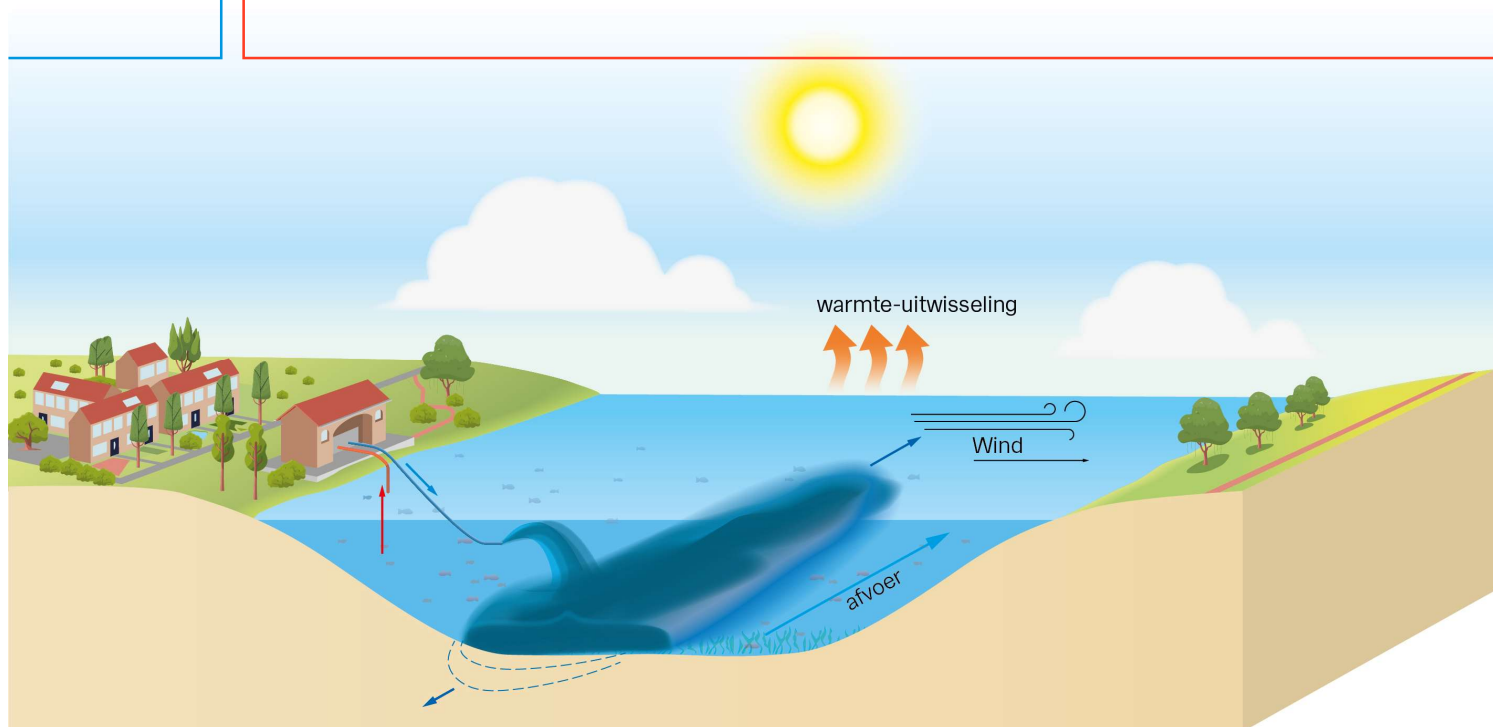




Modelleren van verspreiding van koude in oppervlaktewater door TEO installaties (een aanbeveling van WarmingUp)

Ida de Groot-Wallast
Roland Vlijm

11 juli 2022

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	3
2	Introductie	6
2.1	Opzet document	6
3	Fysische processen bij een koudelozing	7
3.1	Het near-field van een lozing	8
3.2	Het far-field van een lozing	10
4	Aanbeveling modelleren van koudelozingen	12
4.1	Near-field modelleren	14
4.2	Far-field modelleren	16
4.3	Alternatieven voor far-field modelleren van koudelozingen	18
5	Conclusie, reflectie en aanbevelingen	21
6	Referenties	24

1 Samenvatting

Thermische energie uit oppervlakte water (TEO) is een veelbelovende duurzame energiebron die nu vooral op kleine schaal wordt toegepast en waar kansen voor opschaling zijn. Om TEO ook op grote schaal duurzaam te gebruiken, moet zicht zijn op de impact van deze vorm van aquathermie¹ op de omgeving. Deze impact heeft invloed op de potentie van aquathermie: Indien ecologische impact niet aanvaardbaar blijkt dan reduceert de potentie, indien de impact minimaal of gunstig is dan kan dat de potentie vergroten. Een eerste indicator voor de impact op de omgeving is de (verandering van) watertemperatuur.

De thermische impact van een TEO installatie op een watersysteem door de lozing van koude is een complex driedimensionaal proces. Hierbij zijn, onder andere, het ontwerp van het TEO systeem (locatie in- en uitlaat punt), hydrodynamische en meteorologische condities van invloed op de verspreiding en opwarming (ook wel regeneratie) van het watersysteem na lozing van de koude. De gelaagdheid die in het watersysteem aanwezig is of in het watersysteem ontstaat als gevolg van de koudelozing speelt een belangrijke rol in de verspreiding van de koude. Voor een betrouwbare analyse van de verspreiding van de koudelozing dient rekening gehouden te worden met al deze processen.

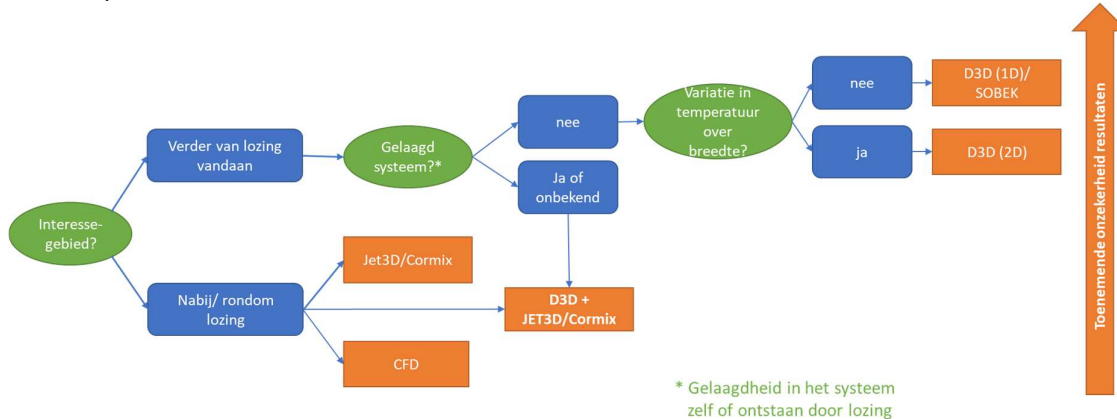
Dit complexe proces vraagt om een juiste (temperatuur)modellering van deze verspreiding van de koudelozing. De kennis die hierover is opgedaan in WarmingUP heeft geleid tot de volgende bevindingen en aanbevelingen voor temperatuurmodellering:

- Voor een goede modellering van de verspreiding van koude door een koudelozing wordt geadviseerd om een combinatie van een near-field en een far-field model te gebruiken:
 - Met een near-field model maak je een eerste inschatting voor de menging en verspreiding van de pluim van het lozingspunt tot op enkele meters tot tientallen meters van de lozing
 - De resultaten van je near-field/ pluimanalyse zijn input voor het far-field model. Op die manier wordt de initiële menging van de pluim goed meegenomen in de simulatie van de verspreiding op grotere afstand van de lozing (tientallen tot honderden meters).
 - De koppeling tussen near- en far-field kan op verschillende manieren vorm krijgen, van eenvoudig tot complex, waarbij ook terugkoppeling tussen de schalen plaatsvindt.
- In het geval dat er geen near-field model beschikbaar is wordt geadviseerd om een gevoeligheidsanalyse te doen met verschillende scenario's voor de ontwikkeling van de pluim (i.e. verschillende pluim trajecten en menging).
- Met alleen een near-field model kan je geen grootschalige verspreiding berekenen, maar dit kan wel geschikt zijn voor ontwerptimalisatie van de in- en, met name, de uitlaat. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met de invloed die de pluim heeft op de (stromings)condities in het near-field.
- Een (hydrostatisch) far-field model is niet geschikt om de initiële menging rond de lozing accuraat op te lossen. Met een far-field model wordt de initiële menging in het algemeen overschat, waardoor effecten van gelaagdheid worden onderschat en opwarming/regeneratie in het far-field wordt overschat. Dit leidt tot een verkeerd beeld van de impact van een TEO op een watersysteem.

¹ Andere vormen van aquathermie zoals TED (drinkwater) en TEA (afvalwater) hebben minder interactie met de omgeving.

- Indien geen informatie beschikbaar is over natuurlijke gelaagdheid (in stroming, temperatuur en/of saliniteit) of als door de lozing gelaagdheid kan ontstaan dan verdient het aanbeveling 3D te rekenen.
- Als het interessegebied buiten mengzone van de koudelozing ligt, als verkenning van de verspreiding van koude, of indien geen gelaagdheid wordt verwacht, kan gekozen worden voor 2D of 1D modellering voor het far-field. Met een far-field model wordt de initiële menging in het algemeen overschat, waardoor effecten van gelaagdheid en opwarming worden overschat en er een verkeerd beeld ontstaat van de impact van een TEO op een watersysteem.
- Voor zowel de near-field als de far-field modellen gelden de basisregels van het modelleren zoals vastgelegd in Uittenbogaard, 2008 [1]. Keuzen voor het rekendomein, horizontale en verticale resolutie, randvoorwaarden, tijdstap, inspeeltijd etc. zijn bepalend voor de betrouwbaarheid van modelresultaten.

In *Figuur 1* is middels een stroomschema samengevat op welke manier de keuze voor het juiste modelinstrumentarium kan worden gemaakt. In de figuur is voor het far-field model Delft3D voorgesteld en voor near-field Jet3D of Cormix. Uiteraard kan hiervoor ook gebruik worden gemaakt van andere softwarepakketten.



Figuur 1 Beslismodel ten behoeve van modelkeuze koudelozing

De gelaagdheid in een watersysteem is sterk bepalend voor de mate van verspreiding van een koudepluim. Het beslismodel maakt zichtbaar dat de variatie in temperatuur over de diepte (gelaagdheid) en breedte en dus de menging van de pluim ook een bepalend criterium is voor de keuze van het juiste modelinstrumentarium. Het is dus van belang vooraf een inschatting te maken van deze gelaagdheid c.q. menging.

Gelaagdheid speelt, in generieke zin:

- Geen rol in volledig gemengde systemen, zoals
 - (snel) stromende wateren, rivieren
 - Wateren onder invloed van getij
- Een rol in niet gemengde systemen, zoals
 - Rivieren, kanalen met lage afvoeren,
 - Gestuwde rivier- of kanaalpanden
- Een mogelijke rol in plassen, afhankelijk van
 - Grootte en vorm van de plas
 - Diepte van de plas
 - De invloed die wind op de plas heeft
(afhankelijk van lokale beschutting en oriëntatie van de plas)
 - Zoninstraling (afhankelijk van troebelheid)

Voor plassen geldt in algemene zin dat hoe groter de plas is, hoe dieper deze moet zijn voordat stratificatie optreedt. In ondiepe kleine plassen is stratificatie beperkt. Een ondiepe plas stratificeert alleen als de plas klein en/ of erg beschut is.

Bij twijfel is het advies om 3-dimensionaal te modelleren om meer zekerheid te krijgen over het ontstaan of de aanwezigheid van gelaagdheid. Daarbij moet bedacht worden dat er processen zijn die de gelaagdheid beïnvloeden, maar in de modellering niet worden meegenomen. Een belangrijke voorbeeld hiervan is de menging die door scheepvaart wordt opgewekt. Om hier meer grip op te krijgen is nader onderzoek nodig. Monitoring op locatie kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren, maar ook onderzoek met schaalmodellen kunnen bijdragen met kennis van het proces van menging door scheepvaart.

2 Introductie

Thermische energie uit oppervlakte water (TEO) is een veelbelovende duurzame energiebron die nu op kleine schaal wordt toegepast en waar kansen voor opschaling zijn. Bij deze bron van energie wordt er warmte onttrokken aan oppervlaktewater om huizen en kantoren te verwarmen. Het water waaraan warmte met behulp van een warmtewisselaar is onttrokken wordt kouder in hetzelfde oppervlaktewater terug geloosd. Warmte-onttrekking is equivalent aan een koudelozing.

Om TEO ook op grote schaal duurzaam te gebruiken, moet zicht zijn op de impact van deze vorm van aquathermie² op de omgeving. Deze impact heeft invloed op de potentie van aquathermie: Indien ecologische impact niet aanvaardbaar blijkt dan reduceert de potentie, indien de impact minimaal of gunstig is dan kan dat de potentie vergroten. Een eerste indicator voor de impact op de omgeving is de (verandering van) watertemperatuur. Onder de impact van aquathermie beperken we ons in dit document tot de temperatuurverlaging van het oppervlaktewater als gevolg van de koudelozing. Door TEO-systemen slim te ontwerpen en strategische keuzes te maken in waar en wanneer TEO systemen gebruikt kunnen worden, kan de impact van aquathermie op het omliggende oppervlakte water beperkt worden. Slim ontwerpen betekent ook dat rekening wordt gehouden met de efficiëntie van TEO systemen, door de koudepluim weg te houden van het water bij het inname punt van het TEO systeem (recirculatie voorkomen).

Binnen het kennisprogramma Warming-Up is onderzoek gedaan naar de impact van aquathermie en de mogelijkheid om met numerieke modellen de verspreiding van het koude te simuleren. In de notitie Tools Koudelozingen [2] zijn de verschillende tools beschreven die gebruikt kunnen worden voor het modelleren van een koudelozing. Daarbij zijn ook mitsen en maren beschreven. Ook buiten WarmingUP is kennis beschikbaar over (het modelleren van) koudelozingen. De impact van TEO heeft vanwege de afwijkende (hogere) dichtheid waarmee geloosd wordt, gelijkenissen met zoutwaterlozingen van drinkwater productie (omgekeerde osmose) en koelwaterlozingen. Kennis hierover is in dit document samengebracht tot een advies voor het modelleren van de verspreiding van de koudepluim.

2.1 Opzet document

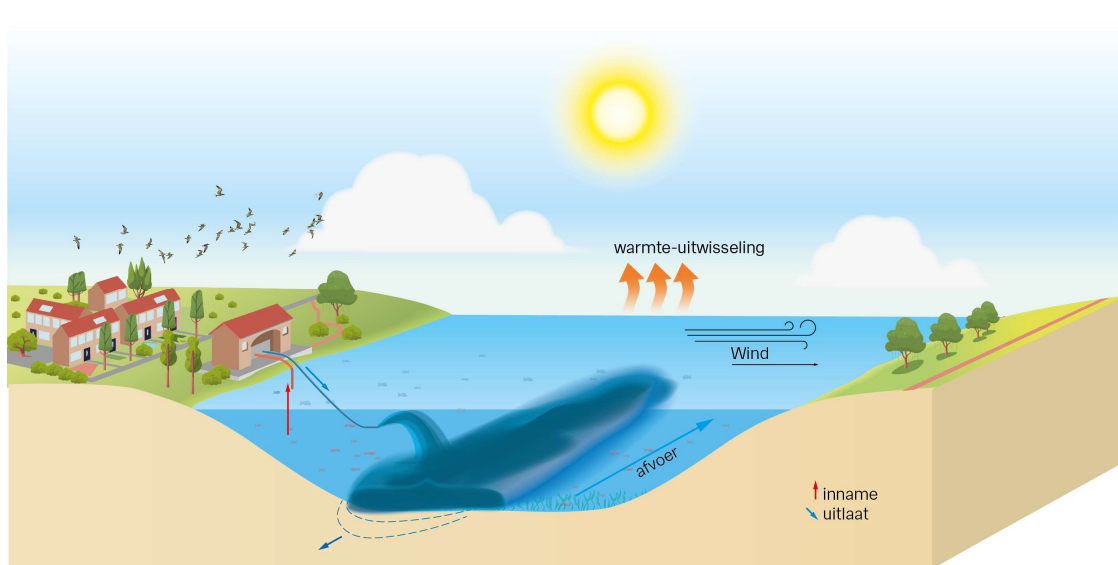
Dit document beschrijft eerst de belangrijkste fysische processen voor de verspreiding van een koudelozing. Dan volgt de aanbeveling voor de manier waarop deze processen met numerieke modellen het best kunnen worden nagebootst. Ook geeft het document inzicht in de alternatieven voor modellering voor specifieke situaties, waarbij aandacht is voor de voor- en nadelen van de verschillende mogelijkheden.

² Andere vormen van aquathermie zoals TED (drinkwater) en TEA (afvalwater) hebben minder interactie met de omgeving

3 Fysische processen bij een koudelozing

Om de impact van een TEO systeem op de temperatuur van omliggend oppervlaktewater te bepalen kijken we naar:

- de verspreiding van de lozing,
- de menging van de lozing met omgevingswater (entrainment) en
- de opwarming van de lozing d.m.v. warmte uitwisseling van de atmosfeer met de lozing, ook wel aangeduid als regeneratie van het watersysteem.

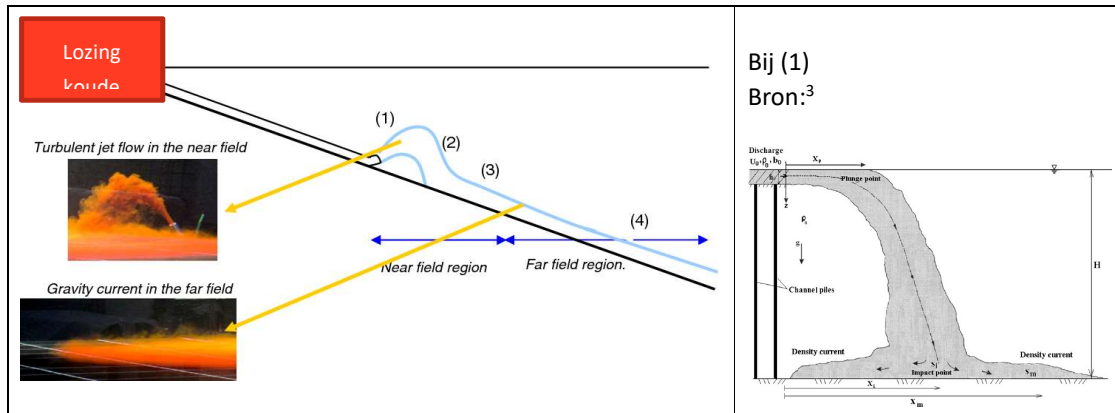


Figuur 2 Schematische verbeelding van warmte-onttrekking, koudelozing en koudepluim

Kenmerkend voor de lozing is dat de dichtheid van het lozingswater afwijkt van de dichtheid van het ontvangend omgevingswater. Om lozingen met een hogere dichtheid, zoals bij een koudelozing, efficiënt te laten mengen met de omgeving wordt er vaak gekozen voor een lozing via puntbron, zoals een pijp vlakbij de bodem schuin omhoog gericht of een horizontale pijp dichtbij het oppervlak van het water. Om menging te bevorderen of recirculatie te voorkomen kan de uitstroom ook anders ontworpen worden met bijvoorbeeld een diffuser.

In de analyse van de impact van een lozing maken we onderscheid tussen twee gebieden:

- Het nabije veld van een lozing, i.e. het 'near-field', het gebied vanaf het punt van lozen tot maximaal tientallen meters ver,
- Het verre veld van een lozing, i.e. het far-field.



Figuur 3 Indicatief verschil tussen het near-field en far-field van een lozing met een hogere dichtheid dan het omliggende water [3]⁴⁵.

Het onderscheid tussen deze gebieden wordt gebruikt omdat de processen die van belang zijn voor de menging van de koudelozing met de omgeving verschillen. In het near-field is het initiële momentum van de lozing (voornamelijk bepaald door de uitstroomsnelheid en de diameter van de pijp) en de turbulente menging van groot belang voor de verspreiding van de koudepluim. In het far-field zijn voor de verspreiding en menging van het koude met name het dichtheidsverschil tussen lozingspluim en omgeving en de hydrodynamische condities zoals stroming van belang. Voor opwarming van de koude (regeneratie) speelt de atmosfeer alleen in het farfield een rol van betekenis. In Figuur 3 zijn de verschillende processen in near- en far-field geschematiseerd weergegeven.

Near-field:

Nabije omgeving van de lozing waar de invloed van de manier van lozen (o.a. uitstroomsnelheid, dichtheidsverschil met omgevingswater) van invloed op de verspreiding is.

Ordegrootte invloedssfeer: van enkele tot enkele tientallen meters.

Far-field:

Op enige afstand van de lozing wordt menging bepaald door omgevingsfactoren (wind, stroming) en is de invloed van de manier van lozen (near-field) niet meer merkbaar.

Orde grootte invloedssfeer: meer dan enkele honderden meters.

Er is uiteraard een overgangszone (midfield) waar alle processen een belangrijke rol spelen (100-1000m)

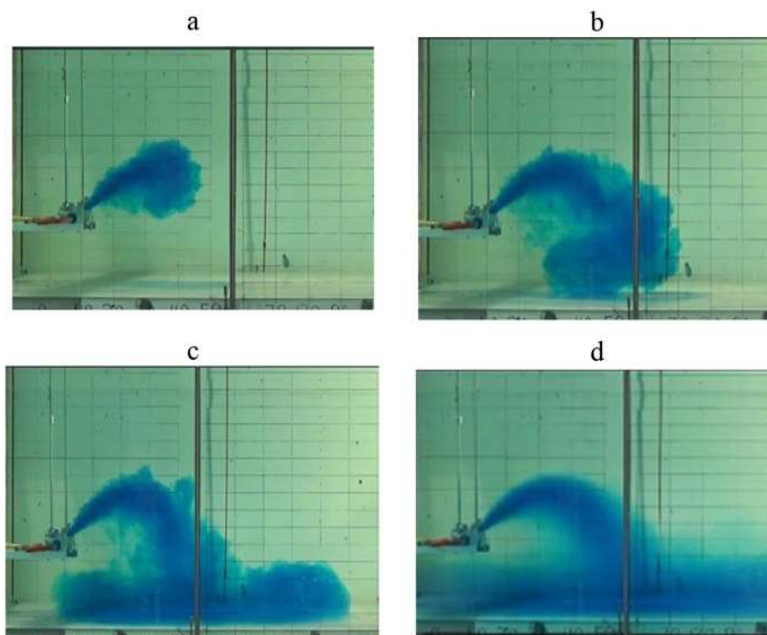
3.1 Het near-field van een lozing

Wanneer water dat door een TEO systeem gebruikt is via de warmtewisselaar weer geloosd wordt, gebeurt dit meestal via een puntlozing. Hier stroomt het water met een bepaalde dichtheid, snelheid en stroomrichting het oppervlakte water in. Het snelheidsverschil tussen de lozing en de omgeving zorgt hier voor turbulente menging. Dit is het gebied waar de koudelozing het meest efficiënt (=grootste mengfactor) kan mengen met het omgevingswater. Het dichtheidsverschil van het zwaardere koude

³ Palomar, Pilar, Javier L. Lara, Inigo J. Losada, M. Rodrigo and Alvaro Alvarez. "Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools." Desalination 290 (2012): 14-27

⁴ Abessi, Ozeair & Saeedi, Mohsen & Bleninger, Tobias & Davidson, M.. (2012). Surface discharge of negatively buoyant effluent in unstratified stagnant water. Journal of Hydro-environment Research. 6. 181-193. 10.1016/j.jher.2012.05.004.

water met de omgeving zorgt er daarnaast voor dat de lozing naar de bodem zal zakken tot het de bodem raakt op het impact punt, zie *Figuur 4*.



Figuur 4 Laboratorium test van het near-field gedrag van een lozing met negatieve dichtheid⁶ geloosd door een diffusor. In b het zogenaamde 'impact point' waar de lozing de bodem raakt.

Merk op dat het dichtheidsverschil (tussen geloosd en ontvangend water) toeneemt met de watertemperatuur: de zelfde dT leidt in warm water tot een groter dichtheidsverschil en daarmee tot grotere neiging tot aanliggen. Zie ter illustratie de voorbeelden in onderstaande tabel.

Koudelozing dT 10°C	Dichtheid lozing	Dichtheid ontvangend water	Dichtheidsverschil	Relatief dichtheidsverschil
18 °C in 28 °C	995.9 kg/m ³	998.6 kg/m ³	2.72 kg/m ³	0.27%
8°C in 18 °C	998.6 kg/m ³	999.9 kg/m ³	1.29 kg/m ³	0.13%

Merk verder op dat in het algemeen zout een veel sterker effect op de dichtheid van water heeft dan koude. In zeewater zit orde 35kg/m³ zout en dus is een zouttong veel stabielere dan een koudepluim.

Verder van het impact punt neemt het initiële momentum (en menging) af en spelen de omgevingscondities een steeds belangrijkere rol in de verspreiding en menging van de pluim. Wanneer een koude lozing in het near-field horizontaal en verticaal goed mengt kan het gebeuren dat er geen gelaagde stroming optreedt, maar dat het koude water verticaal mengt. Dit gebeurt met name in ondiep water, bij hoge uitstroomsnelheden van de lozing en een laag dichtheidsverschil tussen lozing en omgeving.

⁶ Papakonstantis, I.G., Mylonakou, E.L. Flow Visualization Experiments of Inclined Slot Jets with Negative Buoyancy. Environ. Process. 8, 1549–1565 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00546-8>

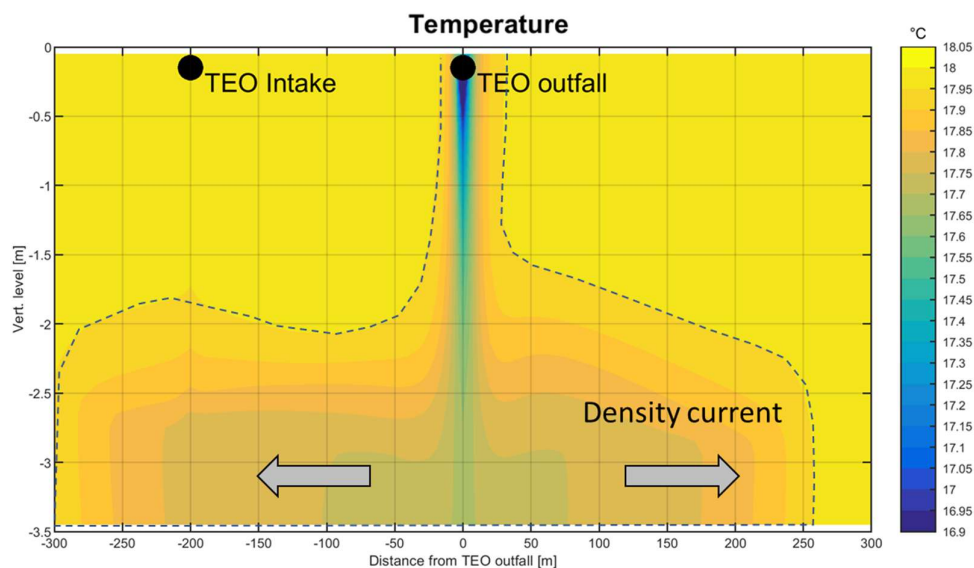
Belangrijke parameters voor de menging en verspreiding in het near-field rond de lozing zijn dus:

- ontwerp van de lozing (breedte en hoogte van het lozingskanaal of pijpdiameter)
- uitstroomsnelheid/debiet
- dichtheidsverschil tussen het koude en omliggend water
- water diepte
- mate van stroming

3.2 Het far-field van een lozing

Na het punt van impact verspreidt het koude water zich via de bodem verder in de omgeving. De menging is in het far-field een stuk minder effectief vergeleken bij het near-field. Processen die bijdragen aan de verspreiding en menging in het far-field zijn onder andere het dichtheidsverschil tussen de koudepluim en de omgeving in combinatie met bodem gradiënten en de turbulentie aan de bodem als gevolg van de bodemruwheid en stroming. Zodra het koude water in de buurt van het wateroppervlak komt zal dit opwarmen richting de evenwichtstemperatuur van het water door warmte-uitwisseling met de atmosfeer. In geval van een lozing die verticaal mengt in het nabije veld kan, afhankelijk van de omgevingscondities, opnieuw stratificatie optreden en een gelaagd systeem ontstaan. Tevens kan stratificatie van het natuurlijke systeem er voor zorgen dat de warmte-uitwisseling met de atmosfeer beperkt wordt.

De warmte uitwisseling met de atmosfeer bepaalt hoe snel het ontvangend water 'regeneert', i.e. terugkeert naar de achtergrond temperatuur van het omliggende water. Het is daarvoor nodig dat het water nabij het oppervlak kouder is dan de evenwichtstemperatuur, daarvoor moet de koudepluim dus verticaal opmengen. De koude in *Figuur 5* zal op het getoonde traject niet 'regenereren' dat gebeurt pas verder van de lozing vandaan, na bv 1 of 2 km (zie *Figuur 11*).



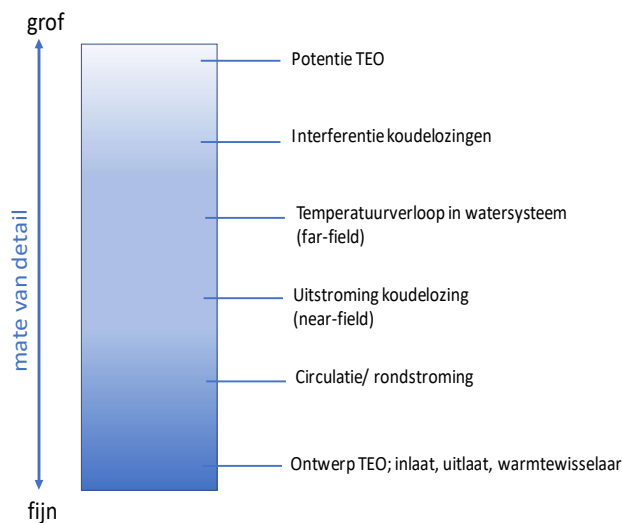
Figuur 5 Gesimuleerde water temperatuur nabij een koud water lozing met Delft3D met een duidelijke dichtheidsstroming bij de bodem.

Samenvattend zijn met name de volgende parameters van belang voor het verspreiden, mengen en opwarmen van het koude in het verre veld:

- Bathymetrie
- Stroming en waterstanden
- Bodemruwheid
- Atmosferische condities (wind, temperatuur, luchtvochtigheid, zoninstraling, etc.)
- Water kwaliteit (i.e. Secchi diepte)

4 Aanbeveling modelleren van koudelozingen

Om de impact van TEO op de watertemperatuur te bepalen wordt vaak gebruik gemaakt van numerieke modellen. Deze studies kunnen uiteenlopende doelen hebben: van het analyseren van de impact van één TEO systeem (near-field) tot ontwerp optimalisatie van het inname en lozingspunt, tot grootschalige cumulatieve effecten (far-field) en haalbaarheids- en potentiestudies. Zie Figuur 5.



Figuur 6 Benodigd detailniveau afhankelijk van doel berekening

De juiste aanpak voor elk van deze studies is een aanpak die de belangrijkste fysische processen die van belang kunnen zijn bij het verspreiden van een koudelozing in ogenschouw neemt. Momenteel is er niet een enkel model beschikbaar dat al deze processen, van kleinschalige turbulentie tot grootschalige verspreiding van het koude, dus van near-field tot far-field, tijdsafhankelijk en volledige fysisch en efficiënt in 3D door kan rekenen. Bovendien is het voor het antwoord op de vraag niet altijd nodig alle processen in een hoog detailniveau mee te nemen en is een minder complexe numerieke opzet soms ook voldoende om een antwoord op de gestelde vraag te krijgen, zodat de modelleerinspanning beperkt kan worden. In alle gevallen is het noodzakelijk kritisch te blijven op de invloed van je model keuzes op de resultaten en de uiteindelijke conclusies.

Het is evident dat zowel near-field als far-field modellen aan de basiseisen voor modelleren moeten voldoen. Denk hierbij aan:

- Het model domein moet groot genoeg zijn om invloed van je modelranden op je koude verspreiding te beperken.
- Een model moet genoeg horizontale en verticale resolutie hebben om gradiënten in temperatuur en stroming te kunnen beschrijven.

- Simulaties met het model moeten relevante randvoorwaarden/scenario's (combinaties van waterstanden, stroming, meteorologie, achtergrond temperatuur etc.) bevatten voor de volledige levensduur van het TEO systeem.
- Een model moet model parameters hebben die passen bij het te modelleren gebied.
- Zie voor meer randvoorwaarden Richtlijnen voor de rapportage van 3D modelsimulaties : onderdeel van de aanvraag voor een vergunning tot warmtelozing in oppervlaktewateren.
[1]

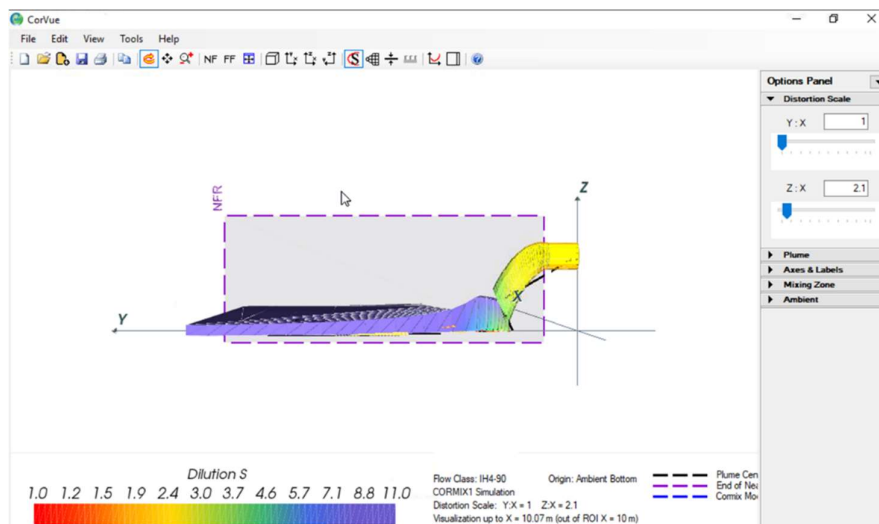
Voor de keuze voor software om de verspreiding van een koudelozing door te rekenen kan er globaal gekozen worden uit near-field modellen en far-field modellen. Near-field modellen focussen op de relevante processen voor verspreiding van het koude dichtbij de lozing. Far-field modellen focussen vooral op grootschalige verspreiding en recirculatie van het koude naar het inname punt en zijn voor een correct resultaat in beginsel afhankelijk van de vorm en verdunning van de koude in het nearfield.

Navolgende paragrafen beschrijven mogelijkheden om de verspreiding van een koudelozing te modelleren in het near-field en in het far-field.

4.1 Near-field modelleren

De verspreiding van een koudelozing nabij het lozingspunt kun je modelleren met een near-field model. Dit type model simuleert initiële menging van een koudelozing op een traject tot tientallen meters van een lozing. Optimalisatie van je ontwerp van je lozingspunt doe je bij voorkeur met dit type modellen.

Near-field modellen berekenen het traject en menging van de lozing van het lozingspunt tot voorbij het impactpunt en focussen met name op de turbulente menging en niet-hydrostatische gedrag van de lozing. Voorbeelden van modellen die dit deel van de lozing kunnen berekenen zijn CORMIX, JET3D en CFD modellen. CORMIX en JET3D zijn relatief makkelijk in gebruik en zeer efficiënt qua rekentijd. Dit laat zien hoe de pluim zich vanaf de uitstroomopening in het watersysteem nabij de lozing verspreidt.



Figuur 7 Voorbeeld van een CORMIX berekening voor een koudelozing

JET3D is geen commercieel product en is naar verwachting derde kwartaal 2022 vrijelijk beschikbaar in de emissietoets (www.emissietoets.nl). Een voorbeeld van een berekeningsresultaat is opgenomen in *Figuur 8*. Het bovenste deel van de figuur simuleert de ruimtelijke verspreiding van de koude, het onderste deel geeft kenmerken over de menging van de pluim die als gevolg van de lozing ontstaat.

CFD-modellen zijn er wel en niet commercieel, hebben een hoge mate van detail, maar dat geeft ook zware berekeningen met lange rekentijden.

Cormix (hoog schematisch), JET3D (stopt zodra pluim de bodem of water raakt) en CFD (zware rekencapaciteit) zijn niet geschikt om variërende omgevingscondities of om lange periodes door te rekenen.

Een near-field model kan de verspreiding op grote schaal (>> tientallen meters) niet goed modelleren. Mochten de hydrodynamische condities rond de lozing zó zijn dat de koudepluim zich over de tijd kan opbouwen, dan kan er mogelijk re-entrainment optreden. Bij dit proces mengt de koudepluim met eerder geloosd koud water en neemt de effectieve menging van de lozing af. Met name bij meren en kanalen kan dit een rol spelen. Bij rivieren met een constante minimale afvoer speelt dit minder of geen rol. Dit proces wordt niet meegenomen in near-field modellen.

Resultaten

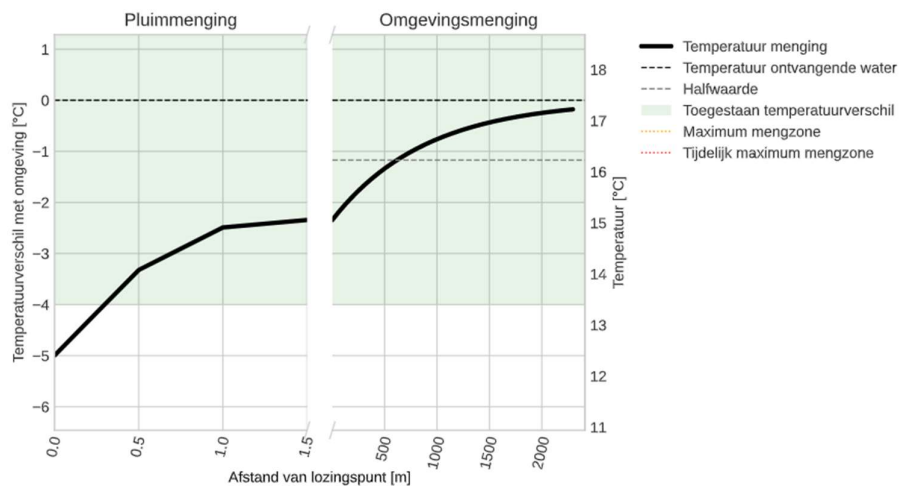
BESLISBOOM RESULTATEN LOGS **KAART** PDF

Resultaten NWM segmenten



Laatste correcte berekening: 16:49:45 28-06-2022

Grafische weergave temperatuurlozing



Het temperatuurverschil op het mengzonecontour is: -2.3 °C. Op 0.5m van de lozing valt het temperatuurverschil binnen de toegestane grens van de pluimberekening.

Figuur 8 Voorbeeld van een JET3D- berekening voor een koudelozing

4.2 Far-field modelleren

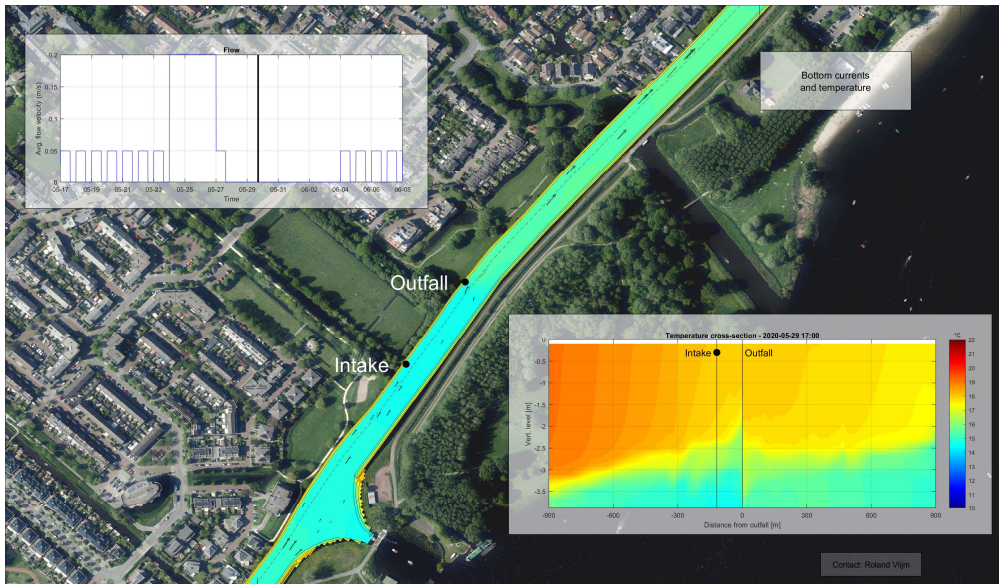
Als we de verspreiding van de koudepluim op een goede manier in het far-field willen modelleren dan moeten we rekening houden met zowel de dominante processen voor verspreiding in het near-field als de dominante processen in het far-field. De combinatie van near- en far field modellen is daarom noodzakelijk en wordt door Deltares in principe voor alle situaties geadviseerd [3].

Near-field processen zijn bepalend voor initiële menging en hebben daarmee invloed op de grootschalige verspreiding van het koude. Visa versa kan de grootschalige verspreiding van koude effect hebben op het near-field gedrag van de lozing. In dat geval is een koppeling van near- en farfield modellen nodig.

De near-field modellen, zoals hierboven beschreven, kunnen worden gebruikt voor de bepaling van de initiële menging, de far-field modellen berekenen (hydrostatisch in 3D) vervolgens de grootschalige waterbewegingen (inclusief de koudepluim) en de uitwisseling van warmte met de atmosfeer. Voorbeelden van dit soort modellen zijn Delft3D, Telemac en MIKE.

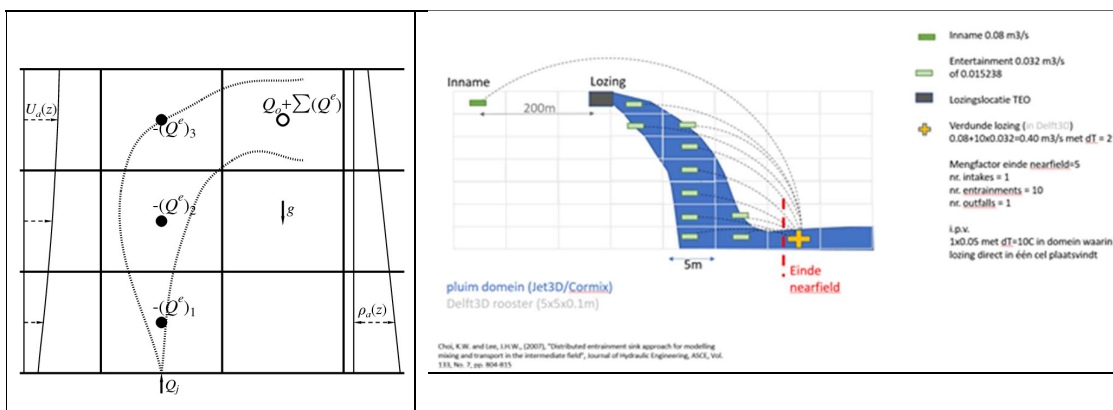
Een far-field model is niet geschikt voor het simuleren van het near-field omdat het far-field model vaak een hydrostatisch model is waarbij aangenomen wordt dat de horizontale schaal van de stroming vele malen groter is dan de verticale. Nabij de koudelozing is dit niet het geval. Tevens hebben far-field modellen niet de resolutie om de turbulente menging van een lozing vlakbij het lozingspunt op te lossen en tegelijkertijd de grootschalige verspreiding van het koude op honderden meters afstand van een lozing in één model. Dat betekent dat je voor het modelleren van de temperatuurverspreiding in het far-field ook een goede modellering van de lozing (het near-field) nodig hebt.

Omdat het near-field resultaat afhangt van bijvoorbeeld veranderende stroming moeten in principe verschillende varianten voor het near-field doorgerekend worden die passen bij de stroming in het far-field. Het vertalen van je near-field resultaten naar je far-field model kan technisch worden gerealiseerd via een handmatige of geautomatiseerde koppeling, waarbij de kenmerken van de pluim in het near-field worden opgedrukt aan het far-field model. Via de koppeling worden de kenmerken van de initiële menging (voor verschillende scenario's) opgelegd aan het far-field model, waarmee dan verschillende berekeningen worden uitgevoerd.



Figuur 9 Gesimuleerde temperatuur met CORMIX en Delft3D rond een TEO systeem voor een fictieve casus waarbij gelaagdheid optreedt

De methode die voor de ge-automatiseerde koppeling wordt aanbevolen is Distributed Entrainment Sinks (DESA-methode [4]). De koppeling kan op verschillende manieren worden vorm gegeven, van eenvoudig tot complex, waarbij ook terugkoppeling tussen de modellen plaatsvindt. Deze methode bootst de menging van de pluim langs het pluim traject na in het far-field model met een combinatie van bronnen en putten. In *Figuur 10* is schematisch de werkwijze van koppeling via de DESA-methode weergegeven.



Figuur 10 Schematische representatie van de DESA-methode voor het koppelen van near-field resultaten met far-field modellen voor een pluim met een lagere dichtheid (links) en een uitgewerkte voorbeeld casus voor koudepluimen (rechts).

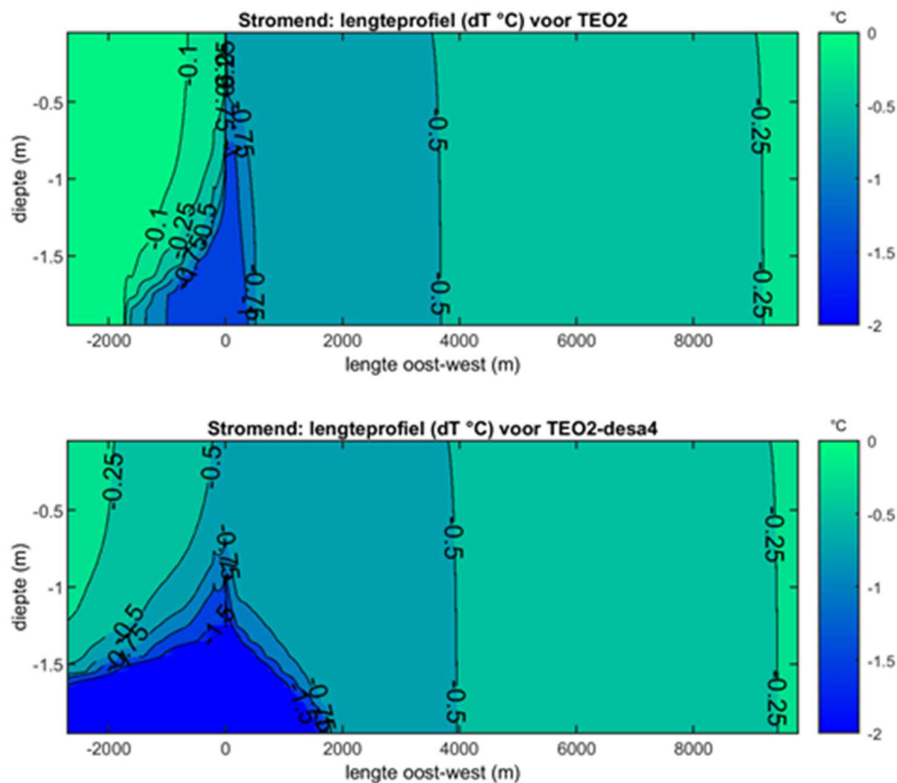
4.3 Alternatieven voor far-field modelleren van koudelozingen

Er kunnen redenen zijn niet de combinatie van near-field en far-field-modellen te gebruiken en om een situatie verder te schematiseren (2D of 1D). Hieronder worden hiervan de mitsen en maren beschreven.

4.3.1 Modelleren met enkel een af-field model (zonder koppeling)

Indien de verspreiding van koude alleen met een far-field model wordt gesimuleerd is de schematisatie van de lozing in dit model een belangrijk punt van aandacht.

Bij gebruik van een puntlozing direct in een far-field model zal een bepaalde arbitraire menging geven die afhangt van gridcel-grootte van het model. Deze menging is dus onafhankelijk van de fysische processen die in het nearfield spelen en onafhankelijk van ontwerp parameters van de lozing (zoals uitstroomsnelheid, pijp diameter etc.), maar wordt enkel bepaald door de opzet van het numerieke farfield model. *Figuur 11* laat het verschil in koude verspreiding zien (Delft3D) voor een casus waarbij alleen een far-field model is gebruikt met een puntlozing en een casus waarbij een near-field analyse (CORMIX) is gedaan en resultaten zijn vertaald naar het far-field model



Figuur 11 Gesimuleerde watertemperatuur waarbij een lozing direct in Delft3D is gestopt (boven) en een waarbij een near-field analyse met CORMIX is gedaan en resultaten in Delft3D gebruikt zijn.

Deze vergelijking maakt zichtbaar dat met alleen een far-field model de gelaagdheid als gevolg van de lozing wordt onderschat. Dat betekent het far-field model meer initiële menging geeft dan in werkelijkheid, wat leidt tot overschatting van de warmte-uitwisseling met de atmosfeer, lagere temperatuurverschillen en kortere koudepluimen dan in werkelijkheid mag worden verwacht.

Daarom is het noodzakelijk indien geen near-field model beschikbaar is deze gevolgen te onderkennen en benoemen. Geadviseerd wordt om een gevoeligheidsanalyse te doen met verschillende scenario's voor de ontwikkeling van de pluim (i.e. verschillende pluim trajecten en menging), zodat gevoel wordt gekregen voor de invloed van deze schematisatie.

Het is natuurlijk ook mogelijk dat de details van het ontwerp van de lozing niet nodig of beschikbaar zijn, zoals bij een verkennende studie waarbij een specifiek ontwerp van de lozing ontbreekt. Een eerste inschatting van het gedrag en menging van de pluim is dan voldoende. Hierbij dient wel duidelijk te blijven dat deze methode een eerste inschatting van de impact van een TEO geeft, maar dat er mogelijk verschillen op gaan treden met gedetailleerdere analyse. Een ander punt van zorg is dat vaak de resolutie van een far-field model niet toereikend is om een eerste inschatting van de temperaturen vlakbij de lozing te geven. Wanneer de resolutie van een far-field model te grof is wordt de impact van een TEO systeem rond de lozing zelf onderschat.

4.3.2 1D, 2D of 3D voor het far-field model

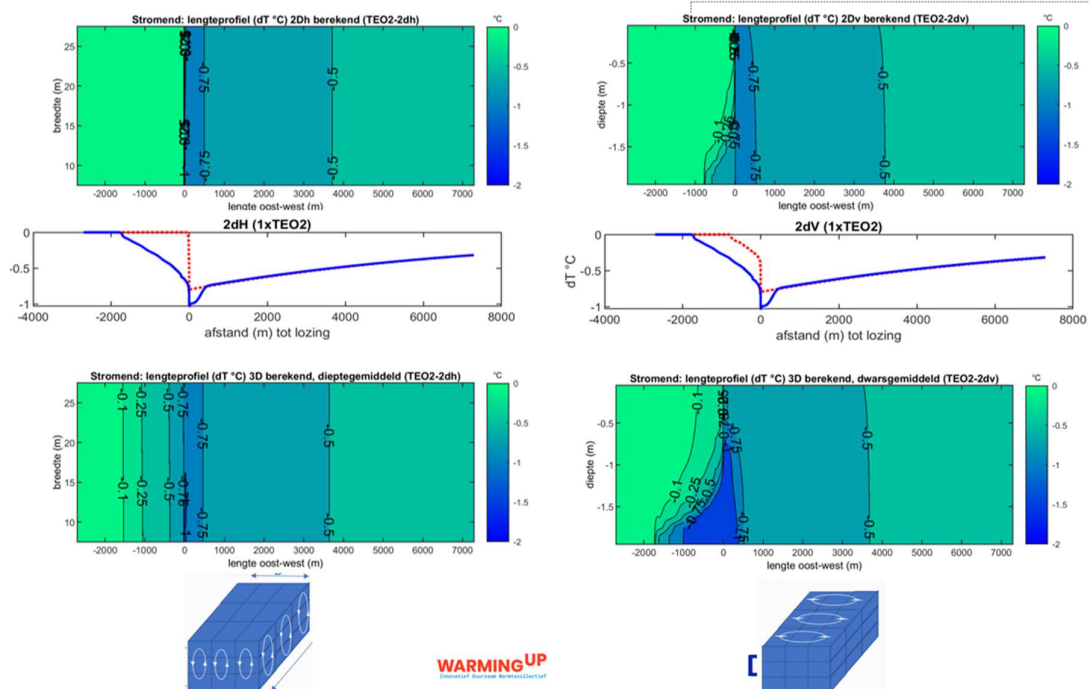
Koud water heeft een hogere dichtheid dan warm water en een koudelozing van een TEO systeem is daardoor geneigd te zinken naar de bodem en een gelaagd systeem te vormen. Ook natuurlijke stratificatie beperkt de warmte uitwisseling plaatsvinden tussen de koudepluim en de atmosfeer. Een logische keuze is dan ook om verspreiding van koude in 3D door te rekenen. Er zijn echter uitzonderingen waarbij 1D of 2D modellen een alternatief zijn.

Bij 2-dimensionaal modelleren (Delft3D 2DH/2DV) neem je aan dat de lozing volledig gemengd is over de diepte of de breedte van het watersysteem. Bij de aanname van constante temperatuur over de diepte is er nooit gelaagdheid, dus wordt de invloed hiervan niet berekend. Bij constante temperatuur over de breedte van het waterlichaam kan gelaagdheid wel optreden.

Bij 1-dimensionaal modelleren wordt de temperatuur zowel over de breedte als de diepte van de watergang constant verondersteld. Gelaagdheid en de invloed hiervan op verspreiding wordt niet meegenomen. Bij 1D (SOBEK) of 2D (Delft3D 2DH/2DV) neem je in feite aan dat de koudelozing in de 1 of meer dimensies volledig gemengd is. Als een koudelozing effectief mengt en gemengd blijft is dit een toelaatbare vereenvoudiging. In deze dimensies zal je alleen lokaal rond de lozing verschillen zien tussen de realiteit en je numerieke modelresultaten. 1D of 2D modelleren kan dus mogelijk toegepast worden indien volledige menging kan worden verondersteld. Dat geldt bijvoorbeeld voor situaties waarin het relatief grote lozingen in bijvoorbeeld een smalle stromende rivier betreft of als je alleen geïnteresseerd bent in een eerste indruk van de impact van TEO systemen op grootschalige gebieden.

Onderstaande figuur laat het verschil in verspreiding zien tussen een 2D, goed gemengd veronderstelde situatie, (boven) en een slecht gemengde, gelaagde situatie (onder). Hieruit blijkt dat 2D-berekeningen temperatuurverschillen onderschatten. Dichtheidsstromen bij de bodem zorgen er in werkelijkheid voor dat het koude niet kan opwarmen aan de atmosfeer en het invloedsgebied van een TEO systeem mogelijk groter is dan verwacht op basis van 1D en 2D modellen.

Nadeel van het gebruik van 1D of 2D modellen is dat wanneer blijkt dat 3D processen wel van belang zijn, 1D of 2D modellen de impact van TEO systemen kunnen onderschatten. Het is evident dat de keuze om dit in 1D, 2D of 3D te modeleren een invloed zal hebben op de verwachte impact van een TEO systeem.



Figuur 12 Gesimuleerde temperatuur voor een goed gemengd (boven) en een slecht gemengde koudelozing (onder).

5 Conclusie, reflectie en aanbevelingen

Om TEO op grote schaal te kunnen toepassen is inzicht in de (ecologische) impact nodig. De impact heeft invloed op de potentie van aquathermie: Indien ecologische impact niet aanvaardbaar blijkt dan reduceert de potentie, indien de impact minimaal of gunstig is dan kan dat de potentie vergroten. Een eerste indicator voor de impact op de omgeving is de (verandering van) watertemperatuur. Een goede aanpak voor de thermische modellering is daarom noodzakelijk.

De kennis die hierover is opgedaan in WarmingUP heeft geleid tot de volgende bevindingen en aanbevelingen voor de verspreiding van de koudepluim en temperatuurmodellering:

- Voor een goede modellering van de verspreiding van koude door een koudelozing wordt geadviseerd om een combinatie van een near-field en een far-field model te gebruiken.
 - Met een near-field model maak je een eerste inschatting voor de menging en verspreiding van de pluim van het lozingspunt tot op enkele honderden meters van de lozing
 - De resultaten van je near-field/ pluimanalyse zijn input voor het far-field model. Op die manier wordt de initiële menging van de pluim goed meegenomen in de simulatie van de verspreiding op grotere afstand van de lozing.
 - Het vertalen van je near-field resultaten naar je far-field model kan technisch worden gerealiseerd via een handmatige of geautomatiseerde koppeling. Uitgangspunt van de koppeling is dat de resultaten van het nearfield worden opgedrukt aan het far-field model.
- In het geval dat er geen near-field model beschikbaar is dan wordt geadviseerd om een gevoeligheidsanalyse te doen met verschillende scenario's met een far-field model voor de ontwikkeling van de pluim.
- Met alleen een near-field model kan je geen grootschalige verspreiding berekenen, maar dit kan wel geschikt zijn voor ontwerptimalisatie van de in- en, met name, de uitlaat. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met de invloed die de pluim heeft op de (stromings)condities in het near-field.
- Een far-field model is niet geschikt om de initiële menging rond de lozing accuraat op te lossen. Met een far-field model wordt de initiële menging in het algemeen overschat, waardoor effecten van gelaagdheid en opwarming verkeerd worden ingeschat en er een verkeerd beeld ontstaat van de impact van een TEO op een watersysteem.
- Indien geen informatie beschikbaar is over natuurlijke gelaagdheid in het watersysteem of gelaagdheid mogelijk optreedt als gevolg van de lozing, dan verdient het aanbeveling altijd 3D te rekenen in verband met mogelijke 3D effecten (stratificatie van je pluim, natuurlijke stratificatie, 3D stroming)
- Als verkenning van de verspreiding van koude, of indien geen gelaagdheid wordt verwacht, kan gekozen worden voor 2D of 1D modellering voor het far-field.

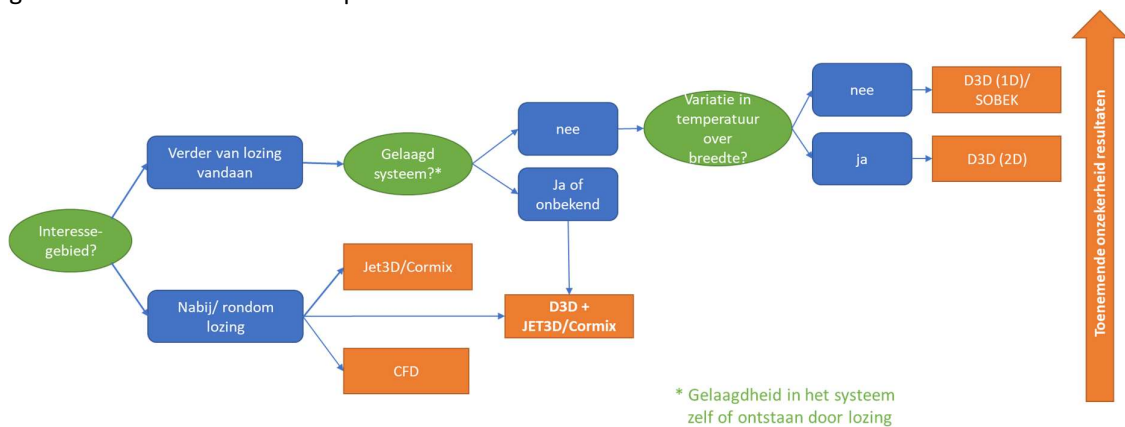
De beperkingen en aandachtspunten van modelkeuzes zijn samengevat in onderstaande tabel.

- Voor zowel de near-field als de far-field modellen gelden de basisregels van het modelleren. Keuzen voor het rekendomein, horizontale en verticale resolutie,

randvoorwaarden, tijdstap, inspeeltijd etc zijn bepalend voor de betrouwbaarheid van modelresultaten.

Type model		Toepassing	Bezwaar	Aandachtspunt
Near-field	Cormix/Jet3D CFD	Ontwerp /optimalisatie inlaat/uitlaat, Complexe in-uit configuraties (CFD)	Ongeschikt voor far-field Ongeschikt voor variërende (seizoens)condities ivm rekentijden (CFD)	
Far-field	D3D (1D) of SOBEK	Verkenning/ potentie warmte-onttrekking	Ongeschikt voor near-field	onderschatting temperatuurverschillen, Inschatting initiële menging
	Delft3D (2DH of 2DV)	Gemengd systeem	Ongeschikt voor near-field,	onderschatting temperatuurverschillen Inschatting initiële menging
	Delft3D (3D)	Gelaagdheid verwacht	Ongeschikt voor near-field	Inschatting initiële menging
Gekoppeld N&F	Cormix/D3D	Alle situaties		Correcte koppeling

In onderstaande figuur is middels een stroomschema samengevat op welke manier de keuze voor het juiste modelinstrumentarium kan worden gemaakt. In de figuur is voor het far-field model Delft3D voorgesteld en voor near-field Jet3D of Cormix. Uiteraard kan hiervoor ook gebruik worden gemaakt van andere softwarepakketten.



Figuur 13 Beslismodel ten behoeve van modelkeuze koudelozing.

De gelaagdheid in een watersysteem is sterk bepalend voor de mate van verspreiding van een koudepluim. Het beslismodel maakt zichtbaar dat de variatie in temperatuur over de diepte (gelaagdheid) en breedte en dus de menging van de pluim ook een bepalend criterium is voor de keuze van het juiste modelinstrumentarium. Het is dus van belang vooraf een inschatting te maken van deze gelaagdheid c.q. menging.

Gelaagdheid speelt:

- Geen rol in volledig gemengde systemen, zoals
 - (snel) stromende wateren, rivieren
 - Wateren onder invloed van getij
- Een rol in niet gemengde systemen, zoals
 - Rivieren, kanalen met lage afvoeren,
 - Gestuwde rivier- of kanaalpanden
- Een mogelijke rol in plassen, afhankelijk van
 - Grootte en vorm van de plas
 - Diepte van de plas
 - De invloed die wind op de plas heeft (afhankelijk van lokale beschutting en orientatie van de plas)
 - Zoninstraling (afhankelijk van troebelheid)

Voor plassen geldt in algemene zin dat hoe groter de plas is, hoe dieper deze moet zijn voordat stratificatie optreedt. In ondiepe kleine plassen is stratificatie beperkt. Een ondiepe plas stratificeert alleen als de plas klein en/ of erg beschut is.

Bij twijfel is het advies om 3-dimensionaal te modelleren om meer zekerheid te krijgen over het ontstaan of de aanwezigheid van gelaagdheid. Daarbij moet bedacht worden dat er processen zijn die de gelaagdheid beïnvloeden, maar in de modellering niet worden meegenomen. Een belangrijke voorbeeld hiervan is de menging die door scheepvaart wordt opgewekt. Om hier meer grip op te krijgen is nader onderzoek nodig. Monitoring op locatie kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren, maar ook onderzoek met schaalmodellen kunnen bijdragen met kennis van het proces van menging door scheepvaart.

6 Referenties

[1] RE Uittenbogaard, 2008; Richtlijnen voor de rapportage van 3D modelsimulaties : onderdeel van de aanvraag voor een vergunning tot warmtelozing in oppervlaktewateren, Deltares.

[2] Boderie, de Groot-Wallast, 2021 Tools koudelozingen, WarmingUP

[3] Morelissen, Robin & van der Kaaij, Theo & Bleninger, Tobias. (2013). Dynamic coupling of near field and far field models for simulating effluent discharges. Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research. 67. 2210-20. 10.2166/wst.2013.081

[4] Choi, K. & Lee, Joseph. (2008). Closure to "Distributed Entrainment Sink Approach for Modeling Mixing and Transport in the Intermediate Field" by K. W. Choi and Joseph H. W. Lee. Journal of Hydraulic Engineering-asce - J HYDRAUL ENG-ASCE. 134. 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1786

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