

Effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van oppervlaktewatersystemen

Literatuurstudie – Warming Up

door
Valesca Harezlak
21 januari 2021

Deltares

Auteur: Valesca Harezlak

21 januari 2021

Review: Gerben van Geest

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

Projectnummer

11205155

Keywords

Thermische Energie Oppervlaktewater (TEO), ecologische effecten, koudelozingen,

Jaar van publicatie

2021

Meer informatie

Valesca Harezlak en/of Ida de Groot-Wallast

T

E Valesca.Harezlak@deltares.nl

Ida.deGroot@deltares.nl

01/21 ©

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

Samenvatting

Winning van warmte uit oppervlakte water (hier gedefinieerd als 'aquathermie') is een groene methode voor het verwarmen van huizen en andere panden. Echter, één van de mogelijke beperkingen voor grootschalige toepassing van aquathermie zijn de kennisleemten over hoe aquathermie het ecologisch functioneren van oppervlaktewateren beïnvloedt. Het doel van onderhavige studie is, als onderdeel van het WarmingUp programma, om een overzicht te geven van beschikbare kennis van de effecten van aquathermie, en dan specifiek de effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van oppervlaktewateren.

De focus van de literatuurstudie ligt op het achterhalen van kengetallen over de relatie tussen verandering in temperatuur en chemische parameters van en flora en fauna in het watersysteem. Het resultaat van deze studie is een levend document met daarin een eerste stap in kennisverzameling en identificatie van kennisleemten met betrekking tot de effecten van aquathermie (koudelozingen) op het ecologisch functioneren van oppervlaktewatersystemen. Het is hierdoor belangrijke input voor onderzoeksonderwerpen voor het vervolg van WarmingUP.

Om de invloed van temperatuurveranderingen in het oppervlaktewater op de ecologie te kunnen voorspellen is een eenvoudige tool wenselijk waarmee de omvang, vorm en verspreiding van koudepluimen voor een oppervlaktewater aan de hand van een aantal kenmerken (zoals omvang en gemiddelde diepte van het oppervlaktewater, debiet van koudelozing) kan worden ingeschat. Daarnaast is het voor de beoordeling van de temperatuurverandering van belang om de natuurlijke temperatuurvariatie van een watersysteem of -systemen in tijd en ruimte te kennen zodat getoetst kan worden of de (voorspelde of daadwerkelijke) afkoeling van het water door koudelozingen binnen de grenzen van de natuurlijk variatie valt.

De effecten van koude lozingen op chemische waterkwaliteitsparameters blijken relatief goed bekend: kengetallen zijn voor een aantal parameters beschikbaar. Voor de kengetallen voor biologische onderdelen, specifiek in deze studie fytoplankton, macrofyten, macrofauna en vissen, is veel minder informatie beschikbaar. Aangeraden wordt om de kennisleemten omtrent fytoplankton en macrofyten, als basis van het voedselweb, en macrofauna, als belangrijke voedselbron, als eerste invulling te geven.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Introductie	5
1.1 Doel	5
1.2 Werkwijze en resultaat	6
1.3 Leeswijzer	6
2 Effect van koudelozingen	7
2.1 Natuurlijke temperatuur variatie	7
2.1.1 Ruimtelijke variaties in temperatuur	7
2.1.2 Temporele variaties in temperatuur	10
2.1.3 Kennisleemten	12
2.2 Temperatuur en chemische processen	12
2.2.1 Kennisleemten	12
2.3 Temperatuur en soortgroepen	12
2.3.1 Temperatuur en voedselweb	13
2.3.1.1 Kennisleemten	13
2.3.2 Fytoplankton	14
2.3.2.1 Kennisleemten	15
2.3.3 Macrofyten	15
2.3.3.1 Verlaging groeisnelheid	15
2.3.3.2 Fenologie	16
2.3.3.3 Voedselweb	16
2.3.3.4 Kennisleemten	16
2.3.4 Macrofauna	17
2.3.4.1 Kennisleemten	17
2.3.5 Vissen	17
2.3.5.1 Temperatuur en paaieren	18
2.3.5.2 Temperatuur en eieren of larven	19
2.3.5.3 Temperatuur en overleven vis	19
2.3.5.4 Temperatuur en fenologie	20
2.3.4.5 Kennisleemten	20
3 Prioritering opvullen kennisleemten	21
4 Referenties	22

1 Introductie

Winning van warmte uit oppervlakte water (hier aangeduid als 'aquathermie') is een groene methode voor het verwarmen van huizen en andere panden. Binnen het programma WarmingUp wordt kennis ontwikkeld over (1) de technische potentie en gevoeligheid en de ruimtelijk verdeling van winnings- en lozingslocaties van aquathermie, (2) technieken die aquathermie kostenefficiënter kunnen maken en (3) de ecologische randvoorwaarden die de winbare hoeveelheid warmte bepalen.

De ecologische randvoorwaarden blijken onduidelijk: het blijkt enerzijds lastig om een snelle eerste inschatting te maken van het gebied dat door een koudelozing beïnvloed wordt en anderzijds wat de effecten van koudelozingen betekenen voor de ecologie. De omvang van een koudelozing in verschillende oppervlaktewatersystemen is voor een paar systemen onderzocht (Boderie en Van Geest, 2017; Boderie en Troost, 2020), maar verdere kennisontwikkeling is cruciaal voor het in kunnen schatten of er sprake is van temperatuurverlaging en wat het oppervlak is van het effectgebied.

De kennisleemten over hoe aquathermie het ecologisch functioneren van oppervlaktewateren beïnvloedt heeft effect op zowel het vergunnen van een aquathermie installatie ('better safe than sorry') als op de hoeveelheid warmte die onttrokken mag worden. Het gebrek aan kennis beperkt de benutting van de warmtewinningspotentie van aquathermie. De urgentie om deze kennisleemten op te vullen blijkt uit de monitoringsverplichtingen die zijn opgenomen in het beleidskader voor aquathermie (Kruitwagen et al., in press) en het opgestelde monitoringsplan (Wortelboer en Harezlak, 2020)

1.1 Doel

Het doel van onderhavige studie is om een overzicht te creëren van beschikbare kennis met betrekking tot effecten van koudelozing op het ecologisch functioneren van een watersysteem. Hiervoor is een beknopte literatuurstudie uitgevoerd. De focus ligt op het achterhalen van kengetallen voor de relatie tussen verandering in temperatuur en chemische parameters van en flora en fauna in het watersysteem. Dit geeft inzicht in kennis en kennisleemten en is daarmee belangrijke input voor onderzoeksonderwerpen voor het vervolg van WarmingUP.

Daarnaast dient deze studie ook als basis waaraan nieuwe kennis kan worden toegevoegd. Zo ontstaat er een overzichtelijk document met up-to-date kennis over de effecten van temperatuurverlaging op ecologie dat bruikbaar is als informatiebron om ecologisch onderbouwde keuzes te kunnen maken voor het vergunnen van aquathermie installaties.

NB: In dit document ontbreekt het mogelijk effect van filters van koelsystemen (hogere sterfte kleine organismen, introductie van stroming, schoonmaakmiddelen) op de ecologie. Deze kennis moet, voor een volledig overzicht van te verwachten effecten van aquathermie op het ecologisch functioneren van een watersysteem, in een latere versie van dit document worden toegevoegd.

1.2 Werkwijze en resultaat

Dit rapport is een levend document: wanneer er meer kennis wordt gevonden of ontwikkeld dan wordt dit toegevoegd aan dit document. De beschikbare resultaten uit de literatuur zijn zoveel mogelijk geïnterpreteerd in termen van koudelozingen en de effecten op de ecologie. Daarnaast is er een kleine database beschikbaar, waarmee de kennis op een gestructureerde manier verzameld kan worden. Deze kennisdatabase is inmiddels deels gevuld voor chemische parameters, fytoplankton en vis. Met het vullen van het fytoplankton-gedeelte werd duidelijk dat de kengetallen niet concreet genoeg waren, en toen gestart werd met macrofyten bleek dat er te weinig kennis was om dat gedeelte zinvol te vullen.

De database is beschikbaar en kan verder aangevuld worden wanneer meer kennis beschikbaar komt. Voor nu is de database nog in Excel formaat, maar in 2021 wordt er gestart met een grote aquathermie database, waar onder ander de ecologische kennis een plek zal krijgen (Otter, 2020).

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt allereerst ingegaan op de natuurlijke variatie van temperatuur: dit is immers één van de randvoorwaarden waarbinnen een watersysteem functioneert en die door koudelozingen verandert. Bij de natuurlijke variatie in watertemperatuur wordt zowel de variatie in de ruimte als in de tijd besproken. Vervolgens worden de effecten van watertemperatuur op de chemie van oppervlaktewateren besproken. Daarna volgt voor vier soortgroepen (fytoplankton, macrofyten, macrofauna en vis) een overzicht van de gevonden kennis met voor elk van de soortgroepen een opsomming van de kennisleemten. Het rapport eindigt met een aanbeveling van prioritering van kennisverzameling.

2 Effect van koudelozingen

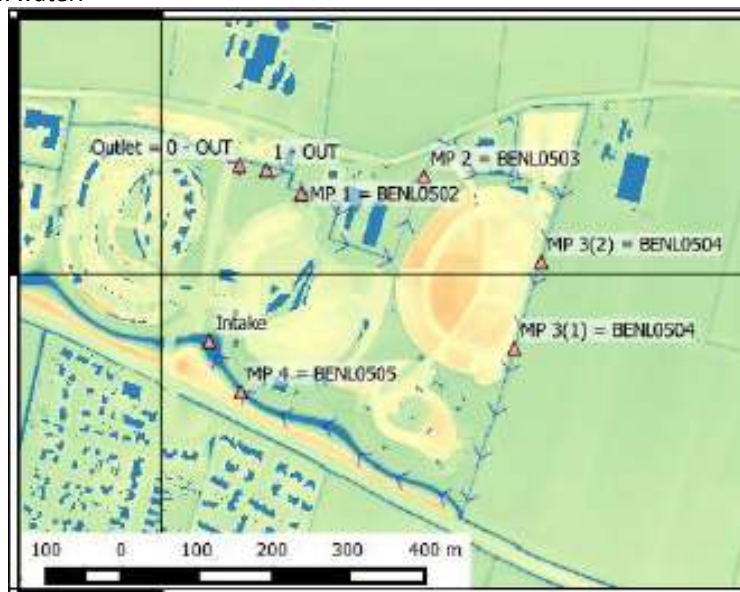
2.1 Natuurlijke temperatuur variatie

Het effect van koudelozingen op het ecologisch functioneren van oppervlakte wateren is direct gelinkt aan de omvang van de koude pluim. Wanneer deze pluim relatief klein is, dan is het effect op de ecologie minder dan wanneer de pluim relatief groot is. Daarnaast is het temperatuurverschil (de ΔT) van de koudelozing van belang: hoe groter deze is, des te groter kan het effect op de ecologie zijn. Echter, belangrijke vraag is hoe de ΔT zich verhoudt tot de variatie in temperatuur die van nature al aanwezig is in het systeem. Wanneer een ΔT van 4°C wordt aangehouden, maar de natuurlijk variabiliteit van het systeem 6°C is, dan valt het effect mogelijk weg tegen de achtergrondruis. Interessant is om ook te kijken naar de regionale variabiliteit in temperatuur: valt een systeem met toepassing van aquathermie nog steeds in de range van vergelijkbare wateren in de omgeving? Ook dan zullen de ecologische effecten in de achtergrondruis kunnen verdwijnen. Dat betekent niet dat er geen effecten zijn, maar dat het systeem wel binnen zijn natuurlijke 'waarden' blijft.

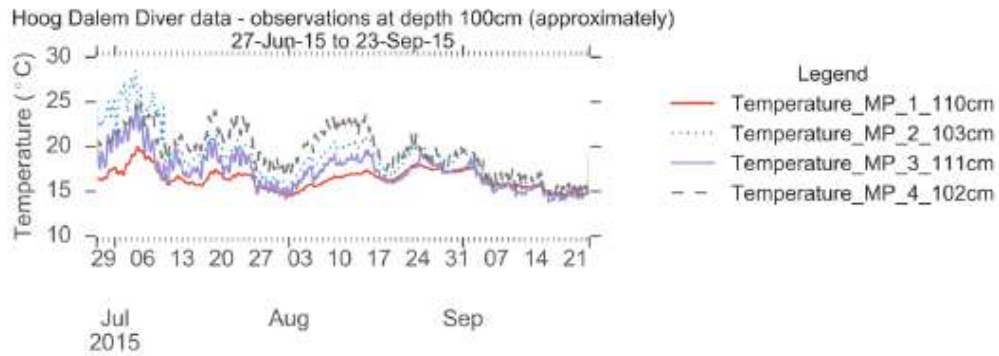
De temperatuursverandering veroorzaakt door een koudelozing blijkt niet altijd rechttoe rechtaan te interpreteren. Een onderverdeling in 1. Ruimtelijke variaties (horizontaal en verticaal) en 2. Temporele variaties (dagelijks, seizoen, jaarlijks) helpt om de verschillende aspecten en de effecten op ecologie te structureren.

2.1.1 Ruimtelijke variaties in temperatuur

Uit de MSc studie van Van Megchelen (2017) in het slotensysteem van Hoog Dalem blijkt dat hoewel de temperatuur nabij het lozingspunt meestal het laagste was, er op basis van de metingen niet een eenduidige conclusie getrokken kon worden tussen temperatuur en afstand tot de koudelozingen (Figuur 1 en Figuur 2). Effecten op de watertemperatuur kunnen naast de koudelozingen bijvoorbeeld ook veroorzaakt worden door beschaduwing (boom, waterplanten) of door een meer geïsoleerd stuk water.

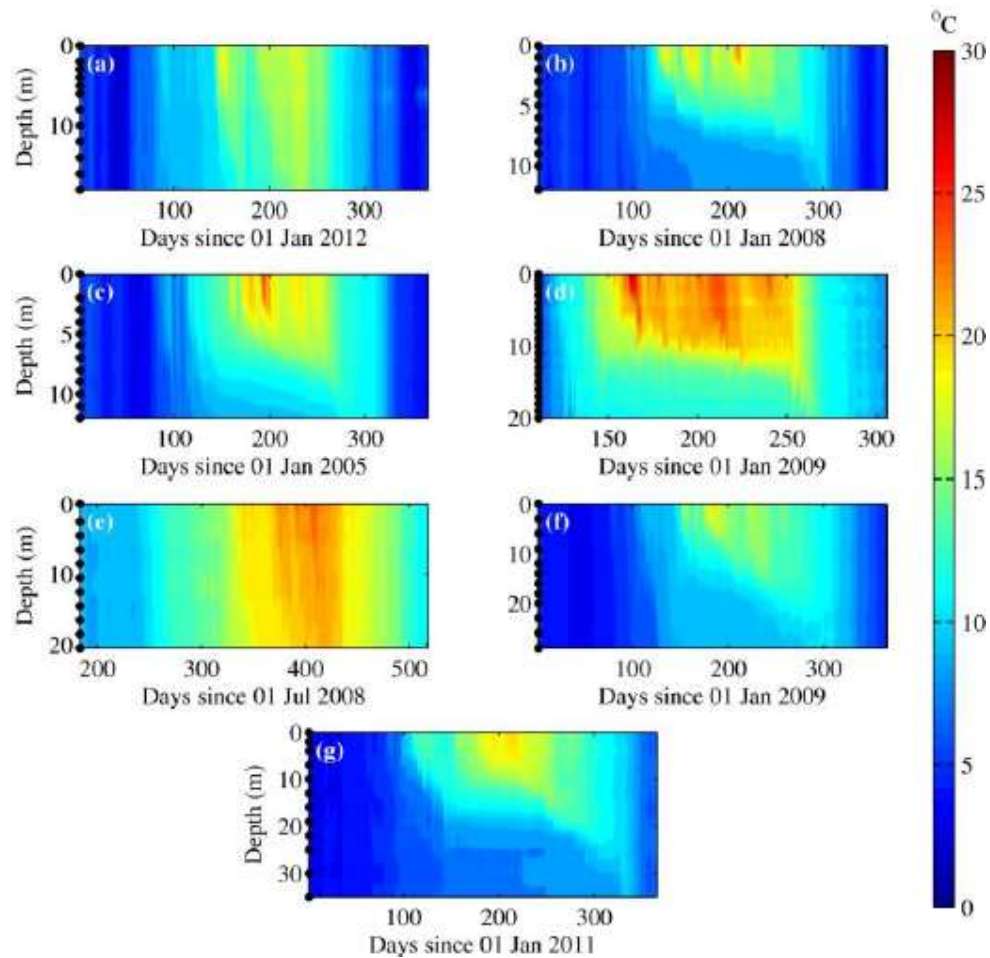


Figuur 1: Meetlocaties (MP X) in Hoog Dalem. Overgenomen uit Van Megchelen (2017)



Figuur 2: Temperatuurmetingen in Hoog Dalem in juli, augustus en september 2015. Overgenomen uit Van Megchelen (2017)

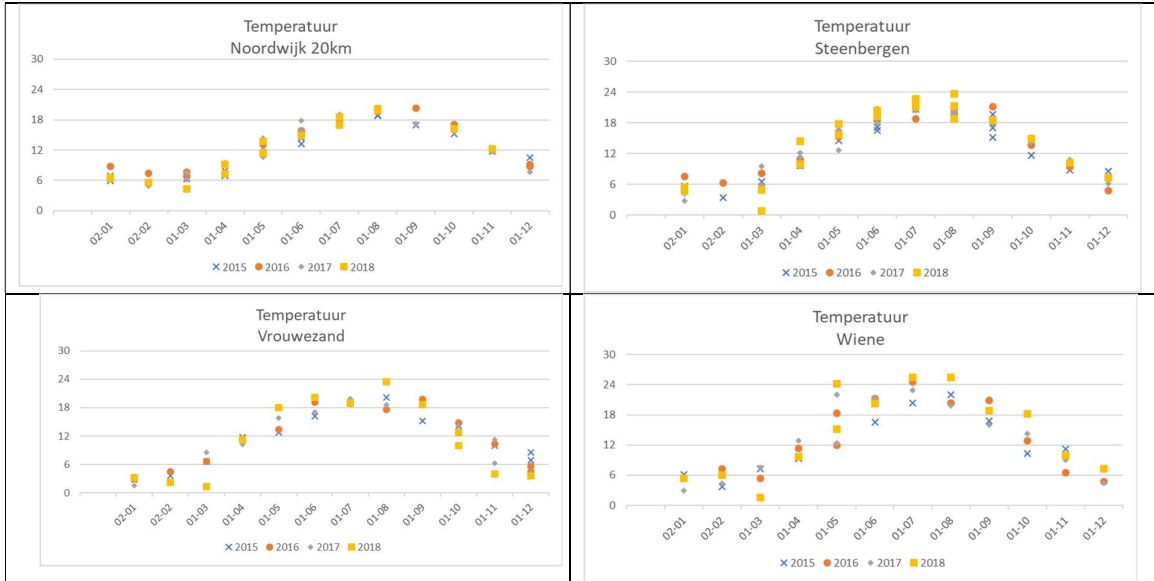
Naast variatie in de 'horizontaal', kunnen in diepere systemen temperatuurvariëaties over de verticaal optreden, dusdanig dat er zelfs sprake is van stratificatie (Figuur 3). Temperatuurstratificatie bemoeilijkt de menging over de verticaal tussen waterlagen en leidt daarom ook vaak tot stratificatie van opgeloste stoffen, zoals zuurstof en nutriënten, en chlorofyl-a concentraties (fytoplankton). Tijdens stratificatie kunnen in de diepere waterlagen lage(re) zuurstofconcentraties ontstaan door remming van de aanvoer van zuurstof vanuit de oppervlakkige waterlagen (door stratificatie) en voortgaande consumptie van zuurstof door afbraakprocessen in het sediment van de diepere waterlagen. De effecten van een koudelozing in zo'n waterlichaam kan mogelijk beperkt worden door in de diepere lagen de koudelozing uit te voeren.



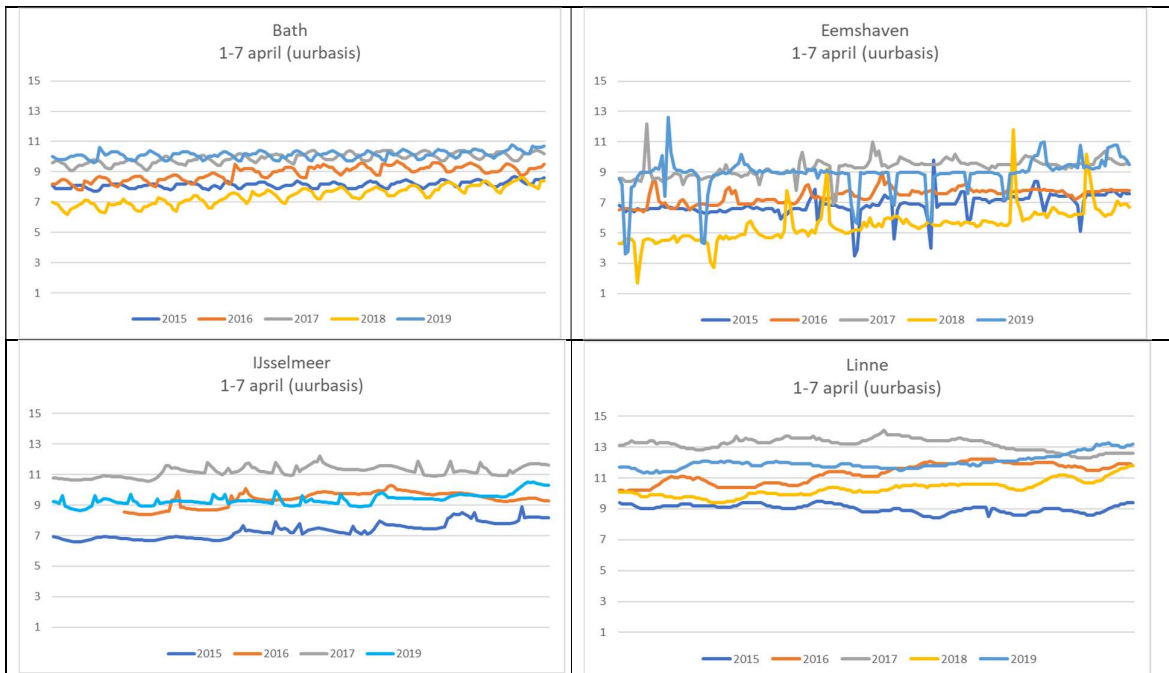
Figuur 3: Stratificatie gedurende de zomer in verschillende diepe meren: a: Bassenthwaite Lake, 2012; b: Blelham Tarn, 2008; c: Esthwaite Water, 2005; d: Lake Mendota, 2009; e: Rotorua, 2008–2009; f: Llyn Tegid, 2009 en g: Windermere, 2011. De diepte van de continue temperatuursensoren zijn aangegeven met zwarte stippen op de Y-as. De stratificatie tussen meren verschilt als gevolg van o.a. verschillen in grootte, diepte, wind, stroming en instraling. Bron: Woolway et al, 2014.

2.1.2 Temporele variaties in temperatuur

Gebruik makend van de data van Rijkswaterstaat, dan blijkt ook dat er tussen systemen, hoewel het temperatuurverloop over het jaar hetzelfde oogt, verschillen in variabiliteit in dit verloop zit (Figuur 4). Wanneer op uurbasis wordt gekeken, dan zijn ook dan verschillen in de temperatuurvariabiliteit duidelijk zichtbaar (Figuur 5).



Figuur 4: Maandgemiddelde temperatuur voor de jaren 2015-2018 voor RWS meetpunten Noordwijk 20km, Steenberg, Vrouwezand en Wiene. Deze locaties worden 1x per 2 weken bemonsterd.



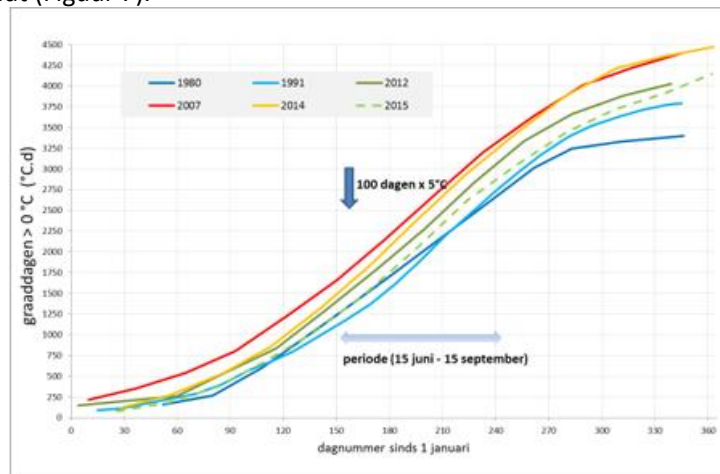
Figuur 5: Uurgemiddelde temperatuur voor de periode 1 t/m 7 april voor de jaren 2015 t/m 2019 voor de RWS monitoringslocaties Bath, Eemshaven, IJsselmeer (Meetpaal 42) en Linne. Data is beschikbaar op 10 minuten basis.

Een “effecten” maat voor jaarlijkse variaties in temperatuur, en daarmee inzicht hoe deze jaarlijkse variaties effect kunnen hebben op de start fenologische fasen (kieming, bloei, afsterven) zijn de zogenaamde ‘Degree Days’ (DD, -). In de literatuur en, met name, in de landbouw, worden degree days worden vaak gebruikt om de start van de fenologische fasen te bepalen. Deze benadering kan ook gebruikt worden om inzichtelijk te maken hoe koudelozingen kunnen leiden tot een verandering in bijvoorbeeld het op gang komen van een groeiseizoen of het eindigen ervan voor een soort of soortgroep. DD worden berekend door in een jaar de graden boven een bepaalde temperatuur bij elkaar op te tellen:

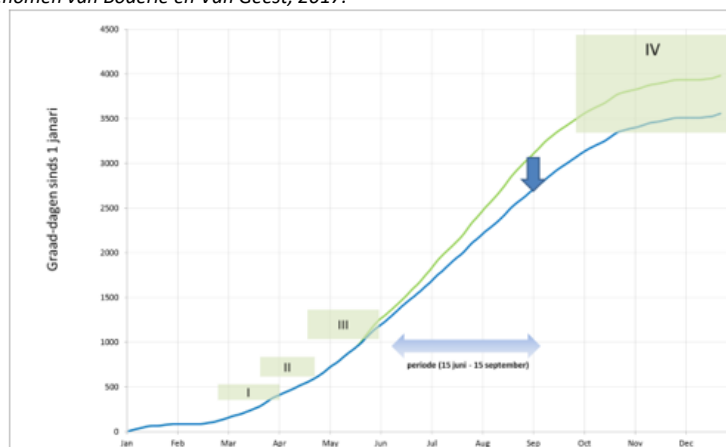
$$DD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

T_{max} and T_{min} zijn de maximum en minimum temperatuur over een etmaal en T_{base} is een organisme specifieke temperatuur.

In de studie van Hoog Dalem door Boderie en Van Geest (2017) is een voorbeeld gegeven van hoe het bereiken van een geschikte degree days waarde tussen een koud en een warm jaar kan oplopen tot zo’n 30 dagen (Figuur 6). Daarnaast kan ook specifiek voor een macrofytensoort gekeken worden hoe koudelozingen de ontwikkelingsstadia van een soort, in dit geval stekelharig kransblad (*Chara hispida*), beïnvloedt (Figuur 7).



Figuur 6: Degree days (graaddagen, °C) voor relatief koude jaren (1980, 1991), een gemiddeld jaar (2012), twee warme jaren (2007, 2014) en 2015. Overgenomen van Boderie en Van Geest, 2017.



Figuur 7: Degree days voor een gemiddeld jaar (groene lijn) en voor een gemiddeld jaar inclusief koude lozing ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$) op basis van gemodelleerde watertemperatuur voor Hoog Dalem. De groene vlakken geven de 4 fenologische fasen van stekelharig kranswier weer, geplotted op de hoogte van de degree days eis voor de betreffende fase. Overgenomen van Boderie en Van Geest (2017).

2.1.3 Kennisleemten

- Op dit moment ontbreekt voldoende kennis over natuurlijke temperatuur variatie in systemen: temporeel en ruimtelijk.

2.2 Temperatuur en chemische processen

Het is goed bekend hoe temperatuur direct chemische variabelen zoals O₂ en CO₂ beïnvloedt. O₂ concentraties nemen toe naarmate het water kouder wordt (zie tabel Tabel 1). Echter, ook biologische processen zijn van invloed op de O₂ en CO₂ concentraties: fytoplankton en waterplanten produceren overdag O₂ en 's nachts CO₂. Dit leidt onder andere tot veranderingen in CO₃²⁻/HCO₃⁻/H₂CO₃ concentraties en daarmee de pH van het water. In een watersysteem kunnen chemische en biologische processen niet los van elkaar worden bekeken: lagere temperaturen vertragen chemische processen en biologische processen en hebben effect op elkaar. Als voorbeeld: organisch materiaal breekt minder snel af en vermindert daardoor de nutriëntbeschikbaarheid voor fytoplankton. Daarnaast wordt de 'proces-snelheid' van biologische processen ook beïnvloed door temperatuur. Daarom kunnen in een watersysteem veranderingen in chemische processen door temperatuurveranderingen niet los gezien worden van de veranderingen van temperatuur op biologische processen en vice versa.

Tabel 1: Overzicht van verandering in O₂ en CO₂ concentraties (mg/l) onder invloed van temperatuur.

Parameter	Kennisregel	10°C	25°C
O ₂	10% toename bij 5°C verlaging	Circa 11.3 mg/l	8.4 mg/l
CO ₂	12% toename bij 5°C verlaging	Circa 0.8 mg/l	0.5 mg/l

2.2.1 Kennisleemten

- Er is voldoende bekend over chemische variabelen (voor interactie met biologische processen, zie volgende paragrafen).

2.3 Temperatuur en soortgroepen

Temperatuur beïnvloedt organismen direct en indirect. Directe effecten van verlaging in temperatuur gaan via enzymatische processen, die onder lagere temperaturen vaak langzamer verlopen. Hierdoor kan onder ander de groei van organismen later in het seizoen starten, de groei langzamer gaan en worden stoffen minder snel omgezet, waardoor sommige stoffen kunnen accumuleren terwijl de beschikbaarheid van andere juist vermindert. Het effect van minder snel groeiende organismen is dat mogelijk de productiviteit van een systeem naar beneden gaat en/of dat organismen die langzamer hun groei aanpassen bij lagere temperaturen, dominantier gaan worden. Indirecte effecten van koudelozingen worden veroorzaakt door chemie en opeenstapeling van veranderingen in voedselweb.

In onderstaande tekst wordt eerst het globale effect van koudelozingen voor het voedselweb beschreven en daar wordt voor de onderstaande soortgroepen apart de effecten van temperatuur beschreven.

- Fytoplankton
- Macrofyten
- Macrofauna
- Vissen

Soortgroepen die nog niet zijn opgenomen in deze literatuurstudie:

- Zoöplankton
- Reptielen
- Amfibieën
- Zoogdieren
- Vogels

2.3.1 Temperatuur en voedselweb

Indirecte effecten van koudelozingen worden veroorzaakt door chemie (zie “Temperatuur en chemische processen”), maar kunnen zich ook in het voedselweb etaleren. Indirecte effecten in het voedselweb worden veroorzaakt door veranderingen in soortensamenstelling en fenologie. Rosenblatt en Schmitz (2016) benadrukken dat voor een goed overzicht van hoe temperatuur ingrijpt op de dynamiek in terrestrische voedselwebben, drie ecologische subonderdelen begrepen moeten worden:

- Interactie: Plant – Omgeving
- Interactie: Herbivoor – Plant
- Interactie: Predator – Prooi interacties

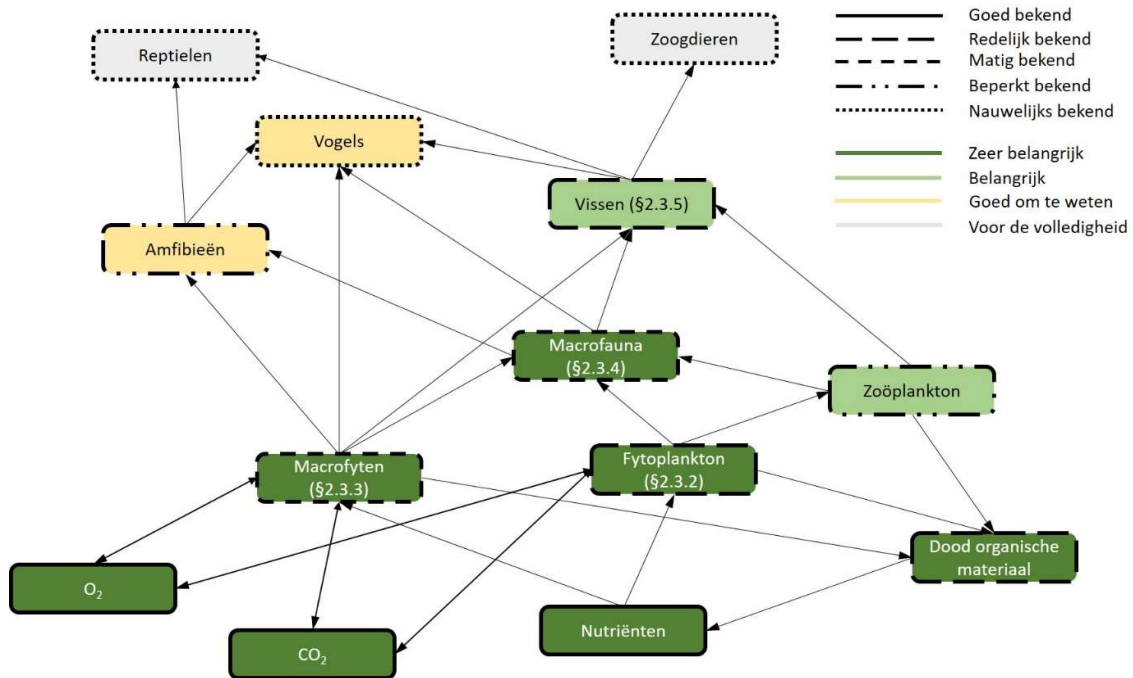
In een vertaling naar aquatische milieus wordt voorgesteld om het begrip van de onderstaande interacties als focuspunten te hanteren om zo de effecten van temperatuurverandering te begrijpen en te identificeren waar kennisleemten zitten (en waar minder):

- Interactie: Primaire productie – Omgeving
- Interactie: Primaire productie – consumenten
- Interactie: Waterplanten als substraat – paai/nest etc. interacties
- Interactie: Predator – prooi interacties (voor het finetunen)

In deze studie zijn slechts twee studies gevonden die uitgebreid onderzoek hebben gedaan naar de indirecte effecten van temperatuurverandering op het voedselweb: Ellwood et al. (2012) en Thackeray et al. (2013). Ellwood et al. (2012) vonden dat de effecten van koudelozingen op insecten kleiner waren dan voor planten, waardoor er potentieel mismatches ontstaan tussen deze twee soortgroepen. Thackeray et al. (2013) toonden aan dat fytoplankton en zoöplankton fenologisch reageerden op enerzijds verandering in temperatuur (direct effect) en anderzijds door temperatuur veranderde nutriëntbeschikbaarheid (indirect effect). Hierdoor ontstond er een mismatch met voedselbeschikbaarheid tussen zoöplankton voor vis.

2.3.1.1 Kennisleemten

Met name op het niveau van voedselweb-interacties lijkt veel kennis te ontbreken. Echter, om deze kennis te ontwikkelen, is eerst kennis nodig van de directe effecten van aquathermie op de verschillende soortgroepen en hoe deze soortgroepen interacteren met andere onderdelen van het voedselweb. Figuur 8 geeft de stand van zaken rondom de kennis weer en hoe belangrijk het is om van een specifiek onderdeel een goed begrip te hebben. Dit figuur (voortuitlopend op de rest van het rapport) prioriteert de belangrijke onderwerpen voor kennisontwikkeling en – ontsluiting.



Figuur 8: Gedeeltelijk overzicht van een aquatisch voedselweb (niet volledig, meest belangrijke onderdelen en relaties in het licht van aquathermie zijn aangegeven). De type omranding van de boxjes geeft weer hoe goed dat aspect van het voedselweb wordt begrepen als het gaat om effecten van aquathermie (legenda, bovenste vijf balkjes). De kleuring van de boxjes geeft weer hoe belangrijk het is om over dat aspect van het voedselweb kennis te hebben qua effecten van aquathermie (legenda, onderste vier balkjes)

2.3.2 Fytoplankton

Temperatuur heeft, naast beschikbaarheid van nutriënten en licht, effect op de productie en soortensamenstelling van fytoplankton. Lagere temperaturen leiden onder andere tot lagere productie (minder voedsel voor het voedselweb), minder opname van nutriënten, minder aanmaak van organisch (zwevend) stof, en een lagere extinctie-coëfficiënt (hogere beschikbaarheid van licht). Onder lagere temperaturen zijn nutriënten vaak niet limiterend, maar energie (licht (fotosynthese)) en temperatuur (enzymatische snelheid)). Ook kan een verlaging in temperatuur leiden tot een andere fytoplanktonsoortensamenstelling: cyanobacteriën (in de volksmond: blauwalgen) groeien langzamer onder koelere omstandigheden. Een verandering in fytoplanktonsoortensamenstelling kan een effect hebben op de voedselkwaliteit voor hogere trofische niveaus.

Fytoplanktongroei en -competitie is redelijk bekend: er bestaan verschillende modellen die de groei en competitie onder verschillende omstandigheden modelleren. Een voorbeeld van zo'n model is

BLOOM. Dit model is een onderdeel van de Delft3D WAQ software en neemt om die reden ook de interactie met licht, zwevend stof en nutriëntenconcentraties mee. Uit de vele toepassingen van dit model is gebleken dat BLOOM goed in staat is om onder verschillende condities en in verschillende systemen fytoplanktongroei en – competitie te kunnen simuleren. Dit model, maar mogelijk ook anderen, is daarom geschikt om voor verschillende kenmerkende systemen kentallen, zoals verandering in primaire productie, fytoplanktonsoortensamenstelling, nutriëntbeschikbaarheid, doorzicht, af te leiden.

2.3.2.1 Kennisleemten

- De interactie tussen fytoplankton en nutriënten, organisch materiaal, zuurstof en pH is complex. Met behulp van de fytoplanktonmodule BLOOM (onderdeel van het Delft3D modelinstrumentarium; Los, 2009) kunnen er kengetallen voor verschillende type systemen worden afgeleid voor de parameters

2.3.3 Macrofyten

De effecten van verlaging in temperatuur op macrofyten zijn een verlaging in groeisnelheid en veranderingen in fenologie. Deze twee veranderingen kunnen vervolgens weer gevolgen hebben voor het ecologische functioneren van het ecosysteem.

2.3.3.1 Verlaging groeisnelheid

Een verlaging in temperatuur verlaagt de fotosynthese capaciteit, omdat fotosynthese een enzymgestuurd proces is. Het precieze effect van een lagere temperatuur op de groeisnelheid hangt af van de plantensoort: plantensoorten verschillen onderling in hun optimale temperatuur. Hierdoor kan voor de ene soort een verlaging van 20°C naar 15°C een groter effect hebben op biomassa productie dan voor een andere soort. Het effect van verandering in temperatuur is in de literatuur vooral te vinden voor het effect van temperatuurverhoging (klimaatverandering). Echter, de resultaten kunnen 'omgekeerd' geïnterpreteerd worden. Hierdoor is er meer inzicht te verkrijgen in hoe temperatuur effect heeft op de groei van macrofyten. Als voorbeeld: de studie van Taylor and Helwig (1995): zij documenteerde dat een toename van 11°C leidde tot een 5-9x toename van biomassa per m² in een pond in Alberta, Canada. Een afname in temperatuur zal dus leiden tot lagere biomassa per m².

Daarnaast wordt vaak een temperatuur coëfficiënt (Q₁₀) gebruikt om de verandering in respiratie ten opzichte van productie te schatten: de relatieve afname van netto groei door toename in respiratie onder invloed van een hogere temperatuur. Echter, deze toename in respiratie neemt over verloop van tijd af: de verhouding tussen respiratie en productie is redelijk stabiel (Lambers et al., 2008; Van Oijen et al., 2010). Dit betekent dat een aquathermie-installatie tijdens het groeiseizoen, vanuit biomassa productie oogpunt, het beste continu kan aanstaan in plaats van alternerend worden gebruikt.

Verder kan een lagere temperatuur leiden tot een verlaagde opbouw van reserves om te overwinteren. Kankaala et al. (2000) rapporteerden dat een *verhoging* van 3°C zorgde voor een eerdere start van groei van Holpijp (*Equisetum fluviatile*), hogere biomassa productie, waarbij de ondergrondse biomassa 2.5x hoger was dan de referentie. De verandering in de ondergrondse

biomassa kan invloed hebben op de competitiersterkte aan het begin van het groeiseizoen. Een kleinere ondergrondse reserve kan daarom leiden tot verdringing van soorten en dus een andere soortensamenstelling (Wersal et al., 2011). Mogelijk dat dit effect versterkt wordt in gebieden waar soorten voorkomen die geen rustperiode in de winter nodig hebben (Haag and Gorham, 1977; Riis et al., 2012). Echter, in het onderzoek van Riis et al. (2012) werd aangetoond dat licht beschikbaarheid een belangrijkere driver was voor competitie sterkte dan temperatuur: het effect van temperatuur op competitiersterkte kan afhangen van het type systeem en de daar voorkomende soorten.

De effecten van temperatuur op groei en biomassa-verdeling van planten zijn niet geheel eenduidig en kunnen variabel zijn. Zo zou een verlaging van de temperatuur voor een aantal soorten juist kunnen leiden tot een langer groeiseizoen: voor Aarvederkruid (*Myriophyllum spicatum*) bleek dat een verhoogde temperatuur leidde tot snellere veroudering van weefsel en daarmee juist tot een verkorting van het groeiseizoen (Barko and Smart, 1981). Daarnaast kan een soort, door verandering in temperatuur, zijn vorm aanpassen (andere biomassa verdeling), zoals het aantal en de omvang van de bladeren (Barko et al., 1982; Mckee et al., 2002). Verder blijkt dat bij een hogere temperatuur, waterplanten op grotere diepten kunnen voorkomen (Calero et al., 2015)

2.3.3.2 Fenologie

Veel macrofyten gebruiken temperatuur als een cue voor kieming en, samen met daglengte, als een cue voor andere levensfasen, zoals bloei, zaadsetting en sterfte. De cue wordt, zeker als temperatuur de enige of meest dominante cue is, vaak uitgedrukt in degree days (zie "Temporele variaties in temperatuur"). Een lagere temperatuur, en dus een lagere degree days, in het voorjaar verlaat het kiemingsproces. In het oevergebied kunnen planten die vooral temperatuur als cue hebben voor kieming, een nadeel ondervinden ten opzichte van planten die een andere cue daarvoor gebruiken (Brock and van Vierssen, 1992). Een andere belangrijke driver voor fenologische respons is CO₂, en deze kan, onder limiterende koolstofomstandigheden, belangrijker zijn dan temperatuur en licht (Malheiro et al., 2013). Het kan dus van het systeem en de soorten afhangen of temperatuur de belangrijkste driver is, of dat deze mogelijk minder van belang is ten opzichte van bijvoorbeeld licht en CO₂.

Een vuistregel die mogelijk nuttig kan zijn voor het inschatten van veranderingen in fenologische responses die door temperatuur gestuurd worden, is 'Hopkins Bioclimatic law'. Deze vuistregel zegt dat fenologische fasen met ongeveer 4 dagen vervroegd worden voor elke 1° graden noord- of westwaarts of 120 meter hoogte (Hopkins, 1920). Calero et al. (2017) en Richardson et al. (2019) hebben deze getest en bruikbaar bevonden voor terrestrische systemen. Hoe en of deze vuistregel toegepast kan worden voor aquathermie, moet verder worden uitgezocht.

2.3.3.3 Voedselweb

De effecten van koudelozingen op de groeisnelheid en fenologie van macrofyten kan effecten hebben voor het voedselweb:

- Minder biomassa als voedsel
- Minder substraat (macrofauna, vis, vogels)
- Verandering in competitie tussen fytoplankton en macrofyten.

Het laatste punt kan grote gevolgen hebben voor het systeem: het kan leiden tot een watersysteem (i.e. stilstaande wateren) dat ofwel gedomineerd wordt door fytoplankton ofwel door macrofyten.

Het vooraf bepalen welke van de twee soortsgroepen gaat domineren is lastig aangezien niet alleen temperatuurverandering, maar ook de beschikbare nutriënten en hoeveelheid licht een rol spelen (Kosten, 2011).

2.3.3.4 Kennisleemten

- Het is niet wenselijk om voor alle soorten macrofyten de temperatuureffecten (kengetallen) op aangroei van biomassa te achterhalen: dit is ontzettend kostbaar en tijdrovend. Een werkbaarder alternatief is om een aantal gidssoorten na te gaan welke data beschikbaar is en hier zo goed mogelijk kengetallen voor af te leiden. In plaats van gidssoorten zou dit mogelijk ook gedaan kunnen voor de verschillende typen macrofyten (ondergedoken, drijfbladeren, drijvend etc). Hoe haalbaar deze optie is, moet verder onderzocht worden.
- Ook voor fenologie wordt bovenstaande werkwijze voorgesteld.
- Kwalitatieve, en daarmee ook kwantitatieve, kengetallen voor de vertaling van effecten van temperatuur op macrofyten (groei en fenologie) ontbreken. Een uitgebreidere literatuurstudie zou mogelijk een kwalitatief conceptueel schema kunnen opleveren, met mogelijk een aantal kwantitatieve kengetallen. Daarnaast wordt dan verder duidelijk waar in de vertaling van de effecten van temperatuur naar het voedselweb de grootste kennishiaten zitten.

Note: <https://apirs.plants.ifas.ufl.edu/> lijkt een nuttige website met verwijzingen naar rapporten en artikelen met betrekking tot 'aquatic plants'.

2.3.4 Macrofauna

Ralf Verdonschot (expert Macrofauna, Wageningen University and Research) geeft aan dat de volgende aspecten van koudelozingen op macrofauna van belang:

- Het grootste effect op macrofauna is te verwachten als er koude schokken worden geïntroduceerd;
- Verandering in soortsaanstelling. Dit speelt met name voor stromende systemen, omdat macrofauna in stilstaande wateren een grotere tolerantie heeft voor fluctuerende temperaturen;
- Effecten op biomassa en populatie-omvang. Voor stilstaande systemen gaat dit met name via verandering in grootte van individuen (een hogere temperatuur leidt tot kleinere individuen en meer reproductie cycli). Daarnaast wordt in stromende systemen de biomassa en populatie-omvang ook beïnvloed door een verandering in soortsaanstelling. Verandering in biomassa en populatie-omvang heeft uiteraard consequenties voor het voedselweb, aangezien het stapelvoedsel in omvang verandert.

Vanuit de literatuur is de volgende kennis gevonden:

Het verschijnen (uitkruipen) van libellen en waterjuffers is sterk gerelateerd aan degree days: hoe kouder hoe later in het seizoen ze uitkruipen (Farkas et al., 2012). Deze relatie blijkt zelfs zo sterk dat er door Richter et al. (2008) een model is ontwikkeld voor de Beekrombout om het uitkruipen te kunnen simuleren aan de hand van temperatuur scenario's. Ook McCauley et al. (2018) rapporteert dat hogere temperaturen leiden tot eerder uitkruipen en voegt daar aan toe dat onder hogere temperaturen het overlevingspercentage afneemt. Er werd geen effect gevonden van hogere temperaturen op lichaamsgrootte. Hopkins' Bioclimatic Law zou mogelijk ook toepasbaar kunnen zijn op macrofauna (zie "Macrofyten").

2.3.4.1 Kennisleemten

- Er ontbreken kengetallen voor hoe (of) temperatuur de standing stock biomassa beïnvloedt: Neemt de hoeveelheid biomassa aanwezig op een bepaald moment af door een verlaging in temperatuur? En zo ja, hoeveel is dit en verschilt dit tussen systemen?
- Hoe (indien) leiden koude lozingen in een systeem tot verandering in de productie van biomassa (meerdere cycli, kleinere individuen)
- Hoe (indien) leiden koude lozingen tot verandering in soortsaamenstelling?

Wageningen University and Research (Ralf Verdonschot) heeft aangegeven dat voor de eerste twee kennisleemten veldonderzoeken uitgevoerd kunnen worden.

2.3.5 Vissen

Op basis van de database van Maurice Ramaker (Ramaker, 2020, grotendeels afkomstig van Van Grinten et al., 2007) zijn voor veel vissoorten de effecten van koude lozingen in te schatten.

2.3.5.1 Temperatuur en paaien

Voor een behoorlijk aantal soorten zijn minimum en maximum temperaturen voor paai van vissen bekend. Het effect van aquathermie hangt af van de temperatuur van het terug geloosde water en van de minimale onttrekkingstemperatuur. Een nadere analyse lijkt te duiden dat voor een behoorlijk aantal soorten aquathermie geen probleem oplevert of zelfs tot een verbetering van de paaitemperatuur leidt. Voor een aantal soorten kan aquathermie leiden tot verslechtering: dit zijn met name soorten die bij een relatief hoge temperatuur paaien (subselectie in Tabel 2, en volledige tabel in "Opzet_database_aquathermie_biologie.xlsx", tab 'Vissen_paai')

Tabel 2: Moment van paaien, minimum en maximum temperaturen voor paai voor een aantal vissen. De kolommen "Effect min T" en "Effect max T" geven een indicatie van het te verwachten effect van afkoeling van een watersysteem voor paai: donker oranje: sterke verslechtering, licht oranje: verslechtering, licht groen: verbetering, donker groen: sterke verbetering. 'ref1' en 'ref2' verwijzen naar verschillende bronnen. In het bestand "Opzet_database_aquathermie_biologie.xlsx" kan de volledige tabel bekeken worden, inclusief de gebruikte referenties.

Latijnse naam	Nederlandse naam	Moment van paaien	Min T	Max T	Effect min T	Effect max T
<i>Abramis bjoerkna</i>	Kolblei	mei-juni	14	25		
<i>Abramis brama</i>	Brasem	april-juli	12	21 (ref 2) - 23 (ref 1)		
<i>Acipenser sturio</i>	Atlantische steur	mei-augustus	-	21		
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Gestippelde alver	mei-juli	12	24		
<i>Alburnus alburnus</i>	Alver	april-juli	14	28		
<i>Alosa alosa</i>	Elft		-	-		
<i>Alosa fallax</i>	Fint		17			

<i>Anguilla anguilla</i>	Aal		-	-		
<i>Barbatula barbatula</i>	Bermpje	april-juni	14	20		
<i>Barbus barbus</i>	Barbeel	mei-juli	8 (ref 1) - 11 (ref 2)	24 (ref 2) - 29 (ref 1)		
<i>Carassius auratus gibelio</i>	Giebel	april-augustus	15	24		
<i>Carassius carassius</i>	Kroeskarper	mei-juli	14	22		
<i>Chondrostoma nasus</i>	Sneep	april-juni	7	16		
<i>Cobetis taenia</i>	Kleine modderkruiper	april-juli	18	26		

2.3.5.2 Temperatuur en eieren of larven

Er is maar voor een beperkt aantal soorten (Barbeel, Karper, Blankvoorn, Snoekbaars, Bruine forel) informatie gevonden over het effect van temperatuur op eieren en larven. Voor deze vijf soorten lijkt de verlaging van de maximum temperatuur een positieve uitwerking te hebben. Een verlaging van de minimum temperatuur lijkt negatief te zijn voor de eieren of larven van de Karper en Blankvoorn (Tabel 3). In het bestand "Opzet_database_aquathermie_biologie.xlsx" (tab 'Vissen_eierenlarven') kan deze informatie, inclusief referenties, bekeken worden.

Tabel 3: Minimum en maximum temperaturen voor eieren of larven voor een aantal vissen. De kolommen "Effect min T" en "Effect max T" geven een indicatie van het te verwachten effect van afkoeling van een watersysteem voor het overleven van de eieren of larven: donker oranje: sterke verslechtering, licht oranje: verslechtering, licht groen: verbetering, donker groen: sterke verbetering.

Latijnse naam	Nederlandse naam	min T	max T	Effect min T	Effect max T
<i>Barbus barbus</i>	Barbeel	11	21		
<i>Cyprinus carpio</i>	Karper	16	26		
<i>Rutilus rutilus</i>	Blankvoorn	17	27		
<i>S. lucioperca</i>	Snoekbaars	9	24		
<i>Salmo trutta</i>	Bruine forel	4	14		

2.3.5.3 Temperatuur en overleven vis

Er is data beschikbaar voor het overleven van vis, maar er is twijfel hoe bruikbaar deze is voor de minimum temperatuur: de gerapporteerde minimum temperaturen van ongeveer 15°C lijken eerder te duiden op 'gemeten tijdens meting' dan de absolute minimum temperatuur. De maximum temperatuur daarentegen lijkt betrouwbaarder en duidt erop dat aquathermie kan bijdragen aan een beter leefklimaat voor vis (Tabel 4). In het bestand "Opzet_database_aquathermie_biologie.xlsx" (tab 'Vissen_overleving') kan deze informatie, inclusief referenties, bekeken worden.

Tabel 4: Maximum temperaturen voor overleving van een aantal vissoorten. De kolom "Effect max T" geeft een indicatie van het te verwachten effect van afkoeling van een watersysteem voor het overleven van de vis: licht groen: verbetering, donker groen: sterke verbetering.

Latijnse naam	Nederlandse naam	max T	Effect max T
<i>Abramis brama</i>	Brasem	26	
<i>Barbus barbus</i>	Barbeel	27	
<i>Cottus gobio</i>	Rivierdonderpad	19	
<i>Cyprinus carpio</i>	Karper	31	
<i>Gobio gobio</i>	Riviergrondel	27	
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Pos	25	
<i>Lampetra fluviatilis</i>	Rivierprik	23	
<i>Misgurnus fossilis</i>	Grote modderkruiper	24	
<i>Osmerus eperlanus</i>	Spiering	23	
<i>Rutilus rutilus</i>	Blankvoorn	28	
<i>Sander lucioperca</i>	Snoekbaars	32	
<i>Lepomis macrochirus</i>	Blauwkeel zonnebaars	28	
<i>Salmo trutta</i>	Bruine forel	24	

2.3.5.4 Temperatuur en fenologie

Qua fenologie rapporteert Lyons et al. (2015) dat een verhoging van de gemiddelde temperatuur heeft geleid tot een vervroeging van de reproductie. Baer et al. (2017) ontdekte dat de activiteit van drie juveniele grondelsoorten positief gecorreleerd zijn met hogere temperaturen, maar dat de activiteit van de adulten juist negatief gecorreleerd zijn.

2.3.5.5 Kennisleemten

- Fenologie is onderbelicht. Mogelijk dat hier ook vuistregels voor te vinden zijn. Dit kan een verdere literatuurstudie aan het licht brengen.
- Bij waterschappen wordt inmiddels ook veel gedaan aan de effecten van aquathermie voor vis. Het zou een goede aanvulling van dit rapport zijn om deze kennis hier ook te laten landen.

3 Prioritering opvullen kennisleemten

Voor het opvullen van de kennisleemten wordt aanbevolen om te starten met inzicht krijgen in de natuurlijke variatie in temperatuur en de verspreiding van koude pluimen. Dit zijn de randvoorwaarden voor het wel of niet optreden van significante effecten op 'de ecologie' (zie *Figuur 8*). Qua ecologie wordt aanbevolen om de kennisleemten omtrent fytoplankton, macrofyten en macrofauna als eerste op te gaan vullen, omdat dit de basis is van het voedselweb. Onderstaand een aantal handreikingen voor het vergroten van de kennis en het beschikbaar maken van kengetallen van deze drie soortgroepen:

- De effecten van temperatuur op fytoplankton kan via 'BLOOM' (de fytoplanktonmodule in Delft3D) verkend worden
- De effecten van koudelozingen op macrofyten kunnen goed onderzocht worden in het veld, en zouden mogelijk als validatiedata voor Hopkins' Bioclimatic Law kunnen dienen.
- Het kwalificeren van de effecten van koude lozingen op de productie van macrofauna biomassa draagt bij aan kennis over macrofauna en koude lozingen an sich, maar draagt ook bij aan de vertaling naar de effecten van koude lozingen naar hogere trofische niveau. Inzicht in de effecten van koude lozingen op biomassa productie kan verkregen worden met veldwerk dat opgezet wordt in samenwerking met WEnR. De omvang van dit onderzoek moet verder onderzocht worden.

4 Referenties

- Baer, J., Hartmann, F., Brinker, A., 2017. Invasion strategy and abiotic activity triggers for non-native gobiids of the River Rhine. *PLoS One* 12, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183769>
- Barko, J.W., Hardin, D.G., Matthews, M.S., 1982. Growth and morphology of submersed freshwater macrophytes in relation to light and temperature. *Can. J. Bot.* 60, 877–887. <https://doi.org/10.1139/b82-113>
- Barko, J.W., Smart, R.M., 1981. Comparative Influences of Light and Temperature on the Growth and Metabolism of Selected Submersed Freshwater Macrophytes. *Ecol. Monogr.* 51, 219–236. <https://doi.org/10.2307/2937264>
- Beekers, B., Stipdonk, H. Van, 2004. Ooibossen in ontwikkeling. *Nature*.
- Boderie, P., Van Geest, G., 2017. Effecten koud water lozing slootsysteem Hoog Dalem – Onderzoeksverslag. Deltares rapport 1205909-000-ZWS-0020.
- Boderie, P., Troost, T., 2020. Aquathermie als maatregel voor vertering waterkwaliteit in de Sloterplas - Een voorverkenning. Deltares rapport 11204410-002-ZWS-0002
- Brock, T.C.M., van Vierssen, W., 1992. Climatic change and hydrophyte-dominated communities in inland wetland ecosystems. *Wetl. Ecol. Manag.* 2, 37–49. <https://doi.org/10.1007/BF00178133>
- Calero, S., Auderset Joye, D., Rey-Boissezon, A., Rodrigo, M.A., 2017. Time and heat for sexual reproduction: comparing the phenology of *Chara hispida* of two populations at different latitudes. *Aquat. Bot.* 136, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.09.011>
- Calero, S., Colom, W., Rodrigo, M.A., 2015. The phenology of wetland submerged macrophytes related to environmental factors. *Limnetica* 34, 425–438. <https://doi.org/10.23818/limn.34.32>
- Ellwood, E.R., Diez, J.M., Ibáñez, I., Primack, R.B., Kobori, H., Higuchi, H., Silander, J.A., 2012. Disentangling the paradox of insect phenology: Are temporal trends reflecting the response to warming? *Oecologia* 168, 1161–1171. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2160-4>
- Farkas, A., Jakab, T., Tóth, A., Kalmár, A.F., Dévai, G., 2012. Emergence patterns of riverine dragonflies (Odonata: Gomphidae) in Hungary: Variations between habitats and years. *Aquat. Insects* 34, 77–89. <https://doi.org/10.1080/01650424.2012.643030>
- Haag, R.W., Gorham, P.R., 1977. Effects of Thermal Effluent on Standing Crop and Net Production of *Elodea canadensis* and Other Submerged Macrophytes in Lake Wabamun, Alberta. *J. Appl. Ecol.* 14, 835. <https://doi.org/10.2307/2402815>
- Hopkins, A.D., 1920. The Bioclimatic Law. *J. Washington Acad. Sci.* 10, 34–40.
- Kankaala, P., Ojala, A., Tulonen, T., Haapamäki, J., Arvola, L., 2000. Response of littoral vegetation on climate warming in the boreal zone ; an experimental simulation. *Aquat. Ecol.* 34, 433–444.
- Kosten, S., E. Jepessen, V.Huszar, N. Maxxeo, E. van Nes, E. Peeters, M. Scheffer, 2011. Ambiguous climate impacts on competition between submerged macrophytes and phytoplankton in shallow lakes. *Freshwater Biology* 56 (8), 1540-1553.
- Lambers, H., Chapin III, F.S., Pons, T.L., Stuart Chapin III, F., Pons, T.L., 2008. *Plant Physiological Ecology*, Springer. Springer New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lyons, J., Rypel, A.L., Rasmussen, P.W., Burzynski, T.E., Eggold, B.T., Myers, J.T., Paoli, T.J., McIntyre, P.B., 2015. Trends in the reproductive phenology of two great lakes fishes. *Trans. Am. Fish. Soc.* 144, 1263–1274. <https://doi.org/10.1080/00028487.2015.1082502>
- Malheiro, A.C., Jahns, P., Hussner, A., 2013. CO₂ availability rather than light and temperature determines growth and phenotypical responses in submerged *Myriophyllum aquaticum*.

- Aquat. Bot. 110, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.05.001>
- McCaughey, S.J., Hammond, J.I., Mabry, K.E., 2018. Simulated climate change increases larval mortality, alters phenology, and affects flight morphology of a dragonfly: *Ecosphere* 9. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2151>
- Mckee, D., Hatton, K., Eaton, J.W., Atkinson, D., Atherton, A., Harvey, I., Moss, B., 2002. Effects of simulated climate warming on macrophytes in freshwater microcosm communities. *Aquat. Bot.* 74, 71–83. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00048-7)
- Otter, H.S., 2020. Opzet registratiesysteem TEO-systemen. Deltares offerte 11206332-001-BGS-0001
- Ramaker, M., 2020. The effect of thermal energy recovery on the ecology of a small, slow flowing freshwater ecosystem. Master thesis Open Universiteit/Waterboard Aa en Maas, 's Hertogenbosch.
- Richardson, A.D., Hufkens, K., Li, X., Ault, T.R., 2019. Testing Hopkins' Bioclimatic Law with PhenoCam data. *Appl. Plant Sci.* 7. <https://doi.org/10.1002/aps3.1228>
- Richter, O., Suhling, F., Müller, O., Kern, D., 2008. A model for predicting the emergence of dragonflies in a changing climate. *Freshw. Biol.* 53, 1868–1880. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02012.x>
- Riis, T., Olesen, B., Clayton, J.S., Lambertini, C., Brix, H., Sorrell, B.K., 2012. Growth and morphology in relation to temperature and light availability during the establishment of three invasive aquatic plant species. *Aquat. Bot.* 102, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2012.05.002>
- Taylor, B.R., Helwig, J., 1995. Submergent macrophytes in a cooling pond in Alberta, Canada. *Aquat. Bot.* 51, 243–257. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(95\)00475-F](https://doi.org/10.1016/0304-3770(95)00475-F)
- Thackeray, S.J., Henrys, P.A., Feuchtmayr, H., Jones, I.D., Maberly, S.C., Winfield, I.J., 2013. Food web de-synchronization in England's largest lake: an assessment based on multiple phenological metrics. *Glob. Chang. Biol.* 19.
- Van de Grinten, E., Van Herpen, F.C.J., Van Wijnen, H.J., Evers, C.H.M., Wuijts, S. en Verweij, W., 2007. Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. RIVM rapport 607800003/2007
- Van Oijen, M., Schapendonk, A., Höglind, M., 2010. On the relative magnitudes of photosynthesis, respiration, growth and carbon storage in vegetation. *Ann. Bot.* 105, 793–797. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq039>
- Van Megchelen, C., 2007. Cool water effects on shallow surface water. MSc Thesis, TU Delft.
- Wersal, R.M., Cheshire, J.C., Madsen, J.D., Gerard, P.D., 2011. Phenology, starch allocation, and environmental effects on *Myriophyllum aquaticum*. *Aquat. Bot.* 95, 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.05.012>
- Woolway, R.I., S.C. Maberly, I.D. Jones, H. Feuchtmayr, 2014. A novel method for estimating the onset of thermal stratification in lakes from surface water measurements. *Water Resources Research* 50, 5131–5140. doi:10.1002/2013WR014975.
- Wortelboer, R., Harezlak, V., 2020. Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater – Uitgevoerd onder WarmingUp. Deltares rapport 11205155-001-BGS-0001.

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