

Temperatuureffecten koudelozingen

Datum: 3 december 2021
Referentie: WU3B

Betreft: Effecten TEO installaties op watertemperatuur

Thermische Energie uit Oppervlaktewater (TEO) is een duurzame bron voor het verwarmen van huizen. De bijbehorende koudelozingen van TEO-installaties verspreiden zich over het ontvangende water, maar 'Zien we de koudelozing terug in het watersysteem?', 'Hoe groot is een koudelozing eigenlijk?', en 'Waar zouden we effecten ervan kunnen zien in het watersysteem?'. Om op deze vragen te beantwoorden, geven we in dit document een overzicht van de reikwijdtes van een koudelozing voor representatieve TEO-installaties op verschillende typen wateren. Daarnaast lichten we een aantal praktijkvoorbeelden toe. Dit overzicht helpt de waterbeheerder een beeld te vormen van de invloed van een koudelozing op een watersysteem.

Deze notitie is opgebouwd uit vijf onderdelen. Als u naar één van de onderdelen wilt kunt u dat onderdeel aanklikken.

1. Hoe krijgen we gevoel voor de koudelozing?
2. Illustratieve fictieve rekenvoorbeelden
3. Praktijkvoorbeelden
4. Inzichten mbt koudelozingen
5. Hoe kan dit document gebruikt worden?

1 Hoe krijgen we gevoel voor de koudelozing?

1.1 Wat doet een TEO systeem en hoe reageert het watersysteem?

Bij TEO wordt warmte aan het oppervlaktewater onttrokken door oppervlaktewater langs een warmtewisselaar te leiden. Daardoor draagt het water warmte af en wordt de watertemperatuur lager. Dit afgekoelde water wordt terug geleid naar het oppervlaktewater. Zo is een warmte-onttrekking feitelijk een koudelozing.

De geloosde koude verspreidt zich, als zogenaamde koudepluim, door het watersysteem, zowel in horizontale als verticale richting. Hoe deze koudepluim zich door het systeem verspreidt, is, naast

processen zoals uitzakken van koude, menging en het (temperatuur) herstellend vermogen van water, afhankelijk van kenmerken van het watersysteem én van de TEO installatie. Meer informatie over de natuurlijke processen zijn terug te vinden in de bijlage. Belangrijk voor de ontwikkeling van de koudepluim zijn de volgende punten:

- de grootte van de koudelozing, zowel debiet als temperatuurverschil ten opzichte van het ontvangend water, in relatie tot de grootte van het waterlichaam
- de eigenschappen van het waterlichaam waarop geloosd wordt: in een lijnvormig water verspreidt een koudepluim zich anders dan in een plas
- Stroming van het water: de stroming verspreidt de koude. De stroomsnelheid is een kenmerk van een waterlichaam, maar kan ook ontstaan of wordt ook beïnvloed door de koudelozing
- De locatie, afstand en vormgeving van de uit- en inlaat van de TEO installatie

Indien er inzicht is in de omvang van (lokale) veranderingen in temperatuur als gevolg van de warmte-onttrekking kan worden beoordeeld of verwacht mag worden dat de temperatuurverandering invloed heeft op de ecologie van het watersysteem. Deze beoordeling valt buiten de scope van dit document, maar informatie hierover is te vinden in het beoordelingskader koudelozingen (Kruitwagen et al., 2021) en in overzichtsdokument van effecten (Harezlak, 2021).

1.2 Hoe verspreidt koude zich in verschillende watersystemen?

Geloosd water koelt water ter plaatse van de koudelozing af door menging met het ontvangend water. Na deze eerste menging verspreidt het koudere water zich door stroming en zakt het uit door verschil in dichtheid (kouder water is zwaarder per volume-eenheid). Afgekoeld water aan het wateroppervlak wordt vervolgens weer opgewarmd door de atmosfeer. De netto stralingsflux van atmosfeer naar het water (de opwarming) is het grootst nabij de lozing, omdat hier de verlaging van de watertemperatuur als gevolg van de koudelozing het grootst is. Menging, stroming en opwarming leiden gezamenlijk, wanneer stabiel, tot een in evenwicht zijnde temperatuurprofiel.

Wind speelt een belangrijke rol in het proces van (verticale?) menging, door de gegenereerde stroming en golven. In niet-gemengde systemen (zonder stratificatie), kan koude lang in het watersysteem blijven: de mate van opwarming van het water door de atmosfeer wordt bepaald door de watertemperatuur aan het wateroppervlak. In een systeem dat gestratificeerd is, is de bovenste waterlaag qua temperatuur in evenwicht met de atmosfeer, maar warmen de diepere waterlagen niet op.

Om een beeld van koudeverspreiding (temperatuurprofiel) in verschillende watersystemen te geven, is een aantal illustratieve voorbeelden onderscheiden. De voorbeelden zijn gebaseerd op de indeling in watertypen zoals gehanteerd in het beleidskader Koudelozingen (Kruitwagen et al., 2021). Dit beleidskader groepeerde in de beoordeling de watertypen zoals weergegeven in Tabel 1. In de rekenvoorbeelden van de verspreiding van koudelozingen zijn deze watertypen geclusterd tot de vier onderscheidende watertypen, met elk hun specifieke kenmerken (Tabel 2).

Tabel 1: Overzicht watertypen zoals gehanteerd in het beleidskader Koudelozingen (Stowa, 2021-30)

Watertypen beleidskader koudelozingen

Stilstaand	
Type 1	stilstaand lijnvormig*
Type 2	kleine ondiepe meren
Type 3	kleine diepe meren
Type 4	matig tot grote ondiepe meren
Type 5	matig tot grote diepe meren
Stromend	
Type 6	stromend lijnvormig*
Type 7	Beken
Type 8	Rivieren

* vaarten & kanalen

De watertypen zijn als illustratief gekozen omdat ze enerzijds onderscheidend ten opzichte van elkaar zijn en anderzijds omdat beheerders voor deze watertypen de meeste TEO_aanvragen verwachten (webinar TEO, april 2021). Wij hebben daarom de volgende indeling illustratieve watertypen gehanteerd:

- Stilstaand lijnvormig type 1 vaarten, kanalen sloten
- Stromend lijnvormig type 6 vaarten, kanalen, sloten
- Stilstaand meervormig type 2 klein/matig ondiep meer
- Stilstaand meervormig type 4 matig/groot ondiep meer
- Stilstaand meervormig type 3/5 diepe meren

Voor de eerste 4 typen zijn modelberekeningen opgezet. Dit zijn realistische rekenvoorbeelden met gegeneraliseerde of watersysteem typische geometrie. De voorbeelden dienen om te demonstreren hoe koude zich in verschillende watertype verspreidt. Voor deze vier watertypen zijn enkele kenmerkende waarden in de tabel opgenomen en een voorbeeld van een werkelijk watersysteem dat binnen dit watertype past.

Diepe meren (type 3 en 5) zijn modelmatig een stuk complexer als gevolg van de natuurlijke stratificatie. Hier is de precieze lokale situatie van groot belang voor de verspreiding van koude, zoals de aanwezigheid van diepe putten. Hiervoor is daarom geen illustratieve modelberekening opgezet. Een eerste inzicht hierin wordt wel gegeven in hoofdstuk drie waar een aantal praktijkcases besproken worden, waaronder het (diepe) Slotermeer.

Ook voor rivieren en beken geldt dat voor deze watertypen een gegeneraliseerde geometrie geen recht doet aan de werkelijke complexe situatie. Daarom is hiervoor geen illustratief rekenvoorbeeld opgezet. Op dit moment hebben we ook geen praktijkvoorbeelden voor deze situatie. Het is waardevol dit watertype op een later moment nog aan deze notitie toe te voegen.

Tabel 2: watertypen voor illustratie van verspreiding van koudelozingen.

Watertype	Stilstaand lijnvormig water (type1,)	Stromend lijnvormig (type6)	Stilstaand meervormig (type2)	Stilstaand meervormig (type 4)
	vaarten, kanalen, sloten	vaarten, kanalen, sloten	klein/ matig ondiep meer	matig-groot ondiep meer
Voorbeeld	Zuid Willemsvaart	Bovenmark	Plas van Buijsen (Pijnacker)	Kralingse Plas
Breedte, B (m)	50	25	150*150	1000x1000
Diepte, D (m)	3.5	2.0	1.5	1.5
Debiet Q (m ³ /s)	Nvt	1	Geen	Geen

1.3 Wat is een realistische grootte voor een koudelozing?

In het programma WarmingUP (warmingup.info) gaat het onder andere over de bijdrage die TEO-installaties aan de energietransitie kunnen leveren. Dat betekent dat een TEO installatie een groot aantal woningen van warmte moet kunnen voorzien. Daarom wordt aangenomen dat een "representatieve" TEO-installatie zo'n **15 Terajoule/jaar** zal leveren. Dit is genoeg, uitgaande van een warmtevraag van 35 GJ per woning¹, een elektrische warmtepomp met een gemiddelde COP² van 3.5 en een ingeschat warmteverlies³ in het distributienet van 20%, om 500 woningen van warmte te voorzien (CE Delft, 2018).

De warmte-onttrekking door een TEO-installatie wordt bepaald door het debiet waarmee water wordt onttrokken (en geloosd) en de mate van afkoeling (ΔT) van het onttrokken water. Vaak wordt gewerkt met een ΔT van 5°C. Daarom wordt in dit document voor de winning van 15 TJ/jaar (de representatieve TEO) een debiet van **300m³/uur** en een **dT van 5°C** als basisscenario gehanteerd. Indien de installatie drie maanden draait, levert dit in potentie de benodigde warmte. Let op: dezelfde hoeveelheid warmte kan ook worden onttrokken met een groter debiet en een kleinere dT of met een kleiner debiet en een grotere dT.

1.4 Illustratieve rekenvoorbeelden

Voor de vier illustratieve watertypen wordt de verspreiding van koude in beeld gebracht voor 3 scenario's waarbij debiet en dT variëren (Tabel 3). Er wordt uitgegaan van een representatieve TEO-installatie ('TEO_{ref}') en drie variaties daarop. De variaties zijn:

-
- ¹ In de deltafactsheet van de STOWA over de werking van TEO wordt uitgelegd hoe de in de zomer onttrokken warmte via bodemopslag in de winter beschikbaar is voor verwarming van huizen middels een warmtepomp
- ² COP = geleverde energie (warmte) / verbruikte elektrische energie: een warmtepomp die 3.5 kWh warmte aflevert en daarvoor 1 kWh aan elektriciteit nodig heeft, heeft een COP van 3.5. Van de geleverd 3.5 GJ warmte komt 2.5 GJ uit de aquathermiebron en 1 GJ uit de elektriciteit. De warmte die geleverd wordt door de warmtepomp is dan 2.5/3.5= 71% uit de aquathermiebron en 29% elektriciteit.
- ³ Uitgaande van 20% warmteverlies in het warmtenet betekent dat voor een 35 GJ warmtevraag van een woning, 42GJ geleverd moet worden door de warmtepomp. Hiervan komt 30 GJ (71%, voetnoot 2) uit aquathermie en 12GJ uit elektriciteit.

1. een TEO-installatie waarbij ΔT is verdubbeld en het debiet gehalveerd ten opzichte van TEO_{ref} ('TEO10', levert dezelfde hoeveelheid warmte als TEO_{ref})
2. een TEO-installatie waarbij ΔT is verdubbeld en het debiet hetzelfde is ten opzichte van TEO_{ref} ('2TEO', levert 2x de hoeveelheid warmte als TEO_{ref})
3. een TEO-installatie waarbij zowel de ΔT als het debiet zijn gehalveerd ten opzichte van TEO_{ref} ('½TEO', levert de helft van de hoeveelheid warmte als TEO_{ref}).

De vergelijking tussen TEO_{ref} en TEO10 geeft inzicht in het effect op koude verspreiding wanneer meer warmte wordt onttrokken uit een kleiner volume water, waarbij de warmteopbrengst gelijk blijft. De vergelijking tussen TEO_{ref} en 2TEO laat het effect op koude verspreiding zien wanneer ΔT vergroot wordt. ½TEO is een variant die alleen gebruikt wordt voor het simuleren van TEO op kleine stilstaande, meervormige watersystemen omdat TEO_{ref} vermoedelijk te veel warmte onttrekt en leidt tot permanente afkoeling van het hele watersysteem.

Tabel 3: Scenario's voor verspreiding koudepluim

scenario	Q	deltaT	Koudevracht (=warmtevraag)		
	(m ³ /h)	(°C)	(gradC.m ³ /h)	(MW)	(TJ.100d)
TEO _{ref}	300	-5	1500	1,75	15
TEO10	150	-10	1500	1,75	15
2TEO	300	-10	3000	3,50	30
½TEO	150	-5	750	0,88	7,5

1.5 Modelopzet

Per watertype is een model gemaakt met Delft3D, de belangrijkste kenmerken van de opgezette modelberekeningen zijn samengevat in Tabel 4. Verder wordt in deze paragraaf de algemene opzet van de modellen beschreven.

Tabel 4 Overzicht modelopzet

Kenmerk	Dimensie	Opmerking	Stilstaand lijnvormig water (type1)	Stromend lijnvormig (type6)	Klein stilstaand meer (type2)	Groot stilstaand meer (type 4)
Lengte	M		50.000	50.000	150	1000
Breedte	M		50	25	150	1000
Vorm	-		rechthoek	rechthoek	vierkant	vierkant
Diepte	M	uniform	3.5	2.0	1.5	1.5
oppervlak	Ha		250	125	2.25	100
Volume	Mm3		nvt	nvt	0.038	1.5
grid resolutie x	M	lengte richting	5	5	5	5
grid resolutie y	M	dwars richting	5	5	5	5
grid resolutie z	Cm	verticaal	10	10	5	5
locatie inname	M	(lengte, dwars)	20.000, 0	10.000,0	50, 75	500, 500
locatie lozing	M	(lengte, dwars)	20.200, 0 (+200m)	10.200,0 (+200m)	100,75 (+50m)	550, 500 (+50m)

diepte lozing	Cm	onder water opp.	10-20	10-20	10-15	10-15
natuurlijk Debiet	m ³ /s	debiet	geen	1 (10)	geen	geen
benedenrand	M	waterstand	0	0	geen	geen
lucht- en watertemperatuur	°C		18	18	18	18
natuurlijke stroomsnelheid	m/d		0	1700	0	0
stroomsnelheid agv TEO (300m³/h)	m/d		40	144	32	5
verversingstijd TEO	d	tijd om meer 1x te circuleren met TEO water	nvt	nvt	4.8	208
	%	percentage gecirculeerd door TEO water per dag			21%	0.5%

- Zónder koudelozing zijn lucht en atmosfeer in dit model in evenwicht en blijft de watertemperatuur 18°C
- De uitwisseling met de atmosfeer (in W/m²) is in het model bepaald op basis van een constante luchttemperatuur ($T_{atm}=18^{\circ}C$) en de actuele watertemperatuur (T_w) die tijdens de simulatie wordt berekend (zie het netto stralingsmodel van Delft3D, heatflux model 3, eq. 9.258 in Delft3D Flow manual).
- De warmte uitwisselingscoëfficiënt tussen lucht en water is constant in de tijd en gelijk aan 20.1 W/m²/°C. Dit is een tamelijk conservatieve waarde die in de meeste omstandigheden kan worden gerealiseerd (Sweers, 1976).
- De netto stralingsflux van atmosfeer naar het water (W/m²) wordt berekend door het temperatuurverschil tussen water en atmosfeer (T_w-T_{atm}) te vermenigvuldigen met de warmte-uitwisselingscoëfficiënt.
- Geloosd water is, afhankelijk van de toegepaste TEO, 5 of 10°C kouder dan het ontvangend water. Dit leidt tot een toename in gewicht van respectievelijk 760 en 1230g/m³.
- Wind is 2m/s onder een hoek van 225 graden (ZW). Dit leidt dat een hoek van 45 graden voor de kanalen omdat deze oost-west georiënteerd zijn.
- Simulatie gaat door totdat de watertemperatuur niet meer verandert en er een stabiele situatie/ evenwichtssituatie is ontstaan.
- Er wordt onderscheid gemaakt in natuurlijke stroomsnelheid en stroomsnelheid als gevolg van de TEO-installatie. De stroomsnelheid is berekend met debiet / (breedte * diepte). Voor een meer is dat niet erg representatief (breedte = breedte van hele meer). Voor de natuurlijke stroomsnelheid wordt het natuurlijke debiet (1m³s voor stromend water) gebruikt en voor de stroomsnelheid als gevolg van TEO het debiet van de TEO installatie.

2 Resultaten illustratieve voorbeelden

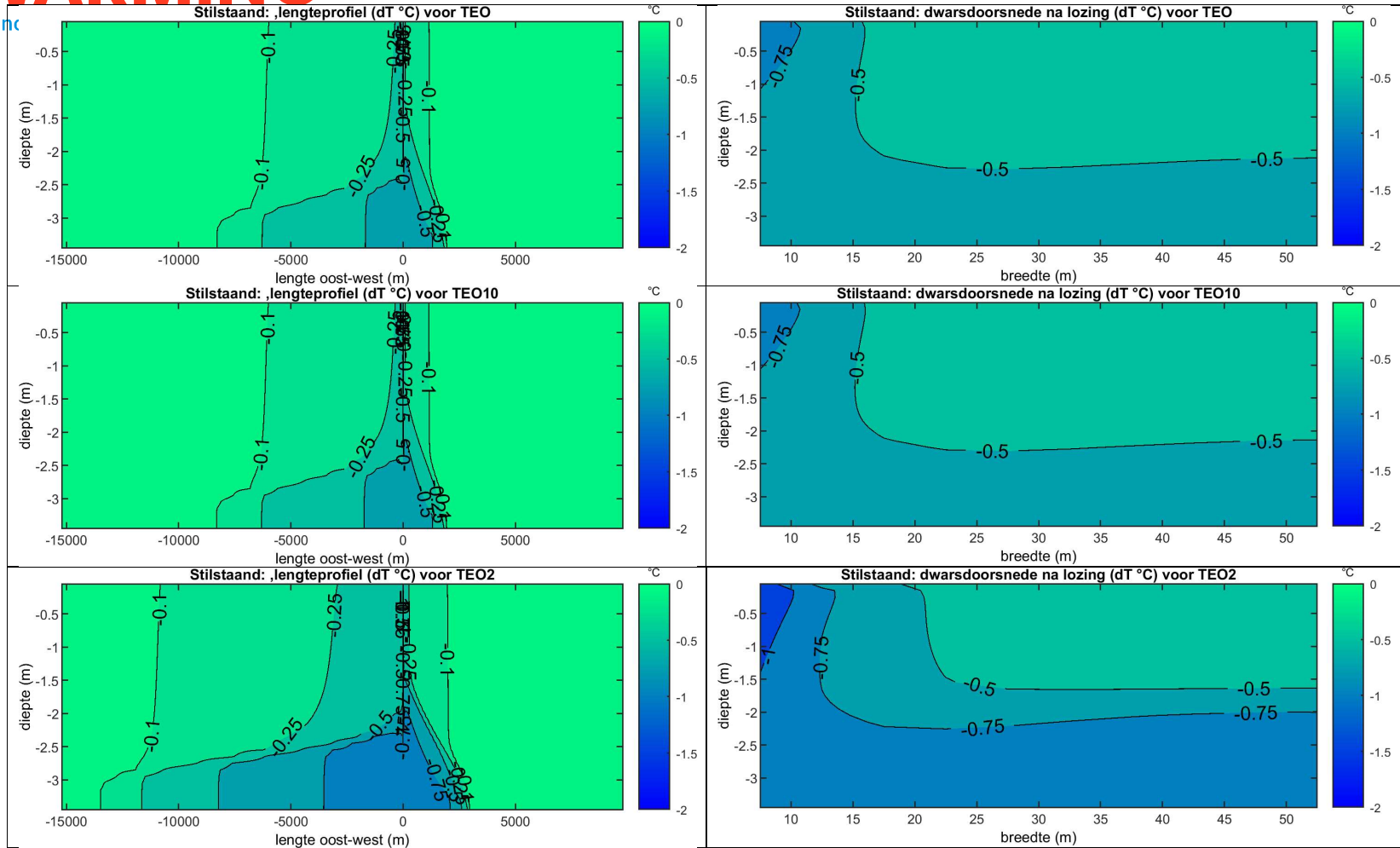
Dit hoofdstuk behandelt per watertype de meest karakteristieke eigenschappen van de verspreiding van de koudelozing. De gebruikte figuren geven de *verschil*temperatuur weer ten opzichte van de situatie zonder koudelozingen. De inname en lozing liggen 50-200m uiteen, waarbij de lozing rechts van de onttrekking ligt (zie ook Tabel 6). De lozingslocatie ligt in de figuren van de lengteprofielen altijd op het punt (0,0) en voor de dwarsprofielen aan de linkerkant van de figuren.

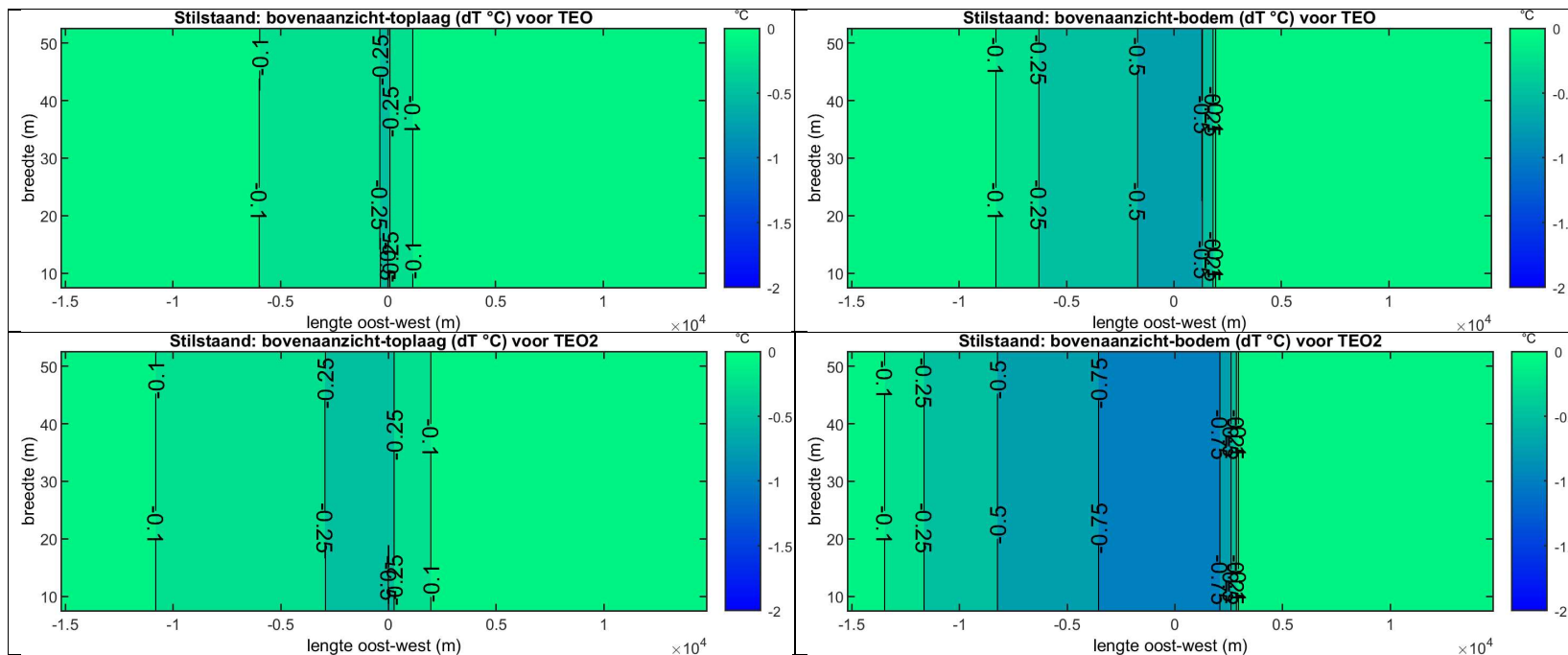
2.1 Koudelozing in stilstaand lijnvormig oppervlaktewater

Op basis van de simulatieresultaten (Figuur 1) valt op dat voor koudelozingen in het watertype “stilstaand, lijnvormig oppervlaktewater”:

- Koude zich naar beide kanten van het lozingspunt verspreidt
- TEO_{ref} en TEO_{10} vergelijkbaar zijn: dus bij het watertype stilstaand, lijnvormig is de warmtevraag (of koudelozing) bepalend voor de verspreiding van de koudelozing en niet de ΔT of het debiet.
- De (zuidwestelijke) wind van 2 m/s zorgt voor een duidelijke asymmetrie in de gelaagdheid van het water.
- De gelaagdheid is persistent vanaf 2.5 m diep, daarboven is het water vrijwel homogeen gemengd
- Er een duidelijke gelaagdheid ontstaat aan beide kanten van de lozing. Door de beperkte menging is de gelaagdheid meer uitgestrekt dan voor stromende wateren. Voor TEO_{ref} en TEO_{10} is de gelaagdheid zichtbaar tot zo’n 7.5 km en voor 2TEO tot zo’n 12.5 km.
- Er over de dwarsrichting ook een gelaagdheid ontstaat die na zo’n 15 m (TEO_{ref} en TEO_{10}) tot 22.5 m (2TEO) niet meer verandert.
- De initiële lozingstemperatuur niet terugkomt in de figuren. Door de directe menging van het lozingswater met het ontvangend water is de situatie ter plaatse van de lozing al sterk verdund (tot een ΔT van ca 1 graad), bij verdere verspreiding neemt het temperatuurverschil nog verder af.

Innk





Figuur 1: verzicht van een aantal figuren die het verschil in temperatuur veroorzaakt door TEO-installaties ten opzichte van een situatie zonder TEO-installatie weergeven voor stilstaande, lijnvormige oppervlaktewateren. De eerste drie rijen tonen het lengte profiel (links) en het dwars profiel ten hoogte van de lozing (rechts) voor respectievelijk de TEO_{ref}, TEO10 en 2TEO scenario's. De vierde rij toont het bovenaanzicht van de toplaag (links) en bodemlaag (rechts) voor het scenario TEO_{ref}. De onderste rij toont het bovenaanzicht van de top- en bodemlaag voor 2TEO.

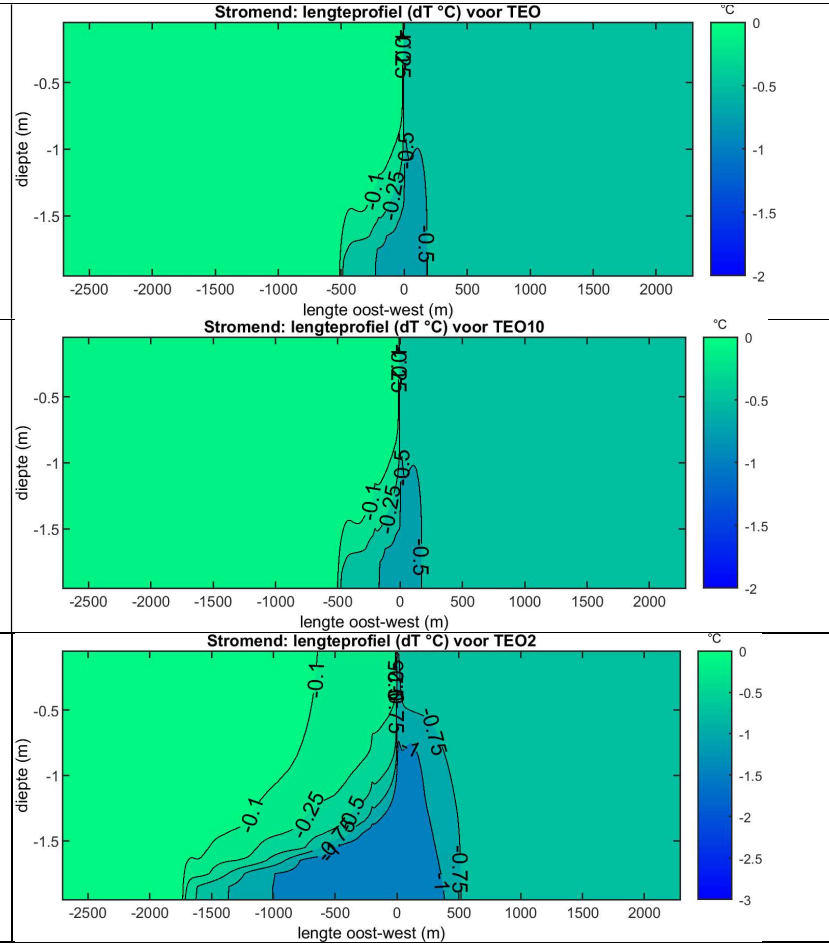
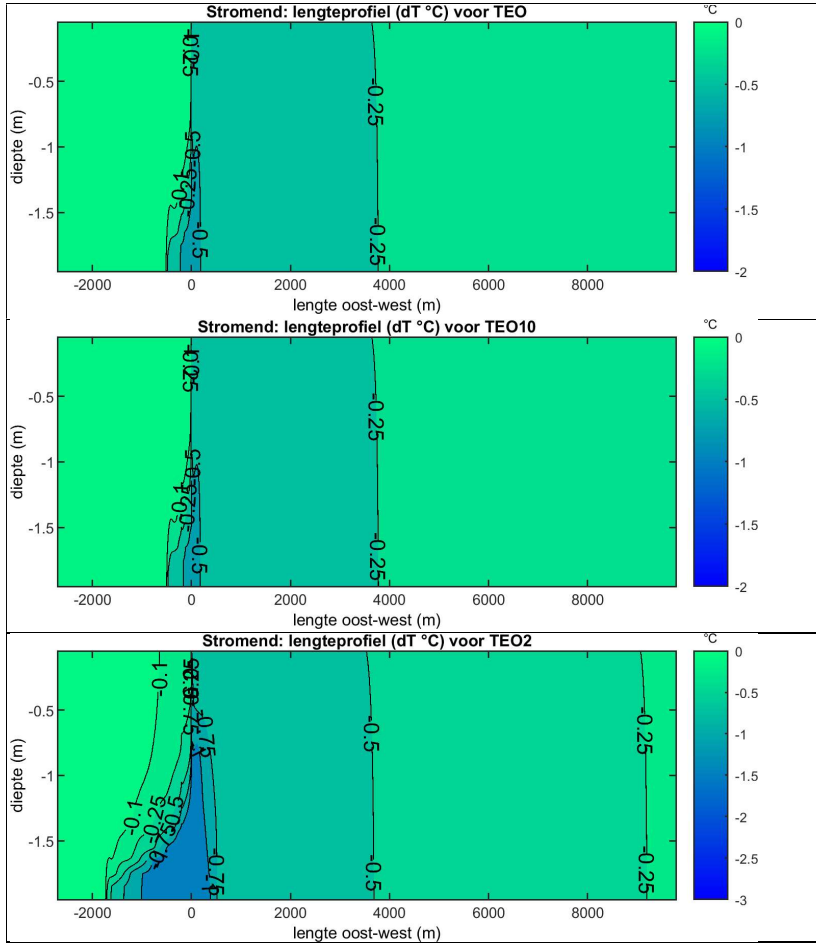
2.2 Koudelozing in stromend lijnvormig oppervlaktewater

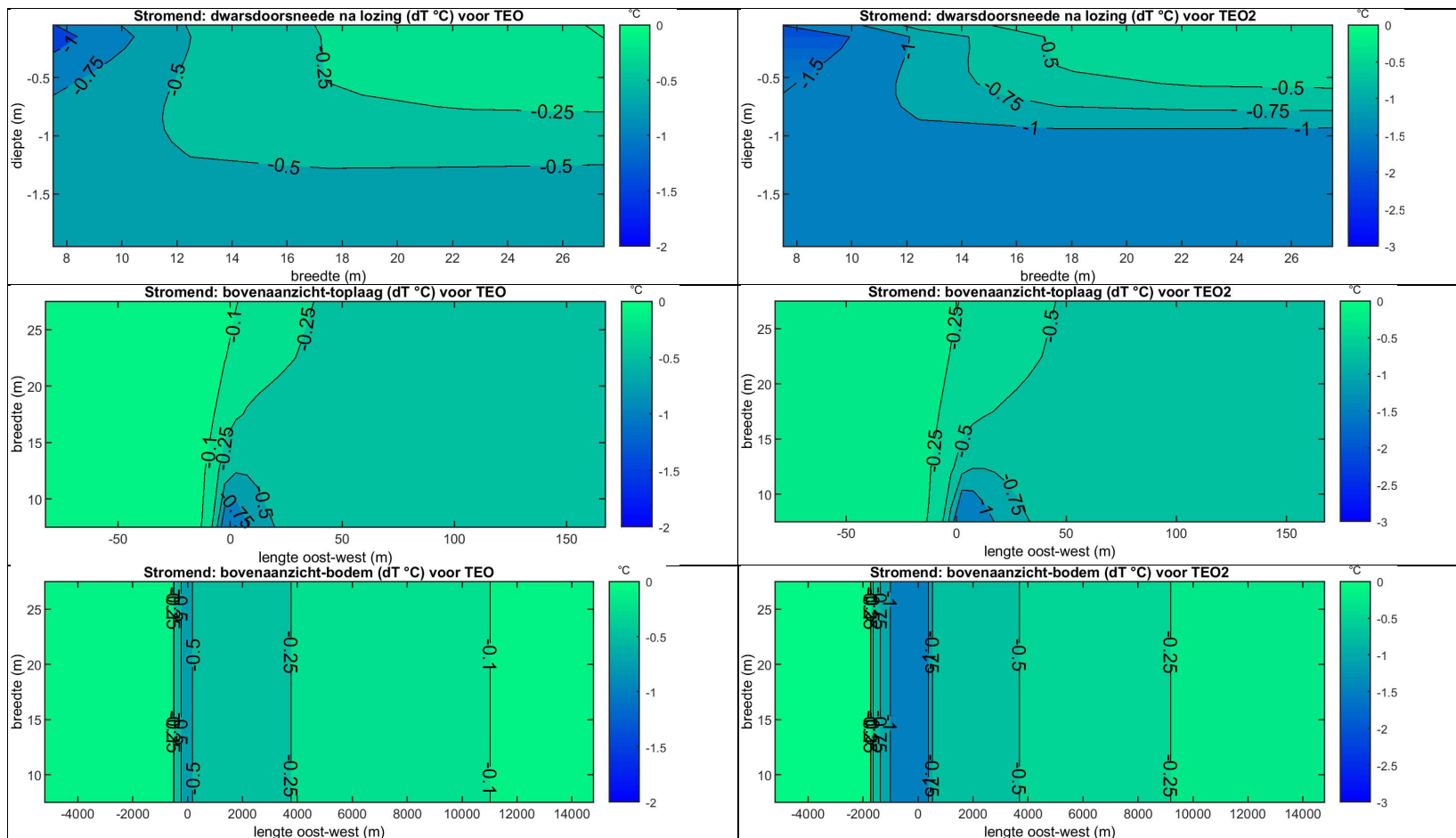
Op basis van de simulatieresultaten (Figuur 2) valt op dat voor koudelozingen in het watertype “stromend, lijnvormig oppervlaktewater”:

- Nauwelijks verschil zichtbaar is tussen TEO_{ref} en TEO_{10} . Dus met eenzelfde warmtelevering, maar met een verdubbelde ΔT en gehalveerd debiet, is de verspreiding van de koudelozing vergelijkbaar.
- Een verdubbeling van de warmte-onttrekking ($2TEO$ vs TEO_{ref}) leidt tot een 2x hogere ΔT in $2TEO$ dan in TEO_{ref} . Deze verdere afkoeling is ook zichtbaar in de tragere opwarming: ΔT in $2TEO$ blijft over een langere afstand groter en ook het dwarsprofiel laat een grotere ΔT zien dan voor TEO_{ref} .
- De grotere dichtheid van het koude water leidt benedenstrooms tot een beperkte gelaagdheid: na zo'n 200m (TEO_{ref} en TEO_{10}) en 500m ($2TEO$) is het water volledig gemengd.
- Bovenstrooms van de lozing ontstaat er ook gelaagdheid. Deze gelaagdheid strekt zich in de $2TEO$ berekening verder uit (circa tot 1700m) dan benedenstrooms, waar het water door de inname en de lozing van de installatie meer gemengd wordt. Bovenstrooms schuift het warmte (stromende) water rustiger over de koude onderlaag heen.
- Voor volledige opwarming is in dit rekenvoorbeeld een grote lengte benedenstrooms van de lozing nodig: na 10km is het water nog $0.2^{\circ}C$ kouder dan zonder TEO installatie het geval zou zijn.
- De initiële lozingstemperatuur niet terugkomt in de figuren. Door de directe menging van het lozingswater met het ontvangend water is de situatie ter plaatse van de lozing al sterk verdund (tot een ΔT van ca 1 graad), bij verdere verspreiding neemt het temperatuurverschil nog verder af.

Modeltechnisch zijn de volgende constatering van belang:

- Er is een traject van orde 1500-2000m waar temperatuurgelaagdheid optreedt, dit is de zone waar 3D modellering nodig is om de invloed van een koudelozing nauwkeuriger te kunnen kwantificeren
- Buiten deze “3D-zone” is de koude gemengd over diepte en breedte. Hier volstaat een 1D berekening in de langsrichting van de watergang. De berekening is daarmee goed met een 1D benadering te beschrijven met een eenvoudige analytische oplossing van de longitudinale gradiënt. De benadering heet ‘thermal decay’ theorie en gebruikt overigens alléén de breedte en afvoer van het kanaal, niet de diepte!
- Om stapeling van het effect van meerdere koudelozingen te beoordelen is ook dit “farfield” (=buiten de zone waar stratificatie speelt) van belang.





Figuur 2: Overzicht van een aantal figuren die het verschil in temperatuur veroorzaakt door TEO-installaties ten opzichte van een situatie zonder TEO-installatie weergeven voor stromende, lijnvormige oppervlaktewateren. De eerste drie rijen tonen het lengte profiel (links volledig, rechts ingezoomd) voor respectievelijk de TEO_{ref}, TEO10 en 2TEO scenario's. De vierde rij toont het dwarsprofiel ten hoogte van de lozing voor de scenario's TEO_{ref} en 2TEO. De onderste twee rijen tonen het bovenaanzicht van de toplaag en bodemlaag voor TEO_{ref} (links) en 2TEO (rechts).

2.3 Koudelozing in klein meer

De grootte van de referentie koudelozing is bijna 1% van het meervolume per uur. In 5 dagen kan het hele meervolume worden uitgewisseld/gecirculeerd. De verwachting vooraf is daarom dat de invloed van deze lozing in temperatuur zichtbaar zal zijn. In het beleidskader staat aangegeven dat voor dergelijke watertypen een lozing van 0.1% van het meervolume per zonder aanvullende toetsing vergunbaar is.

Op basis van de simulatieresultaten (Figuur 3 en Tabel 5) valt op dat voor koudelozingen in het watertype “klein, meervormig oppervlaktewater”:

- de onderlaag van het meer met 5°C en de toplaag met 3.5 - 4°C afkoelt bij TEO_{ref}. In deze situatie zien we een aanzienlijk grotere afkoeling dan in de lijnvormige watersystemen, voordat een nieuw evenwicht ontstaat met de warmte-opname vanuit de atmosfeer.
- De TEO met de halve warmtevraag (½TEO) laat een afkoeling van de onderlaag zien van 2.5°C en afkoeling van de toplaag met een kleine 2°C.
- Voor beide scenario's ontstaat een beperkte gelaagdheid: bijna het hele meer wordt afgekoeld, met een iets minder koude toplaag.

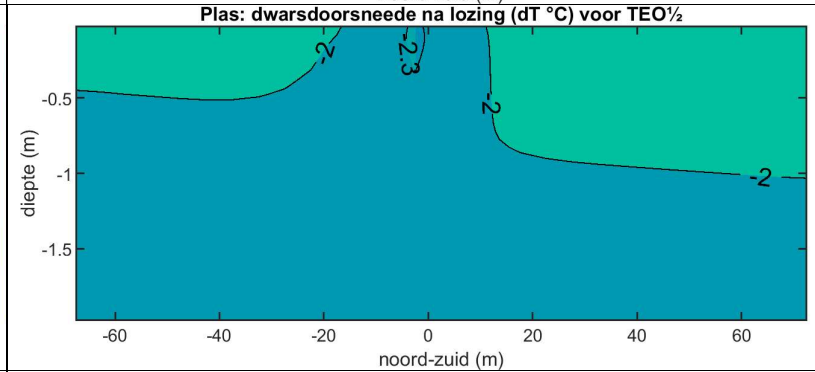
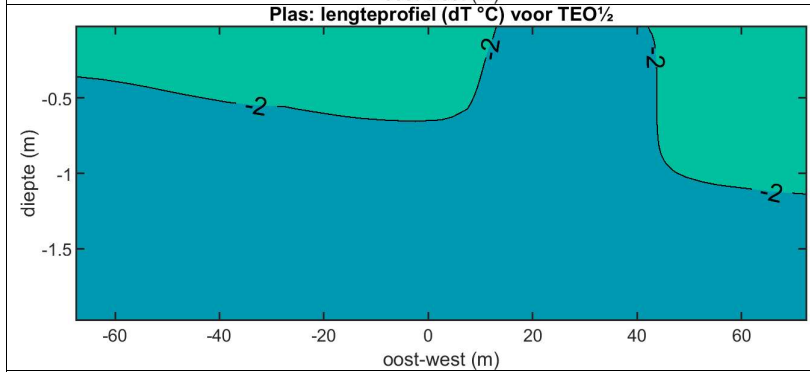
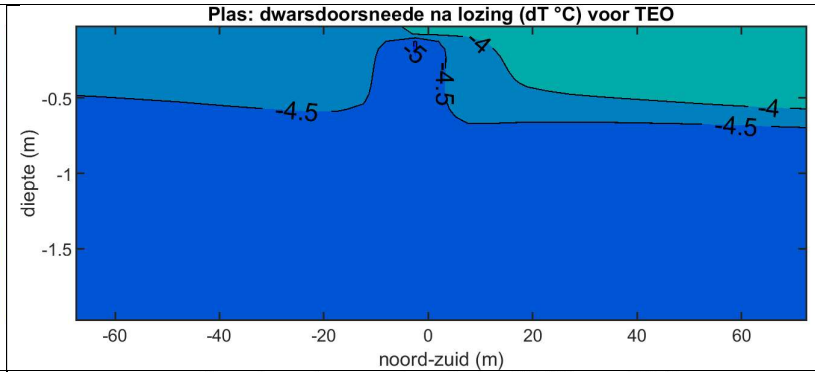
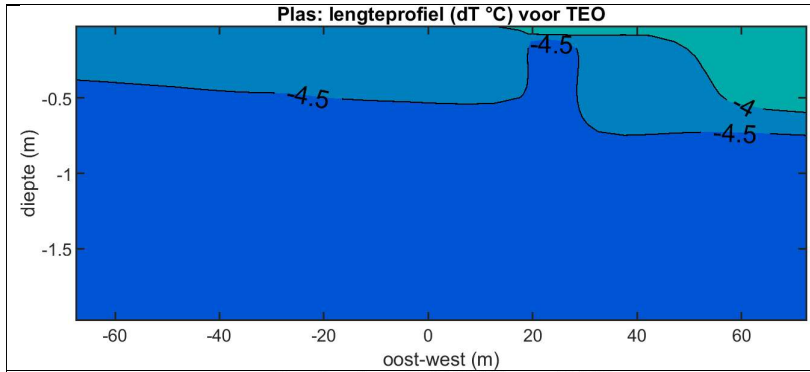
Voor de TEO_{ref} simulatie ontstaat thermisch evenwicht als het oppervlakte van het meer is afgekoeld met zo'n 4°C. Pas dan is de opwarming van het water door de atmosfeer gelijk aan de koudelozing: $150\text{m} \times 150\text{m} \times 4^\circ\text{C} \times 20 \text{ W/m}^2\text{C} = 1.6\text{MW}$ en kan er een stabiel temperatuurprofiel ontstaan. In dit evenwicht wordt er orde 70 W/m² aan warmte gewonnen.

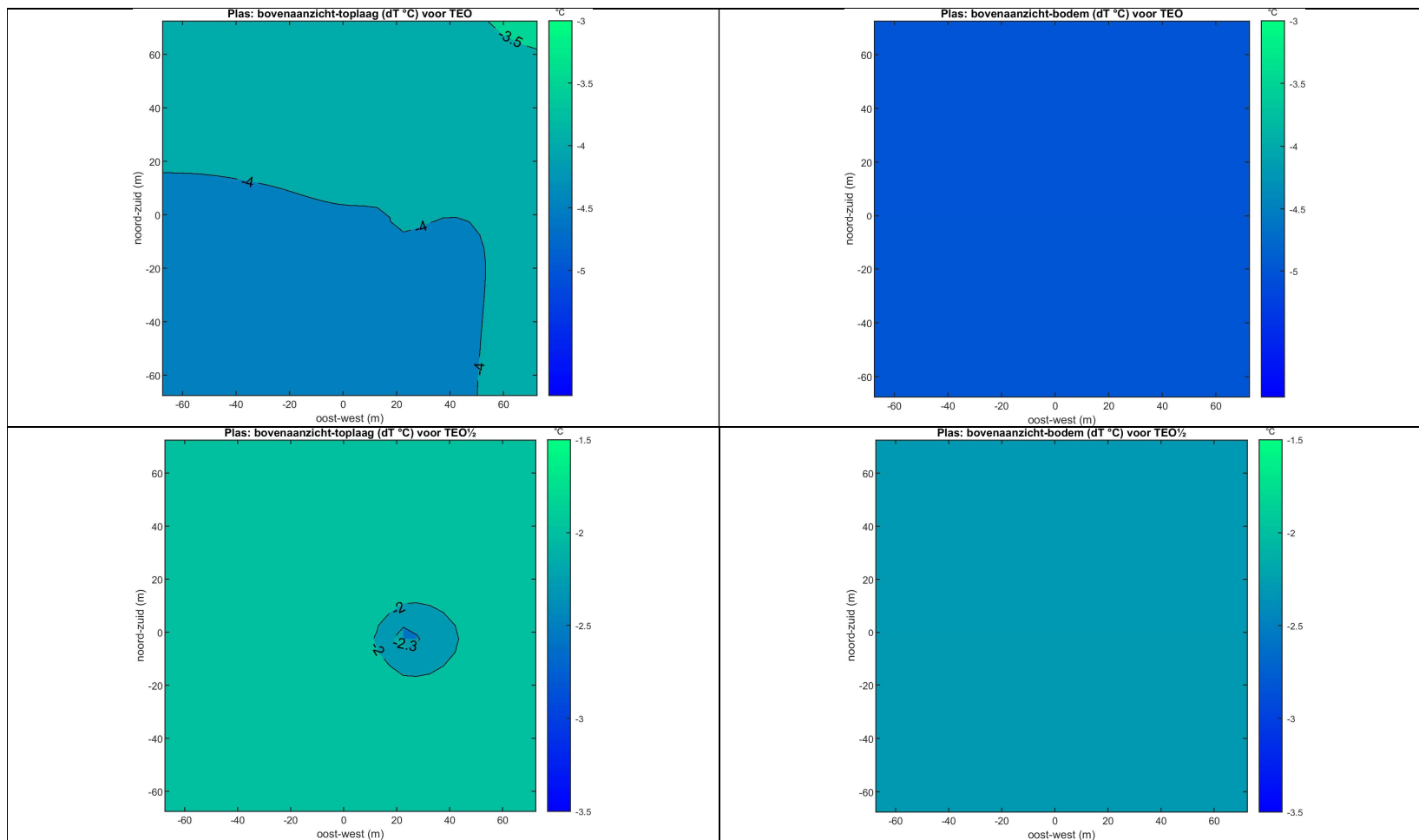
Voor het TEO-scenario met de dubbele warmte-onttrekking koelt het water nog verder af, tot wel 10 graden. Indien we de criteria uit het beleidskader hanteren dan is dit een situatie waarvoor niet direct vergund kan worden, maar waarvoor in ieder geval een maatwerkbeoordeling noodzakelijk is. In onderstaande tabel een samenvatting van resultaten.

Tabel 5 Afkoeling ondiep meer in verschillende scenario's

Scenario	Warmtelast (MW)	Afkoeling toplaag (°C)	Afkoeling onderlaag (°C)_
TEO _{ref}	1,75	3.5 - 4.0	4.5 - 5
1/2TEO	0,88	2	2.5
2TEO	3,50	8-9	10

Indien volledige menging van koude over het meer wordt verondersteld dan kan een snelle berekening van de te verwachten afkoeling voor een ondiep meer bij een lozing worden gemaakt. Zie hiervoor Bijlage 1.





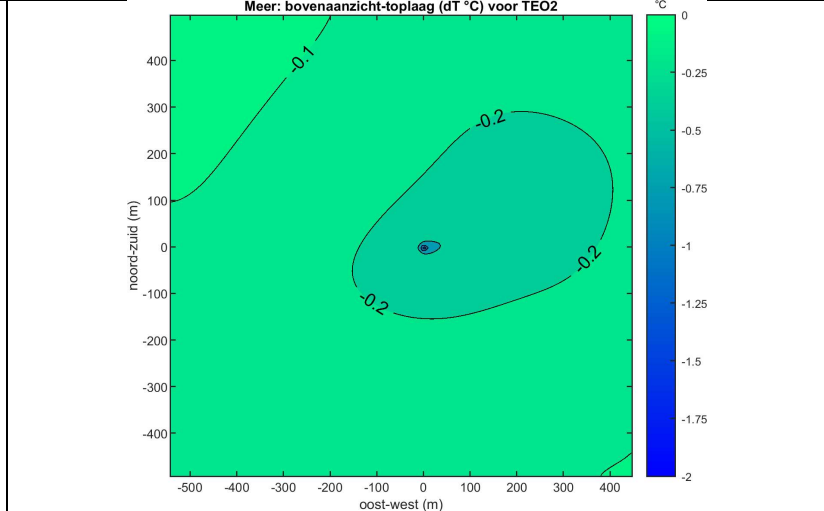
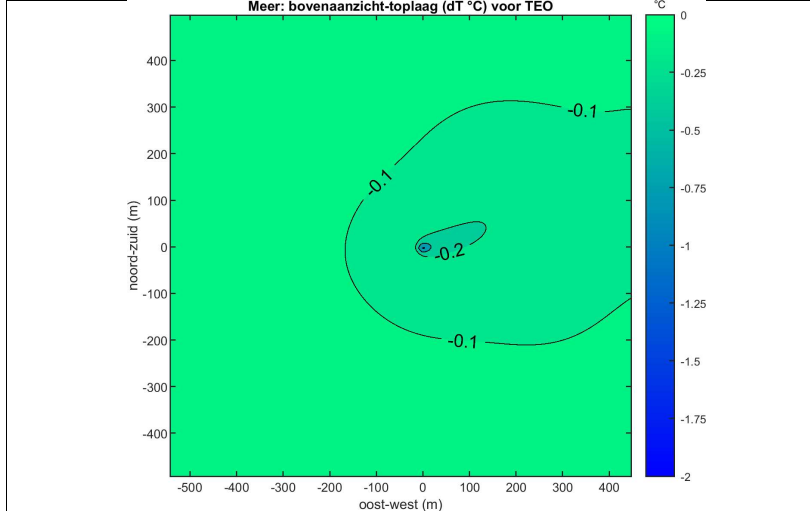
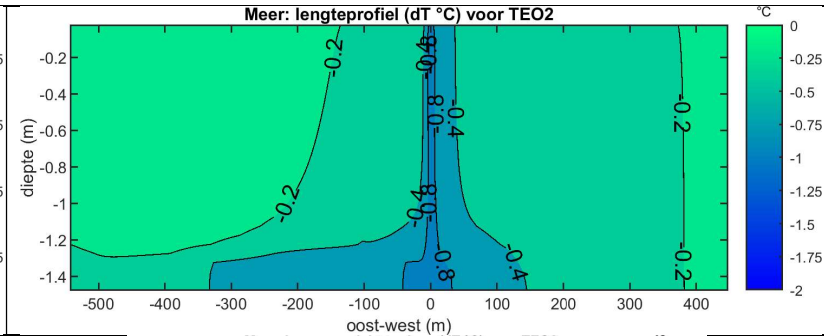
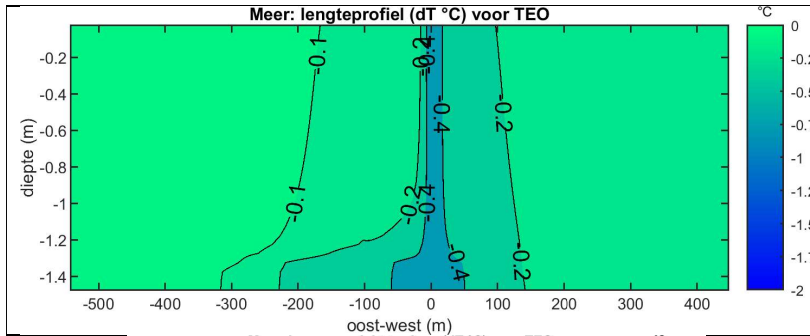
Figuur 3: Overzicht van een aantal figuren die het verschil in temperatuur veroorzaakt door TEO-installaties ten opzichte van een situatie zonder TEO-installatie weergeven voor kleine, stilstaande, meervormige oppervlaktewateren. De eerste twee rijen tonen het lengte profiel oost-west (links) en noord-zuid (rechts) voor respectievelijk de TEO_{ref} en 1/2TEO scenario's. De derde rij toont het bovenaanzicht van de top- (links) en bodemlaag (rechts) voor het scenario TEO_{ref}. De vierde rij toont de top- en bodemlaag voor 1/2TEO.

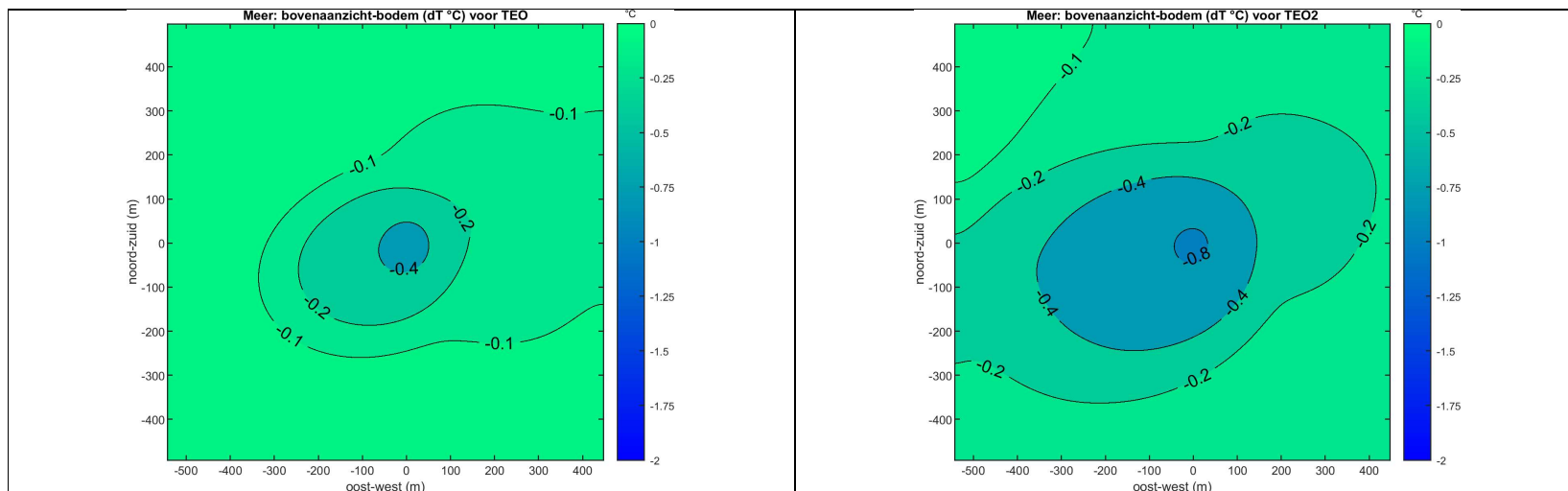
2.4 Koudelozing in groot meer

De grootte van de koudelozing is circa 0.02% van het meervolume per uur (0.5% per dag) voor het referentie-scenario. In ongeveer 200 dagen kan het hele meervolume worden uitgewisseld. De verwachting vooraf is daarom dat de invloed van deze lozing in temperatuur beperkt zichtbaar zal zijn. In het beleidskader staat aangegeven dat voor dergelijke watertypen een lozing van 0.1% van het meervolume zonder aanvullende toetsing vergunbaar is.

Op basis van de simulatieresultaten (Figuur 4Figuur 3) valt op dat voor koudelozingen in het watertype “groot, meervormig oppervlaktewater”:

- Een gelaagdheid ontstaat. Deze gelaagdheid is vergelijkbaar voor TEO_{ref} en TEO10 (niet getoond) en meer aanwezig voor 2TEO.
- De omvang van de gelaagdheid is voor TEO_{ref} nabij de bodem zo’n 200-500 meter waarbij de afkoeling maximaal 0.4°C bedraagt (zo’n 50*50 m). Voor 2TEO bedraagt de maximale afkoeling nabij de bodem -0.8°C (ook zo’n 50*50 m), maar wordt bijna het gehele meer beïnvloed door de koudelozing. Nabij het wateroppervlak is de omvang van de koudelozing in beide scenario’s kleiner.
- De wind en windrichting een belangrijke rol speelt in de vorm van de koudepluim. In de bovenaanzichten van de figuren is duidelijk te zien dat de koudwaterpluim zich in zuidwestelijke richting uitstrekt.





Figuur 4: Overzicht van een aantal figuren die het verschil in temperatuur veroorzaakt door TEO-installaties ten opzichte van een situatie zonder TEO-installatie weergeven voor grote, stilstaande, meervormige oppervlaktewateren. De eerste rij toont het lengte profiel oost-west voor het TEO (links) en 2TEO (rechts) scenario. De tweede rij toont het bovenaanzicht van de top- (links) en bodemlaag (rechts) voor het scenario TEO_{ref}. De vierde rij toont de top- en bodemlaag voor 2TEO.

3 Praktijkvoorbeelden

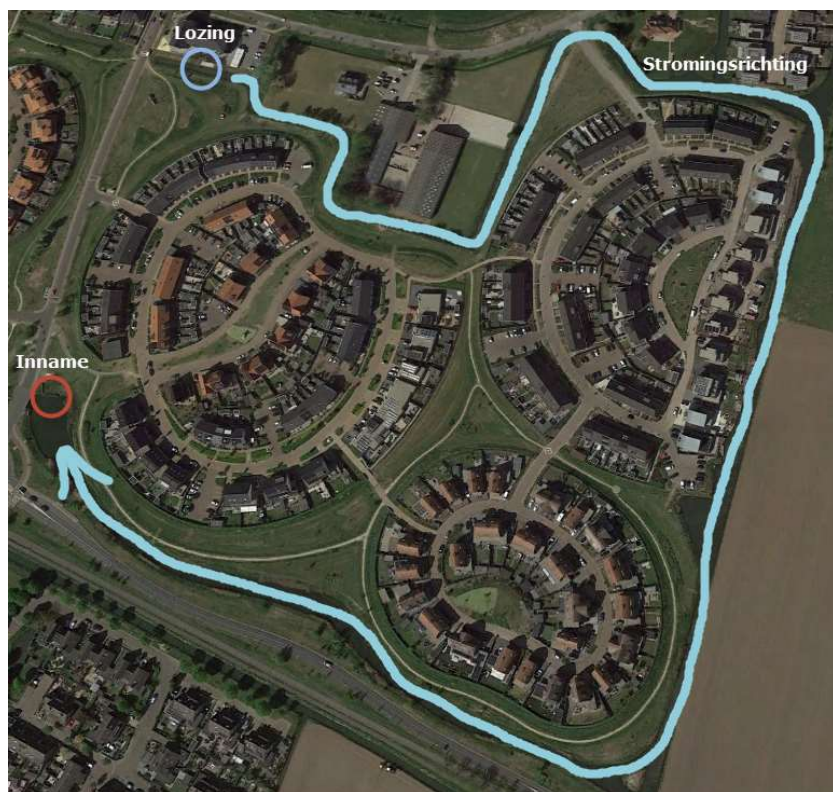
De algemene bevindingen uit de sterk geschematiseerde voorbeelden uit voorgaand hoofdstuk zijn nuttig voor een eerste inschatting van de verspreiding van de koude in de verschillende watertypen. Praktijkvoorbeelden kunnen aanvullend laten zien hoe koude zich in werkelijke situaties verspreidt. Deze praktijkvoorbeelden zijn realistischer, mede doordat er een dag-nachtritme en seizoensdynamiek wordt meegenomen en dragen daarmee verder bij aan begrip van de verspreiding van koudelozingen in complexere situaties. Bovendien geeft een vergelijking tussen de resultaten van de illustratieve en de praktijkvoorbeelden aan of de illustratieve voorbeelden een goed handvat bieden en waar ze van waarde zijn voor toekomstige praktijksituaties. Als praktijkvoorbeelden worden meegenomen de Sloterplas (Boderie en Troost, 2020), Weerwater (Pothof, 2017), Hoog Dalem (Boderie et al., 2018) en Plas Helsingen (TPA en Deltares, 2008). Dit zijn alle stagnante watertypen. Zie Tabel 6 voor systeemkenmerken.

Tabel 6: Overzicht van de kenmerken van de meegenomen praktijkvoorbeelden.

Praktijk voorbeeld	Hoog Dalem, Gorinchem	Weerwater, Almere	Plas Helsingen, Vianen	Sloterplas, Amsterdam
	Lijnvormig stagnant	meervormig, ondiep	meervormig diep	meervormig diep
Oppervlakte (ha)	0.96	150	3.5	92
B (m)	6	1200 ¹	190 ¹	nvt
D (m)	1.2	2	3	16 (max 37)
Q (m ³ /uur)	150	1800	50	650-5400
deltaT (°C)	3 tot 5	7	8	4.5 – 12
koudevracht	½TEO	8 TEO's	¼TEO	2 tot 40 TEO's
ad 1: berekend uit oppervlak aangenomen dat de plas vierkant is				

3.1 Hoog Dalem

Het slotensysteem in de wijk Hoog Dalem in Gorinchem vult aan op de illustratieve voorbeelden van lijnvormige wateren. Er is van nature in de zomer geen stroming in het systeem. In Hoog Dalem wordt water ingenomen in het ene eindpunt van het systeem en geloosd in het andere eindpunt (Figuur 5), waardoor kunstmatige stroming wordt gecreëerd. De afstand die het water aflegt tussen de punten is 1600m en dat duurt zo'n 3 dagen. Als gevolg van de TEO-installatie stroomt het water met een snelheid die het midden houdt tussen stromende en stilstaande wateren. De TEO-installatie loost water met een maximaal debiet van 150m³/uur en een ΔT van 3 tot 5°C en is enkel in de zomerperiode actief. Met deze TEO-installatie worden ongeveer 200 woningen verwarmd en komt overeen met een halve TEO_{ref}.



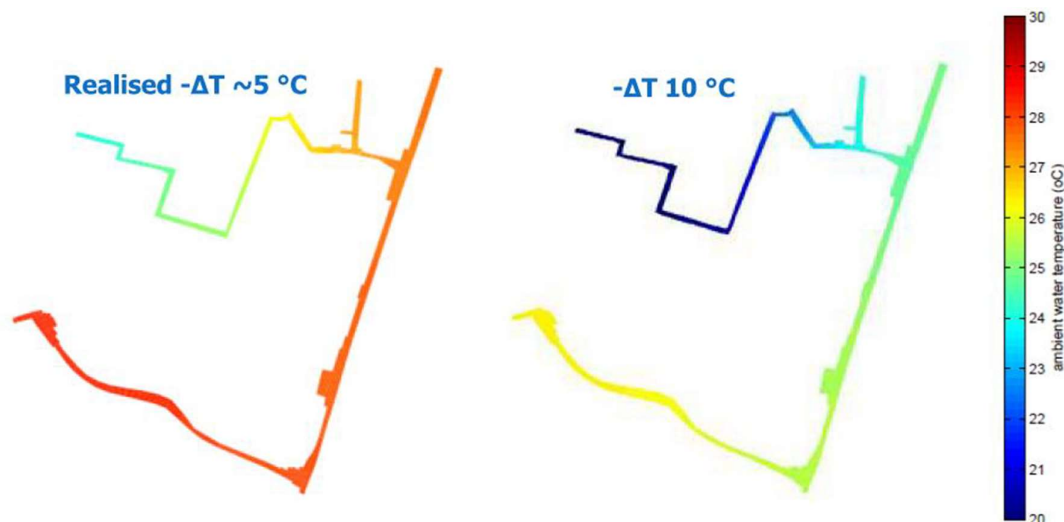
Figuur 5: Inname (rode cirkel) - en lozingspunt (blauwe cirkel) van de TEO-installatie in Hoog Dalem. De lichtblauwe lijn geeft de route van het water aan.

In het veld zijn tijdens het in werking zijn van de TEO-installatie temperatuur, andere waterkwaliteitsparameters en vegetatie gemonitord. De monitoring vond plaats op 4 locaties verdeeld over de 1600m lengte van het slootsysteem. Uit de veldmetingen bleek dat er in ieder geval stratificatie is nabij het lozingspunt en alleen optreedt tijdens de dag. De metingen toonde ook aan dat de ½TEO klein genoeg was om de watertemperatuur over het 1600m traject te herstellen. Opgemerkt moet worden dat met veldmetingen restkoude van orde grootte 0.5°C niet gemeten kan worden.

Naast de veldmetingen is ook de temperatuur gemodelleerd. De metingen kunnen met een model redelijk goed worden beschreven. Een 1D model (Sobek) voldoet in dit praktijkvoorbeeld óók goed omdat het water, als gevolg van de geringe diepte en aanwezigheid van waterplanten en bochten ,goed mengt. Er zijn twee simulaties uitgevoerd: één waarbij de werkelijke ΔT van 5°C is gehanteerd en één waarbij de koudevracht is verdubbeld door een ΔT van 10°C te veronderstellen bij gelijkblijvend debiet. Modelresultaten van een ΔT van 10°C gaven aan dat het watersysteem te klein is om terug in evenwicht te komen met de atmosfeer: het water op het innamepunt werd 3°C koeler (Figuur 6).

Het herstel vermogen (lengte waarop de koude nagenoeg is verdwenen) van deze praktijkcase is niet direct te vergelijken met de illustratieve voorbeelden van lijnvormige wateren omdat de situatie te veel verschilt. Om na te gaan hoe dit praktijkvoorbeeld zich verhoudt tot de illustratieve voorbeelden, is met dezelfde model instellingen als die van de illustratieve voorbeelden Hoog

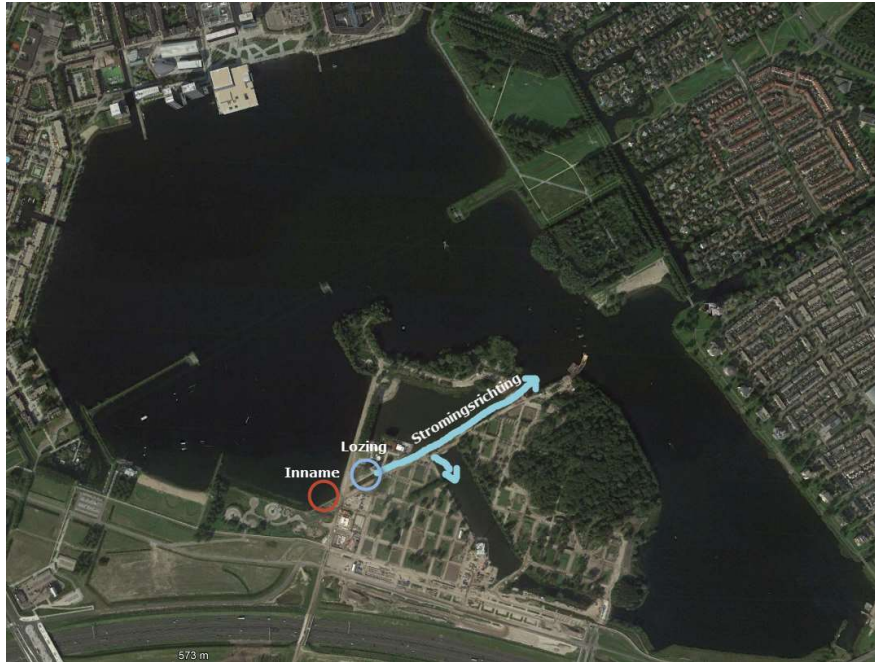
Dalem opnieuw doorgerekend. Daarbij blijkt dat bij een atmosferische warmte flux van 20 W/m²/°C er in Hoog Dalem op 1600 nog een 1.5°C ΔT bestaat. Dit is een onderschatting van het herstelvermogen op basis van de gemeten watertemperatuur. De benadering in de illustratieve voorbeelden lijkt dus, zoals bedoeld, conservatief. Een warmteflux van 30W/m²/°C zou in het geval van Hoog Dalem leiden tot de veronderstelde ΔT van 0.5°C.



Figuur 6: Verloop van de gemodelleerde watertemperatuur (SOBEK, dieptegemiddeld) op een warme dag (4 juli 2015) met (links) koudelozing zoals door Eneco in 2015 gerealiseerd (dT=-5°C) en (rechts) een fictieve koudelozing van dT= -10°C bij het door Eneco gerealiseerde debiet in 2015). (Bron Boderie et al, 2018)

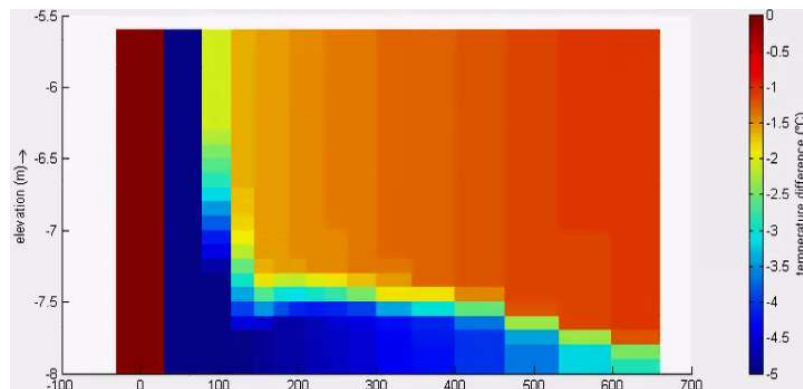
3.2 Weerwater

Het Weerwater in Almere sluit aan bij het illustratieve voorbeeld van de matig grote, ondiepe plas (150 ha en 2 meter diep), hoewel de lozing plaats heeft in een meer sloot-achtig deel van het watersysteem. De TEO-installatie is ten tijde van de uitgevoerde verkennende modelstudie (Pothof, 2017; Pothof en Boderie, 2017) nog niet gerealiseerd. De studie had als doel om na te gaan of een TEO-installatie een voldoende grote bijdrage aan warmte kon leveren voor de Floriade en omgeving: zo'n 660 paviljoens en circa 50 000m² aan utiliteitsgebouwen. De warmtevraag geleverd door de TEO-installatie werd geschat op 25 TJ. Er is tijdens de studie uitgegaan van een ΔT van 7°C en een debiet van 1800 m³/uur.

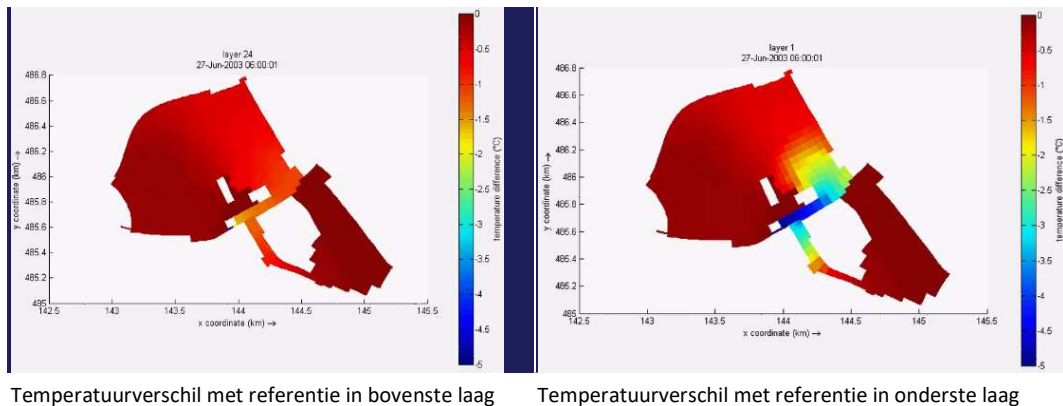


Figuur 7: Inname (rode cirkel) - en lozingspunt (blauwe cirkel) van de fictieve TEO-installatie in het Weerwater. De lichtblauwe lijn geeft de route van het water aan

Alhoewel voor dit praktijkvoorbeeld alleen modelresultaten beschikbaar zijn, geven ze meer inzicht in hoe een koudepluim zich door een systeem verspreidt dan de illustratieve voorbeelden doordat gebruik is gemaakt van gemeten luchttemperatuur, windsnelheden en -richtingen. Figuur 8 en Figuur 9 laten zien dat er een koudepluim nabij de bodem ontstaat. De omvang ervan is afhankelijk van windgedreven menging van het water. De koudepluim nabij de bodem is zichtbaar over meer dan 650 meter en waaiert uit wanneer daarvoor de ruimte is. De lengte van de koudepluim is, wederom door een grotere mate van windgedreven menging, korter dan in de illustratieve voorbeelden. Er is geen 'stroomopwaartse' koudepluim zichtbaar door de geïsoleerde ligging van het lozingspunt. De watertemperatuur in de ondiepere waterlagen laten hetzelfde uitdivingseffect van verschil in temperatuur zien als de illustratieve voorbeelden.



Figuur 8: dwarsdoorsnede van het verschil in temperatuur tussen de referentiesituatie en de gesimuleerde koudelozing in het Weerwater op 27/06/2003 om 06:00:00. De lozingslocatie is op 20 meter. Overgenomen uit Pothof en Boderie, 2017.



Figuur 9: bovenaanzicht van het verschil in temperatuur tussen de referentiesituatie en de gesimuleerde koudelozing in het Weerwater op 27/06/2003 om 06:00:00, Links het bovenaanzicht van de bovenste waterlaag, rechts van de onderste waterlaag. Het temperatuurverschil gaat van -5°C (donkerblauw) tot 0°C (donkerrood). Overgenomen uit Pothof en Boderie, 2017.

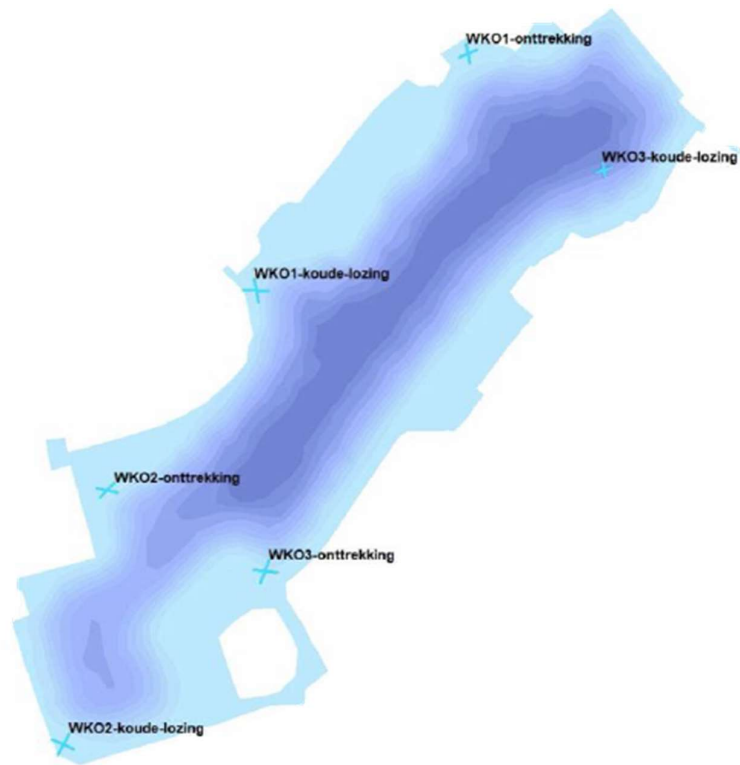
3.3 Plas Helsdingen

Plas Helsdingen bij Vianen is een praktijkvoorbeeld van een kleine, ondiepe plas, waar een aantal diepere putten in voorkomen. In het onderzoek van 2008 (TPA en Deltares) is gekeken of warmte uit Plas Helsdingen gebruikt kan worden om de warmte-onbalans uit een bestaande WKO aan te vullen. De onbalans bedraagt 2.7 TJ op jaarbasis. Om de WKO aan te vullen met warmte wordt uitgegaan van een TEO-installatie met een debiet van 50m³/uur en een ΔT van 8°C.

In de simulatie met een TEO-installatie blijkt dat de onttrekking van warmte de toplaag van het water afkoelt met circa 2°C. De afkoeling van het water is in overeenstemming met het illustratieve voorbeeld van een kleine, ondiepe plas: het wateroppervlak en menging in het systeem is onvoldoende groot ten opzichte van de onttrokken warmte om in evenwicht te komen met de luchttemperatuur. In het praktijkvoorbeeld is ook gekeken naar het effect van lozing van koude op een grotere diepte (in de aanwezige diepe putten). Dit heeft geen effect op de temperatuur van het oppervlakte water, maar leidt wel tot een ‘stabielere’ stratificatie: de stratificatie is zonder TEO-installatie ook aanwezig, maar door de koudelozing neemt het verschil in temperatuur tussen het oppervlaktewater en in de diepe putten verder toe. Dit heeft gevolgen voor de stabiliteit van de stratificatie.

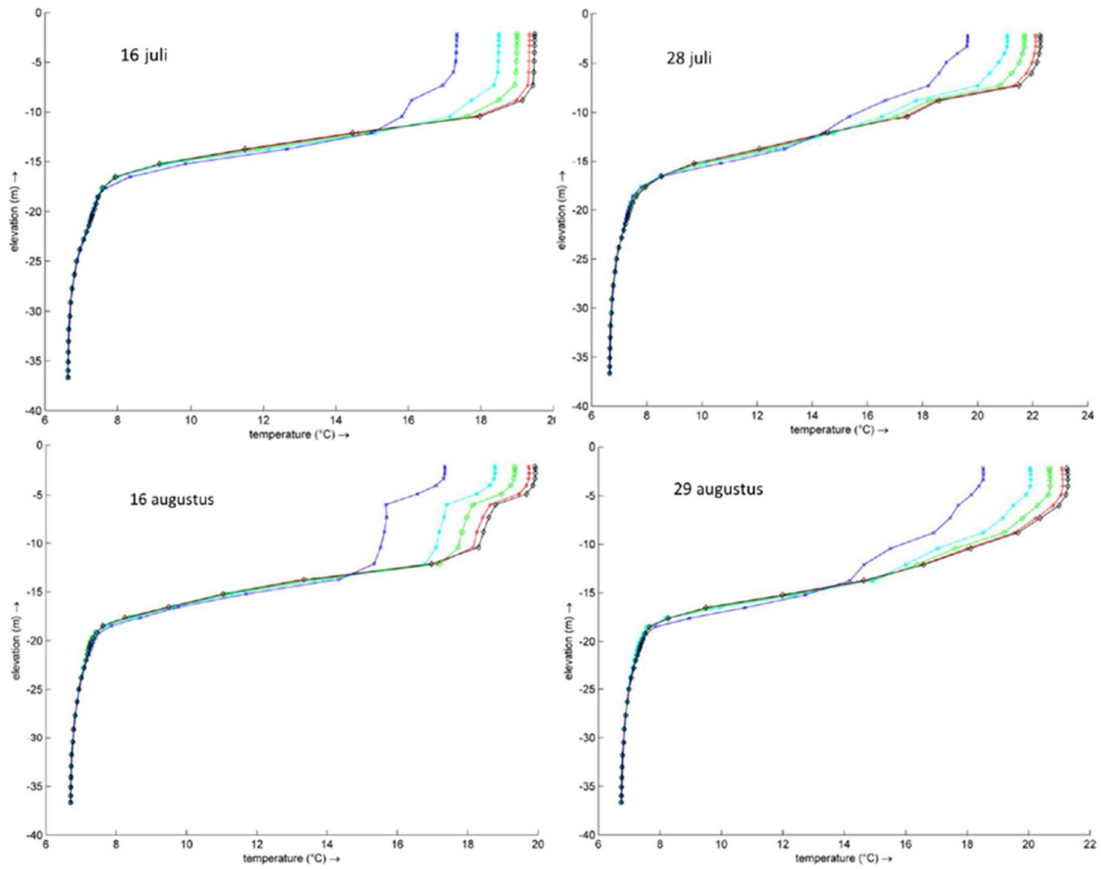
3.4 TEO Sloterplas

Alhoewel de Sloterplas (Amsterdam) geen tegenhanger heeft qua illustratief voorbeeld, is het een interessante casus om op te nemen in als praktijkvoorbeeld voor een diepe plas vanwege mogelijk effecten van koudelozingen op stratificatie. Het doel van de modelverkenning was het in kaart brengen van effecten van koudelozingen op de waterkwaliteit: kan een koudelozing het wateroppervlak dusdanig afkoelen dat het de blauwalgengroei remt? Hiervoor is een aantal scenario’s doorgerekend, waarbij drie TEO-installaties worden verondersteld (zie Figuur 10). De scenario’s variëren in debiet (650 – 5400 m³/h) en in ΔT (4.5 - 12°C).



Figuur 10: Sloterplass en de drie TEO-installaties met bijbehorende onttrekking en lozing (overgenomen van Boderie en Troost, 2020)

De simulaties laten zien dat de koudelozingen leiden tot afkoeling van de bovenste waterlagen. Door opwarming van het water door de atmosfeer ontstaat er een evenwichtssituatie: de maximale afkoeling blijft beperkt tot -2.5°C voor de meest extreme TEO-variant (Figuur 11). De afkoeling van de bovenste waterlagen leidt niet tot het ontstaan van stratificatie. Stratificatie is aanwezig in de referentiesituatie (zonder koudelozingen), maar ook wanneer TEO-installaties operationeel zijn. Het verschil is dat het epilimnion geleidelijk toeneemt van zo'n 5 m naar 10 m aan het einde van de zomer.



Figuur 11: Verticaal profiel van de temperatuur op één locatie in het midden van de Slotterplas op vier verschillende dagen en voor de referentiesituatie (zwart, meest rechtse lijn in de figuren) en de vier onderzochte WKO varianten: rood de minst extreme variant – blauw de meest extreme variant (Boderie en Troost, 2020).

4 Inzichten in de koudelozing

De illustratieve en praktijkvoorbeelden hebben een aantal sturende variabelen voor de verspreiding van een koudelozing getoond. Deze worden in dit hoofdstuk kort samengevat waarna besproken wordt hoe dit inzicht kan dienen voor een afweging van het wel of niet vergunnen van TEO-installatie.

4.1 Sturende variabelen en hun effecten op de verspreiding van een koudelozing

- Stromend of stilstaand
 - Of een watersysteem stromend of stilstaand is, is belangrijk voor de mate van menging (vergelijk Figuur 1 en Figuur 2). In systemen zonder menging blijft de koude onderin zitten, en koelt het oppervlak van het waterlichaam nauwelijks af. Aangezien aan het oppervlak de warmteuitwisseling met de atmosfeer plaatsvindt, wordt er derhalve nauwelijks extra warmte toegevoerd vanuit de atmosfeer naar het ongemengde watersysteem. Daarom is er in meer gemengde systemen een grotere warmtetoevoer vanuit de atmosfeer, en is er derhalve minder effect van eenzelfde koudelozing. Stroming geeft meer menging door turbulentie, daardoor is er in stromend water minder effect van een koudelozing.
 - In langzaam stromend water ontstaat stroomopwaarts een duidelijke koudepluim bij de bodem die enkele honderden meters tot kilometers waarneembaar is (Figuur 2). Stroomafwaarts ontstaat er niet zozeer een koudepluim, maar eerder een temperatuurgradiënt van kouder water naar water dat qua temperatuur in evenwicht is met de atmosfeer (paragraaf 2.2 en 3.1).
 - In stilstaand water waaiert de koudepluim uit en ontstaat rondom het lozingspunt een koudepluim bij de bodem: de temperatuurgradiënt over de gehele waterkolom, zoals deze zich voordoet bij stromende lijnvormige wateren, is zichtbaar bóven de koudepluim (paragraaf 2.1 en 3.2). De vorm van de pluim wordt gestuurd door de windrichting (paragraaf 2.1 en 2.4) en vorm van het watersysteem (3.2).
 - Voor zowel stromende als stilstaande wateren is de invloed van wind duidelijk zichtbaar, in de vorm en de assymetrie van de koudepluim.
- Type water: lijn- of meervormig
 - In een lijnvormig watersysteem bedekt de koudepluim de gehele breedte van de watergang (Figuur 1). Het is (nog) onbekend hoe breed een watergang moet zijn en/of hoe snel het water moet stromen voordat de koudepluim niet de gehele watergang bedekt.
 - In een meervormig watersysteem verspreidt de koudepluim zich om het lozingspunt heen. De vorm van de pluim wordt bepaald door de windrichting (Figuur 4) en de vorm van het watersysteem (3.2).
- Dimensies van het watersysteem
 - Het oppervlak van een watersysteem, samen met de mate van menging is bepalend voor de mate van uitwisseling van temperatuur tussen atmosfeer en water. Hoe meer oppervlak een watersysteem heeft, des te kleiner het effect van een koudelozing, omdat er meer warmte wordt aangevuld vanuit de atmosfeer..

Een waterlichaam met kleiner volume heeft eerder te maken met algehele afkoeling dan waterlichamen met grotere volumes (vergelijk 2.3 en 3.3 met 2.4 en 3.2). In de kleinere systemen is nauwelijks sprake van een koudepluim: het hele systeem is er één.

- De diepte van een watersysteem leidt tot wel of geen stratificatie. Het toevoegen van een koudelozing kan leiden tot het ontstaan van (micro-)stratificatie door het vormen van een koudepluim (zie 2.1, 2.4 en 3.1) of een verandering in de reeds van nature voorkomende stratificatie, waarbij de lozingsdiepte bepalend kan zijn voor een toe- of afname in stabiliteit van de stratificatie (3.3 en 3.4)
- Koudevracht
 - Een specifieke koudevracht kan verkregen worden door verschillende combinaties van debiet en ΔT s. Het blijkt dat een voor de verspreiding van een koudelozing de koudevracht sturend is en niet een verandering in debiet of ΔT (scenario X en Y van de illustratieve voorbeelden)
- Klein meer: de warmteonttrekking is groot tov capaciteit; er ontstaat een nieuw evenwicht bij continue warmteonttrekking, die in balans is met de hoeveelheid warmte die vanuit de atmosfeer weer wordt toegevoerd aan het waterlichaam. Voor dit effect is een simpele benadering mogelijk. Deze uitwerking is beschreven in Bijlage 1.
- De invloed van een individuele installatie is door de geringe temperatuurverlaging niet eenvoudig meetbaar, zeker in het 'farfield' kan het effect niet middels veldmetingen van natuurlijke variaties worden onderscheiden. **Let op:** temperatuurverschillen van 0.5°C kunnen met veldmetingen niet tot nauwelijks worden vastgesteld.

In bovenstaande opsomming ontbreekt (nog) kennis over de effecten van sloop- en recreatievaart op de mate van menging en daarmee de verspreiding van een koudelozing. Ook is nog niet expliciet gekeken naar de effecten van meerdere TEO-installaties op de verspreiding van koudepluimen: duidelijk is dat een koudepluim nabij de bodem lang zichtbaar kan blijven: hoe dat uitwerkt met meerdere TEO-installaties is onbekend.

5 Hoe dit document te gebruiken?

Dit document geeft inzicht in hoe koudelozingen zich in verschillende typen wateren verspreiden. Dit inzicht geeft een handvat voor vergunningverleners om een gevoel te krijgen voor de omvang van een bepaalde koudelozing en de verspreiding in een specifiek watersysteem. Omdat dit document geen kengetallen geeft, is voor een meer accurate inschatting van de verspreiding van een koudelozing een berekening ala de emissie-imissie toets (deze wordt momenteel verder ontwikkeld voor koudelozingen; <https://www.immissietoets.nl>) of een simulatie met een daarvoor toereikend modelinstrumentarium aan te bevelen (Bijstra en Boderie, 2021). Zie voor de mogelijkheden ook de notitie Modelinstrumentarium Koudelozingen (Boderie, ...). Ook het toetsen van de dynamiek van een koudepluim wanneer meerdere TEO-installaties op één waterlichaam lozen zal in meer detail onderzocht moeten worden: daar bieden de getoonde illustratieve en praktijkvoorbeelden te weinig handvatten voor.

De crux van de verspreiding van koudelozingen zit, naast het voorkomen van een recirculatieflux, in de effecten ervan op het ecologisch functioneren van een watersysteem. Er is weinig bekend hoe

(tijdelijke) afkoeling van een (deel van een) watersysteem ingrijpt op het ecologisch functioneren ervan. Om hier zicht op te krijgen is er:

- Een beoordelingskader koudelozingen opgesteld (Kruitwagen et al., 2021)
- Een propositie opgesteld voor het opzetten van een landelijk monitoringsnetwerk voor de effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van watersystemen (nog niet gepubliceerd).
- Een bureaustudie uitgevoerd naar de huidige stand van kennis op dit gebied (levend document, Harezlak, 2021),

Hoe kan dit document ingezet worden in het vergunningverleningsproces? In combinatie met het beoordelingskader koudelozingen, waarin per watertype wordt aangegeven wat de toegestane verspreiding van koude is, kan geschat worden of een koudelozing binnen deze grenzen valt of niet. Bij twijfel of onvoldoende informatie biedt een maatwerkbeoordeling uitkomst. Echter, de kennis gepresenteerd in onderliggend document zijn geen kengetallen: er wordt een richting aangegeven. Een verdere aanscherping van deze kennis is daarom wenselijk.

In het nog op te zetten landelijk monitoringsnetwerk wordt beoogd om op een efficiënte manier data te verzamelen over de verspreiding van koudelozingen in verschillende systemen en onder verschillende condities. Deze data is nodig om koudelozing in modellen, zoals Delft3D, te kunnen valideren. Op basis van de velddata en modellen kunnen kengetallen afgeleid worden, waardoor betere inschattingen voor vergunningverlening gedaan kunnen worden.

Aandachtspunt daarbij is de nauwkeurigheid van de meetinstrumenten. Kleine temperatuurverschillen ($< 0.5\text{grad}$) kunnen niet worden gemeten. Het meten van veranderingen in ecologie bij een dergelijke kleine temperatuurverandering is een onmogelijke opgave.

Een cruciaal punt in het vergunnen van een TEO-installatie is het effect op het ecologisch functioneren: wanneer (in tijd en ruimte) zorgt het afkoelen van water voor een verandering? In het levend document (Harezlak, 2021) wordt zoveel mogelijk kwantitatieve kennis bijeen gebracht en in het nog op te zetten landelijk monitoringsnetwerk worden ook de effecten op het ecologisch functioneren in kaart gebracht. De omvang van een koudepluim kan met deze ecologische kennis vertaald worden in een effect op het ecologisch functioneren. Op basis van deze kennis, kan dan onderbouwd wel of geen vergunning verleend worden voor een TEO-installatie. Maar totdat er goed inzicht is in de ecologische effecten en de verspreiding van een koudelozing aan de hand van kengetallen geschat kan worden, zal gebruik gemaakt moeten worden van de verschillende brokjes informatie, zoals de kennis gepresenteerd in dit document, om tot een afweging tot vergunningverlening te komen.

6 Referenties

- Bijstra, D., P. Boderie en I. de Groot-Wallast (2021): "Modelinstrumentarium voor de verspreiding van koudelozingen", Deltares notitie, uitgevoerd onder WarmingUp.
- Boderie, P., G. van Geest en C. van Megchelen (2018): "Effecten koud water lozing slootsysteem Hoog Dalem – Onderzoeksverslag", Deltares-rapport 1205909-000-ZWS-0020
- Boderie, P. en T. Troost (2020): "Aquathermie als maatregel voor verbetering waterkwaliteit in de Sloterplas? Een voorverkenning", Deltares rapport 11204410-002-ZWS-0003
- CE Delft [2018]: "Nationaal potentieel van aquathermie", Publicatienummer: 18.5S74.116, gezamenlijke rapportage Deltares en CE-Delft, opdrachtgever S
- Harezlak, V., W.E. Penning en I. de Groot-Wallast (2021): "Opzet landelijk monitoringsprogramma – Ecologische effecten thermische energie uit oppervlaktewater", Deltares-rapport 11206845-000-BGS-0005
- Harezlak, V. (2021): "Effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van oppervlaktewatersystemen – Literatuurstudie", Deltares rapport Deltares, uitgevoerd onder WarmingUP.
- Kruitwagen, G., I. Phernambucq en E. Ypma (2021): "Kader voor vergunningverlening koudelozingen 1.0", W+B rapport 119041/21-008.887.
- Pothof, I. (2017): "Floriade 2022 en het Weerwater - Inspiratiedocument voorontwerp warmte/koude voorziening", Deltares rapport 11200690-002-HYE-0002
- Pothof, I en P. Boderie (2017): "Thermische Energie uit het Weerwater Almere_v1", powerpoint presentatie.
- TPA en Deltares (2008): "Onderzoek KWO-systeem met oppervlaktewater Helsdingen", TPA-rapport SVA-101X1-E-RM005B

Bijlage 1 : Snelle 1D-benadering voor afkoeling ondiepe meren door TEO

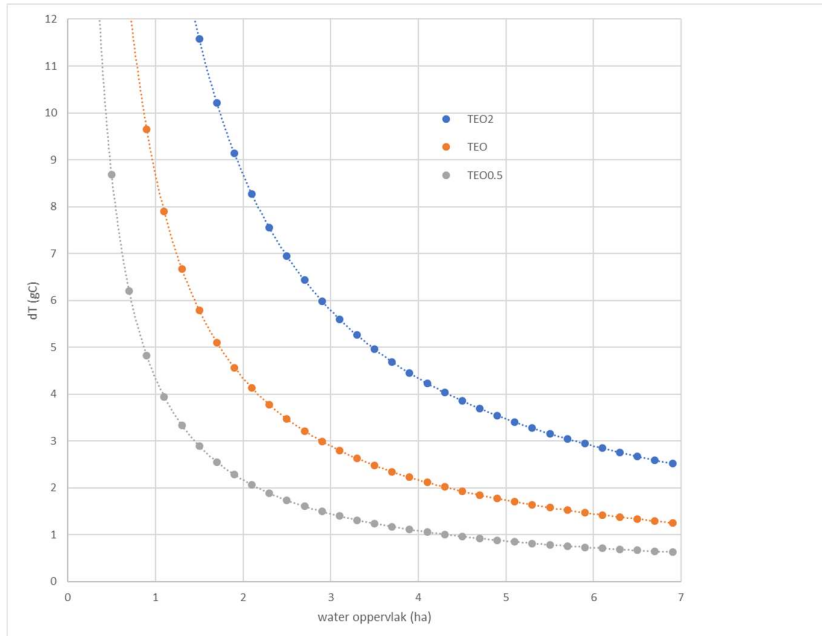
Een koudelozing veroorzaakt in het ontvangend water een afkoeling die afhangt van de grootte en het temperatuurverschil van de koudelozing met het ontvangend water. Het koudere water zakt in beginsel naar beneden waardoor verticale menging beperkt wordt. Hoe meer de dichtheid van het geloosde water afwijkt⁴ van de dichtheid van het ontvangende water, hoe sterker dit proces. Turbulentie als gevolg van stroming, wind, scheepvaart, vissen e.d. zorgen voor menging van het koudere met het warmere water.

Indien de afkoeling zich aan het wateroppervlak manifesteert dan onttrekt het water warmte uit de atmosfeer zodat het water weer opwarmt. De potentie van de warmte-overdracht van atmosfeer naar water is groot. Elke moment van de dag streeft water er naar om zijn natuurlijke temperatuur weer aan te nemen en in evenwicht te zijn met de temperatuur van de atmosfeer. Dit veroorzaakt bijv. ook de schommelingen in watertemperatuur tussen dag en nacht. Met een TEO wordt extra warmte aan het water onttrokken, waardoor het evenwicht wordt beïnvloed.

In potentie is het temperatuurherstellend vermogen van water erg groot. Indien een watersysteem 1 graad wordt afgekoeld door de onttrekking van warmte, dan kan dit vanuit de atmosfeer met een energie-overdracht van 20 W per vierkante meter weer worden aangevuld.

Dat betekent dat hoe beter de koude in het systeem mengt hoe sneller de opwarming plaatsvindt en hoe kleiner de zone van afkoeling wordt. Het is dan afhankelijk van de grootte van de plas bij welke temperatuurverandering een nieuw evenwicht ontstaat. Indien volledige menging wordt verondersteld kan deze temperatuurverandering bij de verschillende TEO-scenarios worden berekend. Deze berekening is in de volgende figuur geïllustreerd.

⁴ Temperatuur zorgt niet voor hele grote verschillen in de dichtheid van water, zout doet dat veel sterker. Zo is zeewater per m³ 30kg (tov 1000kg) zwaarder, water van 15C is maar 1kg/m³ zwaarder dan water dat 5C warmer is.



Figuur 1. Benodigd wateroppervlak (ha) voor een TEO van 15 TJ/seizoen bij toenemende afkoeling van het water (als het water 5 graden mag afkoelen is nog maar een oppervlak van 1.4ha nodig voor dezelfde TEO).

Als menging beperkt is, bijvoorbeeld in diepe plassen, dan ontstaat 's zomers een natuurlijke temperatuurgelaagdheid met warm water aan het oppervlak en koud water onder de spronglaag die afhankelijk is van de vorm van de plas en het weer, waarbij de wind een hoofdrol speelt. Gemiddeld zit deze spronglaag op ongeveer 6m diepte (figuur 6). De warmteverdeling over de diepte is dus een groot deel van het jaar niet gelijkmatig, van mei tot oktober is er gelaagdheid.