

ONDERWERP
Koelwaterstudie PALLAS

PROJECTNUMMER
C05011.000642

DATUM
11 februari 2022

ONZE REFERENTIE
D10048215:28

VAN
[REDACTED]

1 Inleiding

De Stichting Voorbereiding PALLAS-reactor, verder PALLAS genoemd, heeft het voornemen om een multifunctionele nucleaire reactor te realiseren die geschikt is voor het produceren van medische isotopen, industriële isotopen en het uitvoeren van nucleair technologisch onderzoek. Deze reactor, verder de PALLAS-reactor genoemd, dient ter vervanging van de huidige Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten. De HFR is op dit moment ruim zestig jaar operationeel en loopt tegen het einde van zijn economische levensduur.

Voor de nieuwe reactor wordt een koelwaterleiding gerealiseerd. Water wordt ingenomen op het Noordhollandsch Kanaal en geloosd op de Noordzee. Om te kijken of deze koelwaterlozing aan de vergunningscriteria voldoet, dient er een koelwaterstudie uitgevoerd te worden. De 'NBW-beoordelingssystematiek voor koelwaterlozingen' geeft de volgende twee criteria voor lozingen op de Noordzee (bron: Inspectie Verkeer en Waterstaat, Koelwater; Handreiking en inspectiekader voor Wvo- en Wwh-vergunningverlening, 2005):

- De mengzone (zeewatertemperatuur hoger dan 25 °C) mag de bodem niet raken. Dit geldt voor een omgevingszeewatertemperatuur tot 22 °C, daar boven wordt verondersteld dat de temperatuurgevoelige vissen weg migreren naar koelere plaatsen; en
- De watertemperatuur mag niet meer toenemen dan met 2 °C, met een absoluut maximum van 25 °C.

Omdat de ruimtelijke en temporele schalen waarnaar gekeken dient te worden (enerzijds de lokale menging rondom de uitlaat en anderzijds de opwarming over langere tijd langs de Nederlandse kust), is in deze studie gebruik gemaakt van twee numerieke modellen:

- FLOW-3D
 - lost de volledige 3D Navier-Stokes vergelijkingen op
 - niet-hydrostatisch
 - geschikt voor tijdsafhankelijke (vaak ook quasi-stationaire) stroming op kleinere ruimtelijke en temporele schalen
- Delft3D
 - lost de 2D of 3D ondiep water vergelijkingen op
 - hydrostatisch
 - geschikt voor de tijdsafhankelijke stroming op grotere ruimtelijke en temporele schalen

Omdat in FLOW-3D gebruik wordt gemaakt van hele kleine rekencellen in en nabij de uitstroomopening om enerzijds de geometrie in detail te kunnen schematiseren en anderzijds het mengen van het koelwater met zijn omgeving nauwkeurig te kunnen modelleren, zou het modelleren van grotere ruimtelijke schalen (kilometers) en temporele schalen (doodtij-springtij cyclus) leiden tot onacceptabele rekentijden.

Anderzijds is Delft3D niet geschikt om de lokale menging te modelleren. Ten eerste omdat het gebruik maakt van een afgeleide set vergelijkingen, namelijk de ondiep-water vergelijkingen. Twee belangrijke aannames die bij deze vereenvoudiging worden toegepast, zijn dat de horizontale ruimteschalen veel groter zijn dan de verticale, en dat verticale snelheden klein zijn ten opzichte van de horizontale snelheden. Beide aannames zijn in en rondom de koelwaterstraal niet het geval. Ten tweede kan met dit model de complexe geometrie van de koelwateruitlaat niet in detail worden geschematiseerd, waardoor de initiële verspreiding van het koelwater niet nauwkeurig kan worden gesimuleerd.

In dit memo worden de aanpak en de resultaten van deze modelstudie beschreven. De aanpak van de studie bestaat uit de volgende vier stappen:

1. Het bestaande, grootschalige Delft3D-model van de Nederlandse kust (Kuststrook) wordt gevalideerd om te kijken of het in staat is om de temperatuur in de Noordzee correct te modelleren;
2. Dit model wordt ook gebruikt om de omgevingscondities af te leiden ter plaatse van de koelwater-uitlaat (stroomsnelheden, saliniteit). Omdat de resolutie van het oorspronkelijke model relatief grof is, is er een lokale verfijning toegepast rondom de uitlaat;
3. Middels een CFD-studie (Computational Fluid Dynamics) met FLOW-3D wordt de lokale menging van de koelwaterlozing nabij de uitlaat geanalyseerd op korte tijdschalen. Dit is gedaan voor vier maatgevende condities:
 - winter kentering
 - zomer kentering
 - winter maximale getijstrooming
 - zomer maximale getijstrooming
4. Met het grootschalige model onder 2 wordt gekeken hoe de koelwaterlozing(en) zich grootschalig en over langere tijdschalen verspreidt. Dit is gedaan voor twee situaties en elk voor twee relevante condities:
 - overgangsfase
 - winter
 - zomer
 - productiefase
 - winter
 - zomer

Er dienen twee fases te worden onderzocht voor het verkrijgen van de vergunning: de overgangsfase en de productiefase. Tijdens de overgangsfase zijn zowel de bestaande reactor HFR als de nieuwe PALLAS-reactor in gebruik, terwijl in de productiefase alleen de nieuwe reactor nog wordt gebruikt.

Door voor de laatste twee stappen te kijken naar de vier meest extreme combinaties van condities, wordt inzicht verkregen in de bovengrens van de effecten die kunnen optreden. Hierbij is gekeken naar een wintersituatie, waarbij de temperatuurverschillen tussen koelwater en omgeving maximaal zijn en dus het oprijvende vermogen het grootst, en een zomersituatie, wanneer de omgevingstemperatuur het warmst is en dus eerder de kritische grens van 25 °C kan worden overschreden, maar tegelijkertijd het temperatuurverschil het kleinst is.

2 Gebruikte gegevens

2.1 Locatie en lozingsgegevens HFR en PALLAS

HFR:

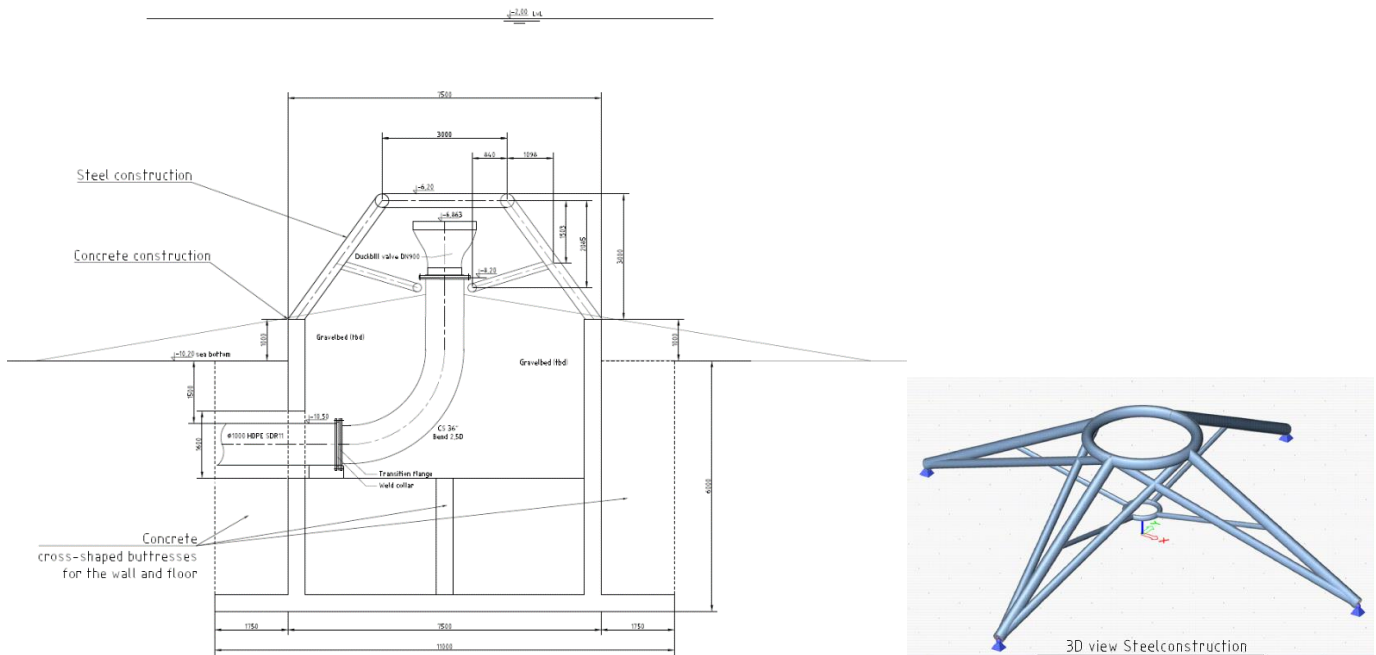
- Outfall locatie: X: 105.589 m, Y: 533.785 m
- Lozingsdebiet: 3.125 m³/uur = 0,868 m³/s
- Lozingstemperatuur: 40 °C
- Lozingssaliniteit: zoet water

PALLAS:

- Outfall locatie: X = 105.786 m, Y = 533.891 m
- Lozingsdebiet: variabel, tussen 3.300 m³/uur = 0,917 m³/s in de zomer en 1.162 m³/uur = 0,323 m³/s in de winter
- Lozingstemperatuur: 35 °C (in overleg met PALLAS aangenomen maximale waarde)
- Lozingssaliniteit: zoet water (inname vanaf het Noordhollandsch Kanaal)

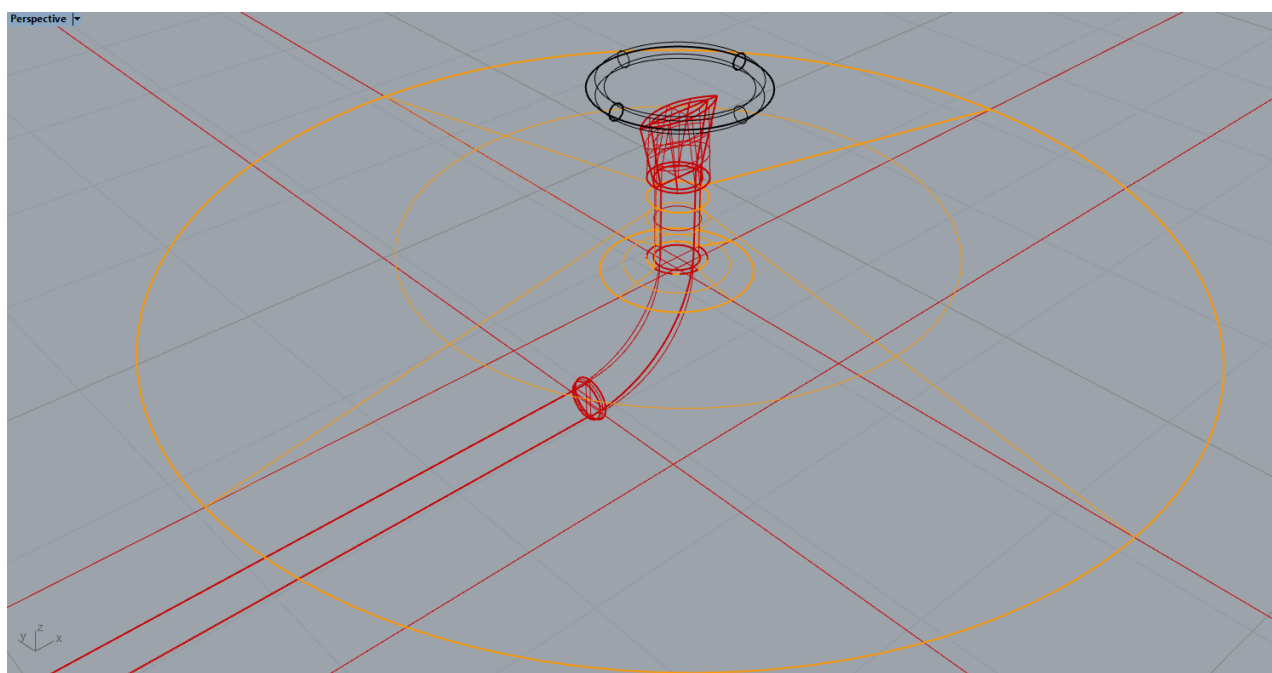
2.2 Ontwerp uitlaat

Het ontwerp van de koelwateruitlaat is weergegeven in figuur 1



Figuur 1 Ontwerptekening van de uitlaat.

Het ontwerp is middels het programma Rhino (<https://www.rhino3d.com/>) omgezet in een 3D CAD-model. In het ontwerp is de wanddikte van het stuk pijp dat boven de zeebodembodem uitstijgt en de dikte van de uitstroom van de duckbill valve overdreven ten behoeve van de roosterschematisatie. Dit zal nader worden toegelicht in paragraaf 3.3. Ook is van de stalen constructie alleen de bovenste ring meegenomen. Het ontwerp is weergegeven in figuur 2.



Figuur 2 3D CAD model van de uitlaat (uitlaat in rood, bodembescherming in oranje, bovenste ring bescherming in zwart).

Vanaf de kust af gezien, bestaat het ontwerp uit:

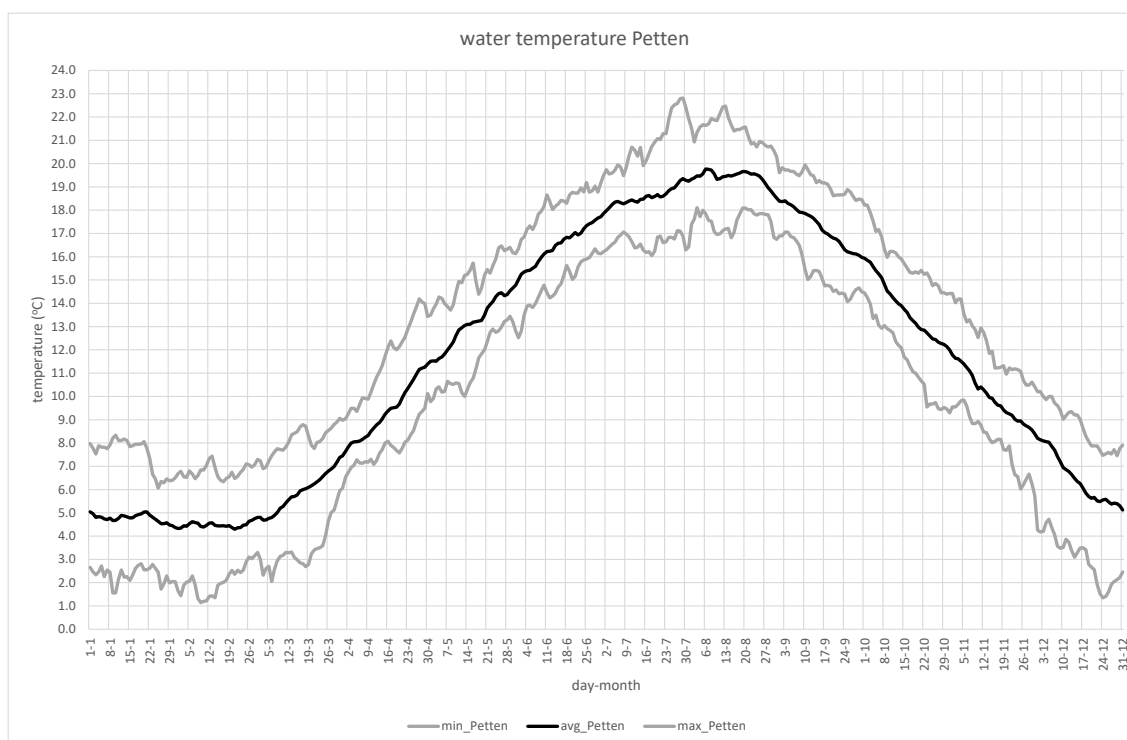
- Aanvoerleiding met een binnendiameter van 818 mm, met de hartlijn op NAP -12,2 m
- Overgangsstuk van binnendiameter 818 mm naar binnendiameter 900 mm, lengte 100 mm
- Bochtstuk met een binnendiameter van 900 mm en een bochtstraal van $2,5 \cdot D = 2250$ mm
- Recht stuk met een binnendiameter van 900 mm van NAP -9,95 m naar NAP -8,20 m
- Duckbill valve, type ProFlex 710 van PROCO om retourstroming de uitlaat in te voorkomen
- De bovenkant van de duckbill valve ligt op NAP -6,863 m
- De uitlaat is beschermd middels een stalen constructie en een bodembescherming.

De bodem ligt op NAP -10,2 m.

2.3 Zeewatertemperatuur

In 2016 is een verkennende studie uitgevoerd naar de koelwaterlozing, waarbij ook een analyse is gemaakt van de zeewatertemperatuur voor de kust van Petten. [Referentie: Memo Water temperature Petten, dd. 1 april 2016.]

De watertemperatuur bij Petten varieert over het jaar en van jaar tot jaar. Deze variatie is afgeleid vanuit de beschikbare metingen bij Den Helder veersteiger (ongeveer 20 km noord) en IJmuiden buitenhaven (ongeveer 35 km zuid van Petten), zie figuur 3. Temperatuur varieert in de winter tussen de 1 en 7 °C (gemiddeld 4,5 °C) en in de zomer tussen de 17 en 23 °C (gemiddeld 20 °C).



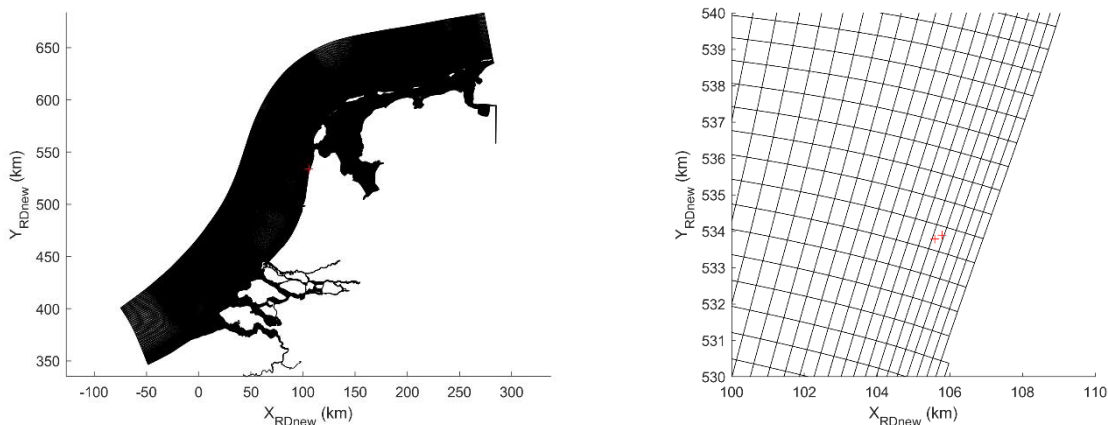
Figuur 3 Gemiddelde, minimale en maximale zeewatertemperatuur per dag (resp. avg_Petten, min_Petten en max_Petten) bij Petten, geanalyseerd over de periode 2000-2012.

Op basis van deze analyse zijn de watertemperaturen voor het winter- en zomerscenario voor de koelwaterstudie als volgt gekozen:

- Temperatuur winterscenario: 1 °C, op basis van de laagst gemeten waarde.
- Temperatuur zomerscenario: 22 °C, conform de maximale temperatuur die beschouwd hoeft te worden volgens de beoordelingssystematiek (en niet de hoogste gemeten temperatuur: 23 °C)

2.4 Kuststrook model RWS

Rijkswaterstaat heeft een groot aantal standaard modelschematisaties van de Nederlandse wateren beschikbaar die zijn opgezet in Delft3D (of het vergelijkbare SIMONA). Een van deze modellen dekt de Noordzeekust. Figuur 4 laat het totale rekenrooster zien en een detail van dit rooster rondom de uitlaatlocaties.



Figuur 4 Rekenrooster van het kuststrook model, geheel (links) en detail rond de uitlaat (rechts). De rode plussen tonen de locaties van de uitlaten van de HFR en de PALLAS-reactor.

3 Modelstudie

De modelstudie bestaat zoals in de inleiding beschreven uit 4 stappen.

In **stap 1** is het bestaande, grootschalige Delft3D-model van de Nederlandse kust (Kuststrook) gevalideerd om aan te tonen dat het model in staat is om de watertemperatuur in de Noordzee correct te modelleren. Het model is omgezet van 2D (dieptegemiddeld) naar 3D, met 4 lagen in de verticaal, en gedraaid voor een heel jaar. Op basis van beschikbare gegevens is ervoor gekozen om deze validatie uit te voeren voor het jaar 2016. Het model wordt geforceerd met de (astronomische) waterstanden op zee, rivierafvoeren (Schelde, Maasmond), spuidebieten (IJmuiden, Haringvlietsluizen, Den Oever, Kornwerderzand) en meteorologische data (wind, bewolgingsgraad, luchtvochtigheid, luchttemperatuur) en de watertemperatuur op de open randen en voor alle rivierafvoeren en lozingsgebieden. Voor de watertemperatuur op zee is gebruik gemaakt van de metingen in K13a Platform, bij gebrek aan een station dichterbij de open rand.

Ten behoeve van de CFD-modellering in stap 3, dienen de omgevingscondities afgeleid te worden ter plaatse van de koelwater-uitlaat. Dit betreft de stroomsnelheid en de saliniteit. Dit is gedaan in **stap 2**. Vanwege het benodigde detailniveau is hiervoor het bestaande model lokaal verfijnd, door middel van twee geneste modellen. Dit wordt nader toegelicht in paragraaf 3.2. Omdat het model met lokale verfijningen veel rekentijd vergt, is besloten om dit model te draaien voor twee doortij-springtijperioden, een in de winter en een in de zomer. In plaats van de watertemperatuur van 2016 op de open rand op te leggen, is besloten om uit te gaan van de gekozen scenario-temperaturen 1 °C voor de winter en 22 °C voor de zomer. Op deze manier kunnen deze berekeningen tevens dienst doen als referentieberekening voor de latere koelwaterberekeningen in stap 4, zonder dat dit significante invloed heeft op de berekende saliniteit en stroomsnelheid ter plaatse van de PALLAS uitlaat.

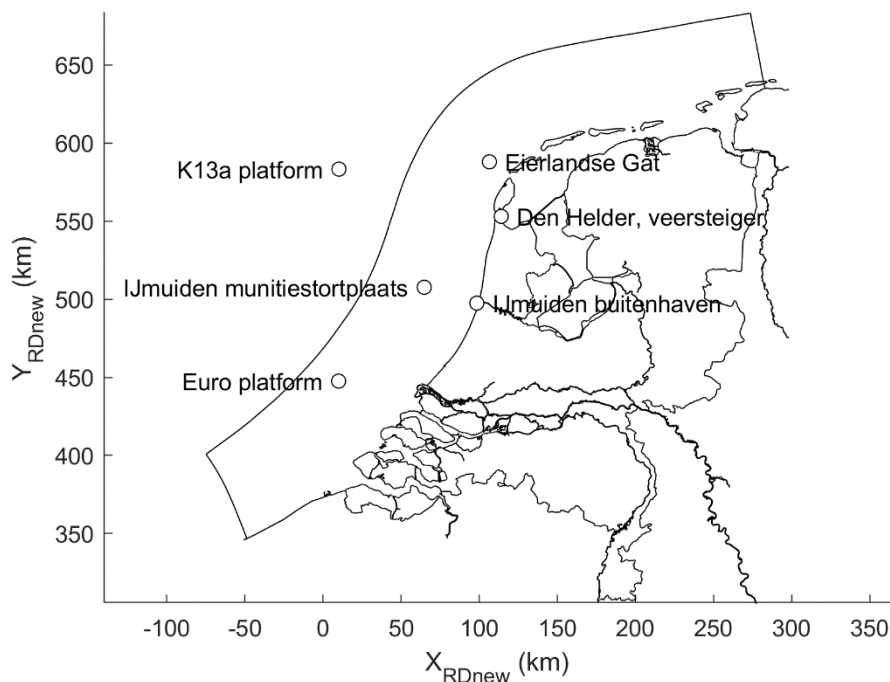
In **stap 3** wordt de lokale menging van de koelwaterlozing van PALLAS geanalyseerd. Hiervoor wordt een model opgezet in het CFD-model FLOW-3D van de nabije omgeving van de uitlaat (± 10 m rondom), inclusief de uitlaat zelf en een deel van de aanvoerleiding. Nadat het model is getest, worden vier relevante condities doorgerekend, te weten een kentering en een maximale getijstroom tijdens de winter en een kentering en een maximale getijstroom tijdens de zomer, waarbij de maximale getijstroom is afgeleid in stap 2. Om de rekentijd niet te ver op te laten lopen, is de simulatietijd beperkt tot zich een stationaire stroming heeft ingesteld.

De FLOW-3D-berekeningen voor kenterring en maximale getijstrooming laten maar een deel van de realiteit zien. Doordat de simulatieduur van de berekening relatief kort is (orde minuut) is het totale volume aan koelwater ook gering, terwijl er in werkelijkheid permanent wordt geloosd. In de berekening voor de maximale getijstroom stroomt het koelwater uiteindelijk het domein uit, waar het in werkelijkheid met de getijstrooming na kenterring ook weer richting uitlaat terugstroomt. Om te kijken of de verversing door het getij en de afkoeling met de omgeving voldoende groot is, is dit in het Delft3D-model van de Nederlandse kust verder onderzocht in **stap 4**. Hiervoor zijn de koelwaterlozingen voor zowel de overgangsfase (HFR en PALLAS) als de productiefase (alleen PALLAS) aan het model uit stap 2 toegevoegd, met het juiste debiet, saliniteit en temperatuur.

In dit hoofdstuk worden elk van de vier stappen nader toegelicht.

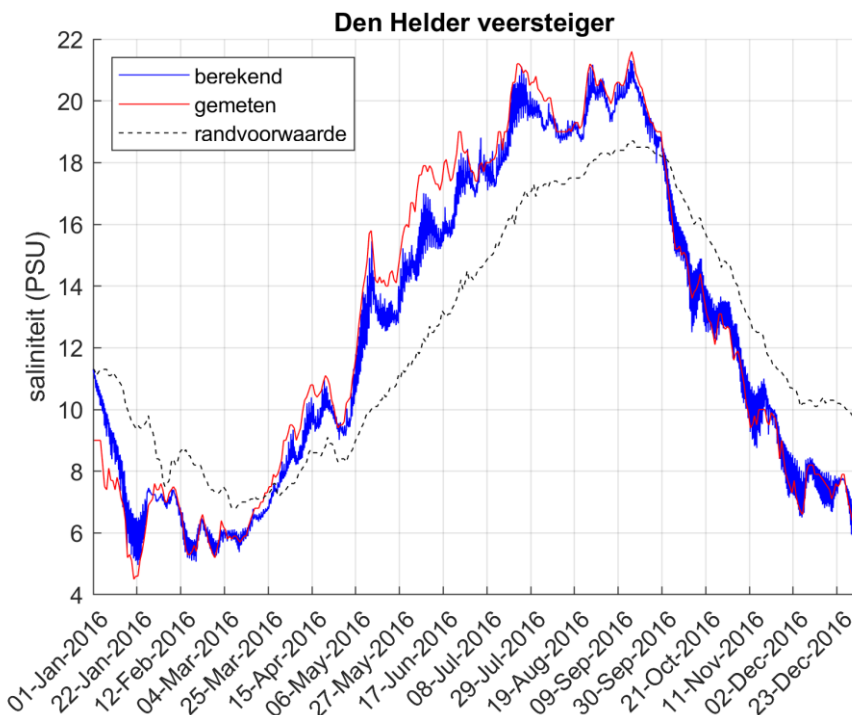
3.1 Stap 1: Validatie kuststrook

De berekende watertemperaturen voor 2016 zijn voor vijf stations vergeleken met metingen. De vijf locaties zijn in figuur 5 weergegeven.

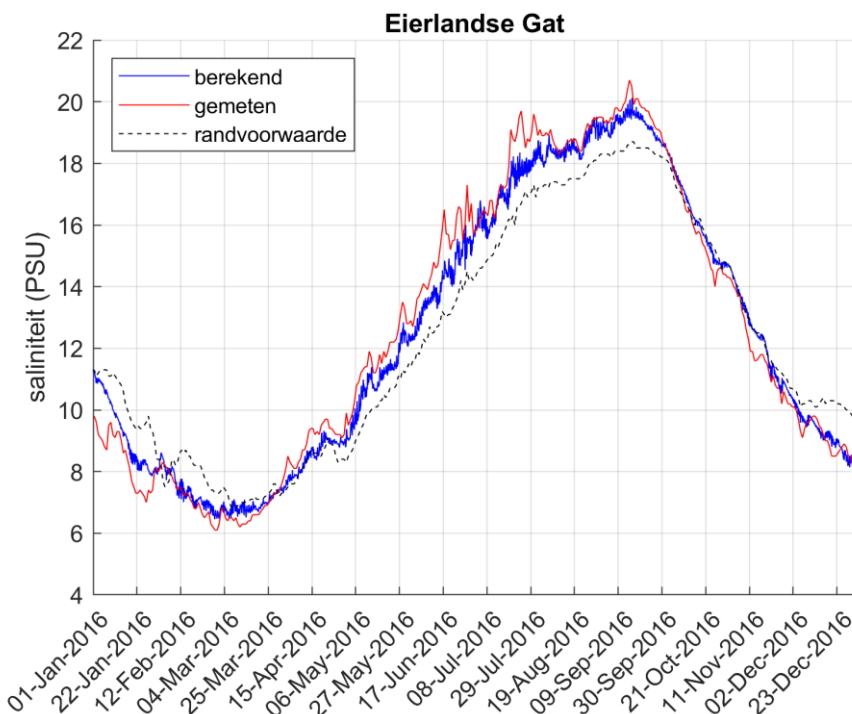


Figuur 5 Ligging van de vijf stations waarvoor gemeten en berekende watertemperatuur is vergeleken en ligging station K13a platform ten opzichte van de open rand van het model (zwarte lijn).

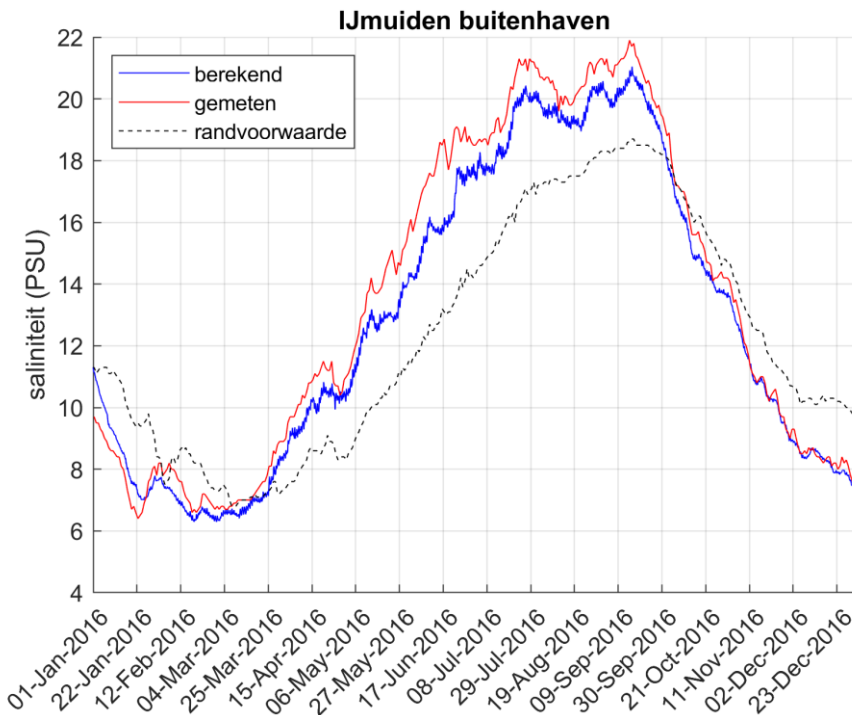
De Delft3D-resultaten in de stations zijn in figuren 6 tot en met 10 weergegeven. Ter referentie is ook de watertemperatuur op de open rand ook weergegeven.



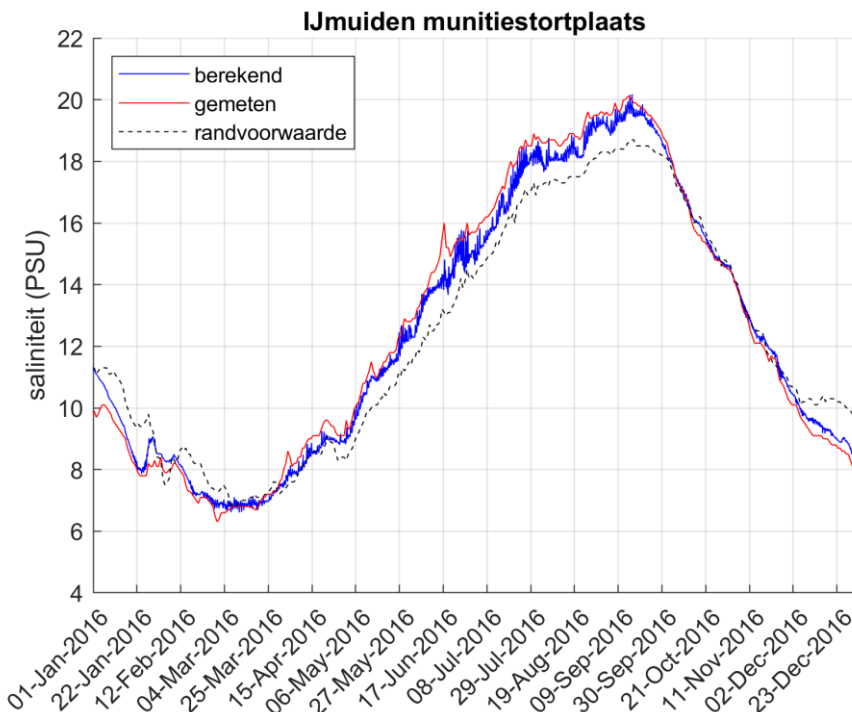
Figuur 6 Vergelijking van de gemeten en berekende watertemperatuur in Den Helder veersteiger en de opgelegde temperatuur op de open rand.



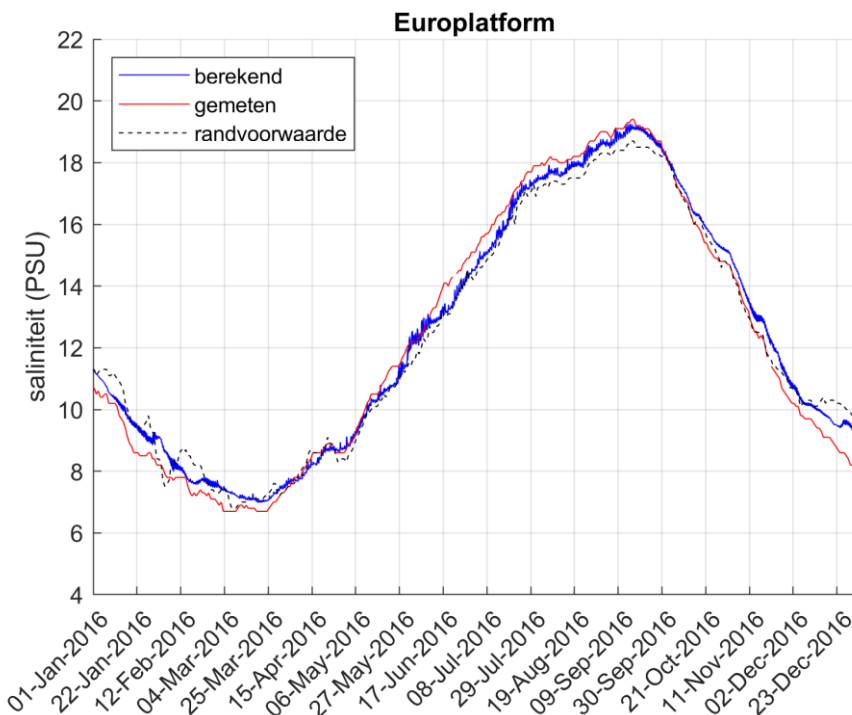
Figuur 7 Vergelijking van de gemeten en berekende watertemperatuur in Eierlandse Gat en de opgelegde temperatuur op de open rand.



Figuur 8 Vergelijking van de gemeten en berekende watertemperatuur in IJmuiden buitenhaven en de opgelegde temperatuur op de open rand.



Figuur 9 Vergelijking van de gemeten en berekende watertemperatuur in IJmuiden munitiestortplaats en de opgelegde temperatuur op de open rand.



Figuur 10 Vergelijking van de gemeten en berekende watertemperatuur in Europlatform en de opgelegde temperatuur op de open rand.

De berekende watertemperatuur in de drie stations op zee (Euro platform, Eierlandse Gat en IJmuiden munitiestortplaats) komen goed met de metingen overeen. Het model loopt wel iets achter bij het gemeten temperatuurverloop. In het voorjaar liggen de temperaturen over het algemeen iets te laag, terwijl in het najaar de berekende temperatuur juist iets hoger ligt dan de metingen. De ondiepere kustzone zal in het voorjaar onder invloed van de zon sneller opwarmen dan de diepere Noordzee en in het najaar ook langzamer afkoelen. De temperatuur op de open rand zal dan ook ergens tussen die van K13a Platform en de stations dicht bij de kust liggen. Indien die wel bekend zou zijn, zouden de resultaten waarschijnlijk verbeteren.

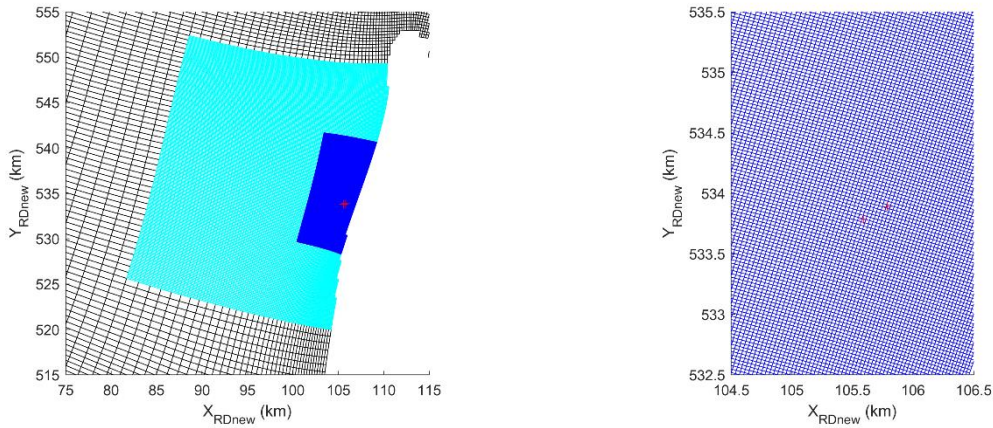
Bij de twee stations bij de kust (Den Helder en IJmuiden buitenhaven) zijn de verschillen tussen model en metingen groter, maar zijn de verschillen wel acceptabel. Een verklaring voor de verschillen is niet eenvoudig te geven. Mogelijk speelt de grofheid van het rekenrooster een rol, waardoor de diepteverschillen nabij de kust en in de haven niet nauwkeurig kunnen worden geschematiseerd, of worden de watertemperaturen beïnvloed door warmtelozingen die niet in het model zitten.

Omdat voor de berekeningen met koelwaterlozing(en) het model gebruik maakt van een voorgeschreven watertemperatuur, geeft dit voldoende vertrouwen dat het model ook in staat is om het effect van één of meerdere koelwaterlozingen te modelleren. Daarbij gaat het ook om het relatieve effect van de koelwaterlozing ten opzichte van een situatie zonder lozingen. Hiervoor is de nauwkeurigheid waarmee de temperatuurvariatie over de seizoenen wordt gemodelleerd minder van belang.

3.2 Stap 2: Kuststrook met lokale verfijning voor omgevingscondities en referentiesituatie

Voor het bepalen van de omgevingscondities voor stap 3 en de grootschalige koelwaterspreidingsberekeningen in stap 4 is de resolutie rondom de uitlaat relatief laag, zoals in figuur 4 te zien is. De roostercellen in die omgeving zijn orde 700 m bij 300 m, terwijl de onderlinge afstand tussen de huidige en nieuwe uitlaat slechts 224 m bedraagt. Vandaar dat ten behoeve van de grootschalige berekeningen voor de koelwaterspreiding het rooster in twee

stappen is verfijnd tot orde 27,5 m bij 27,5 m, zodat beide uitlaten individueel kunnen worden geschematiseerd (zie figuur 11).



Figuur 11 Rekenroosters van de twee geneste modellen, geheel (links) en detail rond de uitlaat (rechts).

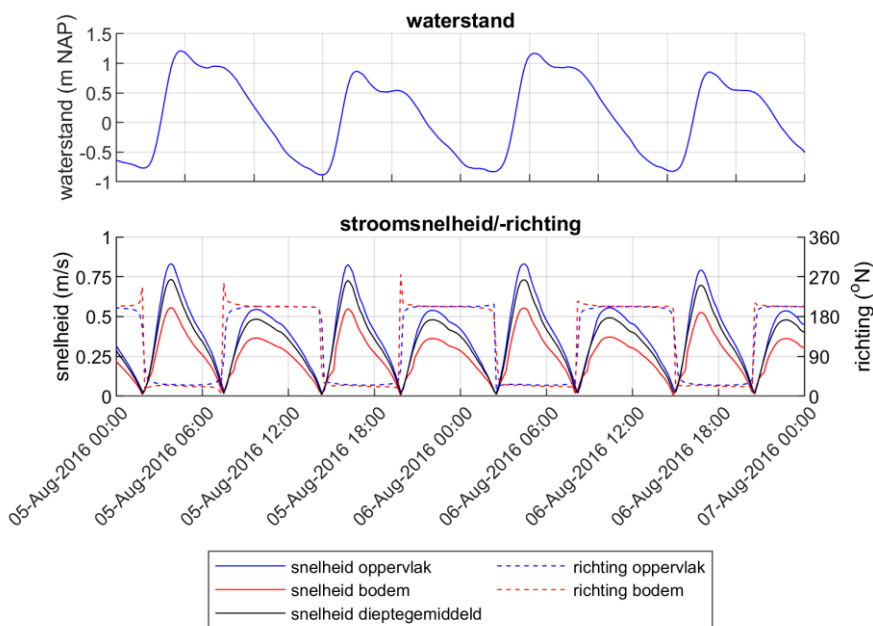
In beide geneste modellen zijn 8 equidistante lagen in de verticaal toegepast. De modelbodem voor beide geneste deelmodellen is gebaseerd op de vaklodingen die voor dit gebied met een resolutie van 20 m beschikbaar zijn.

Omdat de rekentijd van dit model met verfijning erg groot is, zijn twee doortij-springtij perioden van 15 dagen geselecteerd:

- winter: 15 februari – 1 maart
- zomer: 1 augustus – 16 augustus

In beide gevallen is er een periode van 5 dagen gebruikt om het model in te laten spelen.

Figuur 12 toont de berekende waterstanden en stroomsnelheden en -richtingen tijdens het springtij van 5-7 augustus.



Figuur 12 Berekende waterstand en stroming ter plaatse van de uitlaat bij springtij.

Het getij wordt gekarakteriseerd door een korte vloedperiode met relatief hoge stroomsnelheden in noordnoordoostelijke richting en een langere ebperiode met lagere stroomsnelheden in zuidzuidwestelijke richting. De maximale dieptegemiddelde snelheid over deze twee doottij-springtij perioden ligt tussen 0,75 en 0,8 m/s en tussen 0,85 en 0,9 m/s aan het oppervlak. Bij eb ligt dit tussen 0,45 en 0,55 m/s. In de CFD-studie is voor de achtergrondnelheid dan ook gekozen voor de twee uitersten: 0,85 m/s (maximale vloed) en 0 m/s (kentering).

De modeluitvoer van beide perioden laat zien dat de saliniteit varieert tussen de 31 en 34 PSU (1 PSU komt ongeveer overeen met 1 gr zout per liter water), zodat een waarde van 32,5 PSU een redelijke aanname is voor de achtergrondsaliniteit in de CFD-studie.

3.3 Stap 3: CFD voor lokale menging

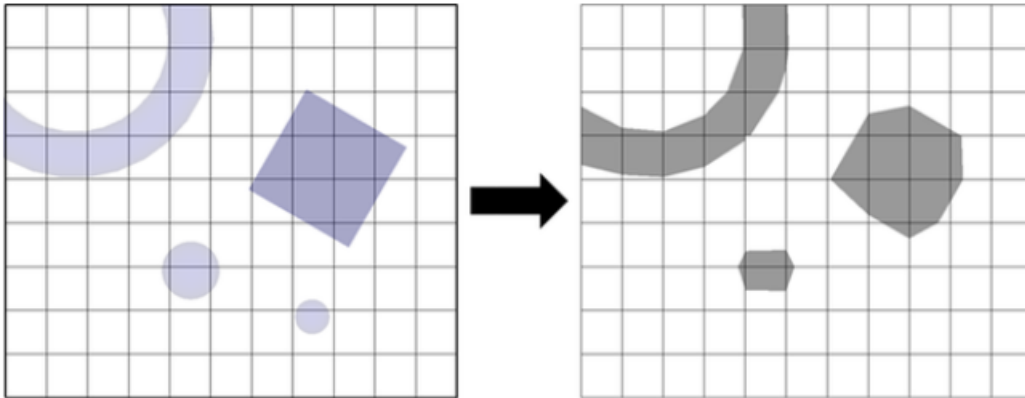
Gebruikte model

Het voor deze CFD-studie gebruikte programma FLOW-3D is een commercieel CFD-pakket, dat in de jaren '80 op de markt is gekomen. Het pakket is ontwikkeld door het Amerikaanse Flow Science (Santa Fe, New Mexico) en wordt door Arcadis veelvuldig toegepast in CFD-projecten. Dit pakket is vanaf het begin ontwikkeld met het oog op tijdsafhankelijke berekeningen met een vrij wateroppervlak. Dit in tegenstelling tot andere CFD-pakketten die zijn ontwikkeld voor gesloten leidingsystemen, maar waar later mogelijkheden van berekening met een vrij wateroppervlak aan zijn toegevoegd. Omdat we in deze studie specifiek kijken naar de langs- en dwarsstroom in de omgeving van de kering, en speciaal aan het oppervlak, is dit het belangrijkste argument geweest om voor dit pakket te kiezen.

Voor de modellering van het vrije wateroppervlak wordt gebruik gemaakt van een zogenaamde Volume-of-Fluid (VoF) methode. Het model rekent voor elke rekencel uit welke fractie van de cel gevuld is met vloeistof. Vervolgens wordt dit gebruikt om een scherpe interface te definiëren die het wateroppervlak beschrijft. Vervolgens wordt op dit oppervlak een randvoorwaarde voorgeschreven, in dit geval de atmosferische druk.

Zoals in paragraaf 2.2 is benoemd, is de dikte van de geometrie aangepast om deze met voldoende detail in het gebruikte rooster te kunnen schematiseren. Dit heeft te maken met de manier waarop in FLOW-3D de geometrie

wordt geschematiseerd. FLOW-3D gebruikt een methode die FAVOR (Fractional Area-Volume Obstacle Representation) wordt genoemd. In figuur 13 is deze methode schematisch weergegeven. De geometrie wordt geschematiseerd door een rekenel een gegeven fractie te blokkeren op basis van het volume dat binnen de rekenel valt.



Figuur 13 FAVOR concept, links de object definitie, rechts hoe dit wordt geschematiseerd door cellen gedeeltelijk of volledig te blokkeren.

Om te voorkomen dat er gaten in de schematisatie komen bij onvoldoende dikte, dient een minimale dikte van 1,5 – 2 maal de roosterafmetingen aangehouden te worden voor de outfall boven het bodemniveau, dus zowel de pijp als de duckbill valve. In dit geval is een dikte van 13,5 cm toegepast om vrijheid te hebben om met de roosterresolutie te kunnen variëren (tot maximaal 7 cm nabij de uitlaat).

Het grote voordeel van deze methode is dat kubusvormige rekenellen vanuit numerieke stabiliteit het best zijn en tegelijk dat het opzetten van een rooster een significant kleinere inspanning vergt dan voor een rooster dat de geometrie wel precies moet volgen. Hoewel dit leidt tot een minder precieze schematisatie van de geometrie dan bij een methode waarbij het rooster de geometrie nauwkeurig volgt (boundary-fitted mesh), kan dit voor een groot deel worden opgeheven door daar waar de geometrie evenwijdig aan de roosterlijnen georiënteerd is, die roosterlijnen aan te laten sluiten op de geometrie.

De 3D CAD geometrie uit paragraaf 2.2 is gebruikt voor de opzet van een eerste model. Het model dekt een gebied van 30 m bij 30 m, met de uitstroomopening centraal in het domein. In de verticaal loopt het domein van de onderkant van de pijp tot 1 m boven het wateroppervlak. Op de open randen rondom wordt een vaste waterstand opgelegd van NAP 0 m in combinatie met een hydrostatische drukverdeling en geen gradiënt (zero-gradient randvoorwaarde) voor de turbulente kinetische energie (k) en dissipatie (ϵ). Water dat door de open randen naar binnen stroomt, heeft een gegeven saliniteit en temperatuur. Daarnaast kan water ook vrijuit naar buiten stromen. Op de bovenste rand is een atmosferische druk van 1013 hPa (1 atm.) opgelegd. De koelwaterlozing wordt middels een debiet in de pijp voorgeschreven, in 1 sec van 0 naar de vaste waarde van 0,917 m³/s oplopend, met een gegeven saliniteit (0,3 kg/m³, zoet water) en temperatuur (35 °C).

Het model is geïnitieerd met water in rust en een hydrostatische drukverdeling tot een niveau van NAP 0 m, de saliniteit en bij het seizoen behorende temperatuur. In de koelwaterleiding is de temperatuur vanaf het begin van de berekening al op 35 °C gezet en de saliniteit op 0,3 kg/m³. Voor de simulaties met vloed wordt de achtergrondnelheid ook initieel en op de bovenstroomse rand als randvoorwaarde voorgeschreven. Als eindtijd is een waarde van 60 sec aangehouden. FLOW-3D past op de wanden van de constructie een no-slip randvoorwaarde toe, waarbij tevens een wandruwheid van 0,06 mm (glad beton) is opgegeven.

Gevoeligheidsberekeningen

Met dit model zijn vervolgens een aantal gevoeligheden onderzocht, voordat de definitieve berekeningen zijn aangezet:

- roosterresolutie

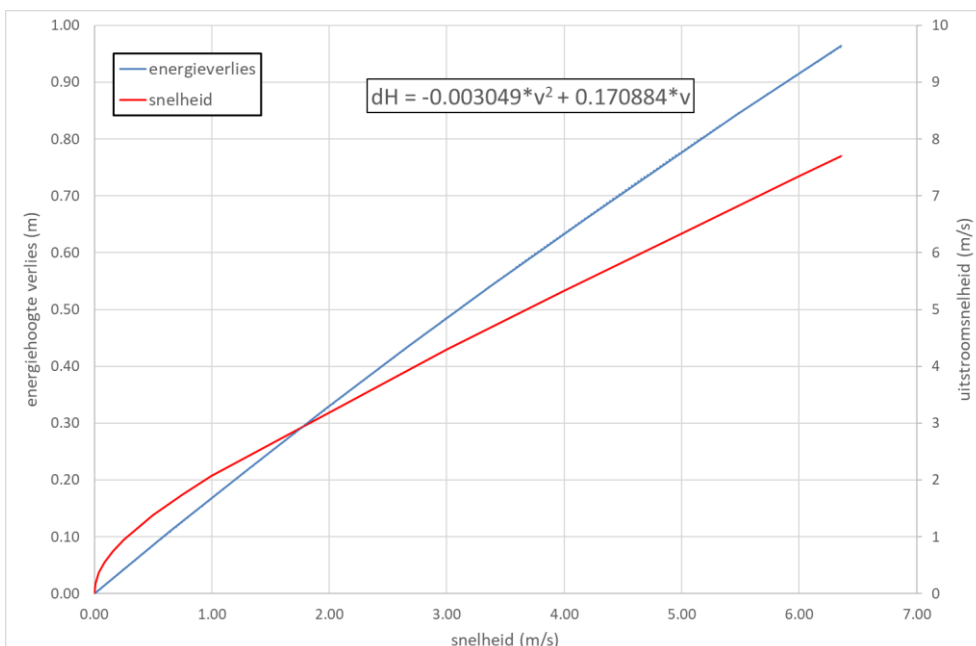
Er zijn drie resoluties onderzocht, te weten 7 cm (13 cellen in pijpdiameter), 6 cm (15 cellen) en 4,75 cm (19 cellen) ter plaatse van de uitstroompijp in x-richting. In alle gevallen is hetzelfde aantal cellen ook gebruikt voor de kleinste breedte van de uitstroomopening in de y-richting (totaal 39 cm), dus in y-richting is de celgrootte orde 2,3 kleiner dan in x-richting. In de verticaal is hetzelfde aantal cellen ook toegepast in de horizontale sectie van de 90 cm pijp en 2 cellen minder in de smallere pijp. In alle gevallen is de celgrootte naar de buitenkant van het domein en richting wateroppervlak geleidelijk vergroefd om rekentijd te besparen.

- kentering of vloed
Ten behoeve van de vloedconditie is het model in benedenstroomse richting met 10 m verlengd.
- het turbulentiemodel
Beschouwd zijn k-ε RNG en k-ω, de twee meest gebruikte turbulentiemodellen voor dit soort uitstromings-studies.
- manier waarop de duckbill valve het best kan worden gemodelleerd
Er is gekeken of een realistische vorm met verlies van energiehoogte en toename van de uitstroomsnelheid of zonder beide door middel van een rechte uitlaatpijp.

De duckbill valve is het ingewikkeldste onderdeel om te modelleren. Het doel van de duckbill valve is om te voorkomen dat er zeewater de koelwaterleiding in stroomt. Zonder waterdruk is de uitstroomopening samengedrukt en als er water doorstroomt, duwt dit de klep uit elkaar. Omdat het doorstroomoppervlak kleiner is dan dat van de pijp, neemt de uitstroomsnelheid toe. De fabrikant PROCOC heeft gegevens verstrekt van de uitstroomsnelheid en energieverlies over de duckbill valve als een functie van het doorstroomdebiet.

In FLOW-3D is het niet mogelijk om de functionaliteit van de rubberen klep realistisch te modelleren. Het is wel mogelijk om de klep als onderdeel van de geometrie te modelleren, zodat de toename van de uitstroomsnelheid correct is. De vorm van de uitstroom is zodanig gekozen dat die bestaat uit twee gedeeltes van een cirkelsegment met het juiste doorstroomoppervlak en een lengte van het segment dat overeenkomt met de lengte van de klep.

Het energieverlies wordt vervolgens gecontroleerd door middel van een zogenaamde “porous baffle”, een schematisatie-element die als een poreuze laag zorgt voor een gegeven weerstand. In figuur 14 is de relatie tussen aanstroomsnelheid en energiehoogte verlies weergegeven en de tweede orde polygoon die daarop gefit is. In deze studie zijn we uitgegaan van de zwaarste uitvoering van dit type duckbill valve.



Figuur 14 Energieverlies en uitstroomsnelheid van de duckbill valve volgens opgave van de fabrikant PROCOC en lineaire fit op het energieverlies.

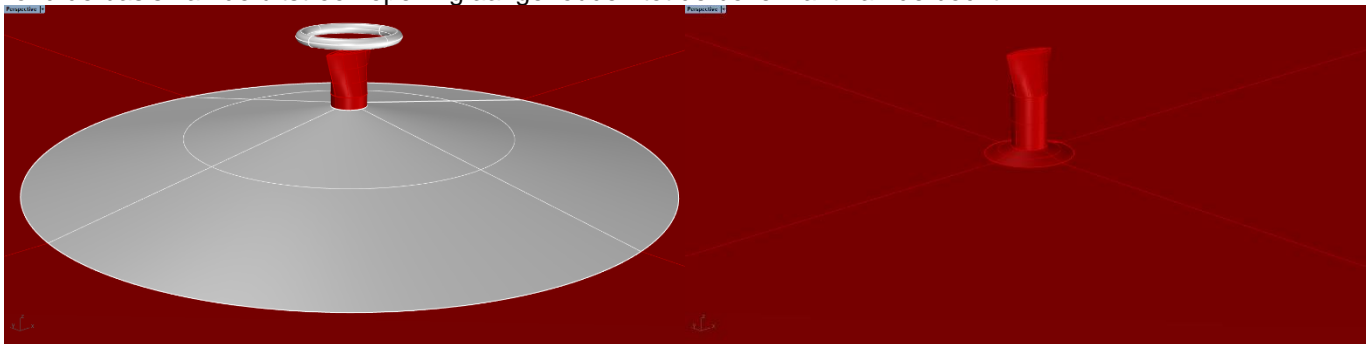
In FLOW-3D is het drukverlies over de “porous baffle” gedefinieerd als:

$$\Delta P = \rho g \Delta H = \rho \left(K_1 u + \frac{1}{2} K_2 u |u| \right)$$

Hieruit volgen waarden voor de verliescoëfficiënten $K_1 = 1.676$ m/s en $K_2 = -0.060$. Bij een debiet van $0,917 \text{ m}^3/\text{s}$ en een diameter van $0,90 \text{ m}$, komt dit neer op een verlies aan energiehoogte van $24,1 \text{ cm}$ en een uitstroomsnelheid van $2,61 \text{ m/s}$.

Deze relaties gelden voor de zwaarste uitvoering van de duckbill valve. Voor de lichte en middelste versies zijn de waarden voor verlies aan energiehoogte respectievelijk $15,9 \text{ cm}$ en $20,0 \text{ cm}$ en de uitstroomsnelheid respectievelijk $2,28 \text{ m/s}$ en $2,45 \text{ m/s}$.

Om het effect van het ontwerp op de resultaten te onderzoeken, zijn twee varianten beschouwd (zie figuur 15) in combinatie met de vloedstroming. In de ene variant is het ontwerp conform de tekening gemodelleerd. Bij de andere variant is de bodembescherming en beschermingsconstructie niet meegenomen. Er is alleen een kleine verhoging rond de basis van de uitstroomopening aangehouden tot de bovenkant van de bocht.



Figuur 15 De twee onderzochte varianten van het ontwerp, met bodembescherming en bovenste ring van de beschermingsconstructie (links) en zonder (rechts).

De resultaten van de gevoeligheidsstudie kunnen als volgt worden samengevat:

- De middelste resolutie geeft de beste resultaten. Bij een grover rooster wordt de straal van de uitstroom instabieler. Het fijnste rooster laat vergelijkbare resultaten zien als het middelste rooster, maar leidt tot erg lange rekentijden. Wel dient de roostercellen in de verticaal richting wateroppervlak niet teveel te worden uitgerekt, om het opbreken van de straal met voldoende detail te kunnen modelleren.
- Het duurt ongeveer 20-30 sec voordat de straal volledig ontwikkeld is en de resultaten (quasi-)stationair worden. Door loslaatverschijnselen van de stroming blijft er een kleine fluctuatie van het stroompatroon zichtbaar. Voor de definitieve berekeningen wordt een eindtijd van 40 sec aangehouden.
- Het berekende verlies aan energiehoogte over de duckbill valve komt met orde 20-22 cm goed overeen met de gegevens van de fabrikant. Om het berekende verlies beter overeen te laten komen, zouden de verliescoëfficiënten K_1 en K_2 iteratief kunnen worden aangepast. Op het stroombeeld zal dit verschil in energieverlies geen significant effect hebben. Om de doorlooptijd van de studie niet te groot te laten worden, zijn daarom de hierboven beschreven waarden aangehouden.
- Bij kentering is de uitstroom als een compacte straal richting oppervlak gericht, terwijl die bij vloed door de stroming al snel wordt opgebroken en zich verspreidt. De uitbreiding van het rooster benedenstrooms kan gehalveerd worden van 10 m naar 5 m .
- Met het $k-\epsilon$ RNG turbulentiemodel blijft de straal tot het wateroppervlak stabiel, terwijl die bij het $k-\omega$ turbulentiemodel de straal richting oppervlak eerder opbreekt. Aangezien de resultaten van het eerste turbulentiemodel dus conservatiever zijn, is dit gebruikt in de definitieve berekeningen.

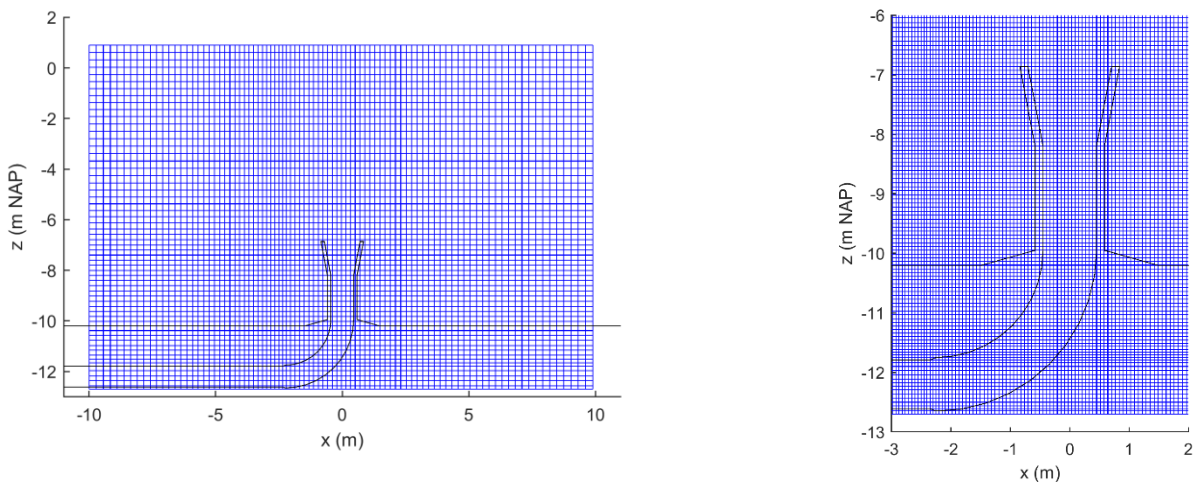
- Het verschil tussen beide schematisaties van het ontwerp, met of zonder bodembescherming en beschermconstructie is minimaal. De ring zorgt voor wat extra turbulentie, maar die is niet zodanig dat dit de straal significant beïnvloedt. Ook zorgt de bodembescherming niet voor een stromingscomponent richting de bodem die de verspreiding van de koelwaterpluim richting de bodem versterkt.

Definitieve modelberekeningen

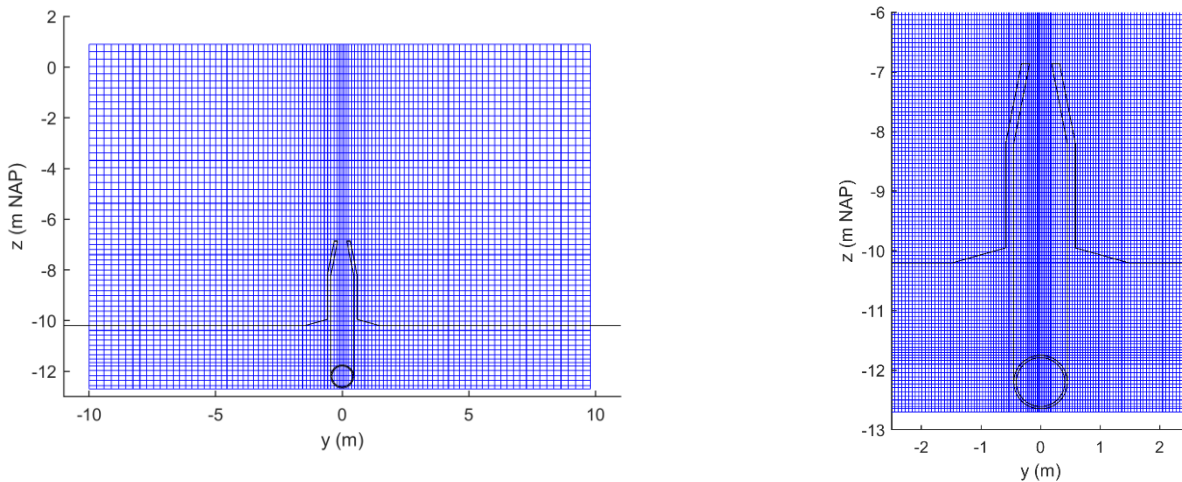
Op basis van de resultaten tot nu toe, zijn voor de definitieve berekeningen dus de volgende keuzes gemaakt:

- Middelste resolutie, maar met hogere verticale resolutie in de waterkolom rond wateroppervlak
- Aangezien de verspreiding van de straal beperkt is, is de omvang van het rekendomein in de horizontaal bij kentering teruggebracht naar 20 m bij 20 m.
- De rekestijd is beperkt tot 40 sec.
- Voor de vloedconditie kan de uitbreiding van het rekendomein beperkt blijven tot 5 m benedenstreams
- Het k- ϵ RNG turbulentiemodel wordt toegepast
- In het model wordt de bodembescherming en de beschermingsconstructie niet meegenomen.

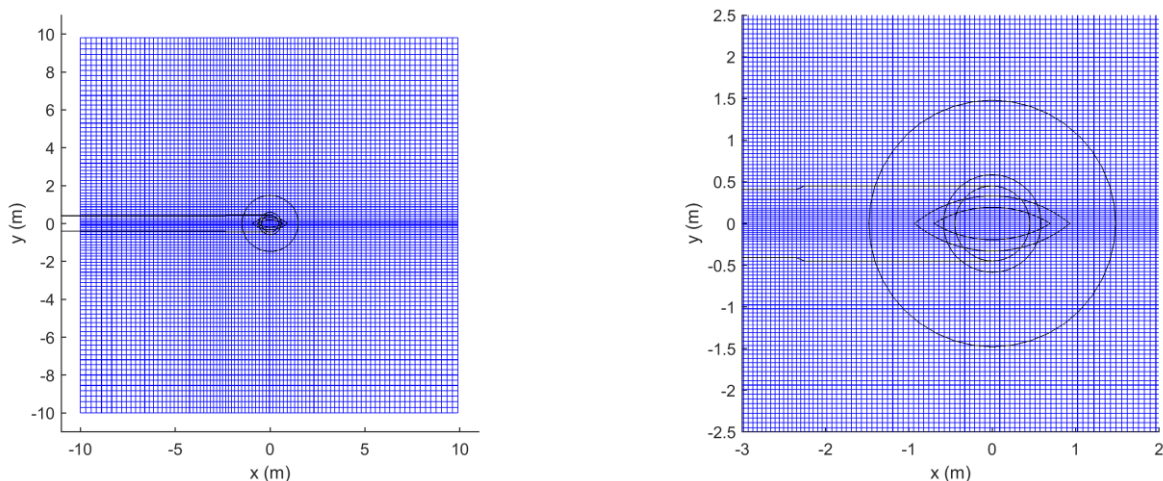
Het uiteindelijke rekenrooster is in figuren 16 tot en met 18 weergegeven.



Figuur 16 Zijaanzicht van het rekenrooster, totale domein (links, 1-op-3 roosterlijnen weergegeven) en detail rond uitlaat (rechts, alle roosterlijnen).



Figuur 17 Vooraanzicht van het rekenrooster, totale domein (links, 1-op-3 roosterlijnen weergegeven) en detail rond uitlaat (rechts, alle roosterlijnen).

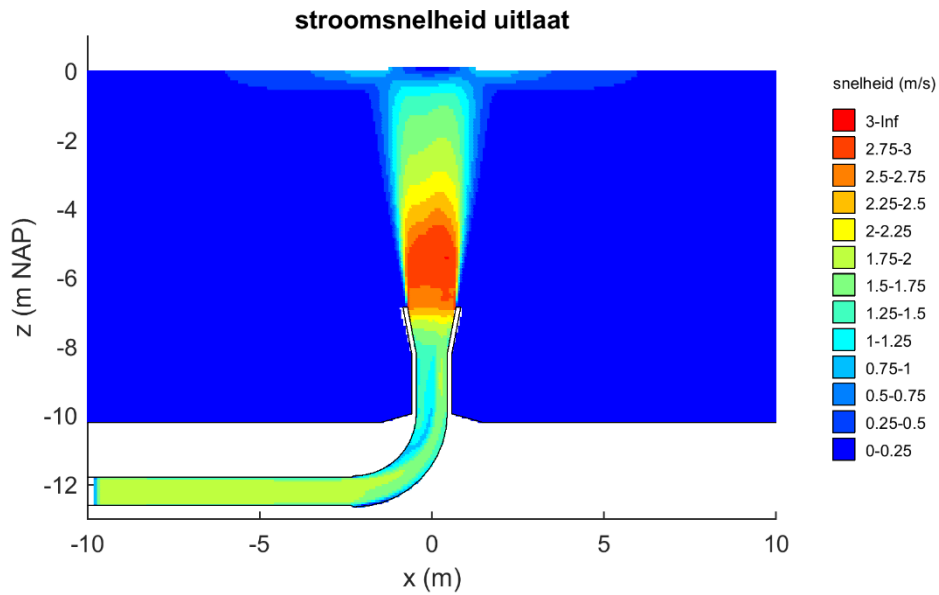


Figuur 18 Bovenaanzicht van het rekenrooster, totale domein (links, 1-op-3 roosterlijnen weergegeven) en detail rond uitlaat (rechts, alle roosterlijnen).

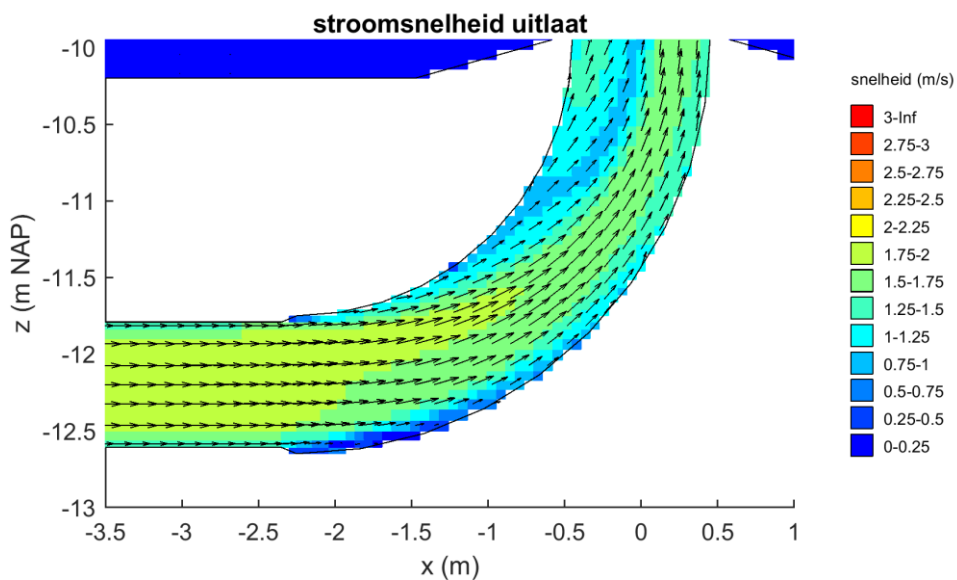
In de volgende vier sub-paragrafen worden de resultaten per conditie besproken.

3.3.1 Kentering – winter

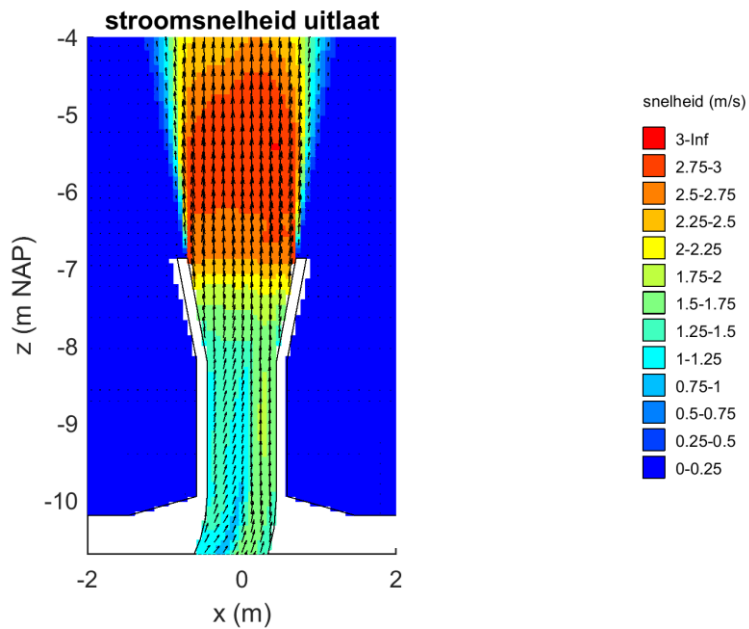
Voor de winter is uitgegaan van een debiet van 3.300 m³/uur als een conservatieve aanpak en om de resultaten voor zomer en winter eenvoudig te kunnen vergelijken. In figuren 19 tot en met 21 is het stroompatroon na 40 sec weergegeven in een dwarsdoorsnede in de lengterichting van de uitlaat, respectievelijk een totaalplaatje, een detail in de bocht en door de uitlaat. In figuren 22 en 23 is hetzelfde gedaan in een doorsnede loodrecht op de uitlaat, dwars op de as van de duckbill valve.



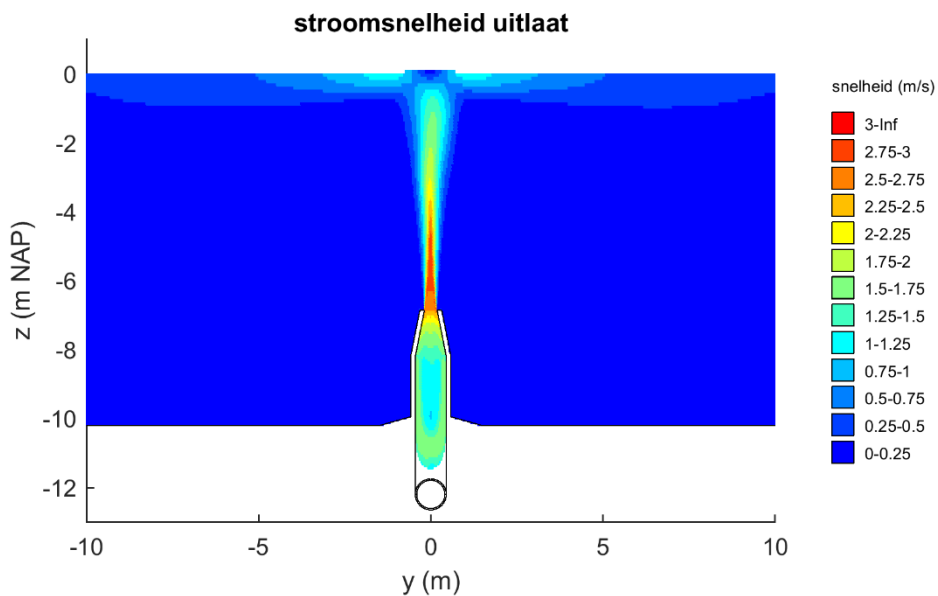
Figuur 19 Stroomsnelheid in een doorsnede parallel aan de uitlaat.



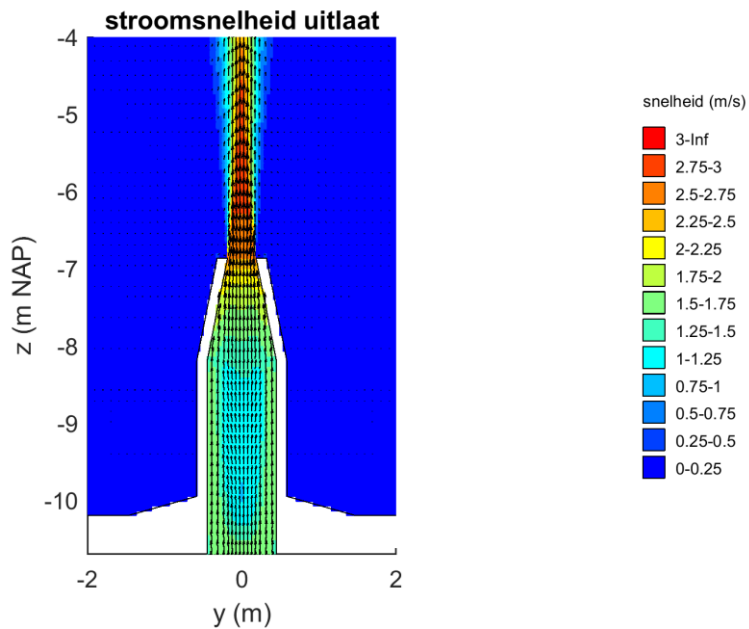
Figuur 20 Stroomsnelheid, detail bocht (vectorveld in beide richtingen met factor 2 uitgedund).



Figuur 21 Stroomsnelheid, detail uitlaat (vectorveld in beide richtingen met factor 2 uitgedund).



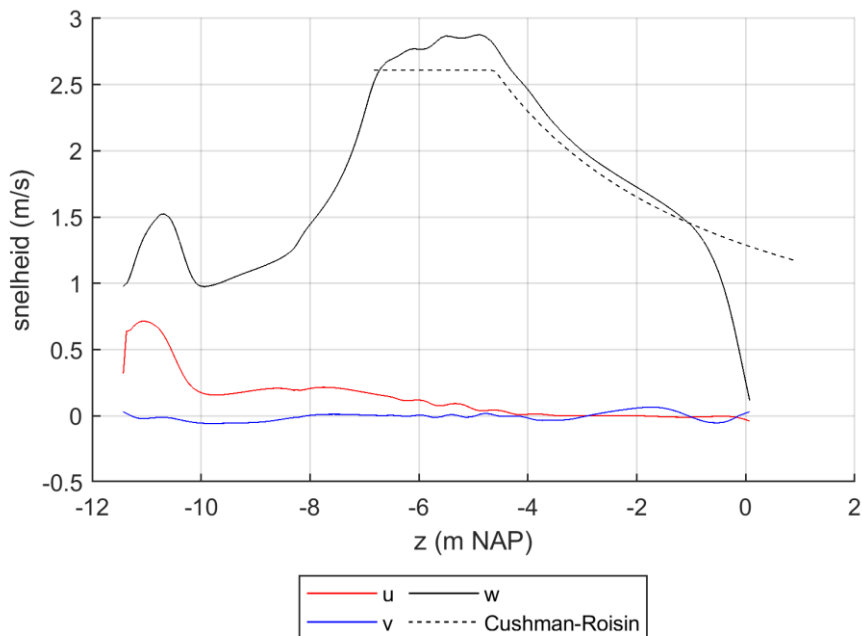
Figuur 22 Stroomsnelheid in een doorsnede dwars op de uitlaat.



Figuur 23 Stroomsnelheid, detail uitlaat (vectorveld in beide richtingen met factor 2 uitgedund).

Daar waar de straal het oppervlak bereikt, vindt er een beperkte verstoring van het wateroppervlak plaats.

De drie snelheidscomponenten langs een verticale lijn dwars door de uitlaat zijn in figuur 24 weergegeven.



Figuur 24 Verloop van de drie snelheidscomponenten langs de as van de uitlaat en vergelijking met theoretisch profiel [Cushman-Roisin, B., *Environmental Fluid Mechanics, Turbulent Jets*, Thayer School of Engineering, Dartmouth College].

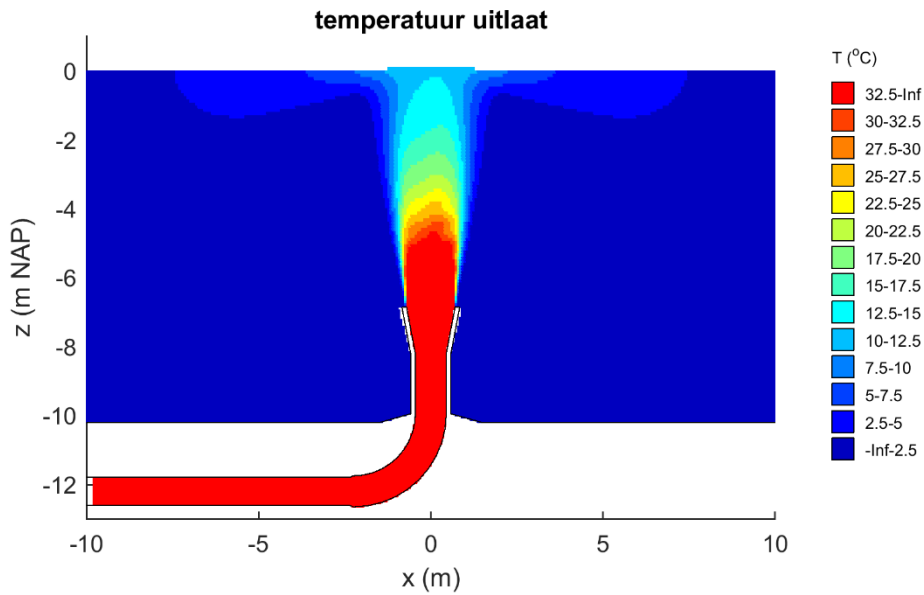
Onder $z = -9,95$ m NAP bevindt zich de bocht en is de u-component relatief groot, daarboven neemt deze component sterk af en is de stroming voornamelijk verticaal. Tussen $z = -8,20$ m NAP en $z = -6,863$ m NAP neemt de verticale snelheidscomponent toe door de afname van het doorstroomoppervlak in de duckbill valve.

In de figuur is ook een theoretisch snelheidsprofiel weergegeven die de snelheidsverdeling van een vrij uitstromende straal in stilstaand water met dezelfde dichtheid beschrijft. De modelresultaten komen goed met deze overeen. Net als in het theoretische profiel blijft de snelheid in de straal over een zekere afstand eerst vrijwel constant, waarna die geleidelijk afneemt met de afstand. Dat de straal niet geheel overeenkomt met de theorie, komt onder andere door:

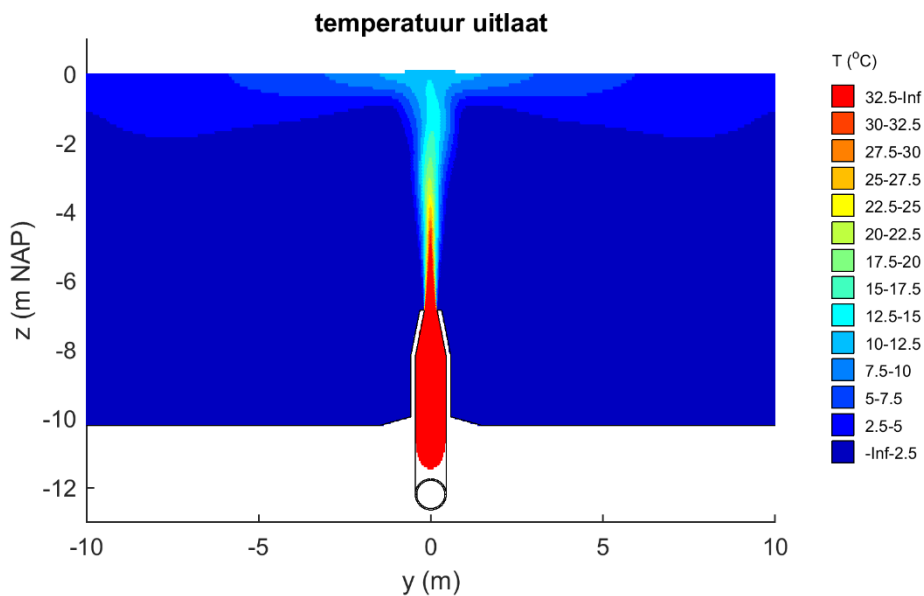
- de geometrie met een bocht net voor het rechte stuk en de duckbill valve die zorgt voor een versnelling van de stroming vlak voor de uitstroom;
- het dichtheidsverschil, waardoor het water een opwaartse versnelling ondervindt; en
- de aanwezigheid van het wateroppervlak, waardoor de straal wordt gebroken.

De goede overeenkomst met het theoretische verloop geeft in ieder geval vertrouwen dat het model de uitstroom correct berekent.

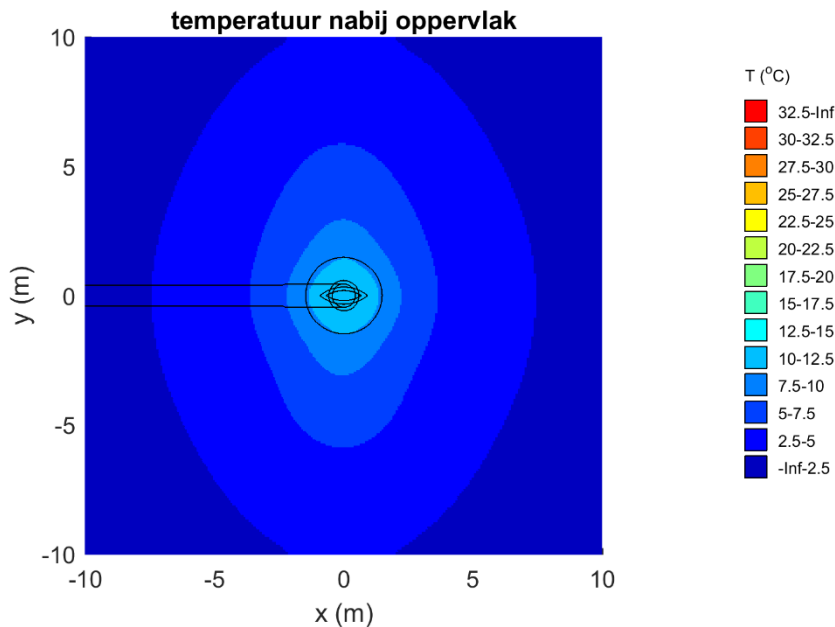
De temperatuur van de koelwaterlozing in dezelfde doorsnedes is in figuren 25 en 26 weergegeven, en de temperatuur in een horizontale doorsnede net onder het wateroppervlak is in figuur 27 weergegeven.



Figuur 25 Temperatuur in een doorsnede parallel aan de uitlaat.



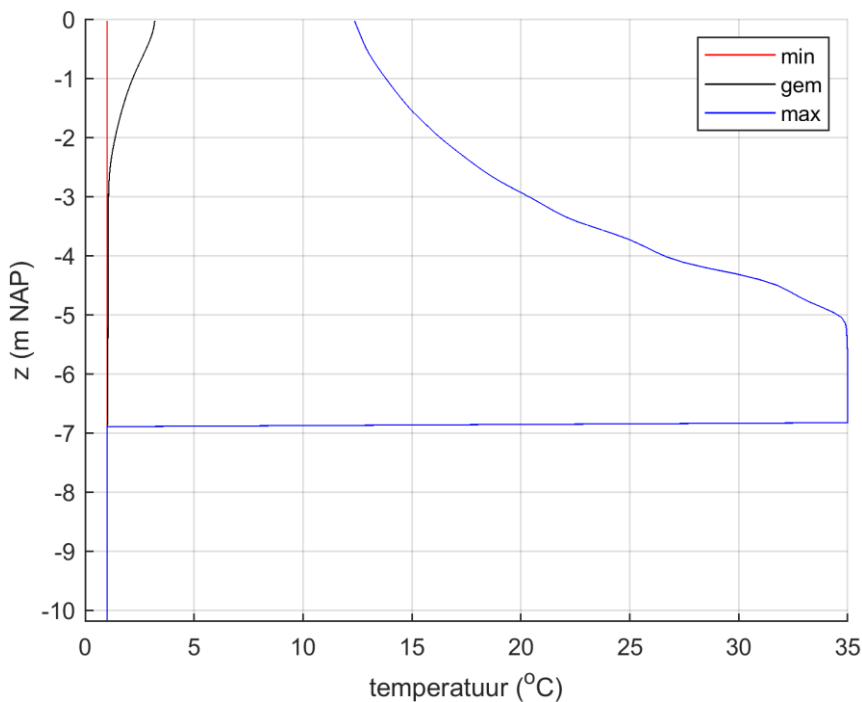
Figuur 26 Temperatuur in een doorsnede dwars op de uitlaat.



Figuur 27 Temperatuur in een doorsnede vlak onder het wateroppervlak.

Vanaf het moment dat de straal het wateroppervlak bereikt, spreidt het koelwater zich steeds verder ruimtelijk uit richting de randen van het domein, maar omdat de doorsnede steeds groter wordt, neemt de snelheid steeds verder af. Tegelijk mengt het koelwater ook steeds meer met het omringende water.

De minimale, maximale en gemiddelde temperatuur in horizontale doorsnedes over de verticaal van het model is in figuur 28 weergegeven. Hierbij is de temperatuur binnenin de constructie niet meegenomen, vandaar de sprong op $z = -6,863$ m NAP.

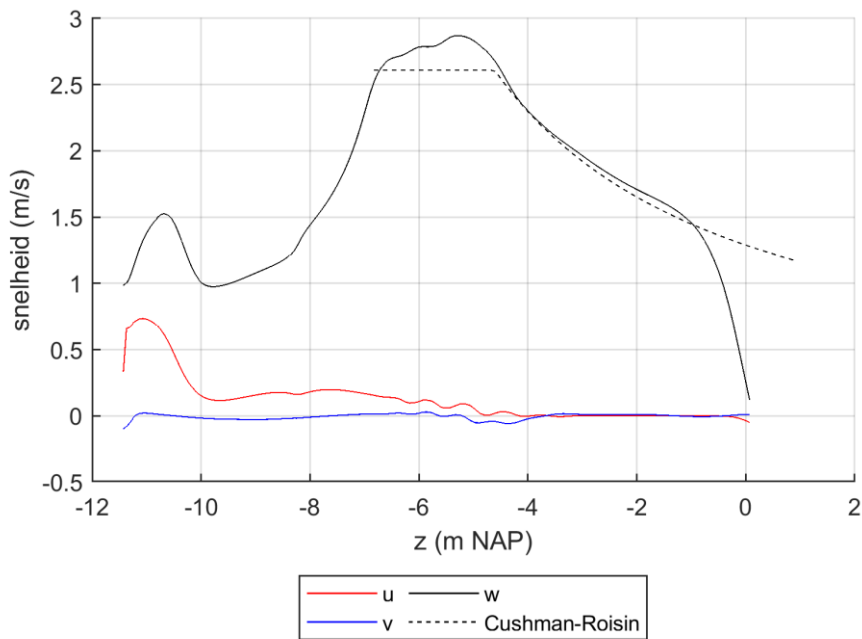


Figuur 28 Verdeling van de berekende minimale, gemiddelde en maximale temperatuur in het model over de verticaal.

Recht boven de straal komen de hoogste temperaturen voor, afnemend van 35 °C net boven de uitlaat tot 12,37 °C nabij het oppervlak. Dit profiel is in de laatste 10 sec vrijwel constant. De minimale temperatuur blijft 1 °C over de gehele verticaal, aangezien de koelwaterlozing de domeinranden nog niet heeft bereikt. De gemiddelde temperatuur loopt op van 1 °C vlak boven de uitstroomopening (het doorstroomoppervlak is klein ten opzichte van de 400 m² oppervlakte van het gehele domein dat de 35 °C van het koelwater nauwelijks tot een verhoging leidt) tot 3,19 °C nabij het oppervlak. Doordat er steeds meer koelwater aan het model wordt toegevoegd en de omvang van de temperatuurverhoging nabij het oppervlak blijft toenemen, loopt de gemiddelde temperatuur aan het oppervlak nog wel op in de tijd, maar steeds langzamer.

3.3.2 Kentering – zomer

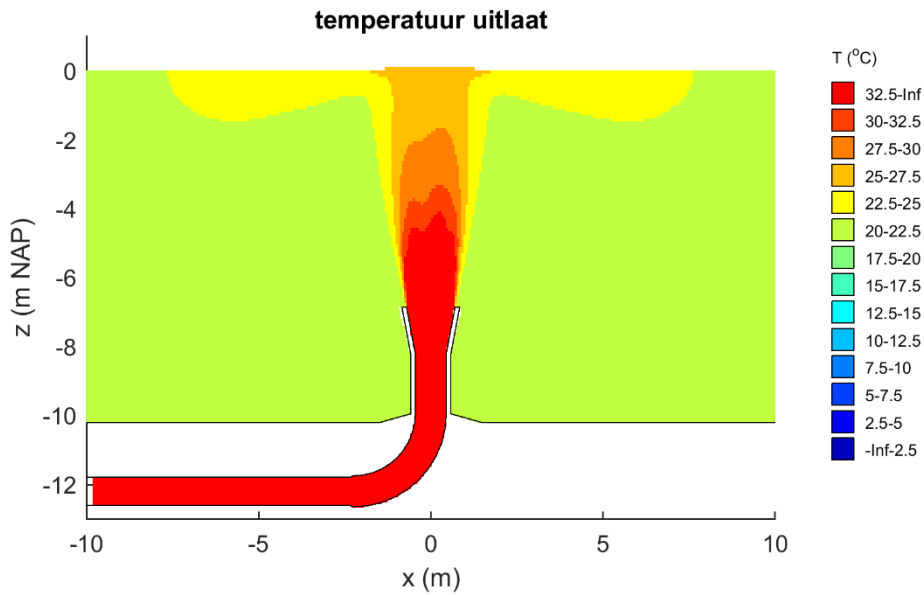
Het beeld van de stroomsnelheden in de pijp en straal verschillen nauwelijks van die voor de winterconditie. In figuur 29 zijn de snelheidscomponenten in de straal na 40 sec weergegeven.



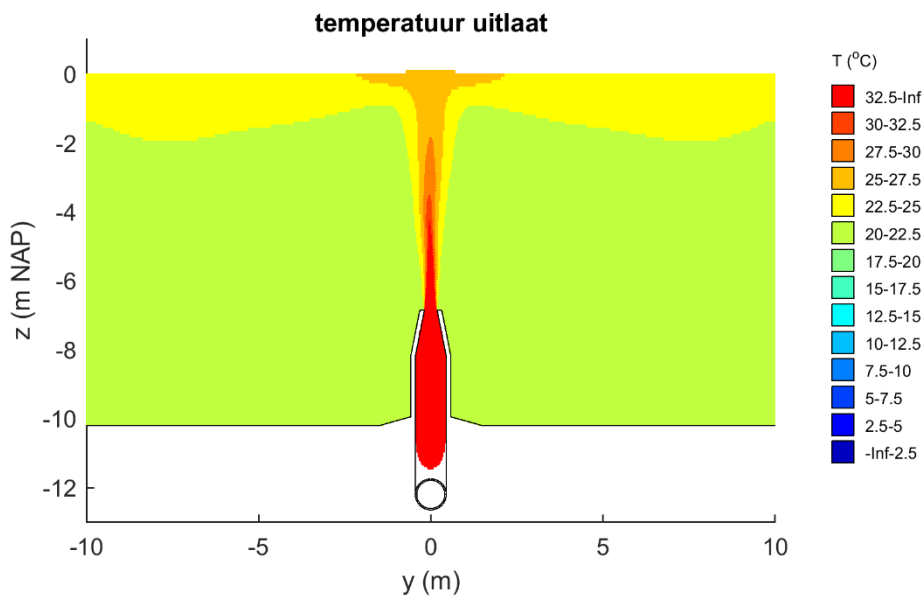
Figuur 29 Verloop van de drie snelheidscomponenten langs de as van de uitlaat en vergelijking met theoretisch profiel van Cushman-Roisin.

De toename van de snelheid in het gedeelte waar de snelheid volgens theorie constant is, is kleiner dan in de winter, maar de verschillen zijn klein en zijn niet constant over de tijd. Het is dan ook lastig om te concluderen dat dit het gevolg is van het kleinere dichtheidsverschil tussen het koelwater en de omgeving in de zomer vergeleken met de winter. Het kan ook liggen aan het fluctueren van de straal in de tijd.

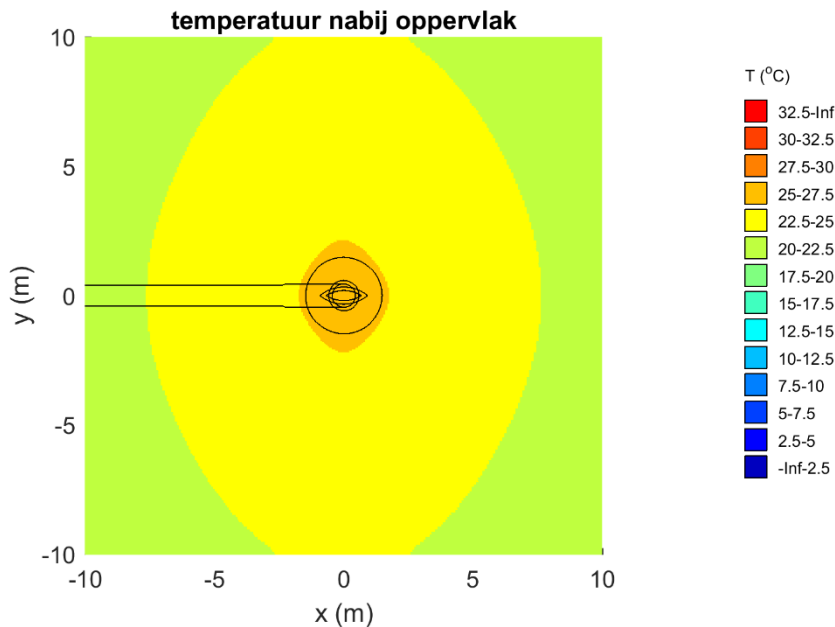
De temperatuurverdeling in de dwarsdoorsnedes is in figuren 30 tot en met 32 weergegeven en figuur 33 toont het minimale, maximale en gemiddelde temperatuurprofiel over de verticaal.



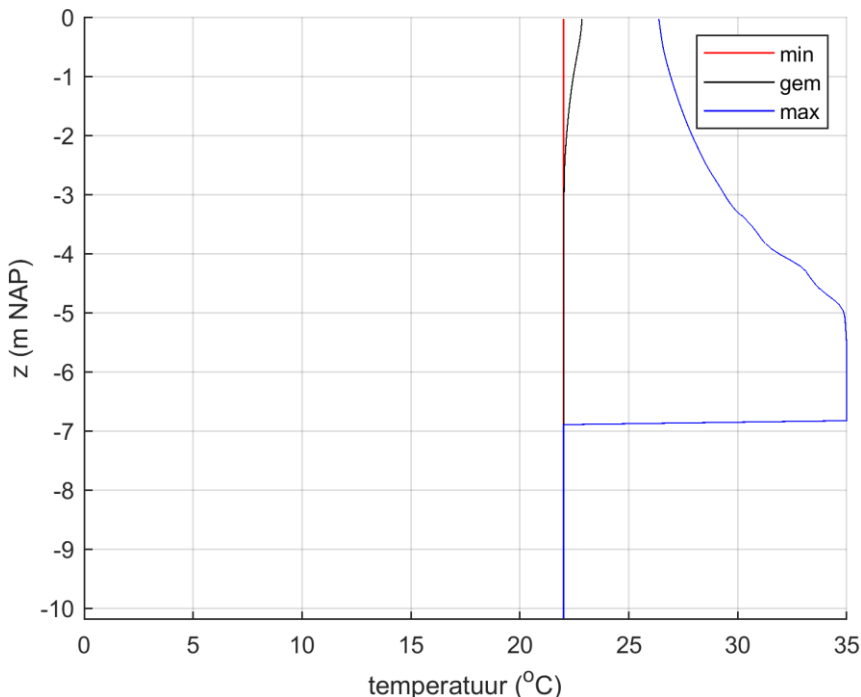
Figuur 30 Temperatuur in een doorsnede parallel aan de uitlaat.



Figuur 31 Temperatuur in een doorsnede dwars op de uitlaat.



Figuur 32 Temperatuur in een doorsnede vlak onder het wateroppervlak.



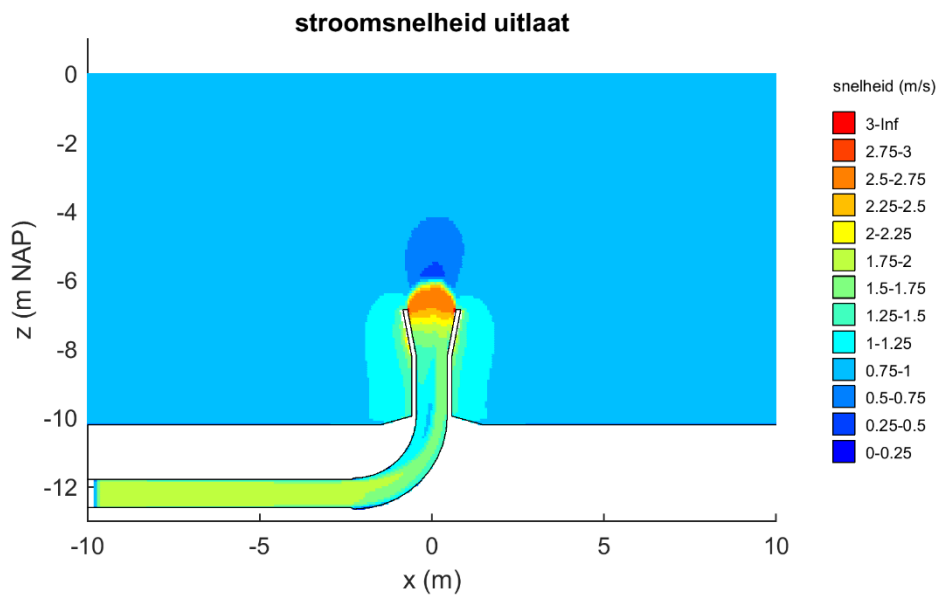
Figuur 33 Verdeling van de berekende minimale, gemiddelde en maximale temperatuur in het model over de verticaal.

De resultaten vertonen eenzelfde beeld als in de winter met lokaal hoge temperaturen recht boven de uitlaat en de verspreiding langs het wateroppervlak. De maximale temperatuur aan het oppervlak is met 26,38 °C bijna twee keer zo hoog als in de winter (12,37 °C), maar de stijging ten opzichte van de omgeving (4,38 °C) is ongeveer een derde van die in de winter (11,37 °C). Ook in dit geval loopt de gemiddelde temperatuur aan het oppervlak nog langzaam op

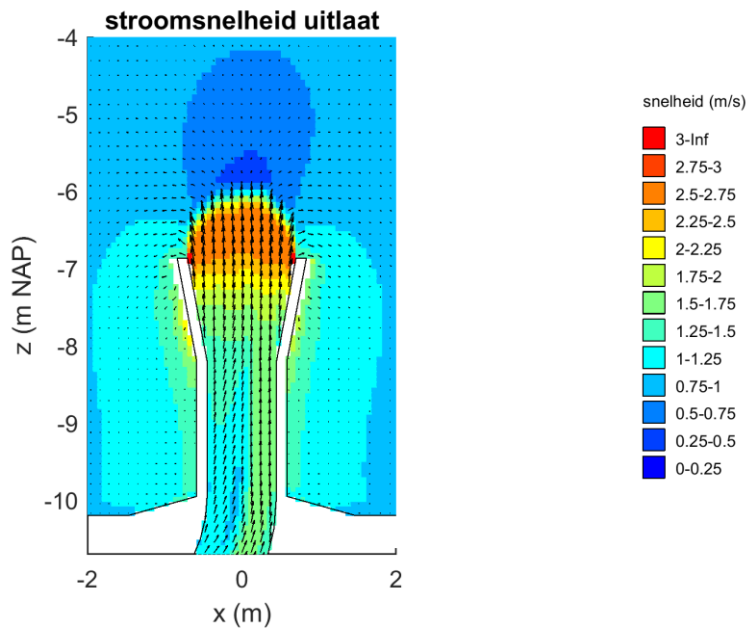
in de tijd doordat er steeds meer koelwater in het model wordt gepompt en de pluim aan het oppervlak zich nog steeds verder uitbreidt.

3.3.3 Vloed – winter

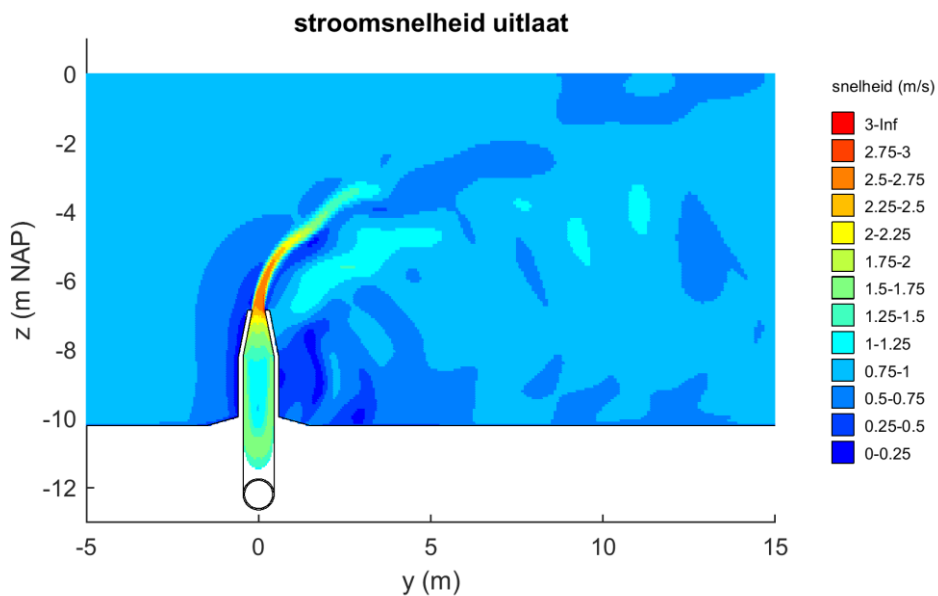
Het stroombeeld bij vloed verschilt wel duidelijk van dat bij kentering. Door de vloedstroom wordt de straal in de vloedrichting afgebogen, zoals in figuren 34 tot en met 37 te zien is voor het stroombeeld na 40 sec.



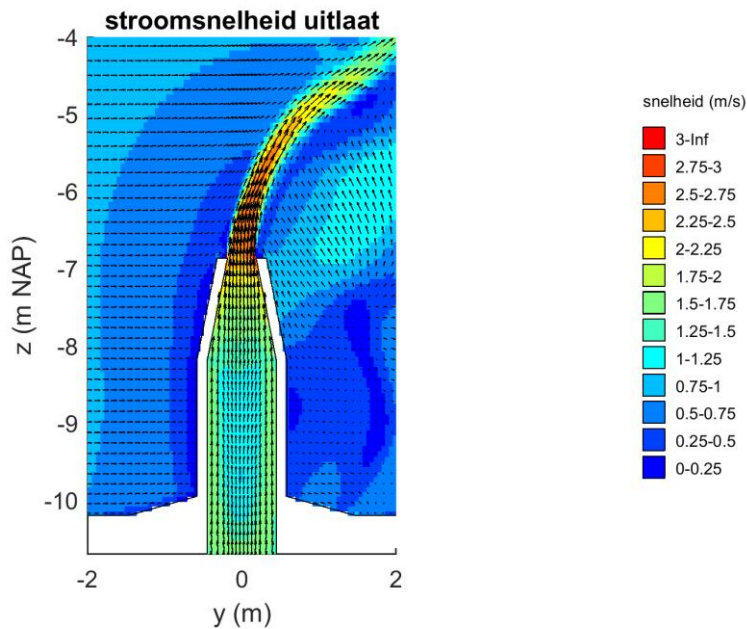
Figuur 34 Stroomsnelheid in een doorsnede parallel aan de uitlaat.



Figuur 35 Stroomsnelheid, detail uitlaat (vectorveld in beide richtingen met factor 2 uitgedund).

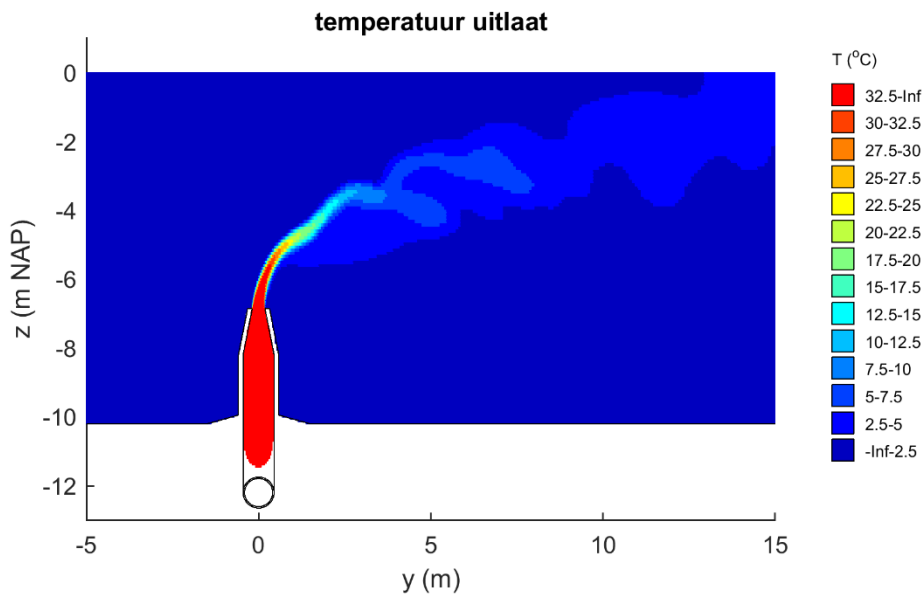


Figuur 36 Stroomsnelheid in een doorsnede dwars op de uitlaat.



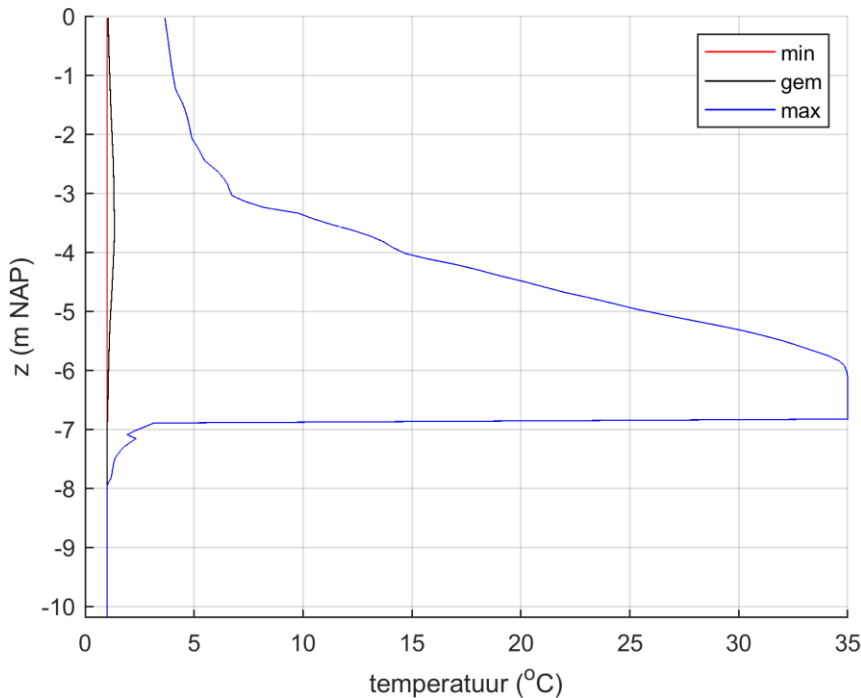
Figuur 37 Stroomsnelheid, detail uitlaat (vectorveld in beide richtingen met factor 2 uitgedund).

Doordat de straal wordt afgebogen vindt er ook veel meer menging plaats, zoals ook in de temperatuurverdeling te zien is in figuur 38.



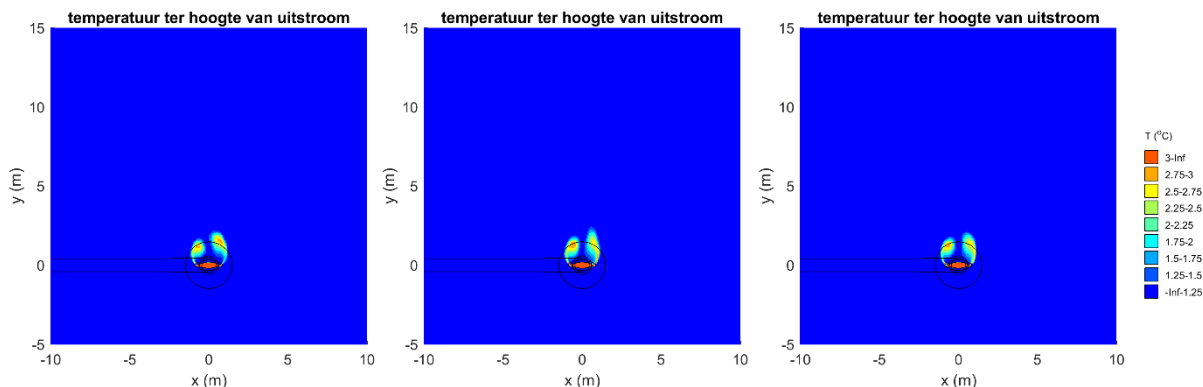
Figuur 38 Temperatuur in een doorsnede dwars op de uitlaat.

Figuur 39 toont de temperatuurprofielen over de verticaal. Het koelwater komt veel minder ver in de verticaal. Op circa 2,5 m boven de uitstroomopening is de maximale temperatuur tot onder de 20 °C gezakt, terwijl dat bij kentering op ruim 30 °C ligt. Nabij het oppervlak is er een beperkte temperatuurstijging waarneembaar tot 3,66 °C. Gemiddeld over het domein is de temperatuurstijging beperkt tot 0,34 °C halverwege de waterkolom. Doordat het warme water niet onder het wateroppervlak ophoopt, blijft daar de opwarming gemiddeld over het modeldomein minimaal. Wel moet opgemerkt worden dat de omvang van het domein nu 25% groter is door de uitbreiding met 5 m benedenstrooms, waardoor de gemiddelden automatisch lager uitvallen, maar de grotere menging is veel dominanter.



Figuur 39 Verdeling van de berekende minimale, gemiddelde en maximale temperatuur in het model over de verticaal.

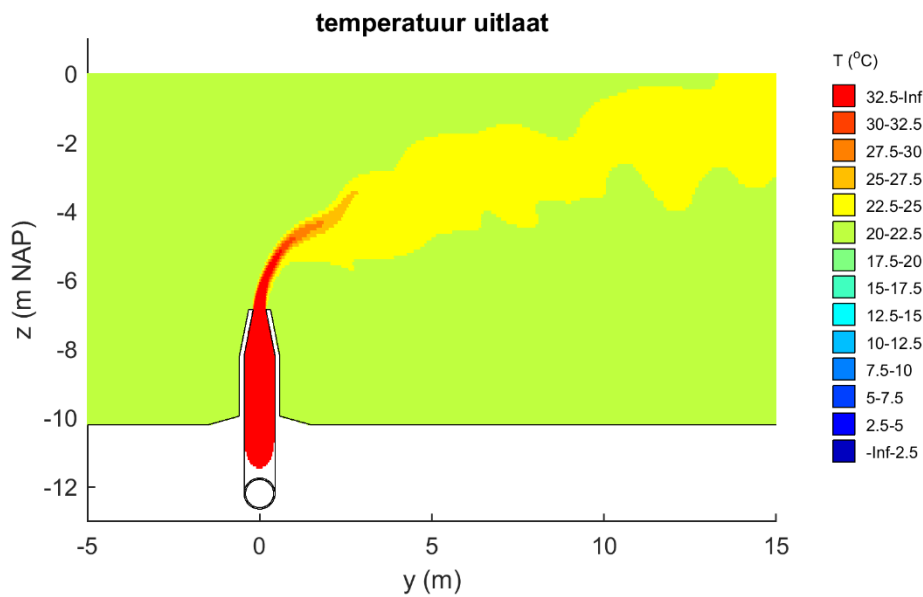
In tegentelling tot de resultaten bij kentering valt in het temperatuurverdeling in de doorsnede en ook in het profiel van de maximale temperatuur op dat er hier wel een toename van de temperatuur zichtbaar is onder het niveau van de uitstroomopening, maar die bereikt de bodem niet, ook niet op andere tijdstippen. De temperatuurverdeling in een horizontale doorsnede ter hoogte van de uitstroomopening op verschillende tijdstippen is te zien in figuur 40. Dit laat zien dat de koelwaterpluim niet stationair is, maar enigszins fluctueert in de tijd.



Figuur 40 Temperatuur in een doorsnede ter hoogte van de uitstroomopening, na 30 sec (links), 35 sec (midden) en 40 sec (rechts).

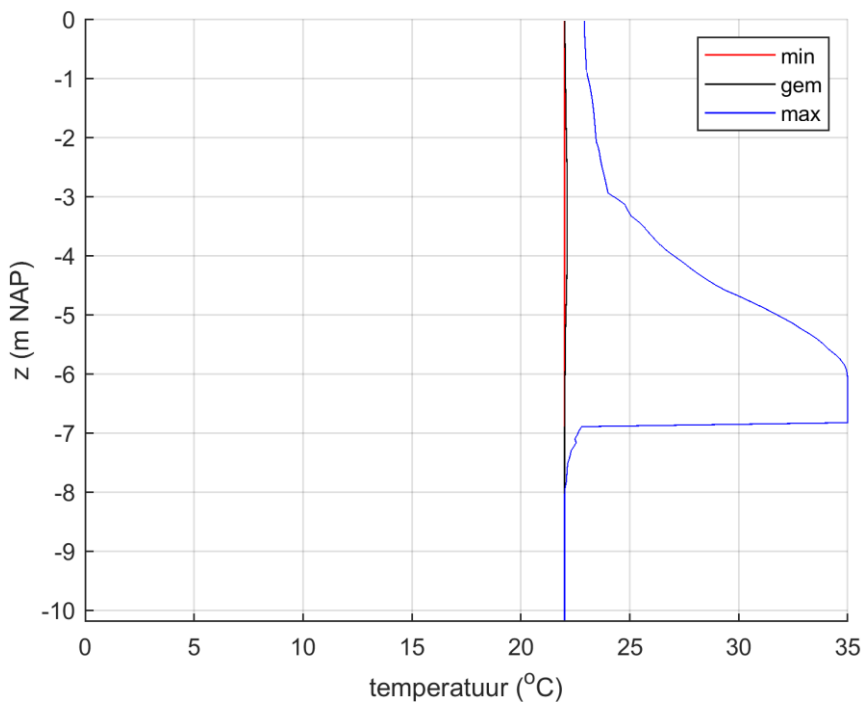
3.3.4 Vloed – zomer

Net als bij de vergelijking tussen winter en zomer bij kentering is ook nu in het stromingspatroon het effect van een kleiner temperatuurverschil ten opzichte van de winter vloed conditie niet duidelijk zichtbaar. De temperatuurverdeling in de dwarsdoorsnede parallel aan de vloedstroom is weergegeven in figuur 41.



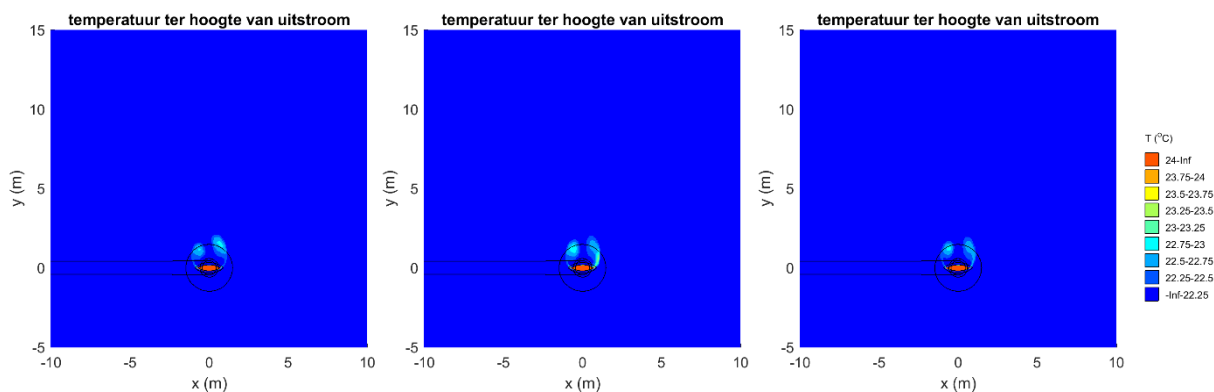
Figuur 41 Temperatuur in een doorsnede dwars op de uitlaat.

De verticale profielen zijn in figuur 42 weergegeven.



Figuur 42 Verdeling van de berekende minimale, gemiddelde en maximale temperatuur in het model over de verticaal.

Net als in de winter is de menging goed, met een kleine temperatuurstijging lokaal aan het oppervlak van minder dan 1 °C. Ook onder het niveau van de uitstroomopening is er weer een kleine toename zichtbaar, maar die bereikt de bodem ook nu niet. Zie ook de horizontale doorsneden in figuur 43. Over het gehele domein gemiddeld bedraagt de temperatuurstijging 0,04 °C, ongeveer de helft minder dan in de winter.



Figuur 43 Temperatuur in een doorsnede ter hoogte van de uitstroomopening, na 30 sec (links), 35 sec (midden) en 40 sec (rechts).

3.3.5 Gevoeligheid debiet 1.162 m³/uur

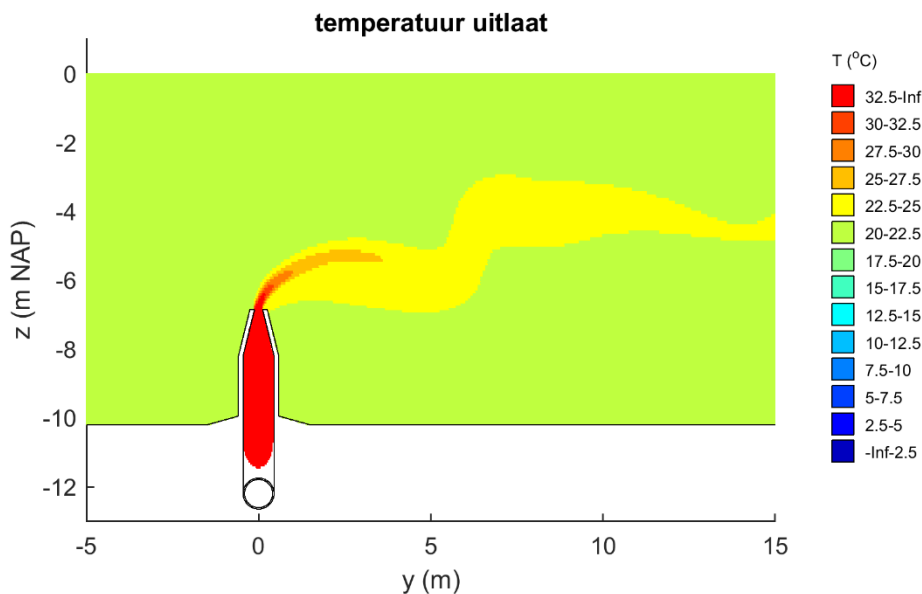
Zoals in paragraaf 2.1 benoemd, is het lozingsdebiet in de winter lager dan in de zomer.

In figuur 14 is de uitstroomsnelheid gegeven als functie van de stroomsnelheid in de aanvoerlijn. Een afvoerdebiet van 3.300 m³/uur correspondeert met een instroomsnelheid door de aanvoerleiding van 1,44 m/s en een uitstroomsnelheid van 2,61 m/s. Bij 1.162 m³/uur zijn deze waarden respectievelijk 0,51 m/s en 1,40 m/s.

Voor een gevoeligheidsberekening is gekeken naar het lagere lozingsdebiet in combinatie met een zomersituatie. De overweging om niet te kijken naar de wintersituatie is tweeledig:

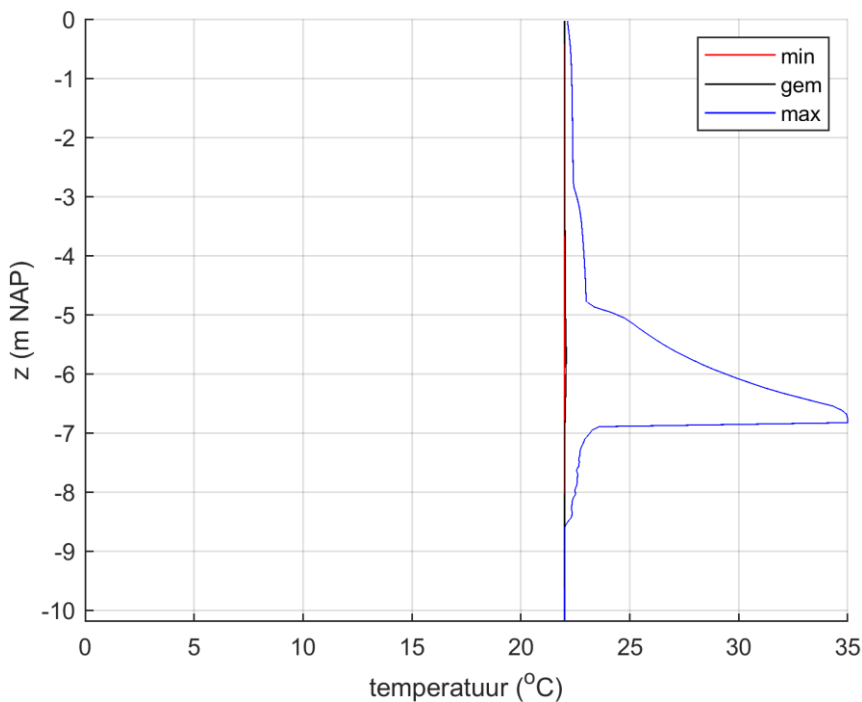
- In de zomer is de omgevingstemperatuur hoger, zodat er minder nodig is om een temperatuurstijging tot 25 °C te verkrijgen.
- Door het kleinere temperatuurverschil tussen koelwater en omgeving is de oprijvende kracht kleiner en dus potentieel een grotere kans dat de koelwaterpluim dichter bij de bodem komt.

In figuur 44 is de temperatuur in de doorsnede dwars op de uitlaat weergegeven. Het effect van de lagere uitstroomsnelheid is duidelijk zichtbaar doordat de straal minder ver richting oppervlak komt in vergelijking met het hogere lozingsdebiet (figuur 41).



Figuur 44 Temperatuur in een doorsnede dwars op de uitlaat.

De verticale profielen zijn in figuur 45 weergegeven.



Figuur 45 Verdeling van de berekende minimale, gemiddelde en maximale temperatuur in het model over de verticaal.

Vergeleken met figuur 42 is de beperktere omvang van de pluim ook in deze figuur duidelijk terug te zien. Wel dringt het koelwater in vergelijking met het hogere koelwaterdebiet verder door richting bodem, maar de 25 °C contour komt niet lager dan de uitstroomopening uit en raakt de bodem zeker niet.

Op basis van deze resultaten is eenvoudig te concluderen dat in de winter er ook geen risico is dat de koelwaterpluim de bodem niet raakt.

3.3.6 Overzichtstabel

De verdeling van de berekende minimale, gemiddelde en maximale temperatuur over de verticaal zoals die voor de verschillende condities hiervoor grafisch zijn weergegeven, is in tabelvorm in tabel 1 samengevat. Hierin zijn zowel de absolute temperatuur als de stijging ten opzichte van de achtergrondtemperatuur in de tabel opgenomen. Tevens zijn de verschillende profielen ook over de verticaal gemiddeld.

Tabel 1 Overzicht van de verdeling van de temperatuur in de verticaal en relatief ten opzichte van de achtergrondtemperatuur voor de verschillende scenario's.

seizoen	niveau		kentering			vloed			
			minimum	gemiddeld	maximaal	minimum	gemiddeld	maximaal	
winter	oppervlak	absoluut	1.00	3.19	12.37	1.00	1.06	3.66	
		relatief		2.19	11.37		0.06	2.66	
	niveau uitlaat	absoluut	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.15	
		relatief		0.00	0.00		0.00	2.15	
	bodem	absoluut	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
		relatief		0.00	0.00		0.00	0.00	
	gemiddeld verticaal	absoluut	1.00	1.25	15.21	1.00	1.11	10.35	
		relatief		0.25	14.21		0.11	9.35	
	zomer	oppervlak	absoluut	22.00	22.85	26.38	22.00	22.02	22.91
			relatief		0.85	4.38		0.02	0.91
niveau uitlaat		absoluut	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.78	
		relatief		0.00	0.00		0.00	0.78	
bodem		absoluut	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	
		relatief		0.00	0.00		0.00	0.00	
gemiddeld verticaal		absoluut	22.00	22.09	27.45	22.00	22.04	25.54	
		relatief		0.09	5.45		0.04	3.54	

De zeer geringe temperatuurverhoging in het totale model geeft ook aan dat het niet relevant is om het effect van de huidige HFR-lozing (in de overgangsfase) op de omgevingstemperatuur mee te nemen.

3.4 Stap 4: Kuststrook met lokale verfijning voor overgangsfase en productiefase

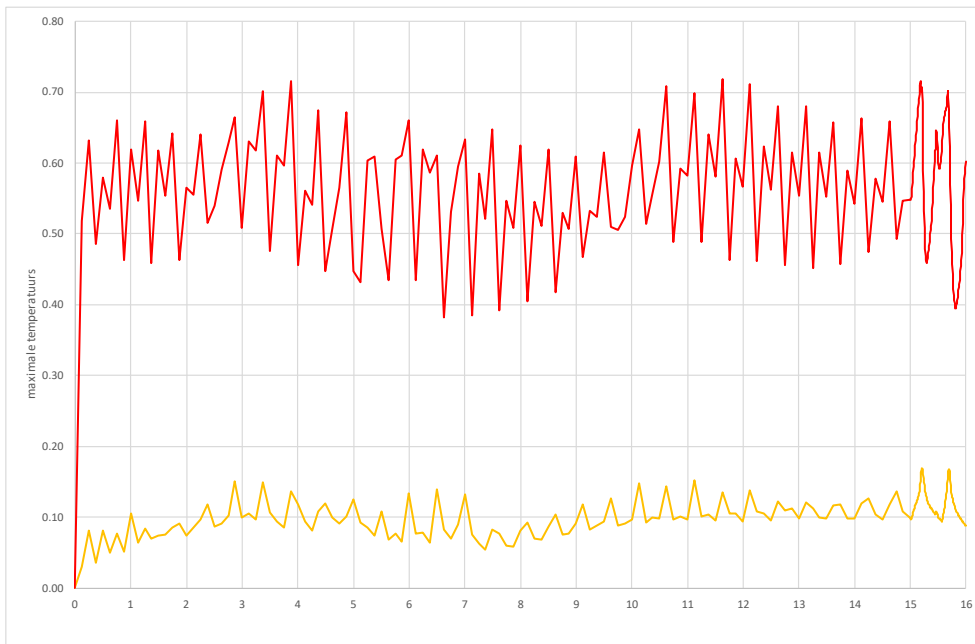
In de Delft3D-berekeningen starten de koelwaterlozing(en) na 5 dagen inspelen van de waterbeweging. De koelwaterlozingen zijn aan de bodem opgelegd. Na afloop van de 15 dagen is er nog een dag doorgerekend, waarbij de uitvoer frequenter in de tijd is weggeschreven om in meer detail naar de resultaten te kunnen kijken. Voor PALLAS is zowel voor het winter- als zomer-scenario uitgegaan van de maximale lozing van 3300 m³/uur. Voor een wintersituatie waarbij de lozingsdebieten lager zijn, is dit een conservatieve aanpak.

De resultaten worden in dit memo gepresenteerd als de temperatuurstijging ten opzichte van de referentieberekening zonder lozingen, om op die manier het effect van de lozing(en) zichtbaar te maken.

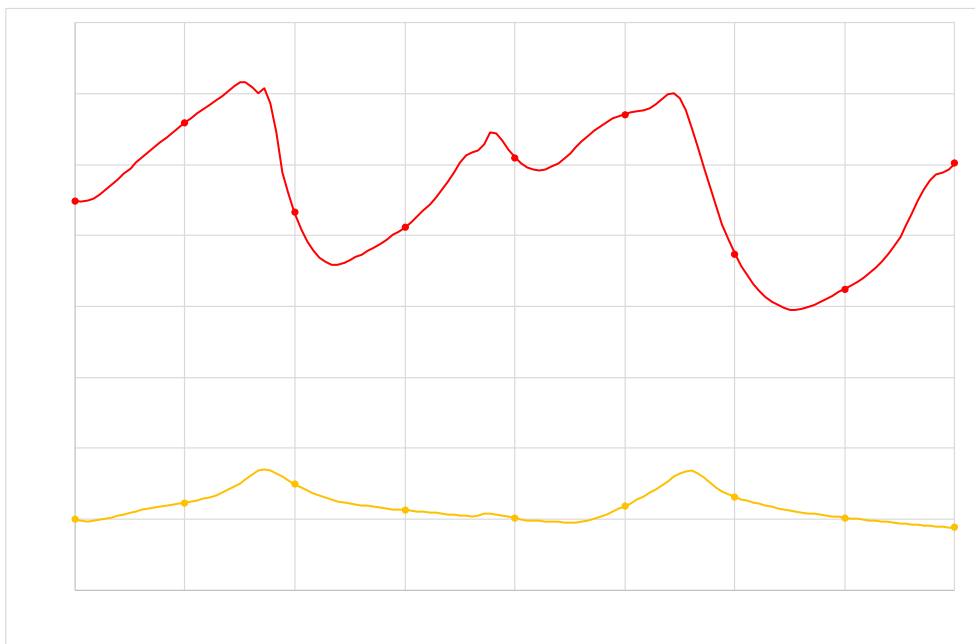
In de volgende vier sub-paragrafen worden de resultaten per scenario besproken.

3.4.1 Overgangsfase – winter

De maximale opwarming ten opzichte van de achtergrondtemperatuur in het gehele model in de tijd is weergegeven in figuur 46 en 47. De eerste figuur toont dit voor de gehele periode van 16 dagen, waarbij de eerste 15 dagen resultaten elke 3 uur zijn weggeschreven en de laatste dag elke 10 minuten. De resultaten voor de laatste dag wordt in meer detail in figuur 47 getoond.



Figuur 46 Maximale opwarming aan het oppervlak (oranje) en nabij de bodem (rood).

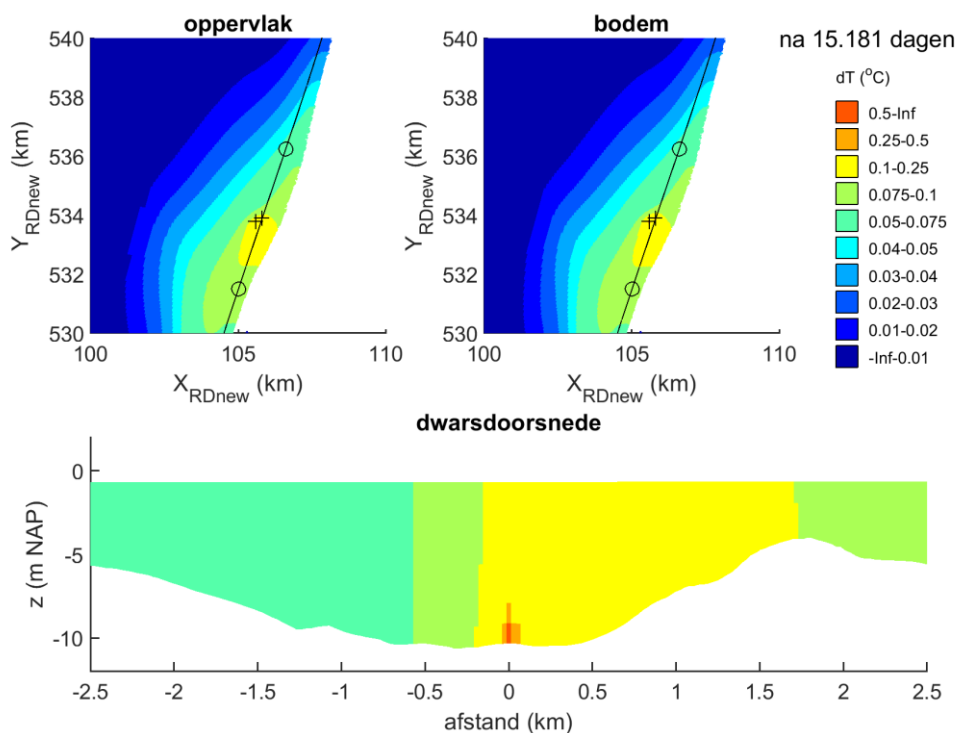


Figuur 47 Maximale opwarming aan het oppervlak (oranje) en nabij de bodem (rood), detail van dag 15.

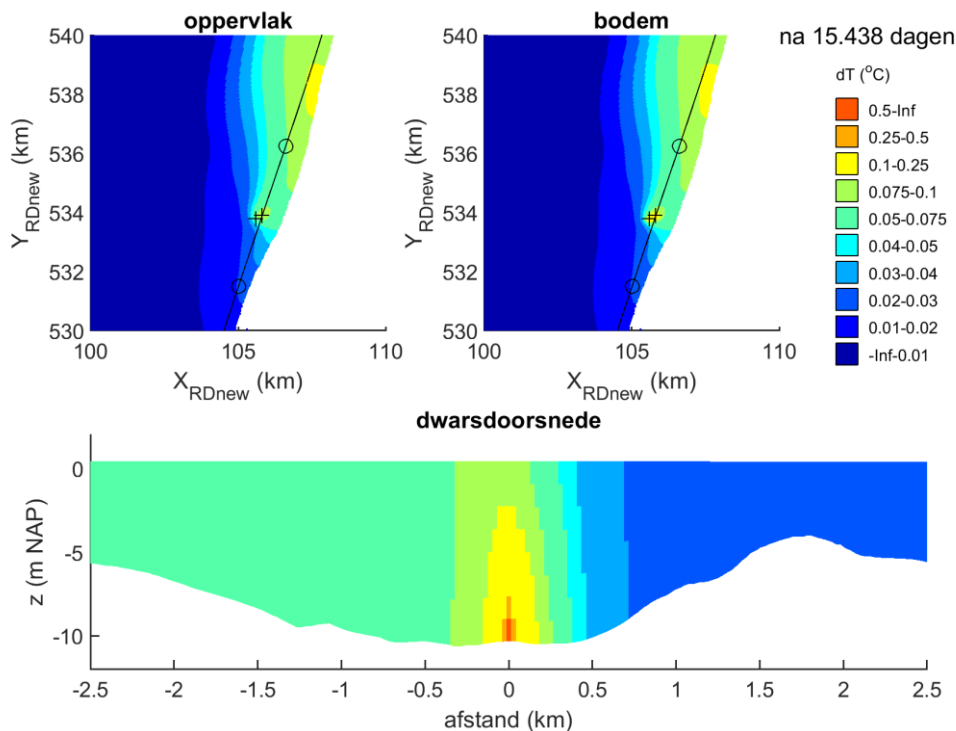
Op basis van deze figuren wordt duidelijk dat er zich al vrij snel een dynamisch evenwicht instelt, die schommelt door zowel het getij als de doortij-sprongtij cycli, maar al wel snel naar een evenwicht gaat en de simulatieduur van 16 dagen dus voldoende is. De figuur van de laatste dag toont aan dat een deel van de variaties over de tijd gemist wordt door het uitvoer-interval van 3 uur (zie bolletjes), maar dat de verschillen minder dan 0,1 °C bedragen. De hogere temperatuurstijging nabij de bodem is het gevolg van het feit dat de lozing in het model nabij de bodem plaatsvindt. Het grote verschil ten opzichte van de FLOW-3D is dat in Delft3D de lozing plaatsvindt in een rekencel van 27,5 m bij 27,5 m (zie paragraaf 2.4) waardoor het koelwater al direct goed gemengd wordt. Een dergelijke geringe stijging is

consistent met de resultaten van de CFD-studie waarbij de temperatuur gemiddeld is over de horizontaal (van 20 m bij 20 m) en verticaal van het FLOW-3D rekendomein.

Om de ruimtelijke verspreiding van de koelwaterlozing te laten zien, zijn in figuur 48 en 49 de temperatuurverhoging ten opzichte van de situatie zonder koelwaterlozingen gepresenteerd voor de kentering rond laag water en de kentering rond hoog water respectievelijk (zie ook figuur 12). Elk figuur toont het effect aan het oppervlak en nabij de bodem en in een langsdoorsnede die door het PALLAS lozingspunt is getrokken. De lijn waarlangs deze doorsnede is getrokken, is in de twee andere figuren aangegeven. De twee cirkels markeren de afstand in de onderste figuur; het noordelijke bolletje valt links in de onderste figuur.



Figuur 48 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens laag water kentering.



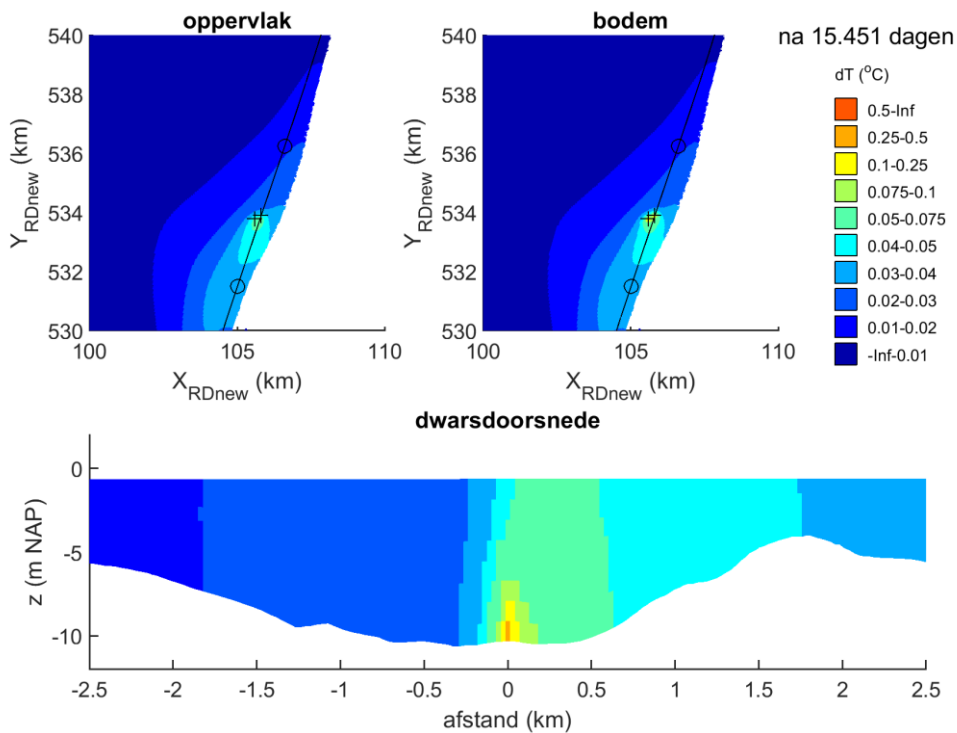
Figuur 49 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens hoog water kentering.

Deze figuren laten duidelijk zien hoe het water rond het lozingspunt wordt opgewarmd door het koelwater tijdens kentering. Lokaal aan de bodem bij het lozingspunt treden de grootste temperatuurstijgingen op, maar verder zijn de verschillen vrijwel uniform in de verticaal.

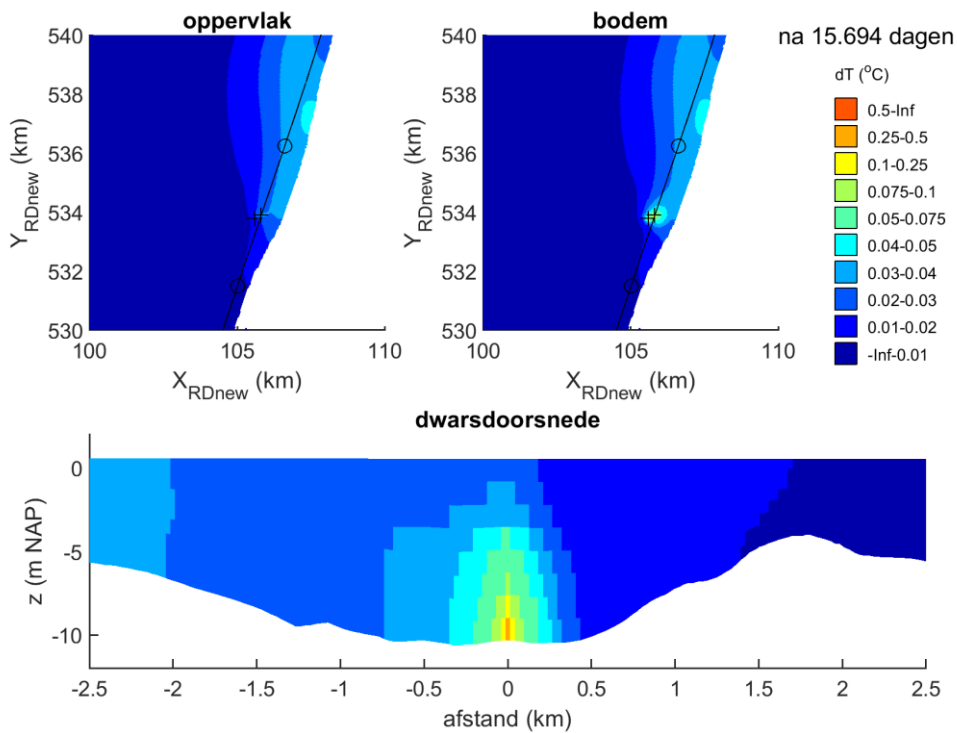
Het opgewarmde water wordt tijdens de vloed langs de Nederlandse kust in noordwaartse richting verplaatst en intussen blijft het lozingspunt warm water toevoegen aan het systeem. Tegelijkertijd mengt het water verder en koelt het water af door de uitwisseling met de atmosfeer. Na de vloed stroomt het water in zuidelijke richting terug langs de kust, waarbij het ook blijft opwarmen door de koelwaterlozing en afkoelen door menging en uitwisseling met de atmosfeer. Op die manier ontstaat er een dynamisch evenwicht, waarbij gedurende de 15 dagen durende berekening de temperatuur aan het oppervlak in het gehele model niet verder opwarmt dan 0,20 °C. Bij doortij zijn de verschillen het grootst. De getijstroomsnelheden zijn dan lager waardoor het koelwater een kleiner volume aan zeewater opwarmt.

3.4.2 Overgangsfase – zomer

Vergelijkbare figuren voor de temperatuurverhoging in de zomer zijn gepresenteerd in figuren 50 en 51.



Figuur 50 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens laag water kentering.

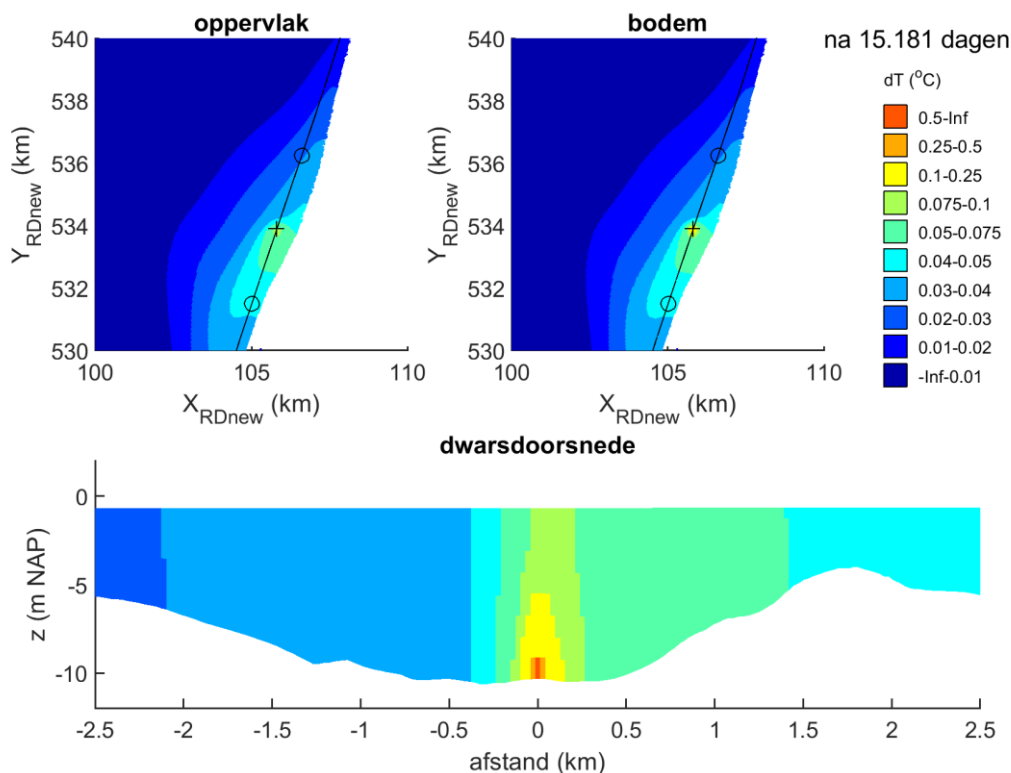


Figuur 51 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens hoog water kentering.

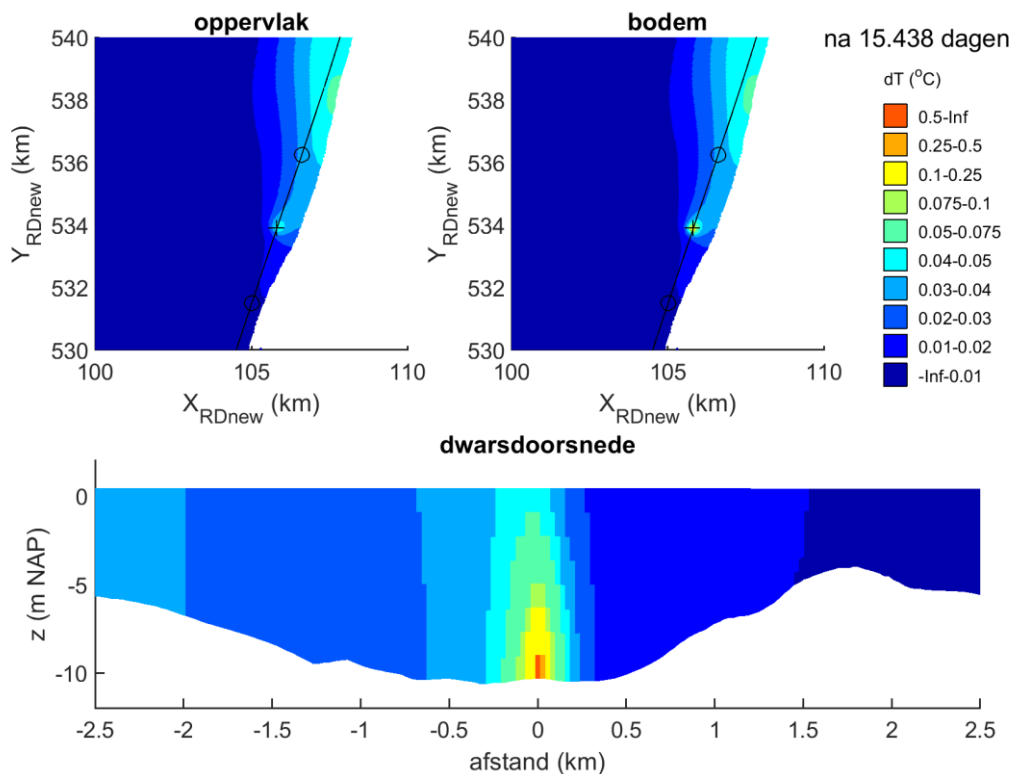
In overeenstemming met de resultaten van de FLOW-3D-studie liggen de temperatuurstijgingen ongeveer een factor 2 lager vergeleken met in de winter en daardoor is ook de omvang van het gebied met temperatuurstijgingen sterk gereduceerd. De maximale opwarming in het gebied blijft ruim onder de 0,10 °C aan het oppervlak.

3.4.3 Productiefase – winter

In de productiefase is de huidige koelwaterlozing buiten gebruik en alleen die van PALLAS in gebruik. De totale hoeveelheid koelwater wat geloosd wordt, wordt daarmee met ongeveer 45% gereduceerd (in de beschouwde situatie waarbij 3300 m³/uur wordt geloosd). De resultaten rond de twee momenten van kentering zijn weergegeven in figuren 52 en 53.



Figuur 52 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens laag water kentering.

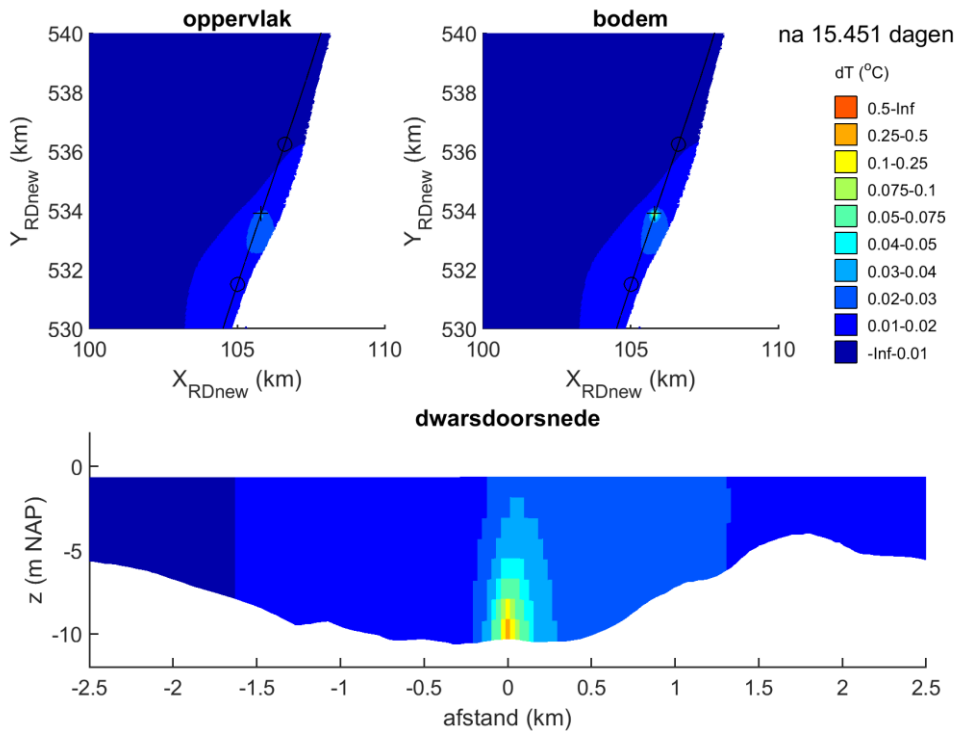


Figuur 53 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens hoog water kentering.

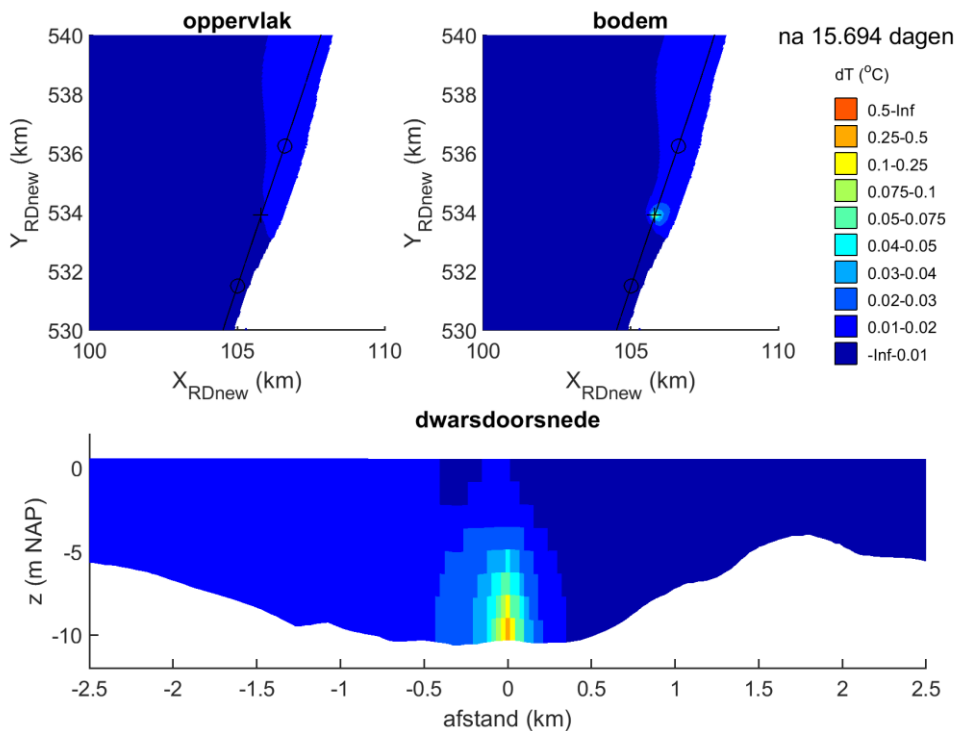
Door de reductie van de totale hoeveelheid geloosd koelwater nemen ook de temperatuurverschillen en de omvang van het gebied waar een zekere temperatuurstijging optreedt, sterk af. De maximale berekende temperatuurtoename aan het oppervlak ligt met 0,10 °C nog steeds erg laag. In het geval van een (realistische) koelwaterlozing van 1.162 m³/uur zal dat alleen maar minder zijn.

3.4.4 Productiefase – zomer

Ten slotte zijn de vergelijkbare figuren voor de temperatuurverhoging in de zomer gepresenteerd in figuren 54 en 55.



Figuur 54 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens laag water kentering.



Figuur 55 Temperatuurverhoging aan het oppervlak (linksboven) en nabij de bodem (rechtsboven) en in de verticale doorsnede door het lozingspunt (onder) tijdens hoog water kentering.

Zoals verwacht zijn de effecten nu nog verder gereduceerd ten opzichte van de eerdere berekeningen (winter en/of overgangsfase). De maximale stijging in het modeldomein aan het oppervlak is met 0,05 °C zeer gering.

4 Conclusies en aanbevelingen

In dit memo is een beschrijving gegeven van de koelwaterstudie die ten behoeve van de nieuwe PALLAS-reactor is uitgevoerd. Door middel van een 4-stappen-modelstudie is aangetoond dat de geplande reactor aan de normen voor koelwater [NBW-beoordelingssystematiek voor koelwaterlozingen] voldoet. De conclusies en aanbevelingen zijn per stap nader toegelicht.

Stap 1: Validatie Delft3D Kuststrook model

- Het Kuststrook model is goed in staat om de watertemperatuur voor de Nederlandse kust te modelleren
- Modelresultaten zouden waarschijnlijk verbeteren indien de temperatuur op de open rand bekend zou zijn. (In een eerdere studie is wel eens gekeken naar de mogelijkheid om de watertemperatuur af te leiden op basis van satellietgegevens, maar die bleken erg onbetrouwbaar.)
- Mogelijk zou door de metingen van K13a Platform en Europlatform op een slimme manier te combineren nog een verbeteringslag kunnen worden bereikt, maar omdat dit voor deze studie niet relevant is en relatief veel tijd vergt, is daar in deze studie niet verder naar gekeken.

Stap 2: Kuststrook met lokale verfijning voor omgevingscondities en referentiesituatie

- Het getij wordt gekarakteriseerd door een korte vloedperiode met relatief hoge stroomsnelheden in noordnoordoostelijke richting en een langere ebperiode met lagere stroomsnelheden in zuidzuidwestelijke richting.
- Ten behoeve van de CFD-studie is besloten dat de maximale vloedstroom (0,85 m/s) en de kentering (0 m/s) een goed beeld geven van de variatie in stroomsnelheden.
- De saliniteit nabij de koelwateruitstroom ligt rond 32,5 PSU (of 32,5 kg/m³).

Stap 3: Lokale menging (FLOW-3D)

- Bij kentering stroomt het koelwater recht uit de uitlaat omhoog en verspreidt zich horizontaal langs het wateroppervlak zijwaarts.
- Bij vloed buigt de straal met de vloedstroom mee opzij, waarbij het koelwater zich goed mengt met het omgevingswater.
- Bij kentering bedraagt de temperatuurstijging aan het oppervlak maximaal 11,37 °C (winter), terwijl dat in de zomer maximaal 4,38 °C is, waarmee in het laatste geval de temperatuur aan het oppervlak maximaal 26,38 °C bedraagt.
- Bij vloed liggen de oppervlaktetemperaturen in de winter en de zomer op respectievelijk 3,66 °C (+2,66 °C ten opzichte van de achtergrondtemperatuur) en 22,91 °C (+0,91 °C).
- Ter hoogte van de uitlaat is alleen bij vloed een temperatuurverhoging benedenstrooms van de uitlaat zichtbaar. In de winter is de maximale stijging 2,15 °C, terwijl dat in de zomer 0,78 °C is. Dit is zeer lokaal en rijkt niet verder dan 5 m van de uitlaatorening. De gemiddelde stijging over een groter gebied (modeldomein) is echter verwaarloosbaar.
- In geen enkel scenario is er een stijging van de temperatuur aan de bodem zichtbaar.
- De gemiddelde temperatuurstijging in het gehele modeldomein is in alle gevallen minder dan 0,25 °C, tussen de 0,25 °C (kentering, winter) en 0,04 °C (vloed, zomer).

Stap 4: Grootschalige verspreiding (Delft3D studie)

- De lokale menging rondom het lozingspunt wordt in het Delft3D model overschat.
- Doordat het totale lozingsdebiet en -temperatuur wel correct zijn, is het model wel goed in staat om te beschrijven hoe de koelwaterlozing zich verspreidt langs de kust.
- De maximale temperatuurstijging ten opzichte van een situatie zonder koelwaterlozingen is marginaal. In de winter is die met het hoge lozingsdebiet het grootst. Maar met orde 0,17 °C in de overgangsfase en 0,10 °C in de productiefase blijft deze ver onder de norm. Met het lagere winterlozingsdebiet zal dit nog verder afnemen. In de zomer is de maximale temperatuurstijging met respectievelijk 0,06 °C en 0,05 °C nog kleiner.

Resultaten in relatie tot de criteria voor koelwaterlozingen:

- Het koelwater van de voorziene PALLAS-reactor voldoet aan de koelwatertemperatuurnormen.

- De mengzone (zeewatertemperatuur hoger dan 25 °C) raakt in geen enkel scenario de bodem (FLOW-3D).
- De watertemperatuuroename blijft onder de norm van 2 °C, daarnaast blijft de temperatuur onder het absoluut maximum van 25 °C. Weliswaar neemt zeer lokaal nabij de uitlaat de watertemperatuur significant toe, maar dit is beperkt tot een relatief klein gebied en bij lage stroomsnelheden rond kentering (FLOW-3D). Over een groter gebied en langere tijdschalen is de temperatuurstijging minder dan 0,1 °C (Delft3D), ruim minder dan de 2 °C volgens de norm.