



Aquathermie in Breda

Effecten van meerdere koudelozingen
geanalyseerd met 3D model

door

Anton de Fockert

02-12-2022

auteur

Deltares

toeleveranciers



Auteur: Anton de Fockert
2 december 2022

Review: Roland Vlijm

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001. WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

[Projectnummer](#)
11205153

[Keywords](#)
Breda, aquathermie, meerdere lozingen, effecten

[Jaar van publicatie](#)
2022

[Meer informatie](#)
Anton de Fockert
T 06 469 111 71
E anton.defockert@deltares.nl

December 2022 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoudsopgave

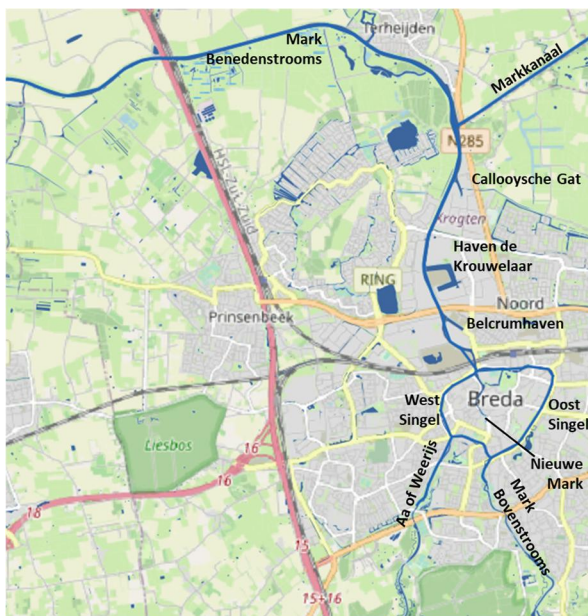
1	Inleiding	4
2	Data analyse	5
2.1	Afvoeren	5
2.2	Waterstanden	5
2.3	Meteorologische gegevens	6
2.4	Koudelozingen	7
3	Modelinstellingen	10
3.1.1	Rekenrooster	10
3.1.2	Bodemgeometrie	11
3.1.3	Randvoorwaarden	13
3.1.4	Lozingen	13
3.1.5	Temperatuuruitwisseling met atmosfeer	14
3.1.6	Scenario's	15
3.2	Validatie	16
4	Resultaten	17
4.1	Algemene Temperatuurverspreiding	17
4.2	Cumulatieve effect	18
4.3	Stratificatie	22
5	Conclusies en aanbevelingen	25
5.1	Conclusies	25
5.1.1	Cumulatieve effecten	25
5.1.2	Stratificatie	26
5.2	Aanbevelingen	26
	Referenties	27

1 Inleiding

Binnen WarmingUP wordt onderzocht wat de potentie van Aquathermie voor Breda is. Omdat de Mark bij Breda een beperkte afvoer heeft, is de potentie van aquathermie gelimiteerd. Om te onderzoeken welke wijken het best op aquathermie aan kunnen worden getakt wordt een Water-Energieplan opgesteld. Als onderdeel van het Water-Energieplan is onderzocht wat de effecten zijn van meerdere onttrekkingen en lozingen in de singels rondom en uit de Mark benedenstrooms van Breda (zie Figuur 1). De analyse is uitgevoerd met behulp van het 1D landelijk SOBEK model [2], waar langjarige effecten bestudeerd kunnen worden.

Omdat er bij aquathermie warmte wordt gewonnen, komt er koude vrij. Dit koude water wordt dan benedenstrooms van de inlaat weer geloosd. Afhankelijk van het debiet van de lozing, de aanwezige stroming en turbulentie in het water, mengt dit koude water wel of niet goed met het omgevingswater. Als het geloosde water niet goed mengt, dan kan het koude water onder het warme oppervlaktewater terecht komen, waardoor het niet kan opwarmen door zoninstraling en warmte uitwisseling met de atmosfeer. Dit kan benedenstrooms een grotere temperatuursverandering geven dan verwacht. Indien meerdere aquathermiesystemen warmte uit hetzelfde water winnen kunnen deze lozingen elkaar beïnvloeden en zorgen voor cumulatieve temperatuursveranderingen.

Omdat deze effecten niet goed met het 1D landelijk SOBEK model kunnen worden onderzocht is een 3D hydrodynamisch model opgezet om deze effecten verder te onderzoeken. Het doel van deze studie is om cumulatieve effecten en stratificatie als gevolg van aquathermie in de Mark bij Breda in meer detail te onderzoeken.



Figuur 1: Situatieschets van de Mark bij Breda inclusief benaming van de waterwegen.

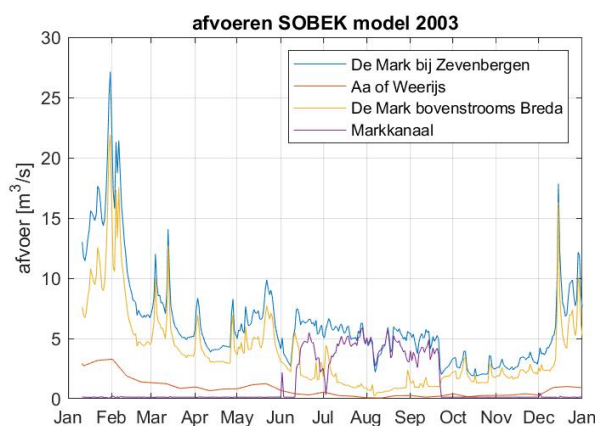
Omdat de Nieuwe Mark in de komende jaren wordt doorgetrokken tot bovenstrooms van het centrum van Breda, is de Nieuwe Mark ook meegenomen in de berekeningen. De implementatie van de Nieuwe Mark is gebaseerd op de HKV notitie [1] waar het effect van de Nieuwe Mark op de stroming rondom Breda is bepaald door middel van SOBEK simulaties.

2 Data analyse

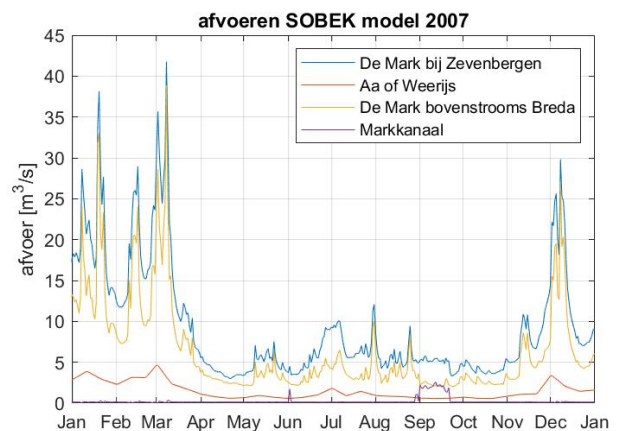
2.1 Afvoeren

Doordat er geen langjarige afvoermetingen beschikbaar zijn rondom Breda zijn de afvoeren voor verschillende jaren geanalyseerd aan de hand van de bestaande modelberekeningen met het landelijke SOBEK model [2]. Hierbij zijn de afvoeren bovenstrooms (de Mark en de Aa of Weerij) en benedenstrooms (de Mark en het Markkanaal) geanalyseerd. De modellen bevatten 31 jaar aan data en laten een duidelijke variatie in afvoer zien tussen de verschillende maanden. De afvoeren in de wintermaanden liggen zo rond de 10 m³/s terwijl de afvoeren in de zomermaanden dalen tot gemiddeld 2-3 m³/s bovenstrooms van Breda.

In Figuur 2 en Figuur 3 zijn de afvoeren voor verschillende locaties rondom Breda gerepresenteerd voor het droge jaar 2003 en het natte jaar 2007. De zomers van de jaren 2018 en 2022 waren ook erg droog, maar ook in het jaar 2003 is de afvoer rondom Breda al minimaal. De jaren 2003 en 2007 zijn ook verder geanalyseerd met behulp van het 1D SOBEK model. Uit deze figuren kan worden afgeleid dat de afvoer in de zomermaanden benedenstrooms van Breda zo'n 5 m³/s bedraagt. In 2003 is de aanvoer bovenstrooms van het centrum van Breda voor langere tijd zelfs onder de 1 m³/s. In 2007 zijn deze afvoeren bovenstrooms van Breda hoger. In dit jaar voert het Markkanaal nauwelijks water af.



Figuur 2: Afvoeren kanalen rondom Breda voor 2003 gebaseerd op 1D SOBEK simulaties



Figuur 3: Afvoeren kanalen rondom Breda voor 2007 gebaseerd op 1D SOBEK simulaties

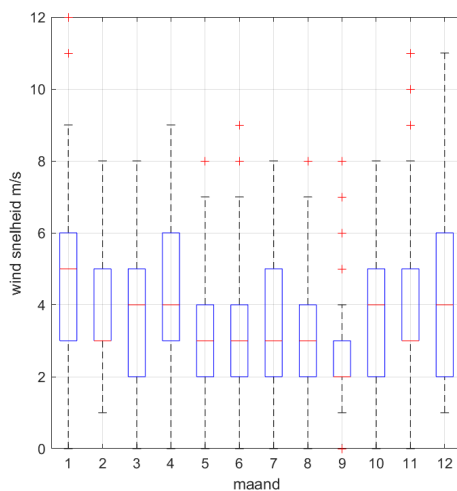
2.2 Waterstanden

Op basis van de metingen van Rijkswaterstaat¹ bij de Trambrug in Breda fluctueert de waterstand in de Mark zo rond de ±10cm NAP. De gemiddelde waterstand is 0m NAP.

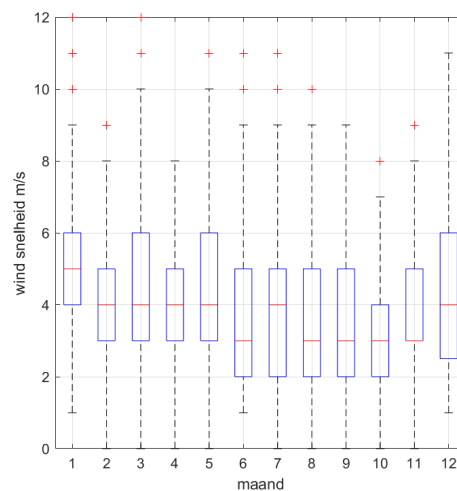
¹ <https://waterinfo.rws.nl/>

2.3 Meteorologische gegevens

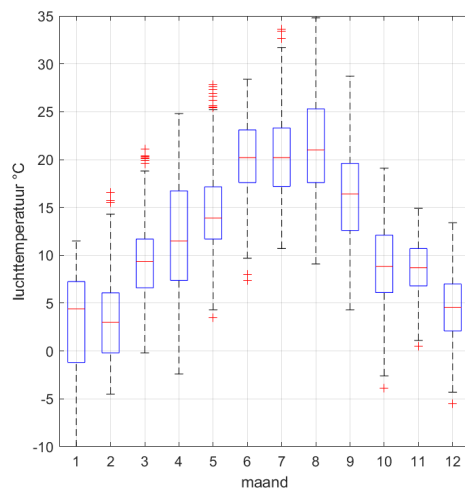
De meteorologische gegevens van het KNMI weerstation Gilze Rijen zijn geanalyseerd voor de jaren 2003 en 2007. Het meetstation ligt zo'n 10 km oostelijk van Breda. Dit meetstation geeft uurgemiddelde waarden² voor parameters zoals: wind snelheid, windrichting, bewolking, luchttemperatuur, luchtvochtigheid, etc. De windsnelheid en luchttemperatuur zijn voor de jaren 2003 en 2007 te zien in Figuur 4 tot Figuur 7. Deze meteorologische condities zijn gebruikt om het temperatuurmodel mee te voeden, zodat de warmte-uitwisseling met de atmosfeer goed wordt meegenomen in de berekeningen.



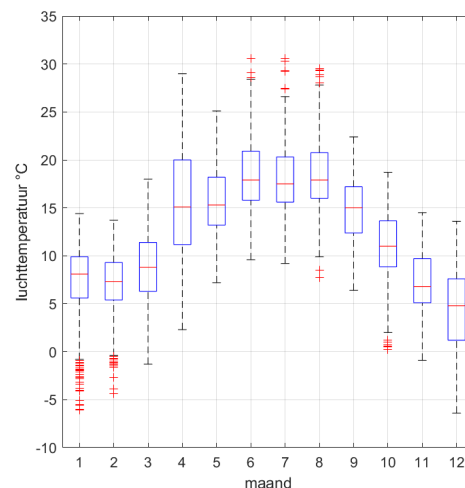
Figuur 4: Windsnelheid voor 2003 gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen



Figuur 5: Windsnelheid voor geheel 2007 gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen



Figuur 6: Luchttemperatuur voor 2003 gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen



Figuur 7: Luchttemperatuur voor 2007 gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen

² <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens>

2.4 Koudelozingen

In het Water en Energieplan voor Breda zijn een aantal scenario's gedefinieerd op basis van benodigde warmte per kavel. Deze scenario's zijn gebaseerd op de mogelijke warmtenetconfiguraties:

1. Kavelset 1 bestaat uit logische clusters van gebouwen geschikt voor alleen lage temperatuur warmtenetten (LT kavels);
2. Kavelset 2 bestaat uit logische clusters van gebouwen geschikt voor lage temperatuur én midden temperatuur warmtenetten (LT+MT kavels)

De kavelsets zijn geïllustreerd in Figuur 1. De achtergrond voor de kavelselectie is verder uitgewerkt in het Water en Energieplanrapport [3].

In deze studie is alleen naar de daling in de watertemperatuur gekeken en niet naar de daadwerkelijke impact op de ecologie. De daling in de watertemperatuur wordt gebruikt als een van de indicatoren voor de ecologische impact. De relatie tussen watertemperatuur en de ecologie, of liever gezegd de koudelozing in de vorm van een lokale koudepluim is niet bekend. Daarvoor is nader onderzoek nodig in de vorm van ecologische monitoring, zoals voorgesteld in het Monitoringsplan Ecologische Effecten TEO systemen [9]. Hoewel er geen harde grenzen vastgesteld zijn over wat wel of niet ecologisch verantwoord is, wordt in het Beleidskader Koudelozingen [8] een grens van 4°C aangehouden.

In dit rapport is het STOWA scenario [8] als uitgangspunt genomen. De randvoorwaarden voor De Mark zijn niet geheel eenduidig. Voor lijnvormige, stomende waren en beken geldt dat 10% van het gemiddeld zomerdebiet gebruikt mag worden voor de warmtewinning, voor kleine vaarten geldt 5%. In dit scenario is een veilige marge gekozen, namelijk 5% van het gemiddeld zomerdebiet per lozing met een maximale ΔT van 5°C.

Omdat de configuratie van de uitlaatconstructie nog niet bekend is, is het ook nog niet duidelijk of het water met een pijp wordt geloosd of dat er een uitlaatconstructie met een overlaatrond wordt gebouwd. Bovendien zou dit kunnen verschillen per lozingslocatie, omdat verschillende configuraties beter toepasbaar zijn, meer gewenst zijn of omdat de aannemer een voorkeur heeft voor een bepaalde configuratie.

In scenario LT+MT zijn 10 verschillende lozingslocaties beschikbaar en in het LT scenario 8 lozingen. Iedere lozingslocatie heeft zijn eigen debiet. In Tabel 2.1 zijn de vermogens gegeven voor die worden onttrokken aan het water gedurende de gehele zomerperiode. Met een temperatuurwinning van 5°C levert dit een uitstroomdebiet en een bijbehorende pijpdiameter uitgaande van een uitstroomstroomsnelheid van 0.3 m/s volgens de waterregelingwet³. Deze uitlaatl diameters zijn relatief groot, en zouden kunnen worden opgedeeld in meerdere uitlaatpijpen. Omdat de uitlaatconstructie nog niet bekend is, wordt dit niet verder uitgewerkt voor deze studie.

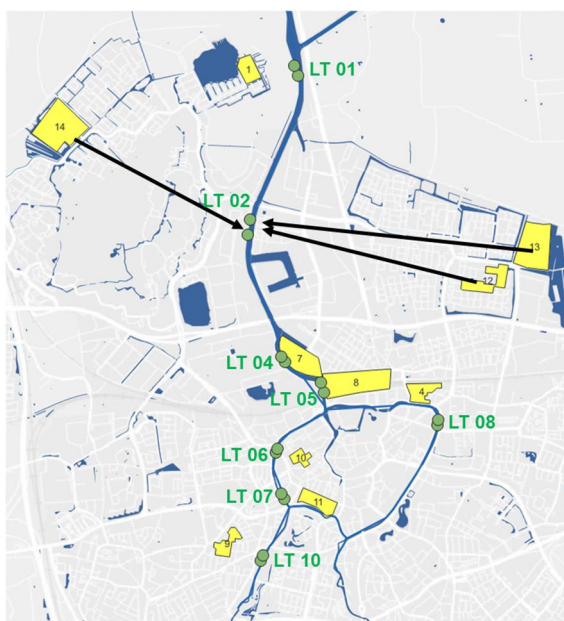
³ <https://wetten.overheid.nl/BWBR0026845/2022-07-01>

Tabel 2.1: ranges in vermogen, debiet en diameters uitlaatpijp voor de verschillende lozingen voor de verschillende LT en LT+MT scenario

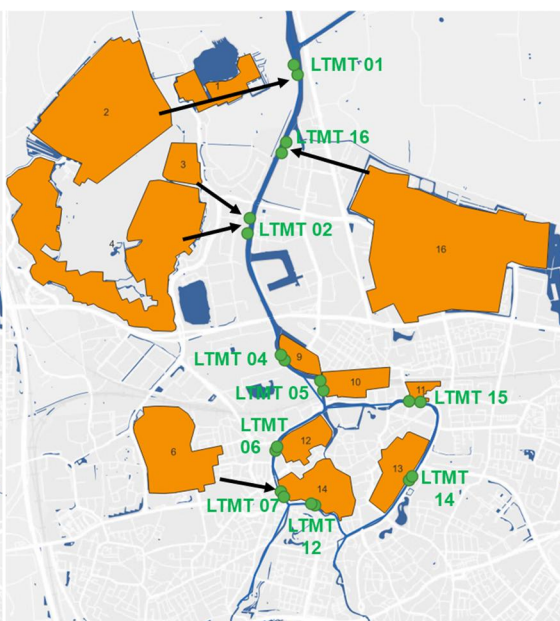
	vermogen	lozingsdebiet	Uitlaatdiameters
	MW	l/s	mm
droog jaar 2003	0.5-2.5	25-120	300-700
nat jaar 2007	0.5-5.5	25-270	300-1000*

* bij grote uitlaatdiameters kan het wenselijk zijn om 2 pijpen naast elkaar te leggen

De inname en lozingspunten zijn voor de scenario's LT en LT+MT weergegeven in Figuur 8 en Figuur 9. In het LT scenario zijn 8 aquathermiesystemen opgenomen en in het LT+MT scenario zitten 10 aquathermiesystemen.



Figuur 8: Potentiele warmtekavels voor aquathermie voor het LT scenario inclusief inname en lozingspunten. De lozingspunten liggen 100m benedenstrooms van de innamepunten. De zwarte pijlen geven aan welke kavels bij welke lozingspunten horen



Figuur 9: Potentiele warmtekavels voor aquathermie voor het LT+MT scenario inclusief inname en lozingspunten. De lozingspunten liggen 100m benedenstrooms van de innamepunten. De zwarte pijlen geven aan welke kavels bij welke lozingspunten horen

Tabel 2.2: Vermogens en debieten voor de verschillende lozingen voor gesimuleerde LT scenario's. Bij de oranje lozingen wordt het gewenste debiet beperkt tot maximaal 5% van het gemiddelde zomerafvoer.

onttrekkingspunt	kavel	warmteonttrekking 2003			lozings debiet 2003 (m3/s)	warmteonttrekking 2007			lozings debiet 2007 (m3/s)
		gewenst (MW)	toegepast (MW)	percentage		gewenst (MW)	toegepast (MW)	percentage	
LT 1	1	2.24	2.24	100%	0.11	2.24	2.24	100%	0.11
LT 2	12,13,14	3.20	2.48	77%	0.12	3.20	3.20	100%	0.15
LT 4	7	1.24	1.24	100%	0.06	1.24	1.24	100%	0.06
LT 5	8	3.31	2.48	75%	0.12	3.31	3.31	100%	0.16
LT 6	10	1.00	1.00	100%	0.05	1.00	1.00	100%	0.05
LT 7	11	0.52	0.52	100%	0.02	0.52	0.52	100%	0.02
LT 8	4	0.83	0.83	100%	0.04	0.83	0.83	100%	0.04
LT 10	9	1.23	0.36	29%	0.02	1.23	1.00	81%	0.05
Totaal		13.58	11.15			13.58	13.34		

Tabel 2.3: Vermogens en debieten voor de verschillende lozingen voor gesimuleerde LT+MT scenario's. Bij de oranje lozingen wordt het gewenste debiet beperkt tot maximaal 5% van het gemiddelde zomerafvoer.

onttrekkingspunt	kavel	warmteonttrekking 2003			lozings debiet 2003 (m3/s)	warmteonttrekking 2007			lozings debiet 2007 (m3/s)
		gewenst (MW)	toegepast (MW)	percentage		gewenst (MW)	toegepast (MW)	percentage	
LTMT 1	1,2	14.71	2.56	17%	0.12	14.71	5.59	38%	0.27
LTMT 2	3,4	18.92	2.48	13%	0.12	18.92	5.06	27%	0.24
LTMT 4	9	1.24	1.24	100%	0.06	1.24	1.24	100%	0.06
LTMT 5	10	3.75	2.48	66%	0.12	3.75	3.75	100%	0.18
LTMT 6	12	5.07	1.25	25%	0.06	5.07	2.61	52%	0.12
LTMT 7	6	6.12	1.25	20%	0.06	6.12	2.61	43%	0.12
LTMT 12	14	6.32	0.89	14%	0.04	6.32	1.61	26%	0.08
LTMT 14	13	6.56	1.21	18%	0.06	6.56	2.28	35%	0.11
LTMT 15	11	1.23	1.23	100%	0.06	1.23	1.23	100%	0.06
LTMT 16	16	22.67	2.56	11%	0.12	22.67	5.59	25%	0.27
Totaal		86.59	17.14			86.59	31.58		

In Tabel 2.2 en Tabel 2.3 zijn de individuele debieten weergegeven voor de verschillende scenario's op de verschillende lozingspunten. In deze tabellen is te zien dat het toegepaste vermogen per onttrekkingspunt soms kleiner is dan het gewenste vermogen voor de kavels. Dit komt omdat het onttrekkingsdebiet dan de limiet bereikt van 5% van de zomergemiddelde afvoer. Voor het LT scenario is dit minder vaak het geval dan voor het LT+MT scenario. De toegepaste vermogens zijn bepaald op het afvoerdebiet ter plaatse van de onttrekking. Zo is de toegepaste warmteonttrekking in punt LTMT01 iets groter dan in LTMT02. Dit komt omdat het Callooyse gat (Figuur 1) zorgt voor een hoger achtergrond debiet bij lozingspunt LTMT01 dan bij LTMT02. Zo is ook de lozing bij lozingspunt LTMT12 kleiner dan bij LTMT07. Dit komt omdat de zomergemiddelde afvoer bij lozingspunt LTMT07 groter is dan bij LTMT12, vanwege extra de afvoer door de Aa of Weerijs.

De lozingsdebieten zijn voor deze lozingen 5% van de gemiddelde zomerafvoer van het desbetreffende jaar. Echter, omdat de gemiddelde zomerafvoer vooraf niet bekend is, is er ook een scenario uitgerekend waar de lozingen gebaseerd zijn op het 10jaar gemiddelde zomerdebiet. In een droog jaar zorgt dit voor hogere afvoeren dan weergegeven in Tabel 2.3. Het 10-jaar gemiddelde zomergemiddelde debiet is 54% groter dan het zomergemiddelde debiet van 2003. De lozingen voor de simulatie met het 10-jaar zomergemiddelde debiet zijn dan ook met dit percentage verhoogd om het effect in kaart te kunnen brengen.

3 Modelinstellingen

Het hydrodynamische model is opgezet in het D-FLOW FM⁴ softwarepakket wat ontwikkeld is door Deltares. Dit software pakket kan 3D stromingen uitrekenen in oppervlakte water. Het software pakket is de opvolger van SOBEK-FLOW en Delft3D-FLOW. Het werkt met onregelmatige roosters, waardoor moeilijke geometrieën goed kunnen worden gerepresenteerd in het model. Dit geldt met name voor Breda waar het systeem met splitsingen, havens en singels een uitdaging geeft voor een gestructureerd rekenrooster. Het D-FLOW FM gebruikt dezelfde beschrijving voor het modelleren van thermische pluimen als het oude Delft3D model [3], wat hiervoor gevalideerd is.

3.1.1 Rekenrooster

Het model omvat een deel van de Mark en de Aa of Weerij's bovenstrooms van het centrum van Breda, de singels rondom het centrum en de Mark benedenstrooms richting Zevenbergen. Het Markkanaal vanuit Oosterhout is ook meegenomen in het Delf3D model. Er zijn 2 modellen opgezet voor Breda: een model zonder de Nieuwe Mark en een model met de Nieuwe Mark.

Onregelmatige rekenroosters zijn toegepast in de situatie bij Breda om de havens, de singels en de splitsingen goed weer te kunnen geven. Het curvi-lineaire rekenrooster volgt de oevers en bevat de havens in Breda. Een horizontale schematisatie van het rekenrooster is weergegeven in Figuur 10 en Figuur 11.



Figuur 10: Boven: Volledige rekenrooster van het D-FLOW FM model voor Breda. De cirkelvormige geometrie representeren de singels en omsluiten het centrum van Breda.

⁴ <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/#features>



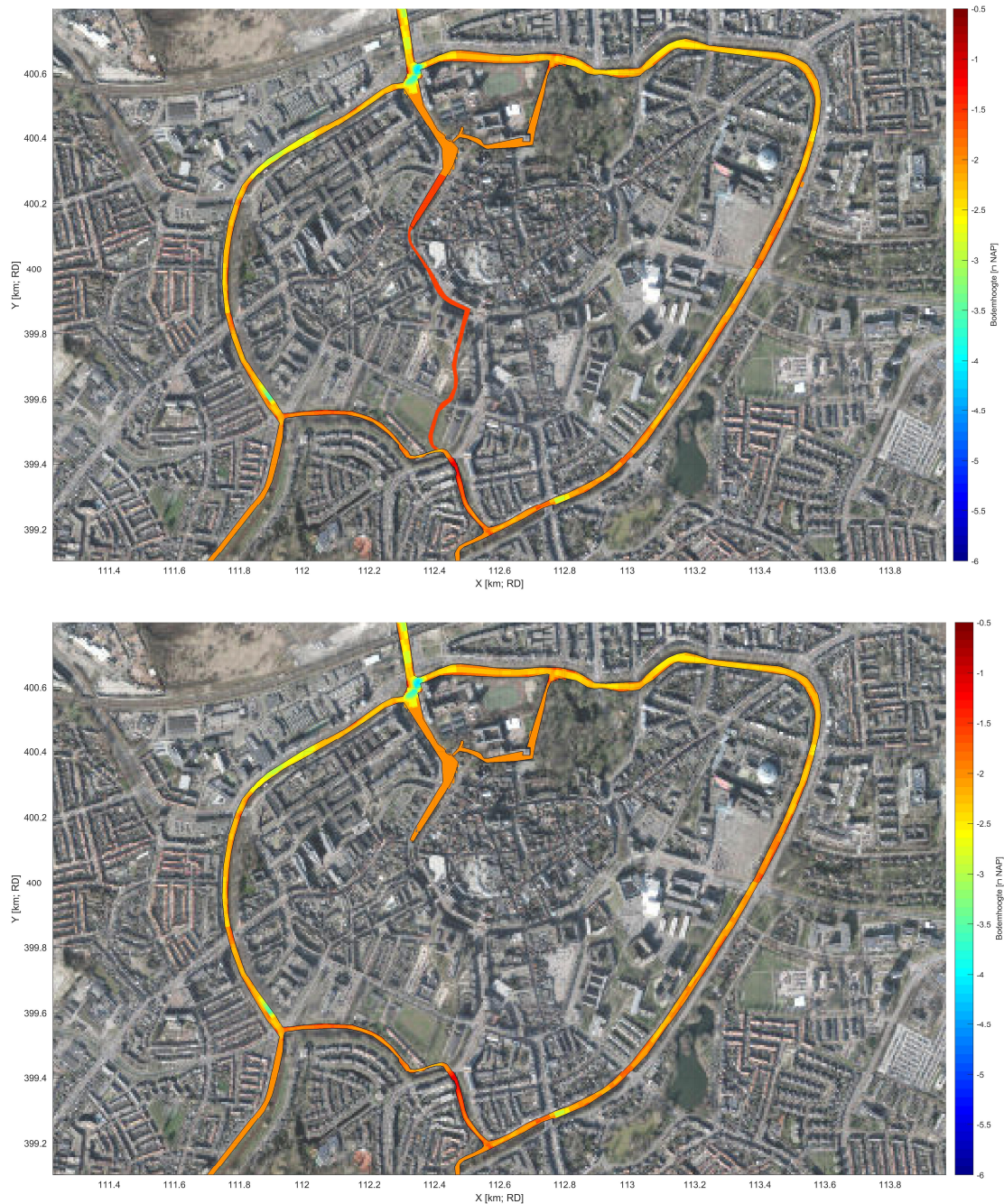
Figuur 11: Boven: Detail van het rekenrooster voor de singels met de Nieuwe Mark en Onder: Detail van het rekenrooster voor de singels zonder de Nieuwe Mark

De horizontale afmetingen van het rekenrooster variëren voor de verschillende riviertakken. De minimale afmetingen zijn 5m en de maximale afmetingen zijn 20m. Voor de verticale resolutie zijn 10 cellen tussen het wateroppervlak en de bodem aangenomen. Bij een gemiddelde diepte van 3m resulteert dit in een hoogte van 30 cm per rekencel.

3.1.2 Bodemgeometrie

De bodem van het modelgebied is gebaseerd op gemeten bodems door het Waterschap Brabantse Delta. Bodemprofielen voor de Aa of Weerij en bodempunten van de singels rondom het centrum

van Breda en de benedenstroomse Mark zijn gebruikt voor het genereren van een bathymetrie voor het model. De bathymetrie voor de Nieuwe Mark is constant gehouden met een diepte van NAP -1.6 m zoals ook gebruikt in de studie van HKV [1] en het bodemprofiel van het Markkanaal is constant gehouden. Een detail van de bodemgeometrie van het model is weergegeven in Figuur 12. Hierin is het detail van de bodemgeometrie over de breedte van de kanalen te zien.



Figuur 12: Boven: detail van de bodemgeometrie voor de singels met de Nieuwe Mark en Onder: Detail van het rekenrooster voor de singels zonder de Nieuwe Mark

3.1.3 Randvoorwaarden

Het model is aangestuurd door debieten op de bovenstroomse randen bij de Aa van Weerij, de Mark en het Markkanaal voor te schrijven en de waterstand aan de benedenstroomse rand. Hiervoor is een waterstand van 0m NAP gehanteerd als gemiddelde gemeten waterstand bij de Trambrug in Breda.

Voor het droge jaar 2003 en het natte jaar 2007 zijn zomerperiodes gekozen. Tijdens de zomer wordt het aquathermiesysteem gebruikt om warmte te genereren en om de WKO bronnen te regenereren. Voor de simulatie zijn specifieke periodes gekozen met een lage afvoer in de zomer periode wanneer het aquathermiesysteem in operatie is. In Tabel 3.1 zijn de gemiddelde afvoeren gegeven voor de gesimuleerde periode.

Tabel 3.1: gemiddelde afvoeren in de simulatieperiodes

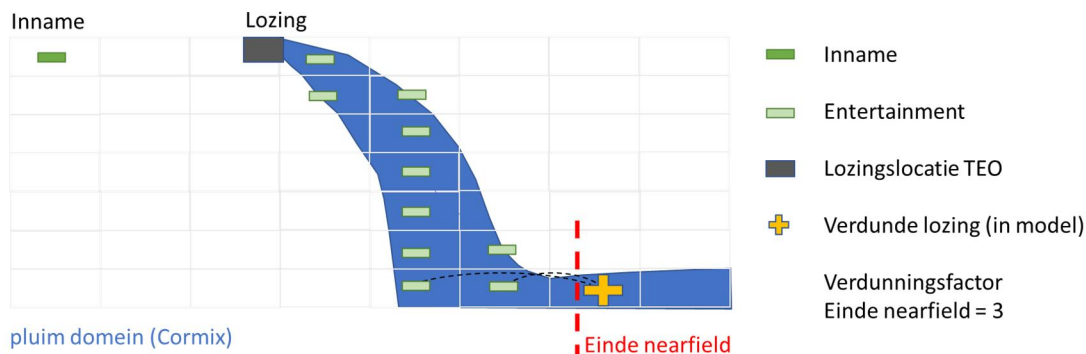
	simulatie periode	Gemiddelde afvoer [m ³ /s]		
		Aa of Weerij	de Mark bovenstrooms van centrum	Markkanaal
droog jaar 2003	1 aug – 15 aug	0.1	0.6	4.1
nat jaar 2007	2 juni – 15 juni	0.7	2.5	0.1

3.1.4 Lozingen

In dit rapport is een scenario gedefinieerd met een vast onttrekkingsregime volgens het STOWA Beleidskader Koudelozingen, zie paragraaf 2.4. De lozingen behorende bij dit scenario zijn gebruikt in het 3D model.

Wanneer het water van het aquathermiesysteem wordt geloosd, dan kan het verticaal opmengen met de rest van het omringende water, maar het kan ook stratificeren. Dat betekent dat er een gelaagdheid ontstaat met het koude water onderin de waterkolom en het warme omgevingswater daarbovenop. Het nadeel van deze gelaagdheid is dat het koude water niet in contact komt met het wateroppervlak waar het weer kan opwarmen. Of er gelaagdheid gaat ontstaan wordt bepaald door het dichtheidsverschil tussen de koudelozing en het omliggende water, het ontwerp van de uitlaatconstructie, de stroming in het omgevingswater en de turbulentiegraad in het water. Bij zwak dynamische systemen (o.a. beken, sloten, meren) is het risico op gelaagdheid veel groter dan bij sterk dynamische systemen (o.a. grote rivieren). In de situatie van Breda is het onduidelijk of er gelaagdheid gaat ontstaan, omdat de ontwerpen van de uitlaatconstructies nog niet bekend zijn. Het zou zelfs zo kunnen zijn dat bepaalde lozingen wel gaan stratificeren en andere niet. Om deze reden zijn er 2 situaties uitgerekend voor de lozingen rondom Breda: 1) verticaal gemengde lozingen en 2) gestratificeerde lozingen.

Een indicatieve som met het nearfield model CORMIX [5] laat zien dat het water in zwak dynamische periodes zoals in de zomer zou kunnen stratificeren. Deze som laat zien dat de lozing aan het einde van het nearfield zo'n 3x verdund is. Dit effect is ook meegenomen in het farfield model (D-FLOW FM simulatie). Om de initiële menging in het nearfield in het D-Flow FM model te reproduceren is gebruikt gemaakt van de Distributed Entrainment Sinks Approach, d.w.z. DESA methode [6]. Hierbij wordt er door middel van bronnen en putten de koudelozing een factor 3 gemengd in het D-Flow FM model gebracht (Figuur 13). Deze methode wordt gebruikt om het water dicht bij de uitlaat op een representatieve manier in het model te brengen.

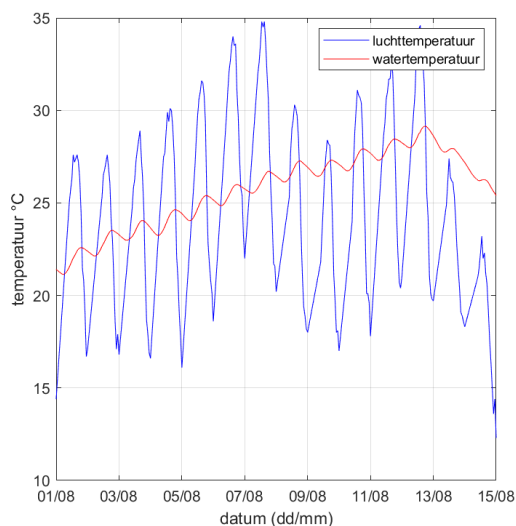


Figuur 13: Schematische weergave van de DESA methode [6]. Het water van het innamepunt wordt bij het uitlaatpunt geloosd. Daarnaast wordt er ook water dicht bij de uitlaat in het nearfield domein onttrokken (groene “-” tekens) en dit wordt ook geloosd op het uitlaatpunt (geel “+” teken).

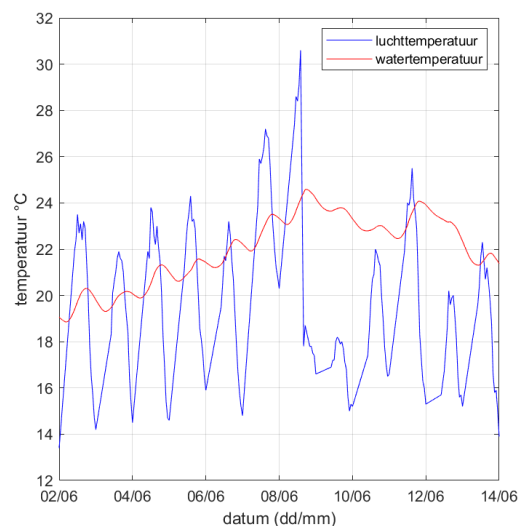
3.1.5 Temperatuuruitwisseling met atmosfeer

Voor de temperatuuruitwisseling met de atmosfeer is een temperatuurmodel gebruikt. Voor het model is het “composite – heat flux” model gebruikt wat beschikbaar is in D-FLOW FM. Dit model gebruikt de relatieve vochtigheid, de windcondities, de luchttemperatuur en de bewolgingsgraad. De zoninstraling wordt berekend door het model gebaseerd op de tijd in de dag, de breedtegraad van het modeldomein en de bewolgingsgraad [3].

De luchttemperatuur heeft een duidelijk dag/nacht ritme. Dit dag/nacht ritme is opgelegd op het model. Omdat er geen gegevens beschikbaar zijn voor de watertemperatuur voor de gesimuleerde perioden is de watertemperatuur berekend met het model. Hierbij is een simulatie uitgevoerd zonder lozingen, maar met het temperatuurmodel. De temperatuur bij de uitstroomrand is gebruikt als watertemperatuur voor het model (zie Figuur 14 en Figuur 15). In deze figuren is te zien dat de watertemperatuur met de luchttemperatuur mee varieert.



Figuur 14: Luchttemperatuur en gesimuleerde watertemperatuur in de kanalen rondom Breda voor 2003 gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen

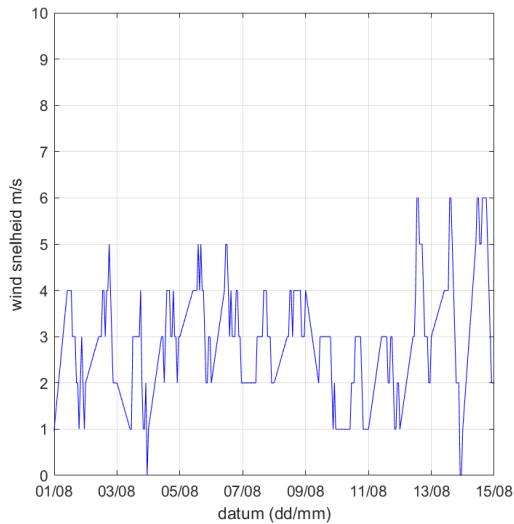


Figuur 15: Luchttemperatuur en gesimuleerde watertemperatuur in de kanalen rondom Breda voor 2007 gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen

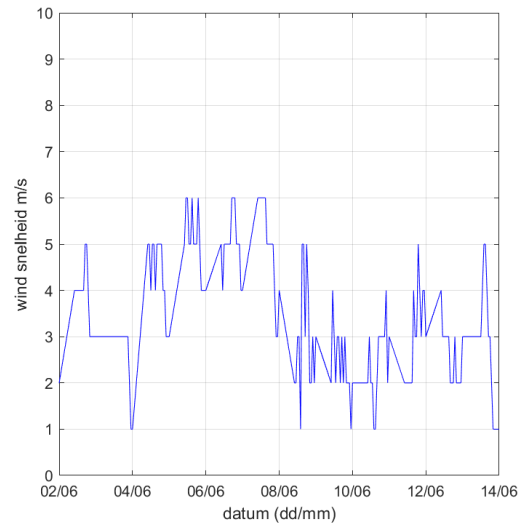
De zoninstraling in het water hangt af van de troebelheid van het water. De doorzicht van het water kan worden gemeten met een zogenaamde Secchi schijf waarbij de diepte waar de schijf niet meer

zichtbaar is de Secchi diepte wordt genoemd. In het 3D model is een Secchi diepte van 0.5m gehanteerd, wat conservatief is voor vaarten en singels zoals rondom Breda, wanneer het wordt vergeleken met vergelijkbare binnenwateren [7].

Omdat de windsnelheid van invloed is op de mate van turbulentie en dus ook op de menging, is de windsnelheid voor de jaren 2003 en 2007 zoals gemeten bij KNMI weerstation Gilzen Rijen gegeven in Figuur 16 en Figuur 17



Figuur 16: Tijdsree van de windsnelheid voor 2003 zoals gebruikt in het 3D model (gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen)



Figuur 17: Tijdsree van de windsnelheid voor 2007 zoals gebruikt in het 3D model (gebaseerd op het KNMI meetstation Gilzen Rijen)

3.1.6 Scenario's

Met de modelinstellingen zoals beschreven in de voorgaande paragrafen zijn een set van modelberekeningen uitgevoerd voor de lozingen voor de toepassing van aquathermie rond Breda. In Tabel 3.2 zijn de variaties weergegeven die zijn gebruikt in het hydrodynamische model. Deze variaties leiden tot een zestiental scenario's welke zijn doorgerekend met het 3D model. Naast deze berekeningen zijn er voor 2003 en 2007 referentiesimulaties gedraaid zonder lozingen waarmee de bovenstaande simulaties zijn vergeleken om het effect van de lozingen te bepalen.

De gekozen scenario's zijn bepaald op basis van de rivierafvoer in de Mark en de Aa of Weerijs. Door een beperkte rivierafvoer in de gekozen zomerperiode is de kans op stratificatie en het effect van de lozingen het grootst. Deze minimale rivierafvoer valt niet samen met het maximale lozingsdebiet in de zomer. Er kunnen meer maatgevende situaties ontstaan bij een grotere lozingen met een hogere afvoer met andere windcondities. Het was echter niet het doel van de studie om al deze scenario's in kaart te brengen.

Tabel 3.2: Berekende scenario's met het 3D hydrodynamische model.

	variabele 1	variabele 2
Jaar	1-15 aug 2003	1-15 juni 2007
Nieuwe Mark	ja	nee
Lozing	verticaal gemengd	gestratificeerd
Scenario	LT	LT+MT

Er is een extra simulatie uitgevoerd met een lozing op basis van het zomergemiddelde debiet van 10 jaar. Deze lozingen zijn toegepast op het droge jaar 2003. Dit scenario is weergegeven in Tabel 3.3

Tabel 3.3: Extra scenario voor het jaar 2003 met de lozingsdebieten gebaseerd op de 10 jaar zomergemiddelde afvoer.

	10 jaar zomergemiddeld
Jaar	1-15 aug 2003
Nieuwe Mark	ja
Lozing	gestratificeerd, debieten op basis van de 10jaar zomergemiddelde afvoer
Scenario	LT+MT

3.2 Validatie

Het hydrodynamische 3D model is vergeleken met de gemiddelde afvoersituatie zoals gemodelleerd met SOBEK en beschreven in het HKV rapport [1]. Hierbij zijn de afvoeren voor de oostelijke en westelijke singel vergeleken met afvoeren zoals gemodelleerd door HKV. De afvoeren voor de oostelijke singel in het D-FLOW FM model is $4.3\text{ m}^3/\text{s}$ ten opzichte van $4.5\text{ m}^3/\text{s}$ in het SOBEK model en de afvoer door de westelijke singel is $2.6\text{ m}^3/\text{s}$ in plaats van $2.8\text{ m}^3/\text{s}$ in het SOBEK model. De verschillen zijn te verklaren doordat het SOBEK model de singels in een paar grote segmenten opdeelt met een vast bodemprofiel, terwijl het D-FLOW FM model de gedetailleerde gemeten bodemgeometrie gebruikt. De vergelijking met de SOBEK sommen geeft vertrouwen dat het 3D model geschikt is om de stroompatronen rondom Breda goed te modelleren.

Het model is alleen gevalideerd voor de situatie zonder de Nieuwe Mark, omdat de route, het profiel en de bodemgeometrie van de Nieuwe Mark nog niet exact bekend zijn.

4 Resultaten

Met het 3D model zijn zestien verschillende scenario's uitgerekend voor 2 verschillende jaren. De gepresenteerde resultaten laten de relatieve temperatuursverandering zien, door de resultaten met lozingen af te trekken van de achtergrondtemperatuur.

4.1 Algemene Temperatuurverspreiding

In Figuur 18 en Figuur 19 is het effect van de verschillende lozingen op de temperatuur te zien voor het LT+MT scenario waarbij de lozingen gestratificeerd zijn ingebracht. De temperatuur dicht bij de bodem laat zien dat het grootste effect van de lozingen op de temperatuur benedenstrooms van de Spoorbrug en ter hoogte van de Belcrum Haven is. Na de laatste lozing (LTMT 01 in Figuur 9) warmt het water weer op en nadert het de achtergrondtemperatuur. Dichtbij de benedenstroomse rand van het model waar de Mark de snelweg de A16 kruist, heeft de temperatuur de achtergrondtemperatuur weer bereikt en is het effect van de lozingen niet meer zichtbaar. Figuur 18 en Figuur 19 laten een instantaan beeld zien van de temperatuurverspreiding. Door variaties in het achtergrond debiet varieert minimale temperatuur gedurende de simulatie. Bij een hoger achtergronddebiet wordt het temperatuurseffect minder en bij een lager debiet gaat de koude accumuleren wat leidt tot lagere temperaturen. De locaties waar de minimale temperaturen optreden in de simulaties zijn vergelijkbaar gedurende de gehele simulatieperiode.



Figuur 18: Effect van de lozingen op de watertemperatuur bij de bodem op 10 augustus 2003 voor het LT+MT scenario waar de lozingen gestratificeerd zijn ingebracht. Het grootste cumulatieve effect is vooral zichtbaar benedenstrooms van de Spoorbrug en ter hoogte van de Belcrum Haven. Benedenstrooms is de temperatuur van het omgevingswater weer aangenomen.



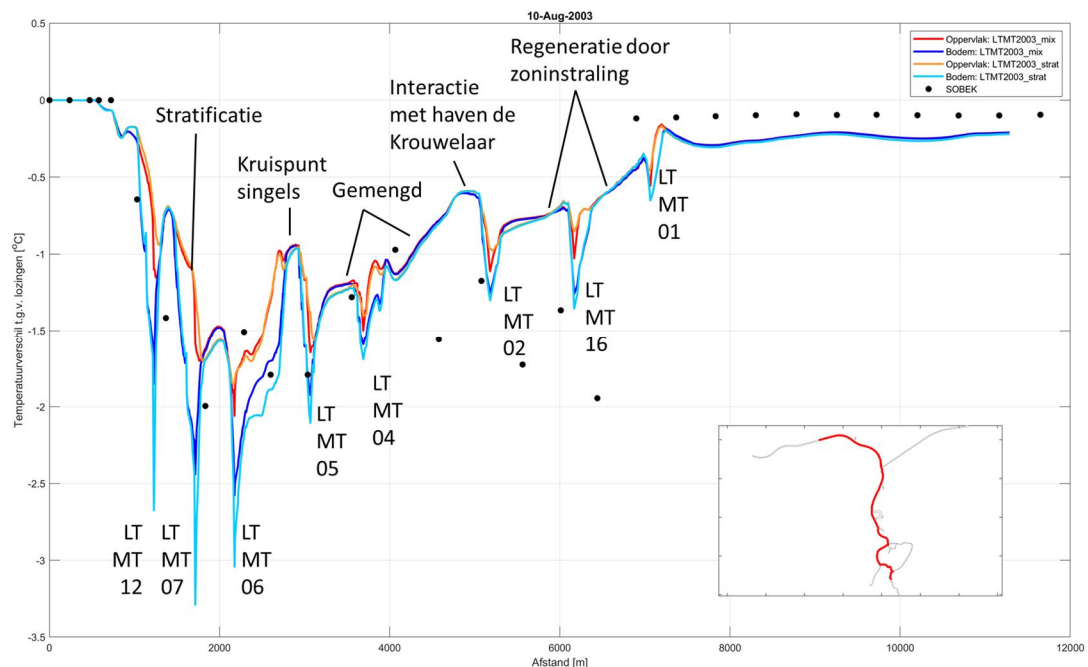
Figuur 19: Effect van de lozingen op de watertemperatuur nabij de bodem in de singels op 10 augustus 2003 voor het LT+MT scenario waar de lozingen gestratificeerd zijn ingebracht.

4.2 Cumulatieve effect

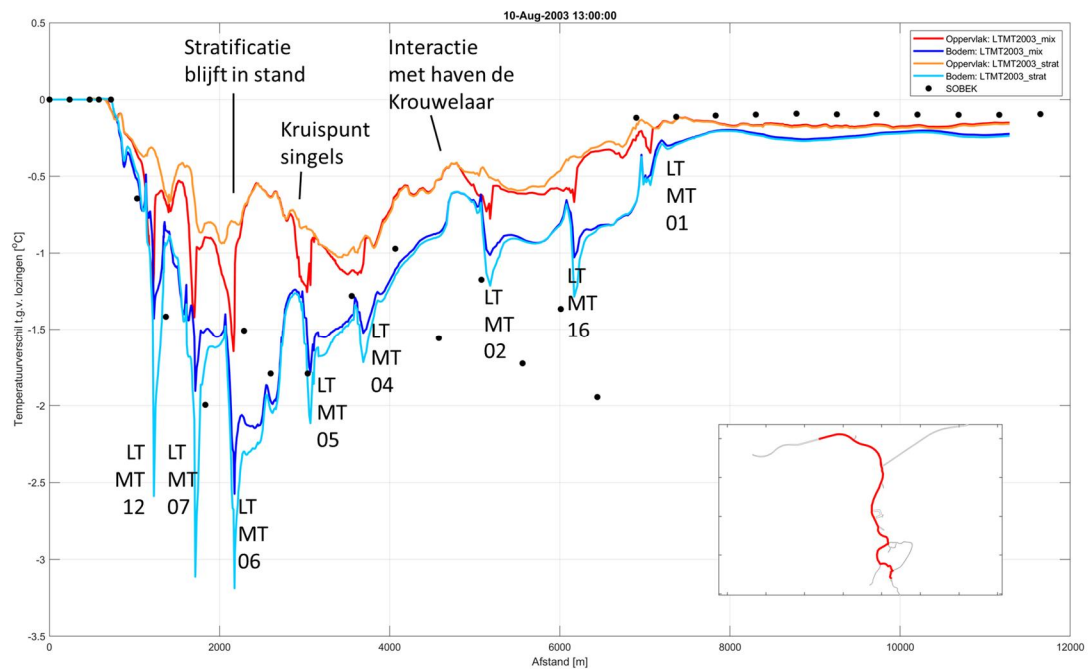
Het cumulatieve effect van de lozingen is nog beter te zien in Figuur 20, waar de temperatuur ten opzichte van de achtergrondtemperatuur is weergegeven. In deze figuur is een traject te zien wat loopt van bovenstrooms van Breda tot de kruising met de A16. Het traject loopt door alle inlaat en uitlaatpunten.

Doordat de lozing met een verdunningsfactor van 3 in het 3D model is ingebracht is de minimale temperatuur aan het eind van het nearfield gemiddeld $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ten opzichte van de achtergrondtemperatuur bij het innamepunt. In de realiteit zal de minimale temperatuur bij het punt van lozen $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ten opzichte van het inname punt zijn. Hierna gaan de lozingen verder opmengen met het omgevingswater, waardoor het temperatuurseffect kleiner wordt. In Figuur 20 en Figuur 21 zijn verschillende momenten gepresenteerd uit dezelfde simulatie voor het LTMT scenario in 2003. In Figuur 20 is een moment te zien waar het water relatief goed gemengd over de verticaal, terwijl in Figuur 21 een moment te zien is waar stratificatie optreedt. Dit is te zien doordat de temperatuur bij de bodem lager ligt dan bij het oppervlak. Deze stratificatie is in het hele gebied van de lozingen te zien. Na de laatste lozing (LTMT01) treedt er weer verticale menging op. De resultaten van de SOBEK simulaties zijn in het traject gevisualiseerd door middel van punten die het midden van de SOBEK segmenten aangeven. De temperatuurdaling zoals uitgerekend met SOBEK zijn orde grootte vergelijkbaar met de resultaten uit het 3D model. Voor de simulatie van het droge jaar met een lage zomerafvoer (2003) voorspelt het 3D model bij de lozingspunten LTMT01 en LTMT16 (iets ten zuiden van het Markkanaal) een kleinere temperatuurdaling dan het SOBEK model. Dit komt omdat het water van lozingspunt LTMT04 meer opwarmt door de atmosfeer dan in het SOBEK model, waardoor de temperatuur net voor het lozingspunt hoger is. De temperatuurdalingen in de SOBEK sommen zijn gemiddeld over 7 dagen. Hierdoor kan de vergelijking alleen op orde grootte worden gemaakt. .

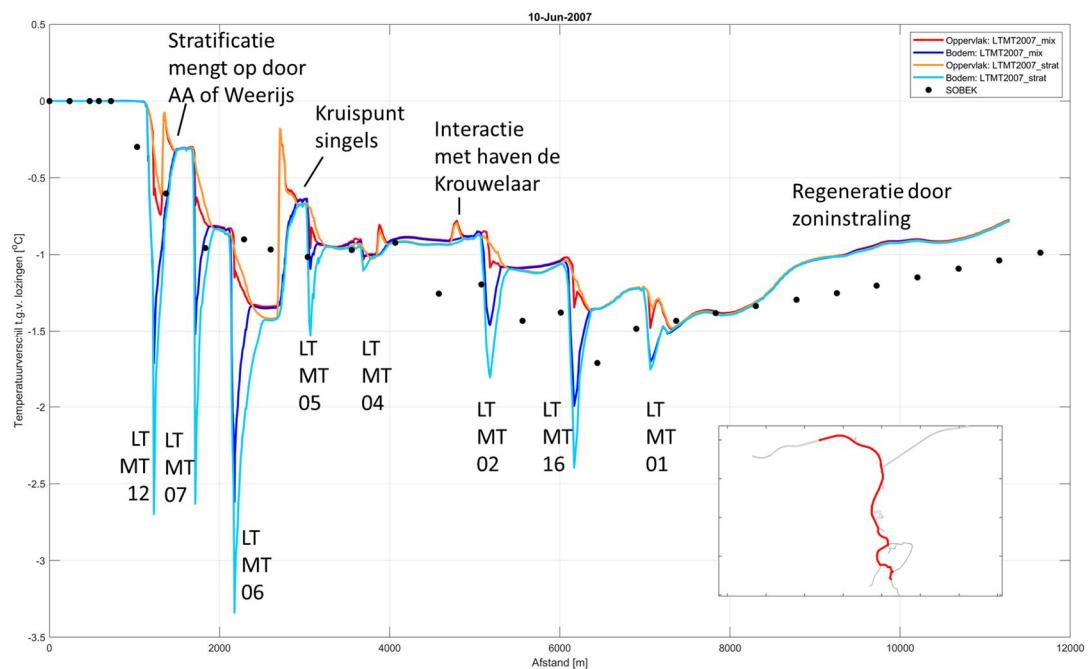
In Figuur 22 is een typische temperatuurprofiel gegeven langs het traject door de Mark en de Singels voor het natte jaar 2007. Doordat de afvoer in de Mark hoger was in 2007 (Figuur 22) dan in 2003 (Figuur 20) is de regeneratie door zoninstraling minder en warmt het water minder snel op dan in 2003.



Figuur 20: Temperatuur bodem en oppervlak langs het traject van de Mark bovenstrooms van Breda tot aan de A16 benedenstrooms van Breda voor het LTMT scenario voor het jaar 2003 tijdens een moment van beperkte stratificatie op 10 augustus 2003.



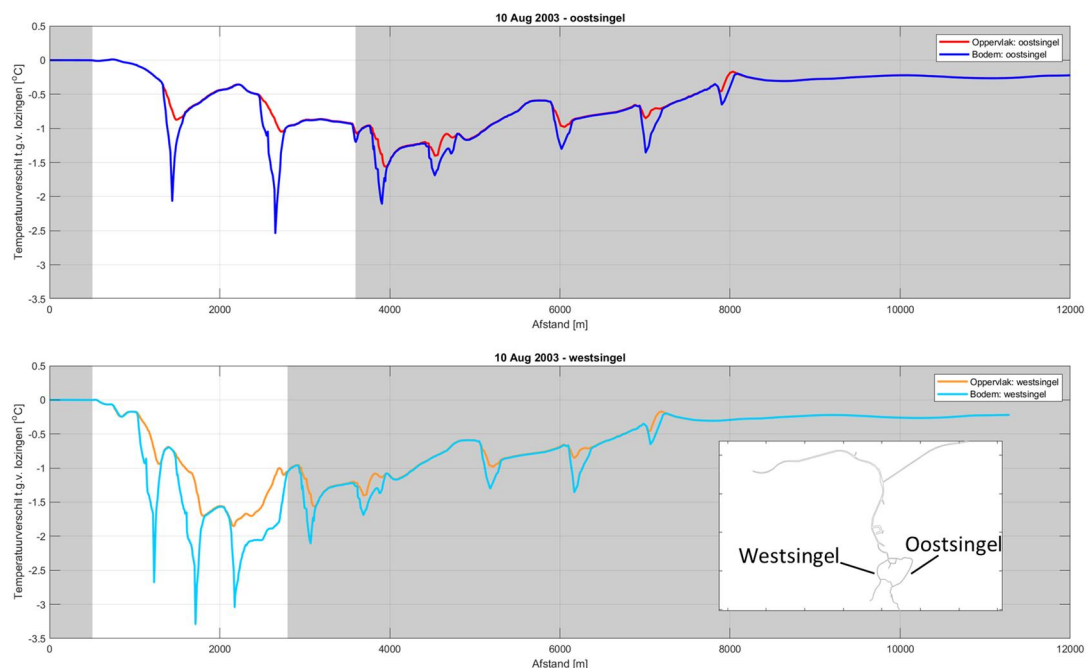
Figuur 21: Temperatuur bodem en oppervlak langs het traject van de Mark bovenstrooms van Breda tot aan de A16 benedenstrooms van Breda voor het LTMT scenario voor het jaar 2003 tijdens een moment van stratificatie op 10 augustus 2003.



Figuur 22: Temperatuur bodem en oppervlak langs het traject van de Mark bovenstrooms van Breda tot aan de A16 benedenstrooms van Breda voor het LTMT scenario voor het jaar 2007.

De patronen voor de verschillende simulaties zijn vergelijkbaar voor de situaties met en zonder nieuwe Mark en voor het LT en LT+MT scenario. Doordat het onttrekkingsdebieten afgestemd zijn op de gemiddelde zomerafvoeren zijn de effecten voor 2003 en 2007 vergelijkbaar. Er is een duidelijk cumulatief effect zichtbaar, waardoor de minimale temperatuur na iedere lozing steeds iets verder daalt ten opzichte van de achtergrondtemperatuur. Door het hogere afvoerdebiet wat bovenstrooms van Breda binnenkomt in 2007, krijgen de koude pluimen minder kans om te accumuleren. Daarentegen krijgt het water in 2007 minder kans om te regenereren door zoninstraling, omdat het water sneller door het systeem heen stroomt.

In Figuur 24 is het temperatuursprofiel langs de oostsingel en langs de westsingel weergegeven voor het LTMT scenario voor het droge jaar 2003. Het grijsgecarroweerde gedeelte is het deel van de Bovenmark en de Benedenmark en dit deel is in beide figuren gelijk. De route langs de westsingel is iets korter dan via de oostsingel. In de oostsingel zitten voor dit scenario 2 lozingen (LTMT14 en 15 in Tabel 2.3) en aan de westsingel zitten 3 lozingen (LTMT12, LTMT07 en LTMT06). Hierdoor is de maximale temperatuurdaling in de westsingel ook hoger dan in de oostsingel.



Figuur 23: Temperatuur bodem en oppervlak langs het traject van de Mark bovenstrooms van Breda tot aan de A16 benedenstrooms van Breda voor het LTMT scenario voor het jaar 2003 voor de oostsingel en voor de westsingel. Het temperatuurtraject in het grijsgearceerde vlak is voor de oost en westsingel hetzelfde. De route voor langs de oostsingel is iets langer dan de route langs de westsingel.

Tabel 4.1 geeft de minimale temperatuur weer bij de innamepunten voor alle simulaties gedurende de hele simulatieperiode. Uit deze tabel blijkt dat de maximale temperatuurdaling voor het jaar 2003 tussen de -2.2°C en -3.9°C ligt terwijl dit voor het natte jaar 2007 tussen de -1.4°C en -4.4°C ligt. Voor 2007 wordt de maximale temperatuurdaling van 4°C voor stagnante vaarten overschreden (zie Beleidskader Koudelozingen [8]). Dit gebeurt lokaal waar het water wordt geloosd. Het droge jaar is 2003 is maatgevend voor de maximale benedenstroomse temperatuursverandering.

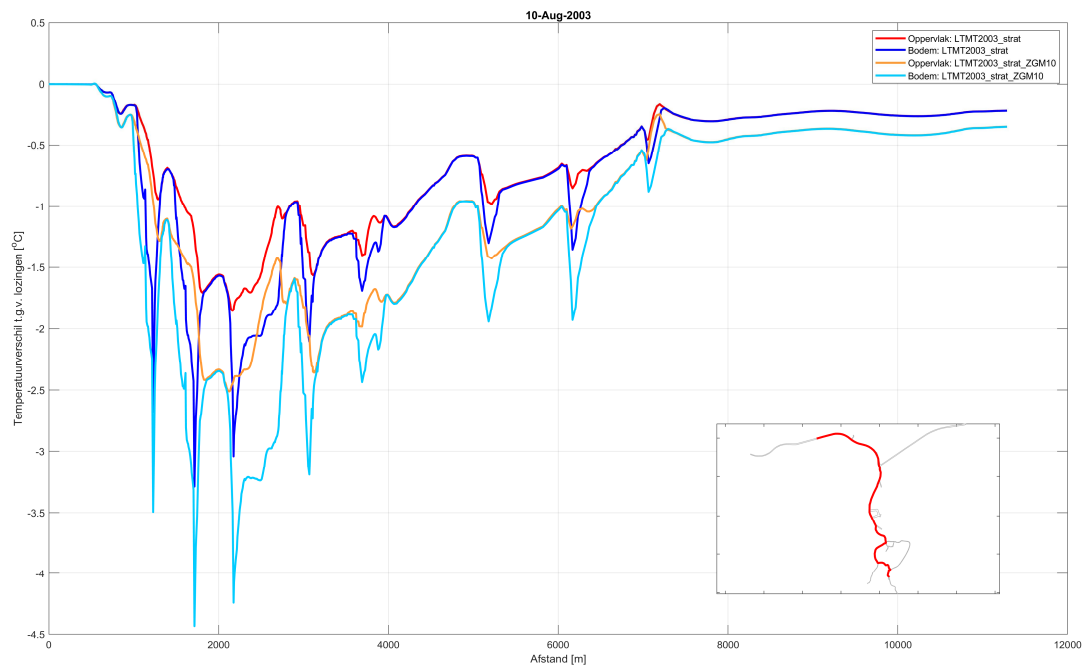
Doordat de lozingen een temperatuur hebben van -5°C ten opzichte van hun innamepunt, is de minimale temperatuur ter plaatse van de lozing ook lager dan de -5°C zoals beschreven in Tabel 4.1. Aan het eind van het nearfield is deze temperatuur gereduceerd door verdunning met een factor 3 (zie paragraaf 3.1.4).

Tabel 4.1: Maximale temperatuurverschil bij de bodem door de lozingen voor de verschillende scenario's gedurende de gehele simulatie periode op een typische afstand van 50-100m benedenstrooms van de lozingen voor het droge jaar 2003 en het natte jaar 2007 voor verschillende manieren van het inbrengen van de lozingen

		2003		2007	
		gemengd	gestratificeerd	gemengd	gestratificeerd
met Nieuwe Mark	LT	-2.4°C	-3.0°C	-1.6°C	-2.2°C
	LT+MT	-3.2°C	-3.9°C	-3.1°C	-4.4°C
zonder Nieuwe Mark	LT	-2.2°C	-2.9°C	-1.4°C	-2.0°C
	LT+MT	-3.0°C	-3.8°C	-2.9°C	-4.1°C

Omdat het gemiddelde zomerdebiet vooraf niet bekend is, is er ook een simulatie uitgevoerd met het 10 jaar gemiddelde zomerdebiet. In deze simulatie zijn de lozingen bepaald volgens de STOWA handreiking als 5% van het 10-jaar gemiddelde zomerdebiet. Voor het jaar 2003 levert dit een situatie

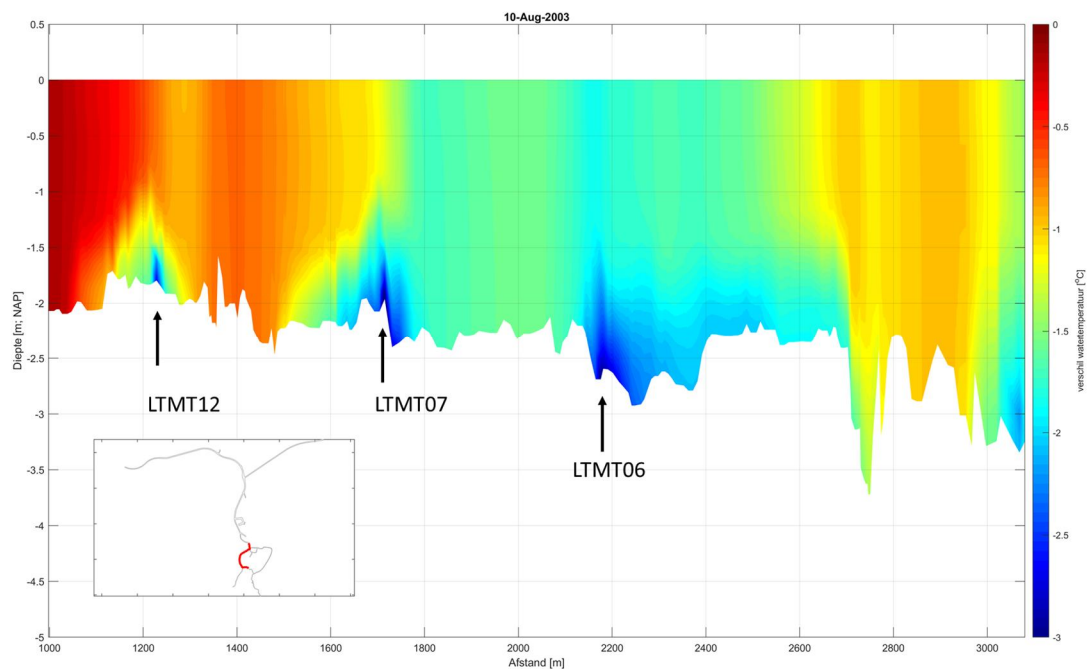
op waar de lozingsdebieten 54% groter zijn bij een gemiddelde zomerafvoer voor 2003. De temperatuursdaling voor de situatie met lozingen bepaald op basis van het 10 jaar zomerdebiet zijn weergegeven in Figuur 24. De minimum temperatuur zou in dit geval -5.2°C worden ten opzichte van -3.9°C bij een gemiddeld zomerdebiet op basis van het jaar 2003.



Figuur 24: Temperatuur bodem en oppervlak langs het traject van de Mark bovenstrooms van Breda tot aan de A16 benedenstrooms van Breda voor het LTMT scenario voor het jaar 2003 op basis van de gemiddelde zomerafvoer van 2003 en op basis van het 10 jarige gemiddelde zomerafvoer.

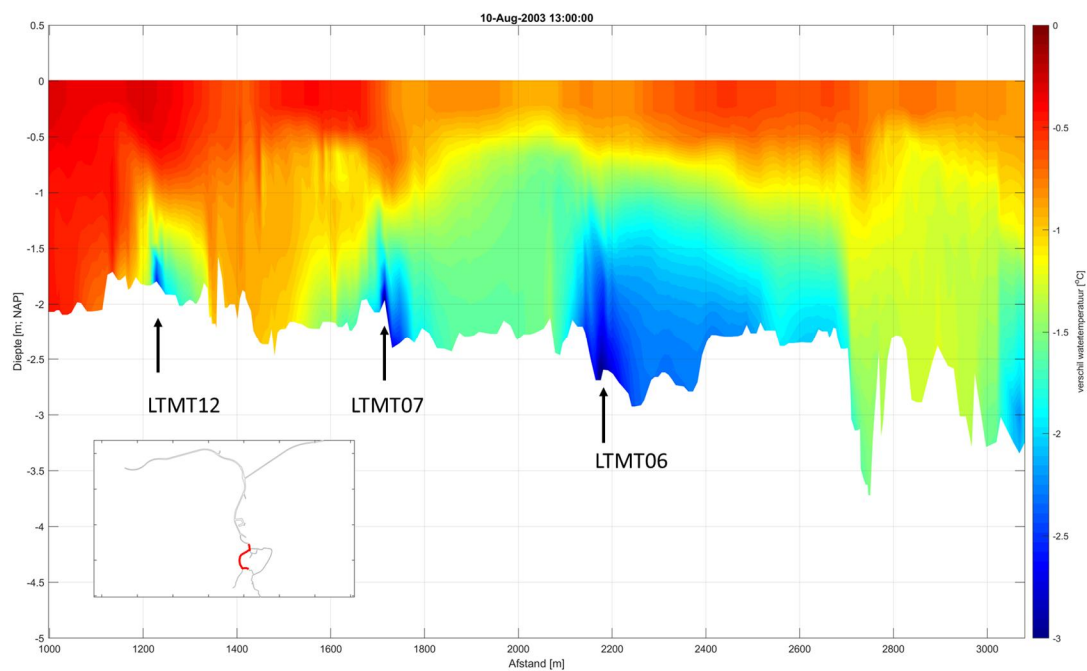
4.3 Stratificatie

Figuur 25 laat een verticale doorsnede rond de westelijke singel zien voor het LT+MT scenario. Uit dit figuur blijkt dat de verticale stratificatie ter plaatse van de lozingen na korte afstand weer opomengt over de verticaal waardoor de stratificatie verdwijnt. Dat is in deze figuur te zien omdat de temperatuur aan het oppervlak en aan de bodem gelijk zijn. De lozingen LTMT12, LTMT07 en LTMT06 zijn in het onderste deel van de waterkolom ingebracht onder NAP 1.5m.



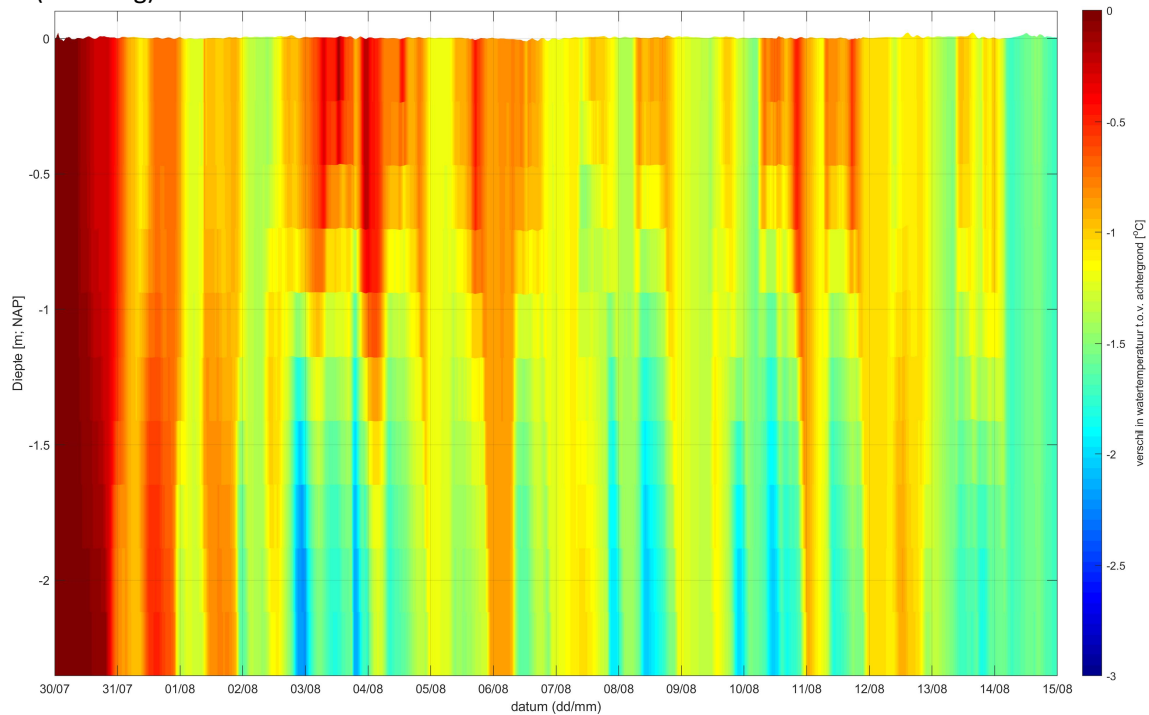
Figuur 25: Verticaal temperatuurprofiel voor de westelijke singel van Breda voor het LTMT scenario waarbij de lozingen gestratificeerd zijn ingebracht (onder de -1.5m NAP) voor een moment waar de stratificatie beperkt is. Uit deze figuur is te zien dat de temperatuur na korte afstand weer opmengt met het omringende water.

Echter, door variërende afvoer door de Mark en de interactie met zoninstraling, zijn er ook momenten dat er stratificatie optreedt. In Figuur 26 is een momentopname op 10 augustus in de middag te zien waarin de stratificatie aanwezig duidelijk aanwezig is in de westelijke singel.



Figuur 26: Verticaal temperatuurprofiel voor de westelijke singel van Breda voor het LTMT scenario waarbij de lozingen gestratificeerd zijn ingebracht (onder de -1.5m NAP) voor een moment waar de stratificatie in stand blijft. . Uit deze figuur is te zien dat de temperatuur na korte afstand weer opmengt met het omringende water.

De temperatuur van het water verandert gedurende de 15 dagen die de simulatie heeft gedraaid. Op 450m benedenstrooms van lozingspunt 6 (einde nabij het splitsingspunt) is het temperatuur-effect in de verticaal te zien in Figuur 27. In de figuur is te zien dat op deze locatie de op verticale stratificatie optreedt (bv: 3 aug), terwijl dit op andere momenten veel minder het geval is (bv: 7 aug).



Figuur 27: Temperatuurdaling in de tijd over de verticaal op 450m benedenstrooms van lozingspunt LTMT06 (oostelijke singel nabij de kruising met nieuwe Mark en westelijke singel), waarbij de lozingen gestratificeerd in het model zijn ingebracht.

5 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van deze studie is om cumulatieve effecten en stratificatie als gevolg van aquathermie in de Mark bij Breda in meer detail te onderzoeken. Om hier een antwoord op te verkrijgen is een 3D hydrodynamisch model opgezet voor de Mark rondom Breda. Met het model is onderzocht wat het effect zou zijn als er meerdere aquathermiesystemen gebruik zouden maken van het water uit de Mark. Op basis van model simulaties voor verschillende scenario's voor een droog en nat jaar, verschillende warmte configuraties, verschillend near-field gedrag van de koudelozing en met/zonder Nieuwe Mark zijn de onderstaande conclusies te trekken.

5.1 Conclusies

5.1.1 Cumulatieve effecten

Op basis van de simulaties met het 3D model zijn de cumulatieve effecten onderzocht voor de verschillende scenario's die gedefinieerd zijn aan de hand van de STOWA handreiking voor koudelozingen [8]. Hieruit zijn de volgende conclusies getrokken:

- De impact van meerdere TEO systemen dicht bij elkaar is door cumulatieve effecten groter dan voor individuele systemen.
- Voor de gesimuleerde scenario's in deze studie is de maximale cumulatieve afkoeling door de verschillende lozingen tussen de -2.2°C en -3.9°C voor een droog jaar en tussen de -1.4°C en -4.4°C voor een nat jaar. Deze maximale afkoeling vindt voor de gesimuleerde aquathermiesystemen plaats benedenstrooms van het centrum van Breda. Benedenstrooms van de laatste lozing warmt het water weer op tot het de temperatuur aanneemt van het omringende water.
- Indien de lozingsdebieten worden bepaald op basis van een 10 jaar gemiddeld zomergemiddelde afvoer, dan zorgt dit voor een heel ander temperatuureffect dan wanneer het zomergemiddelde debiet op 1 jaar wordt gebaseerd. In dit scenario dalen de temperaturen met 34% extra ten opzichte van de lozingen op basis van de gemiddelde zomerafvoer van 2003. Voor het natte jaar zou de minimumtemperatuur juist stijgen.
- Doordat het maximale cumulatieve temperatuureffect groter is dan de maximale temperatuurdaling volgens het "beleidskader koudelozingen", moet de debieten van het aquathermiesysteem worden terug geschaald om binnen de maximale criteria te blijven.
- De aanwezigheid van de Nieuwe Mark heeft een beperkte invloed op de temperatuureffecten, mede doordat er nog geen koudelozingen in de Nieuwe Mark zijn gepland
- Doordat het verschil in lozingsdebieten tussen het LT en LT+MT scenario beperkt zijn, is de invloed van deze verschillende scenario's beperkt op de temperatuursdaling.
- De huidige scenario's zijn bepaald op basis van achtergrondstroming om te kijken naar mogelijke stratificatie. Dit is slechts een verkennende studie naar de 3D effecten van de lozingen. Er kunnen meer maatgevende situaties ontstaan bij een grotere lozingen met een hogere afvoer met andere windcondities. Het was echter niet het doel van de studie om al deze scenario's in kaart te brengen.

5.1.2 Stratificatie

- Koude lozingen kunnen direct bij de uitstroom stratificeren. Uit de modelberekeningen met het 3D model blijkt dat het water na lozing onder zwak dynamische condities een tijd gestratificeerd kan blijven. Zodra de turbulentie in het water toeneemt kan de stratificatie echter ook weer opmengen met het omringende water, waardoor het water door de luchttemperatuur en zoninstraling weer op kan warmen.
- In periodes van beperkte menging kan er stratificatie ontstaan tussen de verschillende lozingen.
- Omdat de Mark een relatief klein en ondiep water is met een beperkte doorstroming, heeft de variatie in luchttemperatuur en zoninstraling een behoorlijke invloed op de watertemperatuur gedurende de dag.

5.2 Aanbevelingen

In deze studie is onderzoek gedaan naar de cumulatieve effecten van aquathermie. De STOWA handreiking voor koudelozingen [8] beschrijft dat er een toets moet zijn op cumulatieve effecten. Omdat deze toets bij de vergunning van meerdere koudelozingen niet gedaan kan worden op basis van metingen, is modellering waar alle lozingen in worden meegenomen essentieel om de cumulatieve effecten in beeld te brengen.

Doordat de lozingen gemaximaliseerd zijn op basis van de gemiddelde zomerafvoer in de handreiking koudelozingen [8], is de bepaling van de gemiddelde zomerafvoer essentieel voor de grootte van een aquathermiesysteem. Uit deze studie blijkt dat het uitmaakt of het lozingsdebiet op basis van een droog jaar, een nat jaar of een 10 jaar gemiddelde afvoer wordt bepaald. Het is wenselijk dat hier een eenduidig eis voor wordt gedefinieerd in de handreiking koudelozingen [8].

Referenties

- [1] HKV (2017), *“Effecten Nieuwe Mark zonder Sluis of Stuw”*, Notitie PR 3523.10
- [2] Deltares (2015), *“LSM achtergronddocument – KPP2015 hydraulica schematisaties - zoet”*, Deltares ref: 1120072-015-ZWS-0002
- [3] Deltares (2021), *“D-FLOW Flexible Mesh – User Manual”*, version 0.9.1, SVN revision 70209
- [4] Deltares (2022), *“Aquathermie in Breda - Opschaling van collectieve warmtesystemen”*, WarmingUP rapport project 3A & 3M
- [5] Doneker, R.L. and G.H. Jirka, (2007) *“CORMIX User Manual: A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters”*, EPA-823-K-07-001, Dec. 2007.
- [6] Choi, K.W., Li, J.H.W, (2008), Closure to *“Distributed Entrainment Sink Approach for Modeling Mixing and Transport in the Intermediate Field”*, Journal of Hydraulic Engineering 133(7), p.p 804-815, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:7(804)
- [7] STOWA (2019), *“Meten van waterdiepte met groene lidar – hulpmiddel om baggerdikte te bepalen”*, STOWA rapport 2019-39, ISBN 978.90.5773.857.9
- [8] STOWA (2021), *“Kader voor vergunningverlening koudelozingen 1.0 – handreiking voor beoordeling van aanvragen voor TEO systemen”*, STOWA rapport 2021-30, ISBN 978.90.5773.946.0
- [9] Deltares (2021), *“Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater”*, WarmingUP rapport, versie 01

Adres

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info