..... | 42 |
| 5.5 | Warmtebalans Maasvlaktegebied | 43 |
| 5.5.1 | <i>Aannames voor schematisatie.....</i> | 43 |
| 5.5.2 | <i>Opstellen warmtebalans.....</i> | 43 |
| 5.5.3 | <i>Resultaten warmtebalans.....</i> | 45 |
| 5.5.4 | <i>Discussie resultaten warmtebalans.....</i> | 46 |
| 6 | NEAR-FIELD ANALYSE | 49 |
| 6.1 | Near-field processen..... | 50 |
| 6.1.1 | <i>Initiële menging van een warmtelozing.....</i> | 50 |
| 6.1.2 | <i>Laterale spreiding van warmtepluim in stabiel gebied.....</i> | 51 |
| 6.2 | Onttrekking bij inlaatlocaties..... | 52 |
| 6.2.1 | <i>Analyse selectieve onttrekking.....</i> | 52 |
| 6.2.2 | <i>Stroomsnelheden bij onttrekking.....</i> | 54 |
| 6.3 | Lozing bij uitlaatlocaties | 54 |
| 6.3.1 | <i>Karakteristieken en lengteschalen.....</i> | 55 |
| 6.3.2 | <i>Analyse ‘zakkende’ warmtelozingen.....</i> | 56 |
| 6.3.3 | <i>Analyse dimensies mengzones.....</i> | 57 |
| 6.3.4 | <i>Analyse stroomsnelheden bij lozingslocaties.....</i> | 58 |
| 6.4 | Conclusies near-field analyse | 59 |
| 7 | FAR-FIELD ANALYSE: OPZET MODEL | 61 |
| 7.1 | Far-field processen..... | 61 |
| 7.2 | Toelichting Delft3D-FLOW en Maasvlakte 2-model | 62 |
| 7.2.1 | <i>Algemene toelichting Delft3D-FLOW.....</i> | 62 |
| 7.2.2 | <i>Herkomst Maasvlakte 2-model.....</i> | 63 |
| 7.2.3 | <i>Numerieke eigenschappen model.....</i> | 64 |
| 7.3 | Hydrodynamica van het model..... | 65 |
| 7.3.1 | <i>Hydrostatische drukverdeling.....</i> | 65 |
| 7.3.2 | <i>Ondiepwatervergelijkingen.....</i> | 66 |
| 7.3.3 | <i>Transport van saliniteit en temperatuur.....</i> | 67 |
| 7.3.4 | <i>Turbulentie sluitingsmodel.....</i> | 67 |
| 7.3.5 | <i>Warmteflux-model.....</i> | 68 |
| 7.3.6 | <i>Samenvatting hydrodynamica en thermodynamica van het model.....</i> | 69 |
| 7.4 | Begin- en randvoorwaarden..... | 69 |
| 7.5 | Validatie model..... | 70 |
| 7.5.1 | <i>Validatie van waterstanden.....</i> | 71 |
| 7.5.2 | <i>Validatie van stroomsnelheden.....</i> | 72 |
| 7.5.3 | <i>Validatie van saliniteit.....</i> | 74 |
| 7.5.4 | <i>Validatie van temperatuurverdeling in de havenbekkens.....</i> | 76 |
| 7.5.5 | <i>Conclusie werking model.....</i> | 77 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8 | MODELRESULTATEN..... | 79 |
| 8.1 | Opzet weergave modelresultaten | 79 |
| 8.2 | Gevoeligheidsanalyse relevante processen..... | 80 |
| 8.2.1 | <i>Keuze van relevante processen voor de gevoeligheidsanalyse.....</i> | <i>80</i> |
| 8.2.2 | <i>Invloed van variatie in getij.....</i> | <i>82</i> |
| 8.2.3 | <i>Invloed van variatie in zoetwaterafvoer.....</i> | <i>86</i> |
| 8.2.4 | <i>Invloed van alternatieve lozingsscenario's.....</i> | <i>88</i> |
| 8.3 | Samenvatting resultaten temperatuurverhoging..... | 89 |
| 8.3.1 | <i>Definitie maatgevende frequentiescenario's.....</i> | <i>89</i> |
| 8.3.2 | <i>Samenvatting temperatuurverhoging bij mengzonegrenzen.....</i> | <i>90</i> |
| 8.3.3 | <i>Samenvatting temperatuurverhoging bij inlaatpunten.....</i> | <i>90</i> |
| 8.4 | Discussie resultaten toekomstig scenario | 91 |
| 8.4.1 | <i>Nauwkeurigheid resultaten</i> | <i>91</i> |
| 8.4.2 | <i>Verloop temperatuurverhogingen in de tijd</i> | <i>93</i> |
| 8.4.3 | <i>Toetsing resultaten aan CIW-richtlijn</i> | <i>93</i> |
| 8.4.4 | <i>Toetsing resultaten aan economische gevolgen.....</i> | <i>94</i> |
| 8.5 | Conclusie resultaten | 95 |
| 9 | REDUCTIE TEMPERATUURVERHOOGING..... | 97 |
| 9.1 | Uitgangspunten | 97 |
| 9.2 | Overzicht en eerste afweging..... | 98 |
| 9.2.1 | <i>Overzicht oplossingsrichtingen.....</i> | <i>98</i> |
| 9.2.2 | <i>Globale afweging maatregelen op basis van uitvoerbaarheid.....</i> | <i>99</i> |
| 9.2.3 | <i>Globale afweging maatregelen op basis van effectiviteit.....</i> | <i>100</i> |
| 9.2.4 | <i>Globale afweging maatregelen op basis van kosten.....</i> | <i>102</i> |
| 9.2.5 | <i>Conclusies over de tot nu toe onderzochte maatregelen.....</i> | <i>102</i> |
| 9.3 | Nader te onderzoeken oplossingsrichtingen | 103 |
| 9.3.1 | <i>Extra koelwaterdebiet en kleinere temperatuurverhoging E.ON-centrale.....</i> | <i>103</i> |
| 9.3.2 | <i>Extra temperatuurverhoging en kleiner koelwaterdebiet E.ON-centrale.....</i> | <i>105</i> |
| 9.3.3 | <i>Verdiepte inname E.ON centrale.....</i> | <i>107</i> |
| 9.3.4 | <i>Variabele diepte-inname E.ON centrale.....</i> | <i>109</i> |
| 9.4 | Samenvatting afweging oplossingsrichtingen..... | 110 |
| 10 | CONCLUSIES | 111 |
| 11 | AANBEVELINGEN | 113 |
| | LITERATUUR..... | 115 |
| | SYMBOLEN | 119 |
| | AFKORTINGEN..... | 121 |
| | BIJLAGEN..... | 113 |
| A | Reeds uitgevoerde studies koelwaterproblematiek MV1&2 | 115 |
| A.1 | <i>Chronologisch overzicht eerdere studies.....</i> | <i>115</i> |
| A.2 | <i>Samenvatting modelresultaten eerdere studies.....</i> | <i>117</i> |
| B | Achtergrondinformatie | 121 |
| B.1 | <i>Achtergrondinformatie ecologische effecten.....</i> | <i>121</i> |
| B.2 | <i>Achtergrondinformatie wetgeving koelwaterlozingen.....</i> | <i>123</i> |
| B.3 | <i>Achtergrondinformatie voorspelling klimaatverandering.....</i> | <i>126</i> |
| B.4 | <i>Achtergrondinformatie werking koelwatersysteem energiecentrale.....</i> | <i>128</i> |
| B.5 | <i>Krantenartikelen ontwikkelingen Maasvlakte 1 & 2 op energiegebied.....</i> | <i>130</i> |
| C | Excel-sheets warmtebalans | 133 |

| | | |
|---|--|------------|
| D | Informatie Near-field analyse | 135 |
| | <i>D.1 Tabel dichtheid water afhankelijk van temperatuur en saliniteit</i> | <i>135</i> |
| | <i>D.2 Voorbeeld resultaten CORMIX.....</i> | <i>136</i> |
| E | Resultaten Delft3D-FLOW..... | 139 |
| | <i>E.1 CIW-richtlijn: temperatuurverhoging bij mogelijke grenzen mengzones</i> | <i>140</i> |
| | <i>E.2 Recirculatie: temperatuurverhoging bij inlaatlocaties.....</i> | <i>141</i> |
| F | Mogelijke maatregelen Koelwaterproblematiek MV2 | 147 |
| G | Overzichtskaart Maasvlakte 1 & 2 in eindfase met thermische lozingen..... | 149 |

FIGUREN

| | | |
|-------------|--|----|
| Figuur 1-1 | Impressie Maasvlakte 2, gezien vanaf de Noordzee | 1 |
| Figuur 2-1 | Vergunde warmtelasten in de Rotterdamse Haven [STUURGROEP MILIEUMONITORING REGIO ROTTERDAM, 2007] | 3 |
| Figuur 2-2 | Inname- en lozingspunten van E.ON en Lyondell | 4 |
| Figuur 2-3 | Grafische weergave probleemanalyse koelwaterlozing E.ON centrale..... | 5 |
| Figuur 2-4 | Schematisatie aanpak onderzoek..... | 7 |
| Figuur 3-1 | Impressie van mengzone met koelwaterpluim [RIKSWATERSTAAT, 2004]. De weergegeven temperaturen gelden voor water voor karperachtigen. | 13 |
| Figuur 3-2 | Onderschrijdingsverdeling van het zicht in het Maasvlaktegebied (in rood omcirkelt). [Havenbedrijf Rotterdam N.V., 2004]..... | 17 |
| Figuur 4-1 | Oppervlaktes van de havenbekkens in het Maasvlakte-gebied..... | 20 |
| Figuur 4-2 | Getijkrommen Beerkanaal, tijd in uren t.o.v. HW [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004] | 21 |
| Figuur 4-3 | Overschrijdingsverdelingen van hoogwaterstanden (links) en laagwaterstanden (rechts). [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM 2004]..... | 21 |
| Figuur 4-4 | Afvoer bij Lobith in de maanden juni tot en met september van de jaren 2001 t/m 2006. [www.waterbase.nl] | 23 |
| Figuur 4-5 | Gemiddelde zoetwaterafvoeren in de maand augustus, bepaald met behulp van metingen bij Lobith, Maassluis en de Maasmond. [www.waterbase.nl]..... | 23 |
| Figuur 4-6 | Doorsnede Suurhoffbrug, ter bepaling van de afvoer van het Hartelkanaal. Rechts zijn de gemeten stroomsnelheden gedurende een getijperiode weergegeven. | 24 |
| Figuur 4-7 | Cumulatieve procentuele verdeling van de windkracht per richting (linkerfiguur) en per maand (rechterfiguur), locatie Hoek van Holland [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004] | 25 |
| Figuur 4-8 | Watertemperaturen bij Hoek van Holland (links) en de monding van het Hartelkanaal in de Maasvlakte (rechts) in de periode juli - half september. | 27 |
| Figuur 4-9 | Gemiddelde aantal dagen overschrijding van een bepaalde absolute achtergrondtemperatuur per jaar zowel ter plaatse van de monding van het Hartelkanaal in de Maasvlakte als bij Hoek van Holland. Schatting gebaseerd op data uit de periode 2000 - 2007. | 27 |
| Figuur 4-10 | Links: estuarium met zoutwig (a), gedeeltelijk gemengd estuarium (b) en een volledig gemengd estuarium (c) [FISCHER <i>et al.</i> , 1979]. Rechts: mechanisme van zoutindringing in het Maasvlaktegebied. | 29 |
| Figuur 4-11 | Links: temperatuurverschil tussen bovenlaag en onderlaag in havenbekkens. Rechts: gemeten saliniteit in Europahaven: bij lage zoetwaterafvoer en springtij wordt het verloop van de maximale saliniteit benaderd, en bij hoge zoetwaterafvoer in combinatie met doortij het minimum scenario. | 30 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figuur 4-12 | Rechts: diagram voor de dichtheid van zeewater als een functie van temperatuur en saliniteit. Onder: verschillende mogelijke lagensystemen. Het drie lagensysteem blijkt in het grootste deel van de Maasvlakte voor te komen [JIRKA <i>et al.</i> 1996, p. 4-13]..... | 31 |
| Figuur 4-13 | Schets van de verticale dichtheidsprofielen in de Europahaven in de zomer van 2004. | 32 |
| Figuur 5-1 | Schematisatie van de warmtetransportprocessen in een deel van een havenbekken. | 34 |
| Figuur 5-2 | Overzicht van de factoren met betrekking tot warmteuitwisseling aan het (water)oppervlak [WL DELFT HYDRAULICS, 2006]..... | 39 |
| Figuur 5-3 | De invloed van watertemperatuur en windsnelheid op het afkoelingsgetal volgens Sweers (links) en Wiggers <i>et al.</i> (rechts: doorgetrokken lijnen). Ter vergelijking zijn in de rechterfiguur de Z-waarden van Sweers (1974) en Wemelfelder (1968) weergegeven. [Uit BODERIE & DARDENGO, 2003]..... | 41 |
| Figuur 5-4 | Grondonderzoek: locaties van de boringen en sonderingen ter plaatse van de toekomstige Maasvlakte 2, zoals gebruikt in deze studie. [FUGRO INGENIEURSBUREAU, 2006]..... | 42 |
| Figuur 5-5 | Schematisatie voor het opstellen van de warmtebalans, met ‘near- & far-field’ processen in de havenbekkens. | 44 |
| Figuur 5-6 | Gemiddelde uniforme temperatuurverhoging in gehele Maasvlaktegebied, bepaald met behulp van een warmtebalans. | 46 |
| Figuur 6-1 | Schematische weergave van de beschouwingen op near-field, mid-field en far-field niveau. | 49 |
| Figuur 6-2 | Voorbeeld van de initiële menging van een opdrijvende oppervlaktelozing in stagnant water. Te zien is de straaldiffusie in het omringende water en de laterale diffusie. [JIRKA <i>et al.</i> , 1996]..... | 51 |
| Figuur 6-3 | Rechts: Zijaanzicht van de initiële menging van een zakkende, horizontale thermische lozing in een gestratificeerd watersysteem. Daar waar de verticale dichtheids-gradiënten het grootst zijn wordt de warmtepluim ingesloten. Onder: foto van een experiment van de hierboven beschreven situatie, echter met een opdrijvende straal. [FISCHER <i>et al.</i> , 1979]51 | 51 |
| Figuur 6-4 | Schematisatie van de laagdikte waarover onttrekking plaatsvindt. Zowel een uniforme verticale snelheidsverdeling is weergegeven (rechts), als een verdeling volgens een Gausse-kromme (links). [HENDERSON-SELLERS, 1984]..... | 52 |
| Figuur 6-5 | Schematisatie van de zomergemiddelde dichtheid van het water in de havenbekkens gelegen aan het Beerkanaal. | 53 |
| Figuur 7-1 | Herkomst van het grote Maasvlakte 2-model..... | 63 |
| Figuur 7-2 | Links: rooster van Maasvlakte 2-model zoals gebruikt voor deze studie. Rechts: procentuele verdeling van de lagen, inclusief laagdiktes bij een maatgevende diepte van 20 m..... | 64 |
| Figuur 7-3 | Randvoorwaarde waterstand Noordzee, voorspelde en gemeten waterstanden (augustus 2001). | 69 |
| Figuur 7-4 | Randvoorwaarden zoetwaterafvoer Nieuwe Waterweg en Hartelkanaal zoals gebruikt bij het Maasvlakte 2-model (augustus 2001). Metingen zijn elke dag om 12.00 uur uitgevoerd..... | 70 |
| Figuur 7-5 | Lay-out van Maasvlakte 1 met de huidige geometrie (2004), zoals gebruikt bij de validatie van het far-field model. | 71 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figuur 7-6 | Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde waterstand op 19 en 20 augustus 2001 ter plaatse van de monding van het Beerkanaal | 71 |
| Figuur 7-7 | Links: vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten stroomsnelheden, Suurhoffbrug (19-08- 2001). Rechts: dieptegemiddelde stroomsnelheden bij een hogere zoetwaterafvoer, zoals gemodelleerd door Rijkswaterstaat [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004]. | 72 |
| Figuur 7-8 | Stroomsnelheden in de monding van de Nieuwe Waterweg (positief landinwaarts)..... | 73 |
| Figuur 7-9 | Snelheidsprofielen in de monding van de Nieuwe Waterweg gedurende verschillende getijfasen, positief landinwaarts..... | 73 |
| Figuur 7-10 | Gemodelleerde saliniteitsprofielen bij gebruik van verschillende horizontale diffusiecoëfficiënten D (bij een afvoer van 1700 m ³ /s), vergeleken met het gemiddelde van de metingen in 2004 (afvoer van 1500 m ³ /s)..... | 74 |
| Figuur 7-11 | Representatieve saliniteitsprofielen gemodelleerd in Delft3D-FLOW ter plaatse van de Europahaven (links) en de monding van het Beerkanaal (rechts), met een horizontale dispersiecoëfficiënt van 1 m ² /s..... | 75 |
| Figuur 7-12 | Indruk van de horizontale verspreiding van de saliniteit bovenin de waterkolom 3 uur voor hoog water (in de huidige geometrie van het Maasvlaktegebied)..... | 75 |
| Figuur 7-13 | Inlaattemperatuur bij verschillende horizontale dispersie-coëfficiënten vergeleken met het getij. Bij een lage diffusiecoëfficiënt is de indringing van het getij groter en wordt er meer warmte de Europahaven in getransporteerd..... | 76 |
| Figuur 8-1 | Ligging doorsnedes voor mogelijke grenzen mengzones E.ON (doorsnede 1, 2 of 3) en Electrabel (doorsnede 4). | 80 |
| Figuur 8-2 | Toelichting interactie tussen getijbeweging en advectie van de warmte (laag 2 en in graden)..... | 82 |
| Figuur 8-3 | Temperatuurverhogingen bij de inlaatlocaties, gemodelleerd van doortij naar springtij en met een afvoer van 1700 m ³ /s. Effect van doortij en springtij is duidelijk te zien..... | 83 |
| Figuur 8-4 | Dwarsdoorsnedes van de havenbekkens met warmtespreiding in [°C], locaties in Figuur 8-2, oplopend van de Oostelijke Yangtzehaven zuid tot de monding van de Europahaven. | 84 |
| Figuur 8-5 | Invloed van zoetwaterafvoer (Lobith) op de etmaal- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhoging bij de mogelijke randen van de mengzones van E.ON en Electrabel. | 87 |
| Figuur 8-6 | Invloed van zoetwaterafvoer (Lobith) op de temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties (ter hoogte van de innamediepte) van de belangrijkste koelwatergebruikers in de toekomst. | 87 |
| Figuur 8-7 | Overschrijdingsfrequenties zoetwaterafvoer Lobith in zomerperiode, gebaseerd op de afvoeren van 2001 t/m 2006 [www.waterbase.nl]. | 89 |
| Figuur 8-8 | Daggemiddelde temperatuurverhogingen ter hoogte van de innamediepte van de inlaatlocaties, gemodelleerd van een doortij naar springtij en met een zoetwaterafvoer van 2200 m ³ /s. | 90 |
| Figuur 8-9 | Dwarsprofiel van de temperatuur in doorsnede 1, gemiddeld over een doortij-springtij cyclus en bij een zomergemiddelde zoetwaterafvoer. Duidelijk is te zien dat het warmste gedeelte niet tot de oppervlakte komt, maar min of meer ingesloten is ter hoogte van het grensvlak, waar de verticale dichtheidsgradiënten het grootst zijn. | 92 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figuur 8-10 | Illustratie van het temperatuurverloop ter plaatse van de monding van de Yangtzehaven (doorsnede 2) op de langere termijn inclusief klimaatverandering. Uitgangspunt is een extreem hoge achtergrondtemperatuur van 23°C..... | 93 |
| Figuur 8-11 | Voorbeeldberekening van de toename van het aantal dagen overschrijding van een bepaalde absolute achtergrondtemperatuur per jaar vanwege de klimaatverandering. Zie ook Figuur 4-9. Uitgangspunt hier is doorsnede 3..... | 94 |
| Figuur 9-1 | Hoofdrichtingen oplossingen; het volledige overzicht is te vinden in bijlage F..... | 98 |
| Figuur 9-2 | Rechts: verspreiding van warmte in de havenbekkens met een omgekeerd koelwatercircuit van de E.ON-centrale. | 101 |
| Figuur 9-3 | Onder: afname temperatuurverhoging bij de nieuwe E.ON-inlaat in geval van het omdraaien van het E.ON koelwatercircuit..... | 101 |
| Figuur 9-4 | Schematische weergave van de maatregel met extra koelwaterdebiet als 'by-pass' inclusief zoutwatergemaal, zoals gepresenteerd in LIGTERINGEN & DIJKEMA (2007). De weergegeven criteria voor maximale temperatuur(verhoging) zijn gebaseerd op water voor karperachtigen..... | 103 |
| Figuur 9-5 | Vergelijking tussen temperatuurverdeling met extra koelwaterdebiet door de E.ON-centrale (boven) en zonder extra debiet (onder). De datum en het tijdstip (net na hoogwater) van beide figuren zijn hetzelfde..... | 105 |
| Figuur 9-6 | Temperatuurverlaging bij de E.ON-inlaat ten gevolge van een extra koelwatertemperatuurverhoging bij de uitlaat..... | 106 |
| Figuur 9-7 | Temperatuurverdeling over de diepte in het midden van de Europahaven, gemodelleerd bij een zoetwaterafvoer van 1700 m ³ /s..... | 107 |
| Figuur 9-8 | Vergelijking van het temperatuurverschil tussen de bovenlaag en onderlaag bij een onverdiepte Europahaven en bij de overgang van een onverdiepte (7m) naar een verdiepte (20m) Europahaven. Dit temperatuurverschil wordt zoals verwacht groter..... | 108 |
| Figuur 9-9 | Vergelijking tussen de verticale temperatuurgradiënten in een verdiepte Europahaven bij inname uit de bovenlagen 1 t/m 3 (links) en inname uit de onderlagen 6 t/m 8 (rechts). | 109 |

TABELLEN

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabel 3-1 | Overzicht huidige en toekomstige thermische lozingen in Maasvlakte 1&2..... | 11 |
| Tabel 3-2 | Waterkwaliteitsdoelstellingen volgens EG richtlijn 78/659/EEG [RIJKSWATERSTAAT, 2004] | 13 |
| Tabel 3-3 | Gehanteerde elektriciteitsproductiekosten volgens OESO [ROYAL HASKONING, 2006] .. | 14 |
| Tabel 3-4 | Voorbeeld berekening kosten rendementsverlies energiecentrales | 15 |
| Tabel 4-1 | Geschatte maatgevende stroomsnelheden in het Maasvlaktegebied [m/s], positief richting zee. | 25 |
| Tabel 5-1 | Verblijftijden van het koelwater in de Yangtzehaven (lozing van E.ON) en Amazonehaven (Electrabel) ten gevolge van de getijbeweging en de lozing zelf. | 36 |
| Tabel 5-2 | Maximale excursie warmtepluim door getij en lozing | 37 |
| Tabel 5-3 | Volumeverhoudingen tussen volume havenbekkens, lozingen en komberging..... | 39 |
| Tabel 5-4 | Resultaat sonderingen en boringen door FUGRO (2006). | 42 |
| Tabel 5-5 | Resultaten handberekening temperatuurverhogingen t.g.v. thermische lozingen..... | 45 |
| Tabel 5-6 | Aandeel processen in opwarming en afkoeling | 46 |
| Tabel 5-7 | Gevoeligheid en aandeel van verversing door getij | 47 |
| Tabel 5-8 | Gevoeligheid en aandeel van warmteuitwisseling met atmosfeer..... | 48 |
| Tabel 5-9 | Gevoeligheid en aandeel van verversing door debiet Hartelkanaal | 48 |
| Tabel 6-1 | Samenvatting analyse selectieve onttrekking bij de energiecentrales | 54 |
| Tabel 6-2 | Gegevens lozingspunten voor near-field analyse..... | 57 |
| Tabel 8-1 | Overzicht van warmtetransportprocessen, waarvan een nadere gevoeligheidsanalyse van variatie in deze processen minder relevant is..... | 81 |
| Tabel 8-2 | Overzicht van warmtetransportprocessen, waarvan een nadere gevoeligheidsanalyse van variatie in deze processen wel relevant is..... | 81 |
| Tabel 8-3 | Poging tot kwantificeren van verschil in doodtij en springtij op temperatuurverhoging.. | 85 |
| Tabel 8-4 | Berekende, afgeronde temperatuurverhogingen met verschillende zoetwaterafvoeren bij gemiddeld tij en basis lozingsscenario. | 86 |
| Tabel 8-5 | Relevante gevolgen van alternatieve lozingsscenario's t.o.v. basis lozingsscenario..... | 88 |
| Tabel 8-6 | Doorsnedegemiddelde temperatuurverhogingen bij het basis lozingsscenario (E.ON 1, 2 & 3, Electrabel 1, EnecoGen en chemie 250 MW), voor de drie gedefinieerde scenario's, in °C. | 90 |
| Tabel 8-7 | Temperatuurverhoging ter plekke van inlaatpunten bij basis lozingsscenario, voor de drie verschillende scenario's, in [°C] | 91 |
| Tabel 8-8 | Schatting rendementsverlies van de E.ON-centrales..... | 95 |
| Tabel 9-1 | Overzicht van maatregelen die in eerdere studies niet effectief of niet economisch rendabel bleken, met betrekking tot de vermindering van de recirculatie. | 110 |

1 INLEIDING

1.1 Algemeen

De Rotterdamse haven, met een oppervlakte van circa 10.500 hectare, is de grootste haven van Europa en behoort tot de top van de wereld voor wat betreft de hoeveelheid overslag en scheepsbewegingen. Jaarlijks bezoeken ongeveer 35.000 zeeschepen en 130.000 binnenvaartschepen de haven.

Het Havenbedrijf Rotterdam N.V. (HbR) is de autoriteit die de Rotterdamse haven ontwikkelt, beheert en exploiteert. De verantwoordelijkheid van het HbR omvat onder andere het efficiënt en veilig afhandelen van de scheepvaart, het in de gaten houden van het transport van gevaarlijke stoffen en het verhuren van terreinen. Tevens verzorgt het HbR de infrastructuur van waterwegen, verkeerswegen, kades en andere voorzieningen voor de gebruikers van het havengebied.

Sinds eind jaren '90 werkt het HbR aan de ontwikkeling van Maasvlakte 2, een uitbreiding van de bestaande Maasvlakte in de Noordzee. Om de kwaliteit en groei van de Rotterdamse haven te waarborgen en de concurrentiepositie te versterken, is de komst van de 2^e Maasvlakte van groot belang. De primaire doelstelling van Maasvlakte 2 is het bieden van ruimte aan bedrijven voor grootschalige, diepzee gebonden haven- en industriële bedrijvigheid, in het bijzonder grootschalige containerop- en overslag, distributie en chemie [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM 2007 MER]. In Figuur 1-1 en bijlage G is een impressie weergegeven van de 2^e Maasvlakte.



Figuur 1-1 Impressie Maasvlakte 2, gezien vanaf de Noordzee

In de Rotterdamse haven is veel industrie gelegen die koelwater gebruikt, zoals energiecentrales en chemische bedrijven. De uitbreiding en verdere ontwikkeling van de Maasvlakte zal veranderingen teweeg brengen in de hoeveelheid en grootte van thermische lozingen en tevens in de verspreiding van warmte in de havenbekkens, hetgeen een temperatuurverhoging van het water in de havenbekkens tot gevolg heeft. Afhankelijk van de grootte van de temperatuurverhoging kan deze situatie mogelijke ecologische en/of economische gevolgen hebben.

In deze studie worden de te verwachten temperatuurverhoging, de mogelijke effecten hiervan en eventueel mitigerende maatregelen onderzocht.

1.2 Leeswijzer

Allereerst wordt in hoofdstuk 2 de probleemanalyse uiteengezet en de aanpak van het onderzoek weergegeven. Hoofdstuk 3 benadrukt het belang van dit onderzoek door het geven van een samenvatting van de effecten en beperkingen rondom temperatuurverhogingen. Dit zijn onder andere mogelijke ecologische gevolgen van opwarming van de havenbekkens inclusief de daarop gebaseerde wetgeving en economische randvoorwaarden. De omgevingscondities worden beschreven in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk bevat een uitgebreide data-analyse, dat nodig is om de verspreiding van de warmte te kunnen beschrijven en waar mogelijk te kwantificeren.

In hoofdstuk 5 wordt door middel van globale berekeningen inzicht getoond in de relevante transportprocessen van de verspreiding van de warmtelasten. Aangezien blijkt dat het voor deze studie noodzakelijk is meer in detail de warmteverspreiding in de havenbekkens weer te geven, wordt in de hierop volgende hoofdstukken een numeriek stromingsmodel gebruikt om betere resultaten te verkrijgen. Allereerst wordt in hoofdstuk 6 om deze reden ingegaan op de aspecten vlak bij de onttrekkings- en lozingspunten in de near-field analyse. De bevindingen van deze near-field analyse worden meegenomen bij de opzet van het far-field model in hoofdstuk 7. De modelresultaten voor het meest waarschijnlijke toekomstige lozingsscenario worden weergegeven in hoofdstuk 8. Tevens wordt er verder ingegaan op de gevoeligheid van de modelresultaten door het effect van variatie van verscheidene processen te analyseren.

Wanneer wordt aangenomen dat - op den duur - de opwarming van de havenbekkens teveel nadelige gevolgen met zich mee zal brengen, moeten er maatregelen getroffen worden om de opwarming te reduceren. Een analyse van mogelijke oplossingsrichtingen hiervoor met bijbehorende maatregelen wordt behandeld in hoofdstuk 9. Van sommige maatregelen zal het effect worden beoordeeld aan de hand van resultaten uit eerdere studies, terwijl enkele andere maatregelen in deze studie worden onderzocht.

Tot slot zijn in hoofdstuk 10 en 11 de conclusies en aanbevelingen te lezen.

In de bijlagen staat allerlei achtergrondinformatie waar in het rapport regelmatig naar verwezen zal worden. Relevant om hier te noemen zijn de laatste twee bijlagen (bijlage F en G), namelijk een overzicht van alle beschouwde oplossingsrichtingen en een overzichtskaart van de Maasvlakte 1 & 2 in de 'eindsituatie', met daarop aangegeven de locaties van de koelwaterlozers met bijbehorende in- en uitlaatpunten.

2 PROBLEEMANALYSE

Leeswijzer

In de eerste twee paragrafen worden de verschillen tussen de huidige en toekomstige lozingsituatie belicht. Hierop volgend worden de probleemstelling en doelstellingen weergegeven en tot slot zal paragraaf 2.5 de aanpak van het onderzoek kort beschrijven.

2.1 Huidige situatie thermische lozingen

In de Rotterdamse haven vinden een aantal koelwaterlozingen plaats. In Figuur 2-1 is het stroomgebied van de Maas en Nieuwe Waterweg in vijf gebieden onderscheiden. Per gebied is de totaal vergunde warmtelast in Megawatt aangegeven. Het gaat hier om toegestane hoeveelheden. Een overzicht van de werkelijk geloosde warmtelast is niet beschikbaar. Wel kan op basis van controles door middel van steekproeven (Rijkswaterstaat) worden gesteld dat deze lager zijn dan de toegestane hoeveelheden. In totaal mag 3.550 MW aan thermische lozingen plaatsvinden. De helft hiervan mag geloosd worden door bedrijven op de Maasvlakte. Vooral energiecentrales lozen veel warmte door hun koelwatergebruik.



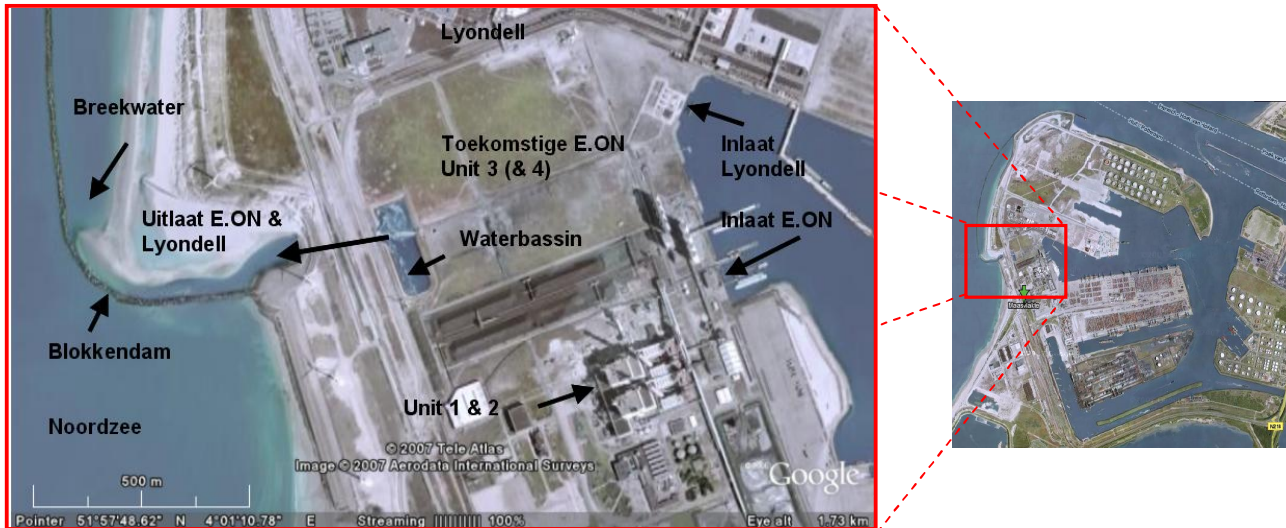
Figuur 2-1 Vergunde warmtelasten in de Rotterdamse Haven [STUURGROEP MILIEUMONITORING REGIO ROTTERDAM, 2007]

De reden dat het Maasvlaktegebied een aantrekkelijke locatie voor energiecentrales is, komt onder andere door de volgende voordelen [www.nre-energie.nl]:

- ligging aan diep vaarwater, wat gunstig is voor de bulkaanvoer van kolen en biomassa;
- goede logistieke verbindingen;
- koeling mogelijk met relatief koud zeewater, waardoor geen koeltoren nodig is (rendementsstijging bij E.ON-centrale van circa 0,5%).

E.ON heeft op de Maasvlakte een 1.040 MWe kolencentrale in bedrijf. Het koelwater wordt op zeven meter diepte uit de Europahaven gehaald en via een half open blokkendam in het Breekwater op de Noordzee geloosd, zie voor een overzichtskaart bijlage G en voor de details Figuur 2-2.

Het ten noorden gelegen chemieconcern Lyondell is energetisch gekoppeld aan de E.ON centrale. Ten behoeve van levering van stoom aan Lyondell heeft E.ON een warmtekrachtcentrale gebouwd. Lyondell neemt separaat koelwater in en loost het opgewarmde koelwater tezamen met het koelwater van de E.ON centrale via het lozingsbekken (of ‘waterbassin’, zie Figuur 2-2).



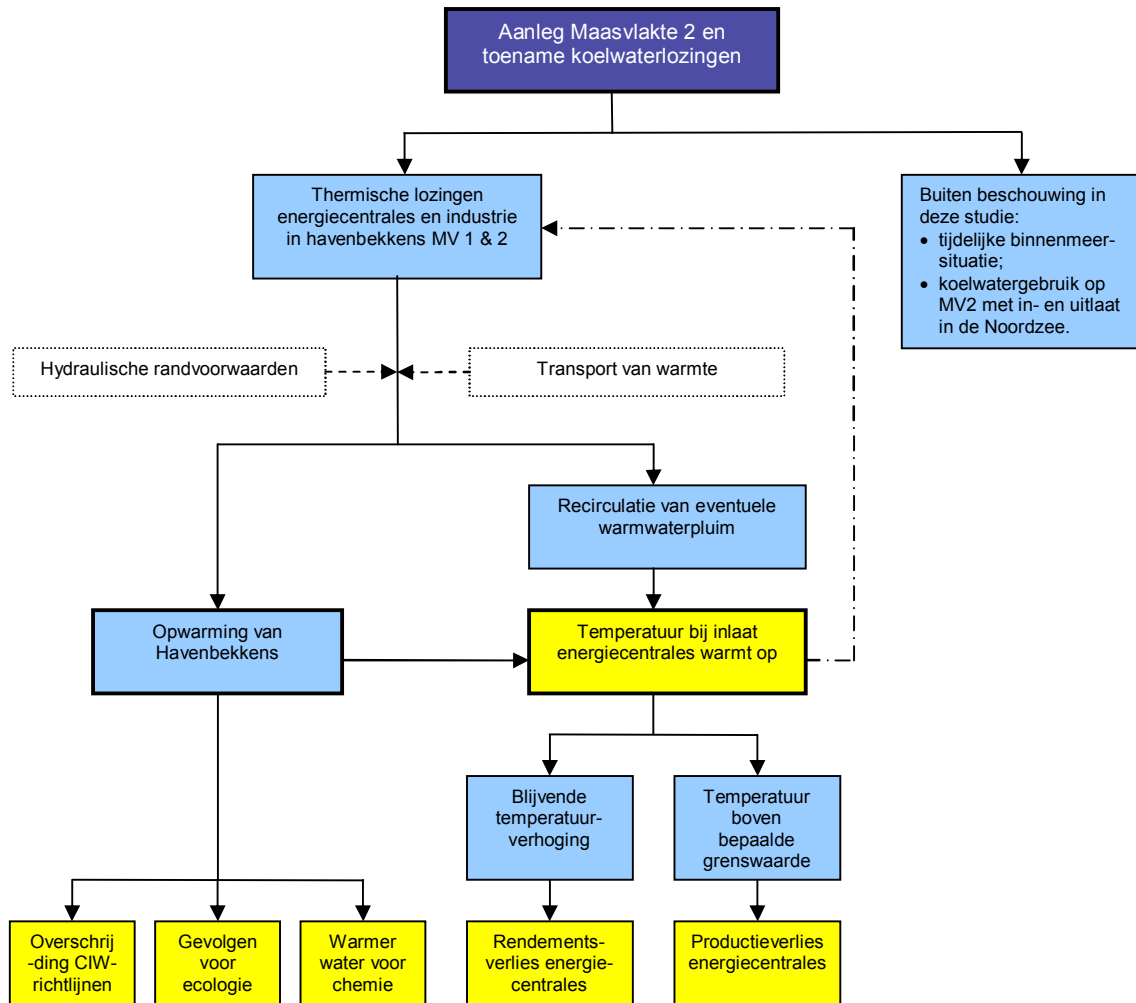
Figuur 2-2 Inname- en lozingspunten van E.ON en Lyondell

Behalve de E.ON-centrale en Lyondell lozen er nog vier bedrijven koelwater in de havenbekkens van de 1^e Maasvlakte. Deze thermische lozingen zijn echter in de orde van 1 MW en/of gedurende korte periodes, waardoor ze in het vervolg van deze studie niet verder worden beschouwd.

Koelwaterlozing in de Noordzee door de elektriciteitscentrale op de huidige Maasvlakte en de beperkte lozing van warm water door overige bedrijven in de havenbekkens van de Maasvlakte veroorzaken in de huidige situatie geen knelpunten [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM, 2007]. Temperatuurmetingen van het oppervlaktewater binnen de blokkendam en op de Noordzee hebben aangetoond dat in de huidige situatie de beïnvloeding op het ontvangende water door de koelwaterlozing verwaarloosbaar is [NOLTE *et al.*, 2004]. Ook wordt de bodem van de Noordzee niet opgewarmd.

2.2 Toekomstige situatie thermische lozingen

De uitbreiding van de Maasvlakte en toename van industrie met koelwatergebruik zal veranderingen teweeg brengen in de hoeveelheid, grootte en verspreiding van warmtelozingen in de bekkens van Maasvlakte 1 & 2 en op de Noordzee. Mogelijk kunnen er hierdoor enkele knelpunten ontstaan. Deze zijn weergegeven in Figuur 2-3.



Figuur 2-3 Grafische weergave probleemanalyse koelwaterlozing E.ON centrale

Zo kan er mogelijk een knelpunt ontstaan bij de E.ON centrale. Wanneer de gehele buitencontour van Maasvlakte 2 gerealiseerd is, zal de E.ON centrale lozen op de binnenhaven van de 2^e Maasvlakte, zie bijlage G. Dit kan een opwarming van het havenbekken tot gevolg hebben, die de maximaal toegestane temperatuur(verhoging) - voorgeschreven in de CIW-richtlijn - overschrijdt. Tevens is er een kans dat recirculatie van warmte plaatsvindt naar de inlaat van de E.ON centrale in de Europahaven. Deze mogelijke effecten worden versterkt wanneer nieuwe energiecentrales en chemie met groot koelwatergebruik in het Maasvlaktegebied geplaatst worden.

Een ander mogelijk knelpunt doet zich voor tijdens de aanleg van Maasvlakte 2. Bij de situatie dat er een tijdelijk binnenmeer ontstaat, zal deze te snel vollopen en opwarmen door de lozing van de E.ON centrale. Er moeten maatregelen getroffen worden, opdat het water voldoende snel weg kan stromen. Inmiddels is besloten tijdens de uitvoering te werken met een tijdelijke brug, waardoor uitwisseling met de Noordzee en vervolgens met de Yangtzehaven continu mogelijk is. Dit onderwerp wordt hier niet verder behandeld.

Wanneer er nieuwe energiecentrales op de buitencontour van de 2^e Maasvlakte geplaatst worden met zowel een in- en uitlaat op de Noordzee, is het nuttig onderzoek te verrichten naar de spreiding van de warmtelast ter plekke. In deze studie wordt dit buiten beschouwing gelaten.

2.3 Probleemstelling

Wanneer Maasvlakte 2 en nieuwe industrie met koelwaterbehoefte wordt gerealiseerd, is te verwachten dat door warmtelozingen de havenbekkens van Maasvlakte 1 & 2 opwarmen. Dit kan nadelige ecologische, juridische en financiële gevolgen hebben:

- Mogelijk worden de normen volgens de CIW-beoordelingssystematiek overschreden, afhankelijk van de interpretatie van deze richtlijnen;
- Er is een kans op recirculatie van de warmtelasten, dat ten koste gaat van het rendement van industriële processen die koelwater gebruiken.

2.4 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze studie is het vinden van het antwoord op de volgende vraag:

- Wat is het effect van de cumulatieve warmtelozingen in Maasvlakte 1 & 2 op de stijging van de watertemperatuur in de havenbekkens, en hoe is deze temperatuurstijging eventueel te reduceren?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, is tijdens de studie een aantal tussenstappen noodzakelijk. De gedefinieerde subdoelen moeten antwoord geven op de volgende vragen:

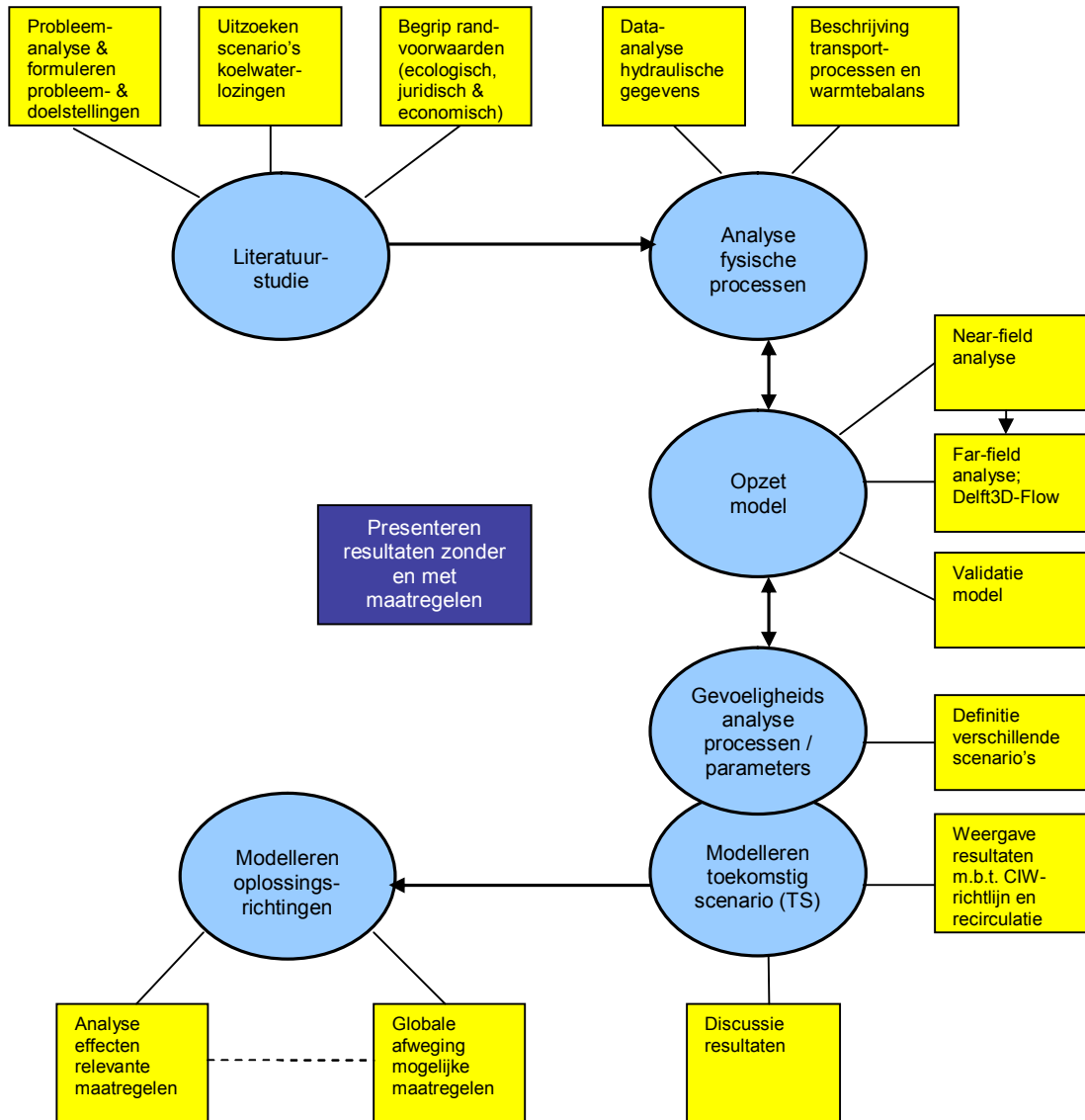
- Wat zijn de ecologische, juridische en economische grenzen aan de opwarming van het water in de havenbekkens?
- Wat zijn de relevante transportprocessen, die invloed hebben op de verspreiding van de warmtelasten in de havenbekkens?
- Wat is de gevoeligheid van de verschillende scenario's op de temperatuurverhoging in de havenbekkens?
- Wat zijn de effectiviteit en globale kosten van mogelijke maatregelen om de temperatuur in de havenbekkens te reduceren?

2.5 Aanpak onderzoek

Om deze hoofd- en subdoelstellingen te bereiken is het afstudeerproject in drie hoofdfasen onderverdeeld:

- *Literatuurstudie*: analyseren van alle tot nu toe uitgevoerde studies en van de achtergrondinformatie betreffende dit onderwerp, opstellen van de probleemanalyse en het verzamelen van de benodigde data.
- *Begrip warmtespreiding*: beschrijven van de fysische processen in de haven en de relevante processen met betrekking tot het transport van warmte door de haven, het modelleren van de verspreiding van warmte van grof (warmtebalans) naar fijn (Delft3D-FLOW) en een gevoeligheidsanalyse van de gebruikte modellen.
- *Effect maatregelen*: analyse van mogelijke maatregelen, alternatiefkeuze en het modelleren van de effectiviteit van gekozen maatregelen.

Deze fasen zijn schematisch weergegeven in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Schematisatie aanpak onderzoek

De onderdelen die bij de drie fasen horen en hun onderlinge relaties zijn in de figuur aangegeven. Duidelijk is te zien dat het analyseren van de fysische processen, het modelleren van het toekomstige scenario (TS) en de bijbehorende gevoeligheidsanalyse grotendeels tegelijkertijd uitgevoerd zullen worden; resultaten worden meegenomen in een volgende stap en vervolgens weer teruggekoppeld naar de vorige stap. Zo wordt uiteindelijk een goed begrip gekregen welke processen relevant zijn bij de transportprocessen van warmte in de havenbekkens, waardoor mogelijke maatregelen concreter en sneller beoordeeld kunnen worden op hun effectiviteit.

Tot slot van dit hoofdstuk moet worden opgemerkt dat in het verleden reeds een aantal (deel)studies is uitgevoerd naar deze koelwaterproblematiek. In bijlage A wordt hier meer informatie over gegeven. Deze studie wordt dus zijdelings uitgevoerd en zal een integrale benadering zijn van de gehele problematiek.

3 EFFECTEN EN BEPERKINGEN TOEKOMSTIGE LOZINGEN

Wat zijn de te verwachten toekomstige lozingen in het Maasvlaktegebied? En waarom is het van belang de temperatuurverhoging in de havenbekkens ten gevolge van deze lozingen te voorspellen? Anders gezegd, wat zijn de effecten en randvoorwaarden aan de temperatuurverhoging van het Maasvlaktewater ten gevolge van de lozingen? In dit hoofdstuk worden deze aspecten, en daarmee het belang van dit onderzoek, toegelicht.

Leeswijzer

Paragraaf 3.1 behandelt de te verwachten toekomstige thermische lozingen. In de hierop volgende paragrafen worden de effecten en beperkingen hieraan beschreven. Bijvoorbeeld de impact van koelwatergebruik op de ecologie (paragraaf 3.2) waarop de richtlijnen (paragraaf 3.3) zijn gebaseerd, en de economische effecten ten gevolge van recirculatie (paragraaf 3.4). Scheepvaart kan hinder ondervinden van de lozingen. Vandaar dat in paragraaf 3.5 de nautische randvoorwaarden worden beschreven. Tot slot worden kort overige mogelijke effecten toegelicht.

3.1 Geplande ontwikkelingen thermische lozingen Maasvlaktegebied

Zowel in de Maasvlakte 1 als 2 is veel nieuwe koelwaterbehoefte industrie gepland. Een overzicht van de huidige plannen per soort industrie wordt hier gegeven. De informatie is gebaseerd op verscheidene rapporten [NOLTE & KLEISSEN, 2006 en HELING *et al.*, 2005, 2007a & b], gedurende verscheidene gesprekken met betrokken medewerkers van het Havenbedrijf en uit persberichten (bijlagen A en B.5).

Kolen- en gasgestookte energiecentrales MV 1 & 2 (eventueel met biomassa)

E.ON: Naast de bestaande twee units van 540 MWe elk, komt een derde unit met een capaciteit van 1040 MWe. De eerste twee units zijn oorspronkelijk in 2013 afgeschreven, maar onlangs is besloten deze tot 2023 in bedrijf te houden. De mogelijkheid bestaat om in de toekomst een vierde unit te plaatsen. Waarschijnlijk zijn tegen die tijd unit 1 & 2 niet meer operationeel. Hierdoor is de kans klein dat in de komende 40 jaar vier units van E.ON gelijktijdig operationeel zijn.

Electrabel: Electrabel gaat een 800 MWe centrale bouwen op het EMO terrein op Maasvlakte 1. Er zijn plannen om in 2017 een tweede gelijke eenheid in gebruik te nemen.

EnecoGen (Europoort) zal vanaf 2011 zijn uitgebreid met een maximale capaciteit van 840 MW. De gemiddelde warmtelozing zal echter lager uitkomen, mede door de samenwerking met LionGas. Vooralsnog wordt een thermische warmtelozing van circa 440 MWth aangehouden.

Buitencontour MV2: In de MER wordt rekening gehouden met de plaatsing van een kleine kolencentrale op de buitencontour van Maasvlakte 2 (circa 500 MW). Er is echter een kans dat de overheid Maasvlakte 2 uitroept tot toekomstig energiegebied. Zeker wanneer de haven zich wil profileren als 'energiehaven' is er een serieuze mogelijkheid dat op de buitencontour meerdere energiecentrales gebouwd zullen worden. Inname en lozing komen dan in de Noordzee te liggen, en blijven in deze studie buiten beschouwing.

Kerncentrales MV 2

De primaire doelstelling van Maasvlakte 2 is het bieden van ruimte aan bedrijven voor grootschalige, diepzee gebonden haven- en industriële bedrijvigheid, in het bijzonder grootschalige container op- en overslag, distributie en chemie [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM, 2007]. Een kerncentrale behoort niet tot dit rijtje. Aangezien een kerncentrale geen extra scheepsbewegingen genereert, en vanwege het feit dat

er een hoge bevolkingsdichtheid binnen een straal van 20 km aanwezig is, komt er geen kerncentrale op de Maasvlakte. Daarvoor biedt de Planologische Kernbeslissing (PKB) geen ruimte. Bovendien is relatief koud zeewater als koelwater op meerdere locaties voorhanden, zoals bij Borssele of de Eemshaven.

Chemische industrie MV2

Volgens de huidige plannen wordt er op de 2^e Maasvlakte een gebied van circa 82 hectare gereserveerd voor chemische, al dan niet koelwaterbehoefte, industrie, die mogelijk koelwater zullen lozen in de 2^e Maasvlakte. Er wordt uitgegaan van een warmtelast ter grootte van 3 MW per hectare. Dit geeft in totaal een warmtelast van circa 250 MWth.

LNG terminals (endotherm proces: terminals hebben warmte nodig en lozen gekoeld water)

Gate Terminal: ter plaatse van de Papegaaibek komt de LNG Gate terminal. Deze terminal heeft een warmtevraag van circa 200 MW. Momenteel wordt onderzocht of een directe koelwatertoevoer van de E.ON centrale haalbaar is via een ondergrondse pijpleiding.

LionGas Terminal: ten oosten van de ingang van het Beerkanaal komt de nieuwe LNG LionGas terminal. Deze zal een directe verbinding met de EnecoGen centrale krijgen.

Overige koelwaterlozingen

GasUnie loost gedurende 2 maanden per jaar ongeveer 30 MWth. Gezien de korte lozingsperiode wordt dit in het vervolg van deze studie niet meegenomen. Overige koelwaterlozingen in het Maasvlakte 1 & 2 gebied zijn relatief klein (circa 1 MWth) ten opzichte van de al genoemde lozingen, en daarom te verwaarlozen in deze studie.

Uit eerdere studie is gebleken dat koelwaterlozingen buiten het gebied van Maasvlakte 1 & 2 een gering effect hebben op de temperatuurstijging in de Yangtzebekken of Europahaven [NOLTE & KLEISSEN, 2006]. Dit effect is lastig te kwantificeren. In deze studie wordt de temperatuur van het Maaswater dat richting het Maasvlakte gebied stroomt als een achtergrondtemperatuur beschouwd.

Wellicht ten overvloede wordt opgemerkt, dat de hoeveelheid geproduceerde energie (in MWe) door een energiecentrale niet gelijk is aan de grootte van de warmtelast (in MWth). Dit heeft kort gezegd te maken met het rendement van een energiecentrale. In bijlage B.4 is meer informatie hierover te vinden, waarin ook het begrip restwarmte en de werking van een energiecentrale met betrekking tot de stoomcyclus en het koelwatersysteem wordt uitgelegd.

Vaak wordt de warmtelozing niet uitgedrukt in de thermische warmtelast Q_{th} [MWth], maar in de combinatie van debiet van het koelsysteem Q_k [in m³/s] en de temperatuurverhoging van het koelwater ΔT [°C]. Deze eenheden zijn als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$Q_{th} = \varphi_m \cdot C_p \cdot \Delta T, \text{ met } \varphi_m = \rho_w \cdot Q_k$$

Met: φ_m = de massastroom [kg/s]
 C_p = de soortelijke warmte van het koelwater, circa 4,2 J/(kg.K)
 ρ_w = de dichtheid van het water [kg/m³].

Tabel 3-1 geeft een kwantitatief overzicht van de lozingen, en in bijlage G zijn de locaties te vinden.

Tabel 3-1 Overzicht huidige en toekomstige thermische lozingen in Maasvlakte 1&2

| Lozing | Energie [MWth] | | | | | Debiet [m3/s] | | | | Temp.stijging [dT] | | |
|---------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | Nu | max | > 2013 | > 2018 | Totaal | Nu | > 2013 | > 2018 | Totaal | Nu | > 2013 | > 2018 |
| E.ON | 1100 | 1290 | 1115 | 0 | 2405 | 40 | 33 | 0 | 73 | 7 - 10 | 7 - 10 | 7 - 10 |
| Lyondell | 320 | 467 | 0 | 0 | 467 | 14 | 0 | 0 | 14 | 7 - 10 | 7 - 10 | 7 - 10 |
| EnecoGen | 0 | 0 | 440 | 0 | 440 | 0 | 13 | 0 | 13 | 0 | 8 | 8 |
| Electrabel | 0 | 0 | 840 | 840 | 1680 | 0 | 28 | 28 | 56 | 0 | 7 | 7 |
| Chemie MV2 | 0 | 0 | 0 | 250 | 250 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 0 | 10 |
| LNG Gate | 0 | 0 | -160 | 0 | -160 | 0 | 8 | ? | 8 | 0 | -7 | ? |
| LNG LionGas | 0 | 0 | -107 | 0 | -107 | 0 | 10 | ? | 10 | 0 | -7 | ? |
| Totaal | 1420 | 1757 | 2128 | 1090 | 4975 | | | | | | | |

Kortom, het is te verwachten dat de totale warmtelast in het Maasvlaktegebied in de toekomst waarschijnlijk ongeveer 4200 MWth zal gaan bedragen. Dit is zonder een 4^e E.ON en 2^e Electrabel unit.

3.2 Ecologische effecten opwarming havenbekkens

Warmtelozingen kunnen negatieve effecten hebben op het ontvangende oppervlaktewater. Wanneer de havenbekkens van Maasvlakte 2 teveel opwarmen, is de kans aanwezig dat dit een verandering in de populaties van vissen en overige organismen teweeg brengt. Ook exoten kunnen zich in de omgeving van het lozingspunt blijvend vestigen. In deze paragraaf worden kort de ecologische effecten van koelwatergebruik toegelicht, opgesplitst in effecten binnen en buiten een koelwatersysteem van een energiecentrale of de industrie. In bijlage B.1 staat nadere uitleg van mogelijke ecologische effecten, meegenomen bij de CIW-beoordelingssystematiek [RIJKSWATERSTAAT, 2004]

3.2.1 Effecten in de koelwaterketen (van inlaat tot uitlaat)

De effecten op organismen in de koelwaterketen zijn op hoofdlijnen terug te voeren naar:

- Mechanische effecten door druk- en snelheidsverschillen, koelwaterzeven en passage van pompen;
- Thermische effecten door de opwarming van het water;
- Effecten ten gevolge van conditionering van het koelwater (bijvoorbeeld gebruik van biociden).

De mate van schade is afhankelijk van het soort organisme en toestand waarin het organisme verkeert op het moment van inzuiging. Zo blijkt uit onderzoek dat sterftcijfers van vis in de koelwaterketen sterk variëren: spiering en haring blijken uiterst kwetsbaar, terwijl bij de paling, driedoornige stekelbaars, aal en botervis nauwelijks sterfte optreedt als gevolg van mechanische schade. Vaak is dit echter gebaseerd op kleine steekproeven van enkele tientallen tot soms maar één vis.

Wat betreft thermische schade heerst bij deskundigen over het algemeen de indruk, dat bij relatief eenvoudige koelwatersystemen - zoals bij energiecentrales - de overleving van een aanzienlijk deel van de ingezogen populatie wel tot de mogelijkheden behoort.

Beperking van het koelwaterdebiet is over het algemeen voordelig voor het aquatische milieu. Dit geldt met name in paaigebieden voor vislarven en juveniele vissen, die zich niet kunnen verzetten tegen hoge stroomsnelheden ter hoogte van innamepunten.

3.2.2 Effecten in het oppervlaktewater

Op lokaal niveau ontstaat ten gevolge van een warmtelozing een warmtepluim in het ontvangende water. In de mengzone nabij het lozingspunt wordt in de meeste gevallen niet voldaan aan de waterkwaliteitsdoelstellingen en zijn mogelijk letale dan wel stress temperaturen voor organismen in

beeld. Ook kunnen warmteminnende exoten overleven in de directe omgeving van de warmtelozing, en inheemse soorten juist minder goed. Om deze redenen mag de mengzone niet te groot zijn.

Bij regionale effecten speelt de mogelijkheid dat door toename van de watertemperatuur een verschuiving optreedt in het ecosysteem. Tevens kunnen de levenscycli van organismen worden verstoord, waardoor een mismatch ontstaat in de timing van levensfasen.

Bij lozing van warmte op zee lijkt, vanwege de intensieve menging (stroming) en de aanwezigheid van zeer grote watermassa's, de mengzone een minder groot probleem te zijn, mits lozingen voldoende ver in zee plaatsvinden en de mengzone de bodem niet kan bereiken. Een groot deel van het ecologische leven in de kustzone bevindt zich namelijk op de bodem of in het onderste deel van de waterkolom.

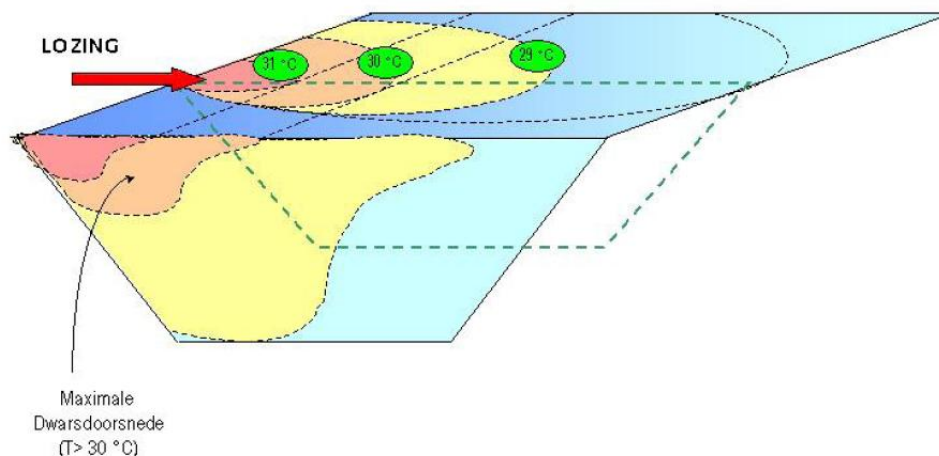
Uit ecologisch oogpunt zijn de kustzone en estuaria - met name als het gaat om paaigebieden en opgroeigebieden voor juveniele vis - de meest waardevolle gebieden. De meest bepalende factor voor de potentiële milieu-impact van warmtelozingen op zoute wateren is de onttrekking van koelwater.

3.3 Wetgeving koelwaterlozingen

Op grond van de Wet verontreiniging oppervlaktewateren (Wvo) moeten alle bedrijven die koelwater lozen daarvoor een vergunning hebben, om te voorkomen dat door te hoge temperaturen van het oppervlaktewater de waterkwaliteit afneemt. In de vorige paragraaf zijn de mogelijke effecten van warmtelozingen op het aquatisch milieu besproken. De hierop gebaseerde CIW-richtlijn, waaraan de vergunningen moeten worden getoetst, worden in deze paragraaf besproken.

Tot 2005 was de ABK-richtlijn van kracht, die een maximale temperatuur van 30°C voorschreef en een maximale opwarming van 10°C. Aangezien door deze oude richtlijn in (extreem) warme zomers energiecentrales verplicht waren tot terugregeling van het opwekkingsvermogen, zijn sinds 2005 voor warmtelozingen nieuwe normen opgesteld. Deze zijn vastgelegd in de 'CIW-beoordelingssystematiek warmtelozingen' [RIJKSWATERSTAAT 2004]. De eis van 30°C als maximale lozingstemperatuur is losgelaten. Volgens de nieuwe richtlijn zijn een drietal criteria opgenomen, waarvan de interpretatie als volgt kan worden samengevat:

1. Criterion onttrekking: Voor het criterium onttrekking zijn nog geen definitieve kwantitatieve criteria vastgesteld. Naar verwachting zal dit in 2008 plaatsvinden. De snelheidsgradiënten in het oppervlaktewater ten gevolge van onttrekking van koelwater mogen niet leiden tot significante effecten voor het aquatische milieu, zoals inzuiging van vislarven en juveniele vissen.
2. Criterion mengzone: (Figuur 3-1) Het criterium mengzone heeft ten doel migratie van vis mogelijk te maken. Een mengzone is het gebied rondom een lozingspunt waar de temperatuur hoger mag zijn dan de voorgeschreven maximale temperatuur. 'Vaste regels' voor de grootte van een mengzone zijn er niet, wel enkele handvatten:
 - de temperatuur op de rand van de mengzone is maximaal 30°C voor zoete wateren (water voor karperachtigen) en 25°C voor zoute wateren (Noordzee / water voor schelpdierachtigen);
 - de mengzone mag maximaal 25% van de dwarsdoorsnede van het ontvangende water beslaan;
 - voor de Noordzee geldt, dat de mengzone met temperaturen > 25°C de bodem niet mag raken.



Figuur 3-1 Impressie van mengzone met koelwaterpluim [RIJKSWATERSTAAT, 2004]. De weergegeven temperaturen gelden voor water voor karperachtigen.

3. criterium opwarming: t.o.v. achtergrondtemperatuur (zie ook Tabel 3-2)

- voor zoet water (rivieren / water voor karperachtigen) bedraagt de maximale opwarming buiten de mengzone (dT) 3°C , en de maximale absolute temperatuur (T_{max}) 28°C ;
- voor zout water (Noordzee / water voor schelpdierachtigen) geldt een maximale opwarming buiten de mengzone (dT) van 2°C , en een maximale absolute temperatuur (T_{max}) van 25°C ;

Tabel 3-2 Waterkwaliteitsdoelstellingen volgens EG richtlijn 78/659/EEG [RIJKSWATERSTAAT, 2004]

| Functietoekenning oppervlaktewater | Maximum temperatuur | Maximum temperatuurverhoging |
|---|------------------------|------------------------------|
| Basiskwaliteit (4 ^e Nota waterhuishouding) | 25°C | - |
| Water voor karperachtigen | 28°C | $3,0^{\circ}\text{C}$ |
| Water voor schelpdierachtigen | 25°C | $2,0^{\circ}\text{C}$ |
| Water voor zalmachtigen | $21,5^{\circ}\text{C}$ | $1,5^{\circ}\text{C}$ |

Voor een juiste interpretatie van de criteria is het dus belangrijk om te weten tot wat voor een water de havenbekkens van de Maasvlakte 1&2 gerekend worden. Dit is echter nog onduidelijk. Waarschijnlijk wordt het oppervlaktewater aangemerkt als schelpdierwater, zie Tabel 3-2. Wanneer toch uitgegaan wordt van water voor karperachtigen, is het onduidelijk hoe er omgegaan wordt met het feit dat buiten de mengzone temperaturen net onder de 30°C voorkomen.

De maximaal toegestane temperatuur en temperatuurverhoging zijn etmaal- en doorsnedengemiddelde temperaturen. Toetsing aan de hand van volumegemiddelde temperaturen van de grens van de mengzone tot het uiteinde van het betreffende havenbekken (de gedefinieerde mengzone) lijkt onwaarschijnlijk. Toch zijn in de meeste onderzoeken tot nu toe de volumegemiddelde temperaturen uitgerekend en niet de doorsnedengemiddelde temperaturen.

Van de genoemde criteria kan gemotiveerd worden afgeweken, wanneer daar aanleiding toe is. Zo is de CIW-beoordelingssystematiek voornamelijk gebaseerd op koelwaterlozingen in rivieren, waar migratie van vissen van belang is. Voor de afgesloten havenbekkens van de 1^e en 2^e Maasvlakte - waar migratie van vissen nauwelijks van toepassing is - kunnen de richtlijnen en in het bijzonder de definitie van de mengzone anders geïnterpreteerd worden: als de warmtelozing plaatsvindt in een haven, dan kan een deel van de haven worden aangewezen als mengzone. In de situatie van de havenbekkens in de Maasvlakte betekent dit, dat de rand van de mengzone waarschijnlijk bij de

mondung van de havenbekkens aan het Beerkanaal komt te liggen. De reden hiervoor is dat het Beerkanaal twee watersystemen met elkaar verbindt, en hierdoor migratie van vissen mogelijk is.

Klimaatverandering heeft geen invloed op het criterium van maximale temperatuurverhoging, maar wel op het absolute criterium van maximale temperatuur. Bij het voorspellen van een toekomstig scenario moet de klimaatverandering daarom zeker meegenomen worden. Voorspellingen over de grootte en snelheid van klimaatverandering variëren sterk. Voorspellingen over de verhoging van de watertemperatuur in de Rotterdamse haven lopen uiteen van 0,5 tot 1°C in 2050. In bijlage B.3 is meer informatie over dit onderwerp te vinden [gebaseerd op www.knmi.nl en www.waterstat.nl].

Kortom, op twee punten is de interpretatie van de CIW-richtlijn niet eenduidig:

- De waterkwaliteitsdoelstelling van het oppervlaktewater in de havenbekkens: water voor karper- of voor schelpdierachtigen?
- De grootte van de mengzone: waar komen de grenzen van de mengzones te liggen met bijbehorende maximaal toegestane temperatuur?

Waarschijnlijk worden de havenbekkens gekenmerkt als water voor schelpdierachtigen, en liggen de randen van de mengzones bij de monding van de desbetreffende havenbekkens (Yangtzehaven, Amazonehaven, etc.) aan het Beerkanaal.

Meer informatie over de CIW-beoordelingssystematiek en de toetsing van de warmtelozingen hieraan is weergegeven in bijlage B.2.

3.4 Economische gevolgen opwarming havenbekkens

De opwarming van de havenbekkens door thermische lozingen heeft mogelijk ook financiële gevolgen voor de energiecentrales en chemie. In paragraaf 3.4.1 wordt beschreven wanneer rendementsverlies optreedt en wat de mogelijke financiële gevolgen hiervan zijn. Dezelfde aspecten bij noodzakelijke terugdraaiing van het elektrische opwekkingsvermogen worden beschreven in paragraaf 3.4.2.

3.4.1 Rendementsverlies

Wanneer door recirculatie van warmte verhoging van de watertemperatuur bij de inlaatlocaties optreedt, heeft dit rendementsverlies van de energiecentrales tot gevolg. Dit kan als volgt worden toegelicht: elke graad hogere koelwatertemperatuur resulteert in een eveneens één graad hogere condensortemperatuur. Bij deze hogere condensortemperatuur is de druk van de condenserende stoom in de condensor hoger, wat resulteert in een afname van het elektrische rendement van de centrale. In bijlage B.4 is meer informatie te vinden over de werking en het rendement van een energiecentrale.

Zo is voor de energiecentrales bekend [KEMA, 2004 en ROYAL HASKONING, 2006], dat een verhoging van de koelwatertemperatuur met circa 1°C resulteert in een verlaging van het rendement van de centrale met circa 0,3%, ofwel een verlies aan opgewekt vermogen van circa 3 MWe in de huidige situatie.

Uit Tabel 3-3 blijkt dat de totale productiekosten per MWh ongeveer € 50,- bedragen. Deze kosten zijn moeilijk te voorspellen en verschillen sterk door fluctuaties in de brandstofkosten.

Tabel 3-3 Gehanteerde elektriciteitsproductiekosten volgens OESO [ROYAL HASKONING, 2006]

| | Kosten in € per MWh |
|--|---------------------|
| Kapitaallasten investering | 13 |
| Onderhoud en bediening | 7 |
| Brandstofkosten (bij steenkoolprijs van € 80,-/ton) | 30 |
| Totaal productiekosten (excl. netbeheer, transport, distributie, marge etc) | 50 |

Als voorbeeld volgt in Tabel 3-4 een berekening van de kosten ten gevolge van het rendementverlies voor de energiecentrales in de toekomstige situatie, aangenomen dat de opwarming bij de E.ON-inlaat door thermische lozingen circa 1°C bedraagt, en bij de overige inlaatlocaties 0,5°C.

Tabel 3-4 Voorbeeld berekening kosten rendementverlies energiecentrales

| Elektrisch vermogen | E.ON: 2120 MWe | Electrabel: 800 MWe | EnecoGen: 400 MWe |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Lozingsdebiet | circa 90 m ³ /s | circa 28 m ³ /s | circa 13 m ³ /s |
| Opwarming | 1,0 °C | 0,5 °C | 0,5 °C |
| Rendementsverlies | 0,3% / 6,5 MWe | 0,15% / 1 MWe | 0,15% / 0,5 MWe |
| Kosten rendementverlies (* 8000 h/jaar * 50 €/MWh =) | 2,6 miljoen euro/jaar | 0,4 miljoen euro/jaar | 0,2 miljoen euro/jaar |

Uit de tabel blijkt dat bij een aangenomen temperatuurverhoging bij de inlaat van de energiecentrales (1°C en 0,5°C) een jaarlijks rendementverlies optreedt van ruim drie miljoen euro. In het vervolg van deze studie zal worden onderzocht wat een aannemelijke temperatuurverhoging is.

Een analyse van LIGTERINGEN EN DIJKEMA (2007) toont echter aan dat het rendementverlies in werkelijkheid geringer is. Zij beweren dat 0,3% afname in elektriciteitsproductie bij een ontwerprendement van 42 procentpunt [%] een rendementverlies geeft van 0,12 procentpunt [%/°C]. Aangezien zij rekenen met een hogere energieprijis verschilt het geschatte rendementverlies niet veel van de hierboven berekende schade. Een schatting van circa 2 miljoen euro rendementverlies van de E.ON-centrale per jaar bij 1°C ophoging van de inlaattemperatuur lijkt een goede aanname.

Ook bij de chemische industrie die gebruik maakt van koelwater uit de havenbekkens zal mogelijk rendementverlies optreden ten gevolge van opwarming van het water in de havenbekkens. Een schatting voor de kosten van dit rendementverlies is in dit stadium nauwelijks mogelijk. Het zal echter van een kleinere orde zijn dan bij de energiecentrales.

In tegenstelling tot het rendementverlies van energiecentrales en chemie heeft een LNG terminal, die water uit de havenbekkens inneemt om de LNG op te warmen, juist baat bij hogere inlaattemperaturen. Er hoeft dan minder water door het opwarmingssysteem gepompt te worden. Er wordt van uitgegaan dat deze kostenbesparing echter van een veel kleinere grootteorde zal zijn dan het hierboven berekende rendementverlies van energiecentrales.

In deze studie wordt aangenomen dat de kosten en opbrengsten voor chemie respectievelijk LNG door temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties elkaar opheffen, gezien de grote onzekerheden en de kleinere effecten hiervan ten opzichte van energiecentrales.

3.4.2 Clipping

De kans bestaat dat de absolute temperatuur in de havenbekkens in een warme zomerperiode te hoog wordt. Dit heeft tot gevolg dat het elektrische opwekkingsvermogen van energiecentrales tijdelijk moet worden teruggedraaid. Dit wordt ‘clipping’ genoemd [LIGTERINGEN EN DIJKEMA, 2007]. De kosten van het terugdraaien van het productieproces zijn afhankelijk van het aantal minder geproduceerde MWh, de duur van productievermindering en de hoogte van elektriciteitsopbrengsten in de betreffende periode. Dit laatste fluctueert sterk en een nadere analyse hiervan valt buiten het bereik van dit onderzoek. Aangenomen wordt dat de elektriciteitsopbrengsten in de zomerperiode het volgende bedragen [ROYAL HASKONING, 2006]:

- een bedrag van € 100,-/MWh als het productieverlies optreedt gedurende een beperkte periode;
- een bedrag van € 75,-/MWh, als het productieverlies optreedt gedurende een langere periode.

Beide bedragen moeten worden gecorrigeerd voor het feit, dat in genoemde periode minder brandstof wordt verbruikt (kosten brandstofverbruik circa € 30,-/MWh, zie Tabel 3-3).

In hoeverre de situatie zal optreden dat het elektrische opwekkingsvermogen moet worden teruggedraaid en gedurende welke periode, hangt af van de te verwachten temperatuurverhoging in de

havenbekkens (wat in deze studie onderzocht wordt), van de stijging van de watertemperatuur door klimaatverandering en van de maximaal toegestane watertemperatuur buiten de mengzone. Voor dit laatste geldt, dat wanneer het oppervlaktewater in de Maasvlakte wordt aangemerkt als:

- water voor karperachtigen, dan is de maximaal toegestane temperatuur buiten de mengzone 28°C. De overschrijdingskans van deze temperatuur is waarschijnlijk gering.
- water voor schelpdierachtigen, dan is de maximaal toegestane temperatuur buiten de mengzone 25°C. De kans dat deze maximale temperatuur wordt overschreden is aanmerkelijk groter.

Wanneer er een schatting bekend is van de te verwachten temperatuurverhogingen in de havenbekkens (zie hoofdstuk 8), kan over de frequentie en duur van het overschrijden van de maximaal toegestane temperatuur – en daarmee de economische schade ten gevolge van het terugdraaien van het elektrische opwekkingsvermogen van energiecentrales – meer duidelijkheid gegeven worden.

3.5 Nautische beperkingen aan thermische lozingen

Grote koelwaterlozingen, vooral van energiecentrales, kunnen aanzienlijke stroomsnelheden in het ontvangende water veroorzaken. Dit kan leiden tot hinder voor de scheepvaart, zeker wanneer de stromingen loodrecht op de vaarrichting gelegen zijn en de (binnenvaart)schepen ter plekke een relatief lage snelheid hebben vanwege aanleg- of afvaart manoeuvres. Om deze nautische reden zijn er richtlijnen voor dwarsstromen (ten gevolge van koelwaterlozingen) opgesteld, voornamelijk te herleiden tot beperkingen aan maximaal optredende stroomsnelheden.

In de Richtlijnen Vaarwegen [RIKSWATERSTAAT, 2005] worden de volgende criteria gesteld voor maximale langs- en dwarsstroomsnelheden in binnenvaarwegen:

- langsstroomsnelheid bij manoeuvreerplaatsen is maximaal 0,5 m/s;
- dwarsstroomsnelheid:
 - als het dwarsdebiet $Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$, maximaal 0,3 m/s;
 - als het dwarsdebiet $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$, dan is nader onderzoek nodig.

Zoals vermeldt in BLOKLAND (2006) dienen de door koelwaterlozing veroorzaakte stroomsnelheden te voldoen aan de volgende eisen:

- de snelheden zijn maximaal 0,5 m/s
- de snelheidscomponent loodrecht op de oeverlijn is maximaal:
 - 0,30 m/s bij een dwarsdebiet van circa 50 m³/s,
 - 0,22 m/s bij een dwarsdebiet van circa 100 m³/s,
 - 0,15 m/s bij een dwarsdebiet van circa 150 m³/s.

De meeste koelwaterlozingen (Electrabel, EnecoGen, Gate LNG, en de chemie op Maasvlakte 2) veroorzaken dwarsstromen kleiner dan 50 m³/s. Uitgaande van bovenstaande richtlijnen geldt dan een maximale dwarsstroomsnelheid van 0,3 m/s. Wanneer Electrabel in de toekomst de 2^e unit in gebruik neemt, wordt het dwarsdebiet daar ruim 50 m³/s, en zal de maximaal toegestane dwarsstroomsnelheid wellicht lager uitvallen.

De E.ON-centrale, verantwoordelijk voor het grootste lozingsdebiet, zal in de toekomst ongeveer 90 m³/s lozen. Aangezien nabij de lozingslocatie een haven voor binnenscheepvaart gepland is, is het van belang de optredende stroomsnelheden ten gevolge van de lozing klein te houden (maximaal 0,2 m/s). In de huidige situatie voorkomt de blokkendam grote stroomsnelheden. Tijdens de aanleg en gebruik van de 2^e Maasvlakte zal of de blokkendam moeten blijven liggen, of een andere soortgelijke maatregel toegepast moeten worden om de stroomsnelheden ten gevolge van de lozing klein genoeg te houden.

3.6 Overige effecten thermische lozingen

Tot slot wordt hier kort ingegaan op overige mogelijke effecten van thermische lozingen in de havenbekkens. De vraag is in hoeverre deze effecten een significante rol spelen. In deze studie zal hier niet uitgebreid op ingegaan worden, maar worden wel een paar voorbeelden genoemd ter illustratie.

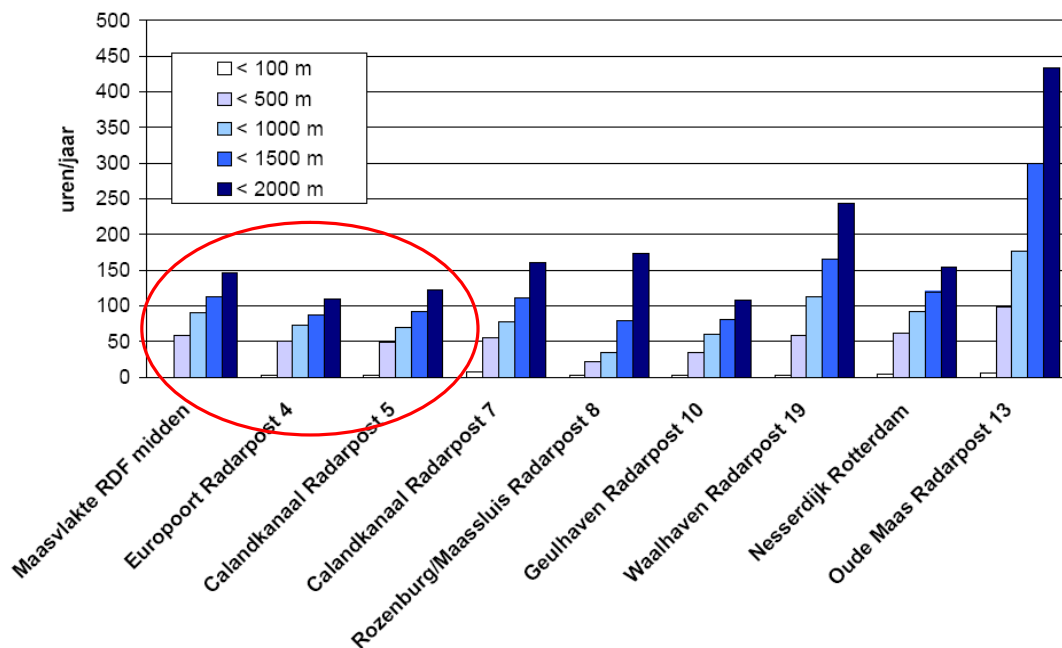
Sedimentatie

Koelwatergebruik met aanzienlijke debieten kunnen morfologische veranderingen teweeg brengen. Zo kunnen bijvoorbeeld op bepaalde plekken zoals bij de inlaatlocaties de stroomsnelheden toenemen, wat plaatselijke erosie / uitschuring kan veroorzaken. Of andersom, waar de stroomsnelheden afnemen kan meer sedimentatie plaatsvinden. Dit is nadelig voor de vereiste diepte in de havenbekkens.

Waarschijnlijk is de geometrie van de havenbekkens en het debiet van de grootste koelwatergebruikers in het Maasvlaktegebied dusdanig dat er geen noemenswaardige veranderingen teweeggebracht zullen worden. Dit kan natuurlijk nader onderzocht worden, maar blijft in deze studie verder buiten beschouwing.

Mistvorming

Vanwege de hoge verkeersintensiteit in de Rotterdamse haven is het zicht belangrijk voor de veiligheid van de scheepvaart. In Figuur 3-2 is te zien hoeveel uur per jaar er minder zicht is dan een bepaalde afstand. Zo is het zicht op de Maasvlakte ongeveer 50 uur per jaar minder dan 500 meter.



Figuur 3-2 Onderschrijdingsverdeling van het zicht in het Maasvlaktegebied (in rood omcirkelt). [Havenbedrijf Rotterdam N.V., 2004]

Wanneer de watertemperatuur aan het wateroppervlak ten gevolge van thermische lozingen hoger wordt, is het mogelijk dat er iets vaker mistvorming ontstaat en daarmee het aantal uren beperkt zicht per jaar toeneemt. Ook dit kan nader onderzocht worden, maar blijft in dit onderzoek buiten beschouwing.

4 OMGEVINGSCONDITIES

Om de genoemde effecten in het vorige hoofdstuk te kunnen kwantificeren en te toetsen aan de randvoorwaarden, is kennis nodig van de hydraulische data van het Maasvlaktegebied. Vooruitlopend op de analyse van de aanwezige warmtetransportprocessen rijst dus de vraag: welke data zijn nodig om de aanwezige processen te kunnen benoemen, beschrijven en/of kwantificeren? Een eerste scan leidt tot de volgende aspecten en bijbehorende vragen:

- *Dimensies havenbekkens:* Om de effecten van de thermische lozings in te schatten is allereerst de geometrie van het Maasvlaktegebied van belang. Wat is de situering van de havenbekkens? En wat zijn de dimensies?
- *Waterbeweging:* Een volgende stap is het in kaart brengen van de waterbewegingen in deze havenbekkens. Hoe groot is het getij en de zoetwaterafvoer? Wat zijn de optredende stroomsnelheden? In hoeverre heeft de wind hier invloed op?
- *Watertemperaturen:* Gezien het onderwerp van deze studie moet natuurlijk worden uitgezocht wat de huidige watertemperaturen zijn, zowel van Noordzeewater als van het Maaswater. En hoe verhoudt het verticale temperatuursverloop in de waterkolom zich?
- *Saliniteit:* Aangezien in de havenbekkens zowel zout water uit de Noordzee als zoet water van de Maas stroomt, leidt dit tot dichtheidsverschillen. Ook dit veroorzaakt stromingen en oefent invloed uit op de verspreiding van warmte. Van belang is het dus om antwoord te kunnen vinden op de volgende vraag: wat zijn de horizontale en verticale saliniteitsgradiënten?
- *Stratificatie:* Door sterke dichtheidsverschillen over de diepte kan verspreiding van warmte over de diepte beperkt worden. Met behulp van de bevindingen wat betreft watertemperaturen en saliniteit moet de vraag beantwoord worden: vindt er stratificatie plaats in de havenbekkens? En zo ja, wat zijn de verticale dichtheidsgradiënten?

Leeswijzer

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens kort deze benodigde omgevingscondities beschreven. De data zijn nodig om begrip te krijgen van de warmtetransportprocessen bij de verspreiding van de thermische lozings in de havenbekkens, beschreven in de volgende hoofdstukken.

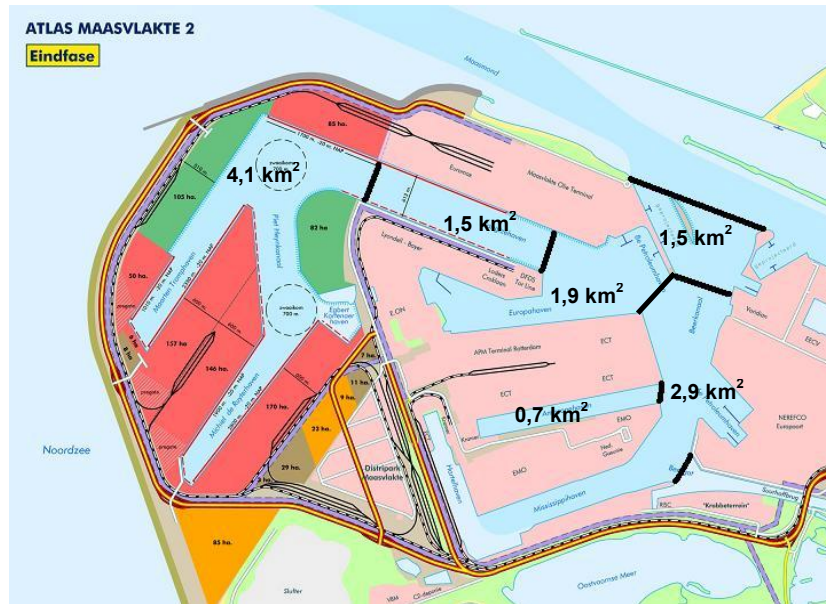
4.1 Dimensies havenbekkens

4.1.1 Bergend oppervlak

Bij de afdeling ‘Geo-informatie & Visualisatie’ van het Havenbedrijf Rotterdam is met het programma ‘AutoCad’ de totale bergende oppervlakte van de havenbekkens van het beschouwde balansgebied uitgerekend, zie Figuur 4-1. In totaal is het bergend oppervlak van Maasvlakte 1 & 2: $A_h = 11,1 \text{ km}^2$.

Figuur 4-1 Oppervlaktes van de havenbekkens in het Maasvlaktegebied

Verlengde Yangtzehaven: 4,1 km²
 'Oude' Yangtzehaven: 1,5 km²
 Europahaven etc.: 1,9 km²
 Beerkanaal etc.: 2,9 km²
 Amazonehaven: 0,7 km²
Totaal circa 11,1 km²
 (Noordelijkste stuk Beerkanaal niet meegerekend)



4.1.2 Gemiddelde diepte en volume

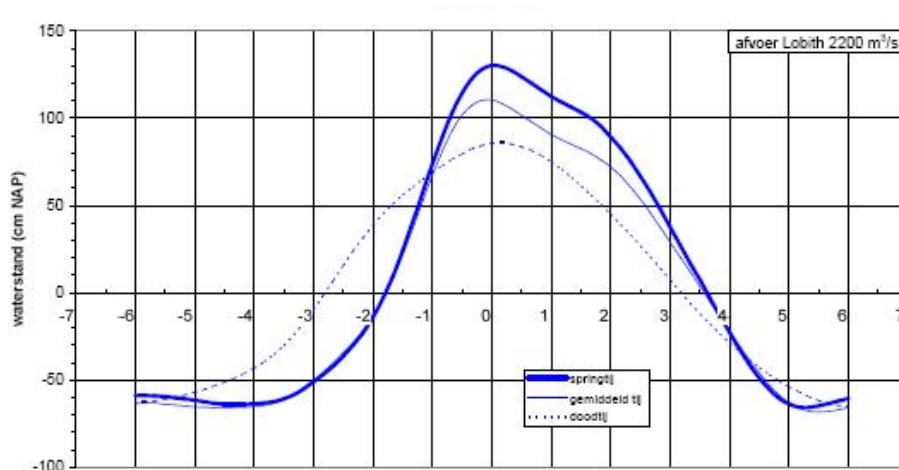
De dimensies van Maasvlakte 1 & 2 zijn vastgesteld aan de hand van toekomstige maatgevende diepe containerschepen en bulk carriers. Volgens het MER-Bestemming hoofdrapport wordt deze diepte ongeveer -20 mNAP [PROJECTORGANISATIE MAASVLAKTE 2, 2007b]. De overdiepte na baggerwerkzaamheden zal maximaal -22 mNAP bedragen. In de zwaaikolken (bijlage G), voornamelijk de noordelijke zwaaikolk in de Yangtzehaven, mag de diepte geleidelijk aflopen tot -40 mNAP ten behoeve van zandbesparing. De Egbert Kortenaerhaven en Hartelhaven zijn gedimensioneerd op binnenscheepvaart en hebben een diepte van 6 tot 11 meter. Aangenomen wordt dat de gemiddelde diepte in de Maasvlakte 1&2, inclusief taluds en ondiepere delen, ongeveer -20 mNAP is.

De aangenomen gemiddelde diepte (d) geeft een totaal gemiddeld volume van de havenbekkens (V_h): $V_h = d * A_h = 222 * 10^6 \text{ m}^3$. Dit is ruim 11 keer de komberging, zie de volgende paragraaf.

4.2 Waterbeweging

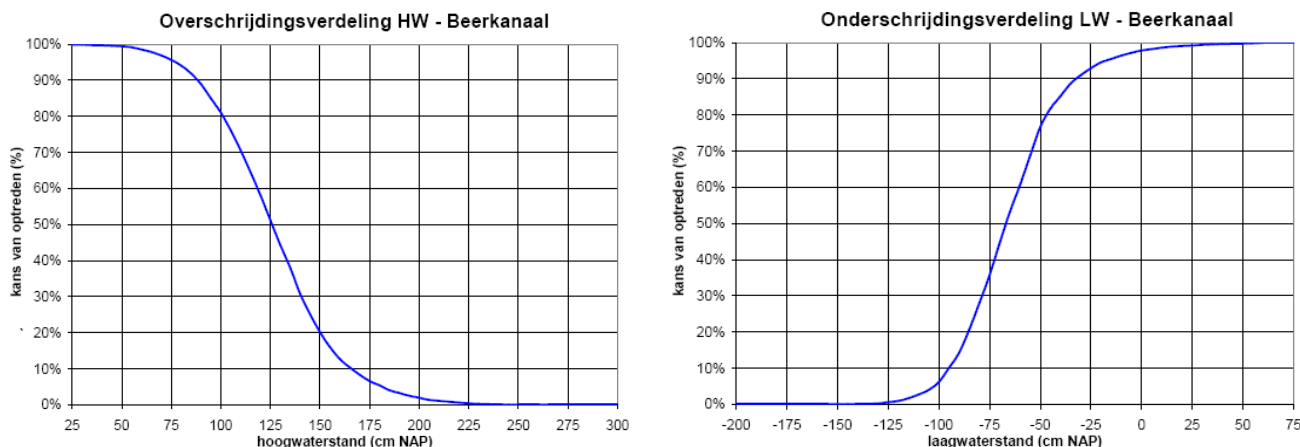
4.2.1 Getij Beerkanaal

De waterstandsvariatie wordt voor een groot deel bepaald door het getij. Daarnaast spelen weersinvloeden een belangrijke rol. Uit de Hydrometeo-bundel [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM 2007] zijn de doottij, springtij en gemiddelde getijkrommen gehaald ter plaatse van de monding van het Beerkanaal, weergegeven in Figuur 4-2.



Figuur 4-2 Getijkrommen Beerkanaal, tijd in uren t.o.v. HW [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004]

Voor de bepaling van de gemiddelde getijslag is gebruik gemaakt van gegevens van www.getij.nl. In de zomer van 2006 en 2007 zijn van juni tot en met september alle getijslagen uitgerekend. De gemiddelde getijslag is 1,75 m, wat overeenkomt met informatie verkregen van de afdeling Hydrometeo van het Havenbedrijf, Figuur 4-2. Maatgevende waarden voor springtij en doortij zijn respectievelijk 2,2 m en 1,5 m. In Figuur 4-3 zijn de overschrijdingsverdelingen van hoog- en laagwaterstanden weergegeven.



Figuur 4-3 Overschrijdingsverdelingen van hoogwaterstanden (links) en laagwaterstanden (rechts). [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM 2004]

Werkelijke waterstandsvariaties zullen enigszins verschillen van het astronomische getij door windinvloeden, seiches etc. Vooralsnog richt deze studie zich op een maatgevende zomerperiode, wanneer de invloed van wind geringer is dan gedurende de rest van het jaar. Daarom wordt wind set-up voorlopig buiten beschouwing gelaten.

4.2.2 *Komberging havenbekkens*

Het effect van het getij op de koeling in de havenbekkens kan globaal geanalyseerd worden als bekend is hoeveel water er ongeveer per getij via het Beerkanaal de Maasvlakte 1 & 2 in en uitgaat.

Wanneer de grootste afmeting van de havenbekkens, circa 10 km, zeer klein is ten opzicht van de golflengte van het getij, kan het kombergingsprincipe worden toegepast op de havenbekkens. Dit wil

zeggen dat de waterstandshoogtes overal in Maasvlakte 1 & 2 nagenoeg als gelijk kunnen worden beschouwd. De waterspiegel is op elk moment vrijwel horizontaal. Hiermee kan de komberging – de hoeveelheid water die per getij in en uit de havenbekkens stroomt – eenvoudig worden bepaald.

Met behulp van de volgende twee formules en gerekend met een gemiddelde havendiepte (d) van 20 m en een getijperiode (T_s) van 44700 s, is golflengte van het getij ongeveer 630 km:

$$c = \sqrt{gd} \text{ en } L = cT_s$$

Met: c = voortplantingssnelheid van een lange golf [m/s]
 g = zwaartekrachtsversnelling, gelijk aan $9,81 \text{ m/s}^2$.

De maximale afmetingen van de havenbekkens zijn inderdaad verwaarloosbaar klein (een factor 60) ten opzichte van de golflengte van het getij. Het kombergingsprincipe mag worden toegepast.

Van de bewegingsvergelijking kunnen de traagheidsterm en weerstandsterm nu worden verwaarloosd [BATTJES, 2002]. Hiermee reduceert de bewegingsvergelijking en wordt de netto instroom Q_g [m^3/s] gegeven door:

$$Q_g = A_h \frac{dh(t)}{dt}$$

Met: dh/dt = waterstandsvariatie [m/s]
 A_h = bergend oppervlak [m^2]

Invullen van deze formule met de waarden zoals beschreven in de voorgaande paragrafen geeft een komberging V_g van:

$$V_g = A_h \cdot \Delta h = 11,1 \cdot 10^6 * 1,76 = 19,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3.$$

Dit geeft een gemiddeld debiet $Q_{g:gem}$ door de monding van het Beerkanaal over een halve getijcyclus:

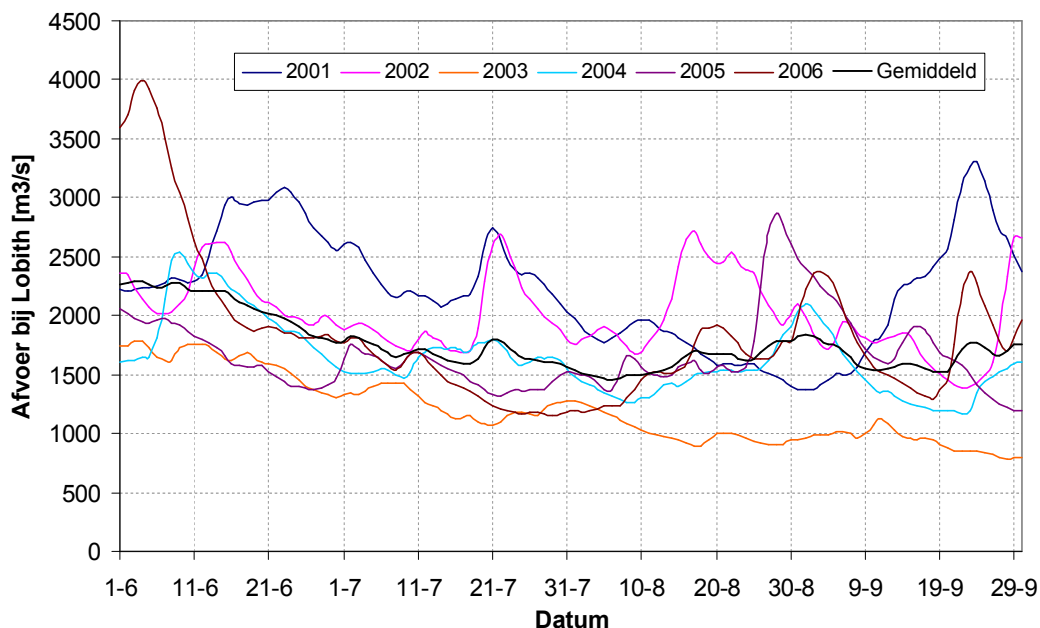
$$Q_{g:gem} = \frac{V_g}{\frac{1}{2} \cdot T_s} = \frac{19,5 \cdot 10^6}{\frac{1}{2} \cdot 44700} \approx 870 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Opgemerkt moet worden dat deze berekening van het getijdebiet door de monding van het Beerkanaal een onderschatting is. In werkelijkheid stroomt er iets meer water in en uit, aangezien het getij ook van invloed is op de waterstand in het Hartelkanaal. Het wateroppervlak A_h is in feite dus groter.

4.2.3 Zoetwaterafvoer

De afvoer bij Lobith heeft grote invloed op de hoeveelheid zoet water in de havenbekkens en daarmee op de gradiënten in de saliniteit. Een deel van de afvoer bij Lobith komt via de Nieuwe Waterweg en de Noordzee (vanwege de getijbeweging) in de havenbekkens van de Maasvlakte terecht. Een kleiner gedeelte komt via het Hartelkanaal de havenbekkens binnen.

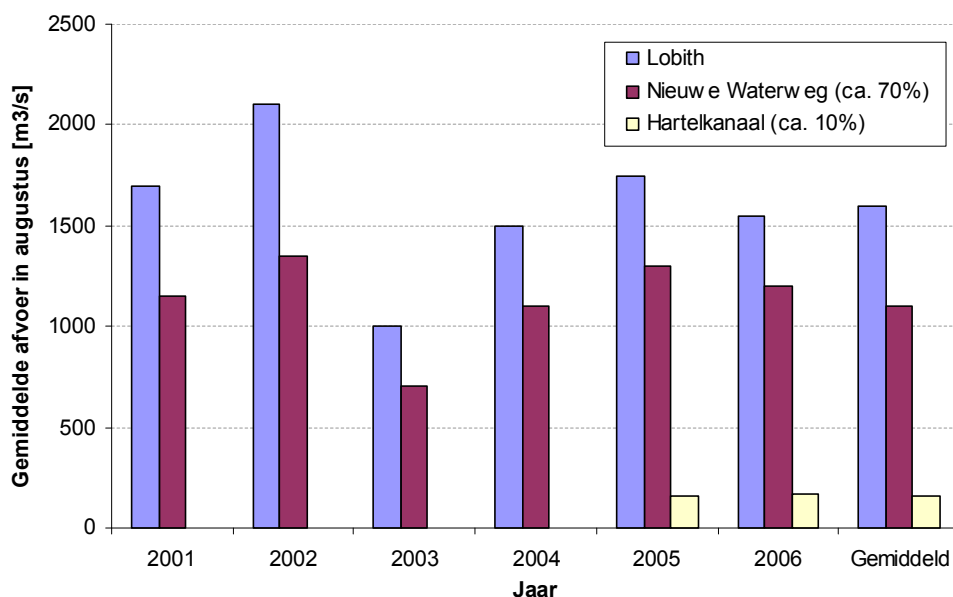
In Figuur 4-4 zijn de afvoeren van de jaren 2001 t/m 2006 in de zomermaanden (juni t/m september) bij Lobith weergegeven, samen met de gemiddelde afvoer.



Figuur 4-4 Afvoer bij Lobith in de maanden juni tot en met september van de jaren 2001 t/m 2006. [www.waterbase.nl]

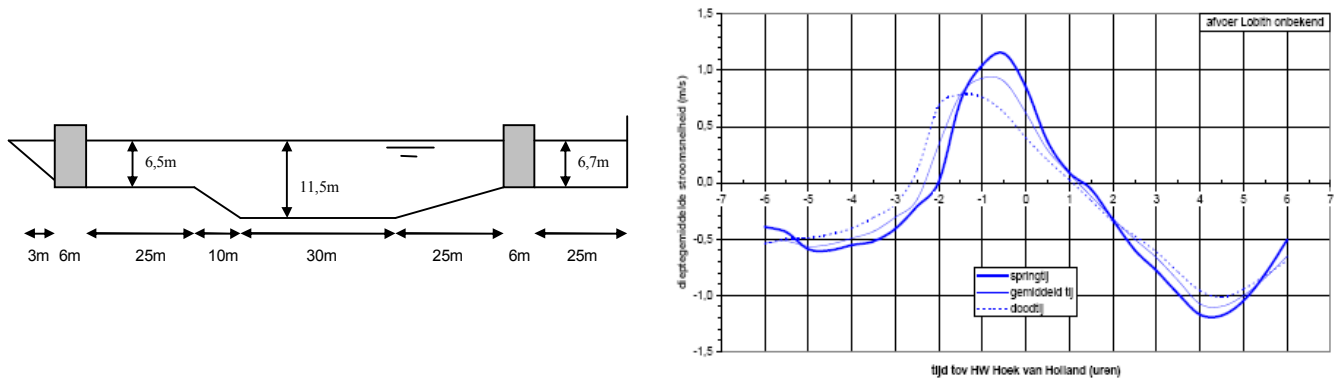
In de maand augustus komen over het algemeen de laagste afvoeren voor, gemiddeld $1600 \text{ m}^3/\text{s}$. De variatie in afvoer kan echter groot zijn. Figuur 4-5 geeft een overzicht van gemiddelde afvoeren in de maand augustus van enkele beschouwde jaren, voor zowel de afvoer bij Lobith als de afvoer van de Nieuwe Waterweg en het Hartelkanaal [www.waterbase.nl].

De afvoer van de Nieuwe Waterweg is bepaald aan de hand van metingen bij Maassluis. De afvoer blijkt ongeveer 70% van de afvoer bij Lobith te bedragen. De afvoer van het Hartelkanaal is bepaald door het verschil uit te rekenen van de gemiddelde afvoeren gemeten bij de Maasmond en bij Maassluis, en bedraagt ongeveer 10% van de afvoer bij Lobith. Opgemerkt moet worden dat de bepaling van de afvoer van het Hartelkanaal slechts gebaseerd is op waarnemingen van 2 jaar, meer informatie is niet beschikbaar.



Figuur 4-5 Gemiddelde zoetwaterafvoeren in de maand augustus, bepaald met behulp van metingen bij Lobith, Maassluis en de Maasmond. [www.waterbase.nl]

Gezien de beperkte hoeveelheid gegevens van de afvoer van het Hartelkanaal wordt hier op een tweede manier de afvoer van het Hartelkanaal bepaald. Dit gebeurt met behulp van metingen van stroomsnelheden ter plaatse van de Suurhoffbrug, gemeten door de afdeling ‘Mariene Geo-Informatie’ van het Havenbedrijf Rotterdam. Een ultrasone snelheidsmeter (Surflow) meet op 4.5 m diepte een 10 seconde gemiddelde stroomsnelheid tussen de pijlers. Daaruit wordt een 1 minuut gemiddelde stroomsnelheid berekend. De datareeks bestaat uit 10 minuten vakgemiddelde metingen van april 2001 tot oktober 2007. Deze geven een zomergemiddelde stroomsnelheid van 0,20 m/s. Met een stroomvoerende doorsnede van ongeveer 900 m², zie Figuur 4-6, geeft dit een gemiddeld debiet van circa 180 m³/s. Dit komt redelijk overeen met bovenstaande bevindingen.



Figuur 4-6 Doorsnede Suurhoffbrug, ter bepaling van de afvoer van het Hartelkanaal. Rechts zijn de gemeten stroomsnelheden gedurende een getijperiode weergegeven.

4.2.4 Stroomsnelheden

Helaas zijn er weinig meetreeksen van stroomsnelheden beschikbaar. Het Havenbedrijf heeft twee meetlocaties in de buurt van het Maasvlaktegebied. Een daarvan is ter hoogte van de Suurhoffbrug, zoals hierboven beschreven. De andere locatie is in de buurt van de Maasmond. Het is helaas echter niet mogelijk snelheidsmetingen ter plekke van de Maasmond te verkrijgen.

Met behulp van kennis van de hydrodynamica en de nu bekende gegevens van de geometrie van de havenbekkens, de getijbeweging en de zoetwaterafvoer, wordt toch geprobeerd hier een schatting te maken van maatgevende stroomsnelheden rond het Maasvlaktegebied.

Uit bovenstaande analyse bleek dat het debiet van de Nieuwe Waterweg circa 70% bedraagt van de afvoer bij Lobith. Dit geeft een jaargemiddelde afvoer ter plaatse van de monding van de Nieuwe Waterweg van ongeveer 1500 m³/s. Met een stroomoppervlak van 700 bij 15 m geeft dit een gemiddelde stroomsnelheid van 0,1 á 0,2 m/s. Vergelijkend met het Hartelkanaal is het vanwege de sterkere getijwerking te verwachten dat de maximale vloed en eb stroomsnelheden iets groter zullen zijn.

De stroomsnelheden in de monding van het Beerkanaal kunnen worden geschat aan de hand van de komberging en de snelheid waarmee het water gemiddeld stijgt en daalt per getijcyclus. Aangenomen wordt dat het water tijdens springvloed maximaal ongeveer 1,3 m/uur stijgt. Met een totale komberging van ruim 11 km² moet er in een uur dus ongeveer 15*10⁶ m³ water door de monding van het Beerkanaal. Dit veroorzaakt maximale stroomsnelheden in de orde van grootte van 0,4 m/s. Uit Figuur 4-2 kan geconcludeerd worden dat tijdens eb het water net iets minder snel zakt dan dat het stijgt tijdens vloed. Een maximale stroomsnelheid van ongeveer 0,3 m/s tijdens eb is een reële schatting.

In de afgesloten havenbekkens van de Europahaven en Amazonehaven zijn de optredende stroomsnelheden relatief klein.

Ook dichtheidsgradiënten van het water en de wind hebben invloed op de stroomsnelheid. Hier wordt later dieper op ingegaan. Alle bovenstaande schattingen zijn weergegeven in Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Geschatte maatgevende stroomsnelheden in het Maasvlaktegebied [m/s], positief richting zee.

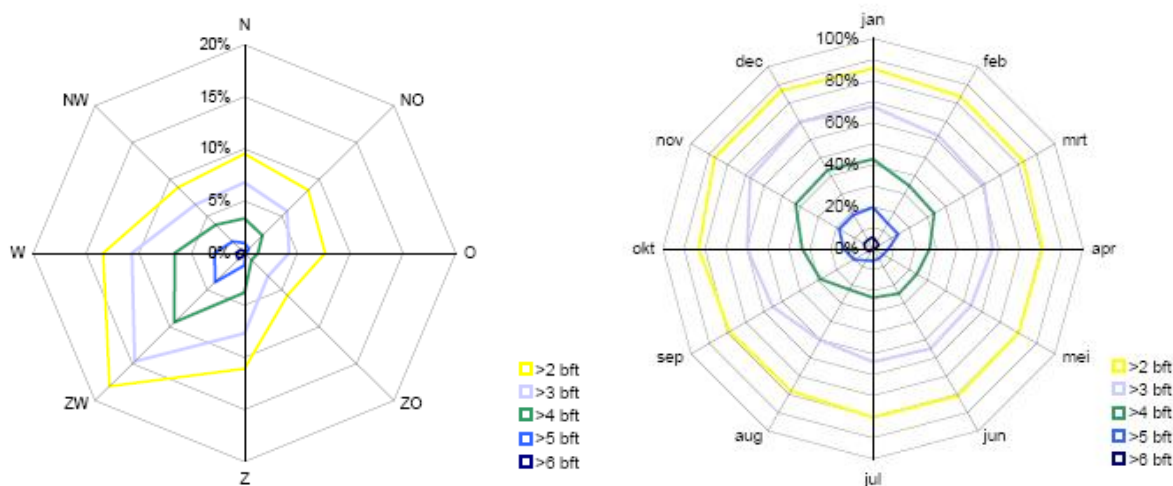
| Locatie | Gemiddeld | Tijdens vloed (max.) | Tijdens eb (max.) |
|-------------------------|-----------|----------------------|-------------------|
| Monding Nieuwe Waterweg | 0,1 á 0,2 | ~ -1,4 | ~ 1,6 |
| Monding Beerkanaal | < 0,1 | ~ -0,4 | ~ 0,3 |
| Hartelkanaal | 0,2 | ~ -1,2 | ~ 1,4 |
| Europa- / Amazonehaven | << 0,1 | < -0,1 | < 0,1 |

4.2.5 Windcirculatie

Wind veroorzaakt door schuifspanningen aan het wateroppervlak een stroming in de bovenlaag, dat zowel in het horizontale als in het verticale vlak circulatie van waterstromen tot gevolg kan hebben. Bij een gestratificeerd watersysteem kan deze windcirculatie een vergroot effect hebben.

Door het veroorzaken van circulatiestromen heeft de wind indirect invloed op de verspreiding van warmte in de havenbekkens. Daarnaast veroorzaken de door wind opgewekte golven ook turbulentie in de bovenlaag, waardoor bij flinke wind verticale menging van het water in de bovenste meters van de waterkolom plaatsvindt.

In deze studie wordt de aandacht vooral op een maatgevende zomersituatie gericht, aangezien dan de meest kritieke situaties wat betreft watertemperaturen zich voordoen. In Figuur 4-7 zijn gegevens van de KMNI over de windsnelheid en windrichting bij Hoek van Holland weergegeven [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004]. Te zien is dat in de maanden mei tot en met augustus slechts 5% van de tijd de wind sterker is dan 5 bft., en waarschijnlijk gedurende korte periodes. In deze maanden zal windcirculatie dus geen dominante rol spelen met betrekking tot de verspreiding van warmte. Om dezelfde reden blijft de beïnvloeding van de waterstand door wind en wave set-up buiten beschouwing.



Figuur 4-7 Cumulatieve procentuele verdeling van de windkracht per richting (linkerfiguur) en per maand (rechterfiguur), locatie Hoek van Holland [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004]

Wel moet worden opgemerkt dat de windsnelheid invloed heeft op de warmteuitwisseling met de atmosfeer. In paragraaf 5.3 wordt hier dieper op ingegaan.

4.3 Watertemperaturen

Om te onderzoeken wat de temperatuurverhoging is van het water in het Maasvlaktegebied ten gevolge van thermische lozingen, is het natuurlijk van belang de achtergrondtemperatuur van het water te kennen.

Naast dat de watertemperatuur in de Maasvlakte varieert per seizoen, vertoont het ook fluctuaties per dag. Deze fluctuaties komen vooral in de bovenlaag voor en zijn grotendeels afhankelijk van de getijfase (ordegrootte fluctuaties: +/- 0,5°C). Daarnaast spelen in mindere mate dag/nacht fluctuaties ten gevolge van dagschommelingen van de atmosferische temperatuur een rol. Wat betreft de in hoofdstuk 3 besproken effecten en randvoorwaarden zijn voornamelijk daggemiddelde temperaturen van belang. Om deze reden worden hier de dagfluctuaties in de temperatuur gemiddeld en worden alleen de daggemiddelde temperaturen geanalyseerd.

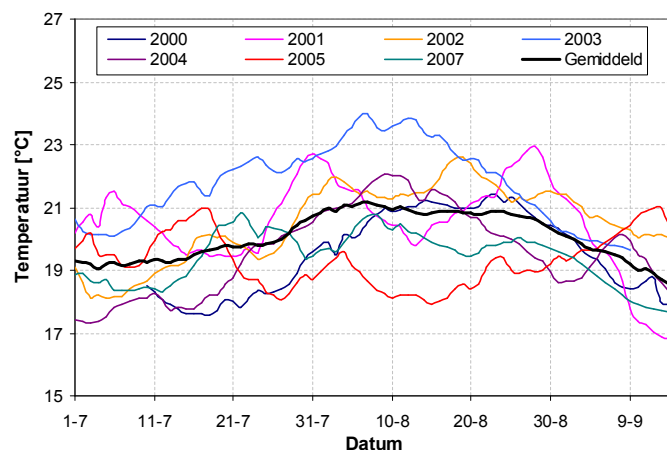
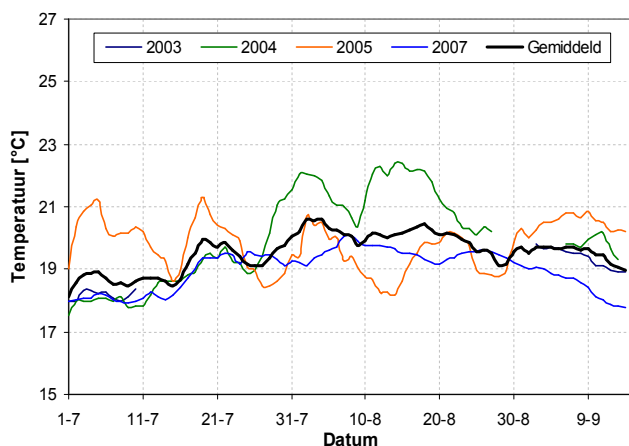
4.3.1 Dieptegemiddelde temperaturen

Er zijn geen temperatuurmetingen in het Maasvlaktegebied zelf beschikbaar. Wel zijn er metingen beschikbaar van de watertemperaturen bij het Europlatform (in de Noordzee), Hoek van Holland en de monding van het Hartelkanaal, verkregen van de afdeling 'Mariene Geo-Informatie' van het Havenbedrijf Rotterdam.

De temperatuur van het water dat met het getij door de Beermonding naar binnen stroomt, wordt beïnvloed door zowel de temperatuur van het zeewater als de temperatuur van het water van de Nieuwe Waterweg. Daarnaast zal het ook beïnvloed worden door de temperatuur van het water dat met eb uit de Maasvlakte 1 & 2 weg is gestroomd en met het getij weer deels terugkomt.

De maximale temperaturen van het zeewater (ter hoogte van het Europlatform) liggen in een zomerperiode tussen de 20 en 21°C [www.waterbase.nl].

Hoek van Holland is het dichtstbijzijnde meetpunt van het Beerkanaal. De beschikbare metingen van de afgelopen jaren zijn te zien in de linkerfiguur van Figuur 4-8. Verwacht wordt dat de piektemperaturen hier iets hoger liggen dan in de monding van het Beerkanaal, aangezien het water op deze plek net iets minder wordt gemengd met het koelere zeewater dan in de monding van het Beerkanaal. Opvallend is dat de watertemperatuur schommelt met de periode van het dood-springtij. Zo is bijvoorbeeld aan de metingen van de zomer van het jaar 2005 duidelijk te zien dat gedurende een springtij de watertemperatuur circa 2°C kouder is dan gedurende een doottij. Dit komt door de toename van verversing van het water in de Nieuwe Waterweg met het relatief koudere zeewater tijdens springtij.

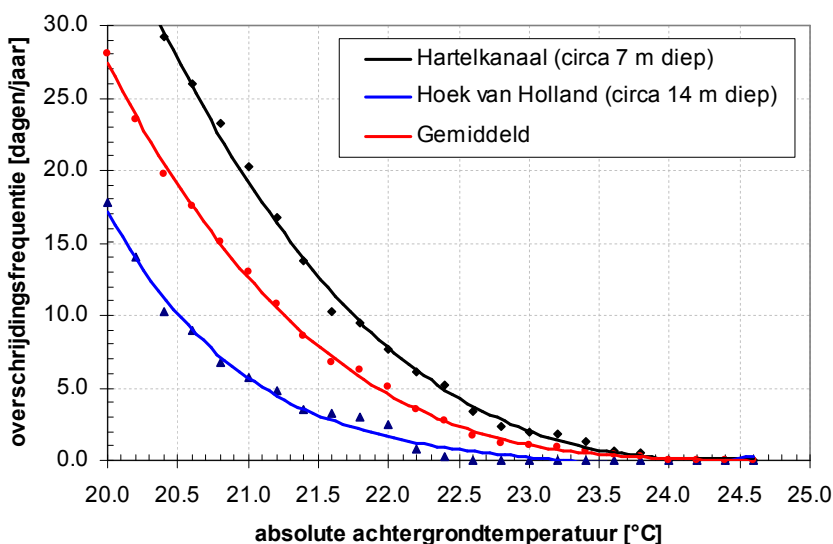


Figuur 4-8 Watertemperaturen bij Hoek van Holland (links) en de monding van het Hartelkanaal in de Maasvlakte (rechts) in de periode juli - half september.

Via het Hartelkanaal stroomt in het zuidoosten water het Maasvlaktegebied in. De temperaturen van de zomers (1 juli t/m 14 september) van de jaren 2000 t/m 2007 zijn nader bekeken, zie rechterfiguur in Figuur 4-8. De gemiddelde dagtemperatuur bedraagt 20,1°C en is warmer dan het water ter plekke van Hoek van Holland.

Aan de hand van Figuur 4-8 is te concluderen dat in augustus de hoogste watertemperaturen optreden en daarmee dus de grootste kans op een mogelijk kritieke situatie. In deze studie wordt de maand augustus dan ook als maatgevende maand beschouwd.

Vanwege de CIW-richtlijn is het interessant voor deze studie te weten hoeveel dagen per jaar een bepaalde absolute achtergrondtemperatuur wordt overschreden. Uit de bovenstaande data zijn overschrijdingsfrequenties bepaald en weergegeven in Figuur 4-9. Als voorbeeld is te zien dat bij Hoek van Holland een achtergrondtemperatuur van 21°C gemiddeld 5 dagen per jaar wordt overschreden.



Figuur 4-9 Gemiddelde aantal dagen overschrijding van een bepaalde absolute achtergrondtemperatuur per jaar zowel ter plaatse van de monding van het Hartelkanaal in de Maasvlakte als bij Hoek van Holland. Schatting gebaseerd op data uit de periode 2000 - 2007.

Het is niet mogelijk precies te voorspellen in hoeverre bovenstaande (achtergrond)temperaturen geldig zullen zijn voor de toekomstige nieuwe bekkens. Aan de ene kant zijn de gepresenteerde overschrijdingskansen in Figuur 4-9 aan de hoge kant voor de havenbekkens: de waterdiepte in de havenbekkens is groter dan die bij Hoek van Holland en er stroomt minder relatief warm rivierwater doorheen. Aan de andere kant is de verblijftijd van het water in de havenbekkens groter, waardoor het water daar meer zal opwarmen in de zomer. Om deze redenen wordt aangenomen dat in de havenbekkens een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van de achtergrondtemperatuur geldt ongeveer gelijk aan de in Figuur 4-9 gegeven achtergrondtemperatuur voor Hoek van Holland.

4.3.2 Verticale temperatuursgradiënten

Het temperatuurverschil tussen de bovenste en onderste lagen in de diepere havenbekkens rond het Beerkanaal bedraagt gemiddeld ongeveer 1°C in de zomerperiode. Uit de metingen blijkt dat dit

verschil zowel geleidelijk verlopend of als een sprong rond -5 mNAP voorkomt [RO TSAERT, 2004]. De bovenste lagen vertonen door het getij temperatuurschommelingen per dag (tot circa -8 m), de diepere lagen nauwelijks. Figuur 4-11 (links) illustreert de temperatuurgradiënten over de diepte. Dit komt in de havenbekkens in de huidige situatie (zonder grote thermische lozingen) dus niet voor. In de winter is het effect andersom, de bovenste laag is dan kouder dan de onderste laag.

4.4 Saliniteit van het oppervlaktewater

Het zoutgehalte (saliniteit) in de havenbekkens lijkt in eerste instantie niet direct van invloed te zijn op de watertemperatuur in de havenbekkens. Toch is het belangrijk zoveel mogelijk kennis hiervan te hebben. Door gradiënten in de saliniteit kunnen namelijk dichtheidsstromen ontstaan, die mogelijk invloed hebben op het transport van warmte door de havenbekkens. Ook bepaalt het zoutgehalte samen met de temperatuur de dichtheid van water, en daarmee of bijvoorbeeld warmer en zouter water wel of niet op kouder en zoeter water drijft.

De hoeveelheid zout in zeewater wordt meestal aangeduid met grootheid *S* van Saliniteit ('*Salinity*'), gemeten in de universele eenheid 'Practical Salinity Units' afgekort PSU, of in 'parts per thousands, afgekort ppt.¹ Het verschil tussen beide eenheden is verwaarloosbaar klein.

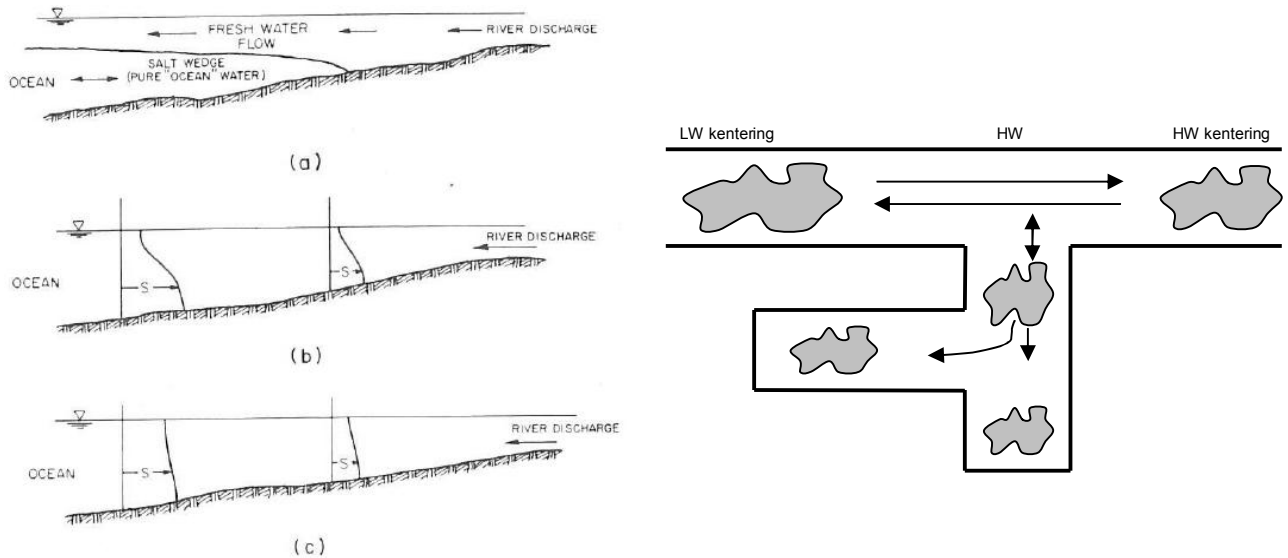
Helaas zijn er weinig meetgegevens beschikbaar over de saliniteit in de bekkens van de Rotterdamse haven.

4.4.1 Horizontale saliniteitsgradiënten

De havenbekkens kunnen worden gekenmerkt als een estuarium: er is zowel een verbinding met zout zeewater als met de zoetwaterafvoer van de Maas. Afhankelijk van de mate van menging kan er een zoutwig ontstaan wanneer het zoete water boven het zoute water stroomt, weergegeven in Figuur 4-10 links (a). Het Maasvlaktegebied is een gedeeltelijk gemengd estuarium, (b) in de linkerfiguur.

De zoutindringing in de havenbekkens van de Rotterdamse haven is een complex geheel. Mede door het gebrek aan metingen is hier nog niet veel over bekend, laat staan over de horizontale verdeling van de saliniteit in de nog niet bestaande Maasvlakte 2. Normaal gesproken wordt verder van de Noordzee af de dieptegemiddelde saliniteit lager, vanwege de afname van de indringing van het getij. Dit is terug te zien de afname van de saliniteit (*S*) landinwaarts in Figuur 4-10 links (b).

¹ De relatieve eenheid PSU (UNESCO 1978) – een hoge PSU geeft een hoge saliniteit – wordt bepaald door de geleidendheid en temperatuur van zeewater. Regelmatig wordt het symbool 'parts per thousands' (ppt) gebruikt, bijvoorbeeld 35 ppt of 35 ‰ representeert 35 gram zout in 1 kilogram zeewater. Het verschil tussen beide eenheden is klein ten opzichte van onnauwkeurigheid bij meten en modelleren van saliniteit. Vandaar wordt in deze studie aangenomen dat het verschil in PSU en ppt verwaarloosbaar klein is.



Figuur 4-10 Links: estuarium met zoutwig (a), gedeeltelijk gemengd estuarium (b) en een volledig gemengd estuarium (c) [FISCHER *et al.*, 1979]. Rechts: mechanisme van zoutindringing in het Maasvlaktegebied.

Concreet betekent dit: hogere dieptegemiddelde zoetwatergehalten in het Beerkanaal, licht afnemend verder de havenbekkens in. Verscheidene processen kunnen echter afwijkingen veroorzaken. In afgesloten havenbekkens kan bijvoorbeeld, mede door lange termijn processen (zoals verschillen in doortij en springtij door het jaar heen en de zoetwaterafvoer gedurende een langere voorgaande periode) accumulatie van zoutwolken optreden. Dit mechanisme is schematisch weergegeven in Figuur 4-10 rechts.

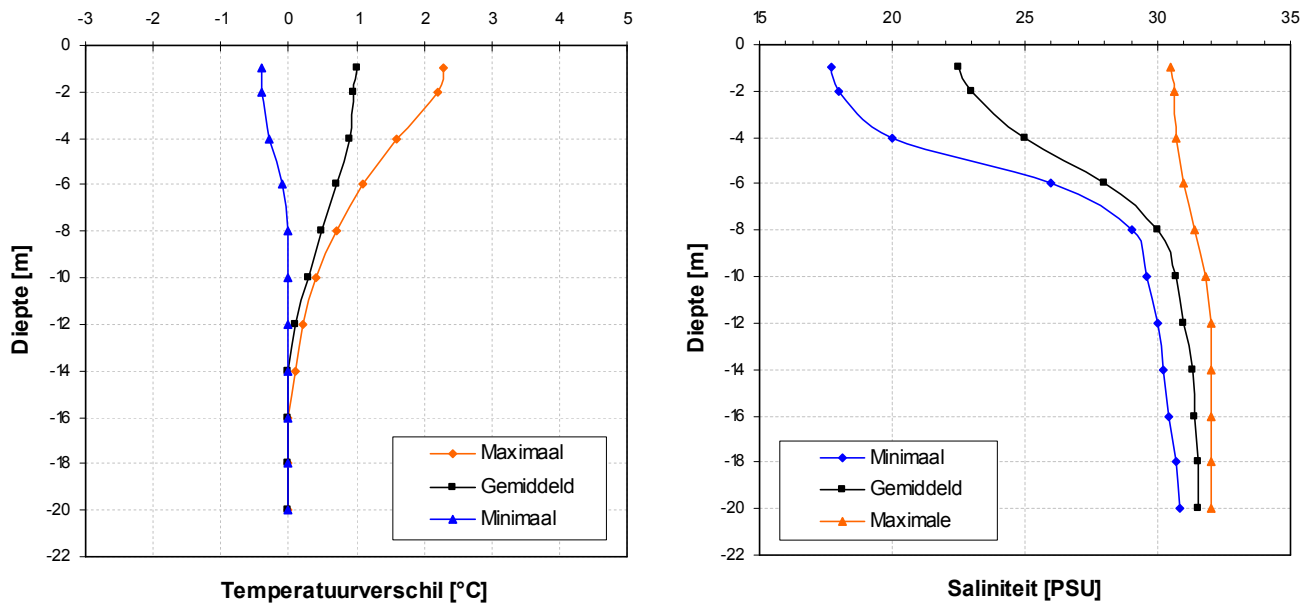
4.4.2 Verticale saliniteitsgradiënten

Uit een eerdere studie [EXPERTISECENTRUM PMR, 2003] blijkt dat het waarschijnlijk is dat stratificatie zal optreden ten gevolge van de verticale saliniteitsgradiënten die in het Beerkanaal voorkomen. De ebstroming (in de Nieuwe Waterweg) veroorzaakt een verticale gelaagdheid in de Maasmond. Tijdens eb heeft de zoetere bovenlaag een dikte van ongeveer 10 m. Rond laag water ontstaat in de Maasmond een naar binnen stromende zouttong, ook in het Calandkanaal. Dit beïnvloedt de stroming in het Beerkanaal. Vanuit het zuiden (Hartelkanaal) stroomt tijdens eb relatief zoet water in een enkele meters dikke laag over de zoutere onderlaag in het Beerkanaal, hetgeen ook verticale gelaagdheid in het Beerkanaal veroorzaakt. De saliniteit van de onder- en bovenlaag bedraagt ongeveer 29 en 25 ppt.

In augustus en september 2004 is door het Havenbedrijf Rotterdam een temperatuur- en zoutmeting uitgevoerd op drie meetlocaties in de Europahaven. Deze gegevens zijn van belang bij de analyse of stratificatie en eventuele insluiting van warmtepluimen plaatsvindt.

Uit de metingen blijkt dat de gemiddelde waarden van de drie locaties in de Europahaven weinig van elkaar verschillen, hooguit 1 PSU afname tussen het dichtstbijzijnde en meest van het Beerkanaal afgelegen meetpunt.

Gekeken naar het verloop van de saliniteit over de diepte kunnen een gemiddeld, maximaal en minimaal saliniteitsverloop getekend worden zoals in Figuur 4-11 (rechts).



Figuur 4-11 Links: temperatuurverschil tussen bovenlaag en onderlaag in havenbekkens. Rechts: gemeten saliniteit in Europahaven: bij lage zoetwaterafvoer en springtij wordt het verloop van de maximale saliniteit benaderd, en bij hoge zoetwaterafvoer in combinatie met doortij het minimum scenario.

Uit een nadere analyse van de tijdstippen van de metingen blijkt duidelijk dat de situatie met minimale saliniteit optreedt tijdens doortij en een relatief hoge zoetwaterafvoer bij Lobith de dagen voor de meting. Andersom kwam de situatie met maximale saliniteit voor tijdens springtij en een relatief lage zoetwaterafvoer bij Lobith de dagen ervoor. Wanneer een hoogwatergolf bij Lobith Nederland binnenstroomt, duurt het namelijk enkele dagen voordat de golf bij de Maasvlakte aankomt.

Het meest frequent werd een verticaal saliniteitsverloop waargenomen zoals het gemiddelde in Figuur 4-11 rechts. Het valt op dat redelijk bovenin de waterkolom (van -3 tot -8 mNAP) de saliniteit sterk verschilt. Vanaf -8 mNAP tot de waterbodem is het saliniteitsverschil klein, rond de 1 tot 2 PSU.

Hoog- en laagwater veroorzaken in de bovenlaag (eerste 5 m) kleine schommelingen in de saliniteit. Vlak na laagwater daalt de saliniteit en vlak na hoogwater stijgt de saliniteit. Gezien de korte tijdschaal zullen deze schommelingen weinig invloed hebben op de temperatuurontwikkeling in de havenbekkens.

Kortom, de reden waarom de saliniteit in de bovenste laag sterk varieert zijn dus de verschillen in getijfase (vooral door het verschil in springtij en doortij) en de hoeveelheid zoetwaterafvoer. Buiten het zomerseizoen komen vaker hogere windsnelheden voor en kunnen de gepresenteerde saliniteitsprofielen door turbulentie in de bovenlaag en wind set-up afwijken. Aangezien voor deze studie naar de maatgevende situatie in de zomer gekeken wordt, blijft wind set-up buiten beschouwing.

4.5 Stratificatie in de havenbekkens

Uit de vorige paragraaf bleek dat vanwege de combinatie van zout en zoet water in de havenbekkens stratificatie plaatsvindt in het Maasvlaktewater. Naast verticale saliniteitsgradiënten veroorzaken ook verticale temperatuursgradiënten dichtheidsverschillen. De gevolgen van verticale dichtheidsgradiënten voor de verspreiding van de temperatuur in de havenbekkens wordt besproken bij de near-field analyse in hoofdstuk 6.

De dichtheid van water (ρ_w) is een functie van de saliniteit en de temperatuur. Eckart (1958) geeft een empirische relatie voor zeewater [WL|DELFT HYDRAULICS, 2006]:

$$\rho_w = \frac{1,000P_0}{\lambda + \alpha_0 P_0}$$

Met:

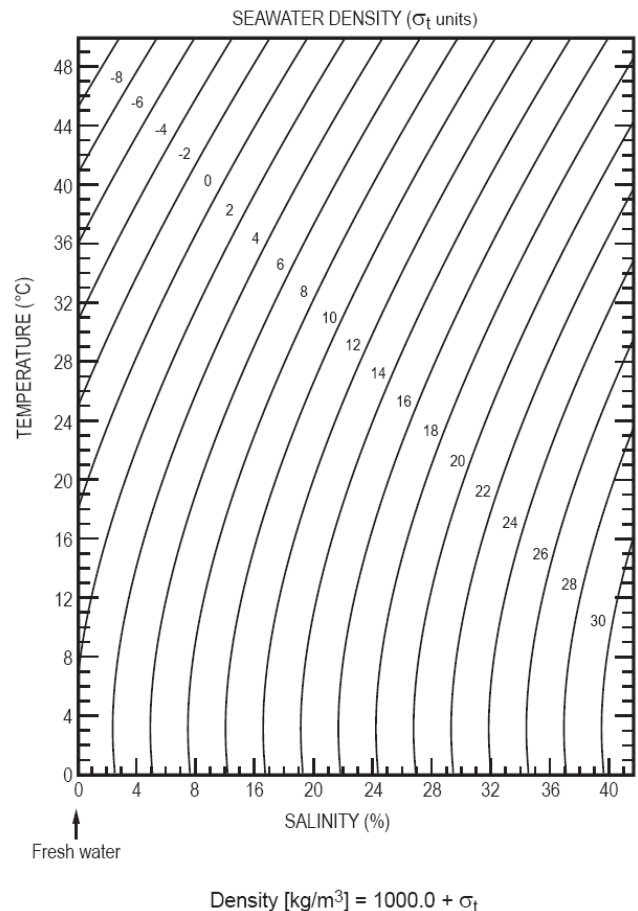
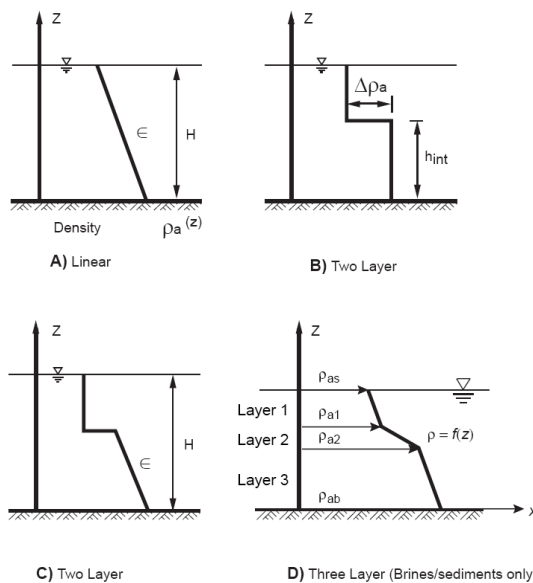
$$\begin{aligned} \lambda &= 1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2 - (3.80 + 0.01T)S, \\ \alpha_0 &= 0.6980 \\ P_0 &= 5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S \end{aligned}$$

Met de saliniteit (S) in ppt en de watertemperatuur (T) in °C. In het diagram van Figuur 4-12 is de dichtheid af te lezen bij gegeven saliniteit en temperatuur, en in bijlage D.1 is een tabel te vinden met dichtheden van de voor deze studie relevante domeinen van temperatuur en saliniteit.

Het numerieke stromingsmodel Delft3D-FLOW rekent de dichtheid van het water uit volgens bovenstaande relatie. Een aantal numerieke modellen werkt met andere relaties voor het berekenen van de dichtheid van water. De verschillen tussen deze relaties zijn dusdanig klein, dat dit verder buiten beschouwing blijft.

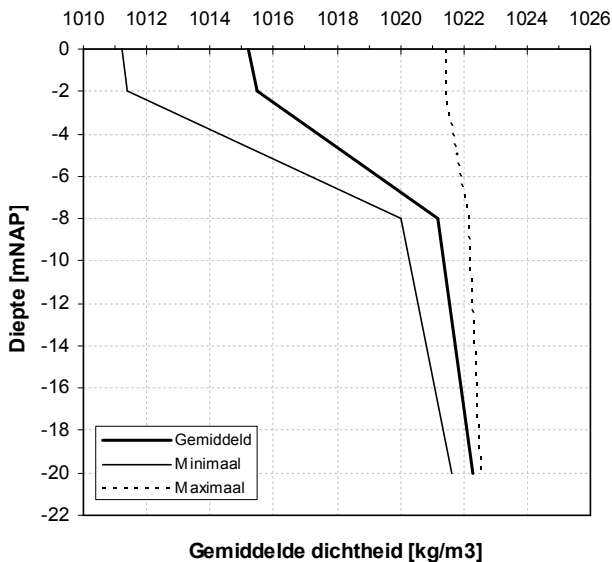
Figuur 4-12 Rechts: diagram voor de dichtheid van zeewater als een functie van temperatuur en saliniteit.

Onder: verschillende mogelijke lagensystemen. Het drie lagensysteem blijkt in het grootste deel van de Maasvlakte voor te komen [JIRKA *et al.* 1996, p. 4-13]



In de praktijk kan een verticale variatie van de saliniteit van minder dan $0,1 \text{ kg/m}^3$ of van de temperatuur van minder dan 1°C verwaarloosd worden.

Uit Figuur 4-12 rechts blijkt duidelijk dat de invloed van saliniteitsgradiënten op de dichtheid groter is dan de invloed van temperatuursgradiënten. Dit effect is het sterkst bij lagere temperaturen ($< 15^\circ\text{C}$), en wordt minder naarmate de temperaturen hoger worden. Met behulp van bijlage D.1 is in Figuur 4-13 een schets van het verticale dichtheidsverloop gemaakt.



Figuur 4-13 Schets van de verticale dichtheidsprofielen in de Europahaven in de zomer van 2004.

Geconcludeerd kan worden dat in de havenbekkens een zoet / zout stratificatie optreedt. Deze stratificatie ziet er in de zomer uit zoals weergegeven in Figuur 4-13, met een laag van circa -3 tot -8 mNAP waar de grootste dichtheidsverschillen optreden. Buiten het zomerseizoen kan het verticale dichtheidsprofiel enigszins afwijken door een hogere zoetwaterafvoer (toename van stratificatie) en door windcirculatie (verandering van de diepte waar de dichtheidsverschillen het sterkst zijn).

De optredende stratificatie kan invloed hebben op de verspreiding van de warmte in de havenbekkens, bijvoorbeeld doordat een warmtepluim ten gevolge van een lozing alleen in de bovenlaag verspreid wordt, of dat de warmtepluim zakt tot onder een zoetwaterlaag. In de volgende hoofdstukken zal meer uitsluitend gegeven worden over de rol die de stratificatie speelt bij de verspreiding van de warmte in de havenbekkens.

5 WARMTETRANSPORTPROCESSEN IN HAVENBEKKENS

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de transportprocessen in en rond de Maasvlakte 1 & 2 en de manier waarop de warmte in de havenbekkens verspreid wordt. Deze processen worden nader bekeken in de near- en far-field analyse (beschreven in de volgende hoofdstukken), om zo de verspreiding van de thermische lozingen in de havenbekkens uiteindelijk goed te kunnen beschrijven en modelleren.

Leeswijzer

Allereerst zullen de algemene warmtetransportprocessen toegelicht worden en zal een eerste indruk van de relevantie van de afzonderlijke processen verkregen worden in paragraaf 5.2 tot en met 5.4. Vervolgens zal met behulp van een warmtebalans een eerste schatting van de opwarming van de havenbekkens worden berekend, om inzicht te krijgen in de relatieve invloed van verschillende warmtetransportprocessen.

5.1 Algemene hydrodynamische transportprocessen

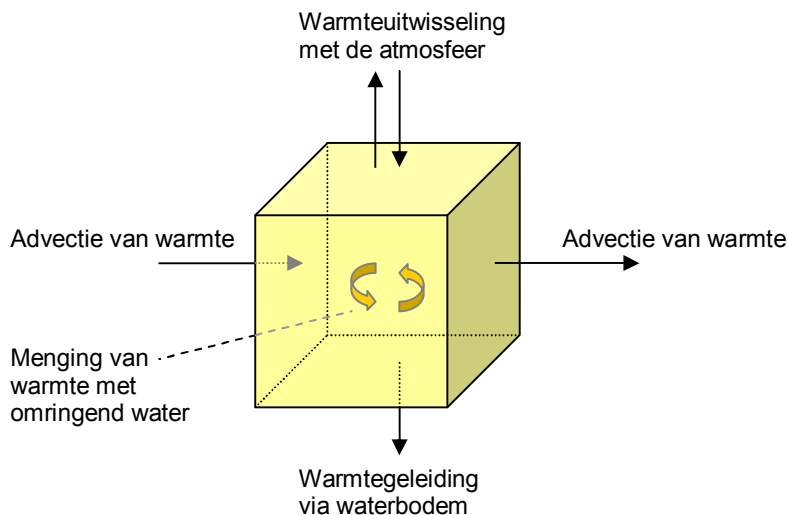
De meest belangrijke stromingsprocessen die transport en menging van warmte ten gevolge van thermische lozingen veroorzaken [FISCHER *et al.*, 1979], zijn:

- *Advectie*: meevoering van warmte door stroming.
- *Convectie*: verticaal transport veroorzaakt door hydrostatische instabiliteit.
- *Moleculaire diffusie*: uiteendrijving van deeltjes door willekeurige moleculaire bewegingen (beschreven met ‘*Fick’s Law*’ of de diffusievergelijking).
- *Turbulente diffusie*: willekeurige uiteendrijving van deeltjes door turbulente bewegingen. Vergelijkbaar met moleculaire diffusie, maar met veel grotere diffusie coëfficiënten en niet van gelijke grootte in alle richtingen.
- *Dispersie*: de verstrooiing van deeltjes of warmtepluim door het gecombineerde effect van afschuiving en transversale diffusie. Met afschuiving (*‘shear’*) wordt de advectie van vloeistof bij verschillende stroomsnelheden op verschillende posities bedoeld.
- *Evaporatie*: transport van waterdamp van een wateroppervlak naar de atmosfeer.
- *Straling*: De flux of stralingsenergie, zoals bij het wateroppervlak of bodem.

Menging is diffusie en dispersie zoals hierboven beschreven, bijvoorbeeld menging van warm water met kouder water door getijbeweging of door scheepsbewegingen.

Concreet leidt dit tot de volgende warmtetransportprocessen in het Maasvlaktegebied:

- Menging van een thermische lozing:
 - in het ontvangende water;
 - met koeler water door het getij (komberging).
- Advectie van een warmtepluim door stroming:
 - t.g.v. de getijbeweging;
 - t.g.v. de zoetwaterafvoer (via Hartelkanaal);
 - t.g.v. de lozing zelf;
 - t.g.v. windcirculatie;
 - t.g.v. dichtheidsverschillen, zowel horizontaal als verticaal.
- Afkoeling of opwarming van water door warmteuitwisseling met de atmosfeer.
- Warmtegeleiding via de waterbodem.



Figuur 5-1 Schematisatie van de warmtetransportprocessen in een deel van een havenbekken.

Deze processen, schematisch weergegeven in Figuur 5-1, worden in de volgende paragrafen nader beschreven en waar mogelijk wordt met behulp van een korte kwantitatieve berekening de relevantie van het desbetreffende proces bepaald.

5.2 Transport en menging in het ontvangende watersysteem

Bij een koelwaterlozing zal de warmte zich mengen met het ontvangende water. Vlak bij het lozingspunt vindt initiële menging met het omringende water plaats. Er ontstaat een warmtepluim. In dit hoofdstuk blijven deze processen buiten beschouwing. Hoofdstuk 6 gaat hier specifiek op in.

De ontstane warmtepluim zal door de aanwezige stroming meegevoerd worden. Dit transport van warmte wordt advectie genoemd en zal hier als eerste worden toegelicht. Vervolgens wordt de menging van de warmtelozing met het omringende water toegelicht door middel van een nadere uitleg van de diffusie (en dispersie) van een warmtepluim. Met behulp van volumeverhoudingen wordt gekeken wat voor een impact een warmtelozing globaal kan hebben op het ontvangende watersysteem, en welke rol het getij daarbij speelt.

5.2.1 Advectie van warmte door stroming

De meevoering van warmte door de omringende stroming (advectie) in de havenbekkens wordt veroorzaakt door verschillende processen. Kijkend naar de grootste warmtelozingen (E.ON en Electrabel), zorgen de volgende aandrijfmechanismen voor advectie van warmte van de verlengde Yangtzehaven of Amazonehaven richting de monding van het Beerkanaal en verder:

- *Stroming door getij:* het horizontale getij veroorzaakt een niet stationaire waterbeweging in de havenbekkens. De stroming verandert per getijfase van richting, waardoor de warmtepluimen heen en weer worden bewogen in de havenbekkens.
- *Stroming door lozing zelf:* wanneer een lozing in een afgesloten havenbekken plaatsvindt relatief ver van het innamepunt af (bijvoorbeeld bij de E.ON en Electrabel centrale), veroorzaakt het lozingsdebiet op grote schaal een stroming door het desbetreffende havenbekken.
- *Stroming door zoetwaterafvoer:* De zoetwaterafvoer van het Hartelkanaal veroorzaakt nauwelijks advectie van warmte in de afgesloten havenbekkens, maar voornamelijk in het Beerkanaal. Warmtepluimen in (de buurt van) het Beerkanaal zullen hierdoor meegevoerd worden richting de Maasmond.

- *Stromingen ten gevolge van dichtheidsgradiënten:* Door de horizontale verandering van saliniteit en temperatuur over een bepaalde afstand kan er een dichtheidsstroming ontstaan. Vele processen hebben hier invloed op, zoals de zoutindringing in de havenbekkens en de hoeveelheid zoetwaterafvoer. Dit is zeker in het Rotterdamse havengebied een zeer complex geheel.
- *Stroming ten gevolge van windcirculatie:* de wind heeft door de wrijving met het wateroppervlak voornamelijk invloed op de bovenste paar meters van de waterkolom. Wanneer de warmte voornamelijk in deze laag aanwezig is, kan de wind dus invloed hebben op de verspreiding van warmte in de havenbekkens. In de maatgevende zomersituatie zal vanwege de meestal lage windsnelheden dit effect echter klein zijn ten opzichte van de andere aandrijfmechanismen. Tijdens de overige seizoenen is een zuidwesten wind veel voorkomend (Figuur 4-7). Dit is gunstig voor de meevoering van warmte uit de (Oostelijke) Yangtzehaven richting het Beerkanaal.

Deze processen hebben niet allemaal een even grote invloed op de advectie. In de volgende paragraaf wordt de relatieve invloed van de verschillende processen besproken.

5.2.2 *Verblijftijden koelwater in havenbekkens*

Aan de hand van een schatting van de maatgevende stroomsnelheden per mechanisme in zowel de Yangtzehaven (E.ON-lozing) als de Amazonehaven (Electrabel) kunnen globaal de verblijftijden bepaald worden. De verblijftijd van de thermische lozingen geeft aan hoe lang een koelwaterdeeltje er gemiddeld over doet om vanaf het lozingspunt uit het desbetreffende havenbekken te zijn getransporteerd. Wanneer de verblijftijd per aandrijfmechanisme bepaald wordt, zal blijken welk mechanisme dominant is.

Door de aanwezige stratificatie kan het koelwater in de bovenste laag van de waterkolom ingesloten blijven en zal het dus niet mengen met diepere lagen. Grotere stroomsnelheden in de laag waar de warmtepluim ingesloten is, kunnen voor een toename van de advectie van warmte zorgen. De verblijftijden kunnen bij stratificatie dus lager uitvallen.

Kort wordt hier toegelicht hoe de verblijftijd van een koelwaterdeeltje kan worden gekwantificeerd.

- *Verblijftijd door getijstroming:* met gebruikmaking van de komberging (zie paragraaf 4.1.1) kan per desbetreffend havenbekken een gemiddelde snelheid per getijslag geschat worden door de getijbeweging. Samen met de lengte en het doorstroomprofiel van het desbetreffende havenbekken bepaalt dit de verblijftijd van een warmtepluim ten gevolge van het getij.
- *Verblijftijd door stroming ten gevolge van lozing zelf:* deze stroming is vrij eenvoudig te kwantificeren. De stroomsnelheid ten gevolge van de lozing zelf is afhankelijk van het debiet van de lozing en de dwarsdoorsnede van het havenbekken waarin geloosd wordt. Voor de E.ON-centrale wordt gerekend met een toekomstig debiet van circa $90 \text{ m}^3/\text{s}$, voor Electrabel met circa $28 \text{ m}^3/\text{s}$.
- *Verblijftijd door zoetwaterafvoer:* aangezien gekeken wordt naar de verblijftijd van een koelwaterdeeltje van het lozingspunt in een afgesloten havenbekken tot aan het Beerkanaal en de zoetwaterflux voornamelijk pas in het Beerkanaal voor verdere advectie van warmte zorgt, is de verblijftijd door de zoetwaterafvoer dus niet relevant.
- *Verblijftijd door dichtheidsstroming:* De dichtheidsstroming is lastiger te kwantificeren. Om de grootte hiervan te schatten moet allereerst de horizontale dichtheidsgradiënt $\Delta\rho/\Delta x$ geschat worden aan de hand van de horizontale saliniteits- en temperatuursgradiënten, indien de temperatuurverschillen groter zijn dan enkele graden. Wanneer wordt aangenomen dat $\Delta\rho = 2 \text{ kg/m}^3$ en de afstand $s = 5 \text{ km}$, dan kan er een horizontale dichtheidsstroming ontstaan van een enkele centimeter per seconde (met deze waarden ongeveer $0,5 \text{ cm/s}$). Het is echter maar de vraag wat de duur van een dergelijke stroming is. Aangezien de dichtheidsstroming niet maatgevend is ten opzichte van de bovenstaande processen, blijft dit buiten beschouwing in Tabel 5-1.

Stroming ten gevolge van wind blijft nu buiten beschouwing, aangezien de aandacht gericht wordt op een maatgevende zomerperiode. Voor de lozingen van E.ON en Electrabel zijn de verblijftijden in Yangtzehaven en Amazonehaven in de Tabel 5-1 te zien. Het zijn schattingen op basis van gemiddelde stroomsnelheden en een af te leggen afstand van circa 5 km voor de E.ON-lozing en slechts 400 m voor de Electrabel-lozing. De verblijftijden zijn ook uitgerekend in het geval dat door stratificatie de advectie van warmte alleen plaatsvindt in de bovenste laag.

Tabel 5-1 Verblijftijden van het koelwater in de Yangtzehaven (lozing van E.ON) en Amazonehaven (Electrabel) ten gevolge van de getijbeweging en de lozing zelf.

| Mechanisme | Diepte 20 m | | Diepte 8 m (stratificatie) | |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|
| | stroomsnelheid gemiddeld [cm/s] | Verblijftijd [uur] | stroomsnelheid gemiddeld [cm/s] | Verblijftijd [uur] |
| <i>Yangtzehaven (E.ON)</i> | | | | |
| Getij (1,75 m) | 3,7 | 38 | 9,1 | 15 |
| Lozing (90 m ³ /s) | 0,8 | 185 | 1,9 | 74 |
| <i>Amazonehaven (Electrabel)</i> | | | | |
| Getij (1,75 m) | 1,7 | 7 | 4,0 | 3 |
| Lozing (28 m ³ /s) | 0,7 | 17 | 1,4 | 8 |

Uit deze tabel blijkt dat de getijbeweging het dominante mechanisme is bij de bepaling van de totale verblijftijd van het koelwater in de genoemde havenbekkens. In het Beerkanaal is dit helemaal het geval, gezien de grote hoeveelheid water wat daar per getijslag heen en weer stroomt. Wat betreft de zoetwaterafvoer kan heel kort gezegd worden dat dit met een debiet van 200 m³/s in het Beerkanaal een gemiddelde stroomsnelheid van ongeveer 1 cm/s veroorzaakt. De zoetwaterafvoer heeft dus zeker invloed op de advectie van warmte, maar is niet dominant ten opzichte van het getij.

5.2.3 Directe recirculatie

Het is van belang om te weten of in een maatgevende situatie directe recirculatie plaats kan vinden. Directe recirculatie is het verschijnsel dat er (een gedeelte van de tijd) een kortsluitstroming ontstaat tussen lozingspunt en innamepunt van een koelwatergebruiker, bijvoorbeeld wanneer binnen één getijslag een warmtelozing van lozingslocatie naar innamepunt getransporteerd kan worden en nog niet veel is afgekoeld. Dit verschijnsel heeft tot gevolg dat inlaat- en lozingstemperaturen (gedurende een bepaalde periode) aanzienlijk hoger kunnen worden. Hier volgt een korte analyse of directe recirculatie in een maatgevende situatie kan optreden bij de energiecentrales.

Bij de E.ON-centrale wordt aangenomen dat directe recirculatie mogelijk is wanneer de warmtepluim zich binnen een getijperiode kan verplaatsen tot voorbij de ingang van de Yangtzehaven. Voor de nieuwste lay-out betreft dit een afstand van ruim 5,5 km.

Voor een veilige aanname wordt gerekend met een maximale verandering van de waterhoogte tijdens springtij. Uit de getijkrommen van Figuur 4-2 kan worden bepaald dat dit tijdens vloed ongeveer 1,0 m/uur bedraagt, en tijdens eb ongeveer 0,7 m/uur. Het bergend oppervlak van de gehele Yangtzehaven is ongeveer $5,6 \cdot 10^6$ m² (zie paragraaf 4.1.1). De hieruit volgende maximale debieten, gesubstitueerd met een toekomstig lozingsdebiet van bijna 90 m³/s, leveren maximale debieten op van afgerond 1500 m³/s bij vloed en 1200 m³/s bij eb. Hieruit zijn maximale stroomsnelheden herleid, weergegeven in Tabel 5-2. De aangenomen breedte en diepte van het havenbekken is respectievelijk 600 m en 20 m. Met de aanname dat de snelheid als functie van de tijd een sinusvorm heeft, dan is de afgelegde afstand s (excursie) binnen een getij:

$$s = T_{e/v} \cdot \frac{2U_m}{\pi}$$

met: $T_{e/v}$ = duur van de eb of vloed [s]
 U_m = maximale snelheid [m/s]

Op een soortgelijke manier is voor de Electrabel-centrale bepaald dat directe recirculatie niet zal optreden. In dit geval is aangenomen dat directe recirculatie mogelijk is als een warmtepluim vanuit de Amazonehaven een stuk in het Beerkanaal terecht komt, een afstand van ongeveer 0,5 km. Dit komt overeen met de bevindingen van een studie uitgevoerd door KEMA [HELING *et al.*, 2007a].

Bij EnecoGen vindt, gezien de combinatie van een korte afstand tussen innamepunt en lozingspunt en de relatief grote getijstromen, zeker directe recirculatie plaats indien aan het wateroppervlak wordt ingenomen en geloosd. Bij dieper innemen kan de kans op directe recirculatie aanzienlijk afnemen, vanwege de stratificatie. Een nadere analyse zal nuttig zijn.

Tabel 5-2 Maximale excursie warmtepluim door getij en lozing

| | Getijfase | Max. debiet Q_g [m ³ /s] | Max. snelheid U_m [m/s] | Excursie s [km] | Directe recirculatie mogelijk? |
|------------|-----------|--|------------------------------|--------------------|---|
| E.ON | vloed | 1500 | 0,13 | 1,9 | nee (< 5,5 km) |
| | eb | 1200 | 0,10 | 1,4 | |
| Electrabel | vloed | 166 | 0,03 | 0,4 | nee (< 0,5 km) |
| | eb | 164 | 0,03 | 0,4 | |
| EnecoGen | n.v.t. | - | 0,40 | > 1 km | Ja (> 1 km), indien zowel aan oppervlak ingenomen als geloosd wordt |

Er kan geconcludeerd worden dat directe recirculatie alleen kan optreden bij de EnecoGen-centrale bij zowel inname als lozing nabij het wateroppervlak. Bij E.ON en Electrabel vindt ook geen directe recirculatie plaats wanneer door de stratificatie de warmte alleen in de bovenste 8 m meegevoerd wordt. De maximale excursie is dan namelijk nog steeds kleiner dan 5 km respectievelijk 1,3 km.

5.2.4 Turbulente diffusie van een warmtepluim

Vloeistofbewegingen in natuurlijke systemen zijn bijna altijd turbulent, zeker in het complexe watersysteem van de Rotterdamse haven. Turbulentie wordt gekenmerkt door onregelmatig fluctuerende, wervelende bewegingen van vloeistofdeeltjes (zie paragraaf 7.3.4 voor meer informatie). Daarom wordt de warmte niet alleen door advectie getransporteerd, maar ook door diffusie ten gevolge van deze turbulente waterbewegingen. Het concept van deze turbulente diffusie wordt hier kort toegelicht.

Moleculaire diffusie is niet direct van invloed op milieuproblemen, behalve op microscopische schaal. Toch kan de turbulente diffusie beschreven worden met processen die vrijwel analoog zijn aan moleculaire diffusie, maar op een grotere schaal. De (moleculaire) diffusievergelijking, of in dit geval de warmtevergelijking genoemd [FISCHER *et al.*, 1979], is gebaseerd op 'Fick's Law', dat de relatie tussen de warmteflux en de gradiënten in de concentratie van warmte beschrijft. In vectornotatie is dit:

$$\mathbf{q} = -D\nabla C$$

Hierin is \mathbf{q} de warmteflux, D de diffusiecoëfficiënt [m²/s] en C de concentratie van warmte (temperatuur). Het minteken duidt op een transport van hoge naar lage concentraties, dus van warmer naar kouder water. De wet van behoud van massa (in dit geval warmte) luidt:

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = -\frac{\partial C}{\partial t}$$

Deze twee vergelijkingen vormen samen met een advectieve term de advectie-diffusievergelijking. In vectornotatie wordt deze vergelijking als volgt beschreven:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C$$

Hierin is \mathbf{u} de vectornotatie van de stroomsnelheid in m/s. De diffusievergelijking voor turbulente diffusie heeft dezelfde gedaante als deze moleculaire diffusievergelijking, maar geldt voor gemiddelde waarden van de fluctuerende grootheden. De diffusiecoëfficiënt D - een maat voor de snelheid waarmee een warmte wolk diffuseert - is nu veel groter en niet meer gelijk in alle richtingen:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \nabla C)$$

Ten gevolge van verschillende stroomsnelheden op verschillende dieptes wordt een warmtepluim in longitudinale en transversale richting in de havenbekkens verspreid. Op kleine schaal gezien is dit proces eigenlijk advectie, maar op grote schaal kan het als een vorm van diffusie gezien worden. Dit effect samen met de turbulente diffusie wordt dispersie genoemd.

Een kwantitatieve analyse van de dispersie van warmtepluimen in het complexe Maasvlaktegebied is niet zomaar te geven. Hiervoor is een numeriek rekenmodel nodig. In een dergelijk model wordt bij een non-uniforme snelheidsverdeling de dispersieve bijdrage wiskundig gezien gelijk aan de diffusieve bijdrage beschreven, echter met een dispersiecoëfficiënt K [m^2/s] die vele malen groter kan zijn dan de diffusiecoëfficiënt. Wanneer gerekend wordt met een dieptegemiddelde concentratie van de warmte, leidt dit tot een twee-dimensionale dispersievergelijking:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$$

Hierin is C de gemiddelde concentratie in de dwarsdoorsnede en zijn u en v de gemiddelde advectiesnelheden in x- en y-richting. K heeft in dit geval in beide horizontale richtingen dezelfde waarde. Het concept van turbulente diffusie en dispersie is hiermee voldoende toegelicht.

5.2.5 *Volumeverhouding koelwaterlozing, komberging & zoetwaterafvoer*

Voorlopig wordt aangenomen dat een warmtepluim zich door dispersie volledig over de diepte en uniform in het havenbekken verspreidt. Nu kan een eerste indruk van de grootte van de lozingen verkregen worden aan de hand van volumeverhoudingen tussen de hoeveelheid lozing per getij, de komberging en het totale volume van de havenbekkens (bij een gemiddeld getij). Dit wordt gedaan voor het totaal van alle lozingen en het gehele volume water in de Maasvlakte 1 & 2, maar ook meer specifiek per havenbekken en de desbetreffende lokale lozingen. Zo kan er onderscheid gemaakt worden in de impact van de verschillende lozingen op het ontvangende watersysteem. Een voorbeeld van hoe de komberging wordt uitgerekend staat in paragraaf 4.2.2.

Tabel 5-3 Volumeverhoudingen tussen volume havenbekkens, lozingen en komberging

| Lozingen | Volume | havenbekkens | Volume | Komberging | Verhoudingen | | |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| volume per getijperiode: | V_l [$10^6 m^3$] | | V_h [$10^6 m^3$] | V_{tij} [$10^6 m^3$] | V_l/V_h | V_{tij}/V_h | V_l/V_{tij} |
| E.ON, Lyondell, Chemie | 4,1 | Yangtzehaven | 96 | 8,4 | 4 % | 9 % | 50 % |
| Electrabel | 1,2 | Amazonehaven | 12,6 | 1,2 | 10 % | 10 % | 100 % |
| EnecoGen, LionGas | 0,6 | Beerkanaal etc. | 80 | 19,5 | < 1 % | 25 % | 3 % |
| Totale lozing | 6,0 | Gehele Maasvlakte 1 & 2 | 222 | 19,5 | 3 % | 9 % | 31 % |

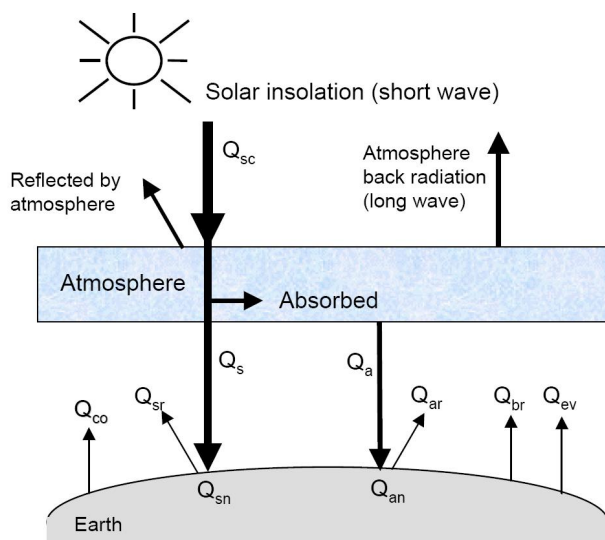
Ook al zijn deze volumeverhoudingen een zeer grove schatting, toch is duidelijk te zien aan de hand van de verhouding lozing/komberging dat de lozingen van E.ON en Electrabel (50% respectievelijk 100%) groot is. Dit betekent dat een volume-eenheid warmtelozing slechts door een volume-eenheid ‘getijwater’ van dezelfde orde grootte gekoeld wordt. Dit kan voor een aanzienlijke opwarming in de desbetreffende havenbekkens zorgen. Het effect wordt versterkt aangezien de Yangtzehaven en Amazonehaven aan één zijde gesloten bekkens zijn.

Bij EnecoGen vindt wel veel afkoeling plaats, doordat er per getijperiode een grote hoeveelheid relatief koud Noordzeewater langs het lozingspunt het Beerkanaal instroomt (circa 25% van het aanwezige water in het gehele Beerkanaal) en de warmte met eb wegstroomt. De verhouding van de koudelozing van de Gate Terminal (niet weergegeven in de tabel) ten opzichte van het volume water wat per getij erlangs stroomt is ook erg klein, in de orde van 1%.

Geconcludeerd kan worden dat in verdere studie voornamelijk aandacht besteed moet worden aan de lozingen van E.ON en Electrabel in de desbetreffende havenbekkens.

5.3 Warmteuitwisseling met de atmosfeer

Bij de warmte-uitwisseling aan het vrije oppervlak tussen water en atmosfeer spelen vele factoren een rol. Deze factoren zijn weergegeven in Figuur 5-2 [WL|DELFT HYDRAULICS, 2006 en BODERIE & DARDENGO, 2003].



Figuur 5-2 Overzicht van de factoren met betrekking tot warmteuitwisseling aan het (water)oppervlak [WL|DELFT HYDRAULICS, 2006].

De verklaring van de gebruikte symbolen voor de warmtefluxen (in $J/m^2 \cdot s$) wordt hier gegeven. De inkomende zonnestraling (Q_{sc}) wordt of door de atmosfeer teruggekaatst (Q_{sr} en Q_a), of het bereikt het wateroppervlak. De warmteuitwisseling tussen de atmosfeer en het wateroppervlak is als volgt:

- Van atmosfeer naar water:
 - zonnestraling Q_s (korte golf straling)

- atmosferische straling Q_a (lange golf straling)
- Van water naar atmosfeer:
 - evaporatie Q_{ev}
 - convectie Q_{co}
 - achtergrondstraling Q_{br} (lange golf straling)

Opgemerkt wordt dat het effect van neerslag op de watertemperatuur in deze studie buiten beschouwing blijft, aangezien dit effect verwaarloosbaar klein is [BODERIE & DARDENGO (2003, 2-5)]

Om de warmte-uitwisseling met de atmosfeer te modelleren, worden twee soorten modellen gebruikt:

- absolute temperatuur modellen (ook wel ‘warmtebalans modellen’ genoemd); ;
- exces temperatuur modellen (ook wel ‘afkoelingsmodellen’ genoemd).

5.3.1 Absolute temperatuur modellen

Modellen gebaseerd op de warmtebalans proberen alle relevante warmtefluxen te kwantificeren en kunnen derhalve de watertemperatuur berekenen als functie van meteorologie en zonnestand. Ze worden vaak gebruikt wanneer men de natuurlijke achtergrondtemperatuur van een (stuk van het) watersysteem wil kunnen beschrijven onder invloed van de seizoensmatig veranderlijke atmosferische omstandigheden.

Er zijn in de literatuur een aantal empirische formules te vinden om deze warmtefluxen te beschrijven. Deze formules kennen vele termen, zoals onder andere:

- zoninstraling;
- bewolgingsgraad;
- luchtvochtigheid;
- windsnelheid.

Het gaat te ver alle empirische formules hier al weer te geven. Logischer is het om eerst het afkoelingsmodel te bespreken en de relevantie van afkoeling van het water in de havenbekkens door warmteuitwisseling naar de atmosfeer ten opzichte van de andere transportprocessen te schatten.

5.3.2 Exces temperatuur modellen

Wanneer de achtergrondtemperatuur en haar verdeling over het jaar bekend is, worden voor het bepalen van de invloed van warmtelozingen en –onttrekkingen ook wel ‘exces temperatuur modellen’ of ‘afkoelingsmodellen’ gebruikt. Een afkoelingsmodel kan beschouwd worden als een deelmodel van een warmtebalansmodel waarin alleen de som van de balanstermen die met afkoeling te maken hebben beschouwd wordt. Hierin bepaalt het afkoelingsgetal hoe snel een hogere temperatuur afkoelt naar de omgeving.

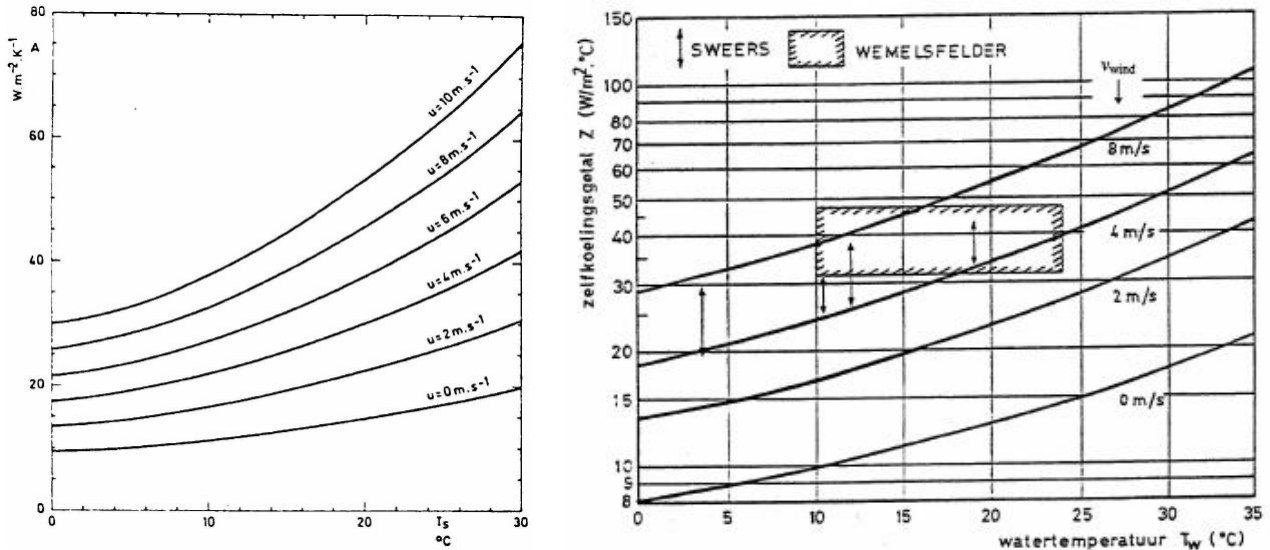
Eenvoudigere modelconcepten gaan daarom uit van de drijvende kracht van een temperatuursurplus als gevolg van een warmtelozing zónder de watertemperatuur zelf te berekenen. Het zelfkoelingsgetal Z [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$] legt het verband tussen de netto warmteuitwisseling over het water-lucht grensvlak Q_t [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$] en het temperatuursurplus θ [$^\circ\text{C}$] ten gevolge van de thermische lozingen:

$$Q_t = -Z \times \theta = -Z(T_w - T_e)$$

Hierin is T_w de temperatuur van het water met lozingen en T_e de evenwichtstemperatuur van het water wanneer er geen lozingen plaatsvinden (de achtergrondtemperatuur). Het zelfkoelingsgetal kan empirisch worden vastgesteld of worden afgeleid van de vergelijkingen zoals beschreven in het warmtebalansmodel. Van invloed op het zelfkoelingsgetal zijn de uitstraling van het water (Q_{br}), de verdampingsenergie (Q_{ev}) en de geleiding (Q_{co}), zoals weergegeven in de volgende formule:

$$Z = -\frac{\partial Q_t}{\partial T_w} = -\frac{\partial(Q_{br} + Q_{ev} + Q_{co})}{T_w - T_e}$$

In BODERIE & DARDENGO (2003) worden enkele analytische en empirische formuleringen voor het afkoelingsgetal gegeven, zoals de formuleringen van Sweers (1974) en Wiggers *et al.* (1998). Volgens hen zijn vooral de watertemperatuur en windsnelheid van invloed op het afkoelingsgetal, zoals te zien is in Figuur 5-3.



Figuur 5-3 De invloed van watertemperatuur en windsnelheid op het afkoelingsgetal volgens Sweers (links) en Wiggers *et al.* (rechts: doorgetrokken lijnen). Ter vergelijking zijn in de rechterfiguur de Z -waarden van Sweers (1974) en Wemelfelder (1968) weergegeven. [Uit BODERIE & DARDENGO, 2003]

Sweers geeft een onderschatting van het afkoelingsgetal en Wiggers een overschatting. De juiste formulering voor Z ligt dus tussen beide functies in, en daarmee wordt de foutenmarge in de schatting van Z ook aanzienlijk kleiner.

Belangrijk is dat een afkoelingsmodel met constant zelfkoelingsgetal alleen gebruikt kan worden wanneer het temperatuursurplus laag is: maximaal 3°C volgens BODERIE & DARDENGO (2003, 3-50).

Om een eerste schatting te kunnen geven van de grootte van afkoeling van warmtelozingen door warmtetransport naar de atmosfeer, wordt in deze studie gebruik gemaakt van een benadering met behulp van het exces temperatuurmodel. Wanneer blijkt dat de warmteuitwisseling met de atmosfeer een grote rol speelt ten opzicht van de andere transportprocessen, kan in een latere analyse alsnog gebruik gemaakt worden van een absoluut temperatuur model.

5.3.3 Relatie tussen verblijftijden en uitwisseling met atmosfeer

De hoeveelheid warmtetransport naar de atmosfeer is evenredig met de temperatuurverhoging van het koelwater aan het wateroppervlak ($T_w - T_e$) en de grootte van dit oppervlak. Daarnaast bepaalt de tijdsduur van blootstelling van het koelwater aan de atmosfeer ook het warmteverlies. De verblijftijd van het koelwater gevonden in paragraaf 5.2.2 is dus een indirecte maat voor de hoeveelheid afkoeling naar de atmosfeer.

De grootste warmtelozing en het grootste oppervlak (Yangtzebekken) betreft de E.ON lozing. Door het gecombineerde effect van stroming door de verschillende genoemde aandrijfmechanismen is de geschatte gemiddelde verblijftijd in de orde van 1 tot 2 dagen. Voor afkoeling naar de atmosfeer, zeker

bij niet al te grote temperatuurverhogingen ten opzichte van de evenwichtstemperatuur, is dit relatief kort. Geconcludeerd kan worden dat afkoeling door menging en advectie waarschijnlijk dominant zijn boven afkoeling naar de atmosfeer. Met behulp van een warmtebalans aan het eind van dit hoofdstuk kan hier meer over gezegd worden.

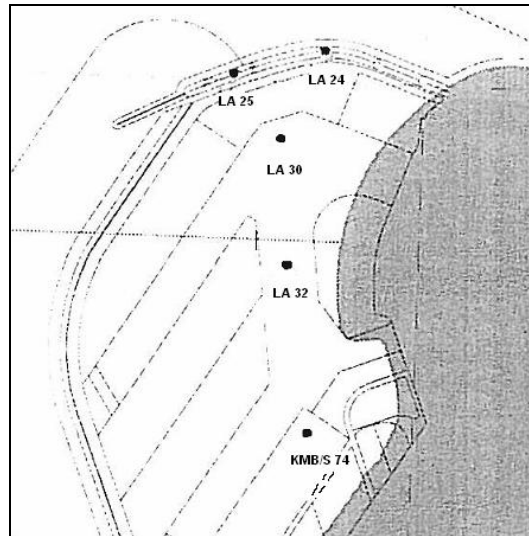
Tot slot moet worden opgemerkt dat de invloed van warmteoverdracht naar de atmosfeer nog minder kan zijn, wanneer de hoogste temperaturen van de warmtepluim van de E.ON-centrale niet het oppervlak raken, maar door de verticale dichtheidsgradiënten op zekere diepte horizontaal door advectie en dispersie verspreid worden. Of dit optreedt, zal blijken uit een nadere analyse van het near- en far-field, zoals beschreven in de volgende hoofdstukken.

5.4 Warmtegeleiding via de waterbodem

Uitwisseling van warmte via de bodem kan worden verwaarloosd, aangezien er nagenoeg overal onder de waterbodem een kleilaag aanwezig is. Klei is ondoorlatend, met als gevolg dat transport van water, en daarmee warmte, door een kleilaag niet mogelijk is.

De gebruikte data voor deze analyse zijn sonderingen en boringen van het Maasvlakte 2 gebied [FUGRO INGENIEURSBUREAU, 2006]. De locaties van de gebruikte sonderingen en boringen zijn aangegeven in Figuur 5-4 en in Tabel 5-4 zijn de gevonden grondlagen op een diepte ter hoogte van de toekomstige diepte van de havenbekkens weergegeven.

Figuur 5-4 Grondonderzoek: locaties van de boringen en sonderingen ter plaatse van de toekomstige Maasvlakte 2, zoals gebruikt in deze studie. [FUGRO INGENIEURSBUREAU, 2006]



Tabel 5-4 Resultaat sonderingen en boringen door FUGRO (2006).

| Diepte [mNAP] | LA 24 | LA 25 | LA 30 | LA 32 | KMB/S 74 |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| -18 tot -19 | zand (fijn) | zand (fijn) | klei (zandig) | zand (fijn) | zand (fijn) |
| -19 tot -20 | klei (zandig) | klei (zandig) | zand (fijn) | klei | |
| -20 tot -21 | | | | | |
| -21 tot -22 | zand (kleiig) | veen (kleiig) | veen | zand (fijn) | veen (kleiig) |
| -22 tot -23 | zand (grof) | | veen | zand (fijn) | |
| -23 tot -23,5 | | zand (grof) | veen | zand (fijn) | veen (kleiig) |
| -23,5 tot < -26 | zand (grof) | | zand (grof) | zand (grof) | |

Wanneer de havens tot -21 mNAP worden uitgebaggerd, bevindt zich zo goed als overal nog een circa één meter dikke kleilaag vlak onder het maaiveld (waterbodem), rond de -21 tot -23,5 mNAP. Om deze reden wordt geconcludeerd dat de uitwisseling van warmte via de bodem te verwaarlozen is. De warmteuitwisseling via kades is te verwaarlozen, aangezien de meeste kades niet permeabel zijn vanwege de harde constructies en het kadeoppervlak veel kleiner is dan het bodemoppervlak.

5.5 Warmtebalans Maasvlaktegebied

In deze paragraaf wordt een eerste schatting van de temperatuurverhoging op basis van een zeer versimpeld model gemaakt. Deze warmtebalans is gebaseerd op de wet van behoud van energie en geeft inzicht in de processen die van invloed zijn op de thermische waterkwaliteit in de havenbekkens. De temperatuurverhoging wordt bepaald in de situatie dat Maasvlakte 2 vrijwel volledig is aangelegd (circa 2030). Er wordt gerekend met het meest waarschijnlijke lozingsscenario.

5.5.1 Aannames voor schematisatie

Beschouwd worden zowel het gehele Maasvlakte 1 & 2 gebied met alle lozingen, als alleen (een deel van) de Yangtzehaven met de E.ON, Lyondell en chemie lozingen. Bij de gehele Maasvlakte als balansgebied liggen de randen bij de ingang van het Beerkanaal, horizontaal ten hoogte van de punt van de Papegaaibek en bij de monding van het Hartelkanaal. Er worden volumegemiddelde temperatuurverhogingen uitgerekend.

Om de werkelijkheid te vereenvoudigen tot een model dat met de hand is door te rekenen, wordt een aantal aannames gedaan.

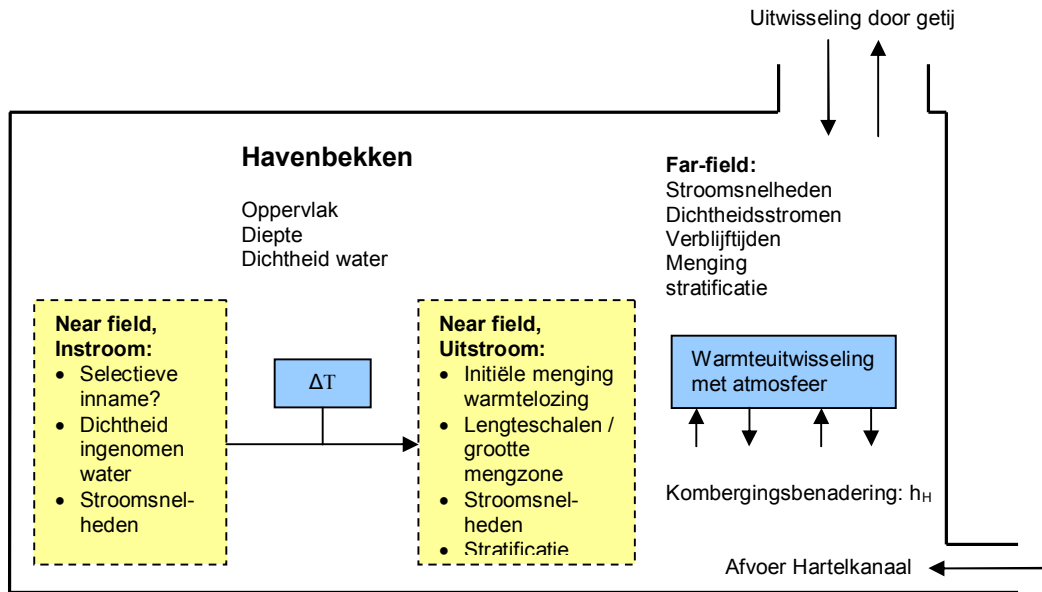
- Er vindt volledige menging van de thermische lozingen met het ontvangende water plaats; Non-uniforme spreiding van de warmtelasten en stratificatie worden voorlopig niet meegenomen.
- Warmteuitwisseling met de atmosfeer wordt gemodelleerd door gebruik te maken van een afkoelingsmodel, zoals beschreven in paragraaf 5.3.
- Warmteuitwisseling met de bodem wordt gelijk aan nul gesteld, zie paragraaf 5.4.
- Het getij wordt geschematiseerd tot een constant in- en uitgaand debiet over de gehele getijdencyclus. Dit betekent dat er een constante in- én uitstroom is van ongeveer 440 m³/s (zie paragraaf 4.2.2).
- Water dat met het getij via het Beerkanaal de Maasvlakte 1 & 2 binnenkomt, heeft een temperatuur gelijk aan de temperatuur van het zeewater en Maaswater. In andere woorden: warmte die met eb 'afgevoerd' wordt, komt met vloed niet weer terug in de haven.
- Het kombergingsprincipe kan worden toegepast op het havenbekken. De argumentatie is terug te vinden in paragraaf 4.2.2.

In Figuur 5-5 is het model geschematiseerd. Op de near- en far-field processen wordt in de volgende hoofdstukken verder ingegaan.

5.5.2 Opstellen warmtebalans

Beschouwd wordt de hoeveelheid warmte in de havenbekkens (in kJ). De temperatuur is een dichtheid gerelateerd aan warmte: het is de hoeveelheid warmte per eenheid massa gedeeld door de specifieke warmte coëfficiënt c_t (ongeveer 4.2 kJ/kg/°C) [STELLING EN BOOIJ, 1999]. Om te rekenen met volume water in plaats van met het gewicht van water, wordt de coëfficiënt μ [J/m³.°C] geïntroduceerd:

$\mu = \rho \cdot C_p$. Dit is het product van de dichtheid en de specifieke warmte coëfficiënt van water.



Figuur 5-5 Schematisatie voor het opstellen van de warmtebalans, met ‘near- & far-field’ processen in de havenbekkens.

De temperatuurverdeling over het havenbekken wordt als constant verondersteld (zie aannames). Om deze reden wordt de temperatuur in het havenbekken gekarakteriseerd door één variabele, de toestandsvariabele: $T(t)$. Hiermee wordt de warmtebalans als een 1^e orde differentiaal vergelijking opgesteld, in woorden:

Verandering van hoeveelheid warmte in havenbekken = warmtetoevoeging door thermische lozingen – warmteafvoer door advectie t.g.v. zoetwaterflux (Hartelkanaal) – warmteafvoer door advectie t.g.v. het getij – warmteafvoer naar de atmosfeer

In formulevorm wordt de warmtebalans:

$$\frac{d}{dt} \mu V_h T = L(t) - \mu Q_H (T - T_H) - \mu Q_{g;gem} (T_w - T_{g;in}) - \mu C_t A_h (T_w - T_e)$$

Overzicht van de variabelen:

- T = temperatuur van het water in het havenbekken [°C]
- μ = soortelijke warmte water (per volume-eenheid en per graad) [J/m³/°C]
- V_h = het volume van water in het havenbekken [m³]
- $L(t)$ = totale hoeveelheid warmteafvoer in haven [W]
- Q_H = gemiddelde afvoer Hartelkanaal [m³/s]
- T_H = watertemperatuur Hartelkanaal [°C]
- $Q_{g;gem}$ = in- en uitstromend debiet door getij (gemiddeld over het getij) [m³/s]
- $T_{g;in}$ = gemiddelde watertemperatuur van inkomend getij [°C]
- A_h = oppervlak van het havenbekken [m²]
- T_e = evenwichtstemperatuur van oppervlaktewater (zonder lozingen) [°C]
- C_t = uitwisselingscoëfficiënt [m/s]
- μC_t = afkoelingsgetal / warmteoverdrachtscoëfficiënt, ook wel: K_{aw} (~ 40) [W/m²/°C]

Een dimensiecontrole bevestigt dat elke term in de warmtebalans de dimensie heeft van [W] of [J/s].

De vergelijking kan worden herschreven tot:

$$V_h \frac{dT}{dt} + (Q_H + Q_{g;gem} + \frac{K_{aw}}{\mu} A_h) T = \frac{L(t)}{\mu} + Q_H T_H + Q_{g;gem} T_{g;in} + \frac{K_{aw}}{\mu} A_h T_e$$

Aangezien het een 1e orde differentiaal vergelijking betreft met tijd (t) als de onafhankelijke variabele, is er slechts één beginvoorwaarde nodig: de temperatuur in het havenbekken op $t = 0$ s. Aangezien er met een afkoelingsmodel gewerkt wordt, maakt het niet uit welke achtergrondtemperatuur (gelijk aan de evenwichtstemperatuur T_e) gekozen wordt als beginvoorwaarde. Hier wordt een evenwichtstemperatuur van 20°C gebruikt.

De analytische oplossing van de warmtebalans is:

$$T(t) = \frac{P}{r} + \left(T(0) - \frac{P}{r} \right) e^{-rt}$$

Met:

$$P = \left(\frac{L(t)}{\mu} + Q_H T_H + Q_{g;gem} T_{g;in} + \frac{K_{aw}}{\mu} A_h T_e \right) / V_h$$

$$r = \left(Q_H + Q_{g;gem} + \frac{K_{aw}}{\mu} A_h \right) / V_h$$

Opgemerkt moet worden dat vanwege het gebruik van een afkoelingsmodel T_H , $T_{g;in}$ en T_e aan elkaar gelijk zijn. Om snel de relatieve invloed van de verschillende afkoelingsprocessen te kunnen zien, wordt de warmtebalans niet verder herleid. In hoofdstuk 4 zijn de meeste benodigde parameters uitgezocht en weergegeven, zoals de totale thermische lozing (circa 5000 MWth).

5.5.3 Resultaten warmtebalans

De te verwachten temperatuurverhoging is zowel voor de gehele Maasvlakte 1 & 2, als voor alleen Maasvlakte 2 met en zonder het eerste gedeelte van de Yantzehaven, uitgerekend. De resultaten zijn weergegeven voor drie maatgevende scenario's:

- Minimum scenario: springtij, hoge warmteuitwisseling met atmosfeer, hoge zoetwaterafvoer;
- gemiddeld scenario: normaal tij, lage tot normale warmteuitwisseling met atmosfeer, gemiddelde zoetwaterafvoer;
- maximum scenario: doodtij, geen uitwisseling met atmosfeer, lage zoetwaterafvoer.

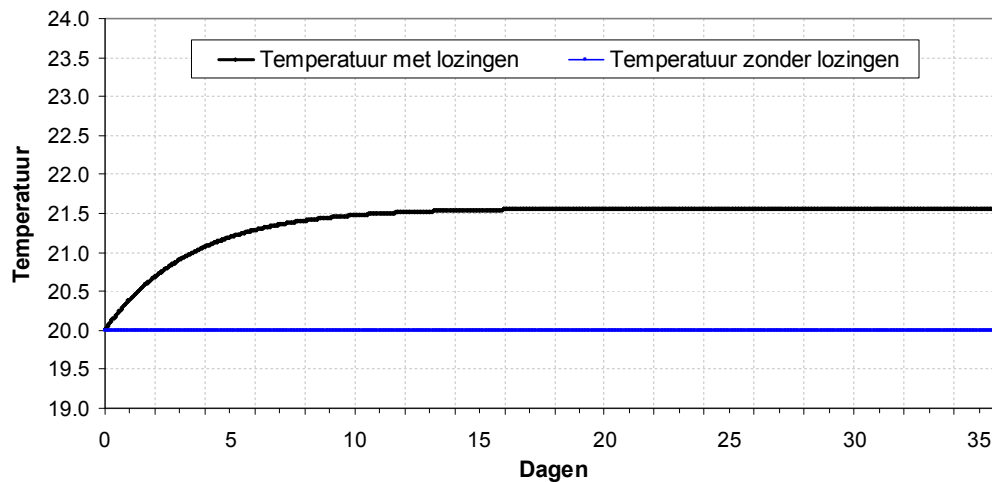
De uitgerekende temperatuurverhogingen zijn in Tabel 5-5 per scenario en per balansgebied weergegeven. Gezien de grootte van de temperatuurverhoging is de kans aanwezig dat de CIW-richtlijn overschreden zal worden en enige recirculatie zal plaatsvinden.

Tabel 5-5 Resultaten handberekening temperatuurverhogingen t.g.v. thermische lozingen

| | Maasvlakte 1 & 2 | Maasvlakte 2, incl. gehele Yangtzebekken | Maasvlakte 2, vanaf huidige zeevering |
|--------------------|-----------------------------|---|--|
| | Alle lozingen (par. 3.1) | Alleen lozing E.ON | Alleen lozing E.ON |
| Minimum scenario | 1,1°C | 1,6°C | 2,1°C |
| Gemiddeld scenario | 1,6°C | 2,1°C | 2,8°C |
| Maximum scenario | 2,4°C | 2,8°C | 3,5°C |

Er moet rekening mee gehouden worden dat een aantal opeenvolgende dagen per zomer het maximum scenario benaderd kan worden.

Een voorbeeld van de resultaten, namelijk de temperatuurverhoging ten gevolge van de thermische lozingen in het gehele Maasvlaktegebied bij een gemiddeld scenario, staat weergegeven in Figuur 5-6.



Figuur 5-6 Gemiddelde uniforme temperatuurverhoging in gehele Maasvlaktegebied, bepaald met behulp van een warmtebalans.

Wanneer de warmte over het gehele havenbekken gelijkmatig zou verspreiden en het getijdebiet als constant wordt aangenomen, bedraagt de inspeeltijd van het systeem ongeveer 5 dagen. Dit is onder andere uit Figuur 5-6 af te lezen.

Bij representatieve gemiddelde waarden van de in de warmtebalans genoemde invoerparameters voor een zomerperiode, is het aandeel van de verschillende factoren in afkoeling van het havenbekken weergegeven in Tabel 5-6. Hieruit blijkt dat het getij de grootste invloed heeft op de afkoeling van het havenbekken.

Tabel 5-6 Aandeel processen in opwarming en afkoeling

| Proces | Warmte in GW | Aandeel [%] |
|-------------------------------------|--------------|-------------|
| Lozing | +5,00 | 100 |
| Verversing door afvoer Hartelkanaal | -1,35 | 27 |
| Verversing door getij | -2,95 | 59 |
| Uitwisseling met atmosfeer | -0,70 | 14 |

5.5.4 Discussie resultaten warmtebalans

Aangezien de warmtebalans een eerste schatting is, moeten de resultaten met een kritische blik benaderd worden. Er zijn namelijk grove aannames gedaan en de gevoeligheid van variatie in de verschillende processen en parameters is nog niet duidelijk. Dit wordt hier bediscussieerd.

Vergelijking resultaten met werkelijke situatie

Aangezien er een aantal vereenvoudigingen zijn gebruikt in deze benadering, is het de vraag hoe realistisch en dus hoe bruikbaar bovenstaande resultaten zijn. Hier worden enkele aannames bediscussieerd.

Uniforme temperatuurverdeling: De eerst genoemde aanname (paragraaf 5.5.1) veronderstelt een uniforme temperatuurverdeling. In de werkelijke situatie zullen de warmtelozingen niet uniform gemengd zijn met het ontvangende water. Dit heeft tot gevolg dat in werkelijkheid op de ene plek de watertemperatuur doorgaans hoger zal zijn dan op een andere plek. Verwacht wordt dat in de buurt van lozingslocaties in afgesloten havenbekkens – waar de stroomsnelheden laag zijn – accumulatie van warmte zal optreden. Dit leidt bijvoorbeeld tot hogere temperaturen in de verlengde Yangtzehaven en Amazonehaven. In het Beerkanaal zal de temperatuur weer lager zijn, vanwege de grotere getijbeweging en zoetwaterflux. De invloed van EnecoGen en LionGas op de opwarming van het havenbekken zal vanwege de ligging bij de monding van het Beerkanaal gering zijn.

Ten gevolge van de aanwezige stratificatie in het Maasvlaktegebied zal de spreiding van de temperatuur ook in verticale richting in werkelijkheid anders zijn. Verwacht wordt dat de warmtepluimen in de bovenste helft (rond de interne zoet-zout grenslaag en daarboven) ingesloten zullen worden. De gemiddelde temperatuur in deze helft van de waterkolom kan met de warmtebalans geschat worden door de diepte van de havenbekkens te verkleinen, waardoor het totale watervolume minder wordt.

Constant getij: De aanname van een constant getij leidt tot een constante temperatuurverhoging in de evenwichtssituatie. In werkelijkheid situatie zal door de heen en weergaande getijbeweging de temperatuur dagschommelingen vertonen, met lagere temperaturen net na hoogwater en hogere net na laagwater.

Overige aannames: De aannames van een te verwaarlozen warmteuitwisseling met de bodem en het mogen toepassen van het kombergingsprincipe zijn in eerdere paragrafen (5.4 en 4.2.2) al gerechtvaardigd.

Gevoeligheid en invloed processen

Uit een analyse van de gevoeligheid van de parameters blijkt, dat bij verandering van deze parameters naar een maximale en minimale situatie de temperatuurverhoging niet veel verandert (Tabel 5-7 t/m Tabel 5-9). Het aandeel in de afkoeling van de verschillende processen verandert wel sterk. Deze gevoeligheid wordt hier besproken.

Invloed getij: In de situatie van opwarming van het havenbekken, koelt het water meer af naarmate er meer water door het getij naar binnen en weer naar buiten stroomt. Of andersom: hoe kleiner de verversing door getij, des te groter de opwarming van het havenbekken. Voor een eerste schatting van de temperatuurverhoging is het zinvol om het effect van doortij en springtij nader te bekijken. Uit Tabel 5-7 blijkt dat het getij zelfs tijdens doortij nog meer dan de helft van de afkoeling veroorzaakt.

Tabel 5-7 Gevoeligheid en aandeel van verversing door getij

| Verversing getij | Doodtij | | Gemiddeld tij | | Springtij | |
|---------------------------------|---------------------------------|-----|----------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| | Q=350m ³ /s, dh=1,4m | | Q=440m ³ /s, dh=1,76m | | Q=550 m ³ /s, dh=2,2m | |
| $T_{g,in} = 19^{\circ}\text{C}$ | | 65% | +0°C | 74% | | 78% |
| $T_{g,in} = 20^{\circ}\text{C}$ | +0,2°C | 53% | 1,6°C | 59% | -0,2°C | 64% |
| $T_{g,in} = 21^{\circ}\text{C}$ | | 42% | +0°C | 44% | | 51% |

Invloed warmteuitwisseling met atmosfeer: in deze warmtebalans wordt gerekend met een exces temperatuur model (paragraaf 5.3). Er kan alleen met een constant afkoelingsgetal gerekend worden wanneer de temperatuurverhoging gering is, maximaal 3°C. Gezien de resultaten ($dT < 3^{\circ}\text{C}$) is deze vereenvoudiging toelaatbaar.

Om de gevoeligheid te analyseren van de warmteuitwisseling met de atmosfeer, worden de effecten van variatie in de waarden voor K_{aw} en T_e bekeken, Tabel 5-8.

Tabel 5-8 Gevoeligheid en aandeel van warmteuitwisseling met atmosfeer

| Uitwisseling atmosfeer | $K_{aw}=30 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ | $K_{aw}=40 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ | $K_{aw}=100 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $(T-T_e)=2,4\text{°C}$ | 16% | +0°C 21% | 53% |
| $(T-T_e)=1,7\text{°C}$ | +0°C 11% | 1,6°C 14% | -0,3°C 29% |
| $(T-T_e)=1,0\text{°C}$ | 7% | +0°C 9% | 24% |

Normaal gesproken wordt uitgegaan van een warmteuitwisselingscoëfficiënt K_{aw} van $40 \text{ W/m}^2/\text{°C}$. Bij een lagere uitwisseling naar de atmosfeer verandert de relatieve temperatuurverhoging nauwelijks, terwijl het aandeel in afkoeling door de atmosfeer afneemt. Een mogelijke hoge waarde voor K_{aw} kan $100 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ zijn. Dit verlaagt de temperatuurverhoging met circa $0,3\text{°C}$. Het aandeel van afkoeling door warmteuitwisseling met de atmosfeer is met deze waarde een stuk hoger.

Door de hogere temperatuur in de bovenlaag ten gevolge van stratificatie is de gevonden invloed van de uitwisseling met de atmosfeer een onderschatting.

Invloed afvoer Hartelkanaal: schommelingen in het debiet van het Hartelkanaal hebben enige invloed op de temperatuurverhogingen (+/- $0,2\text{°C}$). Het aandeel van de zoetwaterflux op de afkoeling blijkt rond de 25% te bedragen. De zoetwaterflux heeft in werkelijkheid echter geen invloed op het gehele gebied, maar alleen in het Beerkanaal. Aangezien hierboven beargumenteerd is dat de temperatuur daar waarschijnlijk een stuk lager is dan in de afgesloten havenbekkens, lijkt de gevonden invloed van de zoetwaterafvoer op de afkoeling een overschatting.

Tabel 5-9 Gevoeligheid en aandeel van verversing door debiet Hartelkanaal

| Verversing Hartelkanaal | $Q_H=100 \text{ m}^3/\text{s}$ | $Q_H=200 \text{ m}^3/\text{s}$ | $Q_H=300 \text{ m}^3/\text{s}$ |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $T_H=18\text{°C}$ | 30% | +0°C 51% | 67% |
| $T_H=20\text{°C}$ | +0,2°C 16% | 1,6°C 27% | -0,2°C 36% |
| $T_H=22\text{°C}$ | 2% | +0°C 3% | 5% |

Conclusies warmtebalans

Het getij lijkt verreweg de grootste invloed op de afkoeling van de watertemperatuur in de havenbekkens te hebben. In de warmtebalans is het effect van afkoeling naar de atmosfeer enigszins onderschat en de afkoeling door de zoetwaterafvoer wat overschat. Deze zullen dus ongeveer van dezelfde grootteorde zijn.

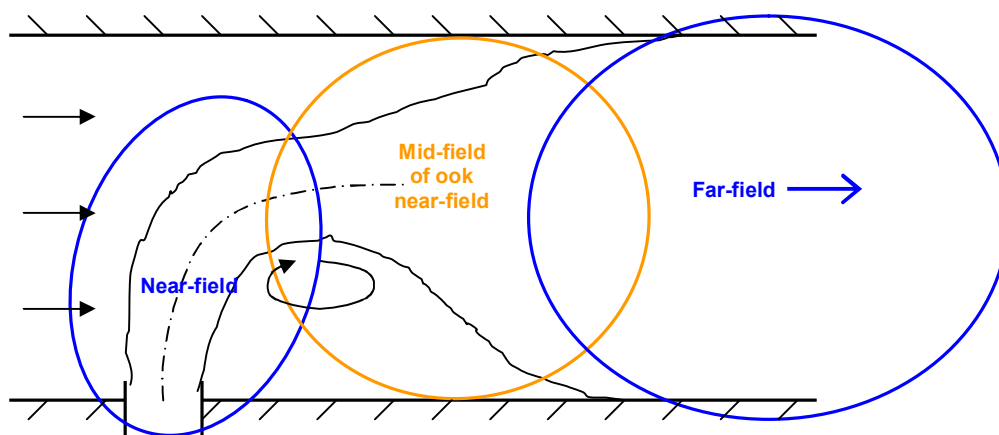
De gevonden temperatuurverhogingen door koelwaterlozingen met behulp van de warmtebalans zijn dusdanig hoog, dat mogelijk overschrijding van de CIW-richtlijnen plaats kan vinden in de havenbekkens. Om hier uitsluitsel over te kunnen geven, zullen de gevonden volumegemiddelde waarden moeten worden omgezet in doorsnedegemiddelde waarden op de mogelijke mengzonegrenzen. Nader onderzoek met behulp van een numeriek stromingsmodel is dan nodig om een duidelijker beeld te krijgen van de temperatuurverhoging bij de mogelijke mengzonegrenzen en inlaatlocaties. Om de lozingen goed in dit model te implementeren, zal in het volgende hoofdstuk allereerst ingezoomd worden op de onttrekking en lozing van het koelwater in het ontvangende water.

6 NEAR-FIELD ANALYSE

De hydrodynamica van een continue thermische lozing in een ontvangend watersysteem kan beschreven worden als een mengproces in twee aparte gebieden. In het eerste gebied zijn de karakteristieken van de warmtelozing bepalend voor het stroombeeld en initiële mengverschijnselen, dit is het near-field gebied.

Als de warmtepluim zich verder van het lozingspunt af verplaatst, worden de initiële karakteristieken van de lozing minder belangrijk. De condities van het ontvangende watersysteem zullen het traject en verspreiding van de warmtepluim domineren. Dit wordt het far-field genoemd.

Soms wordt er nog een tussengebied gedefinieerd, het mid-field, dat de overgang van de hydrodynamische processen van het near-field naar het far-field beschrijft, met name de radiale verspreiding van een warmtepluim. Een mid-field analyse blijft in deze studie buiten beschouwing, de radiale verspreiding wordt besproken in de near-field analyse.



Figuur 6-1 Schematische weergave van de beschouwingen op near-field, mid-field en far-field niveau.

In deze paragraaf worden de thermische lozingen nader bekeken in het gebied rond de inname- en lozingspunten, het 'near-field' gebied. Het doel van deze analyse is om inzicht te krijgen in de verspreiding van de warmte vlak bij het lozingspunt, zodat dit als randvoorwaarde in de far-field analyse kan worden meegenomen.

Leeswijzer

Allereerst zal ingegaan worden op het onderscheid tussen near-field en far-field analyses. Er wordt kort ingegaan op de belangrijkste near-field processen. Vervolgens wordt er ingezoomd op de onttrekking van koelwater bij de inlaatlocaties om een idee van de dichtheid van het ingenomen water te krijgen. Zo wordt er ook ingezoomd op de verticale dichtheidsgradiënten van het ontvangende water bij de uitlaatlocaties. Met de nu bekende dichtheden kan bepaald worden of de stratificatie in de havenbekkens van invloed is op de thermische lozingen.

6.1 Near-field processen

In de handleiding van het near-field model CORMIX [JIRKA *et al.*, 1996] staat de volgende definitie van het begrip ‘near-field’:

“Near-field: The region of a receiving water where the initial jet characteristics of momentum flux, buoyancy flux and outfall geometry influence the jet trajectory and mixing of an effluent discharge.”

Dit wil zeggen dat advectie en diffusie worden beheerst door de eigenschappen van de inkomende straal. Deze eigenschappen zijn onder andere de impuls-flux (‘*momentum flux*’), oprijvende flux (‘*buoyancy flux*’) en de geometrie van de uitloop (‘*outfall*’) van de inkomende straal.

Het near-field maakt het belangrijkste deel uit van de mengzone. Dit laatste is een begrensd volume in de nabijheid van het lozingspunt waar de beginnende verdunning van een lozing optreedt en de temperatuur hoger is dan een limietwaarde, gedefinieerd door de wetgeving (paragraaf 3.3). Zo kan het bijvoorbeeld interessant zijn om met behulp van een near-field analyse de globale dimensies van de mengzone te bepalen.

Ook is het van belang te weten of de verspreiding van de warmtepluim voornamelijk aan het wateroppervlak, over de waterbodem, ingesloten op een bepaalde laag of over de gehele diepte plaats vindt. Deze gegevens kunnen vervolgens gebruikt worden als randvoorwaarde voor het beschrijven van de verspreiding van warmte in het far-field. Het kan bijvoorbeeld invloed hebben op de recirculatie van de warmtelozing naar het innamepunt, zeker wanneer de warmtepluim op dezelfde hoogte is ingesloten als de innamediepte. En als een warmtelozing niet het wateroppervlak bereikt, heeft dit in het far-field een vermindering van de afkoeling door warmteuitwisseling met de atmosfeer tot gevolg.

Gezien het kleine te beschouwen oppervlak vlakbij het lozingspunt, speelt in een near-field analyse de warmteuitwisseling met de atmosfeer nog geen rol. Ook advectie door stroming van het ontvangende watersysteem en ‘large scale tidal flushing’ worden in de near-field analyse niet meegenomen. De volgende processen zijn wel van groot belang in een near-field analyse en worden in de volgende paragrafen nader besproken:

- initiële menging van de uitstroom;
- vorming van een warmteveld of pluim dat natuurlijke laterale diffusie en/of dispersie ondergaat.

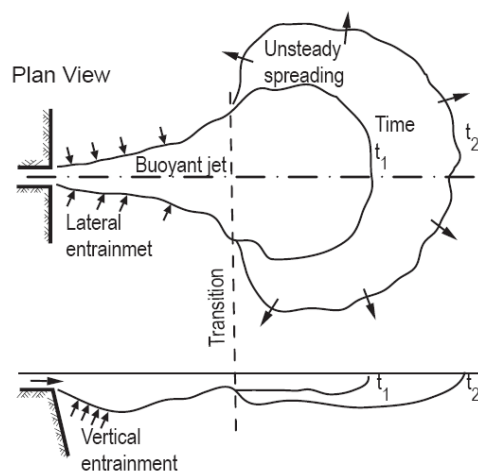
6.1.1 Initiële menging van een warmtelozing

De menging van een inkomende straal wordt meestal onderverdeeld in menging van de straal aan de oppervlakte (‘*surface jet mixing*’) en onder water (‘*submerged jet mixing*’). En een inkomende straal waarvan aanvankelijk de dichtheid een bepaalde hoeveelheid ($\Delta\rho_0$) verschilt met de dichtheid van het ontvangende water wordt een ‘*buoyant jet*’ genoemd [FISCHER *et al.*, 1979, p. 333]. Vanwege de aanwezige stratificatie en het dieper ingenomen koelwater, kunnen de meeste thermische lozingen in het Maasvlaktegebied worden gekarakteriseerd als ‘*buoyant jets*’ die bij laagwater net onder het wateroppervlak gelegen zijn.

Dicht bij het lozingspunt (‘*core region*’) overheerst de impuls van de lozing. Door het snelheidsverschil tussen het geloosde water en het ontvangende water wordt een intensieve schuifstroming veroorzaakt die al snel overgaat in turbulente bewegingen. Voor een aanvankelijk korte afstand wordt de warmte zowel lateraal als verticaal verspreid door deze turbulente menging. De breedte van het gebied met een hoge turbulentie wordt groter in de richting van de stroming door

straaldiffusie ('*entrainment*') van het omringende water, zie als voorbeeld Figuur 6-2. Karakteristiek voor dit 'entrainment gebied' is dat hier het grootste deel van de menging met het ontvangende water plaatsvindt en dus de temperatuur en de snelheid in het hart van de straal afnemen. De impuls van de inkomende straal en de warmte worden zo geleidelijk gediffuseerd.

Figuur 6-2 Voorbeeld van de initiële menging van een opdrijvende oppervlaktelozing in stagnant water. Te zien is de straaldiffusie in het omringende water en de laterale diffusie. [JIRKA *et al.*, 1996]



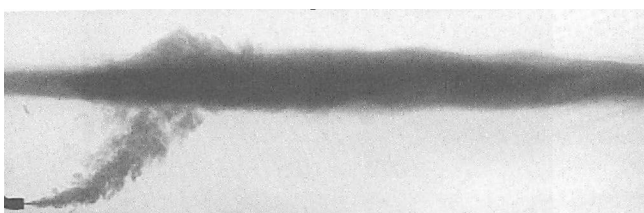
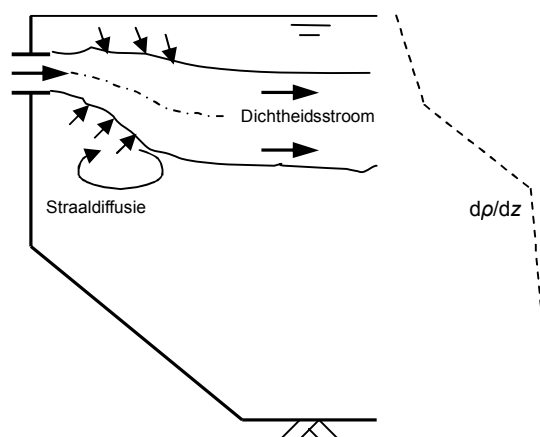
6.1.2 Laterale spreiding van warmtepluim in stabiel gebied

Na de fase van initiële menging wordt door afname van de lozingsimpuls en demping van de turbulente bewegingen de verticale straaldiffusie geremd en vindt vooral nog een sterke laterale spreiding plaats (zie ook Figuur 6-2). De pluim kan nu ook dunner worden, waardoor de horizontale straaldiffusie ook afneemt. In dit 'stabiële gebied' zijn menging en temperatuur redelijk constant.

In geval van omringende stroming neemt op grotere afstand van het lozingspunt de menging sterker toe dan in stagnant water en ontbreekt een stabiel gebied. De ontstane warmtepluim zal geleidelijk afbuigen in de richting van de stroming. Aanwezige stratificatie kan de verticale acceleraties tegengaan, dat uiteindelijk leidt tot het insluiten van de stroming op een zekere hoogte.

Doorgaans is bij een temperatuurlozing sprake van een pluim die lichter is dan het omringende water en daardoor uiteindelijk het wateroppervlak bereikt. In het Maasvlaktegebied kan het zijn dat, vanwege de combinatie van de aanwezige stratificatie en het op een diepere laag koelwater innemen, een warmtelozing door een hoger zoutgehalte toch zwaarder is dan het ontvangende water. In dit geval is de warmtepluim zwak drijvend en zal het ingesloten kunnen worden rond het interne grensvlak van de zout-zoet stratificatie (te zien in Figuur 6-3) of kan het zich gaan verspreiden over de waterbodem.

Figuur 6-3 Rechts: Zijaanzicht van de initiële menging van een zakkende, horizontale thermische lozing in een gestratificeerd watersysteem. Daar waar de verticale dichtheidsgradiënten het grootst zijn wordt de warmtepluim ingesloten. Onder: foto van een experiment van de hierboven beschreven situatie, echter met een opdrijvende straal. [FISCHER *et al.*, 1979]



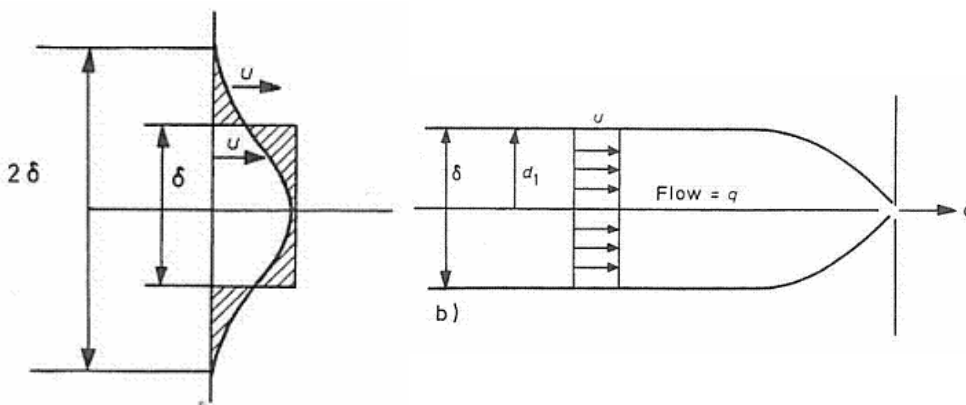
Kortom, om te kunnen voorspellen waar de warmtelozingen in de Maasvlakte ongeveer in de waterkolom terecht komen, moet de globale verhouding tussen de dichtheid van het ingenomen water en het ontvangende water bekend zijn. Daarom zal in de volgende paragraaf allereerst de onttrekking bij de inlaatlocaties bestudeerd worden.

6.2 Onttrekking bij inlaatlocaties

Het is dus mogelijk dat een thermische lozing – ondanks de temperatuurverhoging – door een hoger zoutgehalte toch zwaarder is dan het ontvangende water in de bovenlaag ter plekke van de lozing. Om na te gaan of de buoyancy flux van de lozing in het ontvangende water positief of negatief is, en daarmee of de warmtepluim stijgt naar het wateroppervlak of zakt ter hoogte van het interne zoet-zout grensvlak of naar de bodem, moet de dichtheid van het ingenomen water bekend zijn. Deze dichtheid wordt bepaald door de temperatuur en saliniteit van het ingenomen water, dat weer wordt bepaald door de diepte waarop wordt ingenomen en het innamedebiet. Door de aanwezige stratificatie in de havenbekkens (paragraaf 4.5) is het mogelijk dat niet over de gehele diepte wordt ingenomen, maar over een beperkte diepte. Dit verschijnsel wordt ‘selectieve onttrekking’ genoemd. Wanneer de mate van selectieve inname bekend is, kan meteen geschat worden of de optredende stroomsnelheden bij de onttrekking mogelijk schade aan de vispopulaties teweeg brengen.

6.2.1 Analyse selectieve onttrekking

Kao (1965) vond door middel van een inviscueuse, diffusieloze benadering dat de dikte van de laag waarover wordt ingenomen op grotere afstand van het onttrekkingspunt constant is. Hij nam echter een uniforme verticale snelheidsverdeling aan. Een meer realistische benadering is een Gaussische distributie van het verticale snelheidsprofiel. Beide profielen zijn weergegeven in Figuur 6-4.



Figuur 6-4 Schematisatie van de laagdikte waarover onttrekking plaatsvindt. Zowel een uniforme verticale snelheidsverdeling is weergegeven (rechts), als een verdeling volgens een Gaussiekromme (links). [HENDERSON-SELLERS, 1984]

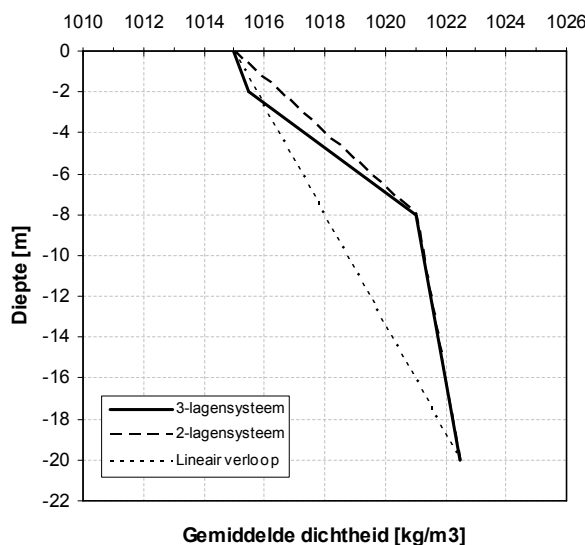
De laagdikte (δ) waaruit wordt ingenomen is te benaderen met de volgende formule:

$$\delta = \alpha \left(\frac{q^2}{g\varepsilon} \right)^{1/4}$$

Hierin is q het onttrekkingsdebiet per strekkende meter. De coëfficiënt α is circa 2.4 in geval van uniforme snelheidsverdeling volgens Kao (1965) en α is 4.8 in geval van een meer realistische Gaussische snelheidsverdeling volgens Huber en Harleman (1968). Aangezien hier een schatting van de gemiddelde dichtheid van het ingenomen water gezocht wordt, is het belangrijk de laagdikte te vinden waarover verreweg het meeste water wordt ingenomen. Om deze reden wordt voorgesteld $\alpha = 2.4$ te gebruiken. De relatieve dichtheidsgradiënt (ε) is gegeven door:

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dz}$$

Het dichtheidsprofiel bij de innamepunten van de energiecentrales ziet er gemiddeld gezien uit zoals de dik getrokken lijn in Figuur 6-5. De twee andere getrokken lijnen geven vereenvoudigingen aan die gebruikt kunnen worden bij de berekening of selectieve inname plaatsvindt.



Figuur 6-5 Schematisatie van de zomergemiddelde dichtheid van het water in de havenbekkens gelegen aan het Beerkanaal.

Onttrekking E.ON & Lyondell

Allereerst wordt gekeken of er bij de E.ON-centrale in de toekomst selectieve inname zal plaatsvinden. De waterdiepte ter hoogte van het innamepunt is ongeveer 7 m. Wanneer het dichtheidsverloop wordt geschematiseerd tot het 2-lagensysteem, geeft dit een dichtheidsgradiënt van $\varepsilon \approx 8,5 \cdot 10^{-4}$. De geschatte laagdikte waarover wordt ingenomen is nu circa 15 m, dus meer dan de aanwezige 7 m diepte. Er kan nu worden aangenomen dat E.ON bij een onverdiepte inlaatlocatie over de gehele 7 m water zal innemen.

Onttrekking Electrabel

Bij Electrabel is de waterdiepte ongeveer 20 m. Bij een onveilige aanname met een dichtheidsverloop zoals bij het 2-lagensysteem is $\varepsilon \approx 8,5 \cdot 10^{-4}$ en de dikte van de innamelaag ongeveer 7,5 m. Bij een veilige aanname van een lineair dichtheidsverloop is $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^{-4}$ en de laagdikte circa 10 m. Een redelijke schatting is dus dat over de eerste -8 tot -10 mNAP water wordt ingenomen.

Onttrekking EnecoGen & LionGas

Ook hier wordt uitgegaan van een waterdiepte van 20 m, en gezien de ligging bij de monding van het Beerkanaal zal de saliniteit in de onderste lagen iets hoger zijn dan die bij de andere inlaatlocaties. De

gemiddelde inlaatdiepte is -12 mNAP. Wanneer wederom wordt uitgegaan van een veilige aanname, een lineair dichtheidsverloop met $\Delta\rho = 9 \text{ kg}$, wordt $\varepsilon \approx 4,5 \cdot 10^{-4}$ en de dikte van de inname laag ongeveer 20 m, gelijk aan de totale diepte. Dit komt door de relatief smalle breedte (3 m) van de geplande inlaat. Het is daarom aan te bevelen deze breedte te vergroten. Aangezien de laagdikte is gevonden bij een veilige aanname van een lineair dichtheidsverloop en aangezien het innamepunt ver onder de interne zoet-zout grensvlak ligt, is een redelijke schatting dat over de diepte van circa -5 tot -20 mNAP ingenomen wordt.

De inname van toekomstige chemie op de Maasvlakte 2 blijft buiten beschouwing vanwege de grote onzekerheden in de uitvoering hiervan, net als de koudelozing van de Gate terminal. Daarnaast werkt dit laatste positief op de afname van de temperatuurverhoging en is dus niet maatgevend. In onderstaande tabel zijn de benodigde gegevens inclusief bovenstaande bevindingen samengevat.

Tabel 6-1 Samenvatting analyse selectieve onttrekking bij de energiecentrales

| Innamelocatie | Debiet Q_k [m^3/s] | Afmeting inlaat ($b \cdot h$) [m^2] | Instroom- debiet q [m^2/s] | Inname- diepte [mNAP] | Herkomst water [mNAP] | Gem. saliniteit [ppt] |
|-----------------------------|--------------------------------|---|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| E.ON, Lyondell (& Gate LNG) | 87 | 25*4,3 + 12,5*4,3 | 3,5 | -4,5 | Gehele diepte: 0 tot -7 m | 26 |
| Electrabel | 28 | 30*3 | 0,9 | -5 | Selectief: 0 tot -8 á -10 m | 27 |
| EnecoGen & LionGas | 13 | 3*3 | 4,3 | -12 | Selectief: -5 tot -20 m | 30 |

6.2.2 Stroomsnelheden bij onttrekking

Uit correspondentie tussen Rijkswaterstaat en het Havenbedrijf Rotterdam kwam het volgende naar voren: ten gevolge van het inname-debiet ter grootte van $87 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt in de Europahaven:

- binnen een gebied met een straal van 133 m van het innamepunt de snelheid van 0,015 m/s (kritieke snelheid voor vislarven) overschreden. Het volume van dit gebied komt overeen met 0,3% van de Europahaven. Zelfs als wordt uitgegaan dat de haven kan worden aangemerkt als paaigebied, met een hoge dichtheid aan vislarven, zal dit niet leiden tot significante effecten. De dagelijkse sterfte van vislarven in een paaigebied bedraagt 3-7,5%.
- binnen een gebied met een straal van 33 m van het innamepunt de snelheid van 0,06 m/s (kritieke snelheid voor juveniele vissen) overschreden, hetgeen overeenkomt met 0,02% van het volume van de Europahaven.

Gezien de beperkte volumina waarin overschrijding plaatsvindt van de kritische snelheid die kan worden weerstaan door respectievelijk vislarven en juveniele vissen, en gezien het feit dat havens op grond van hun hydromorfologische eigenschappen minder geschikt zijn om te fungeren als paai- en opgroeigebied, zullen de dichtheden aan vislarven en juveniele vis veel lager uitvallen dan in paai- en opgroeigebieden. Dit leidt tot de conclusie dat de onttrekking van koelwater uit de Europahaven naar verwachting niet zal leiden tot significante effecten voor het aquatische milieu.

Gezien de kleinere lozingen van Electrabel en EnecoGen en de afmetingen van de bekkens waaruit onttrokken wordt, lijkt het ook onwaarschijnlijk dat deze onttrekkingen enige invloed hebben op het aquatisch milieu.

6.3 Lozing bij uitlaatlocaties

Met de nu bekende gegevens over koelwaterinname en bekende temperatuurverhogingen van het koelwater is met behulp van vereenvoudigde berekeningen met lozingskarakteristieken [FISCHER *et al.*, 1979] na te gaan of het verschijnsel van zakkende warmtepluimen zal optreden bij de grote koelwaterlozingen. Dit geeft aan of stratificatie een rol speelt bij de verspreiding van de

warmtelozingen en of het aandeel van afkoeling naar de atmosfeer meer of minder wordt dan in geval van geen stratificatie. De warmtepluimen drijven dus op naar het wateroppervlak of zakken en worden ingesloten op een bepaalde diepte.

Een ander aspect wat met de karakteristieken en bijbehorende lengteschalen of met het programma CORMIX benaderd kan worden is de schatting van de dimensies van de mengzones van de thermische lozingen.

6.3.1 Karakteristieken en lengteschalen

De hierboven beschreven processen hangen sterk af van de eigenschappen van de warmtelozing. Naast de geometrie van de uitloop, wordt een lozing vooral beschreven door de volume-flux, momentum-flux en buoyancy-flux. Door de initiële snelheidsverschillen kan de lozing op drie manieren tot uiting komen:

- Als een pure straal ('*jet*'): turbulente menging vindt plaats door de initiële momentum-flux.
- Als een pure pluim: turbulente menging vindt plaats door de initiële buoyancy-flux (locale verticale versnellingen).
- Als een oprijvende straal ('*buoyant jet*'), ofwel geforceerde pluim: turbulente menging vindt plaats door een combinatie van initiële momentum-flux and buoyancy-flux.

De momentum-flux en buoyancy-flux zijn naast de volume-flux dus de belangrijkste karakteristieken van een thermische lozing. De impuls die een lozing van warm water met debiet Q_k [m^3/s] door een opening met een oppervlakte A [m^2] introduceert ten gevolge van zijn snelheids-flux, kan gekwantificeerd worden met de 'specifieke momentum-flux':

$$M = \frac{Q_k^2}{A}$$

Zoals eerder beschreven is een belangrijk aspect het drijfvermogen van een thermische lozing in het ontvangende water. De inkomende warmtepluim kan oprijvend zijn ('*buoyant*') of zakkend ('*negative buoyant*'). Het drijfvermogen dat resulteert uit het dichtheidsverschil $\Delta\rho$ tussen de warmtelozing en het ontvangende water leidt tot een 'specifieke buoyancy-flux':

$$B = gQ_k \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

Wanneer B negatief is heeft de warmtelozing de neiging om te zakken. Bij een positieve waarde voor B zal de warmtepluim oprijven tot aan het wateroppervlak.

Met behulp van deze twee genoemde karakteristieken kunnen snel de globale lengteschalen van een warmtelozing geschat worden [FISCHER *et al.* (1979), JIRKA *et al.* (1996) en BAPTIST & UIJTTEWAAL (2005)]. Enkele voor deze studie interessante lengteschalen worden hier beschreven. Zo is de afstand L_M waarover de overgang van straal- naar pluimgedrag plaats vindt (in een stagnante, uniforme omgeving) van de grootteorde:

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}}$$

Kijkend naar een kleinere lengteschaal, is de lengte waarover de geometrie van de uitloop de straal domineert gegeven als:

$$L_Q = \sqrt{A} = \frac{Q}{\sqrt{M}}$$

De ratio tussen de bovengenoemde twee lengteschalen vormt het dimensieloze Richardson getal:

$$R_0 = \frac{L_Q}{L_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}}$$

Dit getal varieert tussen de 0 en 1. Voor grote waarden gedraagt de lozing ('*buoyant jet*') zich als een straal en voor kleine waarden als een pluim.

In de havenbekkens is bij de lozingen van E.ON en Electrabel een zwakke dwarsstroming ten opzichte van de lozingen aanwezig door de getijbeweging en bij EnecoGen een sterke dwarsstroming. De afstand van de indringing van de inkomende lozing in het ontvangende water, totdat die sterk wordt afgebogen door de aanwezige stroming, is gedefinieerd voor een straal en een pluim als:

$$L_m = \frac{M^{1/2}}{u_a} \quad \text{en} \quad L_b = \frac{B}{u_a^3}$$

Deze karakteristieken en lengteschalen worden in de volgende paragraaf gebruikt om de near-field aspecten van de thermische lozingen in het Maasvlaktegebied te beschrijven.

6.3.2 Analyse 'zakkende' warmtelozingen

De mogelijke toekomstige lozingen van de chemie op de 2^e Maasvlakte zullen buiten beschouwing blijven in de near-field analyse, gezien de grote onzekerheden van de toekomstige lozingsparameters. De te beschouwen lozingen staan gegeven in Tabel 6-2.

Allereerst wordt gekeken wat de marge van het dichtheidsverschil is tussen de lozingen en hun ontvangende water. De drie energiecentrales warmen het water ongeveer 7 tot 10°C op, dat leidt tot een dichtheidsverschil $\Delta\rho_T$ van 1,8 á 2,7 kg/m³. Dit doet een warmtelozing normaal gesproken stijgen. Het dichtheidsverschil tussen het ingenomen water op zekere diepte en het ontvangende water aan het oppervlak kan er echter voor zorgen dat de warmtelozing toch zwaarder is dan het ontvangende water. In andere woorden: wanneer het dichtheidsverschil ($\Delta\rho_S$) ten gevolge van verschil in saliniteit tegengesteld en groter is dan het dichtheidsverschil ($\Delta\rho_T$) ten gevolge van de opwarming, wordt de buoyancy-flux negatief en zal de warmtelozing de neiging hebben om te zakken. Dit betekent dat het verschil in saliniteit tussen lozing en ontvangende laag water ongeveer 3 tot 4 ppt moet bedragen om een negatief drijfvermogen te veroorzaken. Het zakken stopt dan tot onder de bovenste relatief zoete waterlaag, waar de toename van de verticale saliniteit deze zakking afremt. De warmtepluim is dan in evenwicht, ingesloten net boven een laag met sterke dichtheidsgradiënten, dus net boven de interne zoet-zout grenslaag.

Er wordt nu kort gekeken of negatief drijfvermogen een rol kan spelen bij de drie grote koelwaterlozers bij een (zomer)gemiddeld saliniteitsprofiel:

- *E.ON/Lyondell*: In de vorige paragraaf bleek dat E.ON water onttrekt over de gehele 7 m diepte, met een gemiddeld saliniteitsgehalte van 26 ppt. Alleen wanneer de saliniteit in de bovenlaag van het ontvangende water kleiner is dan 23 ppt vindt theoretisch gezien zakking van de warmtepluim plaats. Deze situatie zal niet vaak voorkomen en de warmtepluim lijkt in eerste instantie aan de oppervlakte te komen. Maar wanneer de temperatuur van de warmtepluim daalt door de initiële

menging en ‘entrainment’ op verdere afstand, zal de lozing relatief gezien zwaarder worden en zakken tot onder de bovenste zoete laag in de Yangtzehaven. Dit effect wordt versterkt doordat in de Yangtzehaven richting de monding er een dikkere zoet waterlaag zich bovenin de waterkolom bevindt. De warmtepluim zal tot onder deze laag zakken. In het far-field model kan gecontroleerd worden of dit verschijnsel optreedt (paragraaf 8.4.1 ‘discussie nauwkeurigheid’)

- *EnecoGen*: Om recirculatie te voorkomen zal EnecoGen verdiept innemen. In HELING *et al.* (2005) is daarvoor een innamediepte van circa -12 mNAP nodig. Dit geeft bij een selectieve onttrekking van ongeveer -5 tot -20 m een gemiddelde saliniteit van het koelwater van ongeveer 30 ppt. Dit is duidelijk meer dan 4 ppt verschil vergeleken met de bovenlaag waarin geloosd wordt. De warmtelozing heeft negatief drijfvermogen en zal zakken tot waarschijnlijk rond -8 tot -10 mNAP. Gevaar voor enige (directe) recirculatie blijft nog wel aanwezig.
- *Electrabel*: Electrabel neemt selectief in over de bovenste 8 á 10 m met een gemiddelde saliniteit van 27 ppt. Het saliniteitsverschil met het ontvangende water is nu ongeveer 3 ppt. Na de initiële menging en enige temperatuurdaling zal de warmtepluim de neiging hebben te zakken.

Wat gebeurt er bij afwijkende saliniteitsprofielen? Tijdens maximale stratificatie (doodtij en hoge zoetwaterafvoer) zal de E.ON-lozing over het algemeen sterker opdrijvend zijn. Voor de Electrabel-lozing blijft de situatie nagenoeg gelijk en bij EnecoGen zal de warmtepluim nog sterker willen zakken.

Tijdens minimale stratificatie (springtij en lage zoetwaterafvoer) heerst er in de havenbekkens een maximaal verticaal saliniteitsprofiel. Afhankelijk van de indringing van dit profiel in de oostelijke Yangtzehaven zal de E.ON warmtelozing bij weinig indringing minder opdrijvend worden en zelfs gaan zakken en bij veel indringing meer opdrijvend worden. Bij Electrabel en EnecoGen zullen de warmtepluimen (sterk) opdrijvend worden ten gevolge van de temperatuursgradiënten.

Kortom, stratificatie in de havenbekkens van de Maasvlakte speelt een belangrijke rol bij de initiële menging van de thermische lozing in het ontvangende water. Advectie en dispersie van ingesloten warmtepluimen rond het interne zoet-zout grensvlak ten gevolge van de grote koelwaterlozingen vindt gemiddeld gezien nagenoeg in het gehele Maasvlaktebekken plaats, behalve dicht bij de E.ON lozingslocatie (oostelijke Yangtzehaven). Daar is de warmtepluim in eerste instantie opdrijvend en vindt relatief veel afkoeling naar de atmosfeer plaats. Bij een maximaal saliniteitsprofiel zullen alle lozingen echter voornamelijk opdrijvend worden.

6.3.3 Analyse dimensies mengzones

Met behulp van lengteschalen kan globaal geschat worden over welke afstand een bepaald mechanisme (geometrie van de uitlaat, impuls of drijfvermogen van de lozing, omringende stoming etc.) dominant is. Eerder is geconcludeerd dat de mengzone van E.ON en Electrabel waarschijnlijk niet aan de 25% mengzonenorm zal voldoen, maar dat de mengzone als een deel van het havenbekken mag worden beschouwd. De mogelijke mengzonegrenzen liggen dan bij de monding van de desbetreffende havenbekkens in het Beerkanaal. De lozing van EnecoGen kan mogelijk wel aan de 25% mengzonenorm voldoen. Een schatting van de dimensies van EnecoGen worden in deze paragraaf gegeven.

Tabel 6-2 Gegevens lozingspunten voor near-field analyse

| Locatie lozing | Debiet Q_k [m^3/s] | Afmetingen ($b \cdot h$) [m^2] | u_k [m/s] | dT [$^{\circ}C$] | M [m^4/s] | B [m^4/s^2] | L_m [m] | L_b [m] |
|-----------------|-----------------------------|---|--------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|------------------|------------------|
| E.ON / Lyondell | 87 | 7 * (5,9*4,8) | 0,44 | 7 - 10 | 38 | 0,8 | ~ 1000 | ~ $1 \cdot 10^5$ |
| Electrabel | 28 | 28*2 per unit | 0,5 | 7 | 14 | -0,3 | ~ 300 | ~ $1 \cdot 10^4$ |
| EnecoGen | 13 | 5*2 | 1,3 | 8 | 17 | -0,3 | ~ 20 | ~ $1 \cdot 10^2$ |

Eerder is geconcludeerd dat de mengzone van E.ON waarschijnlijk niet aan de 25% mengzonenorm zal voldoen (zie de volumeverhoudingen in paragraaf 5.2.5). Het is mogelijk de mengzone als een deel van het havenbekken te beschouwen. De mogelijke mengzonegrens ligt dan bij de monding van de Yangtzehaven in de Europahaven of bij de monding van de Europahaven in het Beerkanaal. Met behulp van de lengteschalen kan geschat worden dat de afstand van de indringing van een straal in het ontvangende water (L_m) in de ordegrootte van 1000 m is en voor een pluim vele malen groter.

Modelleren in CORMIX voor de E.ON centrale is daarnaast niet zinvol gezien de geometrie van het ontvangende systeem met de aanwezigheid van de blokkendam. In de toekomstige situatie zal de blokkendam of iets soortgelijks ter hoogte van het lozingspunt blijven liggen.

Voor Electrabel is wel een analyse met CORMIX uitgevoerd. Een voorbeeld van de resultaten staat in bijlage D.2. In het voorbeeld wordt aangegeven dat de lozing negatief drijvend is. De lengteschaal van indringing van een jet in het ontvangende water totdat deze sterk afgebogen wordt bedraagt circa 370 meter. Hetzelfde voor een pluim geeft een zeer grote lengte. Dit komt door de zeer lage stroomsnelheden in de Amazonehaven in verhouding tot een relatief grote thermische lozing. Dit geeft aan dat de mengzone mogelijk een groot gebied zal beslaan. Net als bij de E.ON-lozing zal hier een mengzonegrens gekozen kunnen worden bij de monding van het havenbekken, in dit geval de rand van de Amazonehaven en het Beerkanaal.

Omdat het Beerkanaal twee watersystemen met elkaar verbindt en migratie van vissen plaatsvindt, moet de lozing van EnecoGen (& LionGas) wel voldoen aan de 25% mengzonenorm. Het Beerkanaal ter hoogte van de EnecoGen uitlaat is circa 900 m breed en 24 m diep. Aangenomen dat de warmtepluim met $dT > 2^\circ\text{C}$ nooit onder de innamediepte (12 m) zal komen, geldt voor de 25%-norm een maximale horizontale afmeting van de mengzone in dwarsrichting van circa 50% van de totale breedte van het Beerkanaal ter plekke, dus ongeveer 450 m.

Uit een aantal simulaties in CORMIX met variatie van stroomsnelheid van het ontvangende water blijkt dat de maximale horizontale afmeting van de mengzone in dwarsrichting optreedt bij 0,1 m/s of lager. Deze afmeting, ongeveer 65 m, is aanzienlijk kleiner dan de maximaal toegestane waarde van 450 m. Een voorbeeld van de resultaten staat gegeven in bijlage D.2.

Kortom, de mengzones van de lozingen van E.ON en Electrabel zullen mogelijk niet aan de 25%-norm voldoen. Het is dan nodig een deel van de havenbekkens als mengzone aan te wijzen, met de mengzonegrenzen bij de monding van de desbetreffende havenbekkens aan het Beerkanaal. De lozing van de EnecoGen-centrale blijkt wel ruim te voldoen aan de 25% mengzonenorm.

6.3.4 Analyse stroomsnelheden bij lozingslocaties

In Tabel 6-2 zijn de stroomsnelheden ter plaatse van de lozingspunten weergegeven. Deze stroomsnelheden kunnen hinder veroorzaken voor de (binnen)scheepvaart. In paragraaf 3.5 staan de maximaal toegestane stroomsnelheden. Er wordt nu bekeken of de lozingen voldoen en indien dit niet het geval is, welke maatregelen getroffen kunnen worden zodat alsnog voldaan wordt aan de eisen:

- *E.ON*: Gezien de grootte van het debiet mag de stroomsnelheid maximaal 0,22 m/s bedragen. Zonder maatregel voldoet de lozing dus niet. De blokkendam zal in de toekomst echter blijven liggen, zodat de stroomsnelheden in het ontvangende water aanzienlijk lager zullen uitvallen.
- *Electrabel*: Bij één unit is de maximaal toegestane stroomsnelheid 0,5 m/s. In de huidige configuratie wordt dus net voldaan aan de richtlijn.
- *EnecoGen*: Ook hier geldt een maximaal toegestane snelheid van 0,5 m/s. Deze snelheid wordt ruimschoots overschreden. Wanneer geen uitzondering gemaakt wordt bij de vergunningverlening gezien het lage debiet, kan de uitstroomopening vergroot worden ter verlaging van de stroomsnelheid.

6.4 Conclusies near-field analyse

De stratificatie in de havenbekkens van het Maasvlaktegebied blijkt een belangrijke rol te spelen bij het near-field gedrag van thermische lozingen in dit gebied. Een thermische lozing is in de meeste gevallen – ondanks de temperatuurverhoging – door het hogere zoutgehalte toch zwaarder dan het ontvangende water, waardoor een ontstane warmtepluim in evenwicht komt rond het interne zoet-zout grensvlak enkele meters (variërend rond de 5 meter) onder het wateroppervlak. Alleen bij weinig stratificatie zullen de warmtepluimen voornamelijk opdrijvend zijn.

Mogelijke effecten van het zakken van de warmtepluimen zijn:

- Vermindering van afkoeling door warmteuitwisseling met de atmosfeer: dit versterkt de aanname gedaan in hoofdstuk 5 dat het aandeel van warmteuitwisseling naar de atmosfeer relatief kleiner is ten opzichte van de afkoeling door menging met koud Noordzeewater en advection door de getijbeweging en afkoeling door advection van de zoetwaterflux.
- Hogere innametemperatuur (recirculatie) bij de inlaatlocaties, indien ingenomen wordt op dezelfde diepte als waar de warmtepluim een neutraal drijfvermogen heeft.

Alleen in de buurt van de lozingslocatie van de E.ON-centrale, de Oostelijke Yangtzehaven, zal de warmtepluim aan het oppervlak komen en vindt lokaal relatief veel afkoeling naar de atmosfeer plaats.

In het opzetten van het model om verspreiding van de warmte in de havenbekkens van het Maasvlaktegebied te kunnen voorspellen, moet rekening gehouden worden met het feit dat de warmtepluimen doorgaans zakken naar hun evenwichtsdiepte. Indien het far-field model een hydrostatische drukverdeling aanneemt, houdt dit niet juist rekening met de verticale versnellingen in het near-field gebied. Het is daarom van belang de lozingen op de juiste hoogte in het far-field model te implementeren. Natuurlijk zijn er variaties in dit gedrag, maar in eerste instantie wordt uitgegaan van een maatgevende, gemiddelde zomersituatie.

Tot slot kan worden geconcludeerd dat de optredende stroomsnelheden bij onttrekking geen problemen voor de vispopulaties blijken op te leveren. Wat betreft de stroomsnelheden bij de lozingslocaties met betrekking tot nautische hinder door de dwarsstroming, voldoet de Electrabel-lozing net aan de richtlijn, moet bij de E.ON-lozing de blokkendam of iets soortgelijks blijven liggen en is het aan te raden dat EnecoGen zijn uitlaatopening vergroot.

7 FAR-FIELD ANALYSE: OPZET MODEL

Om de verspreiding van de warmte in het far-field te kunnen voorspellen wordt in deze studie gebruik gemaakt van een numeriek rekenmodel. De opzet van het model wordt in dit hoofdstuk beschreven. De bevindingen van de near-field analyse kunnen als randvoorwaarden voor de lozingen gebruikt worden in dit far-field model.

Leeswijzer

De eerste paragraaf van dit hoofdstuk gaat kort in op de verschillende far-field processen en aspecten. In paragraaf 7.2 tot en met 7.4 wordt vervolgens de opzet van het far-field model behandeld en tot slot wordt de validatie van het Maasvlakte 2 model besproken in paragraaf 7.5.

7.1 Far-field processen

In de far-field analyse wordt het transport van warmte verder van het lozingspunt af behandeld. In de CORMIX handleiding [JIRKA *et al.*, 1996] staat de volgende definitie van het begrip ‘far-field’:

“Far-field: the region of the receiving water where buoyant spreading motions and passive diffusion control the trajectory and dilution of the effluent discharge plume.”

Dit wil zeggen dat advectie en diffusie worden beheerst door de eigenschappen van de ontvangende stroming. Dit in tegenstelling tot de near-field analyse, waar de eigenschappen van de lozing zelf dominant zijn. De initiële menging van de uitstroom en de vorming van een ‘warmtepluim’, zoals gevonden in de near-field analyse, worden als randvoorwaarde meegenomen in de far-field analyse. Voor een schematische weergave van de beschouwingen wordt terugverwezen naar Figuur 6-1.

De far-field meng- en transportprocessen worden gekarakteriseerd door longitudinale advectie van de warmtepluim door de omringende stroomsnelheid. In tegenstelling tot de near-field beschouwing is de warmteuitwisseling met de atmosfeer nu niet te verwaarlozen. Tevens wordt de natuurlijke, laterale diffusie en/of dispersie en ‘*large scale flushing*’ meegenomen in de far-field beschouwing. (‘Large scale flushing’ is advectie van warmte geïntegreerd over een aantal getijdencycli, ook wel ‘*upwelling*’ of ‘*downwelling*’ genoemd.)

Afhankelijk van het type near-field stroming, het drijfvermogen van de lozingen in het Maasvlaktegebied (wel, niet of zwak opdrijvend) en de aanwezige stratificatie in de havenbekkens, kunnen er verschillende types van horizontale radiale verspreiding van de warmtepluimen voorkomen ten gevolge van dichtheidsverschillen:

- Verspreiding aan het wateroppervlak;
- Verspreiding over de bodem;
- Verspreiding op de interne zoet-zout grenslaag met grote dichtheidsgradiënten;
- Verspreiding in de eindfase in continue gestratificeerd omringend water.

Deze transportmechanismen kunnen een warmtepluim snel verspreiden over grote afstanden in de transversale richting, vooral bij sterke stratificatie in het ontvangende water in het Maasvlaktegebied.

Uit de near-field analyse is gebleken dat de warmtelozing doorgaans (ondanks de temperatuurverhoging) toch zwaarder is dan de bovenste laag van het ontvangende water en hierdoor deels insluiting van de warmtepluim plaatsvindt. Verspreiding van de warmtepluim rond de interne

zoet-zout grenslaag lijkt daardoor in het Maasvlakgebied het meest voor te gaan komen. Deze lateraal verspreidende stroming gedraagt zich als een dichtheidsstroom met insluiting van omringend water aan de kopse kant van de stroming. Gedurende deze fase is de mengsnelheid relatief laag, kan de laagdikte van de warmtepluim kleiner worden en vindt interactie met de kades van de havenbekkens plaats.

Wanneer de bestaande turbulentie in het omringende water het dominante mengmechanisme wordt op voldoende grote afstand van het lozingspunt, vindt passieve diffusie plaats. Over het algemeen groeit de passief diffuserende stroming in breedte en dikte, totdat er interactie plaatsvindt met de waterbodem of kades.

Bij het beoordelen van de verspreiding in het far-field zijn naast de bovenstaande processen ook aspecten zoals de kans op recirculatie en de invloed van andere warmtelozingen van belang. Gezien de hydrodynamische complexiteit van het Maasvlakgebied (getijsysteem, gestratificeerd systeem, ingewikkelde geometrie van de havens, meerdere lozingen etc.) kan de stromingssituatie niet eenduidig worden gedefinieerd en is een hulpmiddel nodig om deze far-field aspecten door te rekenen, namelijk het gebruik van een drie dimensionaal numeriek stromingsmodel.

In eerdere studies is deze koelwaterproblematiek reeds benaderd met numerieke modellen. In bijlage A wordt een chronologisch overzicht gegeven en worden de resultaten van eerdere studies besproken. In dit onderzoek is ervoor gekozen de warmteverspreiding in de havenbekkens te modelleren met het numerieke Delft3D-FLOW model van WL|Delft Hydraulics, aangezien WL in het verleden een aantal studies namens het Havenbedrijf heeft uitgevoerd.

7.2 Toelichting Delft3D-FLOW en Maasvlakte 2-model

7.2.1 Algemene toelichting Delft3D-FLOW

Delft3D-FLOW is een multi-dimensionaal (2D of 3D) hydrodynamisch simulatieprogramma dat niet-stationaire stromings- en transportprocessen berekent, die resulteren uit meteorologische en getijde forceringen op een curvilineair, eindig rekenrooster.

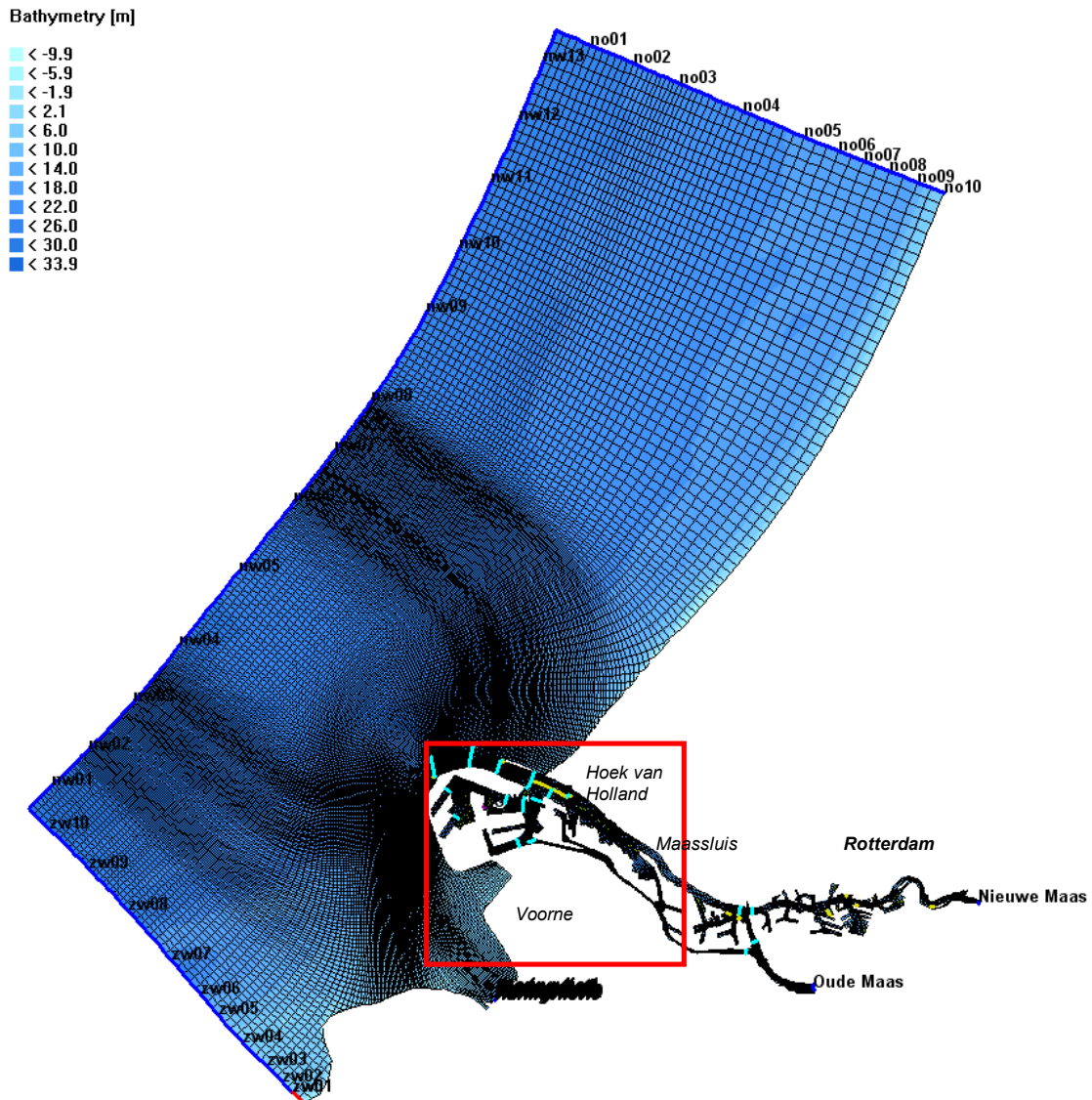
In Delft3D-FLOW worden de niet-lineaire ondiepwatervergelijkingen opgelost. Deze vergelijkingen zijn afgeleid van de drie dimensionale ‘Navier Stokes’ vergelijkingen¹ voor een onsamendrukbare vloeistof. Hiervoor is gebruik gemaakt van een belangrijke aanname dat de verticale versnellingen klein zijn ten opzicht van de horizontale versnellingen. Dit leidt tot een hydrostatische drukverdeling en daarmee dat de applicatie van Delft3D-FLOW beperkt is tot de mid- en far-field dispersiesimulaties van geloosd koelwater.

Het stelsel van partiële differentiaalvergelijkingen in combinatie met een stelsel van begin- en randvoorwaarden wordt opgelost in een eindig volumerooster. Dit rooster wordt hier als eerste besproken. In de volgende paragrafen is meer informatie te vinden over de hydrodynamica van het model en de begin- en randvoorwaarden.

¹ De Navier-Stokes vergelijkingen zijn partiële differentiaalvergelijkingen die de stroming van een vloeistof beschrijven. Die vergelijkingen zeggen dat een verandering in impuls van een vloeistofdeel – bijvoorbeeld als een vloeistof versnelt – altijd in evenwicht is met de aanwezige drukverschillen en met de dissipatieve visceuze kracht die inwerkt op de vloeistof. Die visceuze kracht ontstaat door moleculaire interactie en bepaalt hoe ‘stroperig’ (of hoe visceus) een vloeistof is.

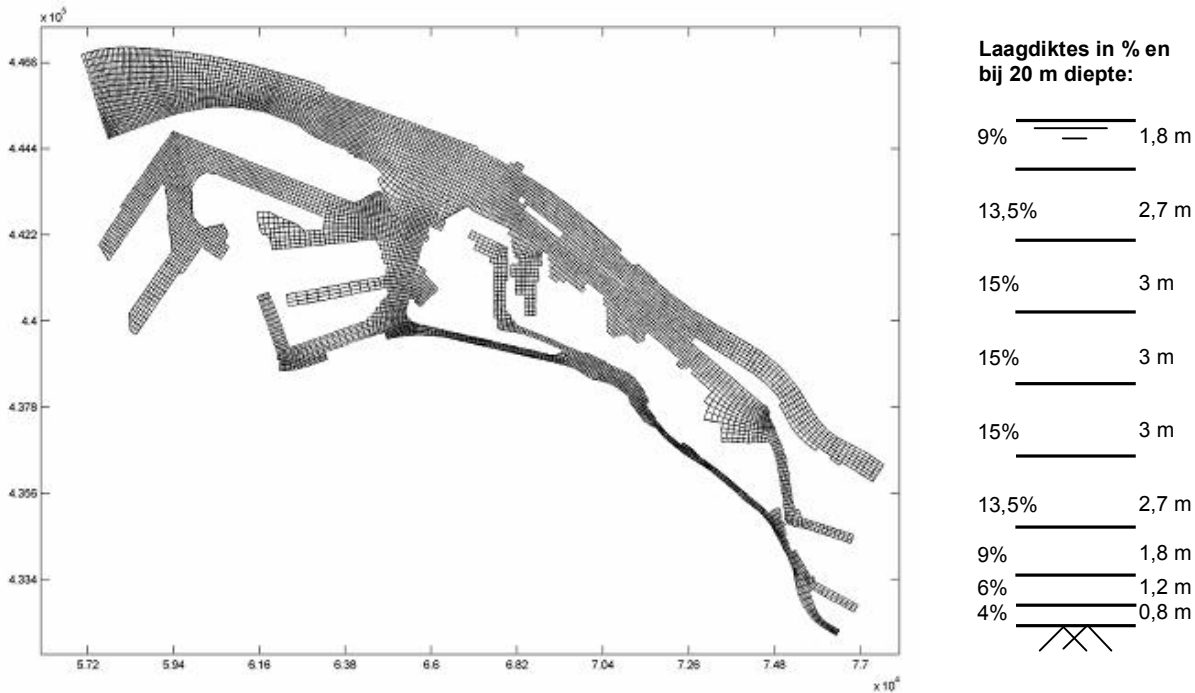
7.2.2 Herkomst Maasvlakte 2-model

Het hier gebruikte Maasvlakte 2-model is genest uit een groter Maasvlakte 2 model, dat op zijn beurt weer is genest uit een oorspronkelijk van Rijkswaterstaat afkomstig model. Dit houdt in dat uit het rooster van het Rijkswaterstaat model het rooster van het Maasvlakte 2 model is gehaald. Ook de randvoorwaarden voor het Maasvlakte 2 model zijn gegenereerd uit het Rijkswaterstaat model.



Figuur 7-1 Herkomst van het grote Maasvlakte 2-model

In Figuur 7-1 is met rood het deel van het Maasvlakte 2 rooster aangegeven, dat voor deze studie is gebruikt. Het voordeel van een kleiner balansgebied is een aanzienlijke verkorting van de rekentijd. Uit het gehele Maasvlakte 2 model zijn met een run de randvoorwaarden voor het kleinere model gegenereerd. Dit kleinere Maasvlakte 2 model is in Figuur 7-2 vergroot weergegeven.



Figuur 7-2 Links: rooster van Maasvlakte 2-model zoals gebruikt voor deze studie. Rechts: procentuele verdeling van de lagen, inclusief laagdiktes bij een maatgevende diepte van 20 m.

7.2.3 Numerieke eigenschappen model

In deze paragraaf worden beknopt de eigenschappen van het rekenrooster en de stabiliteit van het model besproken.

Domein decompositie

Vanwege de vele wijzigingen in de lay-out van de toekomstige havenbekkens in het Maasvlaktegebied, is in het verleden op een gegeven moment het model opgesplitst in een ‘inner’ en een ‘outer’ domein. Dit heet in Delft3D-FLOW ‘domein decompositie’. Zo kon het modelrooster bij nieuwe wijzigingen in de lay-out van de Maasvlakte makkelijker worden aangepast, bijvoorbeeld naar de nieuwe situatie met de LNG Gate terminal op de Papegaaibek.

Horizontale dimensies van de cellen

In horizontale richting varieert de celgrootte van het rooster tussen de 25 en 200 meter met een modus van ongeveer 80 meter, veel voorkomend in het Maasvlaktegebied. In totaal levert dit in het horizontale vlak een paar duizend gridcellen op. Over de breedte van de Yangtze- en Europahaven liggen 7 tot 16 cellen. Alleen de Amazonehaven heeft slechts drie cellen in de breedte, dat aan de lage kant is.

Verticale dimensies: σ -lagen

In verticale richting is het model verdeeld in 9 σ -lagen met ieder een procentueel deel van de waterdiepte als laagdikte. Het aantal lagen is hiermee constant over het gehele te berekenen gebied onafhankelijk van de lokale waterdiepte. De procentuele verdeling van de laagdikte is niet uniform. Aan het wateroppervlak is de laagdikte kleiner, vanwege windwrijving en warmteuitwisseling met de atmosfeer. Bij de waterbodem is de laagdikte ook kleiner, vanwege de optredende schuifspanningen door bodemwrijving. De procentuele verdeling van de lagen is weergegeven in de rechterfiguur van Figuur 7-2, inclusief de laagdiktes in meters bij een veelvoorkomende diepte van 20 m.

Bij het interne zoet-zout grensvlak kan het nuttig zijn de laagdikte ook kleiner te maken. Zo kunnen namelijk de daar optredende, grote dichtheidsgradiënten beter benaderd worden. De diepte is echter niet uniform, waardoor er niet in het gehele model specifiek bij het grensvlak meerdere lagen gecreëerd kunnen worden. Het gebruik van Z-lagen – lagen met een vaste laagdikte – kan dit probleem ondervangen. Er zijn dan wel meer lagen nodig, dat een significante toename van de rekentijd kan veroorzaken. Om deze reden is ervoor gekozen σ -lagen te gebruiken en de verticale maaswijdte niet ook nog bij het interne zoet-zout grensvlak te verfijnen. Wanneer in de toekomst het model verbeterd moet worden, is een nadere analyse van de verschillen tussen het gebruik van σ -lagen en Z-lagen interessant.

Op basis van de resultaten uit de near-field analyse kan gesteld worden dat de onttrekkingen en lozingen met de eerder genoemde configuratie van de σ -lagen nauwkeurig genoeg opgelegd kunnen worden.

Rekentijd

Met een tijdstap van 0,125 min duurt het simuleren van een periode van 9 dagen ongeveer 50 uur. Logischerwijs wordt deze rekentijd gehalveerd met een twee keer zo grote tijdstap van 0,25 min. Er moet echter gelet worden op de inspeeltijd van met name de saliniteit en temperatuur in het model. Hiervoor kunnen ‘*restart-files*’ gebruikt worden, zodat aan het einde van de simulatie de condities als beginvoorwaarde voor een nieuwe simulatie gebruikt kunnen worden.

Stabiliteit van model

Voor de stabiliteit van het model zijn de kleinste maaswijdtes $\{\Delta x, \Delta y\}$ en de gebruikte tijdstap (Δt) belangrijke parameters. Het Courant getal geeft de verhouding tussen de tijdstap en celgrootte weer:

$$Cr = v \frac{\Delta t}{\{\Delta x, \Delta y\}} = \frac{\sqrt{gd} \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

Hierin is d de maatgevende waterdiepte. Als vuistregel [WL|DELFT HYDRAULICS, 2006] mag het Courant getal niet groter zijn dan 10. Met $\Delta x = 30$ m, $\Delta t = 0,125$ min = 7,5 s en $d = 20$ m blijft het Courant getal binnen de voorwaarde voor stabiliteit ($Cr = 3,5$). Wanneer de tijdstap twee keer zo groot wordt genomen ($\Delta t = 15$ s) blijft het Courant-getal nog steeds binnen de grens voor stabiliteit. Het is dus mogelijk het model, bijvoorbeeld na een coldstart met inspeelperiode en kleine tijdstap van $\Delta t = 0,125$ min, te herstarten en opnieuw te draaien met een twee keer zo grote tijdstap van $\Delta t = 0,25$ min. De rekentijd van de simulatie van negen dagen wordt hiermee gereduceerd van circa 50 naar 25 uur.

7.3 Hydrodynamica van het model

In paragraaf 7.2.1 is reeds verteld dat Delft3D-FLOW de ondiepwatervergelijkingen oplost en uitgaat van een hydrostatische drukverdeling. In deze paragraaf wordt dit nader toegelicht, net als de transportvergelijkingen van saliniteit en temperatuur. Verder is de manier waarop de turbulentie en de warmteuitwisseling met de atmosfeer worden gemodelleerd van belang. Ook deze aspecten worden hier kort toegelicht.

7.3.1 Hydrostatische drukverdeling

De horizontale waterbeweging wordt beschreven door middel van een impulsbalans voor de twee horizontale snelheidscomponenten. Onder de aanname van ondiep water is de impulsbalans in verticale richting gereduceerd tot de hydrostatische verdeling van de druk [BAPTIST EN UIJTTEWAAL, 2005 & WL|DELFT HYDRAULICS, 2006]. Er wordt dus verondersteld dat de verticale versnellingen

klein zijn vergeleken met de gravitatieversnelling en deze worden daarom niet meegenomen. De verticale snelheid wordt nu verkregen uit de continuïteitsvergelijking. De verticale dichtheidsverschillen worden meegenomen in de horizontale drukgradiënten en in de verticale turbulente uitwisselingscoëfficiënten.

In de gevallen waar verticale versnellingen verwacht worden, zoals omhoogdrijvende of zakkende warmtepluimen bij de initiële menging van een thermische lozing, is deze aanname niet correct en leidt het tot inaccuraat oplossingen. Ook kan het de menging in het mid- en far-field beïnvloeden. In feite is dan een niet-hydrostatisch model nodig voor een juiste en stabiele weergave van het near-field. Een volledig niet-hydrostatisch model vergt echter veel rekenwerk en dus een langere rekentijd.

Wanneer de verticale versnellingen klein zijn (en de lozingspunten min of meer aan de oppervlakte gelegen zijn), is het resultaat van een hydrostatisch model echter minder problematisch. Het is daarom van belang de resultaten uit de near-field analyse (hoofdstuk 6) goed te implementeren in dit Delft3D-FLOW far-field model, door ze als randvoorwaarden voor de diepte van de te modelleren lozingen toe te passen. Hierdoor wordt de grootte van de te modelleren verticale versnellingen gereduceerd. Dit betekent dat de applicatie van Delft3D-FLOW beperkt is tot de mid- en far-field dispersiesimulaties van geloosd koelwater.

7.3.2 Ondiepwatervergelijkingen

De ondiepwatervergelijkingen met de aanname van hydrostatische drukverdeling bestaan uit twee horizontale impulsvergelijkingen en één continuïteitsvergelijking voor de verticale snelheid. De impulsvergelijkingen zijn als volgt gedefinieerd:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{snelheidsgradiënt}} + \underbrace{u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma}}_{\text{advectieve termen}} = -\frac{1}{\rho_0} P_x + \underbrace{fv}_{\text{Corioliskracht}} + \underbrace{v_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)}_{\text{horizontale turbulente viscositeit}} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_x$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_{\text{snelheidsgradiënt}} + \underbrace{u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma}}_{\text{advectieve termen}} = -\frac{1}{\rho_0} P_y + \underbrace{fu}_{\text{Corioliskracht}} + \underbrace{v_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)}_{\text{horizontale turbulente viscositeit}} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_y$$

Hierin zijn:

| | | |
|-------------|--|-------------------------------------|
| u, v | snelheidscomponenten in x- en y-richting | [m/s] |
| ω | snelheid gerelateerd aan het σ -vlak | [m/s] |
| σ | afstand gerelateerd aan het σ -vlak | [-] |
| H | diepte ($d-\zeta$) | [m] |
| d | diepte onder een horizontale referentievlak | [m] |
| ζ | waterhoogte onder een horizontale referentievlak | [m] |
| P_x / P_y | horizontale drukgradiënten | [kg/m ² s ²] |
| f | Coriolis parameter | [1/s] |
| v_H / v_H | horizontale / verticale turbulente diffusiviteit | [m ² /s] |

De lokale dichtheid in P is gerelateerd aan de temperatuur en saliniteit ter plekke en wordt berekend zoals beschreven in paragraaf 4.5.

De verticale snelheid ω (gerelateerd aan het σ -coördinaatstelsel) volgt uit de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{uit}),$$

met q_{in} en q_{uit} de lokale bronnen en onttrekkingen van water per volume-eenheid [1/s]. De werkelijke ‘fysieke’ snelheid w wordt in Delft3D-FLOW alleen berekend voor ‘post-processing’ toepassingen.

7.3.3 Transport van saliniteit en temperatuur

Het transport van saliniteit en temperatuur wordt berekend met een advection-diffusievergelijking zoals beschreven in paragraaf 5.2.4:

$$\frac{\partial HC}{\partial t} + \frac{\partial HuC}{\partial x} + \frac{\partial HvC}{\partial y} + \frac{\partial \omega C}{\partial \sigma} = \frac{1}{H} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_H}{\sigma_{c0}} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_H}{\sigma_{c0}} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_V}{\sigma_m} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) \right] + S_b$$

Hierin is C de concentratie van de saliniteit of warmte (temperatuur). Een afbraakterm is niet meegenomen. S_b representeert een bronterm per eenheid van oppervlakte voor de toevoegingen en onttrekkingen van warmte aan een cel.

7.3.4 Turbulentie sluitingsmodel

Vloeistofbewegingen in natuurlijke systemen zijn bijna altijd turbulent, zeker in het complexe watersysteem van de Rotterdamse haven. Turbulentie wordt gekenmerkt door onregelmatig fluctuerende, wervelende bewegingen van vloeistofdeeltjes. De schaal van deze wervels varieert van een macro-schaal tot een moleculaire micro-schaal. De kinetische energie van de willekeurige vloeistofbewegingen op grote schaal wordt overgedragen naar steeds kleinere wervels door de interactie van de bewegingen tussen de macro- en micro-schalen. Dit wordt de energiecascade genoemd. Een maat voor de hoeveelheid turbulente kinetische energie wordt uitgedrukt met de grootte k in [m²/s].

Op grotere schaal is de viscositeit relatief onbelangrijk, maar op kleine schaal speelt viscositeit een belangrijke rol en zet het de kinetische energie via wrijving om in warmte. Er wordt dus constant energie gedissipeerd. De hoeveelheid gedissipeerde energie wordt weergegeven met de eenheid ε in m²/s³.

Het rooster in de Maasvlakte is te grof (en de tijdstap iets te groot) om de turbulente fluctuaties op te lossen. Daarom zijn de basis vergelijkingen Reynolds-gemiddeld. Dit introduceert de zogenaamde Reynolds spanningen (*‘Reynolds stresses’*), die de fluctuaties rondom de ensemble gemiddelde turbulente snelheden weergeven. Om een verband te leggen tussen deze onbekende turbulente grootheden en de gemiddelde beweging is het gebruik van een turbulentiesluitingsmodel nodig. De bijdrage van de turbulentie op de verticale uitwisseling van horizontale impuls wordt gemodelleerd met behulp van de verticale turbulente viscositeit ν_v (*‘eddy viscosity’*) en op de verticale uitwisseling van saliniteit en temperatuur met behulp van de verticale turbulente diffusiviteit D_v (*‘eddy diffusivity’*). Kortom, een dergelijk turbulentiesluitingsmodel brengt in het kort gezegd het effect van de turbulente bewegingen in rekening.

In Delft3D-FLOW moeten de horizontale turbulente viscositeit (ν_h) en diffusiviteit (D_h) zelf worden ingevuld, gebaseerd op de maaswijdte. Bij de validatie in paragraaf 7.5 wordt hier verder op ingegaan. Voor de bepaling van de verticale turbulente viscositeit (ν_v) kan gekozen worden uit vier turbulentiemodellen:

- *Model met constante coëfficiënten*: het meest eenvoudige model. Dit leidt bijvoorbeeld tot parabolische verticale snelheidsprofielen (laminaire stroming).

- *Algebraïsch model*: combinatie van twee algebraïsche formuleringen.
- *k-L turbulentiemodel*: k is de turbulente kinetische energie en L is de mengweglengte (een kenmerkende afmeting van de wervels).
- *k- ϵ turbulentiemodel*: ϵ is een maat voor hoeveelheid gedissipeerde kinetische energie.

In het Maasvlakte 2-model wordt het k - ϵ turbulentiemodel gebruikt. Dit model berekent zowel de turbulente kinetische energie k als de dissipatie van de energie ϵ met een transportvergelijking. Met k en ϵ wordt de viscositeit ν_V bepaald en daarmee wordt weer de verticale turbulentie diffusiviteit geschaald volgens:

$$\nu_V = \frac{k^2}{c_\mu \epsilon} \text{ en } D_V = \frac{\nu_V}{\sigma_c},$$

met c_μ is een constante (0,09) en σ_c is het Prandtl-Schmidt getal. In het model wordt hier de basisinstelling voor gebruikt.

Het k - ϵ turbulentiemodel heeft als voordeel dat de menglengte nu een eigenschap is van de stroming, en dat in het geval van stratificatie geen dempingfuncties nodig zijn. De invloed van stratificatie op de mengweglengte wordt in rekening gebracht door de buoyancy term in de transportvergelijking voor k en ϵ .

7.3.5 Warmteflux-model

Om dezelfde redenen als bij de warmtebalans in paragraaf 5.5 wordt gebruik gemaakt van een exces temperatuurmodel in plaats van een absoluut temperatuurmodel. Dit wil zeggen dat de achtergrondtemperatuur niet van belang is omdat er gerekend wordt met temperatuurverschillen ten gevolge van de warmtelozingen en de effecten van de achtergrondtemperatuur op de verspreiding van de warmte niet significant zijn. Meer informatie over de verschillen tussen deze twee modellen is te vinden in paragraaf 5.3.

In tegenstelling tot het exces temperatuurmodel dat gebruikt wordt in de warmtebalans, maakt Delft3D-FLOW echter niet gebruik van een constant afkoelingsgetal. In het model is dit getal een functie van de temperatuur en de windsnelheid zoals bepaald door Sweers (1976) [WL|DELFT HYDRAULICS, 2006]. De warmteflux naar de atmosfeer wordt beschreven met:

$$Q_t = -Z \times \theta = -Z(T_w - T_e)$$

Met T_w de watertemperatuur aan het vrije wateroppervlak en T_e de natuurlijke achtergrondtemperatuur, beiden in °C. De warmteuitwisselingscoëfficiënt Z is een functie van de oppervlaktetemperatuur en de windsnelheid U_{10} . In Delft3D-FLOW wordt hiervoor de volgende relatie gebruikt:

$$Z = 4.48 + 0.049T_w + f(U_{10})(1.12 + 0.018T_w + 0.00158T_w^2)$$

Voor de windfunctie $f(U_{10})$ wordt de volgende formule toegepast:

$$f(U_{10}) = (3.5 + 2.0U_{10}) \left(\frac{5.0 \cdot 10^6}{S_{area}} \right)^{0.05}$$

Met U_{10} de windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak en S_{area} het wateroppervlak in m^2 .

7.3.6 Samenvatting hydrodynamica en thermodynamica van het model

Het Maasvlakte 2 model lost de ondiepwatervergelijkingen in drie dimensies onder de aanname van hydrostatische druk. Het stelsel van vergelijkingen bestaat nu uit zeven differentiaalvergelijkingen:

- drie ondiepwatervergelijkingen:
 - twee horizontale impulsbalansen (voor de snelheid in x- en y-richting)
 - continuïteitsvergelijking (voor de snelheid in z-richting)
- twee transportvergelijkingen:
 - voor het transport van de saliniteit S
 - voor het transport van de temperatuur T
- twee transportvergelijkingen om het effect van turbulentie te modelleren:
 - voor k (maat voor de hoeveelheid turbulente kinetische energie)
 - voor ε (maat voor de hoeveelheid gedissipeerde kinetische energie)

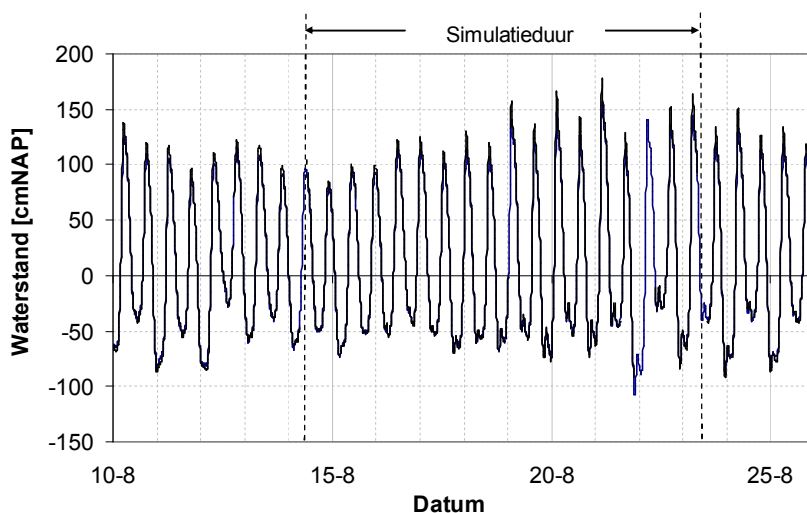
Met de waarden voor S en T wordt de dichtheid bepaald en met de waarden voor k en ε de turbulentie viscositeit. De beide constitutieve vergelijkingen worden gebruikt bij de horizontale impulsbalansen. In de eerste vijf genoemde vergelijkingen zijn bron- en puttermen toegevoegd om de lozing en onttrekking van koelwater te modelleren. Samen met de begin- en randvoorwaarden kan dit stelsel van differentiaalvergelijkingen numeriek worden opgelost.

7.4 Begin- en randvoorwaarden

Zoals al meerdere malen is beargumenteerd, is een zomerscenario (augustus) maatgevend voor de maximaal optredende temperatuur(verhoging) in de havenbekkens. Daarom is ervoor gekozen negen dagen in de maand augustus 2001 (gemiddelde zomer wat betreft temperaturen, zoetwaterafvoer etc.) te simuleren. Uit eerdere analyse bleek ook dat het verschil tussen doortij en springtij waarschijnlijk een aanzienlijke invloed heeft op de temperatuurverhoging ten gevolge van thermische lozingen. Daarom wordt een periode van een doortij naar een springtij gemodelleerd.

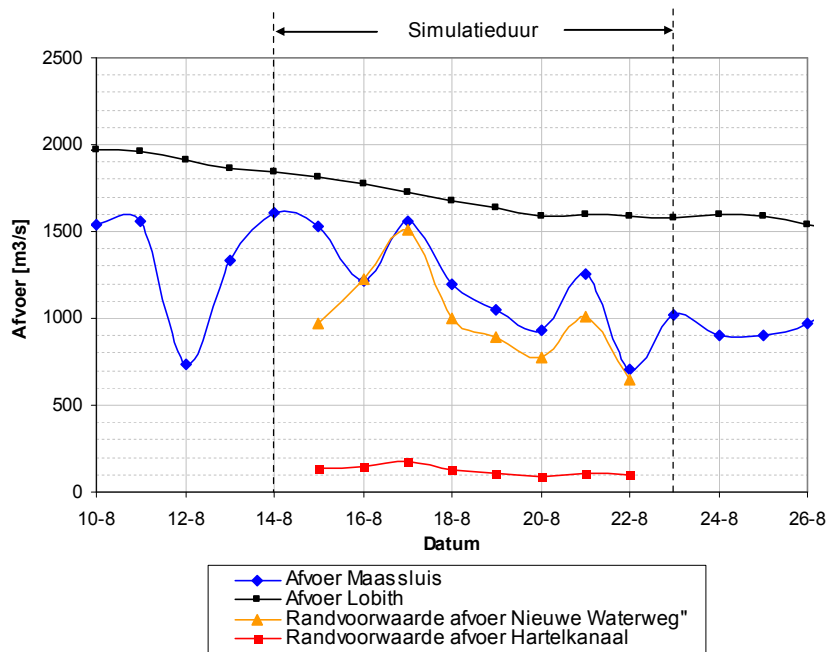
Aangezien het ongewenst is dat kleine fouten in de randvoorwaarden de modelresultaten significant beïnvloeden, moeten de modelranden zo ver mogelijk van het interessegebied af geplaatst worden. De volgende randvoorwaarden zijn het Maasvlakte 2 model opgelegd, genest uit het grotere model:

- Waterstanden (Figuur 7-3) aan de westkant (Noordzeekant) op een deel van de rand lopend van een doortij naar een springtij, en stroomsnelheden per laag gedefinieerd op het andere deel.



Figuur 7-3 Randvoorwaarde waterstand Noordzee, voorspelde en gemeten waterstanden (augustus 2001).

- Stroomsnelheden op de randen aan de oostkant (rivierkant) in Nieuwe Waterweg en Oude Maas, geschaald t.o.v. de afvoer bij Lobith en per laag gedefinieerd. De verhoudingen van de zoetwaterafvoeren staan weergegeven in Figuur 7-4.



Figuur 7-4 Randvoorwaarden zoetwaterafvoer Nieuwe Waterweg en Hartelkanaal zoals gebruikt bij het Maasvlakte 2-model (augustus 2001). Metingen zijn elke dag om 12.00 uur uitgevoerd.

- De temperatuur is op alle randen uniform en dieptegemiddeld aangebracht, aangezien gebruik wordt gemaakt van een afkoelingsmodel.
- De saliniteit is bij alle randen variërend in horizontale en verticale richting opgelegd.

Het model wordt allereerst gedraaid met uniforme beginvoorwaarden. Met gebruik van restart-files kan de simulatieperiode worden verlengd om een simulatieduur groter dan de inspeeltijd van de temperatuur of saliniteit te creëren. Wanneer bijvoorbeeld na de negen simulatiedagen de temperatuur of saliniteit nog niet ingespeeld lijkt, kan met behulp van een restart de simulatieduur telkens met negen dagen verlengd worden. Zo kan de verdeling van temperatuur en saliniteit zijn evenwicht bereiken. Tevens kan een restart-file gebruikt worden om rekentijd te besparen, door slechts een gedeelte van de simulatieduur te restarten of door gebruik te maken van een grotere tijdstap tijdens de restart run. Het blijkt dat na twee keer 9 dagen modelleren de saliniteit en temperatuur ingespeeld zijn.

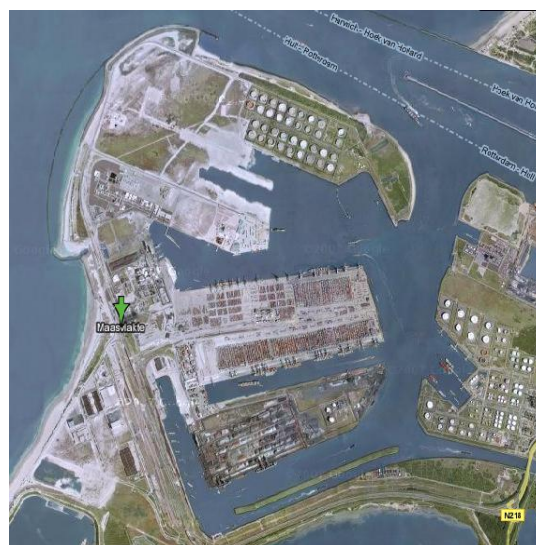
7.5 Validatie model

Wanneer een model gebruikt wordt, is validatie ervan noodzakelijk om te zien of het model de werkelijke situatie goed benadert. Normaal gesproken wordt een model allereerst gekalibreerd op de gevoeligste parameters tot aan de minst gevoelige parameters. Vervolgens wordt het model gevalideerd. Aangezien het Maasvlakte 2 model reeds een lange geschiedenis heeft waarin het gekalibreerd is op waterstanden en saliniteit, en de gevoeligheidsanalyse van de parameters nauw samengaat met het voorspellen van het toekomstig scenario, is ervoor gekozen het model nu te valideren met behulp van beschikbare metingen.

De modelvergelijking tussen Delft3D-FLOW en THREETOX zoals beschreven in bijlage A.2 kan ook als een soort validatie gezien worden, echter met de opmerking dat beide modellen een aantal dezelfde beperkingen kennen. Deze modelvergelijking wordt hier niet verder besproken.

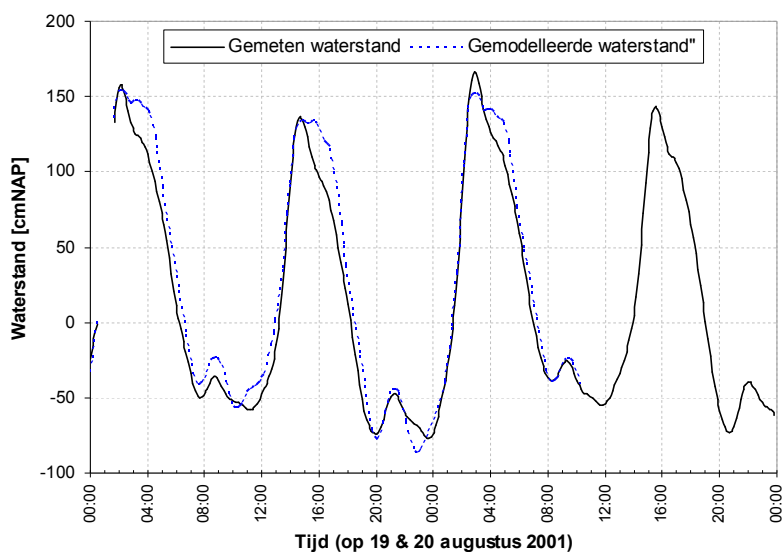
Bij het gebruikte model van Delft3D-FLOW kan de validatie uitgevoerd worden door de 1e Maasvlakte in huidige situatie te modelleren en te vergelijken met gemeten grootheden, zoals waterstanden, stroomsnelheden en saliniteit. Hiervoor is het rooster aangepast aan de lay-out van de 1^e Maasvlakte in 2004, zoals weergegeven in Figuur 7-5.

Figuur 7-5 Lay-out van Maasvlakte 1 met de huidige geometrie (2004), zoals gebruikt bij de validatie van het far-field model.



7.5.1 Validatie van waterstanden

Allereerst zijn de waterstanden die het model weergeeft vergeleken met gemeten waterstanden op 19 en 20 augustus 2001. De meetlocatie bevindt zich in de monding van het Beerkanaal, wat tevens de noordelijke rand van het interessegebied is. In Figuur 7-6 zijn in één plot zowel de gemeten waterstand als de gemodelleerde waterstand weergegeven.



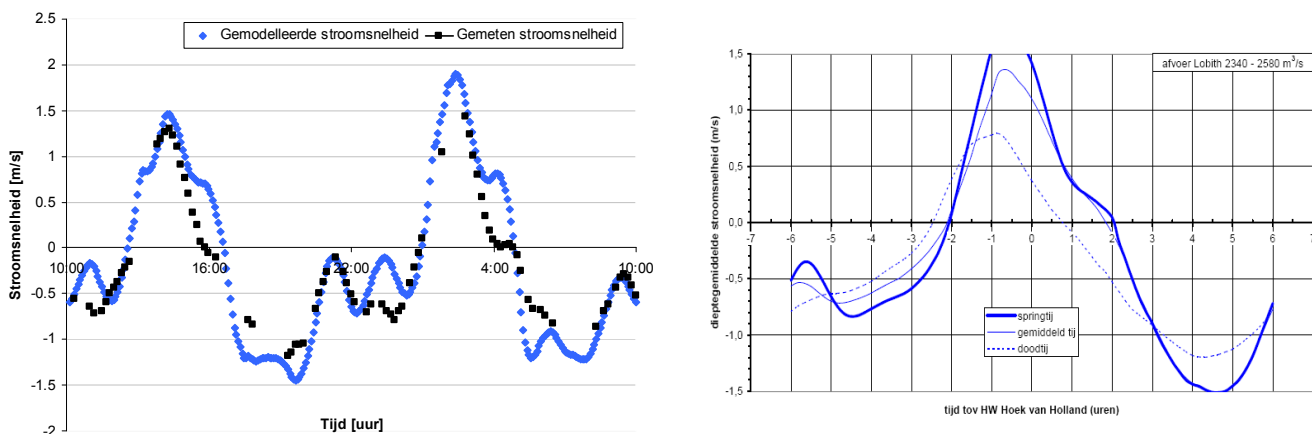
Figuur 7-6 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde waterstand op 19 en 20 augustus 2001 ter plaatse van de monding van het Beerkanaal.

Uit de vergelijking blijkt dat het model de waterstanden in het interessegebied na enkele gesimuleerde dagen redelijk accuraat weergeeft. Het enige verschil zijn de pieken bij hoogwater. In het model zakt het waterniveau minder snel, mogelijk door een nog niet afgelopen inspeeltijd. Aangezien de watertemperatuur in het havenbekken niet gevoelig is voor snelle schommelingen, zal dit verschil een te verwaarlozen effect hebben op de benadering van de temperatuur in de havenbekkens.

7.5.2 Validatie van stroomsnelheden

De gemodelleerde stroomsnelheden in de afgesloten havenbekkens van de 1^e Maasvlakte zijn klein en variëren van circa -0,1 tot 0,1 m/s, en liggen het grootste deel van de tijd in de orde grootte van enkele centimeters per seconde. In de monding van het Beerkanaal zijn de optredende stroomsnelheden groter, tot maximaal 0,5 m/s. Deze waarden komen globaal dus overeen met de geschatte waarden voor de stroomsnelheden in het Maasvlaktegebied in paragraaf 4.2.3.

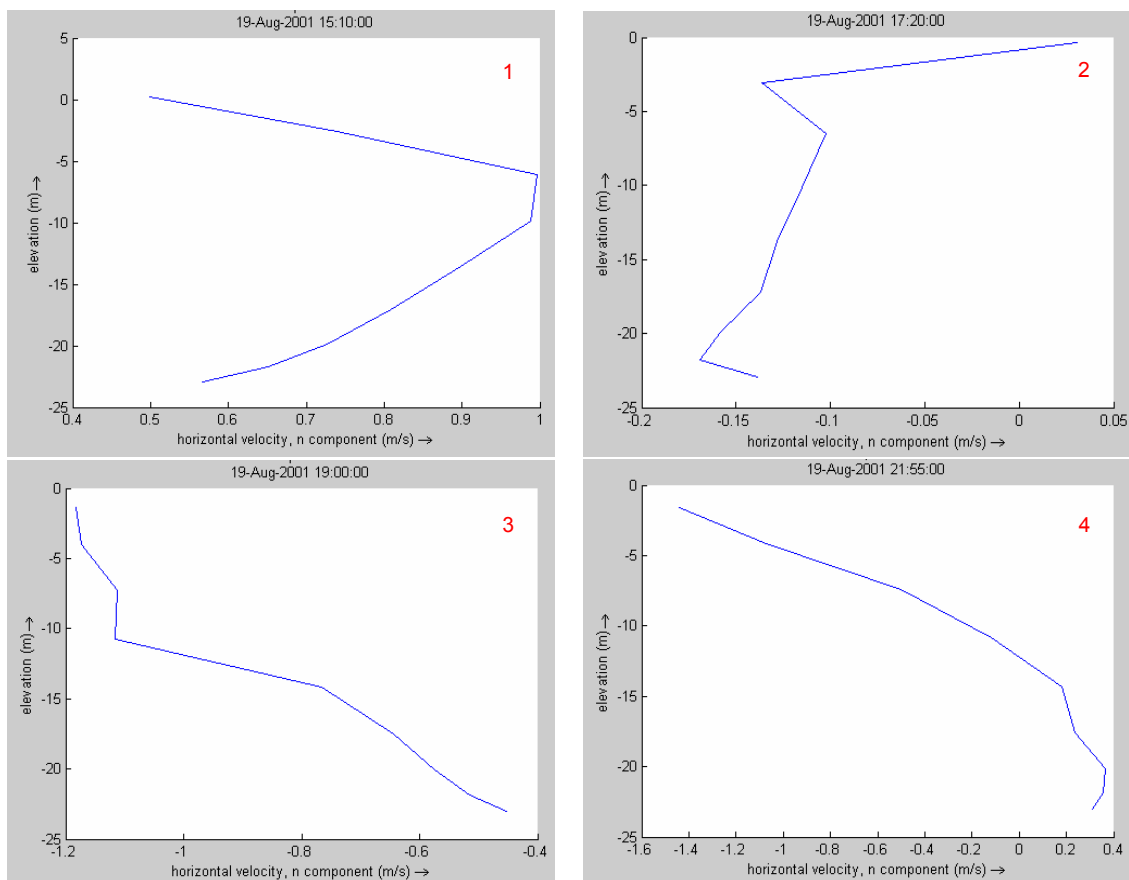
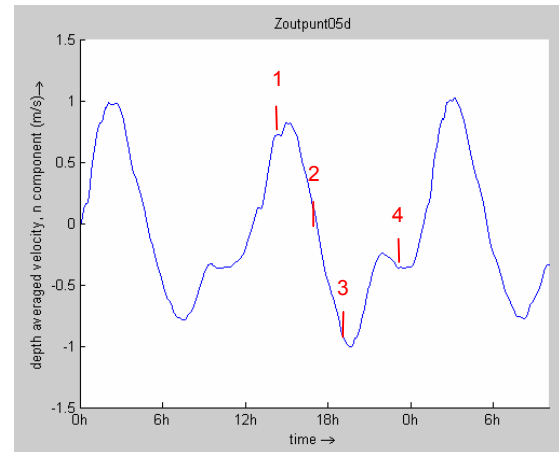
De gemodelleerde stroomsnelheden zijn ook vergeleken met gemeten stroomsnelheden ter plaatse van de Suurhoffbrug (zie bijlage G voor de locatie). De resultaten staan weergegeven in de volgende figuur. De gemeten en gemodelleerde stroomsnelheden lijken redelijk overeen te komen. De gemodelleerde stroomsnelheden blijken echter tijdens twee momenten in de getijcyclus hoger dan de gemeten stroomsnelheden, namelijk 2 uur vóór hoogwater en een uur erna. Dit zijn min of meer dezelfde momenten als waar de gemodelleerde en gemeten waterstanden deels van elkaar verschillen. Mogelijk is het model nog niet volledig ingespeeld, maar een andere reden is dat de gemeten stroomsnelheden niet dieptegemiddeld zijn, maar gemeten op -4,5 mNAP.



Figuur 7-7 Links: vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten stroomsnelheden, Suurhoffbrug (19-08-2001). Rechts: dieptegemiddelde stroomsnelheden bij een hogere zoetwaterafvoer, zoals gemodelleerd door Rijkswaterstaat [HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V., 2004].

Het model is helaas niet gevalideerd met metingen uit de Nieuwe Waterweg. Zoals al eerder vermeld, is het niet gelukt datareeksen van de stroomsnelheden in de Nieuwe Waterweg te verkrijgen. Om toch te beoordelen of het model realistische stroomsnelheden in deze vaarweg weergeeft, worden hier een aantal gemodelleerde diepteprofielen van de snelheid (Figuur 7-9) beoordeeld op vier verschillende momenten in de getijperiode (momenten aangegeven in Figuur 7-8).

Figuur 7-8 Stroomsnelheden in de monding van de Nieuwe Waterweg (positief landinwaarts).



Figuur 7-9 Snelheidsprofielen in de monding van de Nieuwe Waterweg gedurende verschillende getijfasen, positief landinwaarts.

Gedurende opkomend tij (linksboven) zijn de snelheden in het midden van de diepte het grootst. De gevonden snelheden komen overeen met de snelheden beargumenteerd in paragraaf 4.3. Bovenin zijn de snelheden kleiner ten gevolge van de zoetwaterafvoer, onderin door bodemwrijving. Tijdens HW-kentering (rechtsboven) is te zien dat als eerste de snelheid in de diepere lagen omdraait van richting. Tijdens eb (linksonder) veroorzaakt de zoetwaterafvoer hoge snelheden bovenin de waterkolom. Ook deze snelheden komen overeen met de geschatte waarden in paragraaf 4.3. Tot slot begint tijdens laagwater het zoute water onderin de waterkolom via de bodem langzaam de Nieuwe Waterweg in te stromen (rechtsonder). Kort daarna herhaalt de cyclus zich.

Tot slot moet worden opgemerkt dat zwak dynamische systemen, voorkomend in de afgesloten havenbekkens en dus ook te verwachten in de verlengde Yangtzehaven, lastig te modelleren zijn.

7.5.3 Validatie van saliniteit

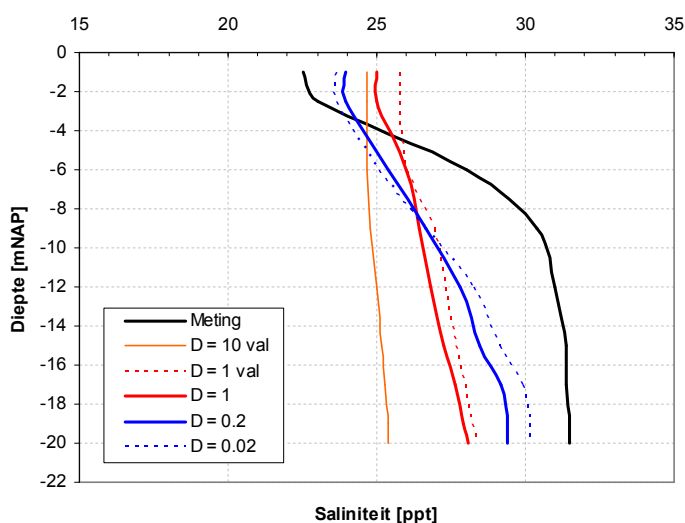
Er zijn maar weinig metingen naar de saliniteit in de 1^e Maasvlakte uitgevoerd. Er is voor gekozen het gebruikte model te vergelijken met de zoutmetingen van de Europahaven in de zomer van 2004, zie ook paragraaf 4.4. Aangezien de randvoorwaarden gebaseerd zijn op de situatie in augustus 2001, moet er bij de vergelijking rekening gehouden worden met verschillen in drie factoren die van grote invloed zijn op de stratificatie in de Europahaven, te weten:

- Fase in getij:
 - variatie tussen laag- en hoogwater heeft met name invloed op de saliniteit in de bovenste lagen en maakt voor daggemiddelde waarden geen verschil;
 - variatie tussen dood- en springtij heeft invloed op de saliniteit over een groter deel van de diepte en maakt voor daggemiddelde waarden wel verschil;
- Zoetwaterafvoer (schalen van afvoer bij Lobith);
- Windforcering (Invloed van wind (en wind set-up) blijft hier buiten beschouwing gezien het modelleren van een zomersituatie met lage windsnelheden).

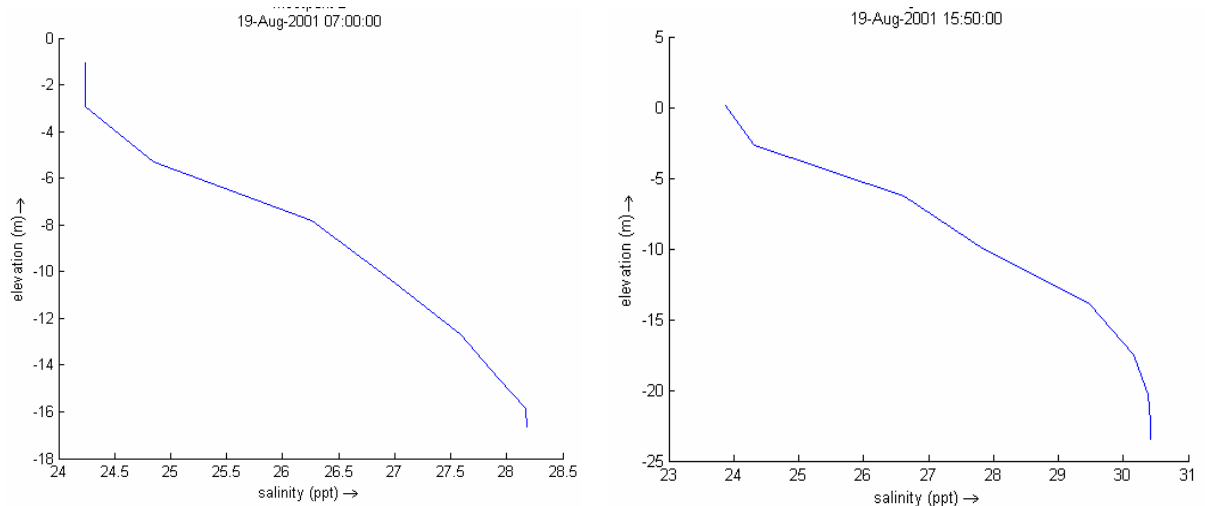
Invloed horizontale dispersiecoëfficiënt op de saliniteitsgradiënten

Met een horizontale dispersiecoëfficiënt van $10 \text{ m}^2/\text{s}$, die tot nu toe is gebruikt bij het Maasvlakte 2 model, blijkt de gemodelleerde saliniteit in de Europahaven over de diepte slechts te variëren van circa 24 ppt in de bovenlaag tot circa 26 ppt in de onderlaag. Tevens komt een intern zoet-zout grensvlak en een duidelijk verticaal saliniteitsverloop vanaf -10 mNAP, zoals in de metingen naar voren kwam, niet in de modelresultaten voor. Aangezien de stratificatie van belang is voor de insluiting van de warmtepluimen moet dit dus aangepast worden in het model.

Een mogelijke oorzaak kan zijn dat de dispersiecoëfficiënten niet optimaal ingesteld zijn. Een te hoge horizontale dispersiecoëfficiënt vult de zoutindringing van het getij teveel uit en heeft daarom in de havenbekkens ook invloed op de verticale saliniteitsgradiënten. Na aanpassing van de coëfficiënten van 10 naar 1 en $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$ (en zelfs $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$) worden de metingen steeds iets beter benaderd, zie Figuur 7-10. In deze studie is verder gemodelleerd met een horizontale dispersiecoëfficiënt van $1 \text{ m}^2/\text{s}$. Bij het modelleren van de oplossingsrichtingen, hoofdstuk **Error! Reference source not found.**, is gebruik van gemaakt van een horizontale diffusiecoëfficiënt van $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$.



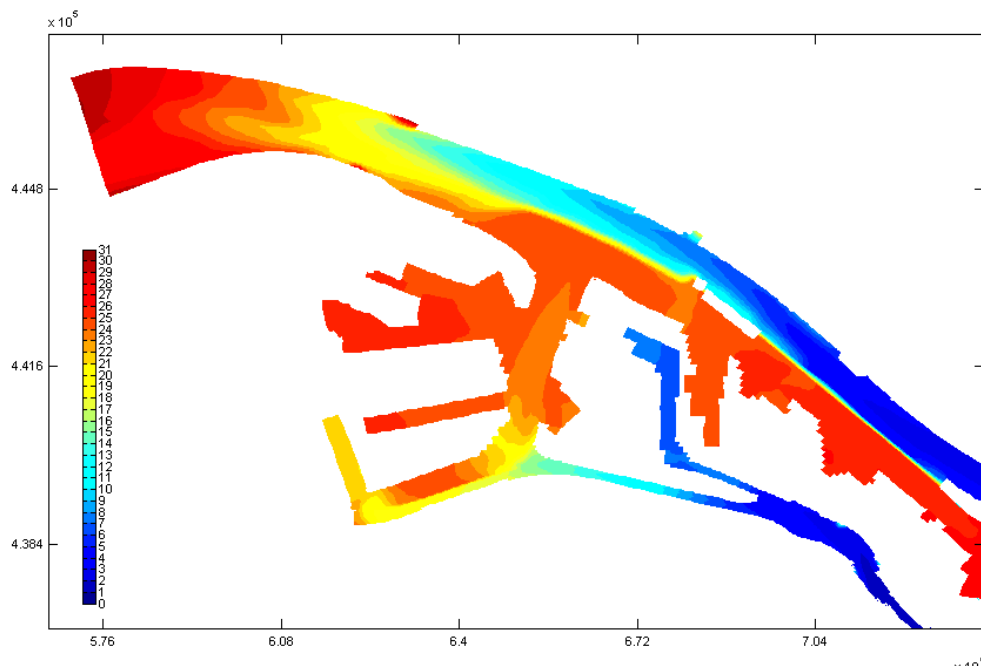
Figuur 7-10 Gemodelleerde saliniteitsprofielen bij gebruik van verschillende horizontale diffusiecoëfficiënten D (bij een afvoer van $1700 \text{ m}^3/\text{s}$), vergeleken met het gemiddelde van de metingen in 2004 (afvoer van $1500 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figuur 7-11 Representatieve saliniteitsprofielen gemodelleerd in Delft3D-FLOW ter plaatse van de Europahaven (links) en de monding van het Beerkanaal (rechts), met een horizontale dispersiecoëfficiënt van $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

De saliniteit van een observatiepunt in de monding van het Beerkanaal (zie Figuur 7-11 rechts) verschilt sterker in de verticaal, van 1 tot 8 ppt tussen boven en onderlaag. De indringing van de zouttong in het Beerkanaal is dus duidelijk waarneembaar door de hogere saliniteit van de onderste lagen (circa 30 tot 31 ppt). Echter tussen -10 en -16 mNAP geeft het model ook op deze locatie te grote verticale saliniteitsgradiënten weer.

Om een indruk te krijgen van de horizontale verdeling van de saliniteit rond het Maasvlaktegebied is Figuur 7-12 toegevoegd. Hierin is goed de interactie van de zoetwaterafvoer met het zoute Noordzeewater te zien.



Figuur 7-12 Indruk van de horizontale verspreiding van de saliniteit bovenin de waterkolom 3 uur voor hoog water (in de huidige geometrie van het Maasvlaktegebied).

Het probleem blijft echter deels bestaan dat de saliniteit - en daarmee de dichtheid - over de diepte te geleidelijk toeneemt en geen sprong vertoont zoals regelmatig in de metingen voorkwam. Dit heeft als resultaat dat een warmtepluim zich meer over een grotere diepte verticaal kan verspreiden in plaats van grotendeels ingesloten te worden rond de diepte van de interne zoet-zout grenslaag.

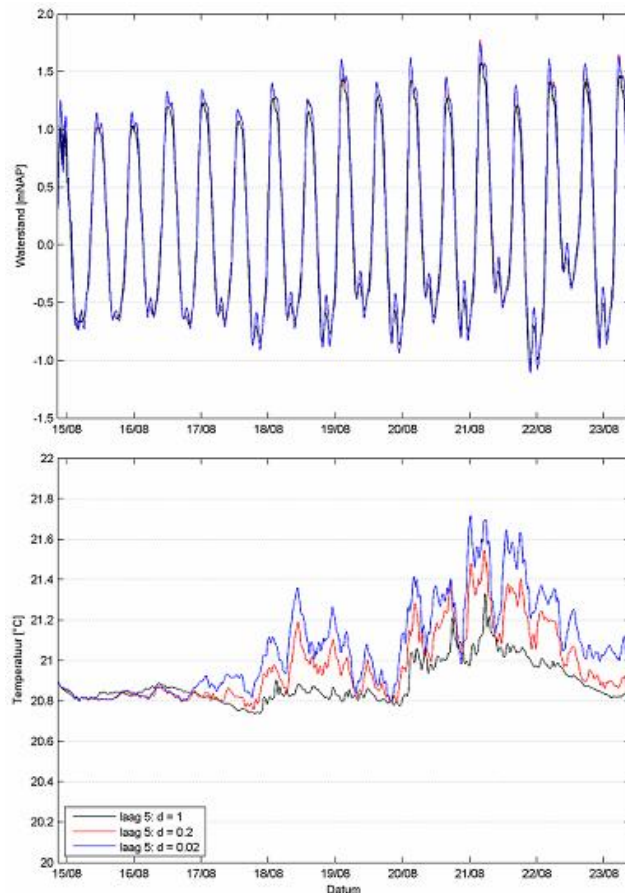
Bij het gebruik van σ -lagen kan horizontale stroming van de ene naar de andere laag 'verticale' menging veroorzaken die fysisch gezien niet optreedt. Daarom is ter verbetering van het model een vergelijking interessant tussen het gebruik van σ -lagen en (horizontale) Z-lagen met meerdere lagen rond het interne zoet-zout grensvlak. In deze studie is dit niet nader bekeken, maar het wordt aanbevolen voor een eventuele vervolgstudie in de toekomst.

7.5.4 Validatie van temperatuurverdeling in de havenbekkens

Aangezien gemodelleerd wordt met een afkoelingsmodel (beschreven in paragraaf 5.3 en 7.3), wordt alleen gekeken naar de temperatuurverhoging in de havenbekkens die door de lozingen veroorzaakt wordt. Voor de begin- en randvoorwaarden is dan een willekeurige uniforme en stationaire temperatuur nodig. De werkelijk optredende temperatuur zal dus niet gemodelleerd worden met het afkoelingsmodel, zodat het niet mogelijk is het model op temperatuur te valideren met behulp van metingen. Daarnaast vinden er in de huidige situatie nog geen significante thermische lozingen plaats in de havenbekkens. De gemodelleerde temperatuur is hierdoor zowel in horizontale als verticale richting nagenoeg constant.

Om het model wel op temperatuur te valideren, moeten dus zowel het warmtetransportmodel als de begin- en randvoorwaarden aangepast worden. In wezen wordt het dan een ander model. Wel is in Figuur 7-13 het effect van de verschillende dispersiecoëfficiënten op de inlaattemperatuur bij de E.ON-inlaat te zien. Deze grafiek is gemaakt met modelresultaten van het Maasvlakte 2 model mét alle toekomstige lozingen in het Maasvlaktegebied meegenomen.

Figuur 7-13 Inlaattemperatuur bij verschillende horizontale dispersiecoëfficiënten vergeleken met het getij. Bij een lage diffusiecoëfficiënt is de indringing van het getij groter en wordt er meer warmte de Europahaven in getransporteerd.



Tijdens springtij geeft een hogere dispersiecoëfficiënt gemiddeld een 0,2°C hogere inlaattemperatuur bij de E.ON-centrale, waarschijnlijk veroorzaakt door een toename van insluiting van de warmtepluimen rond de interne grenslaag op circa -5 mNAP.

7.5.5 Conclusie werking model

De uitkomsten van initiële menging van de warmtelozingen (near-field analyse) zijn als randvoorwaarden in het model meegenomen, waardoor de onjuiste effecten van de hydrostatische aanname geminimaliseerd wordt. Dit wil zeggen dat de thermische lozingen in het rooster op de juiste diepte zijn aangebracht, zoals beschreven in paragraaf 6.3. De verticale versnellingen in het near-field, die het hydrostatische Maasvlakte 2 model niet kan weergeven, worden zo omzeild.

Het Maasvlakte 2 model geeft de waterstanden en stroomsnelheden voldoende nauwkeurig weer. Het verticale saliniteitsverloop wordt echter minder goed weergegeven. Met een aanpassing van de horizontale dispersiecoëfficiënt is dit enigszins verbeterd, maar bij de interpretatie van de modelresultaten zal rekening gehouden moeten worden dat de warmte in werkelijkheid in een kleinere laagdikte wordt ingesloten. Dit kan enige gevolgen hebben voor de modelresultaten met betrekking tot de recirculatie. Deze temperatuurverhogingen zijn namelijk diepteafhankelijk.

De beperking van het model heeft waarschijnlijk nauwelijks effect op de diepte- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhogingen, dus is het Maasvlakte 2 model geschikt om de verandering van de watertemperatuur ten gevolge van koelwaterlozingen te toetsen aan de CIW-richtlijn.

8 MODELRESULTATEN

Nu het far-field model gevalideerd is en de tekortkomingen van het model bekend zijn, kan de analyse van de verspreiding van warmte in de havenbekkens plaatsvinden en kunnen de modelresultaten met betrekking tot de temperatuurverhogingen gepresenteerd en bediscussieerd worden.

Leeswijzer

De keuzes van welke modelresultaten geanalyseerd moeten worden en hoe deze resultaten weer te geven worden behandeld in paragraaf 8.1. Vervolgens zullen de resultaten weergegeven worden door middel van een gevoeligheidsanalyse van enkele processen (paragraaf 8.2). Aansluitend zal dit kort worden samengevat in paragraaf 8.3 met behulp van drie gedefinieerde scenario's. Een discussie van de modelresultaten en de daarop volgende conclusies worden beschreven in paragraaf 8.4 respectievelijk 8.5.

8.1 Opzet weergave modelresultaten

De modelresultaten kunnen op vele manieren weergegeven worden. Het is dus nodig keuzes te maken hoe de resultaten weer te geven. Dit wordt allereerst gedaan met het oog op de toetsing aan de CIW-richtlijn, en vervolgens met betrekking tot de temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties (recirculatie).

Opzet weergave resultaten met betrekking tot de CIW-richtlijn

In paragraaf 3.3 is beschreven dat het nog onduidelijk is hoe de CIW-richtlijnen precies invulling krijgen van Rijkswaterstaat. Zo is het nog niet zeker of het water wordt gekenmerkt als water voor schelpdierachtigen of karperachtigen, en waar de grenzen van de mengzones komen te liggen.

Bij de presentatie van de modelresultaten is ervoor gekozen de doorsnede- en daggemiddelde temperaturen op een drietal doorsneden voor de mogelijke mengzonegrens van de E.ON-centrale uit te rekenen, en op de meest waarschijnlijke mengzonegrens van de Electrabel-centrale. Wat betreft de EnecoGen-centrale, waarvoor waarschijnlijk het mengzonecriterium van maximaal 25% van de doorsnede geldt, bleek uit de near-field analyse dat hier ruimschoots aan voldaan wordt. Om deze reden hoeft er voor de EnecoGen-centrale geen doorsnede- en daggemiddelde temperaturen op een bepaalde locatie gepresenteerd te worden.

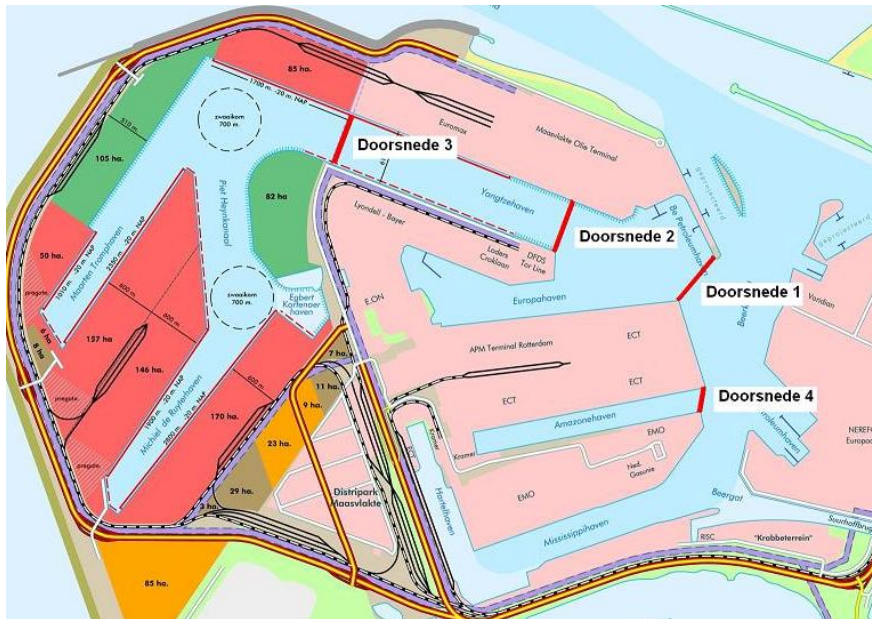
In Figuur 8-1 zijn de meest waarschijnlijk locaties van de randen van de mengzones weergegeven:

- doorsnede 1, 2 en 3 betreffen de E.ON lozing;
- doorsnede 4 betreft de Electrabel lozing.

Opzet weergave resultaten met betrekking tot de recirculatie

Voor de bepaling van de recirculatie, oftewel de temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties, worden simpelweg de temperatuurverhogingen ter hoogte van de gemiddelde inlaatdiepte berekend. In paragraaf 6.2.1 is bepaald over welke diepte naar alle waarschijnlijkheid wordt ingenomen. De middelste laag van deze diepte wordt als de representatieve inlaattertemperatuur beschouwd.

Er moet opgelet worden dat bij de interpretatie van de resultaten (vooral bij de recirculatie) rekening wordt gehouden met de onvolkomenheid van het numerieke model. Zoals bij de validatie van het model bleek, worden de verticale saliniteitsgradiënten meer lineair weergegeven dan dat in werkelijkheid is gemeten. Dit houdt in dat een dispersieve warmtepluim in werkelijkheid waarschijnlijk over een kleinere verticale laagdikte verspreid wordt en dus meer ter hoogte van het interne zoet-zout grensvlak ingesloten wordt.



Figuur 8-1 Ligging doorsnedes voor mogelijke grenzen mengzones E.ON (doorsnede 1, 2 of 3) en Electrabel (doorsnede 4).

Basis lozingsscenario

De toekomstige thermische situatie in het Maasvlaktegebied wordt voornamelijk met het ‘basislozingsscenario’ gemodelleerd. Dit scenario wordt als het meest waarschijnlijke, toekomstige lozingsscenario beschouwd en houdt de volgende lozingen in (terug te vinden in paragraaf 3.1):

- E.ON unit 1, 2 & 3 (2405 MWth)
- Gate terminal (-200 MWth)
- Lyondell (467 MWth)
- Chemie MV2 (250 MWth)
- Electrabel unit 1 (840 MWth)
- EnecoGen / LionGas (440 MWth)

De totale thermische warmtelast van het basis lozingsscenario is circa 4200 MWth. In paragraaf 8.2.4 wordt gekeken wat de invloed van enkele alternatieve lozingsscenario’s op de temperatuurverdeling in de havenbekkens is.

8.2 Gevoeligheidsanalyse relevante processen

Het doel van een gevoeligheidsanalyse is om inzicht te krijgen in hoeverre variatie van relevante processen invloed heeft op de temperatuurverhoging bij de mogelijke mengzonegrenzen en op de grootte van de recirculatie van warmtepluimen naar de inlaatpunten. Bij dit laatste is vooral de temperatuurverhoging bij het grootste innamedebiet, de E.ON-inlaat, van belang.

8.2.1 Keuze van relevante processen voor de gevoeligheidsanalyse

In de voorgaande hoofdstukken is enkele malen al een soort gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Daar kwam duidelijk in naar voren dat de getijbewegingen dominant zijn in de havenbekkens. Door de bevindingen in eerdere hoofdstukken wordt bij een aantal processen geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Deze processen zijn weergegeven in Tabel 8-1, met een korte argumentatie waarom dit niet gedaan wordt.

Tabel 8-1 Overzicht van warmtetransportprocessen, waarvan een nadere gevoeligheidsanalyse van variatie in deze processen minder relevant is.

| Processen | Argumentatie |
|---|--|
| Stromingen t.g.v. wind (windcirculatie) | Er wordt een maatgevende zomerperiode gemodelleerd. In deze periode zijn de windsnelheden dusdanig laag, dat het effect van een gevoeligheidsanalyse gering zal zijn (paragraaf 4.2.5). |
| Warmteuitwisseling met atmosfeer | De gevoeligheidsanalyse van variatie in afkoeling naar de atmosfeer wordt om een aantal redenen achterwege gelaten: <ul style="list-style-type: none"> • Uit de warmtebalans blijkt dat afkoeling naar de atmosfeer van een minder grote orde is dan de andere beschouwde afkoelingsprocessen, zoals de invloed van het getij (paragraaf 5.5.3). • Uit de near-field analyse blijkt dat de warmtepluimen over het algemeen zwaarder zijn dan de bovenste laag water in de havenbekkens, waardoor het gedeelte van een warmtepluim met de hoogste temperaturen zich over een groot gebied voornamelijk enkele meters onder het wateroppervlak zal bevinden. (Uitzondering hierop is de te verwachten accumulatie van warmte in het uiteinde van de afgesloten Oostelijke Yangtzehaven. De temperatuurverhoging zal op deze plekken significant groter zijn dan in de rest van de havenbekkens). • De te verwachten temperatuurverhoging zal in een groot gedeelte van het havenbekken rond de 1 á 2°C bedragen (zie paragraaf 5.5.3). Wanneer een warmtepluim toch de oppervlakte raakt zal deze temperatuurverhoging nog steeds een geringe afkoeling naar de atmosfeer veroorzaken. Alleen in de Oostelijke Yangtzehaven wordt wel een grotere afkoeling naar de atmosfeer verwacht. • De gemiddelde verblijftijden van het koelwater in de Yangtzehaven is relatief kort, 1 tot 2 dagen (5.2.2). Dit beperkt de warmteuitwisseling met de atmosfeer binnen het balansgebied. |
| Warmteuitwisseling met bodem | Dit warmtetransport is verwaarloosbaar, mede aangezien vrijwel overal in het Maasvlaktegebied vlak onder de waterbodem een waterdoorlatende kleilaag aanwezig is (paragraaf 5.4) |
| Watervolumes waarmee warmte-lozingen mengen | Dit is afhankelijk van het volume van de havenbekkens en de grootte van de komberging. In de lay-out van het toekomstige Maasvlaktegebied zullen hoogstwaarschijnlijk weinig wijzigingen meer plaatsvinden die het watervolume in de havenbekkens of de grootte van de komberging significant zullen beïnvloeden. |

Van een aantal processen met de belangrijkste bijbehorende karakteristieken is het juist wel interessant om de gevoeligheid ervan op de temperatuurverhoging in de havenbekkens te analyseren. De desbetreffende processen en methode van gevoeligheidsanalyse staat vermeld in Tabel 8-2.

Tabel 8-2 Overzicht van warmtetransportprocessen, waarvan een nadere gevoeligheidsanalyse van variatie in deze processen wel relevant is.

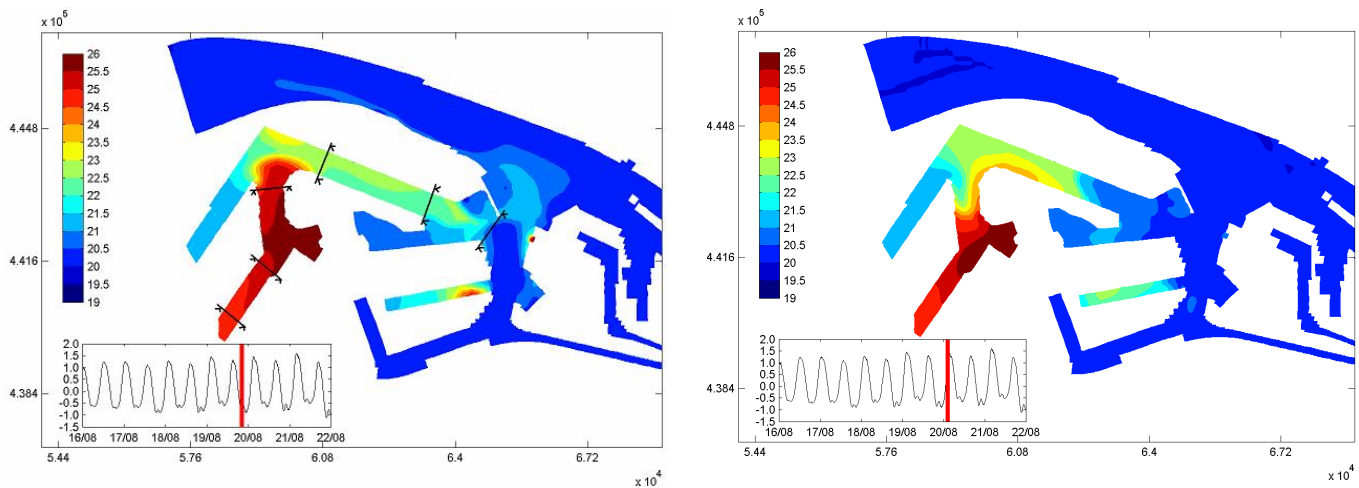
| Processen | Karakteristiek(en) | Argumentatie |
|------------------------|---|--|
| Uitwisseling met getij | Groote getijslag | Aan de hand van verscheidene eenvoudige berekeningen (volumeverhoudingen, verblijftijden, warmtebalans etc.) bleek dat het getij een grote invloed heeft op de afkoeling. Het bestuderen van het effect van variatie in getij is dus interessant, vooral het verschil tussen doodtij en springtij |
| Zoetwaterafvoer | Afvoer Nieuwe Waterweg Afvoer Hartelkanaal | De hoeveelheid afvoer van de Nieuwe Waterweg heeft invloed op de grootte van de zoetwaterbel boven het zoute water in de Maasmond. Met het getij komt dit water het Beerkanaal in, waardoor het de stratificatie in de havenbekkens beïnvloedt. Met behulp van de warmtebalans bleek dat de zoetwaterafvoer van het Hartelkanaal een directe en relevante maat is voor de afkoeling in de havenbekkens. |
| Thermische lozingen | Warmtelast (MWth) | Zonder thermische lozingen geen opwarming van de havenbekkens. Variatie in de grootte van de warmtelast is dus bepalend voor de temperatuurverhoging. Dit zal geen lineair effect hebben. |

8.2.2 Invloed van variatie in getij

De getijbeweging is dus een dominant mechanisme in het Maasvlaktegebied, maar hoe beïnvloedt dit in de praktijk het warmtetransport door de havenbekkens? Om dit in kaart te brengen wordt een zomerperiode van negen dagen in augustus gemodelleerd, van een maatgevend doottij (getijslag van circa 1,5 m) naar een maatgevend springtij (getijslag circa 2,2 m), ook beschreven in hoofdstuk 7.

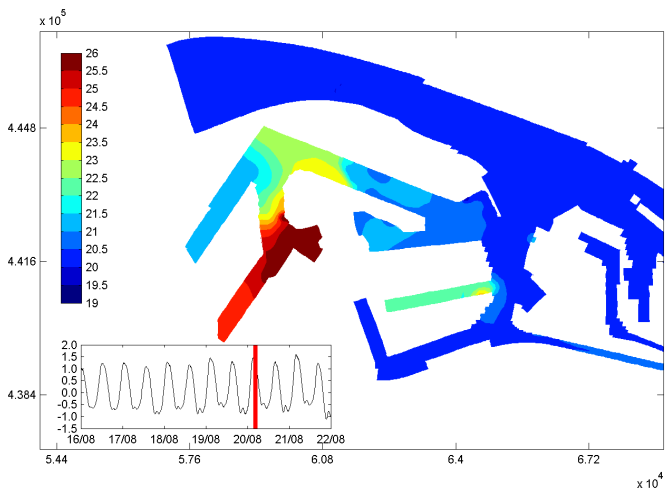
Horizontale warmtespreiding

Allereerst wordt in Figuur 8-2 aan de hand van één getijperiode geïllustreerd hoe de interactie tussen de getijbeweging en de warmteverspreiding in de havenbekkens plaatsvindt. Weergegeven is een laag bovenin de waterkolom en de temperaturen (zie legenda) in graden.

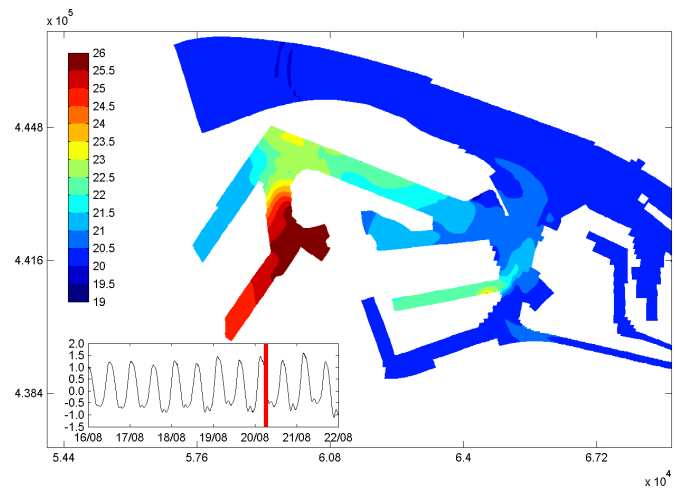


1. Tijdens en net na laagwater is de E.ON-warmtepluim in de Yangtzehaven door advectie ten gevolge van de voorgaande ebstroming getransporteerd tot aan de monding van het Beerkanaal. In de Oostelijke Yangtzehaven vindt accumulatie van warmte plaats. Door de geringe stroming wordt de warmte hier niet snel afgevoerd.

2. Gedurende opkomend tij wordt de warmtepluim in de Yangtzehaven weer 'teruggeduwd' richting het lozingspunt. Ook wordt een deel van de E.ON-warmtepluim de Europahaven in geduwd richting het inlaatpunt van E.ON. De warmtepluim van EnecoGen is door de hoge stroomsnelheden in het Beerkanaal snel verdund.



3. Net na hoogwater is de E.ON-warmtepluim zoveel mogelijk richting het einde van de havenbekkens teruggeduwd. De warmtepluim van Electrabel begint zich richting Beerkanaal te verplaatsen.

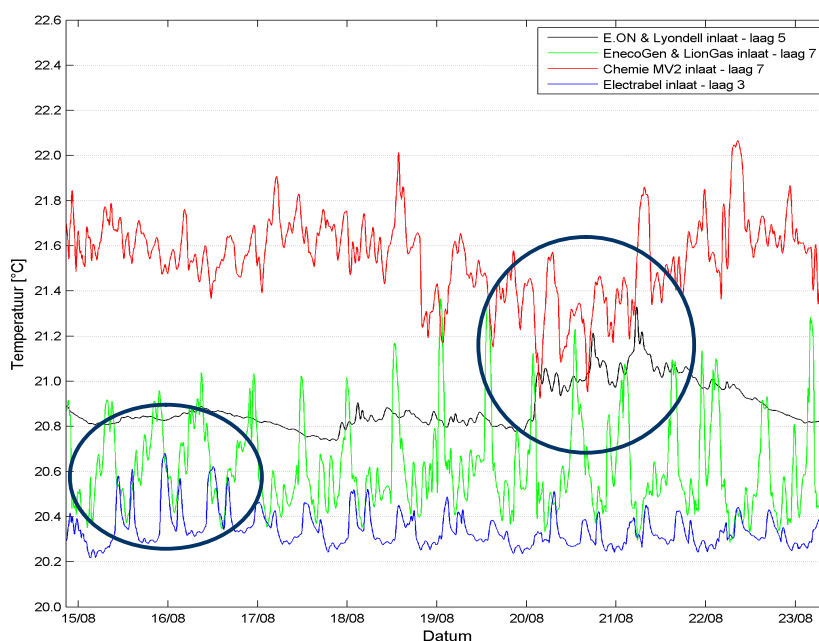


4. Gedurende eb worden de warmtepluimen van zowel E.ON als Electrabel weer door advectie meegevoerd richting het Beerkanaal. Mede door de zoetwaterafvoer wordt de warmtepluim van Electrabel richting EnecoGen verplaatst. Deze neemt echter diep in, waardoor de opwarming bij zijn inlaat beperkt blijft. Door de ebstroming uit de Europahaven is de invloed van de warmtepluim van Electrabel op de temperatuur bij de mogelijke E.ON mengzongrenzen (bij de monding van de Yangtze- en Europahaven) beperkt.

Figuur 8-2 Toelichting interactie tussen getijbeweging en advectie van de warmte (laag 2 en in graden).

Tot nu toe werd in dit onderzoek aangenomen dat tijdens een doortij de minste menging plaatsvindt en dus de hoogste temperaturen optreden. Nu de werking van het getij op de warmteverspreiding bekend is, kan geconcludeerd worden dat dit in het algemeen niet geldt, maar sterk afhankelijk van de geometrie van de havenbekkens. Een springtij veroorzaakt namelijk hogere temperaturen in de Europahaven dan een doortij, door de toename van advectie van warmtepluimen de Europahaven in. Andersom kan een springtij voor meer menging en afkoeling zorgen in de Yangtzehaven en het Beerkanaal. Deze tegenstrijdigheid is een belangrijk concept in deze studie.

Het effect dat een grotere getijslag voor afkoeling zorgt in de verlengde Yangtzehaven en dus bij de inlaat van de chemie op Maasvlakte 2, maar voor opwarming in de Europahaven en dus bij de inlaat van de E.ON-centrale is duidelijk terug te zien in Figuur 8-3. Tijdens doortij is ook een kleine temperatuurverhoging bij de inlaatpunten van EnecoGen en Electrabel in het Beerkanaal te zien.

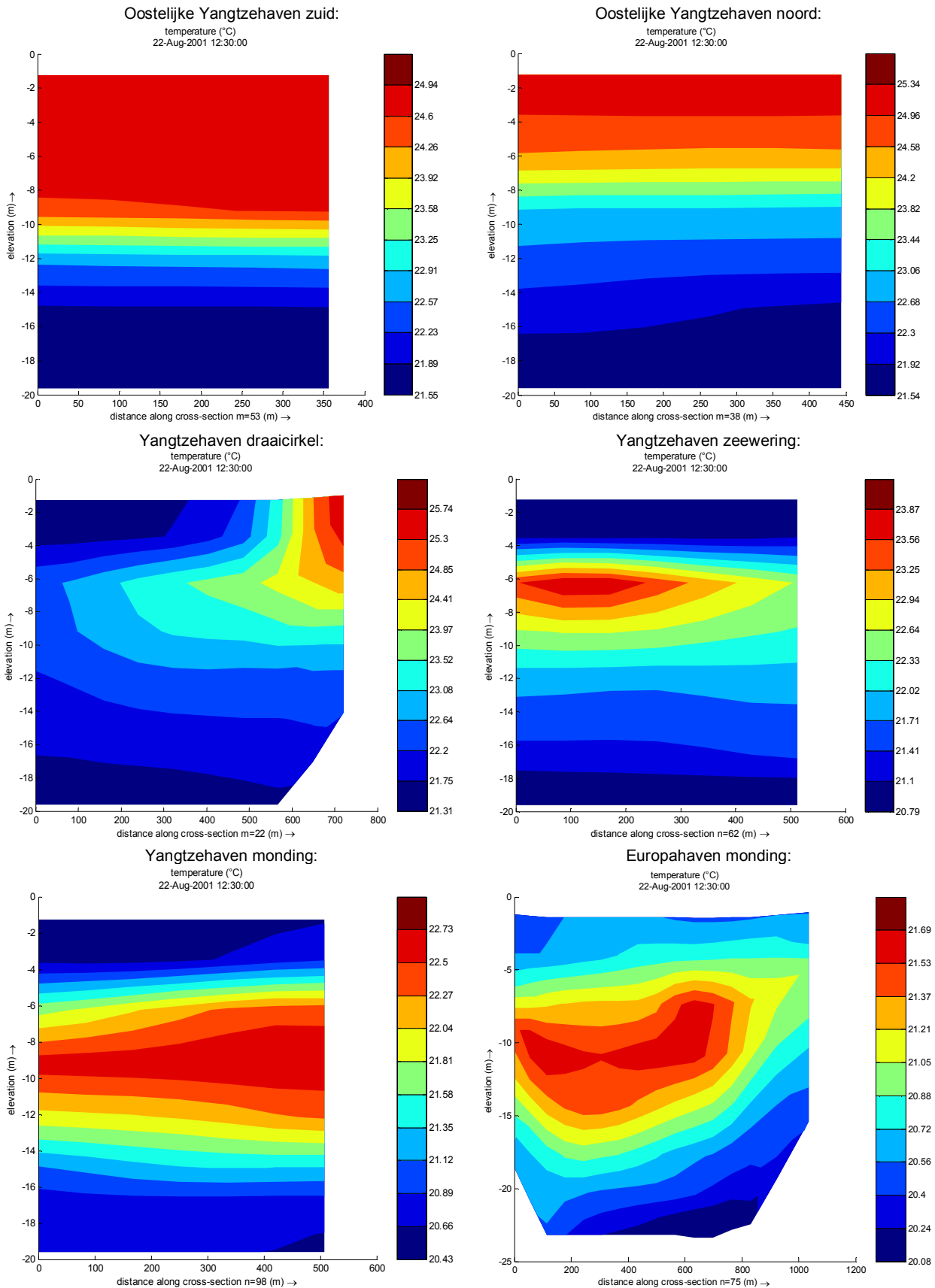


Figuur 8-3 Temperatuurverhogingen bij de inlaatlocaties, gemodelleerd van doortij naar springtij en met een afvoer van 1700 m³/s. Effect van doortij en springtij is duidelijk te zien.

Verticale warmtespreiding

In Figuur 8-4 is de verticale verspreiding van de warmte [°C] te zien. De locaties staan in Figuur 8-2. Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven moet de verticale warmtespreiding met enige voorzichtigheid bekeken worden, aangezien het model in de verticaal een iets te veel lineair verlopend dichtheidsverloop weergeeft.

Het moment waarop de doorsnedes zijn gemaakt is tijdens LW (-0,3 mNAP) na een waterhoogteverandering van bijna 2,4 m tijdens de vloed ervoor. Dit betekent dat het getij vrij ver de havenbekkens ingedrongen kan zijn, met een zoute laag onderin en een zoetwaterlaag bovenin.



Figuur 8-4 Dwarsdoorsneden van de havenbekkens met warmtespreiding in [°C], locaties in Figuur 8-2, oplopend van de Oostelijke Yangtzehaven zuid tot de monding van de Europahaven.

In de Oostelijke Yangtzehaven blijken de hoogste temperaturen voor te komen in de gehele laag boven het interne zoet-zout grensvlak. Bij het uiteinde komt de warmte iets lager dan in de buurt van de lozing, mogelijk door een zwakke recirculatiestroming in de verticaal. In werkelijkheid zal de warmte minder diep in het watersysteem terecht komen.

Richting de draaicirkel is de warmtepluim voornamelijk gecentreerd aan de kant van de E.ON-lozing. Aan de andere kant lijkt enig zoeter en kouder water door het getij de warmte aan het oppervlak verdrongen te hebben. Dit laatste zie je ter hoogte van de oude zeevering over de gehele breedte duidelijk terug. De warmte is nog steeds gecentreerd aan de kant van de lozing, maar is significant afgekoeld door menging met kouder water aangevoerd door het getij.

Bij de monding van de Yangtzehaven is de warmte lateraal verspreid over de gehele breedte. Nogmaals: in werkelijkheid zal de warmte meer gecentreerd zijn rond het interne zoet-zout grensvlak. Hetzelfde geldt bij de monding van de Europahaven.

De hoogste temperaturen over de dwarsdoorsnede lijken alleen in de Oostelijke Yangtzehaven voor te komen (circa 5°C), waar warmteuitwisseling met de atmosfeer het belangrijkste afkoelingsproces zal zijn. In de rest van het Maasvlaktegebied blijkt duidelijk dat een zoetere waterlaag de warmte aan het wateroppervlak verdringt en de warmtepluimen zakken tot het interne zoet-zout grensvlak. Afkoeling van het water vindt hier voornamelijk plaats door een combinatie van menging met kouder water en advectie van de warmte door een combinatie van getij en zoetwaterafvoer tot buiten de havenbekkens.

Conclusies

Aan de hand van bovenstaande analyses kunnen nu de volgende conclusies getrokken worden over de invloed van het getij op de temperatuurverhogingen in de havenbekkens:

- Op de Oostelijke Yangtzehaven na bevinden de hoogste temperaturen zich niet aan het wateroppervlak, maar rond het interne zoet-zout grensvlak.
- De geometrie van de havenbekkens en de lozingslocaties zijn van groot belang voor de interactie tussen getij en temperatuurverspreiding.
- De grootte van de getijslagen, vooral de grootte van het waterstandsverschil gedurende eb (de ebslag) bepaalt het verschil in temperatuurverhoging
- Springtij zorgt op bepaalde plekken voor extra opwarming, op andere plekken voor extra afkoeling. Het is moeilijk dit effect met enige nauwkeurigheid te kwantificeren. Een poging is gedaan in Tabel 8-3.

Tabel 8-3 Poging tot kwantificeren van verschil in doortij en springtij op temperatuurverhoging.

| Locatie | Maatgevende tij | dT tijdens maatgevend tij t.o.v. gemiddeld tij: springtij: getijslag 2,2 m Doodtij: getijslag 1,5 m |
|---------------------|-----------------|---|
| Europahaven west | springtij | 0,2°C |
| Europahaven oost | springtij | 0,1°C |
| Beerkanaal monding | doodtij | 0,1°C |
| Beerkanaal zuid | doodtij | 0,0 á 0,1°C |
| Yangtzehaven midden | doodtij | 0,3°C |

8.2.3 Invloed van variatie in zoetwaterafvoer

Verwacht wordt dat een hogere zoetwaterafvoer over het algemeen leidt tot een vermindering van de temperatuurverhoging in de havenbekkens ten gevolge van thermische lozingen. Dit effect zal minder sterk zijn naarmate de locatie verder van het Beerkanaal – waar de zoetwaterflux vanuit het Hartelkanaal doorheen stroomt – af ligt.

Wat betreft de verticale verdeling van de watertemperatuur, zal een grotere zoetwaterbel in de Maasmond sterkere verticale dichtheidsgradiënten veroorzaken. Het gevolg is verdere insluiting van warmtepluimen rond het interne zoet-zout grensvlak.

Om de invloed van de zoetwaterafvoer op de temperatuurverhogingen in de havenbekkens te onderzoeken, worden de volgende scenario's met elkaar vergeleken:

- 2200 m³/s afvoer bij Lobith: dit is de jaarlijks gemiddelde zoetwaterafvoer.
- 1700 m³/s afvoer bij Lobith: dit is een zomergemiddelde zoetwaterafvoer, zoals in 2001.
- 1000 m³/s afvoer bij Lobith: dit is een extreem lage afvoer in een zomerperiode, zoals in 2003.

De resultaten worden voor de mengzonegrenzen en recirculatie apart gepresenteerd.

Invloed op de mogelijke mengzonegrenzen

De dag- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhogingen op de mengzonegrenzen gedurende de negen gesimuleerde dagen zijn uitgerekend. Zie bijlage E.1 voor een voorbeeld in de vorm van een histogram. In de onderstaande tabel zijn de modelresultaten van de verschillende scenario's samengevat. Tussen haakjes staan de maximaal gevonden temperatuurverhogingen en in het rood staan de temperatuurverhogingen weergegeven die de maximaal toegestane temperatuurverhoging van 2°C overschrijden.

Tabel 8-4 Berekende, afgeronde temperatuurverhogingen met verschillende zoetwaterafvoeren bij gemiddeld tij en basis lozingsscenario.

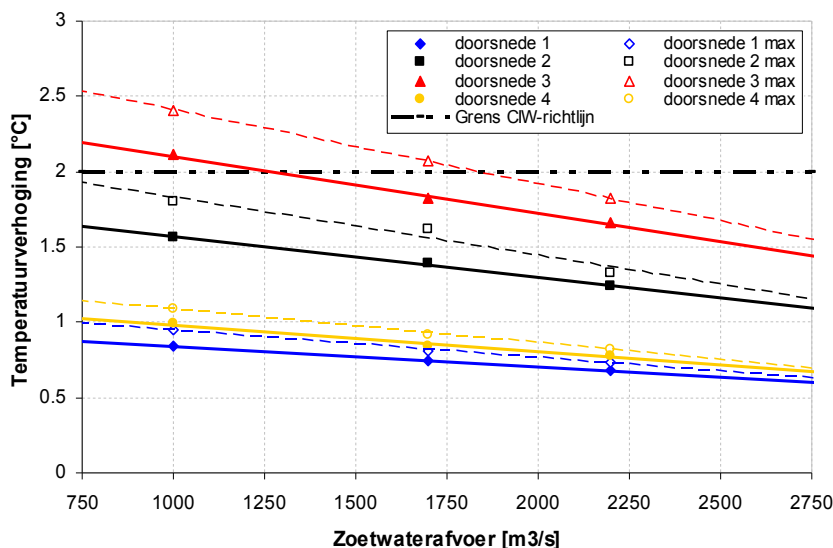
| Zoetwaterafvoer [m ³ /s] | Temperatuurverhoging [°C] | | | |
|--|---------------------------|-------------|------------------|-------------|
| | doorsnede 1 | doorsnede 2 | doorsnede 3 | doorsnede 4 |
| 1000 | 0,8 (1,0) | 1,6 (1,8) | 2,1 (2,4) | 1,0 (1,1) |
| 1700 | 0,7 (0,8) | 1,4 (1,6) | 1,8 (2,1) | 0,8 (0,9) |
| 2200 | 0,7 (0,7) | 1,2 (1,3) | 1,7 (1,8) | 0,8 (0,8) |

De maximaal gevonden temperatuurverhogingen zijn voornamelijk veroorzaakt door het maatgevende getij (springtij of doottij, afhankelijk van de locatie). De waarden komen aardig goed overeen met de resultaten uit de vorige paragraaf.

Om de gevoeligheid van de zoetwaterafvoer duidelijker weer te geven, zijn de resultaten van Tabel 8-4 in grafiekvorm weergegeven in Figuur 8-5. Aangenomen is dat een lineaire trendlijn door de gevonden temperatuurverhogingen getrokken kan worden voor het domein van 750 tot 2750 m³/s zoetwaterafvoer (extrapolatie). Dit zal niet precies de werkelijkheid benaderen, maar gezien de nauwkeurigheid waarmee gewerkt wordt in deze studie, geeft dit een goede indicatie van de invloed van de zoetwaterafvoer op de temperatuurverhogingen bij de mogelijke mengzonegrenzen.

Een toename van de zoetwaterafvoer blijkt in tegenstelling tot wat verwacht werd ook de temperatuurverhoging bij de doorsnedes verder van het Beerkanaal af significant te verlagen. Dit komt door een toename van de netto advectie van warmte uit het Maasvlaktegebied, waardoor bij opkomend tij minder warmte weer de Yangtzehaven 'ingeduwd' wordt.

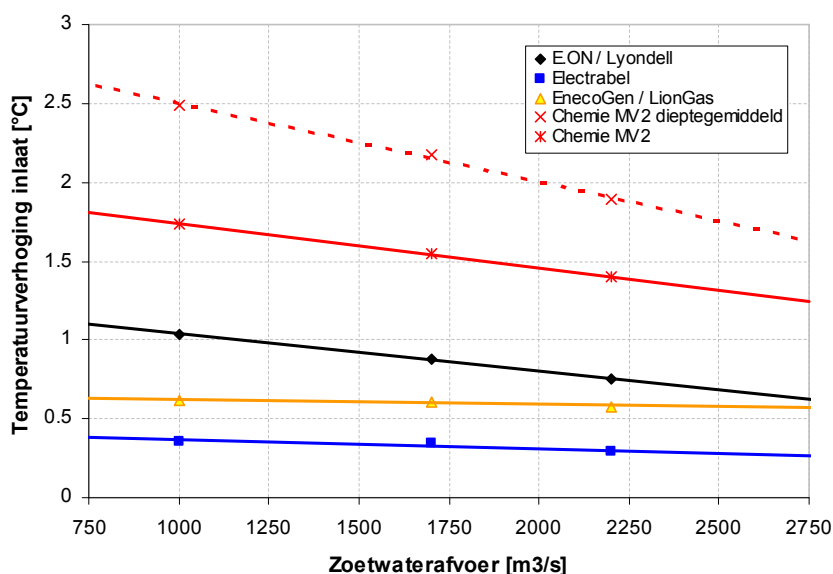
Zoals verwacht zal de temperatuurverhoging bij doorsnede 3 regelmatig de maximaal toegestane temperatuurverhoging overschrijden. Alleen gelet op variatie in de zoetwaterafvoer zal dit net niet bij doorsnede 2 gebeuren, en helemaal niet bij doorsnede 1.



Figuur 8-5 Invloed van zoetwaterafvoer (Lobith) op de etmaal- en doorsnede-gemiddelde temperatuurverhoging bij de mogelijke randen van de mengzones van E.ON en Electrabel.

Ten opzichte van temperatuurverhogingen bij inlaatlocaties

Dezelfde benadering is toegepast op de temperatuurverhoging bij de inname locaties. Vooral de E.ON / Lyondell inname is van belang.



Figuur 8-6 Invloed van zoetwaterafvoer (Lobith) op de temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties (ter hoogte van de innamediepte) van de belangrijkste koelwatergebruikers in de toekomst.

De zoetwaterafvoer heeft een geringere invloed op de temperatuurverandering bij de inlaatlocaties, aangezien het vooral de bovenste 3 lagen ververs, en in mindere mate de diepere inname locaties. Alleen bij E.ON is de relatieve invloed groter, omdat de diepte bij het innamepunt slechts 7 mNAP is, en er over die gehele diepte wordt ingenomen.

Conclusie

Een hogere zoetwaterafvoer zorgt, in combinatie met de getijbeweging, in het gehele Maasvlaktegebied voor een verlaging van de temperatuurverhoging door een toename van het netto warmtetransport uit het model.

8.2.4 Invloed van alternatieve lozingsscenario's

Tot nu toe zijn de modelresultaten weergegeven met het eerder gedefinieerde basis lozingsscenario. Zoals in paragraaf 3.1 terug te vinden is, zijn er mogelijk meer thermische lozingen in de toekomst gepland. E.ON heeft een plan liggen om vanaf 2017 een 4^e unit te plaatsen (1100 MWth) en Electrabel een 2^e unit (840 MWth). Ook kan het zijn dat de nieuwe chemie op de Maasvlakte 2 meer dan 250 MWth aan warmte loost.

Het lijkt nu echter zeer onwaarschijnlijk dat er vier E.ON units en twee Electrabel units tegelijkertijd operationeel zullen zijn. Ook zijn de onzekerheden van deze mogelijke uitbreidingen groot. In deze studie is alleen gekeken naar het effect van elke uitbreiding apart.

Effecten basis lozingsscenario met 4^e E.ON unit (1100 MWth)

De daggemiddelde temperatuurverhoging bij de doorsnedes 1 & 2 neemt toe. De temperatuurverhoging blijft bij doorsnede 1 ruim binnen de CIW-grenzen, maar bij doorsnede 2 liggen de maximaal daggemiddelde temperatuurverhogingen tegen CIW-grens van 2°C aan.

De recirculatie neemt bij de E.ON-inlaat en de chemie op Maasvlakte 2 iets toe (circa 0,3°C). Hetzelfde geldt voor de chemie op MV2 wanneer deze voldoende diep inneemt, anders kunnen de inname temperaturen wel tot 1°C toenemen. Op de inname temperatuur van Electrabel lijkt deze uitbreiding een verwaarloosbare invloed te hebben.

Basis lozingsscenario met extra chemielozing (extra 500 MWth)

Verwacht wordt dat dit lozingsscenario op dezelfde doorsnedes en inlaattemperaturen een evenredige invloed zal hebben als het scenario met een 4^e E.ON unit. Uit de modelresultaten blijkt dat de temperatuurverhoging bij doorsnede 2 net binnen de norm zal vallen.

De recirculatie bij de chemie zelf blijkt ongeveer 0,2°C te stijgen. Op de overige inname locaties heeft de extra warmtelast, zoals verwacht, geen invloed.

Effecten basis lozingsscenario met 2^e Electrabel unit (840 MWth)

Het te verwachten knelpunt lijkt de temperatuurverhoging op de grens van de Electrabel mengzone, doorsnede 4. Hier neemt de temperatuurverhoging toe met ongeveer 0,5°C. Toch blijkt de temperatuurverhoging bij een 2^e unit binnen de CIW-richtlijn te vallen, namelijk slechts een enkele keer hoger dan 1,5°C.

Wat betreft de temperatuurverhogingen bij de inlaatlocaties lijkt een uitbreiding van de Electrabel-centrale een mogelijke invloed te hebben op de EnecoGen-centrale. Hier kan een extra temperatuurverhoging van ongeveer 0,2°C optreden. De extra temperatuurverhogingen bij de overige inlaatlocaties zijn verwaarloosbaar. In bijlage E.2 zijn de effecten op de recirculatie weergegeven.

De effecten van de alternatieve lozingsscenario's die enige rol van betekenis hebben met betrekking tot de CIW-richtlijn en recirculatie, staan samengevat in Tabel 8-5.

Tabel 8-5 Relevante gevolgen van alternatieve lozingsscenario's t.o.v. basis lozingsscenario.

| Lozingsscenario | Veranderingen met gevolgen voor toetsing aan CIW-richtlijn | Veranderingen wat betreft de temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties |
|--|---|---|
| Basis + 4 ^e unit E.ON | Bij doorsnede 2 overschrijding norm maximale temperatuurverhoging (gedurende springtij en/of een lage zoetwaterafvoer). | <ul style="list-style-type: none"> • E.ON: + 0,3°C • Chemie MV2: + 0,3°C • EnecoGen: + 0,2°C |
| Basis + extra chemie MV2 | - | <ul style="list-style-type: none"> • Chemie MV2: +0,2°C |
| Basis + 2 ^e unit Electrabel | - | <ul style="list-style-type: none"> • EnecoGen: + 0,2°C |

Er kan worden geconcludeerd dat bij de keuze van de grens van de E.ON mengzone, doorsnede 2 beduidend minder lozingsruimte in het Maasvlaktegebied geeft dan doorsnede 1.

8.3 Samenvatting resultaten temperatuurverhoging

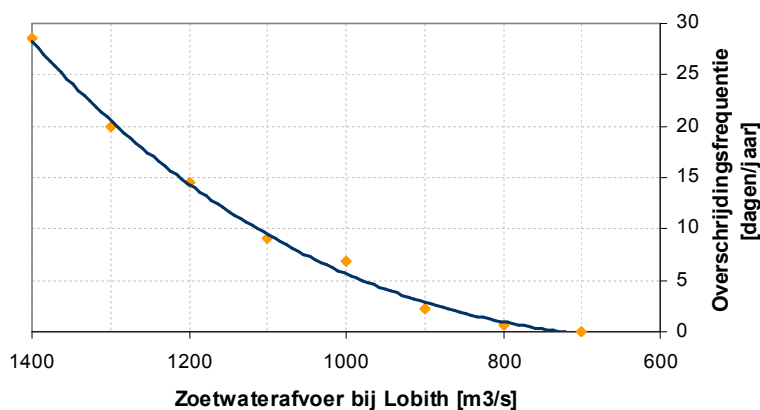
Nu de invloed van de verschillende processen op de temperatuur in de havenbekkens geanalyseerd is, kan hier de te verwachten temperatuurverhoging bij de relevante doorsneden en inlaatlocaties gepresenteerd worden.

8.3.1 Definitie maatgevende frequentiescenario's

Net als bij de resultaten van de warmtebalans in hoofdstuk 5.5 worden hier drie scenario's voor de temperatuurverhoging bij een bepaalde locatie geïntroduceerd, 'frequentiescenario's' genoemd:

- *Een jaargemiddeld scenario:* gemiddeld tij (circa 1,8 m), gemiddelde jaarlijkse zoetwaterafvoer (2200 m³/s), jaargemiddelde windsnelheid en daarmee samenhangend een gemiddelde afkoeling naar de atmosfeer. Deze afkoeling zal door de grotere windsnelheden net wat meer zijn dan tot nu toe gemodelleerd.
- *Een zomergemiddeld scenario:* gemiddeld tij (circa 1,8 m), gemiddelde zoetwaterafvoer in zomerperiode (1700 m³/s), zomergemiddelde windsnelheden en daaraan gerelateerde afkoeling naar de atmosfeer.
- *Een 'worst-case' scenario:* getij dat maatgevend is voor de desbetreffende locatie: doottij (1,5 m) of springtij (2,2 m), lage zoetwaterafvoer (1000 m³/s, maatgevend voor enkele opeenvolgende zomerdagen per jaar), geen wind en weinig afkoeling naar de atmosfeer.

Het worst-case scenario zal weinig voorkomen, hooguit enkele extreme zomerdagen per jaar. Een kans van optreden, bijvoorbeeld 98% percentielen, is lastig te geven in een dergelijke getijsituatie [BAPTIST EN UIJTTEWAAL 2005]. Met behulp van de overschrijdingsfrequentie van de zoetwaterafvoer in Figuur 8-7 en de veilige aanname dat een maatgevend tij 50% van de tijd kan voorkomen, zal het hier gedefinieerde worst-case scenario ongeveer $6 * 0,5 = 3$ dagen per zomer voorkomen.



Figuur 8-7 Overschrijdingsfrequenties zoetwaterafvoer Lobith in zomerperiode, gebaseerd op de afvoeren van 2001 t/m 2006 [www.waterbase.nl].

Voor deze frequentiescenario's zullen nu omrekeningsfactoren voor de temperatuurverhogingen bepaald worden, afhankelijk van de in de gevoeligheidsanalyse beschreven resultaten en de desbetreffende locaties. Voor de jaargemiddelde afkoeling naar de atmosfeer wordt een kleine correctie toegepast.

8.3.2 Samenvatting temperatuurverhoging bij mengzonegrenzen

Nabij de E.ON/Lyondell, chemie MV2 en Electrabel lozingspunten (in de afgesloten havenbekkens) vindt accumulatie van warmte plaats, vooral in de oostelijke Yangtzehaven (circa 5°C opwarming in de bovenlaag van de waterkolom). Er wordt niet voldaan aan het 25% mengzonecriterium. In deze gevallen mag de mengzone waarschijnlijk een deel van het afgesloten havenbekken beslaan en ligt de grens ervan aan de rand van het bekken bij het Beerkanaal.

De voorspelde temperatuurverhogingen bij de verschillende mogelijke mengzonegrenzen per gedefinieerd frequentiescenario zijn samengevat in de volgende tabel. Tot nu toe is alles in een tiende graad nauwkeurig gepresenteerd, zodat de verhoudingen van de temperatuurverhogingen bij de verschillende frequentiescenario's te zien zijn. Waarschijnlijk is dit iets te precies. De onderstaande resultaten moeten dus met een nauwkeurigheidsmarge beoordeeld worden. Een aannemelijke marge is +/- 0,1°C.

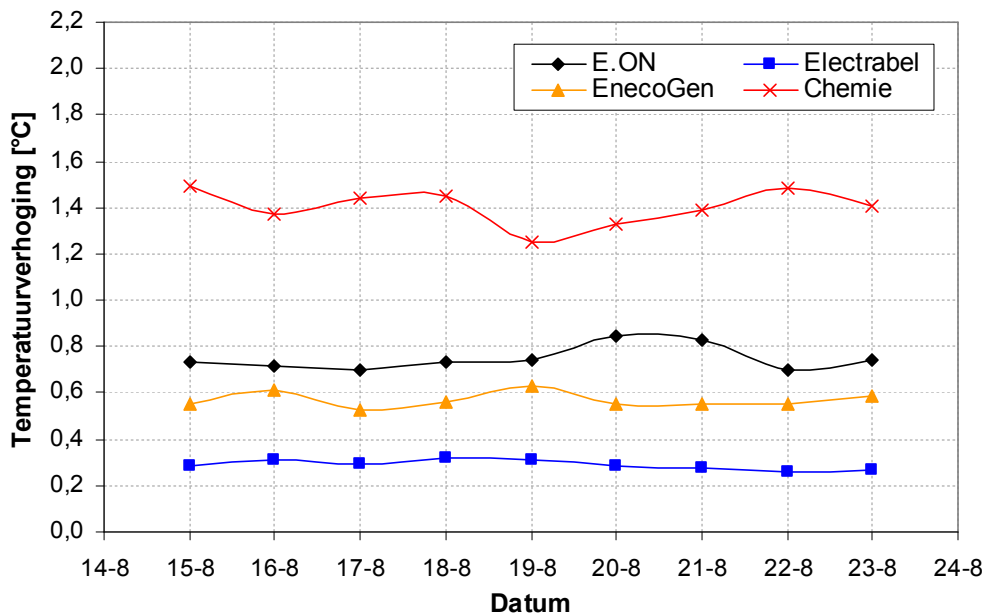
Tabel 8-6 Doornedegemiddelde temperatuurverhogingen bij het basis lozingsscenario (E.ON 1, 2 & 3, Electrabel 1, EnecoGen en chemie 250 MW), voor de drie gedefinieerde scenario's, in °C.

| Scenario | Doorsnede 1 begin Yangtze-/ Europahaven | Doorsnede 2 begin Yangtzehaven | Doorsnede 3 'oude' zeewering Yangtzehaven | Doorsnede 4 Begin Amazonehaven |
|----------------|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| jaargemiddeld | 0,6 | 1,1 | 1,6 | 0,7 |
| zomergemiddeld | 0,7 | 1,4 | 1,9 | 0,8 |
| 'worst case' | ~ 1 | 1,8 | ~ 2,4 | 1,1 |

In paragraaf 6.3.3 is aangetoond dat de EnecoGen-centrale wel voldoet aan het 25% mengzonecriterium. Voor deze lozing hoeft hier dus geen mengzonegrens gedefinieerd te worden.

8.3.3 Samenvatting temperatuurverhoging bij inlaatpunten

In Figuur 8-8 is de daggemiddelde temperatuurverhoging weergegeven bij de inlaatpunten gedurende een simulatie van ongeveer negen dagen. Het getij loopt van een doottij naar een springtij en de zoetwaterafvoer bij Lobith is gemiddeld 2200 m³/s, gelijk aan een jaargemiddelde zoetwaterafvoer.



Figuur 8-8 Daggemiddelde temperatuurverhogingen ter hoogte van de innamediepte van de inlaatlocaties, gemodelleerd van een doottij naar springtij en met een zoetwaterafvoer van 2200 m³/s.

Uit de validatie bleek dat de verticale temperatuursverdeling niet geheel juist weergegeven wordt. Daarom moet net als bij de mengzonegrenzen voor de gepresenteerde temperatuurverhogingen in Tabel 8-7 een nauwkeurigheidsmarge in acht worden gehouden, nu van +/- 0,2°C. De recirculatie bij de chemie is afgerond aangegeven, aangezien de locaties van de inlaatpunten nog onzeker zijn en de temperatuurverhoging in horizontale en in verticale richting sterk varieert. De temperatuurverhoging bij de Electrabel-centrale blijft zelfs in het worst-case scenario kleiner dan 0,5°C.

Tabel 8-7 Temperatuurverhoging ter plekke van inlaatpunten bij basis lozingsscenario, voor de drie verschillende scenario's, in [°C]

| Inlaotpunt | E.ON / Lyondell | Electrabel | EnecoGen / LionGas | Chemie MV2 |
|----------------|-----------------|------------|--------------------|------------|
| Jaargemiddeld | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 1,5 - 2 |
| Zomergemiddeld | 0,9 | 0,3 | 0,6 | ~ 2 |
| 'Worst case' | ~ 1,3 | 0,4 | 0,8 | > 3 |

8.4 Discussie resultaten toekomstig scenario

8.4.1 Nauwkeurigheid resultaten

De gemodelleerde temperatuurverhogingen werden in de gevoeligheidsanalyse met een tiende graad nauwkeurig gepresenteerd. In de voorgaande paragraaf werd al de opmerking gemaakt dat dit vooral voor de grootte van de recirculatie een niet bestaande nauwkeurigheid suggereert. Hier wordt kort op deze modelonnauwkeurigheid en op de onnauwkeurigheid van de gebruikte omgevingscondities ingegaan.

Modelonnauwkeurigheden

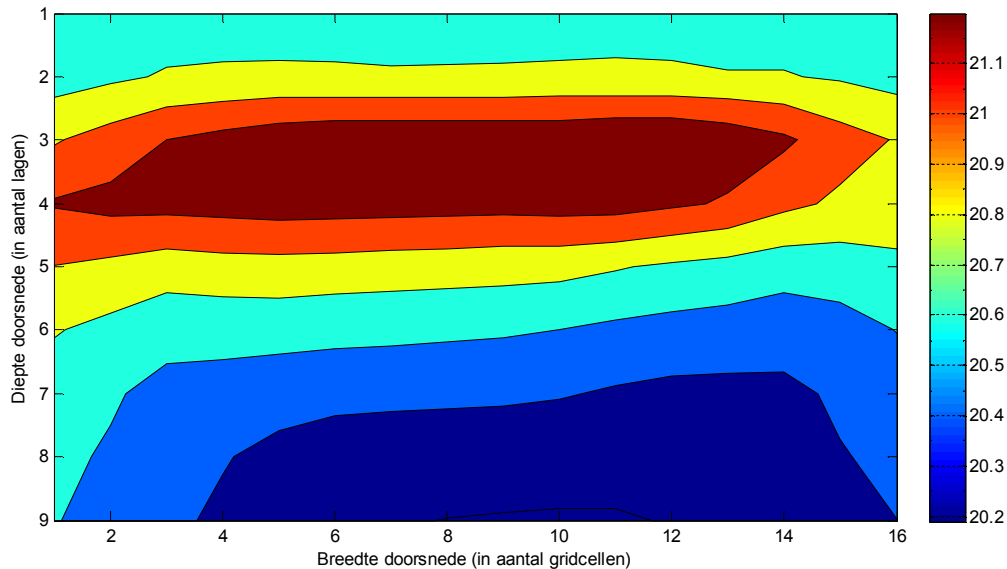
Vanwege de hydrostatische drukverdeling in het numerieke model worden de verticale versnellingen bij de lozingspunten niet goed weergegeven. Het bepalen van de dimensies van een mengzone met dit far-field model wordt dan ook niet realistisch geacht. Dit is echter voor zover mogelijk al in hoofdstuk 6 gedaan.

Bij de validatie in hoofdstuk 7.5 bleek dat het model niet volledig juist de gemeten verticale saliniteitsgradiënten benadert. Aangezien de gradiënten rond het interne zoet-zout grensvlak kleiner zijn in het model dan in de werkelijkheid, leidt dit tot insluiting van een warmtepluim over een grotere diepte. Dit kan enig effect hebben op de gepresenteerde innametemperaturen. Waarschijnlijk worden onder- en overschattingen enigszins voorkomen door de modelresultaten met de eerder genoemde nauwkeurigheidsmarges te beoordelen. Op de dag- en doorsnedegemiddelde temperaturen bij de mengzones zal de aanname van hydrostatische druk minder effect hebben.

Invloed warmteuitwisseling met atmosfeer

De gevoeligheid van de uitwisseling met de atmosfeer is niet geanalyseerd en wel om vier redenen die in Tabel 8-1 zijn beschreven. Eén van die redenen was het feit dat de warmtepluim zakt tot de interne grenslaag en daardoor de hoogste temperaturen van de warmtepluim niet het wateroppervlak raken, maar enkele meters onder het oppervlak ingesloten blijven. Een plot van dwarsdoorsnede 1 bij de monding van de Europahaven bevestigt dit beeld, zoals in Figuur 8-10 te zien is.

Nader onderzoek bleek dat dit verschijnsel overal in de havenbekkens optrad, behalve in de Oostelijke Yangtzehaven tot aan de draaicirkel in Maasvlakte 2. Daar vindt dus relatief veel afkoeling naar de atmosfeer plaats, zeker gezien de hogere temperaturen (circa 5°C opwarming aan het wateroppervlak). Variatie in de afkoeling naar de atmosfeer kan in dit gebied dus enig verschil uitmaken, daarbuiten waarschijnlijk nauwelijks.



Figuur 8-9 Dwarsprofiel van de temperatuur in doorsnede 1, gemiddeld over een doortij-springtij cyclus en bij een zomergemiddelde zoetwaterafvoer. Duidelijk is te zien dat het warmste gedeelte niet tot de oppervlakte komt, maar min of meer ingesloten is ter hoogte van het grensvlak, waar de verticale dichtheidsgradiënten het grootst zijn.

Invloed scheepsbewegingen en -schroeven

De scheepsbewegingen en hun schroefwerking veroorzaken turbulentie in het water en menging van de eventuele lagen met verschillende dichtheden. Om te kijken of dit een relevante invloed heeft op de warmteverspreiding kunnen er verschillende benaderingen gemaakt worden.

- Er kan bijvoorbeeld gekeken worden naar de gemiddelde hoeveelheid waterverplaatsing t.o.v. de hoeveelheid water in het havenbekken en de hoeveelheid wateruitwisseling met het getij.
- Er kan worden bepaald wat een gemiddeld invloedsgebied en tijdsduur is waar turbulentie optreedt t.g.v. een draaiende schroef in gemiddelde situatie. Wanneer dit gebied klein is t.o.v. totale havenbekken en tijd, dan kan de invloed van schroeven verwaarloosd worden.
- Mogelijk kan er een energiebalans opgezet worden met de ingaande energie door schroeven, de kinetische energie van de aanwezige turbulentie en de energie dissipatie op kleine schaal ten gevolge van de viscositeit. Dit laatste is echter minimaal, waardoor deze energiebalans moeilijk uit te werken is.

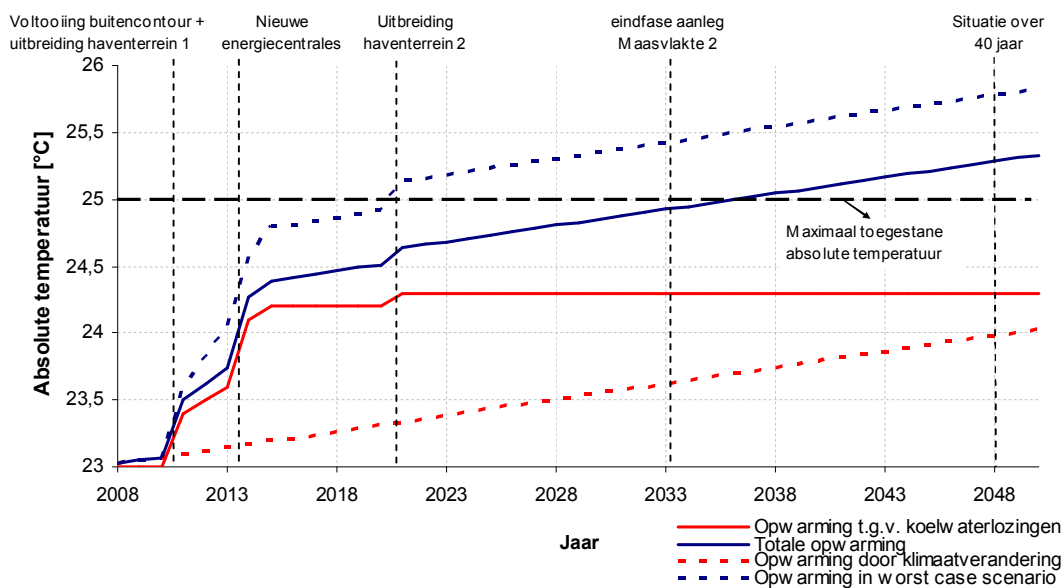
Het vermoeden bestaat dat scheepsbewegingen lokaal gezien zeker de warmteverspreiding beïnvloeden door tijdelijke opmenging van warmte over een bepaalde diepte, maar dat dit gemiddeld over een langere tijdsperiode geen aanzienlijke effecten met zich meebrengt.

Een zeeschip vaart namelijk binnen een uur met sleepboten van de Maasmonding naar een containerterminal op de 2^e Maasvlakte en nog korter naar de havenbekkens in de 1^e Maasvlakte. Vervolgens ligt een schip ongeveer één of meerdere dagen stil aan de kade tot het vertrek. Daarnaast beïnvloedt een scheepsbeweging, zeker die van sleepboten en binnenscheepvaart, niet de gehele dwarsdoorsnede van een havenbekken. In de Yangtzehaven is dit bijvoorbeeld maar een tiende van de totale breedte.

Stel: in een stuk havenbekken met een lengte van een maatgevend schip vaart eens in het half uur een schip (met sleepboten) voorbij. De veroorzaakte turbulentie is na vijf minuten weer verwaarloosbaar klein. Wanneer deze beweging 1/4^e deel van de breedte van het havenbekken beïnvloedt, is gemiddeld in ruimte en tijd in slechts 5% van het water extra turbulentie aanwezig. In deze studie wordt daarom aangenomen dat scheepsbewegingen geen significante invloed op de temperatuurverdeling in de havenbekkens zullen hebben.

8.4.2 Verloop temperatuurverhogingen in de tijd

Klimaatverandering is van belang bij het CIW-criterium van maximaal toegestane achtergrondtemperatuur (zie de bespreking van de CIW-richtlijn in paragraaf 3.3). Hier wordt een voorbeeld gegeven van hoe de temperatuur in de toekomst door de combinatie van de verschillende ontwikkelingen in het Maasvlaktegebied en de klimaatverandering kan toenemen. In Figuur 8-10 is het temperatuurverloop voor de komende 40 jaar weergegeven bij een mogelijke E.ON mengzonegrens, doorsnede 2, zowel voor het jaargemiddelde scenario als voor het worst case scenario. Om verwarring te voorkomen wordt nogmaals opgemerkt dat klimaatverandering een verandering van de achtergrondtemperatuur is en dus niet in verband gebracht kan worden met het CIW-criterium van maximaal toegestane temperatuurverhoging.



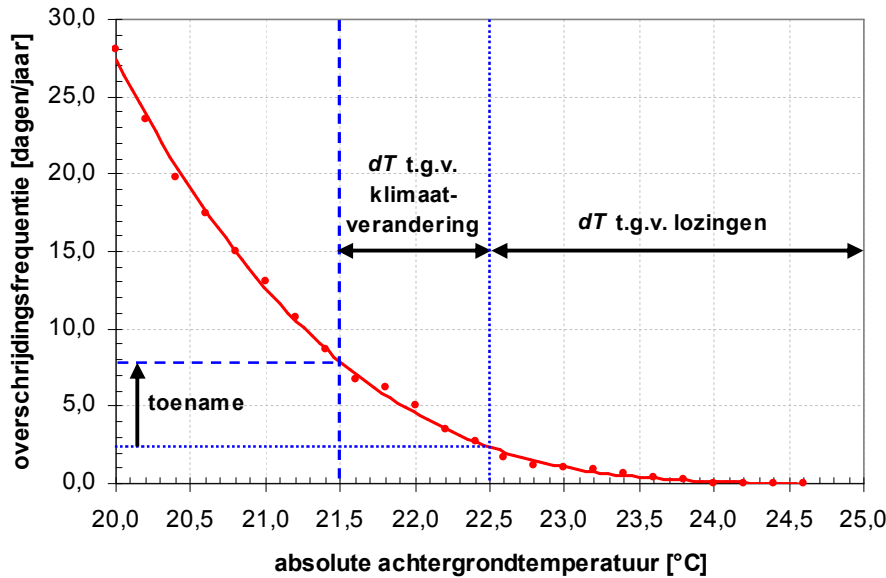
Figuur 8-10 Illustratie van het temperatuurverloop ter plaatse van de monding van de Yangtzehaven (doorsnede 2) op de langere termijn inclusief klimaatverandering. Uitgangspunt is een extreem hoge achtergrondtemperatuur van 23°C.

Een achtergrondtemperatuur van 23°C zal niet snel optreden, maar de invloed van klimaatverandering op de toename van de overschrijdingskans van de maximale achtergrondtemperatuur is nu in ieder geval duidelijk gemaakt.

8.4.3 Toetsing resultaten aan CIW-richtlijn

De maximaal toegestane temperatuurverhoging bij een mengzonegrens wordt alleen overschreden bij doorsnede 3. Bij doorsnede 2 zal dit zeer sporadisch gebeuren, tenzij er vier E.ON units tegelijkertijd operationeel zullen zijn. De mengzonegrens voor de E.ON lozing bij de monding van de Europahaven geeft de meeste lozingsruimte. Ook bij de waarschijnlijke mengzonegrens van Electrabel worden geen problemen verwacht, zelfs niet wanneer er een 2° unit operationeel komt.

Indien het water in de Maasvlakte 1 & 2 wordt gekenmerkt als water voor schelpdierachtigen, dan mag de absolute temperatuur van 25°C niet overschreden worden. Met behulp van Figuur 8-11 kan bepaald worden hoeveel dagen gemiddeld per jaar bij een veilige aanname van de temperatuuroverschrijdingen in het Maasvlaktegebied (middelste, rode lijn) deze maximale temperatuur overschreden wordt.



Figuur 8-11 Voorbeeldberekening van de toename van het aantal dagen overschrijding van een bepaalde absolute achtergrondtemperatuur per jaar vanwege de klimaatverandering. Zie ook Figuur 4-9. Uitgangspunt hier is doorsnede 3.

Indien er vanuit gegaan wordt dat het worst-case scenario altijd tegelijk optreedt met de hoogste achtergrondtemperaturen (een veilige, maar geen onrealistische aanname), dan is het aantal dagen per jaar dat de maximale temperatuur wordt overschreden het volgende:

- Doorsnede 1 & 4 (bij $dT = 1^{\circ}\text{C}$): 0 dagen/jaar;
- Doorsnede 2 (bij $dT = 2^{\circ}\text{C}$): 1 dag/jaar;
- Doorsnede 3 (bij $dT = 2,5^{\circ}\text{C}$): 3 dagen/jaar. (als voorbeeld weergegeven in Figuur 8-11)

Aangezien veilige aannames zijn gedaan, lijken deze overschrijdingskansen mee te vallen. Er is echter geen rekening gehouden met de te verwachten klimaatverandering. Indien de wetgeving niet verandert de komende tientallen jaren, en de opwarming de komende 40 jaar ongeveer 1°C bedraagt, dan gelden over 40 jaar de volgende overschrijdingsfrequenties:

- Doorsnede 1 & 4 (bij $dT = 2^{\circ}\text{C}$): 1 dag/jaar;
- Doorsnede 2 (bij $dT = 3^{\circ}\text{C}$): 5 dagen/jaar;
- Doorsnede 3 (bij $dT = 3,5^{\circ}\text{C}$): 8 dagen/jaar (als voorbeeld weergegeven in Figuur 8-11).

Voor doorsnede 1 & 4 levert dit nog steeds geen problemen, voor de andere doorsneden kan het echter betekenen dat bijvoorbeeld de elektriciteitsproductie moet worden teruggedraaid (clipping, zie paragraaf 3.4.2). Gezien de gedane veilige aannames blijft dit beperkt tot gemiddeld een paar dagen per jaar.

Indien het water in het Maasvlaktegebied wordt gekenmerkt als water voor karperachtigen, dan is de kans zeer klein dat de maximaal toegestane achtergrondtemperatuur van 28°C buiten de mengzones overschreden wordt, ook over 40 jaar.

8.4.4 Toetsing resultaten aan economische gevolgen

De gevonden jaargemiddelde temperatuurverhogingen bij de inlaatpunten verschillen niet veel met de voorbeeldberekening in paragraaf 3.4.1. Aangezien de warmtelast van de E.ON-centrale het grootst is en de andere centrales nog gebouwd moeten worden en daarom hun koelwatergebruik dus nog kunnen optimaliseren aan de te verwachten innametemperaturen, wordt de berekening van het rendementverlies alleen toegespitst op de E.ON-centrale. In Tabel 8-8 is het rendementverlies

berekend voor verschillende situaties. Een redelijke schatting voor het te verwachten rendementsverlies voor de E.ON-centrale is in de ordegrootte van 2 miljoen euro per jaar.

Tabel 8-8 Schatting rendementsverlies van de E.ON-centrales

| | Rendementsverlies van 0,3% per °C opwarming | | Rendementsverlies van 0,12%punt per °C opwarming | |
|--|--|-----|---|-----|
| Warmtelast [MWe] | 2120 | | 2120 | |
| Jaargemiddelde dT [°C] | 0,7 | | 0,7 | |
| Rendementsverlies [MWe] | 6,4 | | 2,6 | |
| Electriciteitsprijs | 75 | 50 | 75 | 50 |
| Kosten rendementsverlies bij 8000 h/jaar [milj euro/jaar] | 3,8 | 2,6 | 1,6 | 1,0 |

Afhankelijk van de gekozen mengzonegrens en de klimaatverandering, zullen de kosten ten gevolge van clipping in de toekomst hierbij moeten worden opgeteld. Bij een mengzonegrens op doorsnede 1 zijn er geen clippingsverliezen te verwachten. Bij een mengzonegrens op doorsnede 2 in de toekomst mogelijk wel: als de extra opwarming (inclusief klimaatverandering) 1°C bedraagt, moet de E.ON centrale jaarlijks gemiddeld gedurende 120 uur (5 dagen, bij veilige aannames) de productie terugdraaien met $1/10 * 2120 = 212$ MWe. Bij een elektriciteitsopbrengst in een extreme zomerperiode van 100 euro per MWe, levert dit een gemiddeld jaarlijks clippingsverlies van: $120 * 212 * (100 - 30) = 1,8$ miljoen euro. Dit is een maximale waarde, aangezien deze schatting is gebaseerd op veilige aannames. Het verlies voor E.ON zou over 40 jaar dan mogelijk kunnen toenemen naar ruim 3 miljoen euro per jaar. Dit is een zeer grove schatting. Bij de andere twee energiecentrales is het niet waarschijnlijk dat clipping moet optreden.

Vanwege de E.ON lozing zal mogelijk toekomstige chemie in de Maasvlakte 2 relatief hoge inlaattemperaturen ondervinden. De meest voor de hand liggende optie is gebruik maken van de stratificatie en dieper innemen. Een apart onderzoek naar mogelijke recirculatie is dan gewenst.

Om dit en recirculatie van de E.ON lozing tegen te gaan is samenwerking tussen E.ON en de Gate terminal door middel van een pijpleiding zeer wenselijk. Overdimensionering van deze pijpverbinding (een groot debiet) zal mogelijk enigszins positief werken.

Tot slot wordt opgemerkt dat de recirculatie bij EnecoGen sterk wisselt per getijfase vanwege de ligging bij de monding van het Beerkanaal. Recirculatie kan gedurende enkele uren significant zijn wanneer een deel van de warmtepluim inderdaad zakt naar de innamehoogte, zoals het far-field model voorspelt. In werkelijkheid zal dit effect waarschijnlijk geringer zijn, maar verdere studie naar de recirculatie is interessant voor EnecoGen (niet in deze studie uitgevoerd).

8.5 Conclusie resultaten

De getijbeweging is dominant voor de verspreiding en afkoeling van de warmtelasten. Door de geometrie van de havenbekkens is of het springtij of het doottij maatgevend voor extra opwarming, afhankelijk van de te beschouwen locatie. In combinatie met de getijbeweging blijkt ook de zoetwaterafvoer invloed op de advectie en afkoeling van de warmtepluimen te hebben. Hoe groter de zoetwaterafvoer, des te hoger het netto transport van warmte uit het Maasvlaktegebied, dus des te lager de temperatuurverhoging in de havenbekkens.

De hoogste temperaturen treden op in de oostelijke Yangtzehaven ten gevolge van de E.ON/Lyondell/chemie-lozing: circa 5°C aan het wateroppervlak. Hier speelt de afkoeling naar de atmosfeer een grote rol. Daarentegen is dit in de rest van de havenbekkens niet het geval, aangezien de

warmte zich voornamelijk enkele meters onder het wateroppervlak verspreidt ter hoogte van het interne zoet-zout grensvlak.

Om te kunnen voldoen aan de CIW-richtlijn met de huidige toekomstplannen voor koelwatergebruik in het Maasvlaktegebied, moet de mengzonegrens van de E.ON/Lyondell/Chemie-lozing of bij de monding van de Yangtzehaven gekozen worden, of bij de monding van de Europahaven. De laatste geeft meer lozingsruimte, bijvoorbeeld in het geval dat er ooit vier E.ON-units tegelijkertijd operationeel zijn.

De monding van de Amazonehaven als mengzonegrens voor de Electrabel lozing blijkt geen problemen op te leveren, zelfs niet als in de toekomst een tweede unit in gebruik wordt genomen.

De EnecoGen/LionGas mengzone zal voldoen aan het mengzonecriterium van maximaal 25% van de dwarsdoorsnede ter plaatse van het lozingspunt.

Clipping zal waarschijnlijk zelden hoeven te gebeuren. De situatie verandert, wanneer op de lange termijn ook rekening wordt gehouden met de klimaatverandering. Zonder aanpassingen zal de maximaal toegestane absolute temperatuur buiten de mengzones over ongeveer 20 tot 30 jaar gemiddeld enkele dagen per jaar overschreden kunnen worden. Clipping bij de energiecentrales zal dan enkele dagen per jaar nodig zijn.

Recirculatie, oftewel een verhoging van de temperatuur bij de inlaatpunten, is vooral te verwachten bij de E.ON-inlaat (jaargemiddeld circa 0,7°C) en bij de chemie-inlaat in de Yangtzehaven (1,5 tot 3°C, sterk afhankelijk van de innamediepte). Om meer uitsluitel te kunnen geven over de directe recirculatie tussen de inlaat en uitlaat van de EnecoGen-centrale is nader onderzoek nodig.

Schade ten gevolge van rendementsverlies zal voornamelijk bij de E.ON-centrale voorkomen (chemie op Maasvlakte 2 buiten beschouwing gelaten) en wordt geschat op ongeveer twee miljoen euro per jaar (contante waarde).

Terugkoppeland naar de resultaten uit de warmtebalans (1,6°C opwarming bij uniforme temperatuurverdeling) en naar de resultaten uit eerdere studies (bijlage A.2, volumegemiddelde temperatuurverhogingen) komen de modelresultaten redelijk met elkaar overeen.

Hieronder wordt een aantal redenen genoemd waarom het loont onderzoek te doen naar mogelijke maatregelen om de temperatuur in havenbekkens van de Maasvlakte 1 & 2 te reduceren.

- Maatregelen om de recirculatie te verminderen kunnen nuttig zijn, wanneer ze zichzelf terugverdienen door afname van het te verwachten rendementsverlies.
- Er is onduidelijkheid in toepassing van CIW-richtlijnen: afhankelijk van de gekozen mengzonegrenzen, wordt er wel of niet aan de CIW-richtlijn voldaan. Voor E.ON geldt: wel bij doorsnede 1 & 2, maar niet bij doorsnede 3. In het laatste geval zal er een oplossing gevonden moeten worden.
- De temperatuurverhoging ligt redelijk in de orde van grootte van de maximaal toegestane opwarming. Met klimaatverandering wordt in toekomst wellicht steeds vaker de eis van maximaal toegestane absolute watertemperatuur buiten de mengzone overschreden.
- Bij eventueel extra toename van koelwatergebruik in de toekomst, kan het nodig zijn de temperatuur in de havenbekkens te reduceren.
- Er bestaat een kans op groei van exoten, algen etc, zeker in de oostelijke Yangtzehaven waar de temperatuurverhoging het grootst is. Wanneer hier teveel hinder van ondervonden wordt, is misschien wel een ingrijpende, dure maatregel nodig.

In hoofdstuk 9 zullen mogelijke oplossingsrichting ter reductie van de temperatuurverhoging nader bestudeerd worden.

9 REDUCTIE TEMPERATUURVERHOOGING

Nu globaal bekend is wat de te verwachten temperatuurverhogingen in de havenbekkens van het Maasvlaktegebied zullen worden ten gevolge van de thermische lozingen, kan gekeken worden of de nadelige effecten van deze verhoging tegengegaan kunnen worden. Dit hoofdstuk bespreekt de mogelijkheden tot reductie van de temperatuurverhoging in de havenbekkens.

Leeswijzer

Allereerst wordt in paragraaf 9.1 beredeneerd wat voor een effect een mogelijke maatregelen minimaal moet hebben, wil het zinvol zijn deze gedetailleerder uit te werken. Vervolgens wordt een overzicht van mogelijke oplossingsrichtingen met alle denkbare, bijbehorende maatregelen weergegeven en een afweging van deze maatregelen op basis van uitvoerbaarheid, effectiviteit en kosten. Er blijven echter nog enkele maatregelen over om nader te bestuderen. Dit gebeurt in paragraaf 9.3. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk worden alle bevindingen kort samengevat.

9.1 Uitgangspunten

Aan de hand van de resultaten uit hoofdstuk 8 kan geconcludeerd worden dat mogelijke knelpunten zich voornamelijk rond de E.ON & Lyondell-lozing zullen voordoen. De koelwaterlozingen van Electrabel en EnecoGen lijken nauwelijks nadelige effecten op te leveren.

Bij de twee meest waarschijnlijke mengzonegrenzen van de E.ON-centrale zal de maximaal toegestane temperatuurverhoging van 2°C met het basis lozingsscenario niet optreden. Ook de maximaal toegestane temperatuurverhoging van 25°C zal niet snel optreden, zelfs met een aanname van een 1°C hogere watertemperatuur ten gevolge van klimaatverandering. In eerste instantie hoeven dus geen maatregelen getroffen te worden om de temperatuur bij de mengzonegrenzen te verlagen.

Wel blijkt uit de resultaten dat de E.ON-centrale in de toekomst koelwater uit de Europahaven zal innemen met een jaargemiddelde temperatuurverhoging van net iets minder dan 1°C ten gevolge van voornamelijk zijn eigen warmtelozing. Dit leidt tot een globaal geschat rendementsverlies van rond de 2 miljoen euro per jaar (contante waarde). Hierop gebaseerd kan een maatregel om de innametemperatuur van de E.ON-centrale te verlagen alleen rendabel zijn, als de kosten ervan op den duur kleiner zijn dan de te verwachten rendementsverliezen. Wanneer bijvoorbeeld een eventuele maatregel de temperatuurverhoging bij de inlaat met circa 50% vermindert en de kosten na 10 jaar terugverdiend moeten zijn, mag deze maatregel globaal ongeveer 11 miljoen euro kosten. Bij terugverdienen na 20 jaar loopt dit al op naar circa 30 miljoen euro. Aangenomen wordt dat de operationele kosten vewaarloosbaar klein zijn ten opzicht van de uitvoeringskosten.

Kortom, een oplossingsrichting moet er voornamelijk voor zorgen dat de temperatuurverhoging bij de E.ON-inlaat beperkt blijft. Er zijn echter situaties te bedenken dat een afname van de temperatuurverhoging in het gehele havenbekken gewenst is, bijvoorbeeld wanneer:

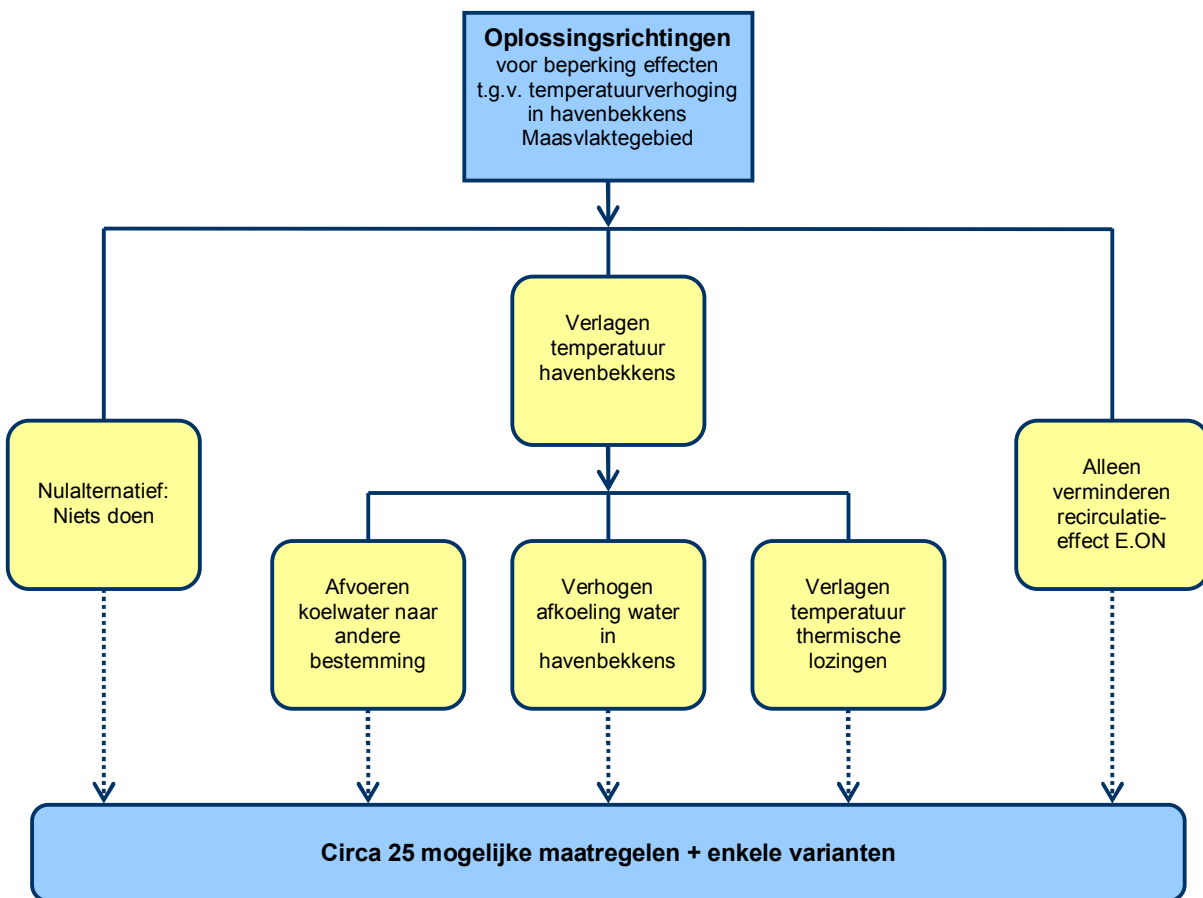
- de mengzonegrens van de E.ON/Lyondell-lozing meer richting doorsnede 3 komt te liggen, en er daarom met regelmaat niet voldaan wordt aan de CIW-richtlijn;
- de innametemperatuur van de toekomstige chemie op Maasvlakte 2 gereduceerd moet worden;
- de temperatuurverhoging in de Oostelijke Yangtzehaven nadelige ecologische effecten met zich meebrengt;
- onverwachte toename van warmtelozingen plaats vindt en vaker de richtlijn overschreden wordt;
- op de lange termijn mogelijke klimaatverandering vaker de CIW-richtlijn doet overschrijden.

9.2 Overzicht en eerste afweging

9.2.1 Overzicht oplossingsrichtingen

Aangezien de problemen met betrekking tot warmtelozingen zich voornamelijk rond de inname en lozing van de E.ON-centrale afspeelen (behalve wanneer Electrabel een 2^e unit in gebruik neemt), richt de analyse van oplossingsrichtingen zich voornamelijk op de E.ON-centrale.

In bijlage F worden alle mogelijke maatregelen overzichtelijk weergegeven, en waar mogelijk voorzien van commentaar uit eerdere studies. Er zijn vijf (hoofd)oplossingsrichtingen geformuleerd, die grafisch zijn weergegeven in Figuur 9-1:



Figuur 9-1 Hoofdrichtingen oplossingen; het volledige overzicht is te vinden in bijlage F.

Deze oplossingsrichtingen worden verder onderverdeeld in subdoelen per oplossingsrichting. Uiteindelijk resulteert deze eerste analyse in ongeveer 25 mogelijke maatregelen met verschillende te verwachten effecten:

- Sommige maatregelen lossen het probleem in zijn geheel op, anderen werken slechts reducerend. Dit verschil is in bijlage F aangegeven.
- Sommige maatregelen zullen een vermindering van de temperatuurverhoging in een groot deel van het Maasvlaktegebied teweeg brengen, anderen reduceren alleen de recirculatie.

9.2.2 *Globale afweging maatregelen op basis van uitvoerbaarheid*

Een aantal genoemde maatregelen die te zien zijn in het overzicht van bijlage F zijn sowieso niet uitvoerbaar. Redenen hiervoor kunnen zijn dat de havenlay-out van de 2^e Maasvlakte niet meer rigoreus veranderd kan worden, dat het technisch niet haalbaar is, of dat er simpelweg geen ruimte voor is. Ze zullen hier zeer beknopt worden besproken.

Haveningang tussen Noordzee en 2^e Maasvlakte

Door een directe verbinding tussen de Maasvlakte 2 en de Noordzee zal de warmte meer met relatief koud Noordzeewater worden gemengd en sneller richting Noordzee worden afgevoerd. De toekomstige lay-out van de 2^e Maasvlakte ligt echter inmiddels vast, hooguit kleine wijzigingen in de lay-out zijn nog mogelijk. Het nu nog significant veranderen van de plannen, zoals andere haveningang, is zeer kostbaar. Bovendien is dan een dure verlenging van de bestaande golfbreker noodzakelijk.

Vergroten komberging Yangtzehaven

Deze maatregel zal de menging met het getij en afkoeling naar de atmosfeer laten toenemen. Maar hiervoor is een rigoreuze wijziging van de lay-out nodig. Zoals hierboven beschreven is dit niet haalbaar en zal het ten koste gaan van haventerrein voor de toekomstige chemie.

Verwijdering papegaaienbek

Dit zal misschien kunnen zorgen dat de warmte in de monding van de Yangtzehaven zich minder snel richting de inlaat van E.ON zal begeven, maar sneller door advectie uit het balansgebied getransporteerd zal worden. Op de plek van de papegaaienbek komt echter de Gate-terminal voor LNG. Verwijdering is dus geen optie, los van de vraag of deze maatregel een significant effect zal hebben.

Afscheiding of bellenscherm monding Europahaven

In ROYAL HASKONING (2006) wordt deze maatregel besproken. Een bellenscherm dient als scheiding van water met verschillende dichtheden. Zo kan worden voorkomen dat warmtepluimen die met laagwater bij de monding van de Yangtzehaven aankomen bij opkomend tij de hoek om gaan de Europahaven in. Geconcludeerd wordt echter dat bij de vereiste afmetingen van een bellenscherm (enkele honderden meters lang in 20 tot 30 meter diep water) op deze locatie veel turbulentie zal optreden dat mogelijk hinder voor de scheepvaart veroorzaakt. Daarnaast kan een lagere gemiddelde dichtheid van een volume water invloed hebben op het drijfvermogen van een schip. Een derde nadeel is het hoge continuë energieverbruik. Een afscheiding op een andere manier wordt al vrij snel zeer kostbaar, en is vanuit nautisch oogpunt ongewenst.

Afkoelbassin in combinatie met sproeien

Om het koelwater van de E.ON-centrale eerst te laten afkoelen in een afkoelbassin, al dan niet met sproeien bij de uitlaat om afkoeling naar de atmosfeer te stimuleren, is niet uitvoerbaar. Een dergelijk afkoelbassin beslaat een te groot oppervlak dat niet meer in de huidige lay-out past en ten koste zal gaan van kostbaar haventerrein.

(Vergaande) aanpassing aan de bestaande centrale

LIGTERINGEN EN DIKEMA (2007) stellen dat een vergaande aanpassing aan de bestaande centrale technisch gezien niet haalbaar is en tevens ook zeer kostbaar. Op deze maatregel wordt hier verder niet ingegaan.

9.2.3 Globale afweging maatregelen op basis van effectiviteit

De volgende maatregelen zijn in eerdere studies beschreven en blijken niet effectief. Ook deze maatregelen worden hier kort toegelicht.

Andere innamelocatie (bijvoorbeeld Hartelhaven);

Innemen van water door de E.ON-centrale in de Hartelhaven vergroot de recirculatielengte. Waarschijnlijk hebben de thermische lozingen op deze locatie nauwelijks effect. Doordat de watertemperaturen in het Hartelkanaal vaak hoger zijn dan de watertemperaturen in de rest van het Maasvlaktegebied (zie Figuur 4-8 en Figuur 4-9) wordt de innametemperatuur alsnog hoger. Deze maatregel lijkt daarom niet effectief. Daarnaast speelt ook weer het kostenaspect mee, deze zullen zichzelf bij lange na niet zullen terugverdienen (ordegrootte enkele tientallen miljoenen euro's).

Verplaatsen lozingslocatie

Deze maatregel, om de recirculatielengte te vergroten, is onderzocht door VATVANI & KLEISSEN (2005), en blijkt zoals verwacht geen effect te hebben. Uit BLOKLAND (2006a) werd vermeld dat verlengen ook hoge kosten met zich meebrengt.

Koeltoren

Geconcludeerd kan worden op basis van ROYAL HASKONING (2006) en LIGTERINGEN EN DIJKEMA (2007), dat een (nageschakelde) koeltoren niet effectief is bij de bestaande centrale en dat de kosten rond de 100 miljoen euro bedragen.

Gebruik diffuser

Het doel van diffusers is om voor een gegeven thermische lozing de initiële menging (zie paragraaf 6.1.1) dusdanig te laten toenemen, dat de maximaal resterende temperatuurverhoging direct na initiële menging lager is, en er daardoor bijvoorbeeld wordt voldaan aan de randvoorwaarden betreffende de mengzone. Dit is bij de E.ON lozing echter het probleem niet, de mengzone mag waarschijnlijk een groot deel van de Yangtzehaven beslaan, zo niet de gehele Yangtzehaven. Een diffusor bij de uitlaat zal geen effect hebben op de etmaal- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhoging bij één van de mogelijke mengzonegrenzen.

Gebruik restwarmte

De warmte zou bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden voor stadsverwarming of voor gebruik in kassen. Dit zou een duurzame maatregel kunnen zijn. Helaas is de benodigde temperatuurverhoging hiervoor te laag. Bij een warmtekrachtcentrale kan vanwege de hogere temperaturen wel gedacht worden aan de hiervoor genoemde synergie. Daarnaast moet opgemerkt worden dat in de maatgevende zomerperiode er minder vraag naar warmte is. Voor het gebruik van restwarmte is een beleidsmatige aanpak nodig.

Samenwerking tussen energiecentrales en LNG-terminals is goed mogelijk. EnecoGen en LionGas hebben vergaande plannen hiervoor. Ook E.ON en de Gate Terminal doen een haalbaarheidsstudie naar een directe koelwaterverbinding van de energiecentrale naar de terminal. Met het oog op opwarming van de Yangtzebekken is een overcapaciteit van deze verbinding geen slecht idee. Het warmteverbruik van een LNG terminal is echter te laag om een significant reducerend effect te hebben op de vermindering van de temperatuurverhoging in de Yangtzehaven.

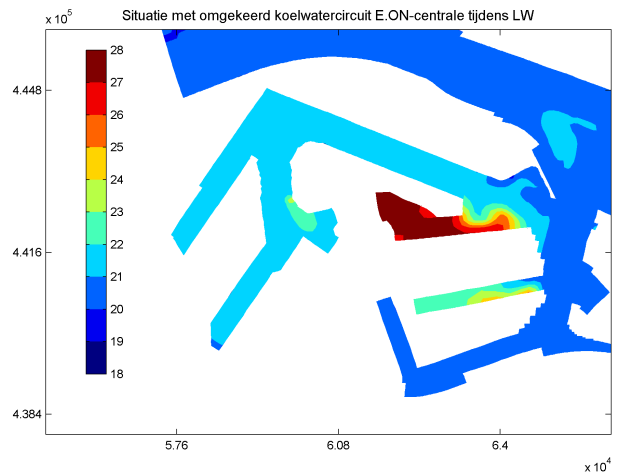
Kortom, met het oog op duurzaamheid is hergebruik van restwarmte zeer gewenst. Dit kan door middel van onderlinge samenwerking tussen de industrie. Wanneer de temperatuur van de warmtelozing aanzienlijk hoger is, kan de warmte gebruikt worden voor bijvoorbeeld stadsverwarming of voor het gebruik in de kassen in het Westland. Om een duurzame, schone haven te creëren is het dus belangrijk dat er aangedrongen wordt door het Havenbedrijf Rotterdam op slimme,

moderne energiecentrales (kolenvergassingsinstallatie of waterkrachtcentrale) en niet op conventionele poederkoolcentrales.

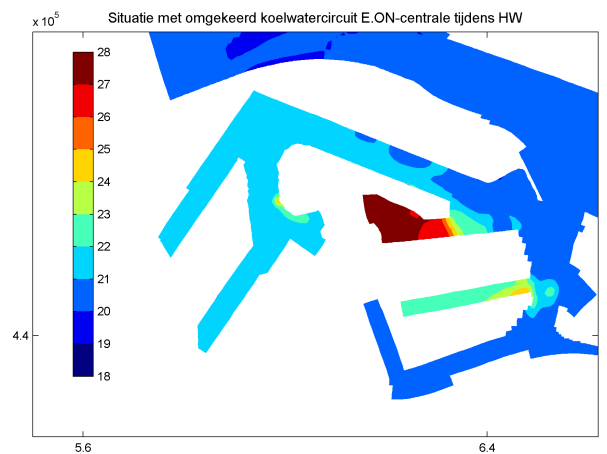
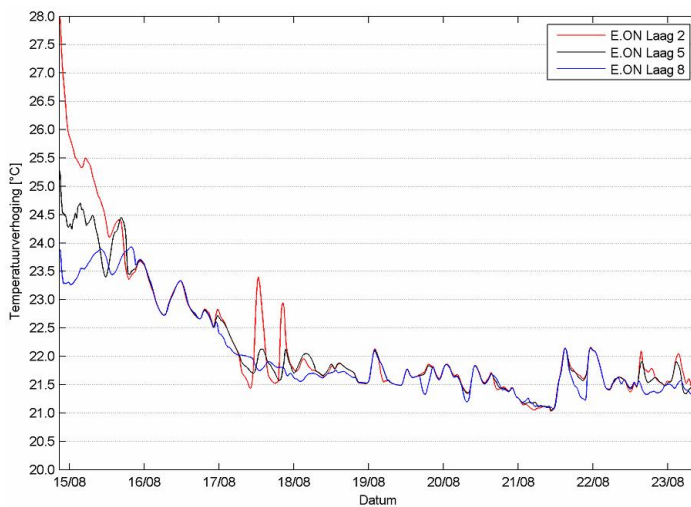
Omkeren koelwatercircuit E.ON-centrale

In eerdere studie [VATVANI & KLEISSEN, 2005] is deze maatregel beoordeeld als weinig effectief. Om een beeld te krijgen van de effecten bij een omwisseling van de inlaat en uitlaat in het nieuwste scenario is in dit onderzoek deze maatregel alsnog gemodelleerd. In Figuur 9-2 is de verspreiding van de warmte in de havenbekkens te zien wanneer deze maatregel wordt toegepast. Duidelijk is te zien dat de warmte zich via de Europahaven tot in de uithoeken van de verlengde Yangtzehaven verspreidt.

Figuur 9-2 Rechts: verspreiding van warmte in de havenbekkens met een omgekeerd koelwatercircuit van de E.ON-centrale.



Figuur 9-3 Onder: afname temperatuurverhoging bij de nieuwe E.ON-inlaat in geval van het omdraaien van het E.ON koelwatercircuit.



De temperatuurverhoging bij de nieuwe E.ON-inlaat is ruim 1°C. Wel is dit gemodelleerd met een chemielozing dichtbij de nieuwe E.ON-inname. Dit lozingspunt kan waarschijnlijk verplaatst worden. Naast de hoge kosten (geschat op enkele tientallen miljoenen euro's) die deze maatregel met zich meebrengt, neemt de recirculatie dus niet af.

De temperatuurverhoging bij de meest waarschijnlijke E.ON mengzonegrens (doorsnede 1) blijkt slechts een klein beetje te zijn toegenomen en valt dus nog binnen de CIW-richtlijn.

Wat mogelijk wel een positieve effect lijkt te zijn, is de lagere temperatuur in de gehele Yangtzehaven. Indien een hogere temperatuur in de toekomst toch voor problemen leidt, is dit een interessante maatregel om nader te bestuderen.

9.2.4 *Globale afweging maatregelen op basis van kosten*

Maatregelen die uit eerdere studies wel effectief bleken maar relatief veel te hoge kosten met zich meebrengen worden hier kort toegelicht.

Afvoerkanaal

Een afvoerkanaal dat de warmtelozing van de E.ON centrale direct afvoert en loost in de Noordzee zou in één keer de koelwaterproblematiek in de havenbekkens van het Maasvlaktegebied oplossen. Deze maatregel brengt echter hoge kosten met zich mee (ordegrootte 100 miljoen euro) door de dure uitvoering, verlies aan haventerrein en onderhoudskosten. Daarnaast is het interessant om te analyseren of wel wordt voldaan aan CIW-criteria van koelwaterlozingen in de Noordzee, en of het afvoerkanaal in de toekomst niet nieuwe knelpunten met zich mee zal brengen.

In de CIW-richtlijn staat vermeldt dat in de Noordzee geen temperaturen hoger dan 25°C mogen voorkomen. Verder schrijft de CIW-richtlijn voor dat een warmtepluim niet de bodem van de Noordzee mag raken. Aangezien de E.ON-centrale koelwater loost met een lagere dichtheid dan de dichtheid van het ontvangende water in de Noordzee (het koelwater heeft een lager saliniteitsgehalte en hogere temperatuur), zal de warmtepluim naar alle waarschijnlijkheid opdrijven naar het wateroppervlak en wordt de bodem niet geraakt. Waarschijnlijk wordt er zonder problemen aan de CIW-criteria voldaan.

Mocht er in de toekomst ooit gedacht worden aan een verdere uitbreiding van het Havengebied in de Noordzee, bijvoorbeeld in de vorm van een 3^e Maasvlakte, dan zal een afvoerkanaal een nieuw knelpunt vormen. De kans is namelijk groot dat het nieuw aan te wijzen havengebied komt te liggen grenzend aan de monding van het afvoerkanaal in de Noordzee. Het probleem lijkt dan slechts verplaatst.

Afvoer door middel van gesloten leidingen of buizen

Het bovenstaande verhaal is ook vrijwel geheel toepasbaar op afvoer met gesloten buizen. De verschillen zijn hogere uitvoeringskosten, maar een minder groot verlies aan haventerrein.

Spuisluis in NW of ZO van Maasvlakte 2

Uit eerdere studie uitgevoerd door WL|Delft Hydraulics blijkt deze maatregel alleen effectief te zijn bij een groot continue debiet van circa 200 m³/s [KLEISSEN, 2007a]. Met dit benodigde pompdebiet is deze maatregel niet alleen duur in aanleg, maar ook in beheer en onderhoud.

Indien verlaging van temperatuur in verlengde Yangtzehaven om bijvoorbeeld ecologische redenen toch nodig blijkt, is het eventueel meer in detail bestuderen van deze maatregel nuttig.

9.2.5 *Conclusies over de tot nu toe onderzochte maatregelen*

De tot nu toe onderzochte effectieve maatregelen die zowel de temperatuurverhoging in de havenbekkens ter hoogte van de doorsnedes met betrekking tot toetsing aan de CIW-richtlijn als de recirculatie verminderen, blijken allen te hoge kosten met zich mee te brengen. Er moet gezocht worden naar goedkopere maatregelen, bijvoorbeeld maatregelen die eventueel alleen de temperatuurverhoging in de havenbekkens verlagen of anderzijds de recirculatie.

Interessant om nader te bekijken

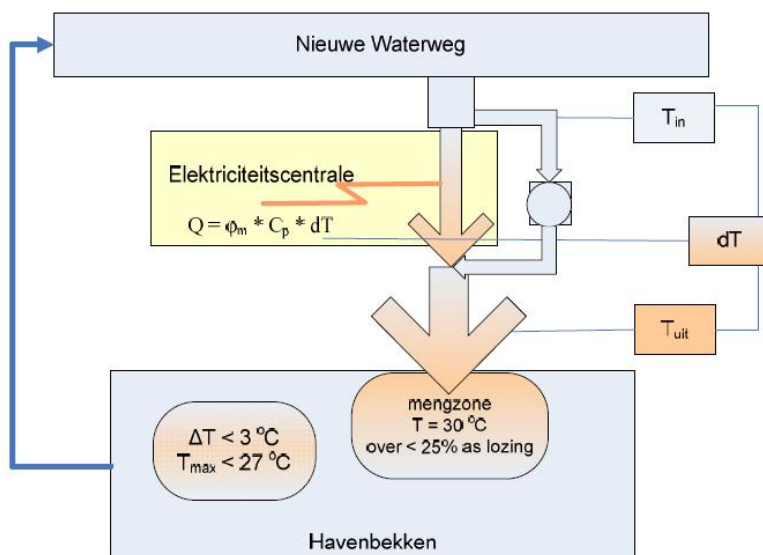
- Gebruik groter lozingsdebiet met lagere temperatuurverhoging
- Vergroting temperatuurverhoging;
- Dieper innemen;
- Variabele diepte-inname.

9.3 Nader te onderzoeken oplossingsrichtingen

Uit de voorgaande paragraaf blijkt dat wanneer maatregelen wel effectief zijn om recirculatie van met name de E.ON-centrale tegen te gaan, de hoge kosten van deze maatregelen het grote heikelpunt zijn. Wanneer nu alleen naar vermindering van deze recirculatie gekeken wordt, moet een maatregel zichzelf dus terugverdienen door vermindering van de rendements- en clippingsverliezen.

9.3.1 Extra koelwaterdebiet en kleinere temperatuurverhoging E.ON-centrale

Deze maatregel, afkomstig van LIGTERINGEN & DIJKEMA (2007), is gebaseerd op het idee de thermische lozing van de E.ON centrale als het ware te ‘verdunnen’ door middel van een verhoogd debiet door de koelwaterketen. Dit extra debiet hoeft niet daadwerkelijk door de gehele koelwaterketen gepompt te worden, maar kan als een soort ‘by-pass’ via een vertakking om de condensor heen weer aansluiten op de koelwaterafvoer (Figuur 9-4). Vervolgens mengt het extra debiet met het opgewarmde water, wat voor een lagere lozingstemperatuur op het oppervlaktewater zorgt.



Figuur 9-4 Schematische weergave van de maatregel met extra koelwaterdebiet als 'by-pass' inclusief zoutwatergemaal, zoals gepresenteerd in LIGTERINGEN & DIJKEMA (2007). De weergegeven criteria voor maximale temperatuur(verhoging) zijn gebaseerd op water voor karperachtigen.

Discussie te verwachten effecten

De te verwachten positieve effecten van extra koelwatergebruik zijn:

- Verlaging van de temperatuur(verhogingen) in de havenbekkens in de buurt van de lozing. Op grotere afstand zal dit effect waarschijnlijk geringer zijn.
- De ‘mengzone’, zoals gedefinieerd in de CIW-richtlijn, zal een kleiner gebied beslaan, waar de maximale absolute temperaturen lager zullen zijn.

Er zijn echter ook nadelige effecten te verwachten:

- De kans op (directe) recirculatie kan groter worden.
- Er is continue extra pompvermogen nodig, waardoor deze maatregel niet als ‘duurzaam’ kan worden gekenmerkt.

- Een grotere onttrekking is tegenstrijdig met de CIW-richtlijn, waar namelijk gepleit wordt voor een zo laag mogelijk onttrekkingsdebiet ter bescherming van de ecologie.
- Bij het lozingspunt worden hogere stroomsnelheden gecreëerd, die zonder overige maatregelen hinder voor de binnenscheepvaart aldaar kunnen opleveren.

Onderzoek & resultaten

Onderzocht moet nu worden of de positieve effecten opwegen tegen de genoemde nadelige effecten. Dit kan gemodelleerd worden met het model zoals beschreven in hoofdstuk 7. Het is interessant de volgende antwoorden te vinden:

- wat voor een effect deze maatregel heeft op het near-fieldgedrag van de warmtelozing, de warmteverspreiding, verblijftijden, absolute temperaturen, recirculatie etc;
- welke temperatuurprofielen er ontstaan in de havenbekkens, zowel bij de mogelijke mengzonegrenzen als bij het inlaatpunt van de E.ON-centrale;
- wat voor een neveneffecten heeft dit? (grotere onttrekking en stroomsnelheden bij in- en uitlaat, extra pompenergie nodig etc).

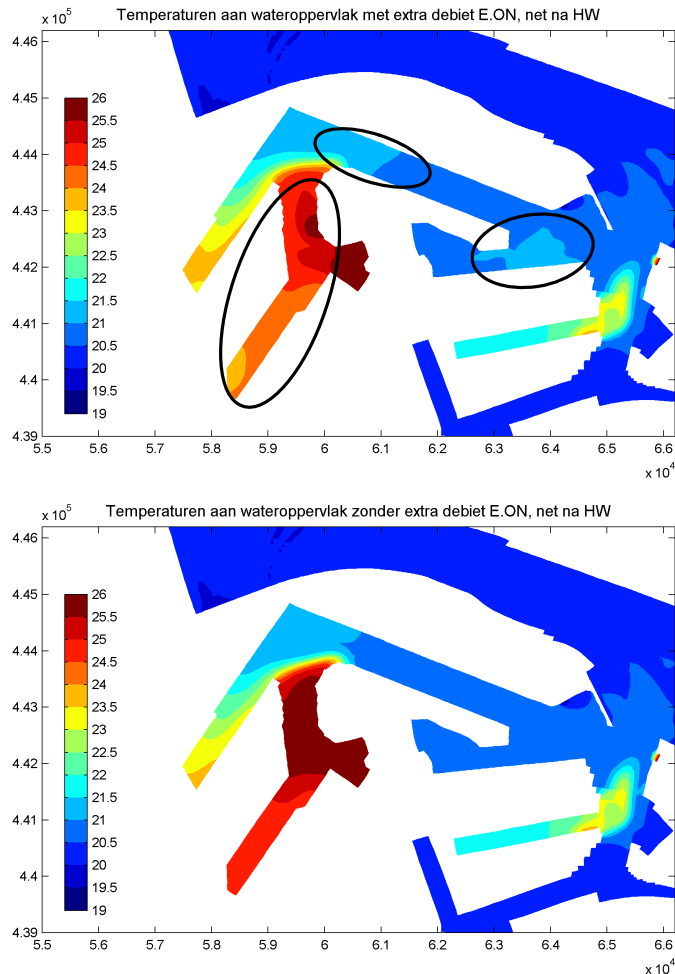
In LIGTERINGEN & DIJKEMA (2007) wordt voorgesteld de temperatuurverhoging van het koelwater bij de E.ON-centrale te reduceren tot $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$. De achterliggende redenatie blijft hier buiten beschouwing, aangezien deze op meerdere en ook onjuiste manieren te interpreteren is. Echter, om een idee te krijgen van het benodigde extra debiet is dit een goede aanname.

De warmtelast Q_{th} is constant, circa 2400 MWth voor E.ON unit 1, 2 & 3. Het totaal benodigde koelwaterdebiet Q_k wordt nu:

$$Q_k = \frac{Q_{th}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} = \frac{2400}{4,2 \cdot 5} \approx 115 \text{ m}^3/\text{s}$$

In vergelijking met de situatie zonder deze maatregel is de toename van het koelwaterdebiet (bij een ΔT van 5°C) ruim $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Een ruwe schatting volgens LIGTERINGEN & DIJKEMA (2007) geeft aan dat de gekapitaliseerde ontwikkel- en bedrijfskosten voor alleen de aanpassing aan de bestaande centrale circa 18 miljoen euro bedragen. Indien de maatregel na verder onderzoek effectief blijkt, moet dit bedrag nader geverifieerd worden.

Met het Maasvlakte 2 model is een run uitgevoerd. Vergeleken worden twee ‘basis lozingsscenario’ runs met een normaal E.ON koelwaterdebiet ($73,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en $\Delta T = 7,8^{\circ}\text{C}$) en een voldoende verhoogd koelwaterdebiet ($115 \text{ m}^3/\text{s}$ en $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$). In Figuur 9-5 worden de resultaten van de twee scenario’s met elkaar vergeleken.



Figuur 9-5 Vergelijking tussen temperatuurverdeling met extra koelwaterdebiet door de E.ON-centrale (boven) en zonder extra debiet (onder). De datum en het tijdstip (net na hoogwater) van beide figuren zijn hetzelfde.

Met deze maatregel wordt de temperatuur in de bovenlaag van de Oostelijke Yangtzehaven ruim 1°C minder, maar de temperatuurverhoging bij doorsnede 2 en 3 en de E.ON-inlaat neemt licht toe. Op doorsnede 1 heeft deze maatregel nauwelijks effect, wat overeenkomt met het feit dat de totale warmtelast in de verlengde Yangtzehaven gelijk is gebleven.

Conclusie

Alleen wanneer het nodig is de temperatuur in de oostelijke Yangtzehaven of bij een mogelijke inlaat van toekomstige chemie op Maasvlakte 2 te verlagen, heeft deze maatregel effect. Maar gezien het feit dat de grootte van de warmtelast gelijk blijft, heeft deze maatregel met betrekking tot het creëren van meer lozingsruimte binnen de CIW-richtlijn een te verwaarlozen, zo niet licht negatief effect.

9.3.2 Extra temperatuurverhoging en kleiner koelwaterdebiet E.ON-centrale

Deze maatregel lijkt precies tegenovergesteld aan de hiervoor besproken maatregel, maar in theorie kan het een bijkomend effect wat betreft de warmtetransprocessen hebben. Het idee achter deze maatregel is namelijk de warmtelozing dusdanig op te laten warmen, opdat de warmtepluim in het ontvangende water over een groter gebied aan het wateroppervlak komt in plaats van gevangen blijft ergens midden in de waterkolom. Door dit effect, samen met het effect van een groter verschil tussen de watertemperatuur en de evenwichtstemperatuur ($T_w - T_e$, zie paragraaf 5.3.2) kan het warmtetransport naar de atmosfeer toenemen.

Discussie te verwachten effecten

De te verwachten positieve effecten van extra temperatuurverhoging zijn:

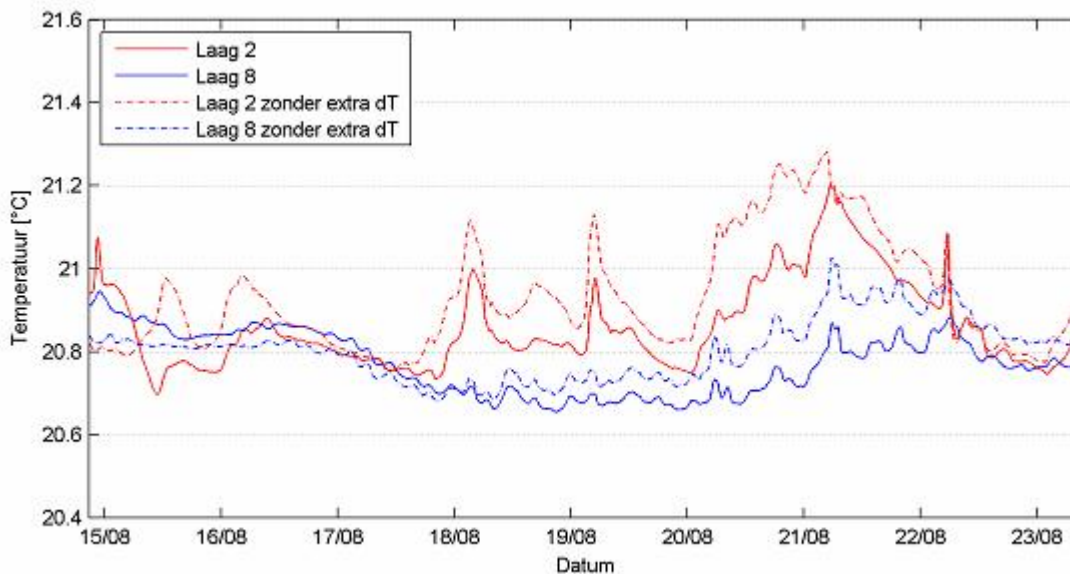
- Toename van de afkoeling naar de atmosfeer, en daardoor mogelijk lagere temperaturen bij de mengzonegrenzen en inlaat van de E.ON-centrale.
- Lage tot geen directe uitvoeringskosten.
- Minder pompvermogen nodig.

Er zijn echter ook nadelige effecten te verwachten:

- Hoge temperaturen dicht bij de lozingslocatie en in de oostelijke Yangtzehaven, dat mogelijk nadelige ecologische effecten met zich meebrengt.
- Mogelijk rendementsverlies van de E.ON-centrale. De vraag is of dit eventuele verlies opweegt tegen de besparing ten gevolge van een lagere innametemperatuur van het koelwater.

Onderzoek & resultaten

Er wordt een run gedaan met een grotere dT bij de E.ON-centrale (van 15°C) en een kleiner koelwaterdebiet. Deze run wordt vergeleken met de run uitgevoerd met het basis lozingsscenario en een zoetwaterafvoer van $1700 \text{ m}^3/\text{s}$. In Figuur 9-6 worden beide runs met elkaar vergeleken op basis van de inlaattemperatuur bij de E.ON-centrale. De eerstgenoemde run is niet nogmaals met een restart gedaan, de mogelijkheid bestaat dus dat het evenwicht nog niet geheel is ingetreden en de afname van de temperatuurverhoging nog iets groter wordt.



Figuur 9-6 Temperatuurverlaging bij de E.ON-inlaat ten gevolge van een extra koelwatertemperatuurverhoging bij de uitlaat.

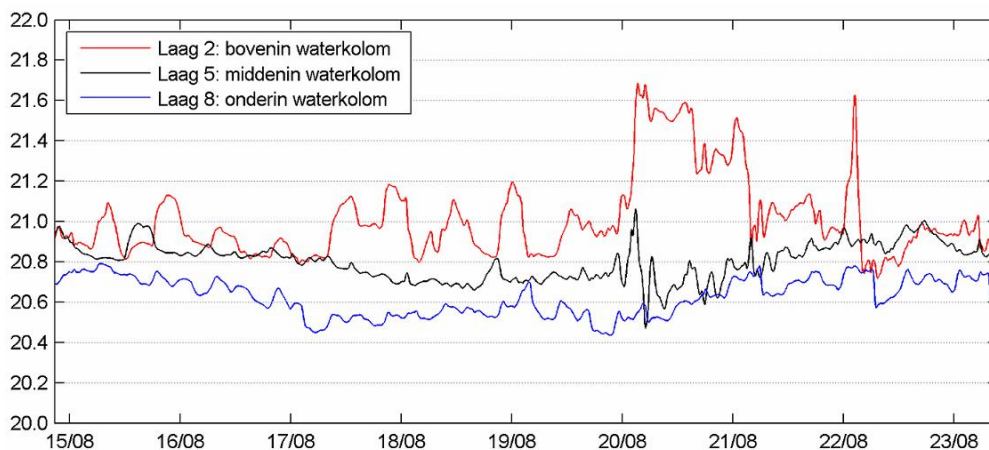
Het effect op de daggemiddelde temperatuur bij doorsnede 1 lijkt te verwaarlozen (bij beide runs gemiddeld $0,7^{\circ}\text{C}$, in vergelijking met $0,6^{\circ}\text{C}$ zonder deze maatregel. Bij doorsnede 2 en 3 is een heel kleine afname van de maximaal optredende temperatuurverhoging te zien.

Aangezien het vergroten van de temperatuurverhoging van het koelwater ook rendementsverlies voor een centrale veroorzaakt, en de inlaattemperatuur van de E.ON-centrale slechts een kleine afname toont ten opzichte van de normale dT , kan geconcludeerd worden dat deze maatregel geen nut heeft.

9.3.3 Verdiepte inname E.ON centrale

Deze maatregel dient om de innametemperatuur te verlagen en is gebaseerd op het innemen van kouder water uit diepere lagen van de waterkolom.

Zoals in paragraaf 4.3.2 is beschreven, is de temperatuur in de onderlaag, in ieder geval in de zomerperiode, gemiddeld één graad koeler dan de temperatuur in de bovenlaag. Ook is gebleken uit eerdere resultaten dat de temperatuurverhoging ten gevolge van de thermische lozingen in de bovenlaag van het diepere gedeelte van de Europahaven (circa 20 m diep) gemiddeld ongeveer 0,4°C hoger is dan de temperatuurverhoging in de onderlaag, te zien in Figuur 9-7. Bij elkaar opgeteld levert dit een temperatuurverschil tussen oppervlak en waterbodem van bijna 1,5°C.



Figuur 9-7 Temperatuurverdeling over de diepte in het midden van de Europahaven, gemodelleerd bij een zoetwaterafvoer van 1700 m³/s.

Indien de Europahaven verdiept zal worden tot aan de inlaat van de E.ON-centrale, kan verdiept innemen van kouder water een aanzienlijk lagere inlaattemperatuur teweeg brengen. Het gevaar schuilt echter in het feit dat wanneer door selectieve inname dieper en zwaarder water wordt ingenomen, de kans groot is dat het geloosde koelwater naar diepere lagen zakt en zich over of nabij de waterbodem verspreidt tot aan het innamepunt.

Selectieve inname bij verdiept innemen E.ON-centrale

In navolging van de analyse in paragraaf 6.2.1 is het allereerst belangrijk om te weten of er bij verdiepte inname selectieve onttrekking plaatsvindt, of dat er ook warmer water uit de bovenste lagen onttrokken wordt. Bij een aangenomen innamediepte van -15 mNAP, een inlaatbreedte van 25 m en een lineaire dichtheidsgradiënt $\varepsilon \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$, wordt over circa 18 m ingenomen. Ondanks de veilige aanname is de kans nu groot dat ook warmer water uit de bovenlaag onttrokken wordt. Om dit te voorkomen moet de inlaatconstructie breder ontworpen worden, bijvoorbeeld 50 m. Bij deze breedte wordt de inlaatdiepte ongeveer 13 m. Gezien het feit dat er nu geen rekening met de interne zoet-zout grenslaag rekening is gehouden, kan gesteld worden dat er water ingenomen wordt over -8 á -10 tot -20 m, waar de temperaturen aanzienlijk lager zijn dan boven het interne grensvlak.

Een andere benadering ook mogelijk, met behulp van de vergelijking van Bernoulli [KRANENBURG, 1998]:

$$\frac{1}{2}u^2 + \frac{\Delta\rho}{\rho_2}ga_2 = \text{constant}, \text{ met } q_2 = a_2u_2$$

q_2 en a_2 , het debiet per strekkende meter en de laagdikte, zijn onafhankelijk van plaats x . Voor de bepaling van het maximale debiet zonder water van de bovenlaag te onttrekken (de stroming is dan intern kritisch), kan in deze vergelijking worden vervangen :

$$a_2 = \frac{2}{3} a_{2\infty}$$

Indien $a_2 < \frac{2}{3} a_{2\infty}$ geldt: $(q_2)_{\max} = \frac{2}{3} a_{2\infty} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g a_{2\infty}}$

Invullen van gegevens geeft een maximaal debiet ($q_{2;\max}$) van ongeveer 7 m²/s.

Indien $a_{2\infty} > a_s > \frac{2}{3} a_{2\infty}$ geldt: $q_{2s} = a_s \sqrt{2 \frac{\Delta\rho}{\rho_2 g} (a_{2\infty} - a_s)}$

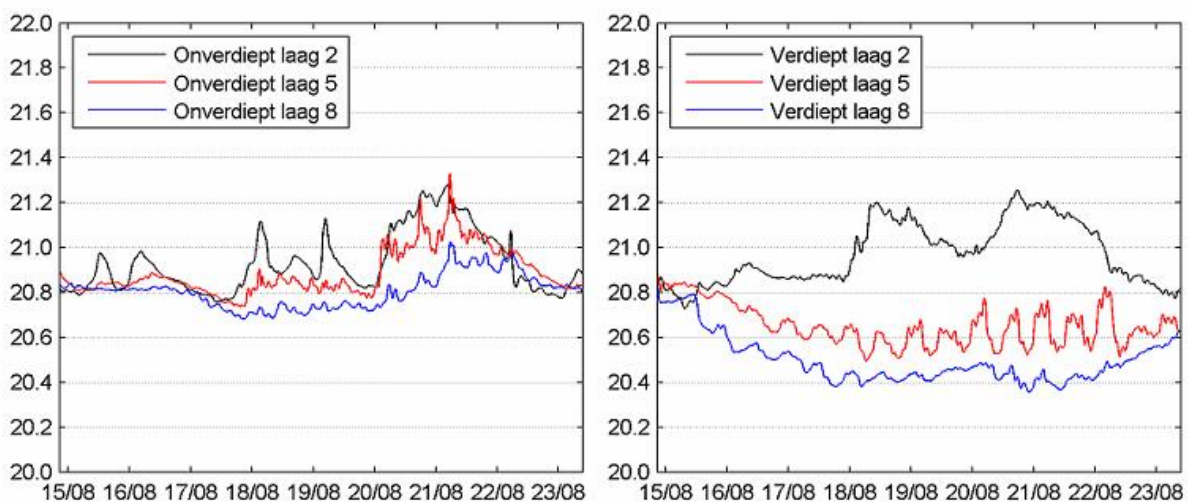
Aangezien voor deze voorwaarde a_s groter dan 8,5 m moet zijn, is dit laatste echter niet van toepassing.

Aan de hand van bovenstaande berekeningen kan geconcludeerd worden dat selectieve onttrekking uit de onderste laag van de waterkolom (onder de interne zoet-zout grenslaag) mogelijk is, zonder water uit de bovenste lagen in te nemen. Eventueel moet de breedte van inlaatconstructie vergroot worden om dit te voorkomen.

Het zoutgehalte van het ingenomen water bedraagt dan doorgaans ongeveer 30 ppt. Met 7 tot 10°C opwarming wordt het gewicht van de thermische lozing ongeveer 1019 kg/m³. De buoyancy flux (zie paragraaf 6.3) van de lozing in het ontvangende water wordt hiermee negatief, waardoor de warmtepluim de neiging zal hebben te zakken. Waarschijnlijk zal de warmtepluim niet verder zakken dan tot onderin de zoet-zout grenslaag, aangezien dan de warmtepluim in evenwicht is. Wel is te verwachten dat de laag waarover de warmtepluim wordt ingesloten nu dikker is. Enige diffusie van warmte naar de onderste lagen is mogelijk, echter met een lage concentratie.

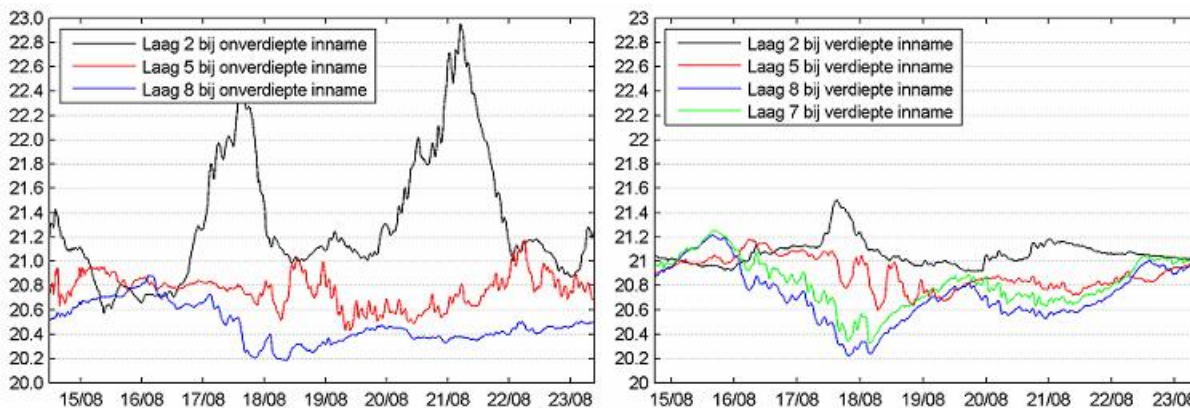
Resultaten

In Figuur 9-8 is de toename van het temperatuurverschil te zien van een onverdiepte Europahaven naar een verdiepte Europahaven, bij een inname van koelwater over de gehele diepte in beide situaties.



Figuur 9-8 Vergelijking van het temperatuurverschil tussen de bovenlaag en onderlaag bij een onverdiepte Europahaven en bij de overgang van een onverdiepte (7m) naar een verdiepte (20m) Europahaven. Dit temperatuurverschil wordt zoals verwacht groter.

Het feit dat de temperatuur in de onderlaag lager wordt, lijkt inderdaad perspectief te bieden voor het innemen van kouder water uit de diepere lagen. Gezien het feit dat het model een kleinere dichtheidsgradiënt weergeeft dan de metingen kan de temperatuur in de onderste lagen in werkelijkheid dus nog lager zijn dan volgens de modelresultaten. Het enige gevaar is dan het zakken en recirculeren van de warmtepluim in de onderste lagen. Om dit te onderzoeken is het dieper innemen gesimuleerd, en na een restart is het resultaat als in de rechterfiguur van Figuur 9-9.



Figuur 9-9 Vergelijking tussen de verticale temperatuurgradiënten in een verdiepte Europahaven bij inname uit de bovenlagen 1 t/m 3 (links) en inname uit de onderlagen 6 t/m 8 (rechts).

Wat meteen opvalt bij de inname uit de bovenlagen bij een verdiepte Europahaven, zijn de grote pieken van de temperatuurverhoging in laag 2. Er kan helaas nog geen uitsluitsel gegeven worden door welke hydrodynamische aspecten dit mogelijk veroorzaakt kan worden, of dat het een onrealistische uitkomst van het far-field model is. Mogelijke oorzaken kunnen bijvoorbeeld zijn:

- Een sneller transport van warmtepluimen door de Europahaven door de grotere diepte, mogelijk door een veranderde circulatie in het havenbekken ten gevolge van getijindringing, hogere snelheden door een kleinere invloed van de bodemwrijving.
- Interne dichtheidsgolven, die bij terugkaatsing op de kade bij de E.ON inlaat een twee keer zo grote uitwijking hebben en daardoor een warmtepluim richting innamepunt transporteren.

9.3.4 Variabele diepte-inname E.ON centrale

Het lijkt erop dat dieper innemen voordelig kan zijn. Het blijkt dat gedurende een doortij-springtij cyclus de temperatuur in de onderlaag iets warmer kan zijn dan de temperatuur in de bovenlaag. Dit komt door een combinatie van de toename van zakking van de warmtepluim door het grotere zoutgehalte en de verblijftijden van (een deel van) deze warmtepluim van het lozingspunt tot weer de E.ON inlaat.

In paragraaf 5.2.2 zijn grootteordes van de verblijftijden ten gevolge van de verschillende aandrijfmechanismen geschat. Het getij bleek dominant hierin. De verblijftijd van een warmtepluim bedraagt ongeveer twee dagen. Dit betekent dat bij de mogelijkheid tot variabele diepteinname, de inname omgewisseld kan worden naar de bovenlaag wanneer een warmtepluim bij de inname onderin de waterkolom aankomt. Op het moment dat de watertemperatuur in de onderlaag weer voldoende kouder is dan de temperatuur in de bovenlaag kan de inname terug naar de diepere lagen. Zo wordt er continue de meest optimale inname temperatuur gezocht, met gebruikmaking van de stratificatie en de waterbewegingen in de havenbekkens.

Het uitvoeren van variabele diepteinname hoeft niet veel te kosten, er is in principe nauwelijks extra pompvermogen nodig. De kosten zitten in het uitbaggeren en onderhouden van de Europahaven, eventuele bodembescherming ter plekke van de instroming en de verlaagde innameconstructie.

9.4 Samenvatting afweging oplossingsrichtingen

In Tabel 9-1 is een overzicht gegeven op basis van de in dit hoofdstuk gepresenteerde overwegingen (effectiviteit en kosten). De eerstgenoemde mogelijke maatregelen die niet sowieso niet haalbaar werden geacht vanwege de uitvoerbaarheid, met name vanwege beperkingen aan het ruimtegebruik, zijn niet weergegeven in de tabel.

Tabel 9-1 Overzicht van maatregelen die in eerdere studies niet effectief of niet economisch rendabel bleken, met betrekking tot de vermindering van de recirculatie.

| Maatregel | Studie(s) | Niet effectief | Niet economisch |
|---|--|----------------|-----------------|
| Andere innamelocatie E.ON (bijv. inname in Hartelhaven) | Kleissen (2004a) Ligteringen & Dijkema (2007) | X | X |
| Verplaatsen lozingslocatie | Vatvani & Kleissen (2005) Blokland (2006a) | X | X |
| Nageschakelde koeltoren | Royal Haskoning (2006) Ligteringen & Dijkema (2007) | X X | X X |
| Gebruik diffusor | Kleissen (2007a) | X | |
| Hergebruik restwarmte | Ligteringen & Dijkema (2007) | X | |
| Omdraaien inlaat en uitlaat E.ON | Deze studie & ... | X ¹ | X |
| Afvoerkanaal (damwanden of taluds) | Ligteringen & Dijkema (2007) | | X |
| Afvoer d.m.v. gesloten leidingen of buizen | Ligteringen & Dijkema (2007) | | X |
| Spuisluis | Kleissen (2007a) | | X |
| Aanpassing bestaande centrale | Royal Haskoning (2006) Ligteringen & Dijkema (2007) | | X X |
| Verdunning koelwatertemperatuur (by-pass) | Deze studie | X ¹ | |
| Verhoging koelwatertemperatuur | Deze studie | X | |
| Verdiepte inname | Deze studie | | |
| Variabele diepte inname | Deze studie | | |

Nu alle mogelijke oplossingsrichtingen bestudeerd zijn, blijven de volgende reële opties over:

- Nulalternatief: niks doen en het rendementsverlies van E.ON-centrale afkopen.
- Dieper innemen of variabele diepte-inname realiseren bij de E.ON-centrale.
- Vestiging van thermische lozers in het Maasvlaktegebied (en Amazonehaven) minimaliseren, of plaatsen op de buitencontour van Maasvlakte 2 met inname uit en lozing in de Noordzee.

Indien in de toekomst blijkt dat de temperatuurverhoging in de Oostelijke Yangtzehaven of bij de inlaat van toekomstige chemie op de Maasvlakte 2 gereduceerd moet worden, kan gedacht worden aan de volgende oplossingsrichtingen:

- By-pass bij koelcircuit van de E.ON-centrale toepassen.
- Verder uitwerken van het omdraaien van de E.ON in- en uitlaat.

Extra temperatuurverhoging in combinatie een lager koelwaterdebiet bij de E.ON-centrale leidt tot een kleine afname van de temperatuurverhoging bij de mogelijke mengzonegrenzen 1 & 2 en bij de E.ON inlaat.

¹ Niet effectief voor afname van temperatuurverhoging bij de E.ON-inlaat, wel voor afname van de temperatuurverhoging in de Oostelijke Yangtzehaven.

10 CONCLUSIES

In het toekomstige Maasvlaktegebied zal door toename van koelwaterlozingen met een totale warmtelast van ongeveer 4200 MWth en de aanleg van de Maasvlakte 2 een toename van de watertemperatuur in de havenbekkens ontstaan. Om een schatting van de temperatuurverhogingen te geven is een numeriek stromingsmodel gebruikt. De warmteuitwisseling met de atmosfeer is gemodelleerd met een afkoelingsmodel. Er wordt dan alleen gekeken naar de temperatuurverhoging ten gevolge van de lozingen zelf en niet naar absolute, werkelijk optredende temperaturen.

Warmtetransportprocessen

Het getij is van grote invloed op de menging en advectie van de warmtepluimen in de havenbekkens. Tijdens doodtij treden niet per sé hogere temperaturen op dan tijdens springtij. Afhankelijk van de geometrie van het havenbekken is ofwel het één, ofwel het ander maatgevend. Zo is voor de inlaattemperatuur bij E.ON het springtij, en met name de grootte van de ebslag, van belang.

In combinatie met de getijbeweging blijkt ook de zoetwaterafvoer invloed op de advectie en afkoeling van de warmtepluimen te hebben. Hoe groter de zoetwaterafvoer, des te hoger het netto transport van warmte uit het Maasvlaktegebied, dus des te lager de temperatuurverhoging in de havenbekkens.

Warmteuitwisseling met de atmosfeer lijkt voornamelijk een rol te spelen in de verlengde Yangtzehaven (oostelijke Yangtzehaven), aangezien daar de oppervlaktetemperaturen relatief hoog zijn vanwege de E.ON/Lyondell en chemie lozingen: rond de 5°C temperatuurverhoging.

Warmtegeleiding via de waterbodem speelt geen rol en in een maatgevende zomerperiode de transport van warmte door windcirculatie ook niet.

Stratificatie

De stratificatie in de havenbekkens van het Maasvlaktegebied blijkt een belangrijke rol te spelen bij het near-field gedrag van thermische lozingen in dit gebied. Een thermische lozing is doorgaans – ondanks de temperatuurverhoging – door het hogere zoutgehalte toch zwaarder dan het ontvangende water, waardoor een ontstane warmtepluim in evenwicht komt rond het interne zoet-zout grensvlak enkele meters onder het wateroppervlak. Dit heeft een vermindering van de afkoeling van warmte naar de atmosfeer tot gevolg, en kan hogere innametemperatuur (recirculatie) bij de inlaatlocaties veroorzaken, indien ingenomen wordt op dezelfde diepte als waar de warmtepluim ingesloten is.

Toetsing CIW-richtlijn

Om te kunnen voldoen aan de CIW-richtlijn met de huidige toekomstplannen voor koelwatergebruik in het Maasvlaktegebied, moet de mengzonegrens van de E.ON/Lyondell/Chemie-lozing of bij de monding van de Yangtzehaven gekozen worden, of bij de monding van de Europahaven. De laatste geeft meer lozingsruimte, bijvoorbeeld in het geval dat er ooit vier E.ON-units tegelijkertijd operationeel zijn.

De monding van de Amazonehaven als mengzonegrens voor de Electrabel lozing blijkt geen problemen op te leveren, zelfs niet als in de toekomst een tweede unit in gebruik wordt genomen.

De EnecoGen/LionGas mengzone zal voldoen aan het mengzonecriterium van maximaal 25% van de dwarsdoorsnede ter plaatse van het lozingspunt in de monding van het Beerkanaal.

Op de lange termijn moet ook rekening worden gehouden met de klimaatverandering. De kans op overschrijding van de maximaal toegestane achtergrondtemperatuur neemt dan steeds meer toe, met als gevolg dat over 40 jaar de elektriciteitsproductie jaarlijks gemiddeld enkele dagen moet worden teruggedraaid (clipping).

Toetsing recirculatie

Recirculatie, oftewel een verhoging van de temperatuur bij de inlaatpunten, is vooral te verwachten bij de E.ON-inlaat. De jaargemiddelde temperatuurverhoging t.g.v. recirculatie is ongeveer 0,7°C, maar kan in een zomerperiode tijdens springtij en een lage zoetwaterafvoer oplopen naar ruim 1°C. Mogelijk toekomstige chemie op de Maasvlakte 2 zal 1,5 tot 3°C warmer koelwater innemen, sterk afhankelijk van de innamediepte. Het lijkt erop bij de EnecoGen-centrale, dat bij een innamediepte van -12mNAP (directe) recirculatie mogelijk met regelmaat kan voorkomen. Om meer uitsluitel te kunnen geven over de directe recirculatie tussen de inlaat en uitlaat van EnecoGen, is nader onderzoek nodig. De jaargemiddelde temperatuurverhoging bij Electrabel is laag, rond de 0,3°C.

Schade ten gevolge van rendementsverlies zal voornamelijk bij de E.ON-centrale voorkomen (chemie op Maasvlakte 2 buiten beschouwing gelaten), en wordt geschat op ongeveer twee miljoen euro per jaar. Verlies door het verplicht moeten terugdraaien van de elektriciteitsproductie (clipping) zal waarschijnlijk zelden hoeven te gebeuren. Er geldt echter dat door klimaatverandering op de lange termijn wel enkele dagen per jaar clipping nodig is.

Toetsing aan overige richtlijnen

De optredende stroomsnelheden bij onttrekking blijken geen problemen voor de vispopulaties op te leveren. Wat betreft de stroomsnelheden bij de lozingslocaties voldoet de Electrabel-lozing net aan, moet bij de E.ON-lozing de blokkendam of iets soortgelijks blijven liggen en is het aan te raden dat EnecoGen zijn uitlaatopening vergroot.

Reductie temperatuurverhoging

Aan de hand van de modelresultaten kan geconcludeerd worden in eerste instantie geen maatregelen getroffen hoeven te worden om de temperatuur(verhoging) bij de mengzonegrenzen te verlagen. Eventueel toekomstige knelpunten concentreren zich rond de E.ON / Lyondell en chemie-lozing, zowel in de gehele Yangtzehaven als bij de inname locatie. De koelwaterlozingen van Electrabel en EnecoGen lijken nauwelijks nadelige effecten op te leveren.

Een maatregel om de inname temperatuur van de E.ON-centrale te verlagen kan alleen rendabel zijn, als de kosten ervan op den duur kleiner zijn dan de te verwachten rendementsverliezen. Een aantal maatregelen dat effectief bleek, bijvoorbeeld een afvoerkanaal, zijn daarom te duur om uit te voeren.

Niet effectief bleek het verlagen van de temperatuurverhoging door vergroting van het koelwaterdebiet door de E.ON-centrale. Dit verandert niet de dag- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhoging bij de mengzonegrenzen. Wel verlaagt deze maatregel de temperatuurverhoging in de oostelijke Yangtzehaven.

Uiteindelijk blijven de volgende mogelijke oplossingsrichtingen over:

- Nulalternatief: niets doen en het rendementsverlies van E.ON-centrale afkopen.
- Dieper innemen bij de E.ON inlaat, bij voorkeur met variabele diepte-inname: zowel bovenin als onderin de waterkolom een innamepunt.
- Vestiging van thermische lozers in het Maasvlaktegebied minimaliseren, of plaatsen op de buitencontour van Maasvlakte 2 met inname uit en lozing in de Noordzee.
- By-pass bij koelwatercircuit van de E.ON-centrale toepassen, indien de temperatuurverhoging in de Oostelijke Yangtzehaven of bij de inlaat van toekomstige chemie op de Maasvlakte 2 verlaagd moet worden. Het omdraaien van de inlaat en uitlaat van de E.ON-centrale is in dit geval nog veel effectiever, maar ook duurder in uitvoering.

11 AANBEVELINGEN

Aanbevolen wordt om op korte termijn nog geen dure maatregelen te implementeren ter verlaging van de watertemperatuur in de havenbekkens. Deze temperaturen zullen naar verwachting voldoen aan de richtlijn.

Gekeken naar een langere termijn, bijvoorbeeld de komende veertig jaar, moet in de toekomst wel rekening gehouden worden een meer regelmatige overschrijding van de maximaal toegestane temperatuur (indien water voor schelpdierachtigen). Aanbevolen wordt om deze problematiek mee te nemen in het meerjaren beleid.

Vermindering recirculatie

- Aangezien de geschatte inkomstenderving door opwarming van water bij de inname locatie van E.ON rond de 2 miljoen euro per jaar liggen, is een maatregel rendabel die bijvoorbeeld binnen 10 of 20 jaar het rendementsverlies heeft terugbetaald. Een effectieve en betaalbare maatregel lijkt dieper innemen bij de E.ON-centrale, bij voorkeur in combinatie met variabele diepte-inname (innamepunten zowel bovenin als onderin de waterkolom).
- Bij de EnecoGen-centrale vindt bij een 3 m breed innamepunt mogelijk inname over de gehele diepte plaats. Het is aan te bevelen deze breedte te vergroten, zodat niet uit de bovenste laag ingenomen wordt en er minder directe recirculatie plaatsvindt. Om meer uitsluitel te kunnen geven over de directe recirculatie tussen de in- en uitlaat van EnecoGen is nader onderzoek nodig.

Aangeraden wordt om of variabele diepte-inname bij de E.ON-centrale te realiseren, of niks te doen en het rendementsverlies af te kopen.

Extra lozingsruimte

- Voor Maasvlakte 2 is van belang dat nieuwe grote warmtelozers aan de buitenkant worden gelokaliseerd met inname en lozing in de Noordzee.
- Om de mogelijkheid open te houden dat er in de toekomst toch meer thermische lozingen in het Maasvlaktegebied plaats zullen vinden, moet er op aangedrongen worden de mengzonegrens van E.ON/Lyondell te kiezen bij de monding van de Europahaven.

Beleid met het oog op duurzaamheid

- Restwarmte moet zoveel mogelijk hergebruikt worden. Voorbeelden: samenwerking tussen LNG-terminals en energiecentrales, de ‘Happy Shrimp Farm’ etc.
- Om een duurzame, schone haven te creëren is het belangrijk dat er aangedrongen wordt door het Havenbedrijf Rotterdam op slimme, moderne energiecentrales (kolenvergassingsinstallatie of waterkrachtcentrale) en niet op conventionele poederkoolcentrales. Wanneer de temperatuur van de warmtelozing aanzienlijk hoger is, kan de warmte gebruikt worden voor bijvoorbeeld stadsverwarming of voor het gebruik in de kassen in het Westland.

Mogelijke vervolgstudies

- Voorstellen tot verbetering van het Maasvlakte 2-model:
 - Analyse over de verschillen tussen het gebruik van σ -lagen en Z-lagen.
 - Meerdere lagen rond interne zoet-zout grensvlak (bij Z-lagen)
 - Aanpassing van de randen: in de Noordzee slechts één rand met waterstand als randvoorwaarde.
 - Verfijning van het modelrooster in het Maasvlaktegebied

- Mogelijkheid bekijken tot het vervaardigen van één rooster in plaats van het gebruik van ‘domein decompositie’.
- Nader onderzoek van de variabele diepte inname met een verbeterd numeriek stromingsmodel. Dit kan meer uitsluitsel geven over de te verwachten verlaging van de inname temperatuur ten opzichte van de ongewijzigde situatie.
- Het uitbreiden van het monitoringssysteem in de Rotterdamse haven, zodat er meer metingen van stroomsnelheden, saliniteit en temperatuur beschikbaar zijn. Zonder deze gegevens is het lastig nauwkeurig te modelleren en voorspellingen te doen.
- Onderzoek naar de ecologische effecten in de Oostelijke Yangtzehaven, wanneer de oppervlaktetemperatuur daar circa 5°C toegenomen is.
- Er wordt aangeraden de mogelijkheden te onderzoeken voor de uitvoering van aangepaste nieuwe energiecentrales met hoger rendement of met beter gebruik van de restwarmte (bijvoorbeeld kolenvergassingcentrales i.p.v. poederkoolcentrales of vervanging van kolen door biomassa, indien biomassa duurzaam verkregen is, d.w.z. niet door ontbossing en wanneer het tweede generatie biomassa betreft).

LITERATUUR

Rapporten & artikelen

- BAPTIST, M.J. EN UIJTTEWAAL, W. (2005) Transport and mixing of cooling water; guidelines and modelling practice. *Delft*
- BATTJES, J.A. (2002) Collegehandleiding CT3310 Stroming in waterlopen. *TU Delft*
- BLOKLAND, T. (2006a) Koelwaterafvoer E.ON bij MV2; Verlenging van koelwaterafvoer: functionele eisen, ontwerpen en kostenramingen. *Gemeentewerken Rotterdam, HH1218 / HH1307*
- BLOKLAND, T. (2006b) Koelwaterafvoer E.ON bij MV2; Binnenmeerfase: functionele eis en ontwerp van spuiduiker in zeewering en afvoer naar Yangtzehaven. *Gemeentewerken Gemeente Rotterdam, HH1307*
- BODERIE, P. EN DARDENGO, L. (2003) Warmtelozing in oppervlaktewater en uitwisseling met de atmosfeer. Een inventarisatie van rekenmethodieken en modellen. *WL|Delft Hydraulics, Q3315*
- BRESSER, M. EN WÜRDEMANN, M. (2007) Rapportage koelwaterproblematiek vanwege aanleg Tweede Maasvlakte. *Havenbedrijf Rotterdam*
- EXPERTISECENTRUM PROJECT MAINPORT ROTTERDAM (2003) Landaanwinning – Stromingsberekeringen Detailmodel. *AAN-02-332*
- FISCHER, H.B., LIST, E.J., KOH, R.C.Y., IMBERGER, J. EN BROOKS, N.H. (1979) Mixing in Inland and Coastal Waters. *Academic Press, Inc. New York.*
- FUGRO INGENIEURSBUREAU BV (2006) Eindrapportage geotechnisch grondonderzoek, opdracht nummer 2106-0053-000
- GENSEBERGER, M. EN NOLTE, A. (2007) Koelwaterlozingen vanaf MV1 en MV2 op de Noordzee. *WL|Delft Hydraulics, Z4162*
- HAVENBEDRIJF ROTTERDAM N.V. (2004) Hydro Meteo: Informatiebundel nr. 3.
- HELING, R., MADERICH, V., KOSHEBUTSKY, V. EN JANSSEN, B. (2005) Modelling of discharges of cooling water in the Beerkanaal; a 3D model evaluation of cooling water discharges of the ENECO power plant into the Harbour. *KEMA*
- HELING, R., KOSHEBUTSKY, V., MADERICH, V., JANSSEN, B. EN JENNER, H.A. (2007a) Koelwaterlozingen in de Maasvlakte door Electrabel; evaluatie van de verspreiding van koelwater in de maasvlaktehavens. *KEMA*,
- HELING, R., KOSHEBUTSKY, V., BEZHENAR, R., MADERICH, V., JANSSEN, B. EN JENNER, H.A. (2007b) Modelling van de E.ON koelwaterlozing op de 2^e Maasvlakte: vervolgstudie. *KEMA, 21947/06.77589/P*
- HENDERSON-SELLERS, B. (1984) Engineering Limnology. *Pitman Publishing LTD, London, 127-135*
- ROYAL HASKONING (2006) Onderzoek naar de koelwaterproblematiek van de Maasvlaktecentrale, *9R5216.01*

- JENNER, H. (2007) Modelvergelijking warmtelozing MV2. *KEMA*
- JIRKA H., DONEKER R.L. EN HINTON S.W. (1996) User's manual for CORMIX. *Cornell University, New York*
- KAY, J.M. EN NEDDERMAN, R.M. (1957) An introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer, third edition. *Cambridge University Press, Cambridge*
- KLEISSEN, F. (2003) Invloed van Maasvlakte 2 op E.ON warmtelozing, definitief rapport. *WL|Delft Hydraulics, Z3599*
- KLEISSEN, F. (2004a) Invloed van Maasvlakte 2 op E.ON warmtelozing, Resultaten modelberekeningen. *WL|Delft Hydraulics, Z3599.10*
- KLEISSEN, F., VILLARS, M. EN NOLTE, A. (2004b) Temperatuurontwikkeling in een tijdelijk binnenmeer in Maasvlakte 2 en mogelijke implicaties van regelgeving. *WL|Delft Hydraulics, Z3918*
- KLEISSEN, F. (2007a) Warmtelozingen in het Maasvlakte 2 gebied; Aanvullende model berekeningen voor de verlaging van de temperatuur in de haven. *WL|Delft Hydraulics, Z4249*
- KLEISSEN, F. (2007b) Modelvergelijking warmtelozing MV2. *WL|Delft Hydraulics, Z4424*
- KLEISSEN, F. EN HELING, R. (2007c) Warmtelozingen in de toekomstige Maasvlakte 2; Warmtemodelvergelijking tussen WL en KEMA. *WL|Delft Hydraulics en KEMA, Z4424*
- KRANENBURG, C. (1998) Collegehandleiding CT5302 Dichtheidsstromen. *TU Delft*
- LIGTERINGEN, H. EN DIKEMA, G.P.J. (2007) Koelwater Maasvlakte 2. Second opinion probleem-analyse en oplossingsrichtingen. *TU Delft, 480046*
- NOLTE, A., BLOK, B., VAN DER POT, J. (2004) Temperatuurmetingen E.ON centrale maasvlakte. *WL|Delft Hydraulics, Z3845*
- NOLTE, A., KLEISSEN, F. (2006) Effect van Cumulatieve Warmtelozingen in het MV1 en MV2 havengebied. *WL|Delft Hydraulics, Z4088*
- PLOUMEN, P.J., VAN RIJEN, S.P.N. (2004) Invloed van de koelwatertemperatuur op vermogen en rendement voor een STEG-, kolengestookte en Combi-eenheid. *KEMA, 50331044-KPS/TPE 03-1112*
- PROJECTORGANISATIE MAASVLAKTE 2 (2007a) Maasvlakte 2: Atlas bij Masterplan 3.3.1. *Havenbedrijf Rotterdam N.V.*
- PROJECTORGANISATIE MAASVLAKTE 2 (2007b) Milieueffectrapport Bestemming Maasvlakte 2, Hoofdrapport. *Havenbedrijf Rotterdam N.V., 9P7008.B1*
- PROJECTORGANISATIE MAASVLAKTE 2 (2007c) Milieueffectrapport Aanleg & Bestemming Maasvlakte 2, Bijlage Water. *Havenbedrijf Rotterdam N.V., 9P7008.A5.K4*
- RIJKSWATERSTAAT (2004) CIW beoordelingssystematiek warmtelozingen. *Ministerie van Verkeer en Waterstaat*

RIJKSWATERSTAAT (2005) Richtlijnen Vaarwegen 2005. *Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RWS/SDG 2006/21059*, 28-31

RO TSAERT, M. (2004) Meetrapport Temperatuur en Zoutmeting Europahaven. *Havenbedrijf Rotterdam*

STELLING, G.S., BOOIJ, N. (1999) Lecture notes CT 4340 Computational modelling flow and transport. *TU Delft*

STUURGROEP MILIEUMONITORING REGIO ROTTERDAM (1999) Het milieu in de regio Rotterdam 2007. *DCMR Milieudienst Rijnmond, Schiedam*, 77-82

VATVANI, D., KLEISSEN, F. (2005) Invloed van de gewijzigde Yangtzehaven lay-out op de E.ON warmtelozing. *WL|Delft Hydraulics, Z4002*

WL|DELFT HYDRAULICS (2006) Delft3D–FLOW User Manual, versie 3.13.

Websites

<http://ioc.unesco.org>

<http://www.getij.nl>

<http://www.helpdeskwater.nl/emissiebeheer>

<http://www.knmi.nl>

<http://www.maasvlakte2.com>

<http://www.eon-benelux.com/eonwww/publishing.nsf/Content/MPP3>

<http://www.portofrotterdam.com/nl/hydrometeo>

<http://www.waterbase.nl>

<http://www.waterstat.nl>

<http://www.wikipedia.com>

SYMBOLLEN

Latijn

| | | |
|-------------------|---|-------------------------------------|
| A | oppervlakte van de opening van een koelwateruitlaat | [m ²] |
| A_h | bergend oppervlak havenbekkens (totaal in Maasvlaktegebied ~ 11,1 km ²) | [m ²] |
| B | specifieke buoyancy-flux | [m ⁴ /s ²] |
| c | voortplantingssnelheid van een lange golf | [m/s] |
| C | concentratie van warmte (temperatuur) | [°C] |
| C_p | soortelijke warmte van het koelwater, circa 4,2 J/(kg.K) | [J/(kg.K)] |
| Cr | Courant getal | [-] |
| C_t | uitwisselingscoëfficiënt | [m/s] |
| d | gemiddelde/maatgevende waterdiepte in de havenbekkens | [m] |
| d | (in Delft3D-FLOW) diepte onder een horizontale referentievlak | [m] |
| dT | temperatuurverhoging van het koelwater | [°C] |
| D | diffusiecoëfficiënt | [m ² /s] |
| f | Coriolis parameter | [1/s] |
| g | zwaartekrachtsversnelling, gelijk aan 9,81 m/s ² | [m/s ²] |
| h | waterstand | [mNAP] |
| H | diepte ($d-\zeta$) | [m] |
| K | dispersiecoëfficiënt | [m ² /s] |
| K_{aw} | warmteoverdrachtscoëfficiënt / afkoelingsgetal (μC_t) | [W/(m ² .°C)] |
| L | golflengte van het getij | [m] |
| L_b | lengteschaal van indringing van inkomende pluim in ontvangend water | [m] |
| L_m | lengteschaal van indringing van inkomende straal in ontvangend water | [m] |
| L_M | lengteschaal waarover de overgang van straal- naar pluimgedrag plaats vindt | [m] |
| L_Q | lengteschaal waarover de geometrie van de uitloop de straal domineert | [m] |
| $L(t)$ | warmtelast ten gevolge van thermische lozingen | [MWth] |
| M | specifieke momentum-flux | [m ⁴ /s] |
| $M_{x,y}$ | externe impulsbron in x- of y-richting | [m/s ²] |
| P_x / P_y | horizontale drukgradiënten | [kg/m ² s ²] |
| q | warmteflux (in vectornotatie) | [°C.m ² /s] |
| q | onttrekkingsdebiet bij een inlaatlocatie per strekkende meter | [m ² /s] |
| q_{in}, q_{uit} | locale bronnen en onttrekkingen van water per volume-eenheid | [1/s] |
| Q_a | atmosferische straling (lange golf straling) | [W/m ²] |
| Q_{br} | achtergrondstraling (lange golf straling) | [W/m ²] |
| Q_{co} | convectie | [W/m ²] |
| Q_{ev} | evaporatie | [W/m ²] |
| Q_g | netto instroom / getijdebiet | [m ³ /s] |
| $Q_{g,gem}$ | gemiddeld getijdebiet (in warmtebalans gemiddeld over het gehele getij) | [m ³ /s] |
| Q_H | gemiddelde afvoer Hartelkanaal | [m ³ /s] |
| Q_k | debiet van een koelwatersysteem | [m ³ /s] |
| Q_s | zonnestraling (korte golf straling) | [W/m ²] |
| Q_t | netto warmteuitwisseling over het water-lucht grensvlak | [J/(m ² .d)] |
| Q_{th} | thermische warmtelast | [MWth] |
| R_0 | dimensieloze Richardson getal | [-] |
| s | afgelegde afstand (excursie) | [m] |
| S | saliniteit | [ppt] of [PSU] |

| | | |
|--------------|--|--------------------------|
| S_{area} | wateroppervlak, met betrekking tot het exces temperatuurmodel | [m ²] |
| t | tijd | [s] |
| T | watertemperatuur | [°C] |
| T_e | evenwichtstemperatuur van het oppervlaktewater (zonder lozingen) | [°C] |
| $T_{g; in}$ | gemiddelde watertemperatuur van inkomend getij | [°C] |
| T_w | temperatuur van het water met lozingen | [°C] |
| $T_{e/v}$ | duur van de eb of vloed | [s] |
| T_H | watertemperatuur Hartelkanaal | [°C] |
| T_s | getijperiode, 44700 s | [s] |
| \mathbf{u} | stroomsnelheid (in vectornotatie) | [m/s] |
| u | snelheidscomponenten in x-richting | [m/s] |
| u_a | stroomsnelheid van een dwarsstroming t.o.v. een lozing | [m/s] |
| u_k | stroomsnelheid van een lozing ter plaatse van het lozingspunt | [m/s] |
| U_{10} | windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak | [m/s] |
| U_m | maximale snelheid | [m/s] |
| v | snelheidscomponenten in y-richting | [m/s] |
| V_g | komberging | [m ³] |
| V_h | gemiddeld volume van het water in de havenbekkens | [m ³] |
| Z | zelfkoelingsgetal | [W/(m ² .°C)] |

Grieks

| | | |
|-----------------|--|--------------------------|
| α | coëfficiënt bij de berekening van de ingenomen laagdikte ($\alpha \sim 2,4$ tot $4,8$) | [-] |
| δ | laagdikte waaruit wordt ingenomen (selectieve onttrekking) | [m] |
| Δh | getijslag | [m] |
| $\Delta \rho$ | dichtheidsverschil | [kg/m ³] |
| $\Delta \rho_S$ | dichtheidsverschil ten gevolge van verschil in saliniteit | [kg/m ³] |
| $\Delta \rho_T$ | dichtheidsverschil ten gevolge van de opwarming (dT) | [kg/m ³] |
| Δt | tijdstap | [s] |
| ΔT | temperatuurverhoging van het koelwater | [°C] |
| Δx | celgrootte in x-richting | [m] |
| Δy | celgrootte in y-richting | [m] |
| ε | relatieve dichtheidsgradiënt | [-] |
| ζ | waterhoogte onder een horizontale referentievlaak | [m] |
| θ | temperatuursurplus ten gevolge van de thermische lozingen ($T_w - T_e$) | [°C] |
| μ | soortelijke warmte water (per volume-eenheid en per graad) | [J/(m ³ .°C)] |
| ω | snelheid gerelateerd aan het σ -vlak | [m/s] |
| ρ_w | dichtheid van water | [kg/m ³] |
| σ | afstand gerelateerd aan het σ -vlak | [-] |
| φ_m | massastroom | [kg/s] |
| v_H / v_{vH} | horizontale / verticale turbulentie diffusiviteit | [m ² /s] |

AFKORTINGEN

| | |
|------|---|
| ABK | Algemene Beraadsgroep Koelwater (ABK-richtlijnen 1975) |
| CIW | Commissie Integraal Waterbeheer (CIW-beoordelingssystematiek 2004) |
| HbR | Havenbedrijf Rotterdam |
| KEMA | Keuring Elektrotechnisch Materieel Arnhem |
| KNMI | Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut |
| LWS | Laag Water bij Springtij ('Low Water at Spring Tide') |
| MER | Milieu-effectrapportage |
| MSL | Gemiddeld zeeniveau ('Mean Sea Level') |
| MV2 | Tweede Maasvlakte |
| MWe | Symbool van de eenheid megawatt voor geproduceerde elektrische energie. |
| MWth | Symbool van de eenheid megawatt voor geproduceerde thermische energie |
| NAP | Normaal Amsterdams Peil |
| PKB | Planologische Kernbeslissing |
| PMR | Project Mainportontwikkeling Rotterdam |
| PMV2 | Projectbureau Maasvlakte 2 |
| ppt | 'parts per thousands' (ook wel gebruikt: promille of PSU) |
| PSU | 'Practical Salinity Unit' (ook wel gebruikt: promille of ppt) |
| RH | Royal Haskoning |
| RIKZ | Rijksinstituut voor Kust en Zee, een specialistische dienst van Rijkswaterstaat |
| TS | Toekomstig Scenario (met basis lozingsscenario en zonder maatregelen) |
| WL | Waterloopkundig Laboratorium Delft (WL Delft Hydraulics), tegenwoordig Deltares |
| Wvo | Wet verontreiniging oppervlaktewater |

BIJLAGEN

A Reeds uitgevoerde studies koelwaterproblematiek MV1&2

A.1 Chronologisch overzicht eerdere studies

Hieronder is een chronologisch overzicht gegeven van alle studies die sinds 1999 over de koelwaterproblematiek in de Maasvlakte 1&2 zijn uitgevoerd. Tevens zijn per studie in het kort de kernpunten erbij vermeld.

99-01 HbR: (E. van der Hout) Literatuurstudie koelwateruitlaat MV-centrale (Samenwerkingsverband Maasvlakte 2)

- Onderzoeken voor bouw centrale: circulatierichting (in- of uitlaat op zee?)
- Verspreiding van koelwater, kortsluitstroming, alternatieven voor lozing in havenbekken.

03-10 WL: (Frank Kleissen) Invloed van Maasvlakte 2 op E.ON warmtelozing, definitief rapport

- Met verouderde lay-out en algemene aannames temperatuur in Yangtzehaven en bij inlaat gemodelleerd.
- Conclusie: significante recirculatie (tot enkele graden) van E.ON koelwater.

04-01 WL: Invloed van Maasvlakte 2 op E.ON warmtelozing, Resultaten modelberekeningen

- Verouderde lay-out bestaande Maasvlakte 2 model (Gemeentewerken Rotterdam) is aangepast en voor twee scenario's (35 m³/s en 260 m³/s) zijn simulaties uitgevoerd.
- Gerekend met springtij, dus geen bovengrens.
- Temperatuurverhoging bij E.ON inlaat blijkt 0,3 resp. 4,1 °C te zijn.
- Uitgewerkte alternatieven:
 - 'Verplaatsing inlaat naar Hartelhaven': reductie tot 0,1 °C (debiet van 35 m³/s).
 - 'Verwijdering Papegaaibek': reductie tot 0,2 °C (lozingsdebiet van 35 m³/s).

04-02 KEMA: (in opdracht van energiebedrijven) Invloed van de koelwatertemperatuur op vermogen en rendement voor een STEG-, kolengestookte en Combi-eenheid.

- Doel: kijken wat gevolgen zijn van kleiner debiet met hogere uitlaattemperaturen op rendement en productie van drie kolencentrales in Nederland.
- De invloed van de koelwater inlaat temperatuur op de energie productie bleek ongeveer 0,3% per graden. (Voor superkritische energiecentrales de reductie van energie is 0,21% per graden en voor de gecombineerde cyclus 0,34%.)
- Het verminderen van het koelwaterdebiet zal resulteren in efficiëntie en energie reductie. Echter, deze reducties zijn kleiner dan de reducties veroorzaakt door begrenzing van de 30°C koelwater temperatuur.

04-11 HbR: (Marc Rotsaert) Meetrapport Temperatuur en Zoutmeting Europahaven

- Zie rapport

04-11 WL: Temperatuurmetingen E.ON centrale maasvlakte (in opdracht van E.ON)

- In lagune tussen blokkendam en MV eerste 400mx50m geen afkoeling
- Etc, zie samenvatting rapport

04-12 WL: Temperatuurontwikkeling in een tijdelijk binnenmeer in Maasvlakte 2 en mogelijke implicaties van regelgeving

- Situatie binnenmeer zal ongeveer 9 maanden tot jaar duren.

- Zonder en met getij-uitwisseling gesimuleerd, resp. 3 en 1°C opwarming ('zonder getij-uitwisseling' is maximaal scenario, het waterniveau in meer zal stijgen met 22 cm per dag)

05-07 WL: (F. Kleissen en D. Vatvani) *Invloed van de gewijzigde Yangtzehaven lay-out op de E.ON warmtelozing*

- Gerekend met springtij, dus geen bovengrens en wel/geen stratificatie onduidelijk
- Gerekend met lozingsdebieten van 35 en 260 m³/s, en drietal simulaties met 150 m³/s.
- Uitgewerkte alternatieven:
 - Verplaatsen lozingspunt: geen significant verschil (misschien i.c.m. spuisluis ZO?)
 - Verdiepen van het innamepunt: geen positief effect, geloosde water zinkt.
 - MV2 zonder chemie deel: recirculatie het kleinst vanwege grotere getijstroom.
 - Omwisselen van in- en uitlaat: geen positief effect (alleen bij temp. bodemlaag)
 - Getij-uitwisseling Yangtzehaven en Noordzee: bij 40 m³/s nauwelijks effect, alleen lokaal).

06-01 WL: (F. Kleissen, A. Nolte) *Effect van Cumulatieve Warmtelozingen in het MV1 en MV2 havengebied.*

- Betreffende CIW: Het criterium dat de toegestane verhoging van de achtergrondtemperatuur tot 3 graden beperkt, wordt eerder overschreden dan het criterium dat de toegestane mengzone tot 25% beperkt.
- Warmtelozingen zijn met 3 scenario's uitgerekend. Normoverschrijding treedt vooral op in de Yangtzehaven. (Gemiddelde verhoging achtergrondtemperatuur met 1°C in MV1 en 2 tot 4°C in MV2, max. 5°C). Ook vindt er enige recirculatie plaats (Europahaven 1 tot 2°C).
- De draagkracht voor warmtelozingen voor afzonderlijke havenbekkens is afgeleid. Deze neemt af als de cumulatieve opwarming meegenomen wordt.

06-03 RH: *Onderzoek naar de koelwaterproblematiek van de Maasvlaktecentrale, Definitief*

- Zie rapport... (samenvattend)

06-04 GR: (T. Blokland) *Koelwaterafvoer E.ON bij MV2; Verlenging van koelwaterafvoer: functionele eisen, ontwerpen en kostenramingen.*

- Goede uitleg van hydraulische aspecten koelsysteem E.ON centrale
- Behandelde maatregelen:
- Verlenging afvoer 500 m (155 m³/s, verval 0,25 m), incl. spuiduiker: ca 23 mlj.
- Koelwaterkanaal 4,2 km (275 m³/s?, verval: 0,5m), incl. spuiduiker: ca 200 mlj.

06-? KEMA: (H. Jenner) *Intern onderzoek E.ON; Modelleren E.ON 1,2,3,4 + Electrabel*

06-11 GR: (T. Blokland) *Koelwaterafvoer E.ON bij MV2; Binnenmeerfase: functionele eis en ontwerp van spuiduiker in zeewering en afvoer naar Yangtzehaven*

- Zie rapport...

07-01 WL: (A. Nolte, M. Genseberger) *Koelwaterlozingen vanaf MV1 en MV2 op de Noordzee*

- Lozing aan de noordkant van Maasvlakte 2 blijkt kleinere warmtepluim te hebben dan lozing in zuiden of huidige lozingslocatie (getijstrooming daar parallel aan de kustlijn).

07-01 WL: (F. Kleissen) *Warmtelozingen in het Maasvlakte 2 gebied; Aanvullende model berekeningen voor de verlaging van de temperatuur in de haven.*

- Alternatieven:

- Geforceerd lozen van water uit havenbekken MV2 (spuisluis): Bij warmtevracht van 4500 MW is onttrekkingsdebiet van 180 m³/s nodig. Bij Oosthaven onttrekking recirculatie van 1,4 (geen onttrekking) naar 0,6 °C (200 m³/s onttrekking)
- Diffusor op de E.ON lozing, eventueel i.c.m. met verdiepte inlaat: weinig effect

07-01 *HbR: Maasvlakte 2, Atlas*

- Plattegronden inclusief aanlegfasen

07-03 *HbR: (M. Bresser) Rapportage koelwaterproblematiek vanwege aanleg Tweede Maasvlakte*

- Zie rapport...

07-07 *WL: (F. Kleissen) Modelvergelijking warmtelozing MV2*

- Input en randvoorwaarden gelijk aan die van het modelleren door KEMA. Resultaten:
- Verwachte achtergrondtemperatuurverhoging in Yangtzebekken van ca. 2,7 °C.
- Verwachte grootte recirculatie bij inlaat E.ON ca. 0,6 tot 0,8 °C.

07-07 *KEMA: (H. Jenner) Modelvergelijking warmtelozing MV2*

- Input en randvoorwaarden gelijk aan die van het modelleren door WL. Resultaten:
- Verwachte achtergrondtemperatuurverhoging in Yangtzebekken van ca. 2,6 – 2,7 °C.
- Verwachte grootte recirculatie bij inlaat E.ON ca. 0,7 °C, met variatie van 0,4 °C.
- Eventuele chemie warmtelozingen voegen 0,1 – 0,2 °C opwarming toe.

07-07 *TUD: Contra expertise, concept*

- Aanbeveling om extra debiet door koelwatersysteem E.ON-centrale (lagere dT) te pompen.

A.2 *Samenvatting modelresultaten eerdere studies*

Zoals vermeld is er sinds 2003 al een aantal studies uitgevoerd naar de grootte van de temperatuurverhoging in de havenbekkens ten gevolge van uitbreiding van warmtelozingen en de aanleg van de 2e Maasvlakte. Deze studies zijn uitgevoerd door WL|Delft Hydraulics (in opdracht van het HbR) en door KEMA (in opdracht van de energiecentrales). WL gebruikt het model Delft3D-FLOW en KEMA het model THREETOX. Tijdens dit onderzoek is een modelvergelijking tussen beide modellen uitgevoerd. In dit hoofdstuk worden beknopt de resultaten en verschillen besproken.

Definitie verschillende scenario's eerdere studies

Bij de oudste studies werden meerdere toekomstige lozingsscenario's opgesteld, zie bijvoorbeeld de volgende tabel. Globaal bestonden deze uit:

- een lage warmtelast (weinig uitbreiding energiecentrales, chemie laag)
- een midden warmtelast (te verwachten uitbreiding energiecentrales, chemie laag/hog)
- een hoge warmtelast (verdere uitbreiding energiecentrales, chemie hoog)

Voorbeeld scenario's koelwaterlozingen uitgedrukt in warmtelasten

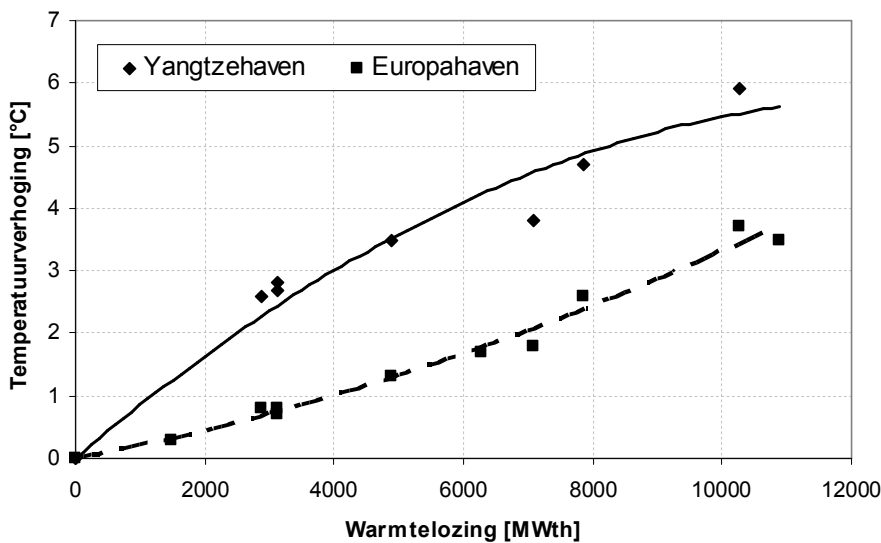
| Scenario: | Referentie 1 | Referentie 2 | Minimum (chemie laag) | Midden MV1 (Chemie hoog) | Midden MV1+2 (chemie laag) | Midden MV1+2 (chemie hoog) | Maximum (chemie laag) | Maximum (chemie hoog) | Conclusie | |
|----------------------------|---|--------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------------|
| Therm lozing MV totaal | 1750 | 2750 | 5000 | 8250 | 5800 | 6800 | 6800 | 7800 | 6800 | 5000 - 8250 |
| op MV1 | | | 1250 | 2050 | 2050 | 2050 | 2050 | 2050 | 2050 | 2050 |
| op MV2 | 1750 | 2750 | 3750 | 5750 | 3750 | 4750 | 4750 | 5750 | 4750 | 3750 - 5750 |
| Temperatuurverhoging in °C | De hieronder aangegeven temperatuurverhogingen zijn mediane verhogingen, bij gemiddeld tij. | | | | | | | | | |
| in MV1 | 0,2 | 0,3 | 1,2 | 2,2 | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 2,2 | 1,8 | 1,5 - 2,5 |
| in MV2 | 1,4 | 2,2 | 3 | 4,6 | 3 | 3,8 | 3,8 | 4,6 | 3,8 | 3 - 4,6 |
| Europahaven | 0,5 | 0,8 | 1,4 | 2,4 | 1,6 | 1,9 | 1,9 | 2,2 | 1,9 | 1,4 - 2,4 |

Vaak werden echter onrealistisch hoge lozingsdebieten gemodelleerd. Bij de laatste modelstudie, de modelvergelijking, is een uniform scenario geformuleerd, bestaande uit alleen de toekomstige lozingen in de 2^e Maasvlakte. De overige lozingen in de Maasvlakte 1 bleven buiten beschouwing.

Resultaten eerdere studies

In de onderstaande figuur zijn alle resultaten uit eerdere studies weergegeven, met de totale lozing uitgezet tegen de temperatuurverhoging in zowel de verlengde Yangtzehaven als de Europahaven. De locaties van de lozingen zijn hier niet meegenomen, wat betekent dat de resultaten niet representatief zijn, maar hooguit een indicatie van de temperatuurverhoging geven. Toch zijn er duidelijk trendlijnen te zien voor de opwarming in de Yangtze- en Europahaven.

Vergeleken met de warmtebalans (paragraaf 5.5), komen de resultaten redelijk overeen.



Samenvatting van de resultaten uit eerdere studies: grafiek geeft gevonden temperatuur-verhogingen in de verlengde Yangtzehaven en Europahaven weer in de situatie dat de 2^e Maasvlakte voltooid is, uitgezet tegen de totale lozing.

De nieuwste studies van WL|Delft (met Delft3D-FLOW) en KEMA (met THREEETOX) zijn uitgevoerd met een totale warmtebelasting van 3118 MWth (E.ON met derde unit, Lyondell en chemie). De studies voorspellen de volgende temperatuurverhogingen (zonder ondernomen maatregelen):

- Volumegemiddelde opwarming van de verlengde Yangtzehaven:
 - Met Delft3D-FLOW: gemiddeld circa 2,7°C, variërend tussen 2,1°C en 3,3°C.
 - Met THREEETOX: gemiddeld circa 2,1°C, variërend tussen 1,5°C en 2,8°C.

- Verhoging van de E.ON inlaattemperatuur (met zoetwaterafvoer van 2001 en van 2004):
 - Met Delft3D-FLOW: 0,6°C - 0,7°C
 - Met THREETOX: 0,3°C - 1,1°C.
- Bij beiden is de extra temperatuurverhoging t.g.v. de chemie warmtelozingen circa 0,1 – 0,2°C.

Discussie resultaten eerdere studies

Het blijkt dat de resultaten van bovenstaande modellen redelijk met elkaar overeenkomen. Dit komt doordat de eigenschappen van beide modellen grotendeels overeen komen [BAPTIST & UJTTEWAAL, 2005]. Beiden veronderstellen namelijk een hydrostatische aanname.

Het grootste verschil in de resultaten van beide modellen is de veel sterkere invloed van de zoetwaterafvoer bij het THREETOX model. Dit kan veroorzaakt worden door twee aspecten. Aan de ene kant heeft het THREETOX model een fijner grid en geeft het waarschijnlijk beter de stratificatie rond het Beerkanaal weer. Bij een grotere zoetwaterafvoer wordt dan meer warmte in de bovenlaag van het watersysteem afgevoerd. Aan de andere kant liggen de randen van het THREETOX model zeer dicht bij het interessegebied. Aan de andere kant kan de aanname in het THREETOX model, dat wanneer warmte door de monding van het Beerkanaal het model uitstroomt niet meer tijdens vloed het model instroomt, een overschatting van de afkoeling door de zoetwaterafvoer geven. Het lijkt erop dat de waarheid tussen de resultaten van beide modellen in ligt.

Bij alle eerdere studies wordt de temperatuurverhoging ten gevolge van de warmtelozingen getoetst aan de CIW-richtlijn op basis van de volumegemiddelde temperatuurverhogingen. De oudste studies wezen een hogere opwarming aan van de havenbekkens dan de meest recente studies. Een sluitend antwoord is dus niet te geven.

Rijkswaterstaat zal echter hoogstwaarschijnlijk niet toetsen op doorsnedegemiddelde temperatuurverhogingen, maar op etmaal- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhogingen op de gekozen mengzonegrenzen, zie paragraaf 3.3. Dit laatste is nog niet goed onderzocht en een aanvullende studie kan hier dus meer duidelijkheid over geven.

De resultaten moeten met enige nauwkeurigheidsmarge beoordeeld worden. Zo is het nog niet eenduidig wat variaties van verscheidene inputparameters (zoals doortijd & springtijd, rivierafvoer en alternatieve lozingsscenario's etc) voor een invloed hebben op de temperatuurverhoging in de havenbekkens. Een gevoeligheidsanalyse van de belangrijkste parameters in de gebruikte modellen is daarom een interessante vervolgstudie.

Opgemerkt moet worden dat de nieuwste studies slechts gericht zijn op de lozingen in de toekomstige 2^e Maasvlakte. Het modelleren van een cumulatief scenario met de mogelijk toekomstige lozingen in de 1^e Maasvlakte erbij is wenselijk.

Mogelijke verbeterpunten

Voortbordurend op de discussie in de vorige paragraaf wordt hier een concreet overzicht gegeven van de mogelijke verbeterpunten voor een eventuele vervolgstudie:

- Validatie van het model, met name aandacht voor saliniteit, en dus het verbeteren van de weergave van stratificatie.
- Het modelleren van het nieuwste scenario met cumulatieve lozingen in tegenstelling tot alleen de lozingen in de Maasvlakte 2, zoals bij de hiervoor beschreven modelvergelijking is toegepast.
- Het geven van een consistent geheel, ook in de benadering van mogelijke oplossingsrichtingen. Door de vele wijzigingen de afgelopen jaren ontbreekt de samenhang en een consistente benadering van de koelwaterproblematiek.
- Gevoeligheidsanalyse van de relevante processen.

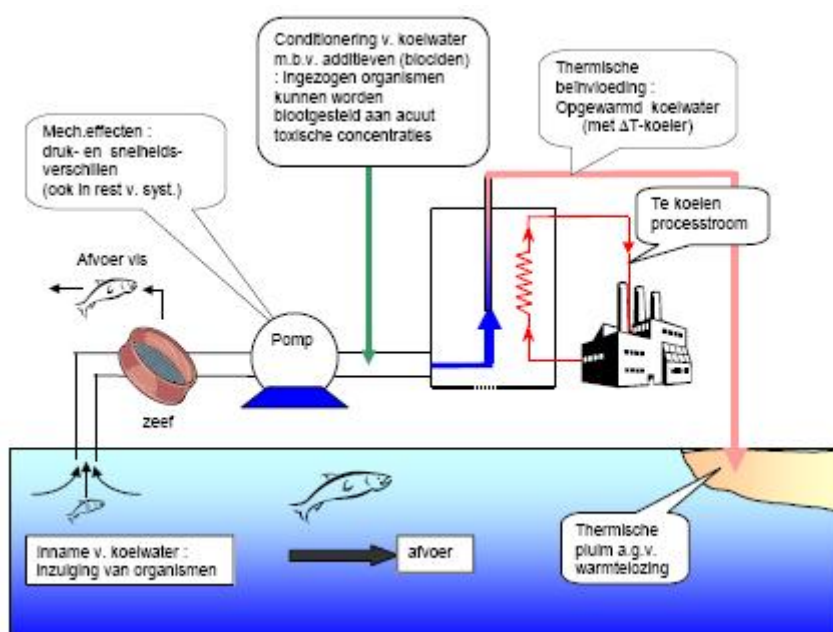
- Een meer probabilistische benadering van het optreden van bepaalde toekomstscenario's. (achtergrondtemperaturen, afvoeren, lozingsdebieten etc.)
- Heldere presentatie van de gevonden resultaten, waarin verschillende gedefinieerde scenario's worden meegenomen van het voorkomen van bepaalde temperatuurverhogingen, te weten:
 - etmaal- en doorsnedegemiddelde temperatuurverhogingen op de mogelijk toekomstige mengzonegrenzen, m.b.t. de CIW-richtlijnen;
 - temperatuurverhogingen bij de inlaatpunten, m.b.t. de recirculatie.
- Eventueel het modelleren van enkele mogelijk effectieve, maar tot nu toe onderbelichte, oplossingsrichtingen.

B Achtergrondinformatie

B.1 Achtergrondinformatie ecologische effecten

Warmtelozingen kunnen negatieve effecten hebben op het ontvangende oppervlaktewater. Wanneer de havenbekkens van Maasvlakte 2 teveel opwarmen, is de kans aanwezig dat dit verandering in de populaties van vissen en overige organismen teweeg brengt. Ook exoten kunnen zich in de omgeving van het lozingspunt blijvend vestigen [RIJKSWATERSTAAT, 2004]. De negatieve effecten op het aquatisch milieu moeten geminimaliseerd worden met de nodige maatregelen, of in het uiterste geval gecompenseerd worden.

In de onderstaande figuur worden de effecten van koelwatergebruik op het omringende watersysteem en ecologie weergegeven, in het kort onder te verdelen in effecten in de koelwaterketen zelf en effecten in het oppervlaktewater.



Beïnvloeding oppervlaktewater door koelwatergebruik [RIJKSWATERSTAAT, 2004]

Effecten in de koelwaterketen

De effecten op organismen in de koelwaterketen zijn op hoofdlijnen terug te voeren naar:

- Mechanische effecten door druk- en snelheidsverschillen, koelwaterzeven en passage van pompen;
- Thermische effecten door de opwarming van het water;
- Effecten ten gevolge van eventuele conditioning van het koelwater (bijvoorbeeld gebruik van biociden).

De mate van schade is afhankelijk van het soort organisme en toestand waarin het organisme verkeert op het moment van inzuiging. Uit "Effecten van koelwater op het zoete aquatische milieu" volgt dat bij een goed visafvoersysteem overlevingscijfers van 50 tot 80% mogelijk zijn voor vis die door de zeven wordt afgevangen. Afhankelijk van de soort en zeefdiameter zijn sterftcijfers in de koelwaterketen gevonden van 18 tot 56%, bij afwezigheid van een warmteschok. Bij een warmteschok van 6 à 7,5 °C en een maximum temperatuur van 24 °C zijn sterftcijfers van 26 tot 97% gevonden. De effecten die optreden zijn sterk soortafhankelijk, voor spiering bedraagt de sterfte ca. 85-97% en bij paling en driedoornige stekelbaars treedt nauwelijks sterfte op als gevolg van mechanische schade.

Mechanische schade

In het rapport “effecten van koelwater op het zoute aquatische milieu” wordt een indicatie van de sterfte voor mariene/estuariene vissoorten gegeven op basis van onderzoek dat is uitgevoerd aan de Eemscentrale in 1981. Van soort tot soort verschilt de kwetsbaarheid voor inzuiging. De spiering en haring zijn uiterst kwetsbaar, en gaan eigenlijk onmiddellijk dood wanneer ze boven water worden gehaald. De driedoornige stekelbaars daarentegen, is een visje dat door zijn pantser van beenplaatjes enige bescherming geniet (50 % sterfte). De aal, puitaal en botervis hebben de beste overlevingskansen. De percentages zijn soms op basis van maar één tot een tiental vissen berekend. Na terugkeer in het ecosysteem kan secundaire sterfte optreden. Indien (nog) geen sterfte percentages van de vissoorten zijn vastgesteld door onderzoek, kan (vooralsnog) verondersteld worden dat 100% van de ingezogen individuen niet overleeft.

Thermische schade

Thermische schade treedt pas op bij en na passage van de condensor in de koelwaterketen. Uit een onderzoek volgt dat radardiertjes en koppotigen geen effect vertonen bij opwarming tot 34 °C. Bij een temperatuur van 30 °C vertonen zoö- en fytoplankton geen sterfte. De sterfte is bij zoöplankton afhankelijk van de soort opgelopen tot 50 à 100% bij een temperatuur van 40 °C. Bij een temperatuur van 40 °C is de sterfte opgelopen van 0% tot meer dan 50% afhankelijk van de soort.

Bij deskundigen aanwezig op de “expert meeting”, gehouden in het kader van de uitgevoerde literatuurstudies naar de effecten van warmtelozingen op het aquatische milieu, bestond de indruk dat in relatief eenvoudige koelsystemen, bijvoorbeeld bij E-centrales, met een relatief geringe verblijftijd overleving van een aanzienlijk deel van de ingezogen populatie wel tot de mogelijkheden behoort. Dit onder voorwaarde dat de koelsystemen goed worden bedreven gekoppeld aan een optimale conditionering van koelwater en het nemen van inzuigingsbeperkende maatregelen.

Extra opwarming in het koelsysteem heeft bij loslaten van de limitering van de temperatuursprong over het koelsysteem een grotere impact op in het koelsysteem ingezogen organismen. Desondanks resulteert vermindering van het koelwaterdebiet, ook in het biologische voorjaar, integraal gewogen in grotere voordelen voor het aquatische milieu.

Het streven naar minimalisatie van het koelwaterdebiet prefereert daarom boven een limitering van de koelwatertemperatuur. Vermindering van het koelwaterdebiet resulteert ook in een afname van het verbruik aan biociden en hiermee samenhangende emissie aan haloformaten naar oppervlaktewater.

Zoete en zoute paaigebieden

In paaigebieden van opgroeigebieden van juveniele vis komen vislarven en juveniele vissen in grote getale voor. Vislarven en juveniele vissen kunnen zich niet verzetten tegen de hoge stroomsnelheid ter hoogte van het innamepunt. In dit soort gebieden kan grootschalige onttrekking van koelwater effecten laten zien. Er mag géén significante beïnvloeding (van populaties) optreden.

Effecten in oppervlaktewater

Op hoofdlijnen zijn de effecten in te delen naar thermische effecten en effecten ten gevolge van de onttrekking. Bij de thermische effecten is vervolgens onderscheid te maken naar lokale effecten nabij het lozingspunt en meer regionale effecten op watersysteemniveau.

Op lokaal niveau ontstaat tengevolge van een warmtelozing een warmtepluim in het ontvangende water. In de mengzone nabij het lozingspunt wordt niet voldaan aan de waterkwaliteitsdoelstellingen en zijn mogelijke letale dan wel stress temperaturen voor organismen in beeld. Ook kunnen warmteminnende exoten overleven in de directe omgeving van de warmtelozing en inheemse soorten juist minder goed overleven. Om deze redenen mag de mengzone niet te groot zijn en géén barrière

vormen voor de migratie van trekvissen. Voor zoete wateren is het Ernstig Risico (ER)-niveau vastgelegd op 30 °C en voor zoute wateren op 25 °C.

Naast de absolute temperatuur is ook de frequentie van temperatuur-fluctuaties van belang. Deskundigen geven aan dat het Ernstig Risico (ER)-niveau voor temperatuur, op de rand van de mengzone in het ontvangende water slechts gedurende één aaneengesloten periode van maximaal 7 dagen per jaar mag worden overschreden.

Bij regionale effecten speelt de mogelijkheid dat door toename van de watertemperatuur een verschuiving optreedt in het ecosysteem. Tevens kunnen de levenscycli van organismen worden verstoord, waardoor een mismatch ontstaat in de timing van levensfasen.

Bij lozing van warmte op zee lijkt, vanwege de intensieve menging (stroming) en de aanwezigheid van zeer grote watermassa's, de mengzone een minder groot probleem te zijn, mits lozingen voldoende ver in zee plaatsvinden en de mengzone de bodem niet kan bereiken. Een groot deel van het ecologische leven in de kustzone bevindt zich op de bodem of in het onderste deel van de waterkolom. Om deze reden is bij lozingen op zee bescherming van dit deel van de waterkolom van belang.

Naar verwachtingen zullen beperkingen van migratie niet snel optreden. Vanuit ecologisch oogpunt moeten de kustzone en estuaria (met name als het gaat om paaigebieden en opgroeigebieden voor juveniele vis) als meest waardevolle gebieden worden aangemerkt.

De meest bepalende factor voor de potentiële milieu impact van warmtelozingen op zoute wateren is de onttrekking van koelwater.

B.2 Achtergrondinformatie wetgeving koelwaterlozingen

Waterkwaliteitsdoelstellingen

In de Europese wetgeving zijn waterkwaliteitsdoelstellingen geformuleerd met betrekking tot de temperatuur in het oppervlaktewater, samengevat in de volgende tabel.

| Funcietoekenning oppervlaktewater | Maximum temperatuur | Maximum temperatuurverhoging |
|---|---------------------|------------------------------|
| Basiskwaliteit (4 ^e Nota waterhuishouding) | 25°C | - |
| Water voor karperachtigen | 28°C | 3,0°C |
| Water voor schelpdierwater | 25°C | 2,0°C |
| Water voor zalmachtigen | 21,5°C | 1,5°C |

Oude ABK-richtlijn

Tot 2005 waren de ABK-richtlijnen van kracht:

- Maximale opwarming (dT) van het ingenomen koelwater bedraagt 10°C. Wanneer het ingenomen koelwater kleiner is dan 15°C, mag de opwarming hoger zijn tot een maximum dT van 15°C bij een koelwatertemperatuur van 5°C.
- Maximale temperatuur van het te lozen koelwater bedraagt 30°C.

Aangezien door deze oude richtlijnen in (extreem) warme zomers energiecentrales verplicht waren tot terugregeling van het opwekkingsvermogen, zijn sinds 2005 voor warmtelozingen nieuwe normen opgesteld. Deze zijn vastgelegd in de 'CIW-beoordelingssystematiek warmtelozingen' [RIJKSWATERSTAAT 2004], gebaseerd op de hierboven beschreven ecologische effecten.

CIW-Beoordelingssystematiek

De eis van 30°C als maximale lozingstemperatuur is losgelaten. Volgens de nieuwe richtlijn zijn een drietal criteria opgenomen, te weten:

- criterium onttrekking;
- criterium mengzone;
- criterium opwarming.

In de volgende tabel staat de CIW-richtlijn kort samengevat.

| Parameter | ABK-richtlijnen ¹ | Nieuw |
|--|--|---|
| Emissie-eisen (generiek) | | |
| T koelwater | Zoet : ≤ 30 °C | - |
| T koelwater | Zout : ≤ 30 °C | - |
| ΔT koelwater | Zoet : ≤ 7 °C (zomer) ≤ 15 °C (winter) Zout: ≤ 10 °C (zomer) ≤ 15 °C (winter) | - |
| Immissie-eisen (generiek) | | |
| Opwarming ² | ≤ 3 °C | ≤ 3 °C t.o.v de achtergrondtemperatuur ³ tot een maximum van 28° °C ⁷ |
| Immissie-eisen (watersysteem gerelateerd) | | |
| Kanalen/getijdenhavens | | |
| Onttrekking | - | geen significante effecten in paaigebied en opgroeigebied van juveniele vis, goed visafvoersysteem, debiet aantoonbaar minimaliseren (optimaliseren op debiet) ⁸ |
| Mengzone ⁵ (T > 30 °C) ⁶ | - | < 25% dwarsdoorsnede ⁷ |
| Rivieren | | |
| Onttrekking | - | geen significante effecten in paaigebied en opgroeigebied van juveniele vis, goed visafvoersysteem, debiet aantoonbaar minimaliseren (optimaliseren op debiet) ⁸ |
| Mengzone ⁵ (T > 30 °C) ⁶ | - | < 25% dwarsdoorsnede |
| Noordzee | | |
| Onttrekking | - | Streven naar zo gering mogelijke onttrekking, niet in paaigebied en opgroeigebied voor juveniele vis of trekroute, goed visafvoersysteem ⁸ |
| Mengzone ⁵ (T > 25 °C) ⁹ | - | Mengzone mag bodem niet raken |
| Estuaria | | |
| Onttrekking | - | Streven naar zo gering mogelijke onttrekking, niet in paaigebied en opgroeigebied voor juveniele vis of trekroute, goed visafvoersysteem ⁸ |
| Mengzone ⁵ (T > 25 °C) ⁹ | - | < 25% dwarsdoorsnede |

¹ De in de tabel opgenomen criteria gelden op hoofdlijnen. Voor het volledige overzicht wordt verwezen naar bijlage 2.

² Toelaatbare opwarming is respectievelijk 3 °C voor water voor karperachtigen, 2 °C voor schelpdierwater en 1,5 °C voor water voor zalmachtigen

³ Opwarming is gerelateerd aan achtergrondtemperatuur op de rand van (delen van) het watersysteem.

⁴ 28 °C voor water voor karperachtigen, 25 °C voor schelpdierwater en 21,5 °C voor water voor zalmachtigen.

⁵ Het deel van het watersysteem (in de nabijheid van een lozingspunt) dat ten gevolge van een warmtelozing op een temperatuur groter of gelijk aan 30 °C is gebracht en wordt begrensd door respectievelijk de ruimtelijke 30 °C-isotherm (zoete wateren) of de 25 °C – isotherm (zoute wateren).

⁶ Uitzonderingssituatie bij hoge achtergrondtemperatuur (> 25 °C): gedurende één aaneengesloten periode van maximaal 1 week in juli/augustus mag de temperatuur op de rand van de mengzone van 32 °C bedragen. Indien een dergelijke aanpak tot problemen leidt in de uitvoeringspraktijk kan een beheerder gemotiveerd afwijken.

⁷ Beheerder kan op basis van specifieke informatie met betrekking tot het beschouwde watersysteem gemotiveerd afwijken.

⁸ Voor zoete wateren met name van belang in het biologische voorjaar (periode 1 maart–1 juni) en voor zoute wateren in het biologische voorjaar (periode 1 februari–1 mei) en het biologische najaar (1 september –1 december). Kwantitatieve generieke criteria voor onttrekking zijn niet te geven. Voor nieuwe situaties zal middels een MER procedure moeten worden afgewogen op basis van lokale specifieke gebiedsgerichte informatie of de activiteit al of niet toelaatbaar is.

⁹ Uitgaande van een achtergrondtemperatuur van 22 °C

De interpretatie van de CIW-beoordelingssystematiek in deze paragraaf is deels afkomstig van correspondentie tussen het Havenbedrijf en de Waterdienst van Rijkswaterstaat, en betreft vooral de toetsing van de warmtelozingen in de 2^e Maasvlakte.

Toetsing aan het criterium onttrekking

Voor het criterium onttrekking zijn nog geen definitieve kwantitatieve criteria vastgesteld. Naar verwachting zal dit in 2008 plaatsvinden. In de CIW-beoordelingssystematiek is opgenomen dat de onttrekking van koelwater niet mag leiden tot significante effecten voor het aquatische milieu. Vislarven zijn in staat een stroomsnelheid van ca. 0,015 m/s te weerstaan en voor juveniele vissen ligt deze waarde op ca. 0,06 m/s. Door de onttrekking van grote hoeveelheden koelwater zal er een snelheidsgradiënt in het oppervlaktewater ontstaan waaruit water wordt onttrokken. Als er vislarven in de buurt van het innamepunt met een snelheidsgradiënt van méér dan 0,015 m/s worden geconfronteerd kan dit inzuiging in het koelsysteem tot gevolg hebben. Op basis van de omvang van het innamedebiet in relatie tot de dimensies van het oppervlaktewater waaruit wordt onttrokken kan een indicatieve inschatting worden gemaakt van de kans op inzuiging.

- Ten gevolge van het innamedebiet ter grootte van 94 m³/s wordt in de Europahaven binnen een gebied met een straal van 133 m van het innamepunt de snelheid van 0,015 m/s overschreden. Dit volume komt overeen met 0,3% van de Europahaven. Zelfs als wordt uitgegaan dat de haven kan worden aangemerkt als paaigebied, met een hoge dichtheid aan vislarven, zal dit niet leiden tot significante effecten. De dagelijkse sterfte van vislarven in een paaigebied bedraagt 3-7,5%.
- Ten gevolge van de het innamedebiet ter grootte van 94 m³/s wordt in de Europahaven binnen een gebied met een straal van 33 m van het innamepunt de snelheid van 0,06 m/s overschreden, hetgeen overeenkomt met 0,02% van het volume van de Europahaven.

Gezien de beperkte volumina waar overschrijding plaatsvindt van de kritische snelheid die kan worden weerstaan door resp. vislarven en juveniele vissen en het feit dat havens op grond van hun hydromorfologische eigenschappen minder geschikt zijn om te fungeren als paai- en opgroeigebied, zullen de dichtheden aan vislarven en juveniele vis veel lager uitvallen dan in paai- en opgroeigebieden. Dit leidt tot de conclusie dat de onttrekking van koelwater uit de Europahaven naar verwachting niet zal leiden tot significante effecten voor het aquatische milieu.

Toetsing aan het criterium mengzone

- de maximale dwarsdoorsnede van de pluim begrensd door de 25°C isotherm bedraagt ter hoogte van het lozingspunt van E.ON ca. 50%;
- de maximale dwarsdoorsnede van de pluim begrensd door de 30°C isotherm bedraagt ter hoogte van het lozingspunt van E.ON ca. 8 %.

Binnen het beleid voor warmte, zoals verwoord in de CIW-beoordelingssystematiek voor warmtelozingen, bestaat de mogelijkheid om voor de toetsing van het criterium opwarming havens geheel of gedeeltelijk aan te merken als mengzone. Een dergelijke keuze moet wel worden gemotiveerd door de waterbeheerder. Dit betekent dat binnen het gebied dat wordt aangewezen als mengzone de opwarming groter of gelijk mag zijn dan 2 °C.

Indien wordt uitgegaan van schelpdierwater ($T_{\max} = 25 \text{ °C}$ en $dT_{\max} = 2 \text{ °C}$) voor de haven wordt in strikte zin niet voldaan aan het criterium mengzone uit de CIW-beoordelingssystematiek. Echter het criterium mengzone heeft tot doel om migratie van vis mogelijk te maken. Belemmering van migratie ten gevolge van warmtelozingen moet worden voorkomen. Migratie is met name van belang voor rivieren en/of kanalen of voor wateren die verschillende watersystemen met elkaar verbinden. Voor havens speelt dit niet of nauwelijks. In het geval van schelpdierwater (mengzone 50%) is het de vraag of dit voor de ecologie tot consequenties leidt. In het ergste geval kan passage van de koelwaterpluim worden bemoeilijkt, onmogelijk wordt dit niet omdat op de bodem altijd nog koud water aanwezig is. Maar de noodzaak om de pluim te passeren is ook minder groot dan bij rivieren, waarbij passage vaak

een ‘must’ is in de levenscyclus van migrerende vissen. Vissen in de haven kunnen ook richting hoofdwatersysteem zwemmen waar koud water aanwezig is. Een eventuele habitatreductie is in de hier beschouwde situatie beperkt van omvang daar het deel ten zuiden van de warmtepluim relatief beperkt van omvang is (max. 12% van de totale Yangtzehaven).

De mogelijkheid om (delen van) een haven aan te wijzen als mengzone, waar mag worden afgeweken van de waterkwaliteitsdoelstellingen, biedt een mogelijkheid om de toetsing aan het criterium mengzone uit te voeren op de grens van de mengzone, bijvoorbeeld de begrenzing van de haven bij de monding naar Beerkanaal, waar wel kan worden voldaan het mengzonecriterium.

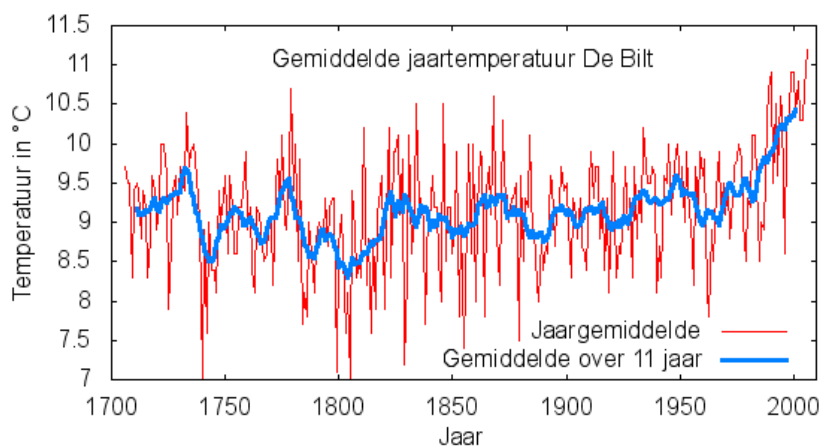
Toetsing aan het criterium opwarming

- 20% van de Yangtzehaven wordt gemiddeld opgewarmd met 3 °C of méér en maximaal 4% van de haven heeft onder extreme omstandigheden (augustus 2003) gemiddeld een temperatuur van méér dan 28 °C;
- 90% van de Yangtzehaven heeft onder extreme omstandigheden (augustus 2003) een gemiddelde opwarming over de verticaal van 2 °C of meer en maximaal 25 % van de haven wordt opgewarmd tot een temperatuur van 25 °C of meer;

Indien de grens van de mengzone wordt gelegd op de grens van de Yangtzehaven met het Beerkanaal en wordt uitgegaan van normering voor schelpdierwater wordt voldaan aan de NBW-beoordelings-systematiek voor warmtelozingen. Deze keuze voor de begrenzing van de mengzone wordt ondersteund door RWS Zuid Holland. Uitgaande van normering voor schelpdierwater is vrijwel alle ruimte (>90%) door de nu beschouwde lozingen (E.ON + Chemie) vergeven. Indien de definitieve invulling van KRW-normering wijzigt ten opzichte van de hier gekozen insteek kan dit consequenties hebben voor de toelaatbare ruimte voor warmtelozingen. Alleen als deze normering minder streng uitpakt dan de hier gekozen aanpak kan dit betekenen, dat er op termijn meer lozingsruimte ontstaat in de haven.

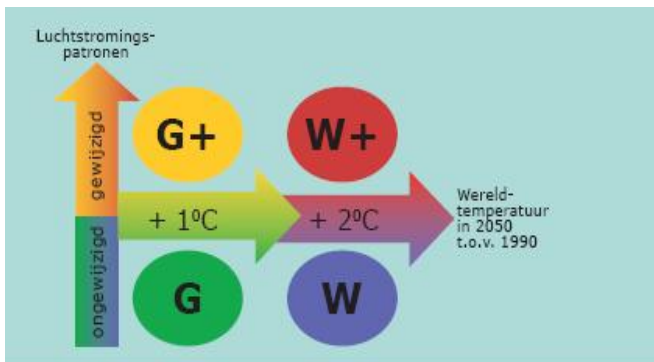
B.3 Achtergrondinformatie voorspelling klimaatverandering

Klimaatverandering heeft invloed op het criterium van maximaal toegestane achtergrondtemperatuur, en moet dus meegenomen worden bij de beoordeling van de modelresultaten. De volgende figuur toont een antieke reeks van de gemiddelde jaartemperaturen van De Bilt. De laatste 30 jaar is een sterk stijgende trend in de gemiddelde jaartemperatuur te zien. Wanneer deze trend doorzet, is de temperatuurstijging de komende 50 jaar meer dan 1 °C.



Data van KNMI, Labrijn e.a., 18 juni 2007 Mathijs Romans, verkregen via www.wikipedia.nl

Het KNMI heeft vier scenario's opgesteld hoe het klimaat er in de toekomst (2050) in Nederland uit kan zien. Deze scenario's zijn in de volgende figuur schematisch weergegeven met een korte uitleg eronder. De voorspelde klimaatverandering is ten opzichte van het jaar 1990. In de onderstaande tabel staan de voorspellingen meer gespecificeerd uitgelegd.

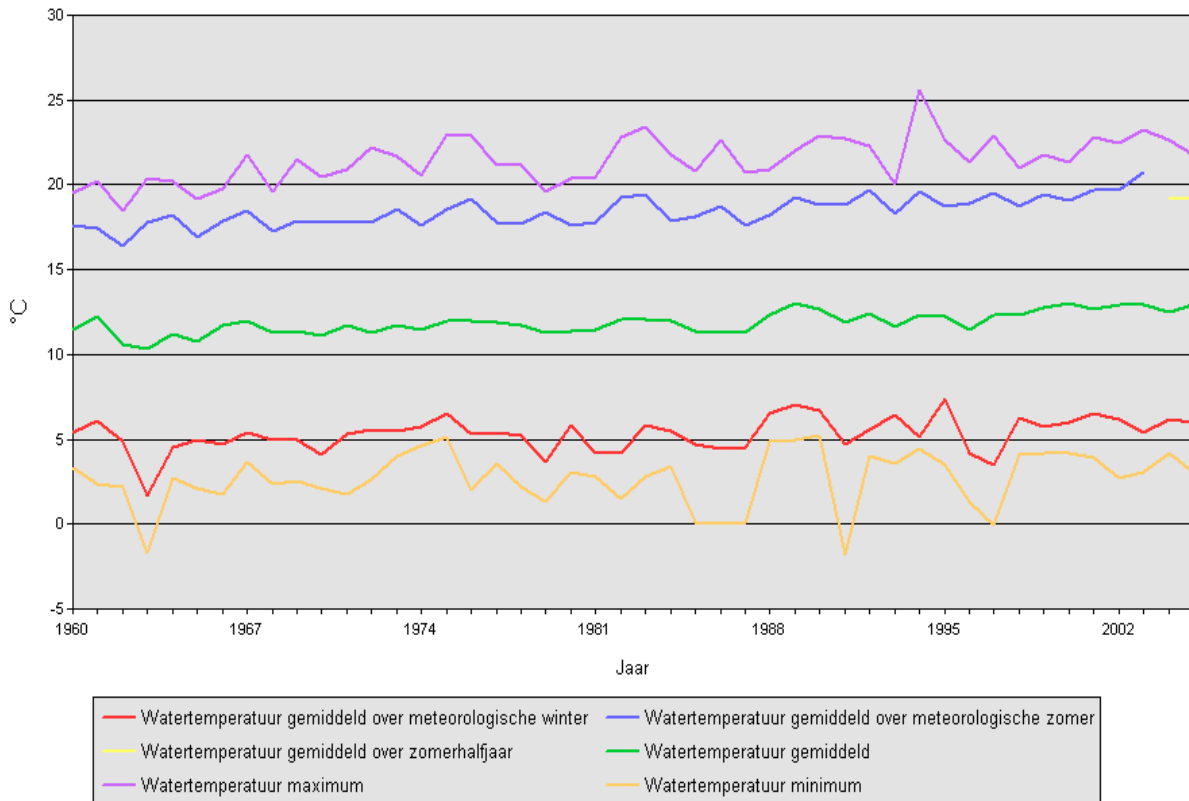


| | | |
|-----------|------------|--|
| G | Gematigd | 1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen in West Europa |
| G+ | Gematigd + | 1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind |
| W | Warm | 2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen in West Europa |
| W+ | Warm + | 2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind |

| 2050 | | G | G+ | W | W+ |
|--|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Wereldwijde temperatuurstijging | | +1°C | +1°C | +2°C | +2°C |
| Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa | | nee | ja | nee | ja |
| Winter | gemiddelde temperatuur | +0,9°C | +1,1°C | +1,8°C | +2,3°C |
| | koudste winterdag per jaar | +1,0°C | +1,5°C | +2,1°C | +2,9°C |
| gemiddelde neerslaghoeveelheid | | +4% | +7% | +7% | +14% |
| aantal natte dagen (? 0,1 mm) | | 0% | +1% | 0% | +2% |
| 10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden | | +4% | +6% | +8% | +12% |
| hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar | | 0% | +2% | -1% | +4% |
| Zomer | gemiddelde temperatuur | +0,9°C | +1,4°C | +1,7°C | +2,8°C |
| | warmste zomerdag per jaar | +1,0°C | +1,9°C | +2,1°C | +3,8°C |
| gemiddelde neerslaghoeveelheid | | +3% | -10% | +6% | -19% |
| aantal natte dagen (? 0,1 mm) | | -2% | -10% | -3% | -19% |
| dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden | | +13% | +5% | +27% | +10% |
| potentiële verdamping | | +3% | +8% | +7% | +15% |
| Zeespiegel absolute stijging | | 15-25 cm | 15-25 cm | 20-35 cm | 20-35 cm |

Klimaatverandering in Nederland rond 2050 ten opzichte van het basisjaar 1990 volgens de vier KNMI '06 klimaat-scenario's. Het klimaat in het basisjaar 1990 is beschreven met gegevens van 1976 tot en met 2005. Onder "winter" wordt hier verstaan december. [www.knmi.nl/klimaatscenario's/knmi06]

Van Rijkswaterstaat [www.waterstat.nl] zijn de temperaturen van het oppervlaktewater bij Hoek van Holland in de periode 1960 tot 2005 verkregen. In 45 jaar tijd is de gemiddelde watertemperatuur circa 1 °C gestegen, en de gemiddelde zomertemperatuur zelfs 2 °C. Wanneer deze trend doorzet, dan is de te verwachten gemiddelde watertemperatuur en de gemiddelde zomerwatertemperatuur in 2050 grofweg ook 1°C, respectievelijk 2°C, hoger dan in 2005.



Bron: WaterStat, Rijkswaterstaat/RIZA Rijkswaterstaat/RIKZ

B.4 Achtergrondinformatie werking koelwatersysteem energiecentrale

Gebaseerd op LIGTERINGEN & DIJKEMA, 2007.

De E.ON-centrale op de Maasvlakte is ontworpen voor grootschalige elektriciteitsproductie. Vanwege de keuze voor productie van alléén elektriciteit wordt de eveneens geproduceerde warmte afgekoeld en opgenomen door zeewater. Het rendement van de centrale is daarom slechts 42%. Dit betekent dat het grootste deel van de chemische energie van de steenkool de centrale verlaat als restwarmte.

Omzetting van warmte in centrale

In het kort gezegd verlaat de totale chemische energie (enthalpie ΔH) die bij de verbranding van steenkool wordt omgezet in warmte (Q) als volgt de energiecentrale:

$$Q = (dQ + q) + (dw + w')$$

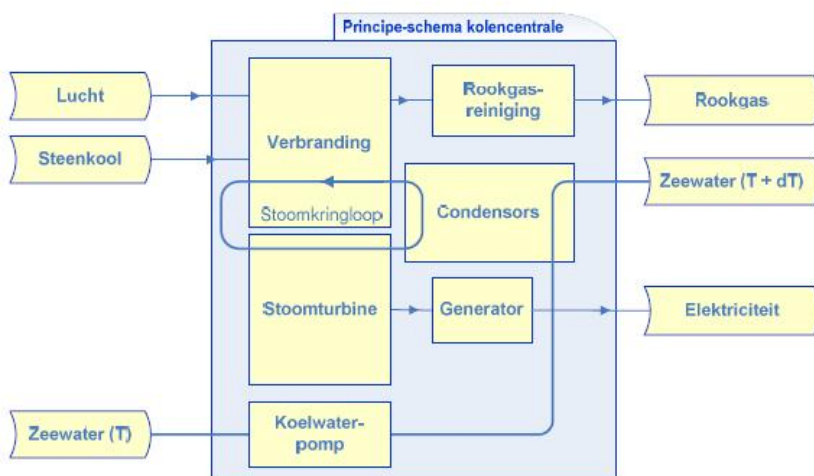
Hierin is:

- dQ een klein deel van de warmte Q , dat de centrale verlaat met het rookgas;
- q [in MWth] de restwarmte dat door het zeewater wordt opgenomen;
- dw het deel van de opgewekte energie dat door de centrale zelf gebruikt wordt. Grote elektriciteitsgebruikers in de continue bedrijfsvoering zijn: molens voor het vermalen van de steenkool, koelwaterpompen, ventilatoren en circulatiepompen in de rookgasreiniging;
- w' [in MWe] de netto elektriciteitsproductie dat uiteindelijk overblijft en aan het elektriciteitsnet geleverd kan worden.

Werking condensor energiecentrale

In het kort wordt hier de werking van een condensor in een energiecentrale toegelicht gezien vanuit de interne stoomkringloop, zoals weergegeven is in de onderstaande figuur:

- Een groot deel van de vrijgekomen warmte bij de verbranding van steenkool (totale verbrandingswarmte Q - rookgaswarmte dq) wordt overgedragen aan water van hoge druk (typisch 120 bar).
- Dit water verdampt bij hoge druk en temperatuur tot hoge-druk stoom.
- Deze hoge-druk stoom drijft een (condenserende) stoomturbine aan, die een generator aandrijft waarmee elektriciteit w wordt opgewekt.
- In de turbine neemt de stoomdruk en temperatuur af.
- In de condensor wordt de ‘afgewerkte stoom’ uit de turbine gecondenseerd bij lage druk door afkoeling met het relatief koude zeewater. Dat is nodig om met weinig vermogen het water (als vloeistof) opnieuw op hoge druk te kunnen brengen in de volgende stap.
- Dit water wordt met een pomp (niet weergegeven) op hoge druk gebracht en naar de warmtewisselaars in de verbrandingsoven gepompt.
- Zie weer de eerste stap.



Principe-schema grootschalige E-centrale [LIGTERINGEN & DIJKEMA, 2007]

Het rendement van een energiecentrale

Het beperkte rendement van een grootschalige elektriciteitscentrale komt voort uit een wetmatigheid bekend als de Tweede Hoofdwet van de Thermodynamica. Deze Hoofdwet impliceert onder meer dat het theoretische rendement van de omzetting van warmte naar kracht begrensd is door het zogenaamde Carnotrendement (η_{carnot}):

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Hierin is T_c [Kelvin: $273,15 + ^\circ\text{C}$] de temperatuur van het reservoir waaraan de restwarmte wordt afgegeven ('cold-sink'). T_h [Kelvin] is de temperatuur van de warmtebron ('hot source'). De T_h wordt begrensd door de maximaal met brandstof te bereiken (adiabatische) vlamtemperatuur, de maximale temperatuur wat het aanwezige materiaal kan hebben en de veiligheidseisen.

Het praktisch gerealiseerde vermogen wordt vervolgens bepaald door het werkelijke rendement van alle apparaten in de centrale: enerzijds door het rendement van de apparaten in de stoomcyclus en anderzijds door het netto elektriciteitsgebruik van de apparatuur nodig voor de continue bedrijfsvoering.

B.5 Krantenartikelen ontwikkelingen Maasvlakte 1 & 2 op energiegebied

In deze bijlage is een aantal krantenartikelen weergegeven over de toekomstplannen van het Maasvlaktegebied. Deze artikelen hebben samen met vele gesprekken met betrokkenen en verscheidene rapporten bijgedragen aan de vorming van een realistisch toekomstbeeld wat betreft de thermische lozingen in het Maasvlaktegebied, zoals beschreven in paragraaf 4.1. Hieruit zijn het basis lozingsscenario en de drie alternatieve scenario's geformuleerd, die gebruikt zijn bij het voorspellen van de toekomstige temperatuurverhogingen in de havenbekkens (hoofdstuk 8).

Technologiekrant, 11 januari 2008

Technisch Weekblad, 5-1-2008

Oplevering eerste twee containerterminals in 2013 PUMA legt Maasvlakte 2 aan

Boskalis en Van Oord gaan het eerste deel van de Tweede Maasvlakte aanleggen. Havenbedrijf Rotterdam verleende de gunning aan PUMA, het consortium waarin de twee baggermaatschappijen samenwerken. Met de opdracht is een bedrag van een miljard euro gemoeid.



De Tweede Maasvlakte wordt 2000 m² groot.

Projectorganisatie Uitbreiding Maasvlakte (PUMA) zal dit najaar met de werkzaamheden beginnen die bestaan uit de aanleg van een zeekering, haventerreinen, 2,5 km havenkade en (spoor)wegen die nodig zijn om het gebied te ontsluiten. PUMA neemt de eerste vijf jaar ook het onderhoud voor zijn rekening. De eerste twee containerterminals moeten in 2013 worden opgeleverd aan DP World uit Dubai en APM Terminals.

'PUMA legt de buitencontour aan, spuit het zand op en doorgraaft de bestaande zeekering', zegt Sjaak Poppe, persvoorlichter van het Havenbedrijf Rotterdam. 'Het leggen van een dijk in zee is de hoofd-doelstelling. Hoe hoog die wordt, is waarschijnlijk eind deze maand bekend.' Volgens Poppe is het uitgeven van nog twee of drie terminals 'afhankelijk van de ontwikkeling van de wereld-economie'.

Na de Botlek, Europoort en de Maasvlakte groeit de Rotterdamse

haven met de Tweede Maasvlakte naar 5000 ha. Met de nieuwe uitbreiding, in totaal 2000 ha groot, krijgt het haven- en industriegebied er 1000 ha aan bedrijventerreinen bij. Voor de aanleg is meer dan 225 miljoen m³ zand nodig.

Voor de chemische industrie en de transportsector zitten in de Rijnmond om ruimte verlegen. Bovendien zijn in de toekomst nieuwe containerschepen te groot voor Rotterdam. Daarom komt direct aan zee een haven van 20 m diepte te liggen. De Tweede Maasvlakte zal zich vooral op containeroverslag richten. Rotterdam wil met de aanleg de toekomst als Nederlands logistieke centrum zeker stellen. De verwachting is dat de uitbreiding uiteindelijk 6200 arbeidsplaatsen oplevert.

Het project is niet alleen bedoeld als uitbreiding van havenactiviteiten. Op het noordelijk stuk van de zeekering komt een windmolenpark, aan de west- en zuidwestkant moet een natuurlijk duinland-

schap en een strand ontstaan, bedoeld voor recreatie. Aan de binnenkant van de dijk wordt de A15 doorgetrokken evenals de havenspoorlijn. Naar verwachting is Maasvlakte 2 in 2033 voltooid. Het totale project is begroot op 2,9 miljard euro.

Vorige maand haalden Boskalis en Van Oord nog twee projecten binnen. Boskalis gaat het toegangskanaal naar de haven van Melbourne verdiepen. Samen met de Port of Melbourne Corporation moet de haven over twee jaar bereikbaar zijn voor containerschepen met een diepgang tot 14 m. De waarde van het contract bedraagt ongeveer driehonderd miljoen euro. Van Oord gaat de haven van Map Ta Phut aan de oostkust van Thailand uitbaggeren. De order, waar 53 miljoen euro mee is gemoeid, omvat ook de ontwikkeling van een terminal voor vloeibaar gas (lng). In april 2009 moet het project klaar zijn.

www.maasvlakte2.com

Lng-terminals Eemshaven en Maasvlakte

ENERGIE Gasunie en Vopak gaan voor achthonderd miljoen euro een lng-terminal bouwen op de Maasvlakte bij Rotterdam en hebben plannen voor een terminal aan de Eemshaven.

De noodzakelijke vergunningen voor de terminal op de Maasvlakte zijn eind vorige maand afgegeven. Het project, met een capaciteit van *negen miljard kubieke meter per jaar*, zal bestaan uit drie opslagtanks met elk een nettocapaciteit van 180.000 m³ en een aanlegsteiger voor de ontvangst van lng-schepen met een capaciteit tot 65.000 m³. De lng terminal moet in 2011 in bedrijf komen. Het gas zal behalve aan Essent ook aan DONG Energie uit Denemarken en Ecogas uit Oostenrijk geleverd worden. Volgens de ontwikkelingsovereenkomst voor de lng-terminal aan de Eemshaven krijgen Gasunie en Vopak elk 25 procent en Essent vijftig procent van de aandelen. (hd)

Copyright (c) 2007 Het Financieele Dagblad

Publicatiedatum: 20-4-2006

Stroommarkt van krapte naar overcapaciteit

In 2010 hooguit plaats voor twee van de zeven nieuwe elektriciteitscentrales die zijn aangekondigd.

KAREL BECKMAN

AMSTERDAM - Het Duitse energieconcern RWE kondigde vorige week aan dat het een grote kolencentrale wil gaan bouwen in Nederland. Het project van RWE is alweer de zevende nieuwe elektriciteitscentrale die in korte tijd is aangekondigd. Zes energiebedrijven gingen RWE voor: Delta, Nuon, Eon, Electrabel, Eneco en Intergen.

Samen zijn de zeven centrales goed voor meer dan 7000 megawatt (MW) aan nieuwe productiecapaciteit. Daarmee zou de huidige elektriciteitsproductiecapaciteit in Nederland in één klap met maar liefst 35% worden uitgebreid.

Aangezien de vraag naar elektriciteit niet spectaculair groeit, lijkt de stroommarkt af te steven op een enorm overaanbod. Zeker als je nagaat dat er nog andere capaciteit bijkomt, zoals de Norned-kabel van 650 MW, die vanaf 2008 waterkrachtstroom uit Noorwegen naar Nederland gaat brengen, de nieuwe gascentrale van 250 MW van Shell Pernis, die in 2007 wordt opgeleverd, en de levensduurverlenging die Essent, Eon en Electrabel hebben aangekondigd voor hun centrales in Maasbracht, de Maasvlakte en de Flevopolder.

De vraag is echter hoeveel van de aangekondigde centrales daadwerkelijk worden gebouwd. 'Je kunt nu al zeggen dat ze er niet allemaal gaan komen', zegt Twan Vollebregt, directeur van adviesbureau Elan Energy Consulting. Vollebregt doet onderzoek naar de ontwikkeling van vraag en aanbod in de elektriciteitsproductiesector. In 2010 is er volgens hem 'hooguit ruimte voor twee nieuwe elektriciteitscentrales in Nederland'.

Na 2010 komt er meer ruimte op de markt, omdat dan oude centrales uit gebruik zullen worden genomen, maar dan nog zullen niet alle plannen de tekentafel verlaten. Vollebregt: 'De komende jaren is er 300 MW per jaar aan nieuwe capaciteit nodig. Na 2010 wordt dat een aantal jaren 1000 MW per jaar.'

Dat neemt niet weg dat er de komende jaren wel degelijk behoefte is aan nieuw productievermogen. Elan heeft berekend dat de markt al in 2008 niet meer kan zonder geïmporteerde stroom. 'Bij de aanvang van de liberalisering, vlak voor 2000, was er nog flinke overcapaciteit', verklaart Vollebregt. 'Inmiddels is de capaciteitsmarge teruggelopen naar 28%, exclusief importen naar 8%. Als je er rekening mee houdt dat centrales kunnen uitvallen, kun je stellen dat de markt krap begint te worden.' De stroomprijzen lijken dit beeld te bevestigen: die zijn de afgelopen jaren verdrievoudigd.

De grote vraag is wie als eerste van de krapte gaat profiteren. 'Het is een varkenscyclus', zegt Vollebregt. 'Wie als eerste de paal in de grond slaat, wint het meeste.'

De gascentrales zijn in het voordeel boven kolencentrales, omdat ze sneller te bouwen zijn en makkelijker een vergunning krijgen. Een van de koplopers in de race lijkt dan ook Eneco, dat een gascentrale van 800 MW wil bouwen in Rotterdam Europort. In december heeft Eneco een milieu-effectrapportage (MER) ingediend. 'Wij gaan ervan uit dat ons project doorgaat', zegt woordvoerder Cor de Ruijter. Een probleemje is er wel: de financiering - het gaat om zo'n euro 500 mln - is nog niet rond. 'We zijn bang dat door de splitsing van ons bedrijf onze credit-rating wordt verlaagd, dus dat is nog een lastige', zegt De Ruijter.

Delta, dat in het Sloegebied in Zeeland een gascentrale van 800 MW wil bouwen, is het verst in het vergunningstraject. Ook de financiering is rond. Delta heeft een ander probleem: de Zeeuwse Milieufederatie heeft bezwaar ingediend tegen het project. Delta verwacht op ieder moment een uitspraak hierover van de Raad van State. 'Als die positief uitvalt, gaat er meteen een tender de deur uit naar bouwbedrijven', zegt woordvoerder Mirjam van Zuilen.

De status van de derde gascentrale, een van 400 MW die het

Amerikaanse Intergen wil bouwen in Pernis, is minder duidelijk. Intergen heeft een startnotitie gepubliceerd - de eerste stap in het vergunningstraject - maar meer is niet bekend over dit project. In de strijd tussen de vier grote kolencentrales die zijn aangekondigd, lijkt Electrabel het voortouw te hebben. Electrabel is in onderhandeling over een terrein op de Maasvlakte. Een startnotitie voor de 800 MW-centrale is afgegeven, de MER is in voorbereiding. Toch vraagt Vollebregt zich af hoe serieus dit plan is. 'Electrabel heeft eigenlijk geen nieuwe capaciteit nodig', zegt hij.

Het Duitse Eon komt 'binnenkort' met een startnotitie voor de 1100 MW-kolencentrale van euro 1,2 mrd die het wil bouwen op de Maasvlakte naast de bestaande Eon-centrale. 'We zijn er vrij zeker van dat deze investering doorgaat', zegt corporate affairs manager Hans Schoenmakers. 'Tenminste, als we eruit komen met de vergunningen.' Dat is nog een grote 'als', want de 'milieuruimte' voor nieuwe kolencentrales is beperkt. Staatssecretaris Pieter van Geel van Milieu zegt desgevraagd dat hij alleen vergunningen wil afgeven voor nieuwe kolencentrales als bedrijven investeren in de afvang en opslag van CO₂, het broeikasgas dat vrijkomt bij de verbranding van kolen. Die technologie is volgens Eon echter nog te duur. De Eon-centrale is ook niet in staat om naast steenkool het milieuvriendelijkere biomassa te verstoppen, iets wat de andere drie centrales wel kunnen.

Nuon, dat een 'multibrandstof'-centrale van 1200 MW wil bouwen, die gas, kolen en biomassa kan verstoppen, heeft in januari maar liefst drie startnotities afgegeven, voor drie locaties: Eemshaven, het Sloegebied en de Maasvlakte. Een keuze is echter nog niet gemaakt. Volgens Vollebregt heeft Nuon, gezien zijn 'verouderende productiepark', nieuwe capaciteit nodig, maar zijn de investeringen voor een multibrandstofcentrale 'erg hoog'.

RWE zegt eveneens 'binnenkort' met een startnotitie te komen voor zijn euro 1,5 mrd kostende centrale van 1600-2200 MW, maar heeft ook nog geen locatie bepaald.

'Je moet het ook zien als een spel', zegt Vollebregt. 'Blufpoker. Als jij je rivalen ervan overtuigt dat jij serieuze plannen hebt, ontmoedig je hen misschien om zelf te bouwen en wordt hun financiering lastiger.' Voor bedrijven als Nuon en Eneco, die dreigen te worden opgeslokt door buitenlandse concerns, ziet Vollebregt nog een argument om projecten voor te bereiden. 'Je bent ook waardevermeerderend bezig als je een mooi uitgewerkt plan voor een centrale hebt klaarliggen.'

De Rotterdamse haven ontwikkelt zich tot 'energiepoort' van Nederland. Het Rotterdamse havengebied is met afstand de populairste locatie voor nieuwe stroomcentrales. Eon en Electrabel kiezen voor de Maasvlakte, Eneco voor Europort, Intergen voor Pernis. RWE en Nuon twijfelen tussen de Maasvlakte en de Eemshaven.

Rotterdam ziet de centrales graag komen, zegt Minco van Heezen, woordvoerder van het Gemeentelijk Havenbedrijf. 'Energie is een van de activiteiten waarmee wij ons profileren.' De haven mikt op meer dan alleen centrales. In de pijplijn zitten nog een bio-ethanolafabriek, drie biodieselafabrieken, twee terminals voor lng (vloeibaar aardgas), en drie palmolieaffinaderijen.

Rotterdam is om diverse redenen aantrekkelijk: de goede aanvoermogelijkheden voor biomassa en kolen, het uitgebreide gasleidingennet, de aanwezigheid van grote stroomverbruikers, en andere 'clustereffecten'.

Het Havenbedrijf maakt zich geen zorgen over mogelijke overcapaciteit. 'Dat laten we aan de markt over', zegt Van Heezen. In het havengebied zijn nog vijf locaties voor centrales. 'Maar als het echt moet, kunnen we nog wel extra ruimte vinden.'

Een probleem is wel dat volgens netbeheerder Tennet de vergunningverlening voor nieuwe hoogspanningsnetten traag verloopt, waardoor nieuwe centrales straks misschien jaren moeten wachten op aansluiting op het net. Een woordvoerder van Economische Zaken onderkent het probleem. 'Maar Tennet mag zelf best wat meer doen om de boel te versnellen. Ze komen altijd eerst bij ons klagen.'

NRC Handelsblad, 29 juni 2007

Toestemming voor kolencentrale op de Maasvlakte

ROTTERDAM, 29 JUNI. Energiebedrijf Eon heeft van de Milieudienst Rijnmond goedkeuring gekregen voor de bouw van een kolencentrale op de Maasvlakte in de Rotterdamse haven. Dat maakte de provincie Zuid-Holland gisteren bekend. De nieuwe centrale moet van de provincie wel aan strenge milieueisen voldoen. Die zijn vorig jaar door de provincie en het ministerie van VROM vastgesteld. Hoewel de provincie formeel geen eisen kan stellen aan de CO₂-uitstoot van de nieuwe centrale, heeft Eon in de aanvraag aangegeven de nieuwe centrale zo te bouwen dat hij is voorbereid op CO₂-afvang. Daarmee wordt de uitstoot van CO₂ in het Rijnmondgebied beperkt. (ANP)

Technisch Weekblad, 28 juni 2007

Regering onderzoekt vestiging kerncentrales

ENERGIEBELEID De regering gaat onderzoek doen naar de milieugevolgen van de bouw van nieuwe kerncentrales. Dat schreven minister Van der Hoeven van EZ en Cramer van Vrom op 20 juli aan de Tweede Kamer.

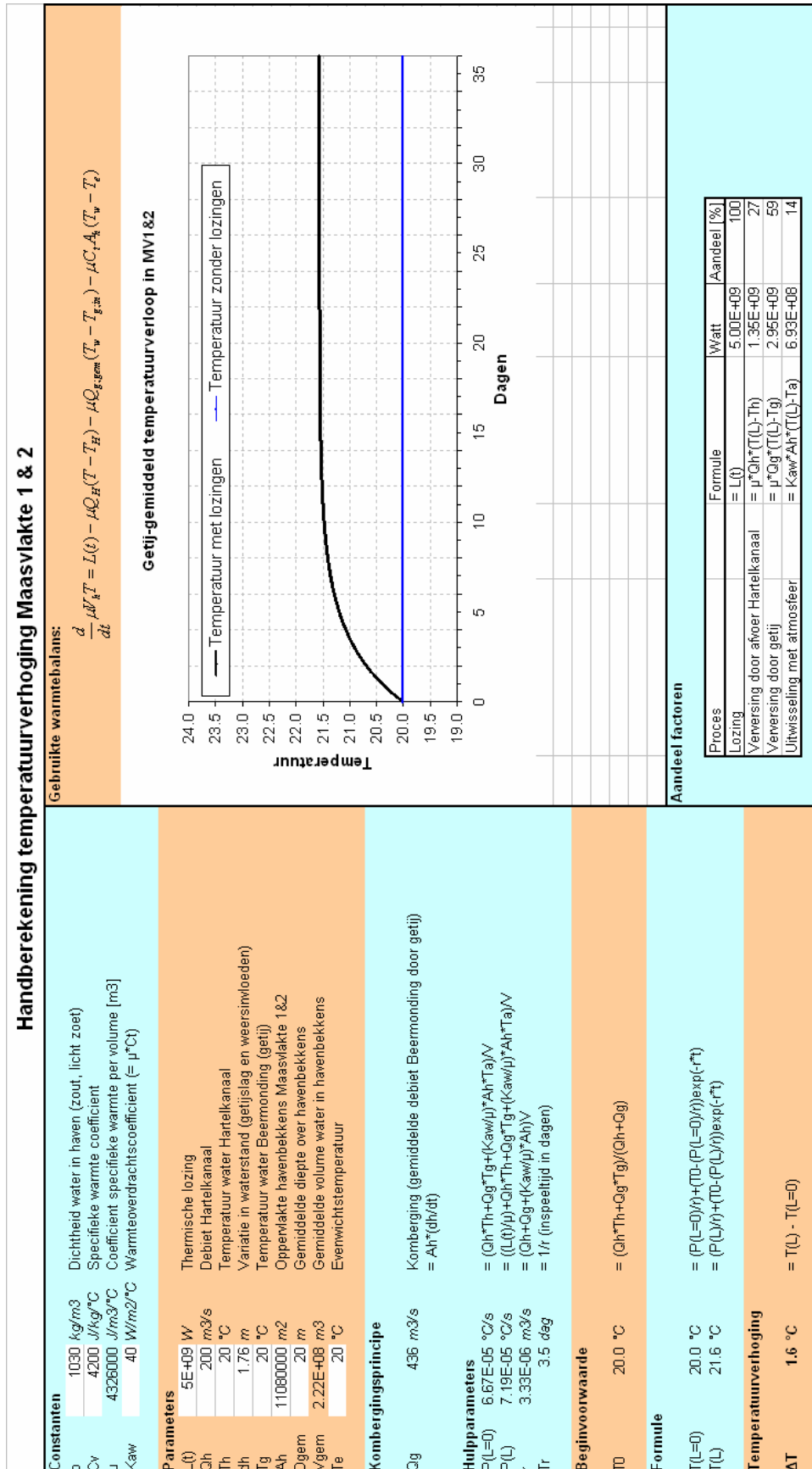
Herman Damveld

De regering noemt vijf mogelijke locaties: Westelijke Noordoostpolderdijk, Moerdijk, Eemshaven, Maasvlakte en Borssele. Deze vijf vestigingsplaatsen werden aan de hand van uitgebreid onderzoek al in 1985 uitgekozen in de 'planologische kernbeslissing vestigingsplaatsen voor kerncentrales'.

Pieter van Geel, staatssecretaris van milieu van het vorige kabinet en nu CDA-fractievoorzitter, noemde in september 2006 in zijn brief over de randvoorwaarden voor kernenergie ook deze vijf locaties, maar liet er zelf al drie afvallen. Hij schreef dat 'voor een grote kern-

centrale een zone van circa vijf kilometer moet gelden, waarbinnen met de mogelijkheid van evacuatie van mensen rekening moet worden gehouden'. Deze evacuatie moet snel uitgevoerd kunnen worden, stelde Van Geel verder. Daarom mogen binnen vijf kilometer rond de centrale geen grote aantallen moeilijk te verplaatsen mensen aanwezig zijn. Tevens dient daarbij een grote bevolkingsomvang in de dichtstbevolkte sector op een afstand van vijf tot twintig kilometer vermeden te worden. 'Dergelijke grote bevolkingsconcentraties (buiten de vijf kilometerzone) zijn wel aanwezig in de omgeving van de locaties Maasvlakte en Moerdijk', schreef de staatssecretaris. Ook wilde hij een locatie aan zee omdat die voldoende koelwater heeft, zodat de Noordoostpolderdijk aan het IJsselmeer afvalt. Het ligt daarom voor de hand dat het onderzoek van de huidige regering zal leiden tot de keuze voor Borsele en de Eemshaven. □

C Excel-sheets warmtebalans



Handberekening temperatuurverhoging Maasvlakte 2

| <p>Constanten</p> <p>ρ 1020 kg/m³ Dichtheid water in haven (zout, licht zoet)</p> <p>C_v 4200 J/kg°C Specifieke warmte coefficient</p> <p>μ 4284000 J/m³°C Coëfficiënt specifieke warmte per volume [m³]</p> <p>K_{aw} 40 W/m²°C Warmteoverdrachtscoëfficiënt (= $\mu \cdot C_t$)</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|-------------|--------|-------------|--------|----------|----------|-----|-----------------------|--------------------------------------|----------|----|----------------------------|---|----------|----|
| <p>Parameters</p> <p>Q_l 87 m³/s Debiet lozing</p> <p>T_l 29 °C Temperatuur lozing</p> <p>dh 1.76 m Variatie in waterstand (getijslag en weersimboeden)</p> <p>T_g 20 °C Temperatuur water Beermondung (getij)</p> <p>A_h 5800000 m² Oppervlakte havenbekkens Maasvlakte 2</p> <p>D_{gem} 19 m Gemiddelde diepte over havenbekkens</p> <p>V_{gem} 110200000 m³ Gemiddelde volume water in havenbekkens</p> <p>T_a 20 °C Atmosferische evenwichtstemperatuur</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Kombergingsprincipe</p> <p>Q_g 228 m³/s Komberging (gemiddelde debiet Yangtzehaven door getij) = $A_h \cdot (dh/dt)$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Hulpparameters</p> <p>$P(Q_l=0)$ 5.13E-05 °C/s = $(Q_g \cdot T_g + (K_{aw} \cdot \mu) \cdot A_h \cdot T_a) / V$</p> <p>$P(Q_l)$ 7.42E-05 °C/s = $(L(t) / \mu) + Q_l \cdot T_h + Q_g \cdot T_g + (K_{aw} \cdot \mu) \cdot A_h \cdot T_a / V$</p> <p>$r(Q_l=0)$ 2.56E-06 m³/s = $(Q_l + (K_{aw} \cdot \mu) \cdot A_h) \cdot V$</p> <p>$r(Q_l)$ 3.35E-06 m³/s = $(Q_l + Q_g + (K_{aw} \cdot \mu) \cdot A_h) \cdot V$</p> <p>$T_r$ 3.5 dag = $1/r$ (inspeeltijd in dagen)</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Beginvoorwaarde</p> <p>T_{atm} 22 °C = luchttemperatuur</p> <p>T_0 20.4 °C = $((K_{aw} \cdot \mu) \cdot A_h \cdot T_{atm} + Q_g \cdot T_g) / ((K_{aw} \cdot \mu) + Q_g)$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Formule</p> <p>$T(L=0)$ 20.0 °C = $(P(Q_l=0) \cdot t) + (T_0 - (P(Q_l=0) \cdot t)) \cdot \exp(-t \cdot r)$</p> <p>$T(L)$ 22.1 °C = $(P(Q_l) \cdot t) + (T_0 - (P(Q_l) \cdot t)) \cdot \exp(-t \cdot r)$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Temperatuurverhoging</p> <p>ΔT 2.1 °C = $T(L) - T(L=0)$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Gebruikte warmtebalans:</p> $\frac{d}{dt} \mu V T = \mu Q_l (T_l - T) - \mu Q_g (T - T_{a,gem}) - \mu C_v A_h (T - T_{a,gem})$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Getij-gemiddeld temperatuurverloop in MV2</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Aandeel factoren</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Proces</th> <th>Formule</th> <th>Waarde</th> <th>Aandeel [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lozing</td> <td>= $L(t)$</td> <td>2.56E+09</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Verwarming door getij</td> <td>= $\mu \cdot Q_g \cdot (T(L) - T_g)$</td> <td>2.07E+09</td> <td>81</td> </tr> <tr> <td>Uitwisseling met atmosfeer</td> <td>= $K_{aw} \cdot A_h \cdot (T(L) - T_a)$</td> <td>4.92E+08</td> <td>19</td> </tr> </tbody> </table> | | Proces | Formule | Waarde | Aandeel [%] | Lozing | = $L(t)$ | 2.56E+09 | 100 | Verwarming door getij | = $\mu \cdot Q_g \cdot (T(L) - T_g)$ | 2.07E+09 | 81 | Uitwisseling met atmosfeer | = $K_{aw} \cdot A_h \cdot (T(L) - T_a)$ | 4.92E+08 | 19 |
| Proces | Formule | Waarde | Aandeel [%] | | | | | | | | | | | | | | |
| Lozing | = $L(t)$ | 2.56E+09 | 100 | | | | | | | | | | | | | | |
| Verwarming door getij | = $\mu \cdot Q_g \cdot (T(L) - T_g)$ | 2.07E+09 | 81 | | | | | | | | | | | | | | |
| Uitwisseling met atmosfeer | = $K_{aw} \cdot A_h \cdot (T(L) - T_a)$ | 4.92E+08 | 19 | | | | | | | | | | | | | | |

D Informatie Near-field analyse

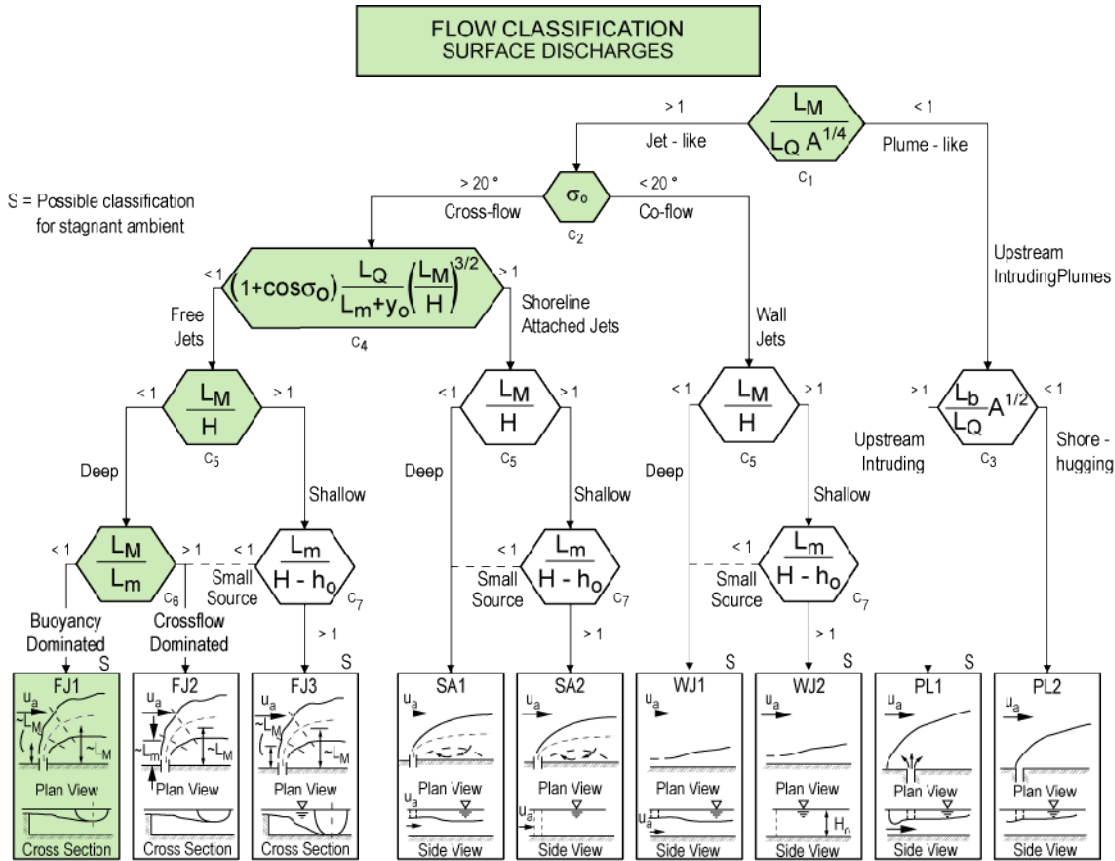
D.1 Tabel dichtheid water afhankelijk van temperatuur en saliniteit

| Dichtheid zeewater, afhankelijk van saliniteit en temperatuur | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|--------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Gebaseerd op Eckhart (1958), empirische functie: | | | | | | | | | | | | | | | |
| $\rho = \frac{1,000 P_0}{\lambda + \alpha_0 P_0}$ | Met: | λ | = 1779.5 + 11.25t - 0.0745t ² - (3.80+0.01t)s | | | | | | | | | | | | |
| | | α_0 | = 0.698 | | | | | | | | | | | | |
| | | P_0 | = 5890 + 38t - 0.375t ² + 3s | | | | | | | | | | | | |
| | | Dichtheid 1 | | Dichtheid 2 | | Dichtheidsverschil $\Delta\rho$ | | | | | | | | | |
| Temperatuur t | | 28 [°C] | | 20 [°C] | | | | | | | | | | | |
| Saliniteit s | | 30 [ppt] | | 25 [ppt] | | | | | | | | | | | |
| Dichtheid ρ | | 1018.8 [kg/m ³] | | 1017.2 [kg/m ³] | | | | | | | | | | | |
| Dichtheidsverschil $\Delta\rho$ | | -1.7 [kg/m ³] | | | | | | | | | | | | | |
| T [°C] | Saliniteit [ppt] | | | | | | | | | | | | | | |
| | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 0 | 1014.3 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.8 | 1017.6 | 1018.4 | 1019.2 | 1020.0 | 1020.8 | 1021.6 | 1022.4 | 1023.2 | 1024.1 | 1024.9 | 1025.7 |
| 1 | 1014.3 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.7 | 1017.5 | 1018.3 | 1019.1 | 1019.9 | 1020.7 | 1021.6 | 1022.4 | 1023.2 | 1024.0 | 1024.8 | 1025.6 |
| 2 | 1014.3 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.7 | 1017.5 | 1018.3 | 1019.1 | 1019.9 | 1020.7 | 1021.5 | 1022.3 | 1023.1 | 1023.9 | 1024.7 | 1025.5 |
| 3 | 1014.2 | 1015.0 | 1015.8 | 1016.6 | 1017.4 | 1018.2 | 1019.0 | 1019.8 | 1020.6 | 1021.4 | 1022.2 | 1023.0 | 1023.8 | 1024.6 | 1025.4 |
| 4 | 1014.2 | 1014.9 | 1015.7 | 1016.5 | 1017.3 | 1018.1 | 1018.9 | 1019.7 | 1020.5 | 1021.3 | 1022.1 | 1022.9 | 1023.7 | 1024.5 | 1025.3 |
| 5 | 1014.1 | 1014.9 | 1015.7 | 1016.5 | 1017.3 | 1018.0 | 1018.8 | 1019.6 | 1020.4 | 1021.2 | 1022.0 | 1022.8 | 1023.6 | 1024.4 | 1025.2 |
| 6 | 1014.0 | 1014.8 | 1015.6 | 1016.4 | 1017.2 | 1017.9 | 1018.7 | 1019.5 | 1020.3 | 1021.1 | 1021.9 | 1022.7 | 1023.5 | 1024.3 | 1025.1 |
| 7 | 1013.9 | 1014.7 | 1015.5 | 1016.3 | 1017.1 | 1017.8 | 1018.6 | 1019.4 | 1020.2 | 1021.0 | 1021.8 | 1022.6 | 1023.4 | 1024.2 | 1025.0 |
| 8 | 1013.8 | 1014.6 | 1015.4 | 1016.2 | 1016.9 | 1017.7 | 1018.5 | 1019.3 | 1020.1 | 1020.9 | 1021.7 | 1022.5 | 1023.2 | 1024.0 | 1024.8 |
| 9 | 1013.7 | 1014.5 | 1015.3 | 1016.0 | 1016.8 | 1017.6 | 1018.4 | 1019.2 | 1020.0 | 1020.7 | 1021.5 | 1022.3 | 1023.1 | 1023.9 | 1024.7 |
| 10 | 1013.6 | 1014.4 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.7 | 1017.5 | 1018.3 | 1019.0 | 1019.8 | 1020.6 | 1021.4 | 1022.2 | 1022.9 | 1023.7 | 1024.5 |
| 11 | 1013.4 | 1014.2 | 1015.0 | 1015.8 | 1016.5 | 1017.3 | 1018.1 | 1018.9 | 1019.7 | 1020.4 | 1021.2 | 1022.0 | 1022.8 | 1023.6 | 1024.4 |
| 12 | 1013.3 | 1014.1 | 1014.8 | 1015.6 | 1016.4 | 1017.2 | 1018.0 | 1018.7 | 1019.5 | 1020.3 | 1021.1 | 1021.8 | 1022.6 | 1023.4 | 1024.2 |
| 13 | 1013.1 | 1013.9 | 1014.7 | 1015.5 | 1016.2 | 1017.0 | 1017.8 | 1018.6 | 1019.3 | 1020.1 | 1020.9 | 1021.7 | 1022.4 | 1023.2 | 1024.0 |
| 14 | 1013.0 | 1013.8 | 1014.5 | 1015.3 | 1016.1 | 1016.8 | 1017.6 | 1018.4 | 1019.2 | 1019.9 | 1020.7 | 1021.5 | 1022.3 | 1023.0 | 1023.8 |
| 15 | 1012.8 | 1013.6 | 1014.4 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.7 | 1017.4 | 1018.2 | 1019.0 | 1019.8 | 1020.5 | 1021.3 | 1022.1 | 1022.8 | 1023.6 |
| 16 | 1012.6 | 1013.4 | 1014.2 | 1014.9 | 1015.7 | 1016.5 | 1017.2 | 1018.0 | 1018.8 | 1019.6 | 1020.3 | 1021.1 | 1021.9 | 1022.6 | 1023.4 |
| 17 | 1012.4 | 1013.2 | 1014.0 | 1014.7 | 1015.5 | 1016.3 | 1017.0 | 1017.8 | 1018.6 | 1019.4 | 1020.1 | 1020.9 | 1021.7 | 1022.4 | 1023.2 |
| 18 | 1012.3 | 1013.0 | 1013.8 | 1014.5 | 1015.3 | 1016.1 | 1016.8 | 1017.6 | 1018.4 | 1019.1 | 1019.9 | 1020.7 | 1021.4 | 1022.2 | 1023.0 |
| 19 | 1012.0 | 1012.8 | 1013.6 | 1014.3 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.6 | 1017.4 | 1018.2 | 1018.9 | 1019.7 | 1020.5 | 1021.2 | 1022.0 | 1022.8 |
| 20 | 1011.8 | 1012.6 | 1013.3 | 1014.1 | 1014.9 | 1015.6 | 1016.4 | 1017.2 | 1017.9 | 1018.7 | 1019.5 | 1020.2 | 1021.0 | 1021.8 | 1022.5 |
| 21 | 1011.6 | 1012.4 | 1013.1 | 1013.9 | 1014.6 | 1015.4 | 1016.2 | 1016.9 | 1017.7 | 1018.5 | 1019.2 | 1020.0 | 1020.7 | 1021.5 | 1022.3 |
| 22 | 1011.4 | 1012.1 | 1012.9 | 1013.6 | 1014.4 | 1015.2 | 1015.9 | 1016.7 | 1017.4 | 1018.2 | 1019.0 | 1019.7 | 1020.5 | 1021.3 | 1022.0 |
| 23 | 1011.1 | 1011.9 | 1012.6 | 1013.4 | 1014.2 | 1014.9 | 1015.7 | 1016.4 | 1017.2 | 1018.0 | 1018.7 | 1019.5 | 1020.2 | 1021.0 | 1021.8 |
| 24 | 1010.9 | 1011.6 | 1012.4 | 1013.1 | 1013.9 | 1014.7 | 1015.4 | 1016.2 | 1016.9 | 1017.7 | 1018.5 | 1019.2 | 1020.0 | 1020.7 | 1021.5 |
| 25 | 1010.6 | 1011.4 | 1012.1 | 1012.9 | 1013.6 | 1014.4 | 1015.1 | 1015.9 | 1016.7 | 1017.4 | 1018.2 | 1018.9 | 1019.7 | 1020.5 | 1021.2 |
| 26 | 1010.3 | 1011.1 | 1011.8 | 1012.6 | 1013.4 | 1014.1 | 1014.9 | 1015.6 | 1016.4 | 1017.1 | 1017.9 | 1018.7 | 1019.4 | 1020.2 | 1020.9 |
| 27 | 1010.1 | 1010.8 | 1011.6 | 1012.3 | 1013.1 | 1013.8 | 1014.6 | 1015.3 | 1016.1 | 1016.9 | 1017.6 | 1018.4 | 1019.1 | 1019.9 | 1020.7 |
| 28 | 1009.8 | 1010.5 | 1011.3 | 1012.0 | 1012.8 | 1013.5 | 1014.3 | 1015.1 | 1015.8 | 1016.6 | 1017.3 | 1018.1 | 1018.8 | 1019.6 | 1020.4 |
| 29 | 1009.5 | 1010.2 | 1011.0 | 1011.7 | 1012.5 | 1013.2 | 1014.0 | 1014.8 | 1015.5 | 1016.3 | 1017.0 | 1017.8 | 1018.5 | 1019.3 | 1020.0 |
| 30 | 1009.2 | 1009.9 | 1010.7 | 1011.4 | 1012.2 | 1012.9 | 1013.7 | 1014.4 | 1015.2 | 1016.0 | 1016.7 | 1017.5 | 1018.2 | 1019.0 | 1019.7 |
| 31 | 1008.9 | 1009.6 | 1010.4 | 1011.1 | 1011.9 | 1012.6 | 1013.4 | 1014.1 | 1014.9 | 1015.6 | 1016.4 | 1017.1 | 1017.9 | 1018.7 | 1019.4 |
| 32 | 1008.5 | 1009.3 | 1010.0 | 1010.8 | 1011.5 | 1012.3 | 1013.0 | 1013.8 | 1014.5 | 1015.3 | 1016.1 | 1016.8 | 1017.6 | 1018.3 | 1019.1 |
| 33 | 1008.2 | 1008.9 | 1009.7 | 1010.4 | 1011.2 | 1012.0 | 1012.7 | 1013.5 | 1014.2 | 1015.0 | 1015.7 | 1016.5 | 1017.2 | 1018.0 | 1018.7 |
| 34 | 1007.9 | 1008.6 | 1009.4 | 1010.1 | 1010.9 | 1011.6 | 1012.4 | 1013.1 | 1013.9 | 1014.6 | 1015.4 | 1016.1 | 1016.9 | 1017.6 | 1018.4 |
| 35 | 1007.5 | 1008.3 | 1009.0 | 1009.8 | 1010.5 | 1011.3 | 1012.0 | 1012.8 | 1013.5 | 1014.3 | 1015.0 | 1015.8 | 1016.5 | 1017.3 | 1018.0 |

D.2 Voorbeeld resultaten CORMIX

Bepaling lengteschalen Electrabel

Voorbeeld van de output bij maximale stratificatie (gedurende doortij en hoge zoetwaterafvoer).



‘Flow classification’ van de Electrabel-lozing bij maximale stratificatie (doortij en hoge zoetwaterafvoer)

FLOW PARAMETERS AND LENGTH SCALES:

Relative density differences between discharge and ambient:

Ambient density at the discharge level $\rho_{OAH0} = 1012 \text{ kg/m}^3$.
 Vertical mean ambient density $\rho_{OAM} = 1017.7143 \text{ kg/m}^3$.

The effluent density (1017 kg/m^3) is greater than the surrounding ambient water density at the discharge level (1012 kg/m^3). Therefore, the effluent is **NEGATIVELY BUOYANT** and will tend to sink towards the bottom.

The shoreline surface discharge will lead to limited **VERTICAL MIXING** in the discharge vicinity, with a plume thickness **LESS THAN THE WATER DEPTH**. All density differences and buoyancy fluxes are computed relative to the local ambient density ($1012.962702 \text{ kg/m}^3$) that has been vertically averaged over an expected plume thickness of 4.121674 m in the ambient stratification.

Flow bulk parameters:

Discharge volume flux $QD = 28 \text{ m}^3/\text{s}$.
 Discharge momentum flux $MO = 14 \text{ m}^4/\text{s}^2$.
 Discharge buoyancy flux $JO = -1.089290 \text{ m}^4/\text{s}^3$.
 Reduced gravitational acceleration $GPO = -0.038903 \text{ m/s}^2$.

Non-dimensional parameters:

Densimetric Froude number $FRO = 0.93$ (based on LQ)
 Channel densimetric Froude number $FRCH = 1.79$ (based on outlet channel depth)
 Velocity ratio $R = 50$

Flow length scales:

Discharge length scale $LQ = 7.4833$ m.

Jet-to-crossflow length scale $Lm = 374.17$ m.

Plume-to-crossflow length scale $Lb = 1089290.35$ m.

Jet-to-plume transition length scale $LM = 6.93$ m.

Jet stratification length scale $Lm' = 7.33$ m.

Plume stratification length scale $Lb' = 7.54$ m.

Because of NEAR-STAGNANT conditions, the plume-to-crossflow length scale will be limited to $Lb = 99999.0$ m.

Parameters for CORMIX3 have been calculated

Classifying Flows.

FLOW CLASSIFICATION:

CORMIX3 for Brine discharges includes TWO MAJOR CLASSES of possible flow configurations:

Classes FJ: Free jet flows without near-field shoreline interaction.

Classes SA: Shoreline-attached discharges in crossflow.

The NEAR FIELD FLOW will have the following features:

The applicable layer depth (H) = 21 m

Since this is a Brine or Sediment discharge, CORMIX FORCES the discharge to be jet-like.

The discharge jet is crossflowing.

The discharge forms a free jet, unattached to the shoreline.

The ambient is deep relative to discharge characteristics.

The following conclusion on the NEAR-FIELD FLOW CONFIGURATION applies to the FULL WATER DEPTH of the specified ambient stratification condition Level3.

Due to MODERATE VERTICAL MIXING the surface plume will be extend into the lower layer below the pycnocline! However, in the FAR-FIELD the surface plume will be confined to the UPPER LAYER!

*** FLOW CLASS = FJ1 ***

Flow has been classified.

Hierboven staan schattingen voor de lengteschalen gegeven. Een schatting van de mengzone is hiermee niet te geven. Dit hangt af van de richtlijn met betrekking tot de mengzone. Indien het water in de havenbekkens wordt gekenmerkt als water voor schelpdierachtigen, dan is de maximaal toegestane temperatuurverhoging op de rand van de mengzone 2°C (en de maximale temperatuur 25°C). Bij het volgende voorbeeld van de EnecoGen-centrale is wel de mengzonegrootte te bepalen.

Bepaling mengzone EnecoGen

Voorbeeld van een deel van de 'prediction file' van CORMIX. In rood omcirkeld staan de y-coördinaten (in dwarsrichting van de stroming van het ontvangende water) en de concentratie (C) van de temperatuur, wanneer de temperatuurverhoging minder dan 2°C wordt.

Density current in crossflow with strong buoyancy effects.

Profile definitions:

BV = top-hat thickness, measured vertically
 BH = top-hat half-width, measured horizontally in Y-direction
 ZU = upper plume boundary (Z-coordinate)
 ZL = lower plume boundary (Z-coordinate)
 S = hydrodynamic average (bulk) dilution
 C = average (bulk) concentration (includes reaction effects, if any)

| X | Y | Z | S | C | BV | BH | ZU | ZL |
|------|-------|-------|-----|-----------|------|------|-------|-------|
| 0.70 | 9.70 | -3.53 | 1.0 | 0.800E+01 | 3.53 | 3.11 | -1.77 | -5.30 |
| 1.07 | 13.29 | -4.76 | 1.2 | 0.655E+01 | 4.84 | 3.56 | 0.07 | -4.58 |

Jet/plume RESTRATIFIES at the above position.

BV = Gaussian 1/e (37%) vertical thickness

| | | | | | | | | |
|------|-------|--------|-----|-----------|------|-------|--------|--------|
| 5.57 | 48.80 | -16.90 | 3.0 | 0.270E+01 | 2.24 | 17.50 | -14.67 | -16.90 |
|------|-------|--------|-----|-----------|------|-------|--------|--------|

** WATER QUALITY STANDARD OR CCC HAS BEEN FOUND **

The pollutant concentration in the plume falls below water quality standard or CCC value of 0.200E+01 in the current prediction interval.

This is the spatial extent of concentrations exceeding the water quality standard or CCC value.

| | | | | | | | | |
|--------|--------|---------|-------|-----------|-------|--------|---------|---------|
| 13.00 | 87.04 | -29.98 | 5.8 | 0.138E+01 | 3.10 | 29.04 | -26.88 | -29.98 |
| 22.05 | 124.96 | -42.95 | 9.4 | 0.855E+00 | 4.01 | 40.43 | -38.95 | -42.95 |
| 32.25 | 162.62 | -55.83 | 13.6 | 0.589E+00 | 4.91 | 51.69 | -50.92 | -55.83 |
| 43.38 | 200.05 | -68.63 | 18.4 | 0.434E+00 | 5.82 | 62.81 | -62.81 | -68.63 |
| 55.30 | 237.26 | -81.36 | 23.8 | 0.336E+00 | 6.73 | 73.80 | -74.63 | -81.36 |
| 67.91 | 274.26 | -94.02 | 29.7 | 0.270E+00 | 7.63 | 84.68 | -86.39 | -94.02 |
| 80.97 | 310.58 | -106.44 | 35.9 | 0.223E+00 | 8.51 | 95.31 | -97.93 | -106.44 |
| 94.78 | 347.20 | -118.96 | 42.7 | 0.187E+00 | 9.40 | 105.98 | -109.56 | -118.96 |
| 109.12 | 383.63 | -131.42 | 50.0 | 0.160E+00 | 10.29 | 116.54 | -121.14 | -131.42 |
| 123.95 | 419.89 | -143.82 | 57.6 | 0.139E+00 | 11.17 | 127.00 | -132.66 | -143.82 |
| 139.26 | 455.97 | -156.17 | 65.6 | 0.122E+00 | 12.04 | 137.36 | -144.12 | -156.17 |
| 155.01 | 491.88 | -168.45 | 73.9 | 0.108E+00 | 12.92 | 147.63 | -155.53 | -168.45 |
| 171.19 | 527.62 | -180.67 | 82.6 | 0.968E-01 | 13.79 | 157.80 | -166.88 | -180.67 |
| 187.56 | 562.72 | -192.67 | 91.6 | 0.874E-01 | 14.65 | 167.74 | -178.03 | -192.67 |
| 204.55 | 598.12 | -204.78 | 100.9 | 0.793E-01 | 15.52 | 177.71 | -189.27 | -204.78 |
| 221.92 | 633.36 | -216.83 | 110.5 | 0.724E-01 | 16.38 | 187.60 | -200.45 | -216.83 |
| 239.67 | 668.42 | -228.83 | 120.5 | 0.664E-01 | 17.25 | 197.38 | -211.58 | -228.83 |
| 257.78 | 703.32 | -240.76 | 130.7 | 0.612E-01 | 18.12 | 207.08 | -222.65 | -240.76 |
| 276.26 | 738.05 | -252.64 | 141.2 | 0.567E-01 | 18.99 | 216.67 | -233.66 | -252.64 |
| 295.09 | 772.61 | -264.46 | 151.9 | 0.527E-01 | 19.86 | 226.17 | -244.60 | -264.46 |
| 314.02 | 806.53 | -276.06 | 162.7 | 0.492E-01 | 20.72 | 235.44 | -255.35 | -276.06 |
| 333.54 | 840.74 | -287.76 | 174.0 | 0.460E-01 | 21.59 | 244.74 | -266.17 | -287.76 |
| 353.41 | 874.78 | -299.40 | 185.4 | 0.432E-01 | 22.48 | 253.94 | -276.93 | -299.40 |
| 373.63 | 908.63 | -310.98 | 197.0 | 0.406E-01 | 23.36 | 263.02 | -287.62 | -310.98 |
| 394.18 | 942.29 | -322.50 | 208.9 | 0.383E-01 | 24.25 | 272.00 | -298.24 | -322.50 |

De precieze waarden worden gegeven in het 'session report':

***** REGULATORY MIXING ZONE SUMMARY *****

No RMZ has been specified.

However:

The ambient water quality standard was encountered at the following

plume position:

Water quality standard = 2 deg.C

Corresponding dilution s = 4

Plume location: x = 8.31 m

(centerline coordinates) y = 64.17 m

z = -22.16 m

Plume dimensions: half-width (bh) = 4.47 m

thickness (bv) = 3.46 m

Deze waarde geldt dus bij een bepaalde combinatie van omgevings- en lozingscondities, in dit geval bij een maatgevende omgevingsconditie (lage stroomsnelheid: < 0,1 m/s). Door middel van iteraties kan met het programma CORMIX zo een indruk verkregen worden van de near-field verspreiding van een warmtepluim.

E Resultaten Delft3D-FLOW

In hoofdstuk 7 is beschreven hoe de validatie van het model is uitgevoerd. De hiervoor uitgevoerde runs staan weergegeven in onderstaande tabel, met aangegeven of het een coldstart of een restart betreft.

Uitgevoerde runs voor validatie.

| Nr. | Beschrijving run | Coldstart | Restart 1 | Restart 2 |
|-----|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | hor. diff. op 10 | 1 klaar | 1.1 klaar | ----- |
| 2 | hor. diff. op 1 | 2 klaar | 2.1 klaar | ----- |
| 3 | hor. diff. op 0.2 | 3 klaar | 3.1 klaar | ----- |
| 4 | hor. diff. op 0.02 | 4 klaar | 4.1 klaar | ----- |
| | <i>Verder met hor. diff. op 1:</i> | | | |
| 5 | geen saliniteit | 5 klaar | ----- | ----- |
| 6 | Lozing stop | 6 klaar | ----- | ----- |
| 7 | geen wind | 7 bezig | ----- | ----- |

Voor het bepalen wat voor een temperatuurverhogingen in de toekomst zullen plaatsvinden, is voor een aantal verschillende processen de gevoeligheid op de temperatuurverhogingen bepaald. Zo is gekeken naar de effecten van veel of weinig zoetwaterafvoer, naar het verschil tussen doortij en springtij en naar alternatieve lozingsscenario's (door een 4^e unit van E.ON, een 2^e unit van Electrabel of door extra warmtelozingen door de chemie op Maasvlakte 2). De hiervoor uitgevoerde runs staan weergegeven de volgende tabel.

Uitgevoerde runs voor gevoeligheidsanalyse.

| Nr. | Beschrijving run | Coldstart | Restart 1 | Restart 2 |
|-----|--|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1700;ds;wf | 1 klaar | 1.1 klaar | 1.2 klaar |
| 2 | 1000;ds;wf | 2 klaar | 2.1 klaar | 2.2 klaar |
| 3 | 2200;ds;wf | 3 klaar | 3.1 klaar | 3.2 klaar |
| | <i>Volgende runs gestart met zoetwaterafvoer van 1700 m³/s:</i> | | | |
| 4 | 1700;dd;wf | ----- | 4.1 klaar | ----- |
| 5 | 1700;ss;wf | ----- | 5.1 klaar | ----- |
| 6 | 1700;ds;nwf | ----- | 6.1 bezig | ----- |
| 7 | 1700;ds;wf;EON | ----- | 7.1 klaar | 7.2 klaar |
| 8 | 1700;ds;wf;Electrabel | ----- | 8.1 klaar | 8.2 klaar |
| 9 | 1700;ds;wf;Chemie | ----- | 9.1 klaar | 9.1 klaar |

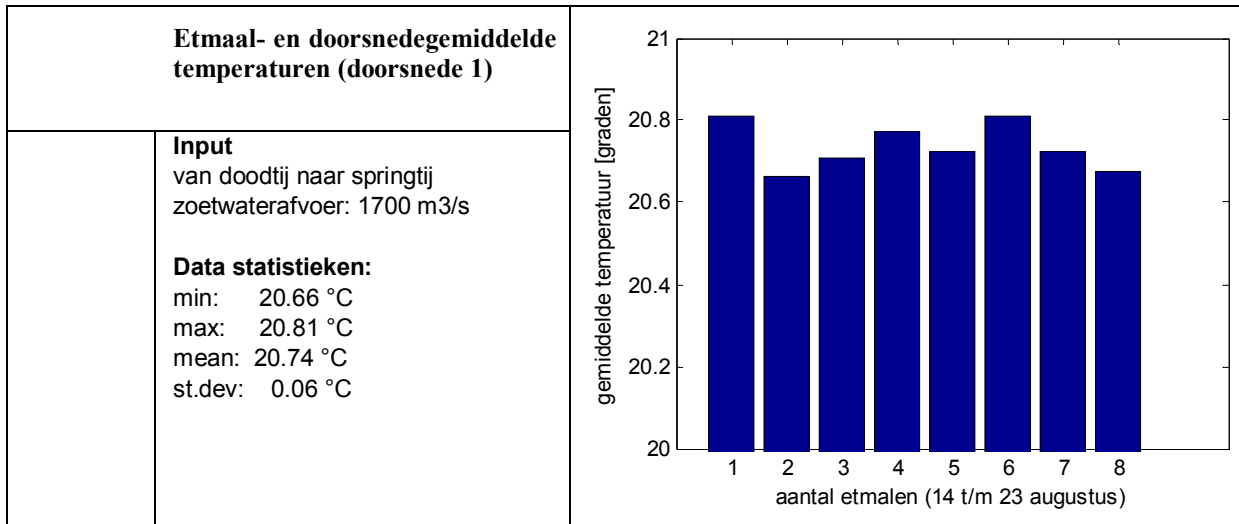
Om de effecten van mogelijke maatregelen te bestuderen, zijn een aantal runs uitgevoerd, zoals de volgende tabel laat zien. Om een consistent beeld te krijgen zijn deze runs allemaal uitgevoerd met een zomergemiddelde zoetwaterafvoer van 1700 m³/s en een horizontale diffusiecoëfficiënt van 1. Voor een realistischer beeld van de verticale dichtheidsgradiënten is voor de maatregel 'verdiept innemen een diffusiecoëfficiënt van 0.2 gebruikt.

Uitgevoerde runs voor oplossingsrichtingen

| Nr. | Beschrijving run | Coldstart | Restart 1 | Restart 2 |
|-----|---|-----------|-----------|-----------|
| 1 | Omwisselen in- en uitlaat E.ON | | | |
| 1 | Extra debiet E.ON | 1 klaar | 1.1 klaar | 1.2 klaar |
| 2 | Extra temperatuurverhoging E.ON | 2 klaar | 2.1 klaar | 2.2 klaar |
| 3 | Europahaven verdiept, inname boven | 3 klaar | 3.1 klaar | 3.2 klaar |
| 4 | Europahaven verdiept, inname onder | ----- | 4.1 klaar | 4.2 klaar |
| 7 | Europahaven verdiept, variabele diepte-inname | ----- | 7.1 | ----- |

E.1 CIW-richtlijn: temperatuurverhoging bij mogelijke grenzen mengzones

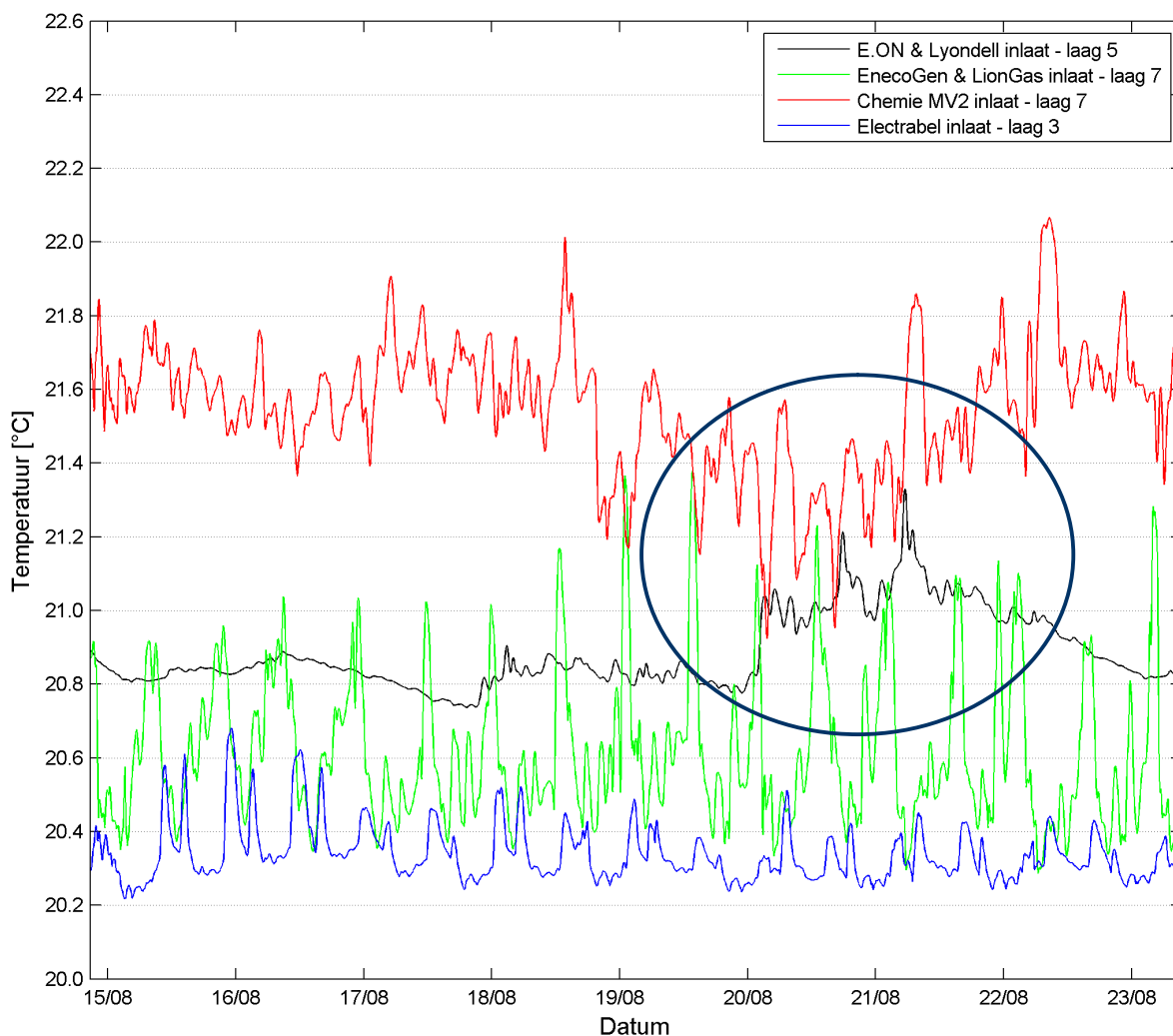
Een voorbeeld van de resultaten op de doorsnede- en etmaalgemiddelde temperatuurverhoging bij de monding van de Yangtze- en Europahaven (doorsnede 1) bij een zoetwaterafvoer van 1700 m³/s zijn in de volgende figuren weergegeven.



Op deze manier is voor elke doorsnede 1 t/m 4 voor verschillende zoetwaterafvoeren de dag- en doorsnedegemiddelde temperatuur en dag- en doorsnede maximale temperatuur van een doortij naar een springtij bepaald. Deze grafieken zijn hier niet weergegeven, alleen bovenstaand voorbeeld. De resultaten zijn in hoofdstuk 8 in tabel en grafiek weergegeven.

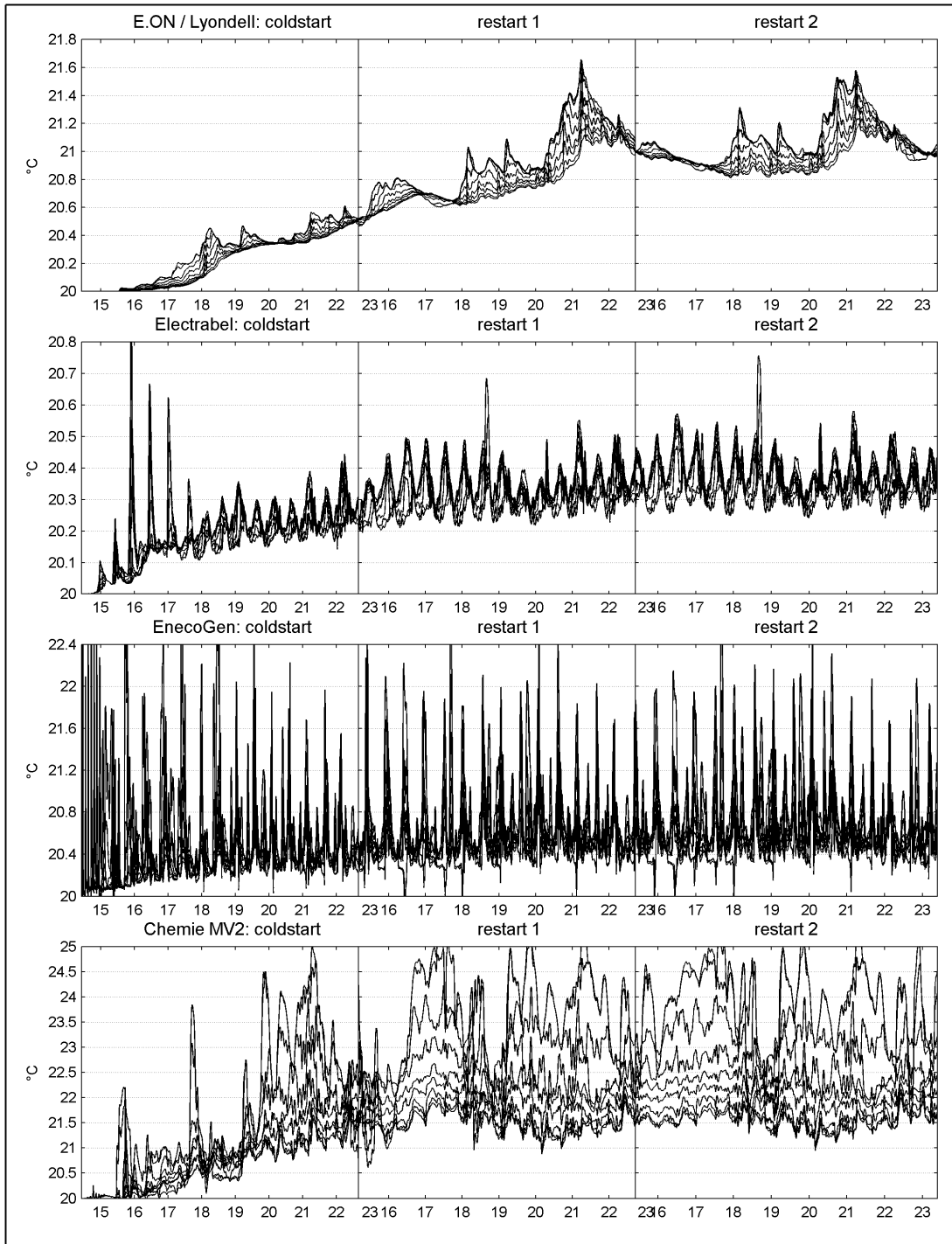
E.2 Recirculatie: temperatuurverhoging bij inlaatlocaties

In de onderstaande figuur is de verhouding te zien van de temperatuurverhoging bij de inlaatlocaties ten gevolge van koelwaterlozingen, bij een zoetwaterafvoer van 1700 m³/s. Van de energiecentrales heeft E.ON de grootste temperatuurverhoging, voornamelijk door zijn eigen lozing. De inlaattemperatuur bij EnecoGen schommelt flink per getijfase.



Weergave van de inlaattemperaturen bij de grote koelwatergebruikers in het Maasvlaktegebied gedurende de negen gesimuleerde dagen. Het omcirkelde gebied laat de afkoeling zien in de Yangtzehaven door springtij tegelijkertijd de extra temperatuurverhoging bij de E.ON inlaat ten gevolge van springtij.

In de volgende drie figuren worden de temperaturen bij de inlaatlocaties voor alle 9 lagen weergegeven met verschillende zoetwaterafvoeren. Over het algemeen geldt dat in laag 2 of 3, en daarna laag 1, de hoogste temperaturen voorkomen, afnemend naar de diepere lagen. In hoofdstuk 8 worden deze resultaten samengevat en geïnterpreteerd.

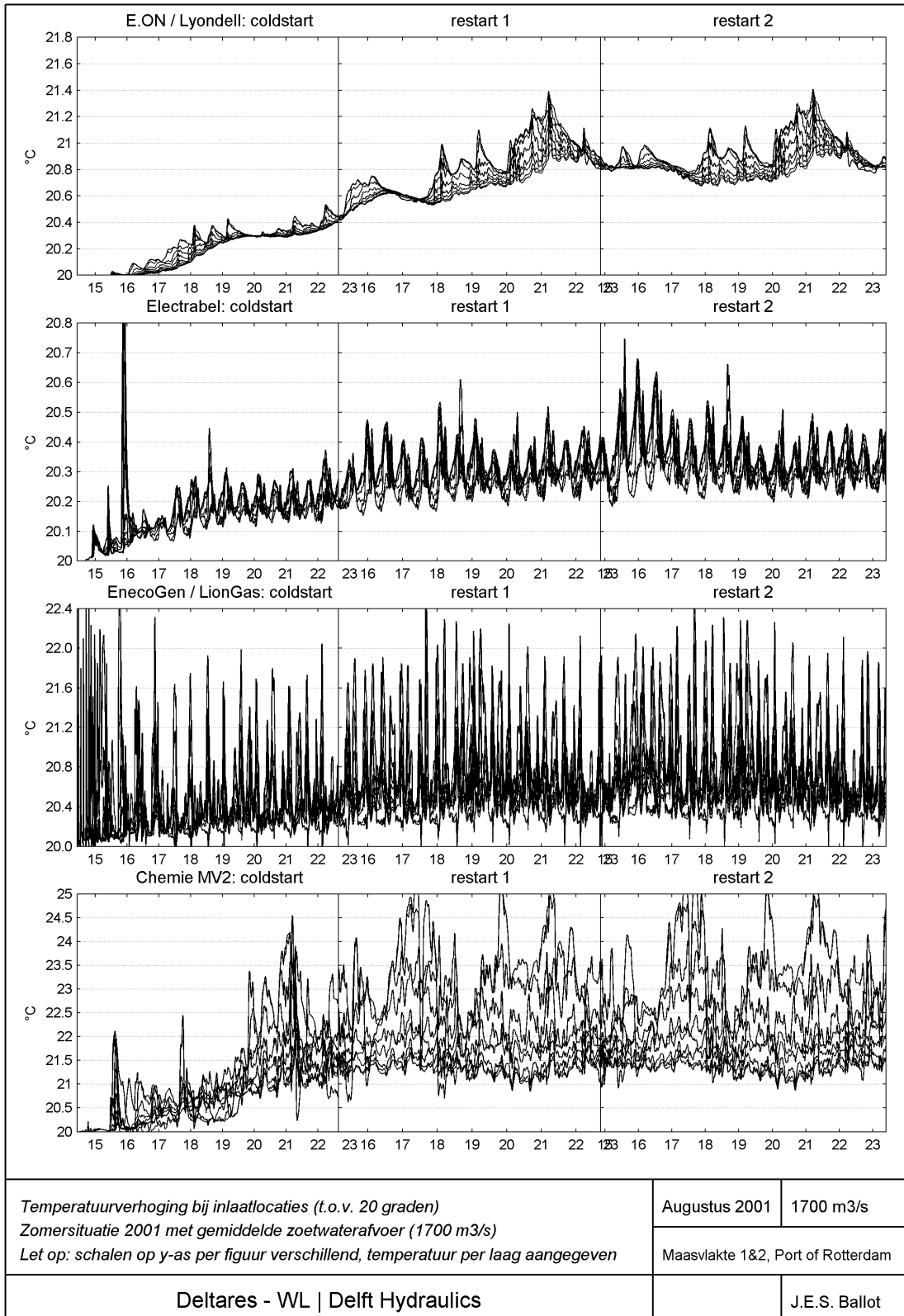


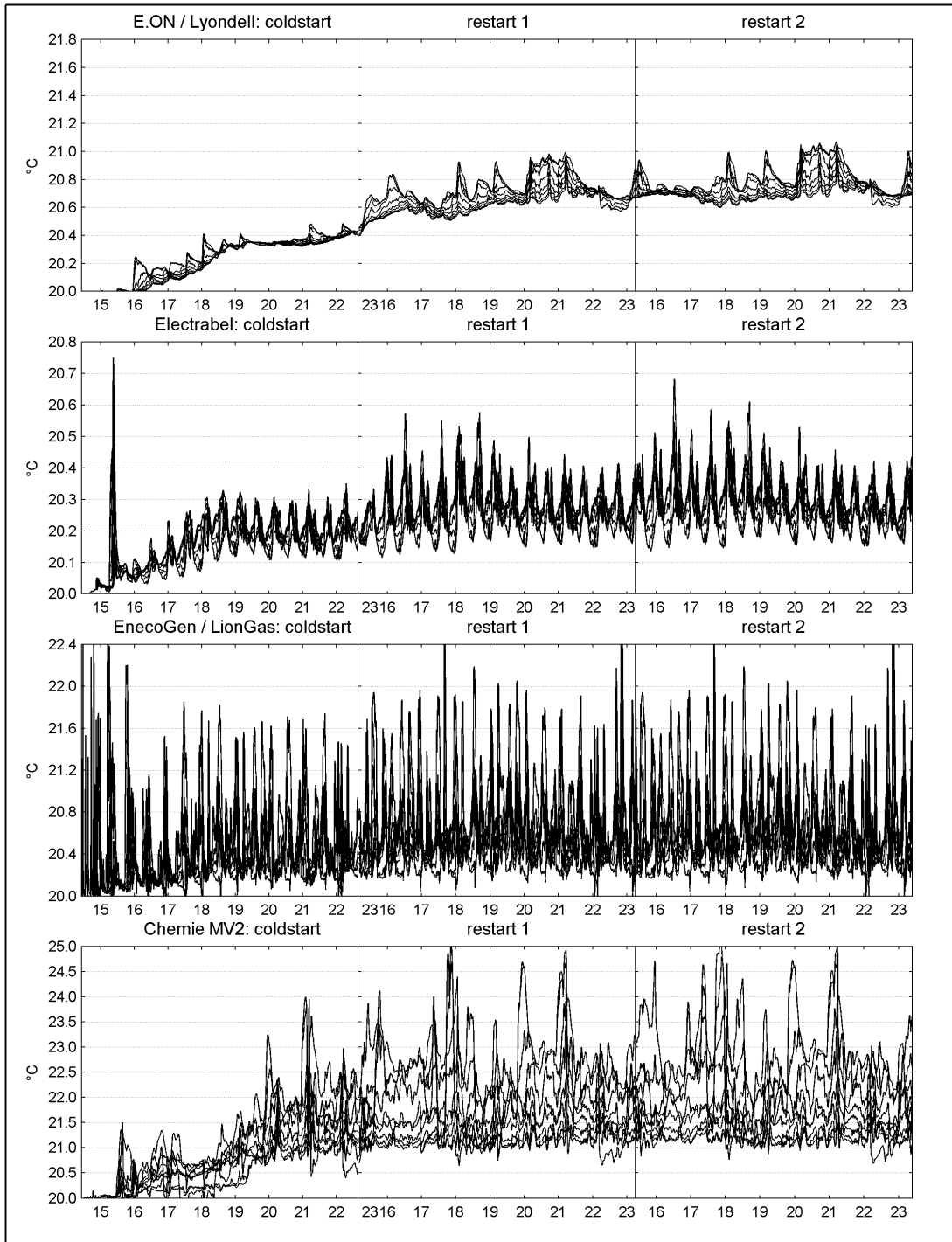
Temperatuurverhoging bij inlaatlocaties (t.o.v. 20 graden)
 Zomersituatie 2003 met lage zoetwaterafvoer (1000 m³/s)
 Let op: schalen op y-as per figuur verschillend, temperatuur per laag aangegeven

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Augustus 2003 | 1000 m ³ /s |
| Maasvlakte 1&2, Port of Rotterdam | |

Deltares - WL | Delft Hydraulics

J.E.S. Ballot





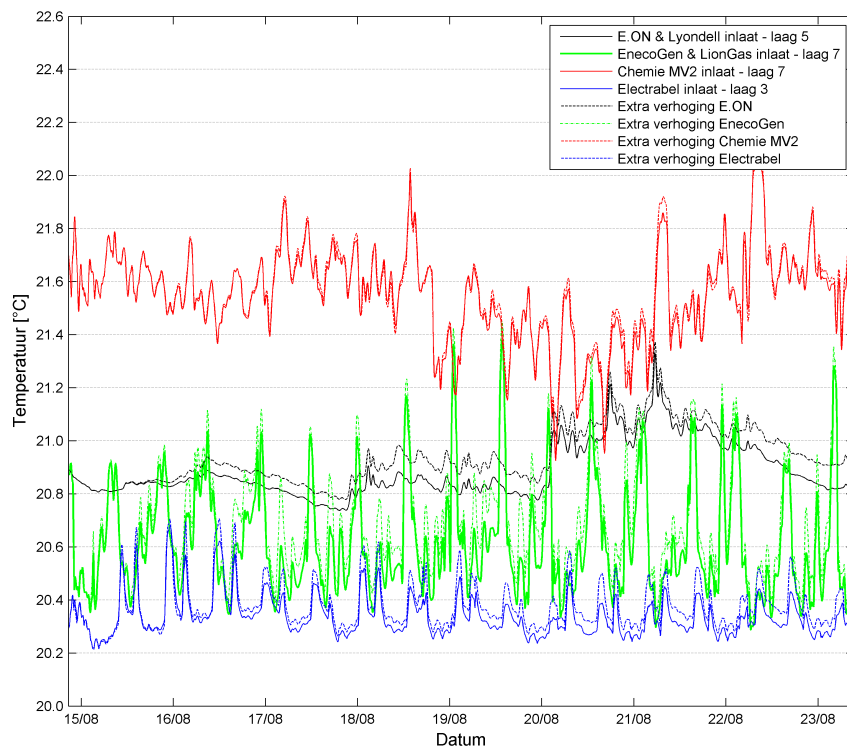
Temperatuurverhoging bij inlaatlocaties (t.o.v. 20 graden)
 Zomersituatie 2004 met hoge zoetwaterafvoer (2200 m3/s)
 Let op: schalen op y-as per figuur verschillend, temperatuur per laag aangegeven

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Augustus 2004 | 2200 m3/s |
| Maasvlakte 1&2, Port of Rotterdam | |

Deltares - WL | Delft Hydraulics

J.E.S. Ballot

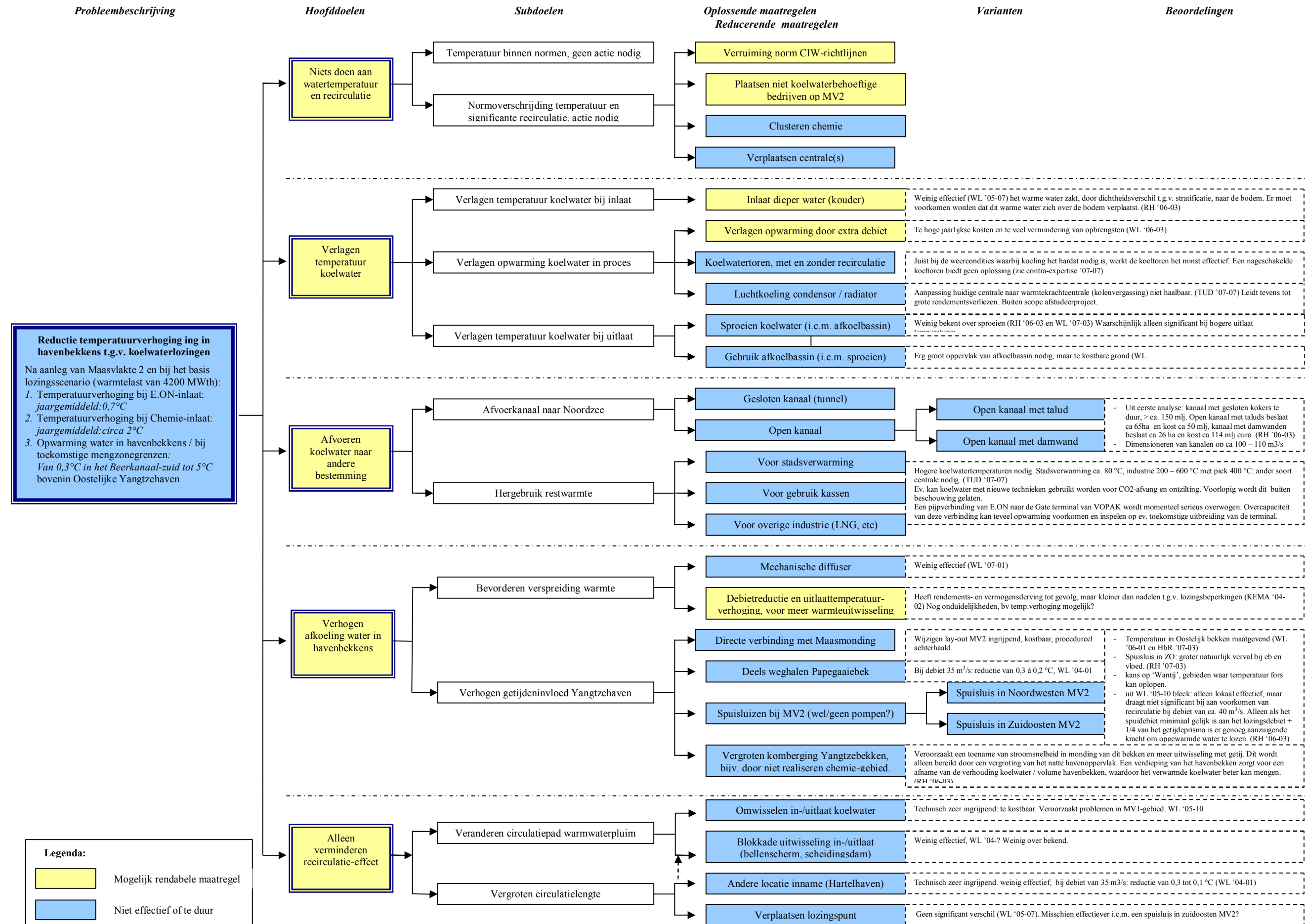
Een voorbeeld van het effect van een alternatieve lozingsscenario op de inlaattemperaturen bij de verschillende innamelocaties is weergegeven in de volgende figuur.



Voorbeeld van extra temperatuurverhoging bij de inlaatpunten bij alternatieve lozingsscenario's, in dit geval door de in gebruikname van een 2e Electrabel unit.

Zo blijkt dat een 2^e unit van Electrabel een zeer geringe invloed heeft op de toename van recirculatie, hooguit 0,1°C opwarming bij E.ON. Dit is echter van een gelijke orde grootte als de nauwkeurigheid waarmee gemodelleerd wordt (beschreven in hoofdstuk 8). De invloed van deze extra unit is dus te verwaarlozen.

F Mogelijke maatregelen Koelwaterproblematiek MV2



Legenda:

- Mogelijk rendabele maatregel
- Niet effectief of te duur

