

stowa

WARMINGUP
Innovatief Duurzaam Warmtecollectief

KOUDELOZINGEN, VIS EN AMFIBIEËN EEN LITERATUURSTUDIE



RAPPORT

2023
11

KOUDELOZINGEN, VIS EN AMFIBIEËN
EEN LITERATUURSTUDIE

RAPPORT

2023

11

ISBN 978.94.6479.019.1



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Valesca Harezlak
Steven Kelderman

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Dennis Dekker, Waterschap Brabantse Delta
Eva Ruiter, Wetterskip Fryslân
Jack Hemelraad, Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard
Jacqueline Laumans, STOWA
Jasper Stroom, Waternet
Luuk van Gerven, Waterschap Aa en Maas
Marcel van den Berg, Rijkswaterstaat
Marco Vaartjes, Hoogheemraadschap Rijnland
Marco van Schaik, STOWA
Nikki Dijkstra, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Ronald Gylstra, Waterschap Rivierenland
Sam Minekus, Waterschap Aa en Maas
Simone van Dam, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Tisja Daggars, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden
Wilfred Wiegman, Waterschap Drents Overijsselse Delta

DRUK Buro Vormvast
STOWA STOWA 2023-11
ISBN 978.94.6479.019.1

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

VERMIJD KOUDESCHOKKEN, ZORG VOOR TEMPERATUURGRADIËNTEN

Deze literatuurstudie gaat dieper in op de effecten van koudelozingen op populaties van vissen en amfibieën. Dit helpt waterbeheerders om vergunningaanvragen voor het winnen van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) te beoordelen. Hierbij wordt namelijk koude geloosd. Welke impact deze temperatuurverandering heeft op vissen en amfibieën hebben we dankzij deze studie scherper in beeld.

Het blijkt dat het ontstaan van een temperatuurgradiënt als gevolg van een koudelozing van een TEO-installatie kan leiden tot meer robuuste populaties van vissen en amfibieën. Plotselinge veranderingen door het aan- of uitzetten van de lozing kunnen juist schadelijk zijn. Ook zijn de periode in het jaar en de omvang van de temperaturoldaling van belang. Allemaal inzichten waarmee initiatiefnemers en vergunningverleners hun voordeel mee kunnen doen.

STOWA en Rijkswaterstaat brachten eerder al een beoordelingskader koudelozingen 1.0 uit om vergunningverleners te helpen in hun afwegingen. Er was echter nog weinig bekend over de effecten van koudelozingen, met name op amfibieën en vissen. De kennis die in dit rapport wordt samengebracht, draagt eraan bij dat we het beoordelingskader verder kunnen verbeteren. Zodat de potentie van thermische energie uit oppervlaktewater benut wordt op een wijze die bijdraagt, of in ieder geval niet ten koste gaat van een gezond aquatisch ecosysteem.

De uitkomsten zullen hun doorwerking vinden in het beoordelingskader 2.0 dat STOWA en Rijkswaterstaat in 2023 laten opstellen. Deze literatuurstudie is uitgevoerd onder de vlag van onderzoeksprogramma WarmingUP.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

De opgave vanuit de energietransitie in Nederland noodzaakt een zoektocht naar en de benutting van alternatieve bronnen voor fossiele energie. Eén van de veelbelovende bronnen is warmtewinning uit oppervlaktewater, TEO (Thermische Energie uit Oppervlaktewater). Door de directe link met het oppervlaktewater, zijn er vragen over hoe TEO de ecologie in oppervlaktewater kan beïnvloeden. Eén van de beïnvloedingsroutes is via koudelozingen. Door beperkte kennis over hoe koudelozingen de ecologie van oppervlaktewateren beïnvloedt, is het vergunnen voor TEO-installaties een lastige taak voor waterbeheerders.

Om kennis over de invloed van koudelozingen op te bouwen is in 2021 (Harezlak, 2021) verkend wat in de literatuur bekend is over de invloed van temperatuurverandering op de ecologie. Daarbij is gefocust op biochemische parameters, fyto- en zooplankton, macrofyten en vissen en is onderscheid gemaakt naar directe effecten en indirecte effecten, dus de doorwerking van een verandering op het voedselweb. Onderliggende studie is een aanvulling op deze eerder uitgevoerde literatuurstudie, waarbij de focus ligt op vissen en amfibieën. In deze studie is gericht gezocht naar informatie waarmee de criteria voor koudelozingen die in het beoordelingskader koudelozingen 1.0 zijn opgenomen kunnen worden getoetst, zodat in een nieuwe versie van dit beoordelingskader deze informatie meegenomen kan worden.

In het huidige beoordelingskader worden eisen gesteld aan de grootte van de koudepluim. De koudepluim is gedefinieerd als het gebied waarbinnen de temperatuur meer dan 4 graden lager is dan het ontvangende water. Daarnaast wordt voor vismigratie de eis gesteld dat de pluim maximaal 50% van de natte doorsnede mag beslaan. Om deze criteria te toetsen worden in deze studie specifiek de volgende vragen meegenomen:

- Wat weten we van de positieve en negatieve effecten van koudelozingen op specifiek de ecologie van vissen en amfibieën?
- Hoe verhouden de gevonden positieve en negatieve effecten op vissen en amfibieën zich tot de gestelde 4°C in het beoordelingskader?
- In hoeverre is een vaste 4°C nodig vanuit het oogpunt van de ecologie van vissen en amfibieën? Oftewel, wanneer is een watersysteem gevoeliger voor afkoeling en wanneer is een watersysteem minder gevoelig?
- De minimumtemperatuur van teruglozing is 12°C. Is dit altijd het geval of geeft de ecologie van vissen en amfibieën de mogelijkheid om deze minimumtemperatuur los te laten?
- Ondervinden vissen hinder van een afkoeling van 4°C van maximaal de helft van de natte doorsnede van een lijnvormig water?

De effecten van koudelozingen op vissen en amfibieën zijn divers. Generiek kan gesteld worden dat:

- lagere temperaturen tot een tragere ontwikkeling van de verschillende levensstadia leiden en hogere temperaturen tot een snellere ontwikkeling,
- de introductie van een temperatuurgradiënt kan leiden tot meer robuuste populaties.
- de timing van de koudelozing belangrijk is: door acclimatisatie bereiden de eerdere levensstadia zich voor op een bepaalde temperatuur voor het adulte levensstadia, wat onder andere resulteert in specifieke fysieke kenmerken. Een plotse verandering van

warmere naar koudere condities kan daarmee een nadelig effect hebben op de robuustheid van populaties.

- Koude schokken kunnen zeker in de vroege levensstadia resulteren in (sub-) lethale effecten.

De temperatuurranges van veel vissoorten (en niet per se voor andere soortgroepen) impliceren dat een afkoeling van 4°C niet leidt tot een verandering van warme naar koude condities: vislarven kunnen zich goed ontwikkelen binnen een bandbreedte van ca. 11 graden, voor adulten is de bandbreedte maximaal 14 graden. Daarnaast blijkt in ieder geval adulte vis actief op zoek te gaan naar die temperaturen die de groei optimaliseren: dus bij zowel te koud als te warm water trekken ze weg, mits een temperatuurgradiënt aanwezig is. Een natte doorsnede van maximaal 50% van de watergangbreedte die 4°C afkoelt lijkt daarmee zeker voldoende ruimte te bieden om weg te trekken. Ook de 4°C voor de mengzone lijkt daarmee, voor vissen, een veilige aanname, waar, afhankelijk van de voorkomende soorten, het watertype en de ruimtelijke samenstelling van habitats, mogelijk ruimte in zit tot het hanteren van een verder afgekoelde mengzone. Essentieel blijft wel de timing wanneer afgekoeld gaat worden in verband met temperatuur-acclimatisatie van soorten, waarbij het voorjaar de meest gevoelige periode is.

Het vasthouden aan een minimum terugloos-temperatuur van 12°C lijkt met name voor vissen tijdens de paai een goede maat, omdat een aantal soorten pas paaien vanaf 12°C of hoger. De paaiperiode is grotendeels tussen april en juli. Afhankelijk van de voorkomende soorten en hoe de temperatuurgradiënt er ruimtelijke uitziet ten opzichte van verschillende habitats, kan variatie van de 12°C verkend worden. Voor amfibieën of soortgroepen is niet bekend of de 12°C een goede of veilige maat is.

Met behulp van degree days (relatie tussen temperatuur en ontwikkeling van soorten) kan het effect van koudelozingen op de ontwikkeling van soorten verkend worden onder verschillende afkoelscenario's. Het gebruik van degree days is wel een simplificatie, aangezien degree days per soort en niet in een voedselweb rekent. Ondanks dit, kunnen degree days voor een aantal belangrijke soorten wel inzicht geven wat koudelozingen betekenen in termen van ontwikkeling.

Vanuit deze literatuurstudie, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Verder onderzoek naar de effecten van koude schokken op vissen en amfibieën in de vroege levensstadia.
- Verkennen van de bruikbaarheid van de GDD voor inschatting van de effecten van koudelozingen op de ontwikkeling van soorten.
- Ecologische monitoring rondom TEO-installaties.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

KOUDELOZINGEN, VIS EN AMFIBIEËN EEN LITERATUURSTUDIE

INHOUD

	TEN GELEIDE SAMENVATTING	
1	AANLEIDING EN DOEL	1
	1.1 Kennisleemten en het beoordelingskader koudelozingen	1
	1.2 Doel van de studie	2
	1.3 Leeswijzer	3
2	METHODE	4
3	TEMPERATUUR, VISSSEN EN AMFIBIEËN	6
	3.1 Vissen, amfibieën en seizoenen	6
	3.2 Vissen, amfibieën en temperatuur	8
	3.3 Specifieke effecten van temperatuur op de fenologie	10
	3.4 Acclimatisatie en plasticiteit	11
	3.5 Andere stuurfactoren dan temperatuur	12
4	KWANTIFICERING VAN TEMPERATUUR OP FENOLOGIE	14
5	CONCLUSIES & AANBEVELINGEN	16
	5.1 Conclusies algemeen	16
	5.2 Conclusies ten aanzien van criteria beoordelingskader	16
	5.3 Aanbevelingen	17
6	REFERENTIES	18
BIJLAGE A1	T ₀ waarden voor GDD	22
BIJLAGE A2	Overzicht gebruikte en gevonden referenties	24

1

AANLEIDING EN DOEL

De opgave vanuit de energietransitie in Nederland noodzaakt een zoektocht naar en de benutting van alternatieve bronnen voor fossiele energie. Eén van de meest belovende bronnen is aquathermie: het winnen van warmte uit water. De warmte kan gewonnen worden uit afvalwater (TEA), drinkwater (TED) en oppervlaktewater (TEO). De potentie van TEO voor warmtewinning is de grootste van de drie: 40% van de warmtevraag van de gebouwde omgeving in Nederland (Kruit et al., 2018). Echter, grootschalige toepassing van TEO in de praktijk wordt soms belemmerd door onzekerheden rond ecologische effecten van een TEO-installatie in oppervlaktewateren. Een TEO-installatie beïnvloedt potentieel de ecologie van oppervlakte-wateren door het lozen van koude, het gebruik van filters in de installatie en het veroorzaken van extra stroming.

Door ontbrekende kennis over de impact van TEO-installaties op het ecologisch functioneren van watersystemen blijkt vergunningverlening voor een TEO-installatie in de praktijk lastig. Om waterbeheerders bij vergunningverlening te ondersteunen zijn in de afgelopen jaren een aantal documenten beschikbaar gekomen, zoals:

- het beoordelingskader koudelozingen (Kruitwagen et al., 2021),
- een memo over tools die beschikbaar zijn om de omvang van een koudelozing in te kunnen schatten (WarmingUp, 2021a),
- een memo die voor een aantal typische wateren de omvang van een koudepluim voor aantal verschillende warmteonttrekkingen toont (WarmingUp, 2021b),
- een monitoringsopzet voor het kunnen monitoren van eventuele effecten van TEO-installaties op het ecologische functioneren van een waterlichaam (Wortelboer en Harezlak, 2020; Harezlak et al., 2021),
- literatuurstudies naar effecten van koudelozingen (De Lange et al., 2017; Harezlak, 2021)
- ecologische modellering om meer inzicht te krijgen in de gecombineerde effecten van TEO (filters en koude) onder verschillende omstandigheden (Teurlinx et al., in prep.).

1.1 KENNISLEEMTEN EN HET BEOORDELINGSKADER KOUDELOZINGEN

Ondanks dat er al veel informatie bijeen is gebracht en het inzicht in de effecten van TEO op het ecologisch functioneren van waterlichamen toeneemt, is er nog een aantal kennisleemten die de vergunningverlening voor TEO-installaties lastig maken. Door de kennisleemten op te vullen, kan het beoordelingskader koudelozingen (Kruitwagen et al., 2021), verder onderbouwd of, daar waar nodig, aangepast of gedetailleerd kan worden.

Vanuit de STOWA zijn de volgende kennisleemten geïdentificeerd die relevant geacht worden om vergunningverlening, in relatie tot het beoordelingskader koudelozingen, verder te onderbouwen:

- In het beoordelingskader is de grens van de koudelozing waarop geen negatieve ecologische effecten worden verwacht op 4°C gesteld: de zogenaamde rand van de mengzone. Maar hoe aannemelijk is het dat er bij een ΔT kleiner dan 4°C geen negatieve effecten plaatsvinden?

- Ten aanzien van mogelijke differentiatie voor de seizoenen:
 - in welke periode zijn soortgroepen en het aquatisch ecosysteem gevoeliger en is een kleinere ΔT en minimum watertemperatuur vereist, en
 - in welke periode en situatie kan de ondergrens van 12 graden – als minimale teruglozings-temperatuur – worden losgelaten?
- Ten aanzien van meerdere onttrekkingen:
 - Bij smalle lijnvormige wateren, vaarten en grote kanalen zonder stroming, wordt voor een mengzone maximaal 500 meter aangehouden. Indien er meerdere onttrekkingen plaatsvinden, kan het hele waterlichaam een mengzone worden. Wat betekent het voor het ecologisch functioneren dat over een aantal kilometers de temperatuur van een water meer dan vier graden afkoelt ten opzichte van de natuurlijk temperatuur?
- Ten aanzien van vismigratie: in hoeverre is te verwachten dat een mengzone die meer dan 50% van de doorsnede natte oppervlakte bestrijkt, vissen ervan weerhoudt te passeren?

De meeste van deze kennisleemten lijken goed beantwoord te kunnen worden met een literatuurstudie, met uitzondering van de kennisleemte over de effecten over meerdere onttrekkingen in lijnvormige wateren, omdat het hier gaat over het ecologisch functioneren. Het ecologisch functioneren van een waterlichaam hangt sterk af van de context zoals de geometrie van het waterlichaam, de verblijftijd van het water, de nutriëntbelastingen, toxiciteit en andere drukfactoren. Een ecologische modelleringsstudie, zoals uitgevoerd door Teurlinx et al. (in prep) is een betere methode om vragen over ecologisch functioneren te beantwoorden dan een literatuurstudie. Desalniettemin is de geïdentificeerde kennisleemte een belangrijk punt om in de toekomst op te vullen.

1.2 DOEL VAN DE STUDIE

In opdracht van STOWA wordt in deze studie, als aanvulling op de literatuurstudie uit 2021 (Harezlak, 2021), een aantal van de hierboven beschreven kennisleemten verder opgevuld. In Harezlak (2021) werd ingegaan op de effecten van koudelozingen op chemische parameters, waterplanten, onderlinge ecologische interacties en temperatuurranges voor vis. In onderliggende studie ligt de focus meer op het inzichtelijk maken wat koudelozingen precies betekenen voor de fenologie (periodieke ontwikkelingen in levensstadia) van vissen en amfibieën. Zo ontstaat ook voor deze soortgroepen overzicht van de effecten van koudelozingen op hun fenologie en kan dat overzicht gebruikt worden voor verdere onderbouwing van het beoordelingskader en/of om het beoordelingskader verder aan te scherpen. Hiervoor zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- Wat zijn zowel de positieve en negatieve effecten van koudelozingen op specifiek de ecologie van vissen en amfibieën?
- Hoe verhouden de gevonden positieve en negatieve effecten op de ecologie van vissen en amfibieën zich tot de gestelde 4°C in het beoordelingskader?
- In hoeverre is een vaste 4°C nodig vanuit het oogpunt van de ecologie van vissen en amfibieën? Oftewel, wanneer is een watersysteem gevoeliger voor afkoeling en wanneer is een watersysteem minder gevoelig?
- De minimumtemperatuur van teruglozing is 12°C. Is dit altijd het geval of geeft de ecologie van vissen en amfibieën de mogelijkheid om deze minimumtemperatuur los te laten?
- Ondervinden vissen hinder van een afkoeling van 4°C van maximaal de helft van de natte doorsnede van een lijnvormig water?

1.3 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 wordt de aanpak besproken. Hoofdstuk 3 gaat in op de in de literatuur gevonden verbanden tussen temperatuur en de fenologie van vissen en amfibieën. Daarna wordt in hoofdstuk 4 gekeken hoe de gevonden kennis vertaald kan worden naar kwantitatieve effecten. Hoofdstuk 5 besluit met beantwoording van de onderzoeksvragen.

2

METHODE

Voor deze literatuurstudie is gebruik gemaakt van een gestructureerde literatuurscan (zie Tabel 1 voor de gebruikte zoektermen). De gebruikte zoektermen zijn samen met waterschappen vastgesteld. De zoektermen zijn vervolgens in google scholar ingevoerd, waarbij zowel naar Nederlandse en Engelse literatuur is gezocht. De zoektermen leverden veel literatuur op. Deze zijn stapsgewijs gefilterd. Een eerste voorwaarde voor de selectie was dat het artikel of het rapport open access moest zijn. Vervolgens zijn die artikelen en rapporten bewaard die op basis van de samenvatting aansloten bij de gestelde onderzoeksvragen. Omdat het binnen de omvang van deze studie niet mogelijk was alle literatuur te doorgronden, zijn per onderzoeksvraag tenminste drie artikelen gekozen die het meest relevant geacht werden voor de betreffende vraag. Om tot een leesbaar document te komen, is de initiële referentielijst uitgebreid met referenties die nodig waren om benodigde duiding en/of detail toe te voegen. Uiteindelijk zijn er voor de studie de volgende referentie gebruikt:

- 23 referenties vanuit initiële zoektermen in studie
- 7 referenties vanuit de 23 referenties vanuit de initiële zoektermen
- 6 additionele referenties om voldoende detail toe te kunnen voegen en tegemoet te komen aan vragen vanuit waterschappen.

Bijlage A.2 toont welke literatuur in welke categorie valt, en ook welke referenties niet gebruikt zijn en welke geen open access hebben, maar mogelijk wel relevant zijn.

De initiële zoektermen hebben een goed overzicht gegeven van welke kennis in de (inter-) nationale literatuur beschikbaar is in relatie tot de gestelde onderzoeksvragen. Echter, er bleek behoefte te zijn om een aantal referenties toe te voegen voor verdere detaillering van de kennis. Dat deze referenties niet omhoog zijn gekomen met de gebruikte zoektermen kan verwonderlijk zijn: zijn de juiste zoektermen wel gebruikt? De opgestelde zoektermen waren bedoeld om een goed overzicht te krijgen van wat bekend is over temperatuur effecten op vissen en amfibieën. Dat is gelukt. De extra referenties zorgden voor een vloeiender overzicht omdat de extra referenties preciezere voorbeelden konden geven of verbanden tussen onderwerpen aanstipten. De extra referenties vereisten specifiekere zoektermen:

- growing degree days amphibians temperature
- primary production change to temperature
- migrating amphibians water quality
- tolerance amphibians to temperature
- food web temperature lake fish

Wel opvallend was dat in de literatuur met name de effecten van temperatuur gekwantificeerd zijn in relatie tot opwarming (klimaatverandering) en dat daarnaast temperatuur vaak als omgevingsparameter is gebruikt en niet als aparte stuurfactor.

TABEL 1 GEBRUIKTE ZOEKTERMEN VOOR VERKRIJGEN RELEVANTE REFERENTIES

Nederlands	Engels
vis AND temperatuur AND effect AND ei OR larve OR juveniel OR adult AND zoet water AND groei	Fish AND temperature AND effect AND eggs OR larvae OR juvenile OR adult AND fresh water AND growth
vis AND temperatuur AND effect AND ei OR larve OR juveniel OR adult AND zoet water AND groei AND seizoen OR minimum temperatuur OR maximum temperatuur OR winter OR zomer	Fish AND temperature AND effect AND eggs OR larvae OR juvenile OR adult AND fresh water AND growth AND season OR minimum temperature OR maximum temperature OR winter OR summer
vis AND migratie AND temperatuur AND effect AND zoet water	Fish AND migration AND temperature AND effect AND fresh water
vis AND migratie AND temperatuur AND effect AND zoet water AND seizoen OR minimum temperatuur OR maximum temperatuur OR winter OR zomer	Fish AND migration AND temperature AND effect AND fresh water AND season OR minimum temperature OR maximum temperature OR winter OR summer
Amfibie OR kikker OR salamander OR pad AND temperatuur AND effect AND ei OR kikkervis OR juveniel OR adult AND seizoen OR minimum temperatuur OR maximum temperatuur OR winter OR zomer	Amphibian OR frog OR newt OR toad AND temperature AND effect AND egg OR tadpole OR juvenile OR adult AND season OR minimum temperature OR maximum temperature OR winter OR summer
Amfibie OR kikker OR salamander OR pad AND temperatuur AND effect AND ei OR kikkervis OR juveniel OR adult AND seizoen OR minimum temperatuur OR maximum temperatuur OR winter OR zomer	Amphibian OR frog OR newt OR toad AND temperature AND effect AND egg OR tadpole OR juvenile OR adult AND season OR minimum temperature OR maximum temperature OR winter OR summer

3

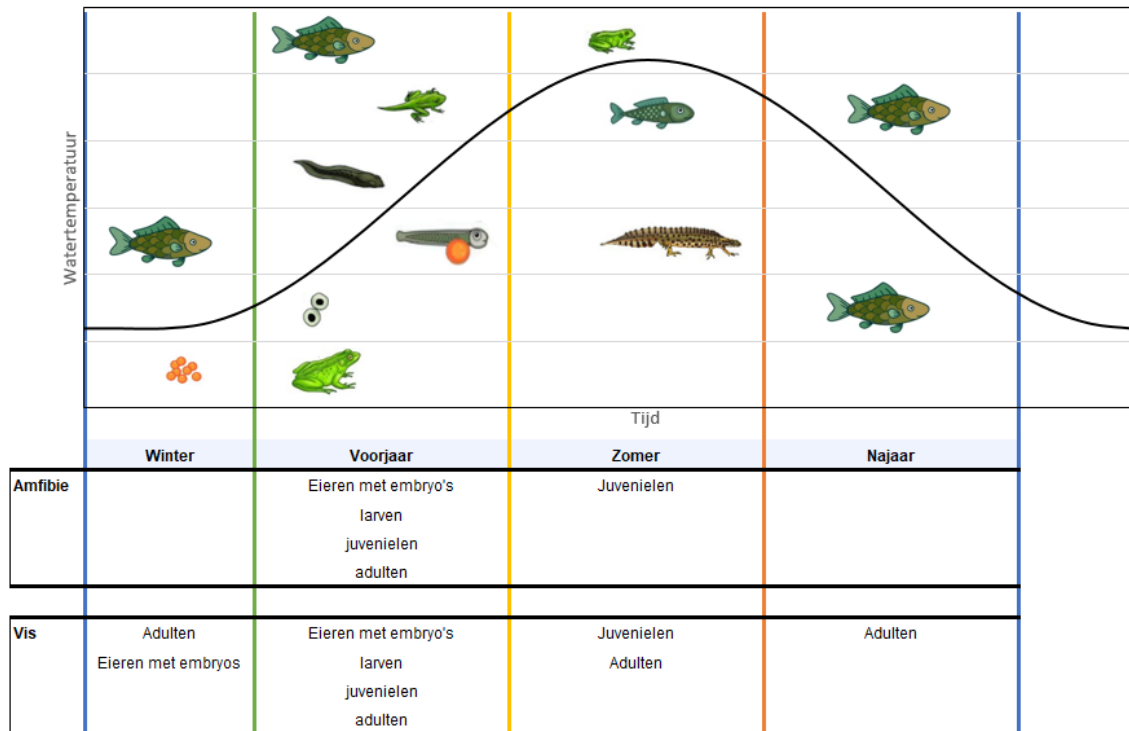
TEMPERATUUR, VISSSEN EN AMFIBIEËN

In Harezlak (2021) is voor vissen een overzicht gemaakt van temperatuurranges van in Nederland voorkomende vissoorten voor verschillende levensstadia: ei/larve, adult, overleving en paai. Er is in die studie geen aandacht besteed aan fenologie en amfibieën ontbreken volledig. In onderliggende studie wordt daarom voor vissen verder ingegaan op relaties tussen de verschillende levensstadia en temperatuur en migratie en temperatuur. Ook voor amfibieën wordt ingegaan op effecten van temperatuur op hun fenologie en de samenhang tussen ontwikkelingsstadia en wat de rol van temperatuur is.

3.1 VISSSEN, AMFIBIEËN EN SEIZOENEN

Tussen Nederlandse vissen en amfibieën bestaan overeenkomsten en verschillen. Zo zijn beide groepen gebonden aan water, ectotherm en planten zich voort middels eilegging. Afhankelijk van het levensstadia kunnen zowel vissen als amfibieën wegtrekken van minder geschikte milieucondities, waarbij voor vissen connectiviteit met andere waterlichamen moet bestaan en amfibieën via land op zoek kunnen naar ander water. Echter, in de vroege levensstadia (ei en larve) zijn beide groepen dieren gebonden aan de heersende milieucondities van het opgroeigebied. Deze vroege levensstadia, en deels ook latere levensstadia, vallen voor inheemse vissen en amfibieën vaak samen in de tijd, waardoor een algemeen beeld geschetst kan worden van het verloop van de ontwikkeling van soorten in relatie tot de watertemperatuur (Figuur 1). Daarnaast reageren beide groepen in het embryo-stadium hetzelfde op lagere en hogere watertemperaturen, zoals een snellere ontwikkeling van het embryo- naar het larvenstadium onder hogere temperaturen (Pankhurst & Munday, 2011; Hoffmann et al., 2021).

FIGUUR 1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE VERDELING VAN VERSCHILLENDE DOOR WATERTEMPERATUUR BEÏNVLOEDE LEVENSTADIA VAN VISSEN EN AMFIBIEËN OVER VIER FENOLOGISCH RELEVANTE PERIODEN: WINTER (RECHTS VAN BLAUW), VOORJAAR (RECHTS VAN GROEN), ZOMER (RECHTS VAN GEEL), NAJAAR (RECHTS VAN ORANJE)



De ontwikkeling van vissen en amfibieën is dus te koppelen aan het seizoenale temperatuurverloop. Dit geeft aanknopingspunten voor hoe (on-) natuurlijke temperatuur-fluctuaties soorten, en daarmee populaties, kunnen beïnvloeden. Zo is de winter een rustperiode, het metabolisme staat op een laag pitje: amfibieën overwinteren op vochtige plaatsen met uitzondering van een aantal soorten die in het water overwinteren, en vissen spenderen weinig energie aan andere zaken dan instandhouding van hun biomassa. Wanneer in het voorjaar zowel de watertemperatuur als de daglengte toenemen, begint het metabolisme op te starten en beginnen beide soortgroepen de voortplanting. Het voortplantingsseizoen kent qua temperatureisen voor beide soortgroepen een grote spreiding door soort-specifieke temperatureisen voor zowel paai als de ontwikkeling en het uitkomen van eitjes (Chezik et al., 2013).

Tijdens de zomer bevinden van beide soortgroepen veel soorten zich in het juveniele en adulte levensstadium. Voor adulte moeten de temperaturen binnen de temperatuurrange van de soort vallen en voor juvenielen zijn de temperaturen ook van belang voor de ontwikkelingssnelheid. De tolerantie voor hogere temperaturen is daarbij kleiner dan voor lage temperaturen. In het najaar neemt de temperatuur af en bereiden soorten zich voor op de naderende winter door hun biomassa, en daarmee hun fitness, te vergroten: voedsel zoeken en consumeren heeft een hoge prioriteit om de winter te kunnen overleven (Biro et al., 2021).

Een belangrijk aandachtspunt tijdens de zomer is dat hoge temperaturen kunnen leiden tot slechtere waterkwaliteit. Hoge temperaturen kunnen in weinig stromende wateren in de diepere gedeelten (niet de oeverzone) leiden tot stratificatie. Door de doorlopende zuurstofvraag van de bodem kunnen onder de thermocline lage zuurstofconcentraties ontstaan (stratificatie), die lethaal kunnen zijn voor vissen en amfibieën, waarbij sommige soorten beter tegen lage zuurstofconcentraties kunnen dan anderen.

Tussen vissen bestaat een grote verscheidenheid in aanpasbaarheid aan lage zuurstofconcentraties, zo hebben salmoniden hoge zuurstofconcentraties nodig en kunnen karpers en aal/paling goed overleven onder lage zuurstofconcentraties. Amfibieën zijn over het algemeen gevoeliger voor lage zuurstofconcentraties dan vis (Bickler en Buck, 2007). Na het opheffen van stratificatie kunnen tijdelijk verlaagde zuurstofconcentraties ontstaan in de hele waterkolom. Een ander proces dat effect kan hebben op de waterkwaliteit tijdens hoge temperaturen is een sterke algengroei, zeker in nutriëntrijke systemen. Tijdens de nacht hebben de algen zuurstof nodig, waardoor de zuurstofconcentraties ook afnemen (Tait & Schiel, 2013). Daarnaast leidt hoge algenproductie tot hoge pH-waarden.

Koudelozingen kunnen met name in de zomer de hoge watertemperaturen temperen, maar kunnen ook bijdragen aan stratificatie, doordat het verschil tussen de temperatuur nabij het oppervlakte water en nabij de bodem verder uiteen kunnen gaan liggen en daarmee stratificatie versterken. Of een koudelozing bijdraagt aan stratificatie of het water als geheel afkoelt, hangt af van het watertype. In stromende wateren is de kans op stratificatie lager dan in stilstaande wateren.

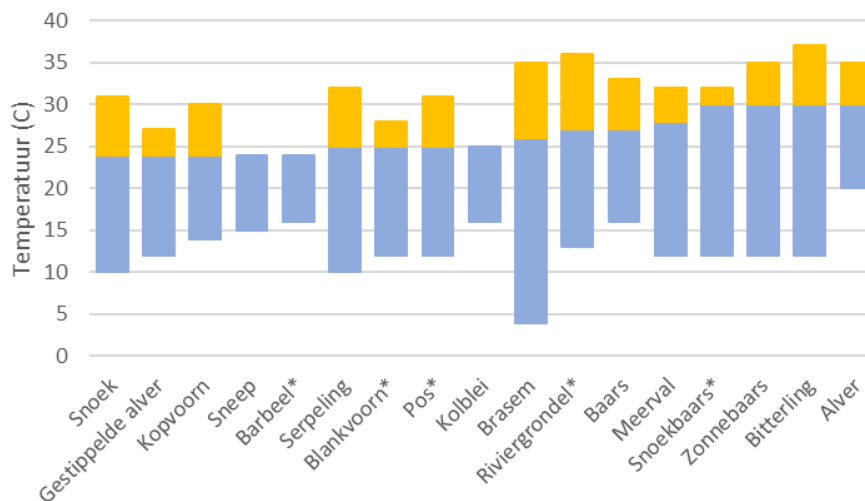
3.2 VISSEN, AMFIBIEËN EN TEMPERATUUR

De ontwikkeling van vissen en amfibieën van embryo-stadium naar adult (fenologie) wordt sterk gestuurd door temperatuur en is soort-afhankelijk. De soort-afhankelijkheid is terug te zien in bijvoorbeeld de paaiperiode, en de snelheid van ontwikkeling van het ene levensstadium naar het andere (Chezik et al., 2013; Chezik et al., 2014a; Chezik et al., 2014b). Soorten hebben daarmee hun eigen optimum temperatuurrange voor verschillende levensstadia. En met name voor vis is hier veel over bekend.

De temperatuurranges voor vis (ei/larve, juveniel, adult en paai) zijn onder andere beschreven in Van Grinten et al. (2007) en is in Harezlak (2021) geïnterpreteerd voor de effecten van koudelozingen. De data in Harezlak (2021) is beschikbaar via een database. In de huidige literatuurstudie is het overzicht van Van Grinten et al. (2007) aangevuld met data vanuit Souchon & Tissot (2012). In deze laatstgenoemde studie wordt een overzicht gegeven voor de temperatuurranges van de verschillende levensstadia van veel voorkomende vissen in de rivieren van West-Europa. De data ranges wijken voor sommige soorten af van Van Grinten et al. (2007), maar geven ook voor een aantal soorten aanvullende data (Figuur 2). De meeste optimumtemperaturen liggen dicht bij de hoge kritische grens van te warm water dan te koud water (Van Grinten et., 2007; Hoffmann et al 2021).

FIGUUR 2

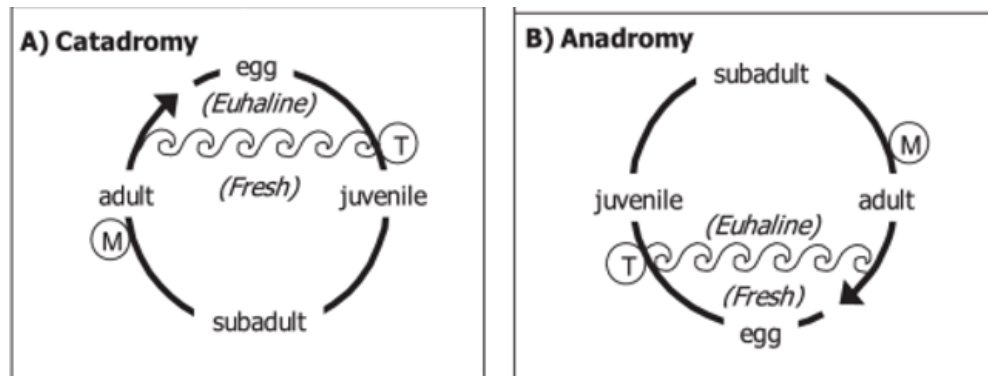
TEMPERATUURRANGES VOOR HET ADULTE STADIUM VOOR VERSCHILLENDE VISSOORTEN. IN BLAUW DE TEMPERATUUR RANGE VAN MINIMUM NAAR OPTIMALE TEMPERATUUR EN IN ORANJE DE TEMPERATUUR RANGE VAN OPTIMAAL NAAR LETHAAL. EEN ONTBREKEND ORANJE BALKJE BIJ EEN SOORT WIJST OP ONTBREKENDE DATA. EEN * BIJ DE SOORTNAAM GEEFT AAN DAT DE DATA (DEELS) AFKOMSTIG IS UIT GRINTEN ET AL., 2007. DE REST VAN DE DATA IS OVERGENOMEN UIT SOUCHON & TISSOT 2012



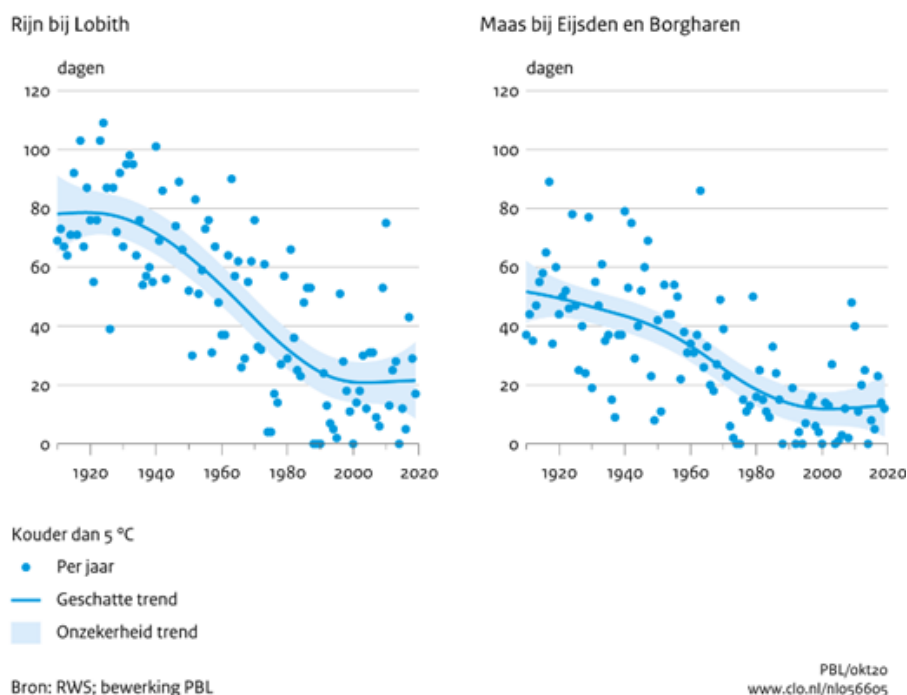
Een aspect dat ontbreekt in Harezlak (2021) is de notie van migratie van vissen. Het migratiegedrag van vissen heeft consequenties voor het effect dat door soorten in potentie door koudelozingen ondervonden kan worden: niet alle levensstadia worden in zoet water volbracht. Er kan onderscheid gemaakt worden in katadroom en anadroom migratiegedrag:

- Katadrome vissen, zoals de paling en bot, leggen hun eieren in zout water en volbrengen de rest van hun levenscyclus in zoet water (Figuur 3, links). De paai en ontwikkeling van het embryo-stadium worden daarmee niet beïnvloed door koudelozingen, hoewel koudelozingen wel kunnen leiden tot latere maturatie en daardoor effect kunnen hebben op het moment van trek, de fitheid van de individuen en het aantal en/of omvang van eieren (Pankhurst en Munday, 2011).
- Anadrome vissen, zoals zalm, houting, en elft, leggen hun eieren in zoet water en brengen de rest van hun leven door in zout water (Figuur 3, rechts). De paai van deze soorten begint vaak al in de winter, bij watertemperaturen van 6 tot 8°C (Paalvast & Noordhuis, 2012; Van Grinten et al., 2008). Door de timing van paai en hun voorkeur voor lagere temperaturen tijdens de paai zullen anadrome vissen zeer waarschijnlijk geen effect ondervinden van koudelozingen. Deze soorten lijken met name last te hebben van warmer wordend water, aangezien de lage vereiste lage temperaturen in de winter steeds minder vaak gehaald worden (Figuur 4).
- Voor niet migrerende soorten worden wel alle levensstadia beïnvloed door de temperatuur in zoete wateren. Voor deze soorten kan onderscheid gemaakt worden in koude en warmte minnende soorten. Afhankelijk van timing van de koudelozing zullen koude minnende soorten over het algemeen baat hebben bij lagere watertemperaturen en warmte minnende soorten zullen of minder baat of negatieve effecten van koudelozingen. Deze informatie is terug te vinden in Harezlak (2021).
- Over het algemeen is migratiedrang van vissen zo groot, dat van een koude barrière van enkele graden geen sprake is. Echter, bij welke afkoeling er wel sprake is van een barrière-werking is onbekend (pers comm T. Buijse).

FIGUUR 3 BESCHRIJVING VAN DE LEVENSCYCLUS VAN KATADROME (LINKS) EN ANADROME (RECHTS) VISSEN. T STAAT VOOR DE LARVALE TRANSFORMATIE EN M VOOR SEKSUELE VOLWASSENHEID. OVERGENOMEN VAN MCBRIDE EN MATHESON, 2011



FIGUUR 4 AANTAL DAGEN DAT DE WATERTEMPERatuur LAGER IS DAN 5°C BIJ LOBITH (LINKS) EN BIJ EIJSDEN EN BORGHAREN (RECHTS). OVERGENOMEN VAN PBL



Belangrijk is dat temperatuurranges van soorten ook gezien moeten worden vanuit een voedselweb-oogpunt. Bijvoorbeeld: paai van vis bij koudere temperaturen zorgt ervoor dat de ontwikkeling van ei naar larve en juvenielen eerder in het seizoen plaats vindt dan van soorten die bij warmere temperaturen paaien. Jagende piscivore soorten zoals baars, snoek en snoekbaars doen hier hun voordeel mee. Door bij koudere temperaturen te paaien dan benthivore soorten zoals voorn, bitterling en alver, kunnen de piscivore juveniele soorten zich al snel voeden met relatief kleine individuen van de benthivore soorten (Souchon & Tissot 2012). Koudelozingen kunnen daarmee invloed hebben op voedselweb: mismatches tussen voedselvraag en -aanbod moeten voorkomen worden.

3.3 SPECIFIEKE EFFECTEN VAN TEMPERATUUR OP DE FENOLOGIE

Hoewel er sprake is van een optimumrange, betekenen grote amplitudes in temperatuur op korte termijn, zoals dagen, dat meer energie nodig is om het metabolisme te reguleren

dan constantere temperaturen. Daarbij komt dat de optimumrange voor temperaturen in de vroege levensstadia voor zowel vissen als amfibieën het smalst is: het metabolisme kan nog niet gereguleerd worden (Souchon and Tissot, 2012; Ruthsatz et al., 2022). Dit uit zich ook in gevoeligheid voor koude schokken: in de vroege levensstadia kunnen koude schokken (vanaf een ΔT van 4°C) leiden tot (sub-) lethale effecten (Miche et al., 2020). Koude kan ook, wanneer niet in schokken voorkomend, helend zijn: het biedt mogelijkheden voor herstel na voor soorten relatief zeer warme perioden. Daarbij blijken in ieder geval vissen actief op zoek te gaan naar koude refugia. Sowieso hebben vissen de tendens om thermale habitats op te zoeken die hun groei maximaliseren (Souchon and Tissot, 2012).

Een ruimtelijke variatie in temperatuur, zoals koude refugia, draagt dus bij aan een robuuster watersysteem doordat soorten die plekken kunnen kiezen die qua temperatuur het meest geschikt is. Een bijkomend aspect is dat ruimtelijke variatie in temperatuur, oftewel temperatuur-gradiënten, kunnen bijdragen aan meer diverse (en dus meer robuuste) populaties (Richter-Boix et al 2014; Killen et al., 2017) sex and relatedness. However, the role of physiological traits has been largely overlooked. Here, we discuss mechanisms by which physiological traits—particularly those related to metabolism and locomotor performance—may result in phenotypic assortment not only among but also within animal groups. At the among-group level, varying combinations of passive assortment, active assortment, phenotypic plasticity and selective mortality may generate phenotypic differences among groups. Even within groups, however, individual variation in energy requirements, aerobic and anaerobic capacity, neurological lateralization and tolerance to environmental stressors are likely to produce differences in the spatial location of individuals or associations between group-mates with specific physiological phenotypes. Owing to the greater availability of empirical research, we focus on groups of fishes (i.e. shoals and schools. Voor bijvoorbeeld de heikikker (*Rana arvalis*) is aangetoond dat een qua temperatuur relatief homogeen leefgebied leidt tot hogere zwemsnelheden die redelijk uniform zijn in de populatie, terwijl een meer heterogeen leefgebied wel leidt tot een gemiddeld lagere zwemsnelheid, maar met een grotere spreiding binnen de populatie (Richter-Boix et al., 2014).

3.4 ACCLIMATISATIE EN PLASTICITEIT

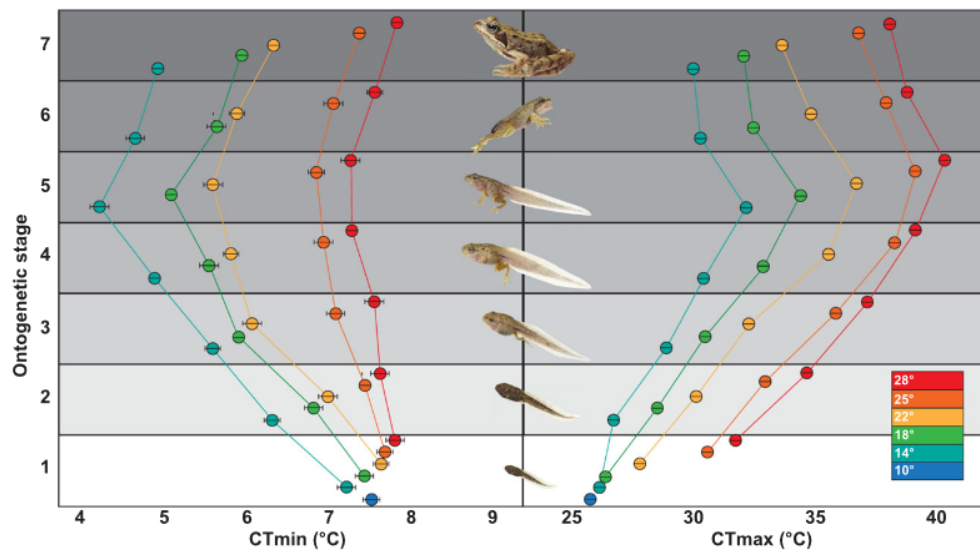
Hoewel temperatuurranges een bruikbare indicator zijn voor a) waar soorten voorkomen en b) of een soort nadelige effecten ondervindt van temperatuur, zijn temperatuurranges tot op zekere hoogte variabel: soorten kunnen zich door acclimatisatie aanpassen aan veranderende temperaturen. Vissen zijn bijvoorbeeld in staat door acclimatisatie het bereik van de optimale temperatuur te veranderen: wanneer vissen eerst 3 weken in water met een relatief hoge temperatuur acclimatiseren dan kunnen ze beter overleven boven hun optimale temperatuurrange dan vissen die niet eerst geacclimatiseerd zijn (Souchon and Tissot, 2012).

Acclimatisatie aan warmere temperaturen in eerdere levensstadia en daarna door koudelozingen moeten leven in koudere temperaturen kan wel problemen opleveren: acclimatisatie is het gevolg van plasticiteit (de mogelijkheid van een individu om zich aan te passen aan milieucondities) in bepaalde kenmerken van soorten en vergroot daarmee de overlevingskansen. Hoe soorten zich aanpassen aan temperatuur-condities wordt onder andere gestuurd door de temperatuurrange tijdens de ontwikkeling. Zo leidt een lagere temperatuur tot een langer larve- (vis) en kikkervisjesstadium. Voor het larvestadium leiden lagere temperaturen tot meer skeletspieren en voor het kikkervisjesstadium tot een mogelijke kleinere statuur, kortere pootjes en een grotere mate van verbening in het adulte stadium (Gomez-Mester et

al 2010, en referentie daarin). Specifiek voor de roodoogmakikikker (*Agalychnis callidryas*) en de klauwkikker (*Xenopus laevis*) werd door Gomez-Mester et al. (2010) een bredere bek voor adulten gevonden. Deze morfologische veranderingen kunnen effect hebben op de fitheid van de populatie. Ook Seebacher en Grigaltchik (2014) vonden effecten van temperatuur tussen verschillende levensstadia. De lichaamslengte is langer en de zwemsnelheid is hoger voor individuen van de hamerkikker (*Limnodynastes peronii*) die zich bij hogere temperaturen hebben ontwikkeld. Vertalend naar een natuurlijk temperatuurverloop kan dit inhouden dat individuen die eerder in het jaar geboren worden (bij koudere temperaturen) langzamer kunnen zwemmen dan individuen die later in het jaar (bij warmere temperaturen) worden geboren. Dit kan leiden tot een verschil in fitness tussen individuen van dezelfde populatie.

Een illustratieve studie naar de effecten en temperatuurtolerantie van verschillende levensstadia is uitgevoerd door Ruthsatz et al., (2022). De studie laat zien dat de thermische tolerantie van de bruine kikker (*Rana temporaria*) het kleinst is in de vroegere levensstadia en voor het adulte levensstadium en het grootst is tijdens de transformatie van kikkervisje naar kikker. De thermische tolerantie wordt beïnvloed door acclimatisatie: wanneer de vroegere ontwikkelingsstadia plaats vinden bij hogere temperaturen, dan geldt dat het adulte stadium ook beter tegen hogere temperaturen kan en vice versa voor lagere temperaturen (Figuur 5)

FIGUUR 5 VERSCHILLENDE ONTOGENETISCHE FASES WAARIN HET BEREIK VAN DE KRITIEKE MINIMUM TEMPERatuur (CTMIN) EN KRITIEKE MAXIMUM TEMPERatuur (CTMAX) VERANDEREN. DE KLEUREN REPRESENTEREN DE VERSCHILLENDE ACCLIMATISATIE TEMPERATUREN. OVERGENOMEN VAN RUTHSATZ ET AL., 2022



3.5 ANDERE STUURFACTOREN DAN TEMPERatuur

Temperatuur acclimatisatie is niet eenduidig en kan beïnvloed worden door andere stuurfactoren. Zo kunnen gradueel toenemende temperaturen voor sommige amfibiesoorten leiden tot een lager lichaamsgewicht, terwijl voor andere soorten het lichaamsgewicht juist toe neemt (Ficetola & Maiorano 2016). Ook blijkt dat, hoewel acclimatisatie soorten in staat stelt om om te gaan met relatief hoge en lage temperaturen, ze met name onder hogere temperaturen vatbaarder worden voor andere stressoren, zoals een grotere gevoeligheid voor toxische stoffen en tijdelijk beperkt voedselaanbod (Ficke et al., 2007). Buiten hun optimale temperatuurrange lijken soorten meer vatbaar voor parasieten (Emde et al., 2016; Paull et al 2012).

Ook de plasticiteit van soorten wordt niet alleen door temperatuur gestuurd. Een langer kikkervisjesstadium, mogelijk een kleinere statuur op het moment van metamorfose, kortere pootjes en een grotere mate van verbening in het adulte stadium kunnen ook veroorzaakt worden door voedselbeschikbaarheid, de dichtheid (aantallen per volume) van de kikkervisjes, en het water volume (Gomez-Mester et al 2010). Ook de waterkwaliteit kan een rol spelen. Zo bleek de groei- en ontwikkelingssnelheid en het gewicht van kikkervisjes positief gecorreleerd met een temperatuuroename van 4°C in een helder water. Echter, voor groeisnelheid en gewicht werd een negatieve correlatie gevonden onder troebele omstandigheden, veroorzaakt door een verandering in de stoichiometrie van de kikkers (Norlin et al., 2016).

Een andere factor die effect kan hebben op de plasticiteit is de lengte van het groeiseizoen. Zo blijkt dat voor *Bufo gargarizans* (een algemeen voorkomende kikkersoort in Azië en Rusland) de ei-grootte, leeftijd wanneer seksueel volwassen en gemiddelde leeftijd toenemen bij een afnemende lengte van het groeiseizoen. Tussen vrouwtjes en mannetjes zijn verschillende responses aanwezig in relatie tot groeisnelheid, welke veroorzaakt worden door trade-offs tussen groei en reproductie. Deze trade-off wordt Rensch's rule genoemd (Liao et al., 2015).

4

KWANTIFICERING VAN TEMPERATUUR OP FENOLOGIE

Het leggen van een relatie tussen de bevindingen in hoofdstuk 3 en naar wat dit betekent voor de effecten van koudelozingen op de ecologie van vissen en amfibieën kan bijdragen om ecologisch meer onderbouwd vergunningsaanvragen te kunnen beoordelen. Net zoals voor waterplanten (zie Harezlak, 2021) zouden growing degree days (GDD, de cumulatieve tijd dat een temperatuur boven een minimumtemperatuur van een soort is), gebruikt kunnen worden. Doordat GDD een kwantitatieve koppeling is tussen watertemperatuur en fenologie, is dit in *potentie* een bruikbare methode om de effecten van koudelozingen over een langere periode op de fenologie van vissen (Chezik 2013; Chezik et al., 2014a&b) en potentieel amfibieën in te kunnen schatten. Voor amfibieën zijn over het algemeen iets complexere formules beschikbaar om de timing van metamorfose te schatten: daarin worden lichaamsgewicht (Gillooly et al., 2002) en lengte meegenomen (O'Regan et al., 2014). Deze benadering kan ook voor vissen gebruikt worden, maar de simpele GDD-benadering is voor vissoorten verder uitgewerkt in de literatuur (Honsey et al., 2018).

Het gebruik van de GDD-benadering kan inzichtelijk maken wat een langdurige afkoeling van bijvoorbeeld 4°C betekent en of die afkoeling jaarrond dezelfde effecten heeft. Ook kan met de GDD-benadering gekeken worden wat de ondergrens van 12°C van een koudelozing voor vissen en amfibieën betekent. Ondanks dat er verscheidene empirische studies zijn gerapporteerd (onder andere Neuheimer en Taggart, 2007; Venturelli et al., 2010; Chezik et al., 2014a), wordt voor vissen en amfibieën de GDD nog niet heel breed toe gepast. Een belangrijke reden hiervoor is dat er geen lineaire relatie is tussen groei van vis en GDD, waardoor soort specifieke, non-lineaire groeimodellen favoriet zijn.

In de non-lineaire groeimodellen wordt uitgegaan van een energiebalans, waarbij groei een resultante is van de energie beschikbaar via consumptie, min het metabolisme en excretie. De groei wordt daarbij beïnvloed door temperatuur. Honsey et al. (2018) heeft aangetoond dat onder verschillende temperatuurscenario's en uitgaand van een minimum benodigde temperatuur van 5°C als minimumtemperatuur voor groei, jaarlijkse groei van vissen nagenoeg lineair is. Deze relatie geldt enkel voor groei *tot* het adulte levenstadium, omdat de groei van adulten vaak niet lineair is door onder andere reproductie (referenties in Honsey et al., 2018).

Het voordeel van GDDs ten opzichte van non-lineaire groeimodellen is dat er nauwelijks soort-specifieke eigenschappen meegenomen hoeven te worden: enkel een T_0 die aangeeft boven welke temperatuur netto groei plaats vindt:

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_0$$

Waarbij T_{\max} en T_{\min} staan voor de dagelijkse maximum en minimumtemperatuur. De berekende GDD over een periode moet vervolgens gekoppeld worden aan bepaalde levensfasen. Door Chezik et al. 2014a is een overzicht gemaakt van de hiervoor beschikbare data voor vissen (zie bijlag A.1) en O'Regan et al. (2014) voor data voor amfibieën. De T_0 waarden blijken wel zeer fluctuerend: voor dezelfde vissoort kunnen zeer verschillende waarden gebruikt worden, afhankelijk van statistische aannames en lokale condities. Wanneer een T_0 is vastgesteld voor een gebied, kan deze wel gebruikt worden om de effecten van veranderingen in temperatuur op de ontwikkelingsstadia van vissen en amfibieën te duiden. De veranderingen in de duur van ontwikkelingsstadia door koudelozingen kunnen met GDD beoordeeld worden, zoals een maximale mate van vertraging van ontwikkeling van een aantal sleutelsoorten.

Voor de jaarlijkse groei (toename in lengte per leeftijdscohort) tijdens de adulte levensfase van vis draagt Chezik et al. (2014a) een robuuste en meer generieke benadering aan: de annual degree days (ADDs). Voor de berekening van ADDs kan gebruik gemaakt worden van gestandaardiseerde T_0 waarden (0, 5, 10 en 15°C). De ADDs kunnen als volgt berekend worden:

$$ADD_{T_0} = \frac{365}{\pi} \left[w \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \sin t \, dt - \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} (T_0 - T_{mean}) dt \right]$$

Waarbij t de dag in het jaar is, 365 de cyclus periode, $w = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{2}$, T_{\max} en T_{\min} zijn jaarwaarden, T_{gem} de gemiddelde jaar temperatuur en $\theta = \frac{T_0 - T_{gem}}{w}$. T_0 is een soort-specifieke temperatuur waarbij netto groei plaats kan vinden.

Voor de effecten van koudelozingen op de ontwikkelingssnelheid van levensstadia van vissen en amfibieën kan dus, met uitzondering van het adulte levensstadium, de GDD-benadering gebruikt worden en voor de adulte levensstadia van vis de ADD-benadering. Voor beide benaderingen geldt dat, hoewel temperatuur een sterk bepalende factor is voor de snelheid van de ontwikkeling, andere omgevingsfactoren van belang zijn, zoals stroomsnelheid, zuurstof- en nutriëntconcentraties, de aanwezigheid van toxische stoffen en biologische interactie. Suboptimale condities van deze factoren kunnen de ontwikkeling van een individu, zoals bepaald door de temperatuur, wijzigen (Chezik et al., 2014a).

Een belangrijk aspect van koudelozingen en potentiële effecten op de ecologie van vissen en amfibieën is de samenhang tussen soorten. Koudelozingen kunnen een negatief effect hebben op één soort en een positief effect op een andere soort. Het netto-effect op de soorten als geheel is daarom waardevol. Dat betekent dat bijvoorbeeld het gebruik van GDD interessant is wanneer dit op een aantal soorten wordt toegepast en het netto-effect wordt geëvalueerd. Een alternatief kan zijn dat er naar een paar doelsoorten wordt gekeken.

5

CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

5.1 CONCLUSIES ALGEMEEN

De effecten van koudelozingen op de ecologie van vissen en amfibieën zijn divers. Over het algemeen leiden lagere temperaturen tot een tragere ontwikkeling van de verschillende levensstadia en hogere temperaturen tot een snellere ontwikkeling. Daarnaast zorgt de ontwikkeling onder relatief koude of warme temperaturen tot aanpassingen in de fysiek van soorten, die mogelijk effect hebben op de fitheid van de populatie, zoals veranderingen in zwemsnelheden. De introductie van een temperatuurgradiënt stuurt op een grotere diversiteit binnen een populatie en daarmee op een meer robuuste populatie. Het ontstaan van thermische kortsluiting doet daarentegen niet veel voor het robuuster maken van populaties: er ontstaat geen gradiënt. Echter, wanneer er op grotere schaal (omringende wateren) meer variatie in temperatuur ontstaat, dan kan deze variatie op grotere schaal wel voor meer diversiteit zorgen: qua milieucondities en qua tijdsduur van beschikbaarheid van voedsel. Wel moet opgepast worden met koude schokken. Deze kunnen leiden tot lethale en nagenoeg lethale effecten voor met name de vroege levensstadia. Een geleidelijke opstart en uitschakeling van de TEO verdient daarom aanbeveling.

Een belangrijk aspect van koudelozingen is de timing: in welke periode wordt er koude geloosd en hoe koppelt dit aan de ontwikkeling van verschillende levensstadia? Soorten kunnen zich door acclimatisatie aanpassen aan relatief koude of warme temperaturen binnen hun temperatuurrange. Wanneer soorten acclimatiseren aan relatief warme temperaturen en zich hier ook op ontwikkelen qua fysieke kenmerken, dan kan een plots geïntroduceerde koudelozing leiden tot een mismatch tussen de temperatuur waar een soort zich op acclimiseert (relatief warm) en wat de uiteindelijke temperatuur is (relatief koud). Deze mismatch kan in potentie leiden tot een minder vitale populatie en pleit voor een stelselmatige afkoeling gedurende het jaar. Wanneer TEOs jaarrond worden gebruikt, leidt dit mogelijk niet alleen tot vitalere populaties door de introductie van een temperatuurgradiënt, maar ook tot meer koude dagen in winter wat gunstig is voor de vroege paaiers. Het najaar lijkt het minst relevant voor veranderingen in temperatuur.

5.2 CONCLUSIES TEN AANZIEN VAN CRITERIA BEOORDELINGSKADER

De minimum terugloos-temperatuur van 12°C en de 50% natte doorsnede zijn echte vis-gerelateerde criteria. De mengzone van 4°C is een ecologisch breder criterium. In onderstaande tekst moet daarom de 4°C smal geïnterpreteerd worden: enkel voor vis. Voor amfibieën zijn geen duidelijke temperatuurranges gevonden. Daarnaast is uit onderliggende studie niet duidelijk wat de 4°C precies voor de fenologie van vis doet: hoeveel wordt de ontwikkeling van een bepaalde vis vertraagd en wat betekent dat voor het ecologisch functioneren? Dat is een vraag die nog beantwoord dient te worden. Wel kan gesteld worden dat het ei/larve stadium gevoeliger is voor temperatuurveranderingen dan het juveniele en adulte stadium voor zowel vissen als amfibieën.

Gezien de temperatuurranges van veel vissoorten (zie Figuur 2, Figuur 5 en Harezlak, 2021), lijkt een afkoeling van 4°C voor vissen niet te leiden tot een verandering van warme

condities naar koude condities. Voor paai en het ei/larve stadium is de gemiddelde range voor vissoorten 11°C en voor het adulte stadium 14°C. Hier zitten wel soorten tussen met een smallere temperatuurrange voor de paai, zoals het biermpje, rivierdonderpad, riviergrondel en beekprik. De 4°C lijkt daarmee over het algemeen aan de veilige kant te blijven, gezien mogelijk effecten van acclimatisatie op temperatuur en daaraan gekoppelde ontwikkeling. Het toepassen van GDD zou een handvat kunnen bieden om voor een locatie meer grip te krijgen wat een koudelozingen potentieel betekent voor de verschillende levensstadia: hoeveel vertraagt de ontwikkeling? Het is goed om dit in het licht van natuurlijk temperatuurvariatie te zetten en de lokale temperatuurverlaging in het watersysteem. Ook kunnen GDDs mogelijk ingezet worden om een maximale afkoeling voor vis voor een waterlichaam te duiden (daarbij andere soortgroepen negerend).

Voor het adulte stadium van vis lijkt een temperatuurverandering van 4°C klein: ze zoeken actief de temperatuur range op waarbij de groei wordt geoptimaliseerd: zolang er geen thermische kortsluiting optreedt, maar een gradiënt, dan vindt de adulte vis vermoedelijk zijn weg wel. Daarnaast kunnen lagere temperaturen juist de inheemse vissen een beter temperatuurklimaat bieden in tegenstelling tot exoten. De toepassing van de ADD kan een indicatie geven in welke mate de 4°C leidt tot tragere groei van adulte vis. De 50% natte doorsnede voor adulte vis lijkt ook aan de veilige kant, zeker als in het waterlichaam ook gebieden zijn zonder effect van de koudelozing. En daarbij kan tijdens hogere temperaturen, bijvoorbeeld als gevolg van klimaatverandering, een koudelozing fungeren als koude refugia of zelfs zorgen dat ongewenste hoge temperaturen als gevolg van klimaatverandering getemperd worden.

Het vasthouden aan een minimum terugloos temperatuur van 12°C lijkt met name ten tijde van de paai een goede maat, omdat een aantal soorten pas paaien vanaf 12°C of hoger. Zo paaien de kolblei, alver en bittervoorn pas bij 14°C. De paaiperiode is grotendeels tussen april en juli, dus lagere temperaturen dan 12°C kunnen effect hebben. Zolang er temperatuurgradiënten beschikbaar zijn in geschikte paaigebieden, zou er gespeeld kunnen worden met deze 12°C omdat een koude pluim een temperatuurverloop kent en vaak dynamisch is over de tijd (afhankelijk van instraling, wind, stroming). De 12°C moet daarom gezien worden als een systeemafhankelijk parameter: welke soorten komen voor en hoe ziet de koudelozing eruit in relatie tot de ruimtelijke verdeling van habitats.

5.3 AANBEVELINGEN

Na aanleiding van deze literatuurstudie, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Verder onderzoek naar de effecten van koude schokken op vissen en amfibieën in de vroege levensstadia.
- Verkennen van de bruikbaarheid van de GDD en ADD voor inschatting van de effecten van koudelozingen. Waarschijnlijk zijn deze benaderingen alleen nuttig wanneer een substantieel (wat substantieel is, moet ook nog worden vastgesteld) van het water afkoelt of wanneer de afkoeling plaats heeft in de relevante delen van een waterlichaam, zoals paai en opgroeigebied. Daarnaast moet onderzocht worden welke waarden beschikbaar zijn voor Nederlandse soorten. En niet onbelangrijk: wat zijn de precieze inzichten die deze benaderingen opleveren en zijn deze bruikbaar om inzicht te krijgen in de effecten van koudelozingen voor vissen en amfibieën?
- Ecologische monitoring rondom TEO-installaties: in hoeverre vinden we veranderingen in soorten en eigenschappen van soorten zoals beschreven in deze studie terug?

6

REFERENTIES

- Bickler, P.E. en L.T. Buck (2007). Hypoxia Tolerance in Reptiles, Amphibians, and Fishes: Life with Variable Oxygen Availability. *Annu. Rev. Physiol.* 2007. 69:145–70
- Biro, P.A., J.R. Post en C. Beckman (2021). Autumn lipid reserves, overwinter lipid depletion, and high winter mortality of rainbow trout in experimental lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 78, 738-743.
- Cayuela, H., Arsovski, D., Thirion, J. M., Bonnaire, E., Pichenot, J., Boitaud, S., ... & Besnard, A. (2016). Demographic responses to weather fluctuations are context dependent in a long-lived amphibian. *Global Change Biology*, 22(8), 2676-2687.
- Chezik, K. A. (2013). Fish growth and degree-days: Advice for selecting base temperatures in both within-and among-lake studies. University of Minnesota. https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/160062/Chezik_umn_0130M_14245.pdf?sequence=1
- Chezik, K. A., Lester, N. P., & Venturelli, P. A. (2014a). Fish growth and degree-days I: selecting a base temperature for a within-population study. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(1), 47-55. Growing degree days fish
- Chezik, K. A., Lester, N. P., & Venturelli, P. A. (2014b). Fish growth and degree-days II: selecting a base temperature for an among-population study. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(9), 1303-1311. https://kchezik.github.io/publications/Chezik_2014b.pdf
- De Lange, M., C. Jacobs en P. Boderie (2017). *Deltafact Ecologische effecten koudwaterlozingen*. In opdracht van STOWA.
- Ebbens E, S. Mulder, M. De Haan, C.A. Schipper, K. Jungerling, (2021) Verkenning effecten klimaatdrukfactoren op de natuur van de Grote Wateren; Literatuurscan, vraagarticulatie regio's en synthese, in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- Ficetola, G. F., & Maiorano, L. (2016). Contrasting effects of temperature and precipitation change on amphibian phenology, abundance and performance. *Oecologia*, 181(3), 683-693.
- Ficke, A.D., C.A. Myrick en L.J. Hansen (2007). Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 17 (4), 581-613.
- Gillooly, J.F., E.L. Charnov, G.B. West, V.M. Savage en J.H. Brown (2002). Effects of size and temperature on developmental time. *Nature*, 417, 70 – 73.
- Gomez-Mestre, I., Saccoccio, V. L., Iijima, T., Collins, E. M., Rosenthal, G. G., & Warkentin, K. M. (2010). The shape of things to come: linking developmental plasticity to post-metamorphic morphology in anurans. *Journal of Evolutionary Biology*, 23(7), 1364-1373.
- Grayson, K. L., Bailey, L. L., & Wilbur, H. M. (2011). Life history benefits of residency in a partially migrating pond-breeding amphibian. *Ecology*, 92(6), 1236-1246.

- Harezlak, V., 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 - Warming Up
- Hoffmann, E. P., Cavanaugh, K. L., & Mitchell, N. J. (2021). Low desiccation and thermal tolerance constrains a terrestrial amphibian to a rare and disappearing microclimate niche. *Conservation Physiology*, 9(1), coab027.
- Kavanagh, K. D., Haugen, T. O., Gregersen, F., Jernvall, J., & Vøllestad, L. A. (2010). Contemporary temperature-driven divergence in a Nordic freshwater fish under conditions commonly thought to hinder adaptation. *BMC evolutionary biology*, 10(1), 1-12.
- Kruit, K., B. Schepers, R. Roosjen en P. Boderie (2018). Nationaal potentieel van aquathermie – Analyse en review van de mogelijkheden. CE-rapport 18.5S74.116
- Kruitwagen, G., I. Phernambucq en E. Ypma (2021). Kader voor vergunningverlening koudelozingen 1.0 - Handreiking voor beoordeling van aanvragen voor TEO-systemen. STOWA rapport 2021-30, ISBN 978.90.5773.946.0
- Kuczynski, L., Chevalier, M., Laffaille, P., Legrand, M., & Grenouillet, G. (2017). Indirect effect of temperature on fish population abundances through phenological changes. *PLoS One*, 12(4), e0175735
- Liao, W. B., Luo, Y., Lou, S. L., Lu, D., & Jehle, R. (2016). Geographic variation in life-history traits: growth season affects age structure, egg size and clutch size in Andrew's toad (*Bufo andrewsi*). *Frontiers in Zoology*, 13(1), 1-9.
- McBride, R.S. en R.E. Matheson (2011). Florida's diadromous fishes: biology, ecology, conservation, and management. *Florida Scientist*, 74 (3), 187-213.
- Meeus, D. W., Adriaen, J., De Kimpe, A., Aerts, S., Nevejan, N., & De Charleroy, D. (2011). Zoetwaterkabeljauw: de vis van morgen uit de keuken van gisteren. *Aquacultuur*, 26(1), 1-8.
- Michie, L.E., J.D. Thiem, C.A. Boys en S.M. Mitrovic (2020). The effects of cold shock on freshwater fish larvae and early-stage juveniles: implications for river management. *Conservation physiology* 8, DOI 10.1093/conphys/coaa092.
- Noordhuis R., L.H. van der Heijden, A.E.E. de Jong (2021) Effecten van temperatuurtoename op de grote wateren: een literatuurstudie met data-overzicht
- Neuheimer, A.B., and Taggart, C.T. 2007. The growing degree-day and fish size at-age: the overlooked metric. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 64(2): 375–385. doi:10. 1139/f07-003.
- Norlin, L., Byström, P., Karlsson, J., Johansson, M., & Liess, A. (2016). Climate change will alter amphibian-mediated nutrient pathways: evidence from *Rana temporaria* tadpoles in experimental ponds. *Freshwater biology*, 61(4), 472-485.
- O'Regan, S.M., W.J. Palen and S.C. Anderson (2014). Climate warming mediates negative impacts of rapid pond drying for three amphibian species. *Ecology*, 95 (4), 845-855.
- Pankhurst, N. W., & Munday, P. L. (2011). Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Marine and Freshwater Research*, 62(9), 1015-1026.

- Paull, S. H., LaFonte, B. E., & Johnson, P. T. (2012). Temperature-driven shifts in a host-parasite interaction drive nonlinear changes in disease risk. *Global Change Biology*, 18(12), 3558-3567.
- Richter-Boix, A., Katzenberger, M., Duarte, H., Quintela, M., Tejado, M., & Laurila, A. (2015). Local divergence of thermal reaction norms among amphibian populations is affected by pond temperature variation. *Evolution*, 69(8), 2210-2226.
- Ruthsatz, K., Dausmann, K. H., Peck, M. A., & Glos, J. (2022). Thermal tolerance and acclimation capacity in the European common frog (*Rana temporaria*) change throughout ontogeny. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 337(5), 477-490.
- Seebacher, F., & Grigaltchik, V. S. (2014). Embryonic developmental temperatures modulate thermal acclimation of performance curves in tadpoles of the frog *Limnodynastes peronii*. *PLoS One*, 9(9), e106492.
- Souchon, Y., & Tissot, L. (2012). Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (405), 03.
- Tait, L. W., & Schiel, D. R. (2013). Impacts of temperature on primary productivity and respiration in naturally structured macroalgal assemblages. *PLoS One*, 8(9), e74413.
- Teulincx, S., V. Harezlak en A. van der Linden (in prep). Ecologische effecten TEO-installaties: een modelverkenning. STOWA/Deltares rapport.
- 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
- Venturelli, P.A., Lester, N.P., Marshall, T.R., and Shuter, B.J. 2010. Consistent patterns of maturity and density-dependent growth among populations of walleye (*Sander vitreus*): application of the growing degree-day metric. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 67(7): 1057–1067. doi:10.1139/F10-041.
- Van der Grinten, E., van Herpen, F. C. J., van Wijnen, H. J., Evers, C. H. M., Wuijts, S., & Verweij, W. (2008). Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. *RIVM-rapport 607800004*.
- WarmingUp (2021a). Notitie Modelinstrumentarium voor de verspreiding van koudelozingen. WarmingUp notitie WarmingUP T3B IdG.
- WarmingUp (2021b). Notitie Temperatuureffecten koudelozingen. WarmingUp notitie WU3B.
- Wortelboer, R. en V. Harezlak (2020). Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater – uitgevoerd onder WarmingUp. Deltares rapport 11205155-001-BGS-0001.

NIET GEBRUIKTE REFERENTIES, DIE MOGELIJK WEL RELEVANT KUNNEN ZIJN:

Arend, K. K., Beletsky, D., DePINTO, J. V., Ludsin, S. A., Roberts, J. J., Rucinski, D. K., ... & Höök, T. O. (2011). Seasonal and interannual effects of hypoxia on fish habitat quality in central Lake Erie. *Freshwater Biology*, 56(2), 366-383.

Brodersen, J., Nicolle, A., Nilsson, P. A., Skov, C., Brönmark, C., & Hansson, L. A. (2011). Interplay between temperature, fish partial migration and trophic dynamics. *Oikos*, 120(12), 1838-1846.

Foekema, E. M., Rippen, A. D., & Slijkerman, D. M. E. (2011). *Inventarisatie van lozingspluimen als potentiële migratie-barrière* (No. C078/11). IMARES.

Gale, M. K., Hinch, S. G., Eliason, E. J., Cooke, S. J., & Patterson, D. A. (2011). Physiological impairment of adult sockeye salmon in fresh water after simulated capture-and-release across a range of temperatures. *Fisheries Research*, 112(1-2), 85-95.

Honsey, A. E., Venturelli, P. A., & Lester, N. P. (2019). Bioenergetic and limnological foundations for using degree-days derived from air temperatures to describe fish growth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76(4), 657-669.

Jonsson, B., & Jonsson, N. (2009). A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of fish biology*, 75(10), 2381-2447.

Lototskaya, A. A., Verdonschot, R. C. M., Verdonschot, P. F. M., & Klostermann, J. E. M. (2007). Doorwerking klimaatverandering in KRW-keuzen: cases beken en beekdalen: literatuurstudie (No. 1536). Alterra.

Mantua, N., Tohver, I., & Hamlet, A. (2010). Climate change impacts on streamflow extremes and summertime stream temperature and their possible consequences for freshwater salmon habitat in Washington State. *Climatic Change*, 102(1), 187-223.

Mehner, T. (2012). Diel vertical migration of freshwater fishes – proximate triggers, ultimate causes and research perspectives. *Freshwater Biology*, 57(7), 1342-1359.

Winter, H. V., Griffioen, A. B., & Van Keeken, O. A. (2014). *De Vismigratierivier: Bronnenonderzoek naar gedrag van vis rond zoet-zout overgangen* (No. C035/14). IMARES.

GEEN OPEN TOEGANG:

Ganser, A. M., Newton, T. J., & Haro, R. J. (2015). Effects of elevated water temperature on physiological responses in adult freshwater mussels. *Freshwater Biology*, 60(8), 1705-1716.

Marcos-López, M., Gale, P., Oidtmann, B. C., & Peeler, E. J. (2010). Assessing the impact of climate change on disease emergence in freshwater fish in the United Kingdom. *Transboundary and emerging diseases*, 57(5), 293-304.

Xu, C., Letcher, B. H., & Nislow, K. H. (2010). Context-specific influence of water temperature on brook trout growth rates in the field. *Freshwater Biology*, 55(11), 2253-2264.

BIJLAGE A1

T₀ WAARDEN VOOR GDD

T₀ waarden voor vissoorten zoals opgenomen in Chezik et al., 2014.

Scientific name	Common name	Age (s) ^a	T ₀ (°C)	Temp ^b	Just ^c	Reference	Adoption frequency
<i>Abramis brama</i>	Common bream	0	12.8	W	1	Mooij et al., 1994	2
<i>Aplodinotus grunniens</i>	Freshwater drum	1–10	9	W	2	Braaten and Guy, 2002	0
<i>Barbus barbus</i>	Barbel	0	13.5	W	3	Baras and Philippart, 1999	0
<i>Carassius carassius</i>	Crucian carp	0–2	12	W	4	Copp et al., 2008	1
<i>Carpiodes carpio</i>	River carpsucker	1–8	10	W	2	Braaten and Guy, 2002	0
<i>Coregonus clupeaformis</i>	Lake whitefish	2–3	5	A	9	Rennie et al., 2009	0
<i>Esox lucius</i>	Northern pike	Juvenile	7	W	2	Bry et al., 1991	0
		Unknown	10	W	5	Frost and Kipling, 1967	3
<i>Gobio gobio</i>	Gudgeon	0	12	W	9	Cowx, 2000	0
<i>Gymnocephalus cernua</i>	Ruffe	0	7.6	W	1	Mooij et al., 1994	0
<i>Lepomis gibbosus</i>	Pumpkinseed	0	14	W	2	Murphy et al., 2012	0
<i>Lepomis macrochirus</i>	Bluegill	0	14	W	2	Murphy et al., 2011	0
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Common dace	0	12	W	9	Cowx, 2000	0
		0	12	W	3	Mills and Mann, 1985	4
<i>Lota lota</i>	Burbot	1–3	0 ^d	W	9	Kjellman and Eloranta, 2002	0
<i>Macrhybopsis meeki</i>	Sicklefin chub	1–2	10	W	2	Braaten and Guy, 2002	0
<i>Micropterus salmoides</i>	Largemouth bass	0	0	W	9	Schlosser et al., 2000	0
<i>Morone americana</i>	White perch	0	15	W	2	O’Gorman and Burnett, 2001	0
<i>Notropis atherinoides</i>	Emerald shiner	1–2	7	W	2	Braaten and Guy, 2002	0
<i>Oncorhynchus clarkii</i>	Cutthroat trout	0	5	W	2	Coleman and Fausch, 2007	1
<i>Osmerus eperlanus</i>	European smelt	0	–3.6	W	1	Mooij et al., 1994	1
		1–2	5	A	7	Power and Attrill, 2007	0
<i>Perca flavescens</i>	Yellow perch	0	0	W	2	Mills et al., 1989	0
		0	4.4	A	9	Ney and Smith, 1975	0
		0	10	A	9	Ney and Smith, 1975	0
		2–4	14	W	5	Henderson, 1985	0
		0	13.5	W	5	Tardif et al., 2005	0

Scientific name	Common name	Age (s) ^a	T ₀ (°C)	Temp ^b	Just ^c	Reference	Adoption frequency
Perca fluviatilis	European perch	1	0 ^d	W	9	Borcherding and Magnhagen, 2007	1
		0	9.8	W	1	Mooij et al., 1994	4
		0	14	W	9	Griffiths and Kirkwood, 1995	0
		1–14	14	W	2	Le Cren, 1958	8
Rhodeus amarus	European bitterling	0	12	W	2	Konec̃ná et al., 2009	0
Rutilus rutilus	Roach	0	10.2	W	1	Mooij et al., 1994	1
		0	11.5	W	1	Mooij and van Tongeren, 1990	1
		0	12	W	9	Cowx, 2000	0
		0	12	W	4	Grenouillet et al., 2001	0
		0	12	W	4	Nunn et al., 2003	3
		1–5	13	W	3	Müller and Meng, 1986	0
		0	14	W	3	Broughton and Jones, 1978	0
		0	14	W	9	Griffiths and Kirkwood, 1995	0
		0	16	W	3	Kempe, 1962	0
Salmo salar	Atlantic salmon	0	17.5	W	1	Mooij et al., 1994	1
		1	0 ^d	W	9	Jonsson et al., 2005	0
		Unknown	0 ^d	W	9	Skinner et al., 2008	0
Salmo trutta	Brown trout	0–1	0 ^d	W	8	Baglinière and Maisse, 1990	0
		0	0 ^d	W	9	Ojanguren and Braña, 2003	0
Sander canadensis	Sauger	1–6	5	W	2	Braaten and Guy, 2002	0
Sander lucioperca	Pikeperch (i.e. zander)	0	10	W	1	Mooij et al., 1994	2
Sander vitreus	Walleye	0	5	A	10	Uphoff et al., 2013	0
Semotilus atromaculatus	Creek chub	0	0	W	9	Schlosser et al., 2000	0
Squalius cephalus	European chub	0	12	W	2	Mann, 1976	1
		0	12	W	4	Nunn et al., 2003	2
Thymallus thymallus	Grayling	0	0 ^d	W	9	Haugen, 2000	1
Multiple species	—	0–1	12	W	4	Wolter, 2007	0

Note: Adoption frequency refers to the number of times that an estimated T_0 value was adopted in later studies involving the same species.

^a Age-0 refers to young of the year; all other values are age classes.

^b Temperature: W = water; A = air.

^c Justification (why the study chose the given T_0 value): 1 = fit a growth model (e.g. bioenergetics model), 2 = minimum temperature for physiological process, 3 = goodness of fit (e.g., T_0 that maximizes r_2), 4 = used for common dace (Mills and Mann 1985), 5 = used for European perch (Le Cren 1958), 6 = commonly used in plant studies, 7 = physiologically relevant to *O. mordax*, 8 = used for Atlantic salmon egg survival (Ketola et al. 2000), 9 = none given, 10 = used in Shuter et al.'s 1983 among-population study.

^d not reported; assumed to be 0 °C.

BIJLAGE A2

OVERZICHT GEBRUIKTE EN GEVONDEN REFERENTIES

OPGENOMEN LITERATUUR VANUIT VOORAF OPGESTELDE ZOEKTERMEN

Cayuela, H., Arsovski, D., Thirion, J. M., Bonnaire, E., Pichenot, J., Boitaud, S., ... & Besnard, A. (2016). Demographic responses to weather fluctuations are context dependent in a long-lived amphibian. *Global Change Biology*, 22(8), 2676-2687.

Chezik, K. A. (2013). Fish growth and degree-days: Advice for selecting base temperatures in both within-and among-lake studies. University of Minnesota. https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/160062/Chezik_umn_0130M_14245.pdf?sequence=1

Chezik, K. A., Lester, N. P., & Venturelli, P. A. (2014a). Fish growth and degree-days I: selecting a base temperature for a within-population study. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(1), 47-55. Growing degree days fish

Chezik, K. A., Lester, N. P., & Venturelli, P. A. (2014b). Fish growth and degree-days II: selecting a base temperature for an among-population study. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71(9), 1303-1311.

De Lange, M., C. Jacobs en P. Boderie (2017). Deltafact Ecologische effecten koudwaterlozingen. In opdracht van STOWA.

Ebbens E, S. Mulder, M. De Haan, C.A. Schipper, K. Jungerling, (2021) Verkenning effecten klimaatdrukfactoren op de natuur van de Grote Wateren; Literatuurscan, vraagarticulatie regio's en synthese, in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Gomez-Mestre, I., Saccoccio, V. L., Iijima, T., Collins, E. M., Rosenthal, G. G., & Warkentin, K. M. (2010). The shape of things to come: linking developmental plasticity to post-metamorphic morphology in anurans. *Journal of Evolutionary Biology*, 23(7), 1364-1373.

Honsey, A. E., Venturelli, P. A., & Lester, N. P. (2019). Bioenergetic and limnological foundations for using degree-days derived from air temperatures to describe fish growth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76(4), 657-669.

Kavanagh, K. D., Haugen, T. O., Gregersen, F., Jernvall, J., & Vøllestad, L. A. (2010). Contemporary temperature-driven divergence in a Nordic freshwater fish under conditions commonly thought to hinder adaptation. *BMC evolutionary biology*, 10(1), 1-12.

Kuczynski, L., Chevalier, M., Laffaille, P., Legrand, M., & Grenouillet, G. (2017). Indirect effect of temperature on fish population abundances through phenological changes. *PLoS One*, 12(4), e0175735

- Liao, W. B., Luo, Y., Lou, S. L., Lu, D., & Jehle, R. (2016). Geographic variation in life-history traits: growth season affects age structure, egg size and clutch size in Andrew's toad (*Bufo andrewsi*). *Frontiers in Zoology*, 13(1), 1-9.
- Meeus, D. W., Adriaen, J., De Kimpe, A., Aerts, S., Nevejan, N., & De Charleroy, D. (2011). Zoetwaterkabeljauw: de vis van morgen uit de keuken van gisteren. *Aquacultuur*, 26(1), 1-8.
- Michie, L.E., J.D. Thiem, C.A. Boys en S.M. Mitrovic (2020). The effects of cold shock on freshwater fish larvae and early-stage juveniles: implications for river management. *Conservation physiology* 8, DOI 10.1093/conphys/coaa092.
- Noordhuis R., L.H. van der Heijden, A.E.E. de Jong (2021) Effecten van temperatuuroptimalisatie op de grote wateren : een literatuurstudie met data-overzicht
- Norlin, L., Byström, P., Karlsson, J., Johansson, M., & Liess, A. (2016). Climate change will alter amphibian-mediated nutrient pathways: evidence from *Rana temporaria* tadpoles in experimental ponds. *Freshwater biology*, 61(4), 472-485.
- Paalvast & Noordhuis (2012) Deltaprogramma, Gevolgen van klimaatverandering voor beroepsbinnenvisserij en sportvisserij in Nederland Knelpuntanalyse Deltaprogramma.
- Pankhurst, N. W., & Munday, P. L. (2011). Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Marine and Freshwater Research*, 62(9), 1015-1026.
- Paull, S. H., LaFonte, B. E., & Johnson, P. T. (2012). Temperature-driven shifts in a host-parasite interaction drive nonlinear changes in disease risk. *Global Change Biology*, 18(12), 3558-3567.
- Richter-Boix, A., Katzenberger, M., Duarte, H., Quintela, M., Tejedó, M., & Laurila, A. (2015). Local divergence of thermal reaction norms among amphibian populations is affected by pond temperature variation. *Evolution*, 69(8), 2210-2226.
- Seebacher, F., & Grigaltchik, V. S. (2014). Embryonic developmental temperatures modulate thermal acclimation of performance curves in tadpoles of the frog *Limnodynastes peronii*. *PLoS One*, 9(9), e106492.
- Souchon, Y., & Tissot, L. (2012). Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (405), 03.
- Venturelli, P.A., Lester, N.P., Marshall, T.R., and Shuter, B.J. 2010. Consistent patterns of maturity and density-dependent growth among populations of walleye (*Sander vitreus*): application of the growing degree-day metric. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 67(7): 1057 – 1067. doi:10.1139/F10-041.
- Van der Grinten, E., van Herpen, F. C. J., van Wijnen, H. J., Evers, C. H. M., Wuijts, S., & Verweij, W. (2008). Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. RIVM rapport 607800004.

LITERATUUR DOOR MIDDEL VAN REFERENTIES

Ficetola, G. F., & Maiorano, L. (2016). Contrasting effects of temperature and precipitation change on amphibian phenology, abundance and performance. *Oecologia*, 181(3), 683-693.

Ficke, A.D., C.A. Myrick en L.J. Hansen (2007). Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 17 (4), 581-613.

Grayson, K. L., Bailey, L. L., & Wilbur, H. M. (2011). Life history benefits of residency in a partially migrating pond-breeding amphibian. *Ecology*, 92(6), 1236-1246.

Hoffmann, E. P., Cavanaugh, K. L., & Mitchell, N. J. (2021). Low desiccation and thermal tolerance constrains a terrestrial amphibian to a rare and disappearing microclimate niche. *Conservation Physiology*, 9(1), coab027

Ruthsatz, K., Dausmann, K. H., Peck, M. A., & Glos, J. (2022). Thermal tolerance and acclimation capacity in the European common frog (*Rana temporaria*) change throughout ontogeny. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 337(5), 477-490.

Tait, L. W., & Schiel, D. R. (2013). Impacts of temperature on primary productivity and respiration in naturally structured macroalgal assemblages. *PLoS One*, 8(9), e74413.

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

AANVULLENDE LITERATUUR

Bickler, P.E. en L.T. Buck (2007). Hypoxia Tolerance in Reptiles, Amphibians, and Fishes: Life with Variable Oxygen Availability. *Annu. Rev. Physiol.* 2007. 69:145 – 70

Biro, P.A., J.R. Post en C. Beckman (2021). Autumn lipid reserves, overwinter lipid depletion, and high winter mortality of rainbow trout in experimental lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 78, 738-743.

Gillooly, J.F., E.L. Charnov, G.B. West, V.M. Savage en J.H. Brown (2002). Effects of size and temperature on developmental time. *Nature*, 417, 70 – 73.

McBride, R.S. en R.E. Matheson (2011). Florida's diadromous fishes: biology, ecology, conservation, and management. *Florida Scientist*, 74 (3), 187-213.

Neuheimer, A.B., and Taggart, C.T. 2007. The growing degree-day and fish size at-age: the overlooked metric. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 64(2): 375 – 385. doi:10. 1139/f07-003.

O'Regan, S.M., W.J. Palen and S.C. Anderson (2014). Climate warming mediates negative impacts of rapid pond drying for three amphibian species. *Ecology*, 95 (4), 845-855.

NIET GEBRUIKTE REFERENTIES, DIE MOGELIJK WEL RELEVANT KUNNEN ZIJN:

Arend, K. K., Beletsky, D., DePINTO, J. V., Ludsin, S. A., Roberts, J. J., Rucinski, D. K., ... & Höök, T. O. (2011). Seasonal and interannual effects of hypoxia on fish habitat quality in central Lake Erie. *Freshwater Biology*, 56(2), 366-383.

Brodersen, J., Nicolle, A., Nilsson, P. A., Skov, C., Brönmark, C., & Hansson, L. A. (2011). Interplay between temperature, fish partial migration and trophic dynamics. *Oikos*, 120(12), 1838-1846.

Foekema, E. M., Rippen, A. D., & Slijkerman, D. M. E. (2011). Inventarisatie van lozingspluimen als potentiële migratie-barrière (No. C078/11). IMARES.

Gale, M. K., Hinch, S. G., Eliason, E. J., Cooke, S. J., & Patterson, D. A. (2011). Physiological impairment of adult sockeye salmon in fresh water after simulated capture-and-release across a range of temperatures. *Fisheries Research*, 112(1-2), 85-95.

Jonsson, B., & Jonsson, N. (2009). A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of fish biology*, 75(10), 2381-2447.

Lototskaya, A. A., Verdonschot, R. C. M., Verdonschot, P. F. M., & Klostermann, J. E. M. (2007). Doorwerking klimaatverandering in KRW-keuzen: cases beken en beekdalen: literatuurstudie (No. 1536). Alterra.

Mantua, N., Tohver, I., & Hamlet, A. (2010). Climate change impacts on streamflow extremes and summertime stream temperature and their possible consequences for freshwater salmon habitat in Washington State. *Climatic Change*, 102(1), 187-223.

Mehner, T. (2012). Diel vertical migration of freshwater fishes – proximate triggers, ultimate causes and research perspectives. *Freshwater Biology*, 57(7), 1342-1359.

Ramaker, M (2020). The effect of thermal energy recovery on the ecology of a small, slow flowing freshwater ecosystem: a modeling approach: Thesis OU

Winter, H. V., Griffioen, A. B., & Van Keeken, O. A. (2014). De Vismigratierivier: Bronnen-onderzoek naar gedrag van vis rond zoet-zout overgangen (No. C035/14). IMARES.

REFERENTIES ZONDER OPEN ACCESS

Feng, L., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2015). Modelling the influence of thermal discharge under wind on algae. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 79, 108-114.

Ganser, A. M., Newton, T. J., & Haro, R. J. (2015). Effects of elevated water temperature on physiological responses in adult freshwater mussels. *Freshwater Biology*, 60(8), 1705-1716.

Gaudard, A., Weber, C., Alexander, T. J., Hunziker, S., & Schmid, M. (2018). Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(5), e1295.

Jiang, Z., Du, P., Liao, Y., Liu, Q., Chen, Q., Shou, L., ... & Chen, J. (2019). Oyster farming control on phytoplankton bloom promoted by thermal discharge from a power plant in a eutrophic, semi-enclosed bay. *Water research*, 159, 1-9.

Marcos-López, M., Gale, P., Oidtmann, B. C., & Peeler, E. J. (2010). Assessing the impact of climate change on disease emergence in freshwater fish in the United Kingdom. *Transboundary and emerging diseases*, 57(5), 293-304.

Thome, C., Mitz, C., Somers, C. M., Manzon, R. G., Boreham, D. R., & Wilson, J. Y. (2016). Incubation of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) em

Xu, C., Letcher, B. H., & Nislow, K. H. (2010). Context-specific influence of water temperature on brook trout growth rates in the field. *Freshwater Biology*, 55(11), 2253-2264.