

Verdiepen in warmer water: een modelstudie naar watertemperaturen en het effect van diepte

Liesbeth Wilschut (Tauw, Hogeschool van Amsterdam), Cor Jacobs (Wageningen Environmental Research, Hogeschool van Amsterdam), Anne Vrouwe, Mark Heideveld (Gemeente Zwolle), Jeroen Kluck (Tauw, Hogeschool van Amsterdam)

's Zomers zullen steeds vaker langere periodes van hitte gaan optreden. Wat heeft dit voor effect op de lokale watertemperatuur? En heeft het zin om waterpartijen te verdiepen? Met de Cool Water Tool is geprobeerd modelmatig greep te krijgen op deze vragen. De resultaten laten zien dat de watertemperaturen met klimaatverandering toenemen. Lokaal verdiepen heeft weinig effect op de gemiddelde watertemperatuur. Daarentegen neemt de lengte van de maximale aaneengesloten periode met watertemperaturen hoger dan 20 graden fors toe.

Zowel in het stedelijk gebied als op het platteland kent Nederland een enorme rijkdom aan oppervlaktewater. De waterkwaliteit daarvan hangt af van meerdere factoren, zoals de aanvoer van nutriënten, de mate van doorstroming en de watertemperatuur.

De watertemperatuur is een cruciale factor. Een hogere watertemperatuur betekent een lagere oplosbaarheid van zuurstof. Dit kan uiteindelijk leiden tot vissterfte, of een verschuiving naar vissoorten die minder gevoelig zijn voor lage zuurstofconcentraties. Warmer water betekent ook een grotere kans op schadelijke micro-organismen. Een eerste voorbeeld daarvan zijn blauwalgen, die zich met de hoge fosforconcentraties in de Nederlandse meren bij hogere temperaturen goed kunnen vermenigvuldigen. Een tweede voorbeeld zijn de bacteriën die botulisme veroorzaken. Naast een toename van schadelijke micro-organismen kan een verhoogde watertemperatuur bijvoorbeeld ook leiden tot een toename van (ongewenste) exotische waterplanten.

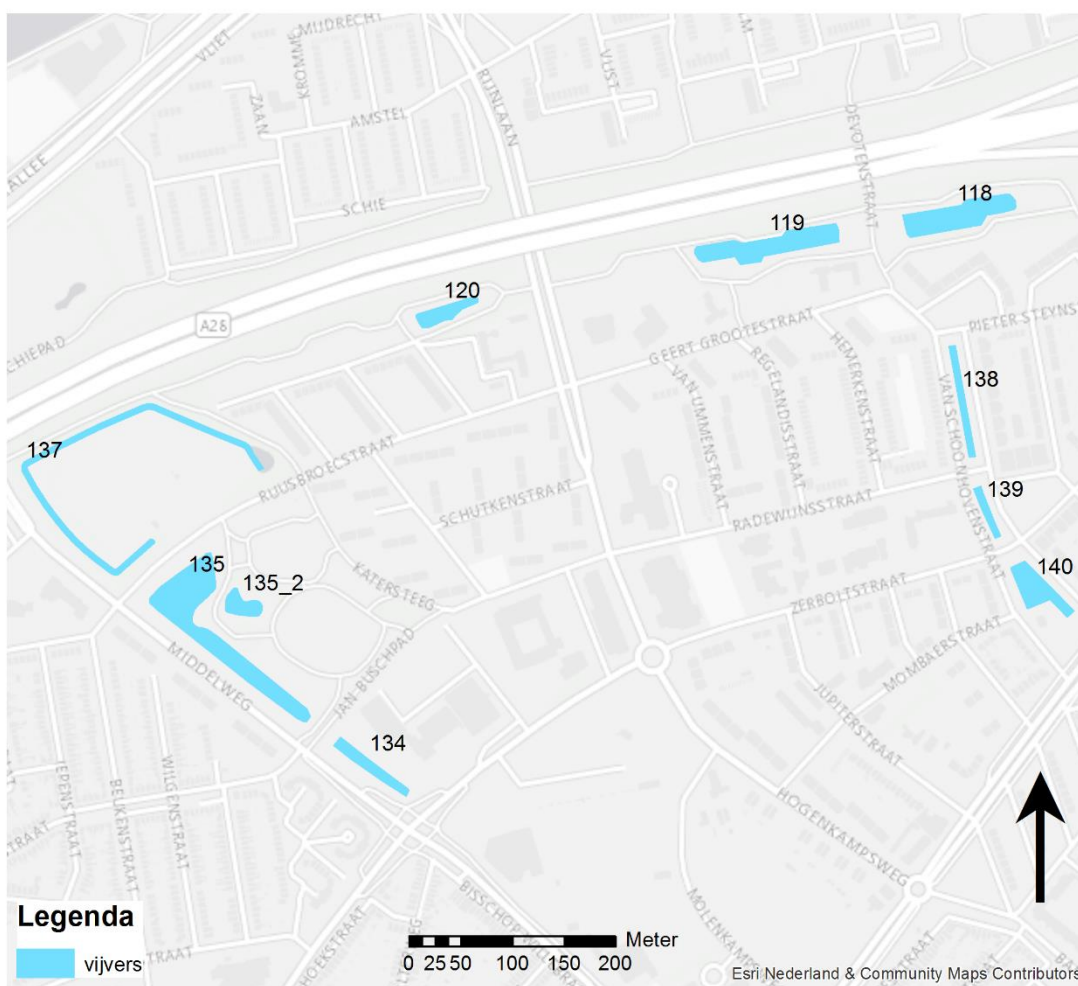
De watertemperatuur wordt beïnvloed door verschillende factoren. Zo speelt de omgeving van het waterlichaam een rol: schaduw, gebouwdichtheid en -hoogte bijvoorbeeld. De grootste rol speelt het (lokale) klimaat; het aantal zonuren, de luchttemperatuur en de luchtvochtigheid beïnvloeden allemaal de watertemperatuur.

Vanwege de relatie tussen watertemperatuur en het weer is de verwachting dat klimaatverandering zal leiden tot veranderingen in de temperatuur van het oppervlaktewater in Nederland. De vraag is nu dan ook: hoe gaat het watertemperatuurverloop gedurende zomers er in het huidige en het toekomstige klimaat uit zien?

De gemeente Zwolle stelde zichzelf deze vraag en heeft daarom in overleg met het waterschap Drents Overijsselse Delta (WDODelta) onderzoek laten doen naar de ontwikkeling van de watertemperaturen in tien geschakelde vijvers in de Zwolse wijk Dieze-Oost. In deze naoorlogse wijk moet zowel op woning- als op systeemniveau nog een slag worden geslagen om klimaatrobust te worden, zo blijkt uit klimaatstresstesten.

De gemeente is niet alleen geïnteresseerd in de frequentie en de duur van perioden met hoge temperaturen, maar ook in de effectiviteit van maatregelen, zoals het verdiepen van vijvers. De volgende onderzoeksvragen werden geformuleerd:

- Wat is het temperatuurverloop van het water in deze vijvers gedurende een warme zomer in het huidige klimaat? En wat is het watertemperatuurverloop in het klimaat rond 2050, volgens het W_H-scenario van het KNMI?
- Wat is het effect van lokaal verdiepen op het temperatuurverloop van het water?



Afbeelding 1. De tien door duikers verbonden vijvers in de wijk Dieze-Oost

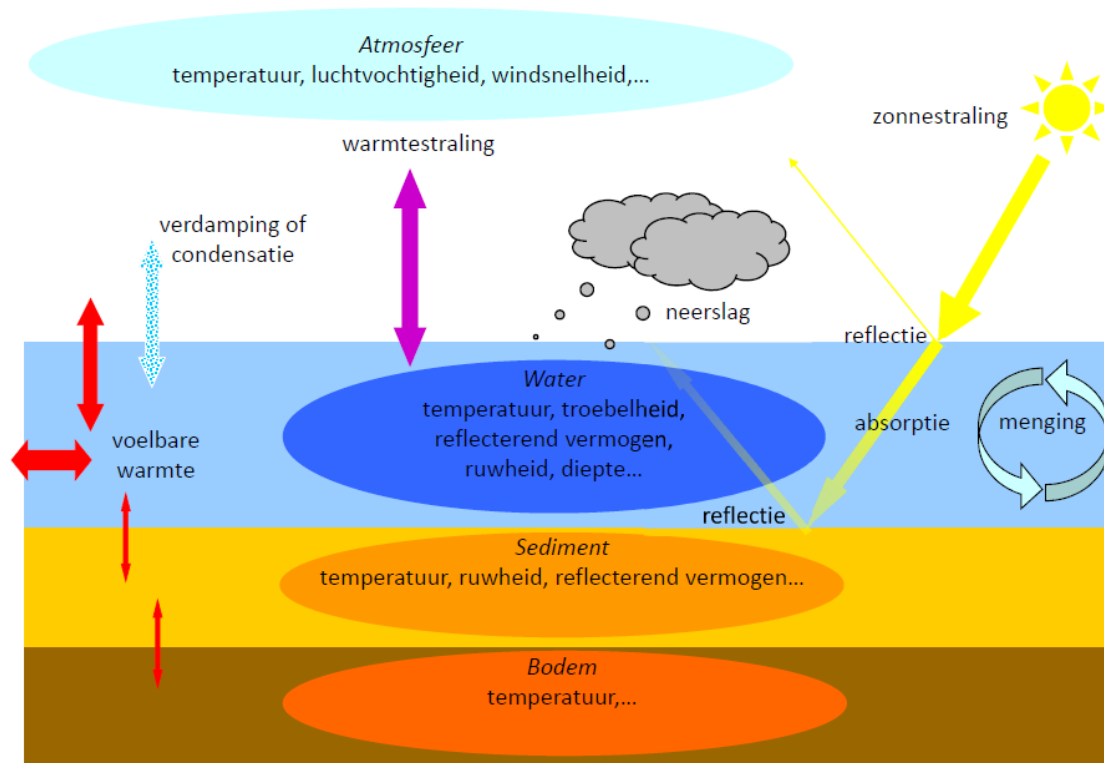
Gebiedsbeschrijving: tien vijvers in Dieze-Oost

Dieze-Oost is een jaren '60-wijk ten noordoosten van het centrumgebied van Zwolle. In deze wijk liggen tien door duikers verbonden vijvers (afbeelding 1 en tabel 1), variërend in oppervlakte van 353 tot 4634 m² en met maximale dieptes rond de 90 centimeter. De wijk kent nauwelijks hoogteverschillen in het maaiveld.

Het watersysteem wordt gevoed door grondwater. Er waren geen gegevens beschikbaar over de stroomsnelheid in de vijvers of de hoeveelheid en snelheid van de instroom van grondwater. Aangenomen werd dat de waterdiepte 's zomers nagenoeg constant is.

Model

Het watertemperatuurverloop is berekend met de Cool Water Tool (CWT). Dit is een model dat, onder de aanname van perfecte menging van het water, rekening houdt met de invloed van het weer op de watertemperatuur (afbeelding 2). De CWT kan zowel binnen als buiten stedelijk gebied gebruikt worden. Binnen bebouwd gebied houdt het model rekening met typisch stedelijke effecten als schaduwwerking van gebouwen en het stedelijk hitte-eilandeffect [1]. Voor uitgebreide informatie over dit model, inclusief validatie, zie [2], [3].



Afbeelding 2. Invloed van het weer op de watertemperatuur in een open omgeving. De getoonde interacties zijn gemodelleerd in de Cool Water Tool, met aanpassingen voor de gebouwde omgeving bij toepassing in stedelijk gebied [3]

Inputdata

Weerreeksen

Met de CWT zijn de watertemperaturen gemodelleerd voor vijf warme zomers (april-september) in het huidige klimaat en voor een klimaat in 2050, gebaseerd op het W_H-scenario van het KNMI [4]. De zomers zijn geselecteerd op basis van het warmtegetal (een maat voor de warmte in het tijdvak van 1 april tot 31 oktober van het betreffende jaar) in De Bilt [5], waarbij als uitgangspunt de tien warmste zomers tussen 1981 en 2010 werden genomen. Een verder selectie criterium was dat meteorologische gegevens van het weerstation Heino beschikbaar waren. Uiteindelijk zijn de volgende zomers in het huidige klimaat geselecteerd: 1994, 1995, 1997, 2003 en 2006. Temperatuur, neerslag en zonnestraling van deze zomers zijn vervolgens getransformeerd naar het W_H-scenario volgens de methodiek van het KNMI en gebruikt in berekeningen voor het toekomstig klimaat.

Vijverkarakteristieken

De in het model gebruikte vijverkarakteristieken zijn weergegeven in tabel 1. De oppervlaktes van de vijvers zijn berekend met ArcGIS op basis van de Top10NL en het topografische basisbestand van het Kadaster [6]. De gewogen diepte werd bepaald op basis van de dwarsdoorsnede van de vijvers. De gewogen dieptes variëren tussen 0,47 en 0,91 meter. Aan de hand van de oppervlakte en gewogen diepte werd het watervolume per vijver geschat.

Het water stroomt langzaam van vijver 140 (afbeelding 1) tegen de klok in naar vijver 134. Bij gebrek aan data hierover is aangenomen dat er alleen in vijver 140 aanvoer is van grondwater, met een temperatuur van 11°C en een debiet van 3,5 m³ per uur.

De skyviewfactor (0-1) op een punt geeft de fractie weer met vrij zicht op de hemelkoepel of de hogere atmosfeer; bij een skyviewfactor van 1 is er volledig vrij zicht op de hemel [7]. De skyviewfactor van de vijvers werd bepaald vanaf het middelpunt van de vijver ter hoogte van het wateroppervlak, volgens de methode van Steenbergen [8]. De skyviewfactoren van de vijvers (tabel 1) variëren tussen de 0.71 en 0.91. Deze vijvers bevinden zich dus in een tamelijk open gebied.

Tabel 1. Vijverkarakteristieken die zijn gebruikt als input voor de CWT

Nummer	Oppervlakte (m ²)	Diepte (m)	Volume (m ³)	Skyview	Oriëntatie (°)
140	1.266	0.91	1.157	0.78	325
139	353	0.75	264	0.71	340
138	681	0.56	379	0.74	350
118	2284	0.82	1.872	0.8	260
119	2.459	0.64	1571	0.90	260
120	714	0.47	333	0.66	255
137	2.397	0.53	1.262	0.82	45
135	4.634	0.73	3.369	0.89	310
135_2	597	0.73	436	0.91	275
134	770	0.68	522	0.91	305

Wijkkarakteristieken

De gemiddelde hoeveelheid schaduw die op een vijver valt en de uitwisseling van warmtestraling tussen de vijver en zijn omgeving, worden bepaald door wijkkarakteristieken als bebouwingsdichtheid en gemiddelde gebouwhoogte en de oriëntatie van de vijver. Uit eerdere analyses met de CWT [2], [3] blijkt dat wateren met een vrij hoge skyviewfactor relatief ongevoelig zijn voor de wijkkarakteristieken zodat een eerste-ordeschatting van de bijbehorende waardes voldoende nauwkeurig is voor de vijvers in Dieze-Oost.

Gemiddelde bebouwingsdichtheid en gebouwhoogte zijn geschat op basis van gegevens uit de Top10NL. De fractie groen rond de vijvers en de oriëntatie werden geschat op basis van Google Earth-beelden. De fractie groen bepaalt mede de intensiteit van het stedelijke hitte-eiland ter plaatse.

Analyse

Voor de vijf geselecteerde warme zomers werd het verloop van de watertemperatuur in de tien vijvers gesimuleerd. Uit de resultaten zijn de gemiddelde en maximale watertemperaturen per vijver en per zomer berekend. Ook werd de maximale lengte (in dagen) bepaald van periodes waarin de watertemperatuur zonder onderbreking hoger was dan 20°C. Hoewel er geen eenduidige temperatuurgrens is waarboven er waterkwaliteitsproblemen ontstaan, houdt men vaak 20°C aan. Van alle kengetallen wordt per vijver het gemiddelde over de vijf zomers getoond.

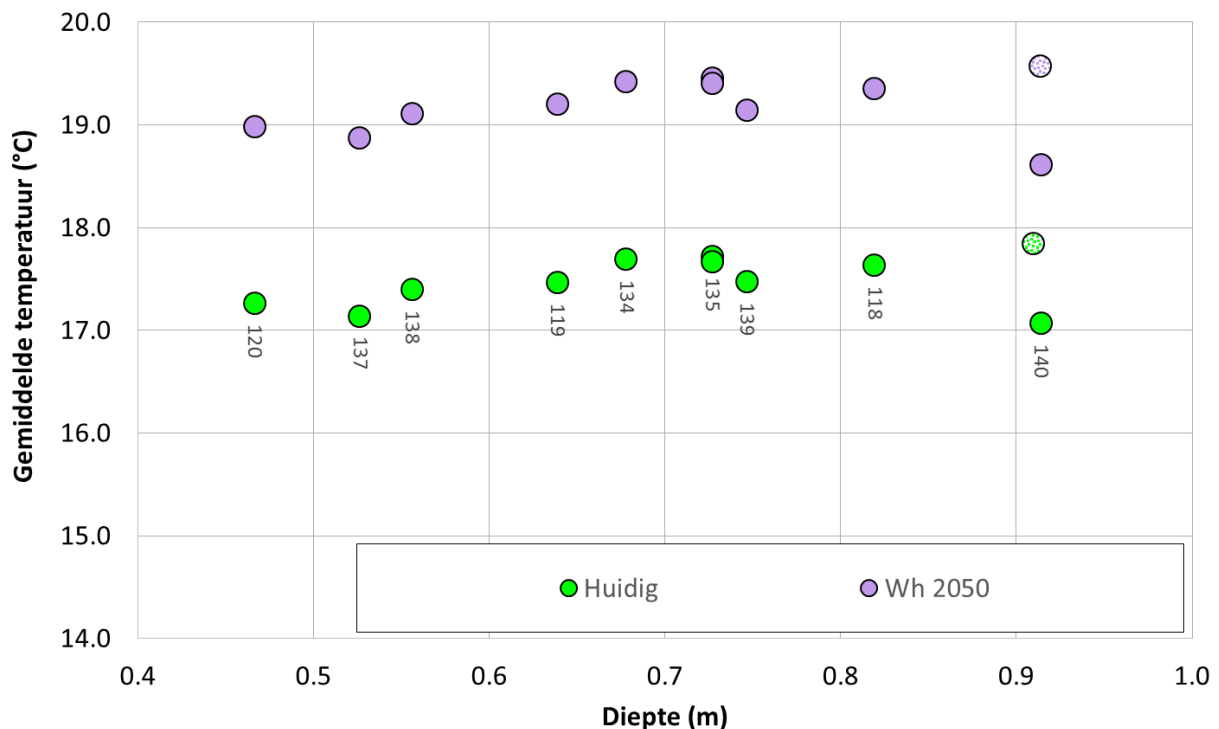
Diepte en verdiepen

Bovenstaande simulaties en analyses zijn eerst uitgevoerd voor de huidige dieptes en daarna voor dezelfde vijvers, maar na verdieping met respectievelijk een factor 1,5 en 3, om te kunnen zien welk effect dit heeft op de watertemperatuur. De waardes 1,5 en 3 werden gekozen zodat het effect van verdiepen tot ongeveer 3 meter (de maximale diepte waarbij de uitkomsten van de CWT nog redelijk betrouwbaar worden geacht) kon worden bepaald.

Resultaten

Watertemperatuurverloop in huidige klimaat

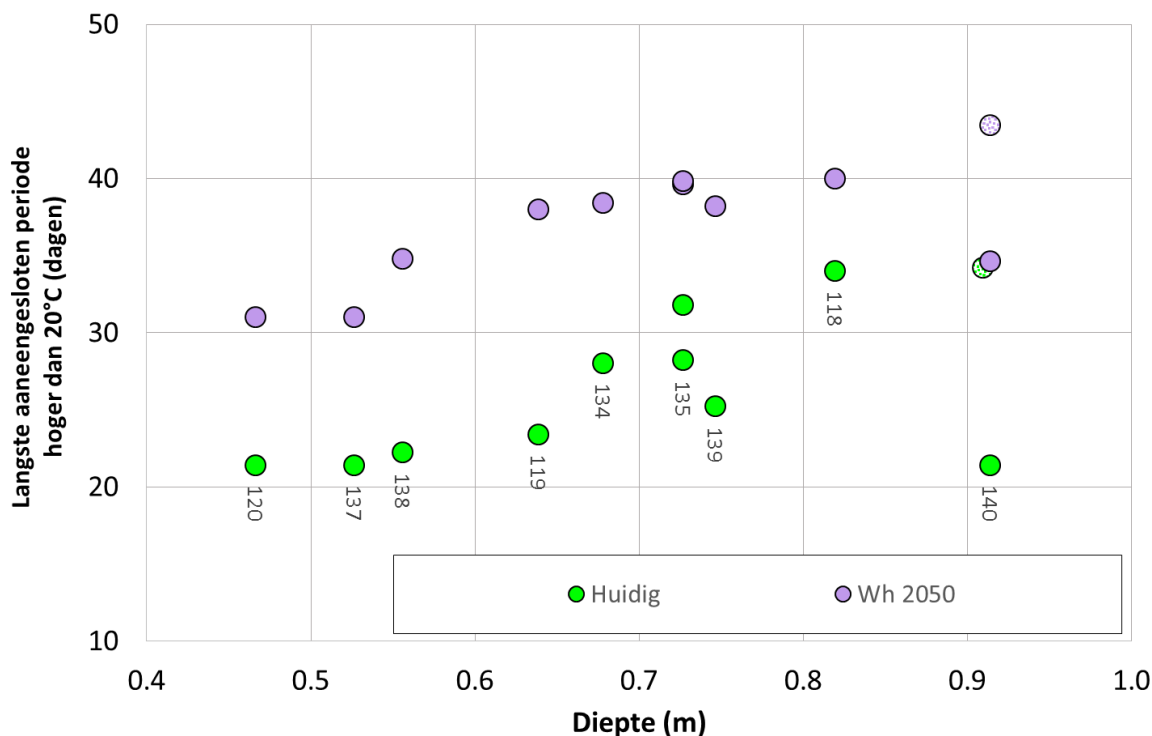
In de tien vijvers liggen de watertemperaturen gedurende ongeveer 33 procent (1461 uur) van de zomerperiode boven 20°C. De gemiddelde watertemperatuur van de tien vijvers bedraagt 17,5°C (zie afbeelding 3) . De maximale watertemperatuur die wordt bereikt is 30,6°C. Dit gebeurt in vijver 120, de ondiepste. Er is ook gekeken naar de (over de 10 vijvers gemiddelde) maximale lengte van een aaneengesloten periode met water warmer dan 20°C; deze is 26 dagen in het huidige klimaat (afbeelding 4). Deze cijfers geven aan dat opwarming van water in de zomers fors is.



Afbeelding 3. Gemiddelde watertemperatuur per vijver voor de gehele zomerperiode (gemiddeld voor vijf zomers) afgezet tegen de diepte van de vijver. De watertemperaturen voor het huidige klimaat staan weergegeven in groen, voor 2050 in paars. Met klimaatverandering stijgen de gemiddelde temperaturen. Vijver 140 heeft twee waarden: met (het gevulde bolletje) en zonder aanvoer van grondwater (het gestippelde bolletje)

Toekomstig klimaat

De scenario-runs voor 2050 laten zien dat het aantal uren met warm water ($T > 20^{\circ}\text{C}$) toeneemt met ongeveer 1/3 tot 44 procent (1900 uur) van de zomerperiode. De gemiddelde watertemperatuur ten opzichte van de huidige situatie stijgt met ongeveer 1,7°C. De maximale watertemperatuur stijgt met 2,5°C. De maximale lengte van een aaneengesloten periode met warm water stijgt naar gemiddeld 38 dagen, een stijging van 12 dagen (46%) ten opzichte van het huidige klimaat (afbeelding 4).

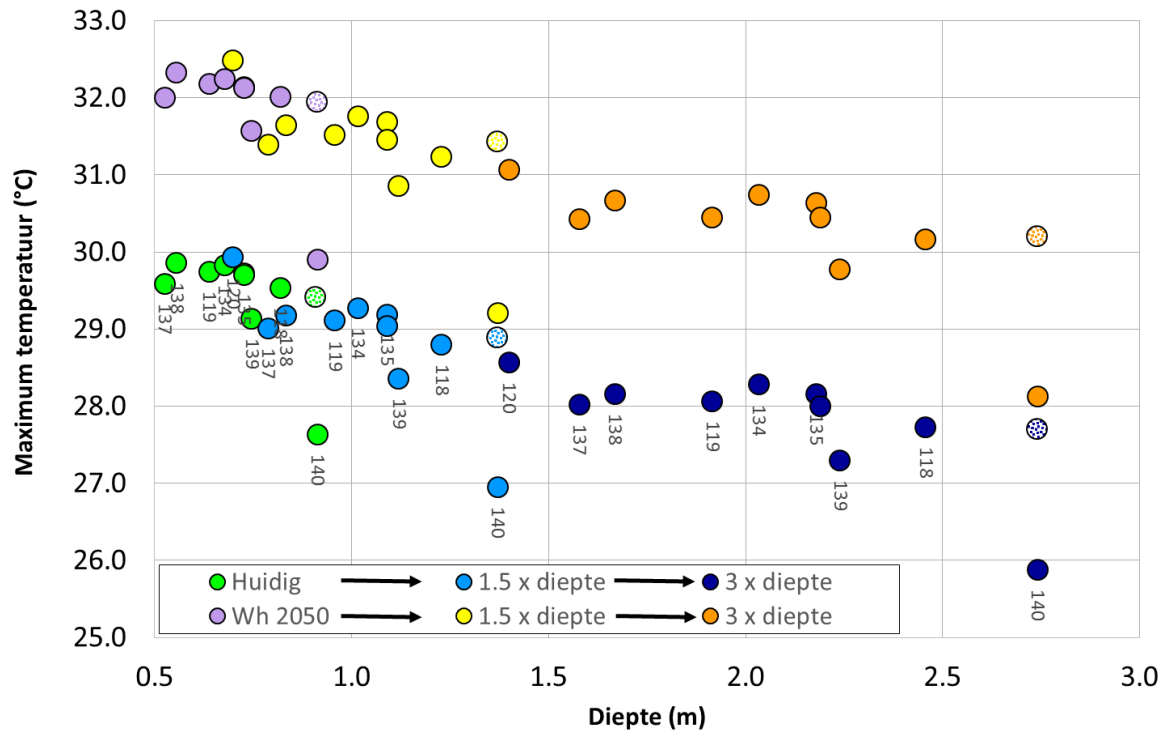


Afbeelding 4. Langste aaneengesloten periode met een watertemperatuur hoger dan 20°C per vijver van de gehele zomerperiode (gemiddeld voor vijf zomers), afgezet tegen de diepte van de vijver. Naarmate de diepte toeneemt, nemen de lengtes van de periodes toe. Dit is het geval in het huidige en het toekomstige klimaat. Vijver 140 heeft twee waarden: met (het gevulde bolletje) en zonder aanvoer van grondwater (het gestippelde bolletje)

Effect van diepte en verdiepen

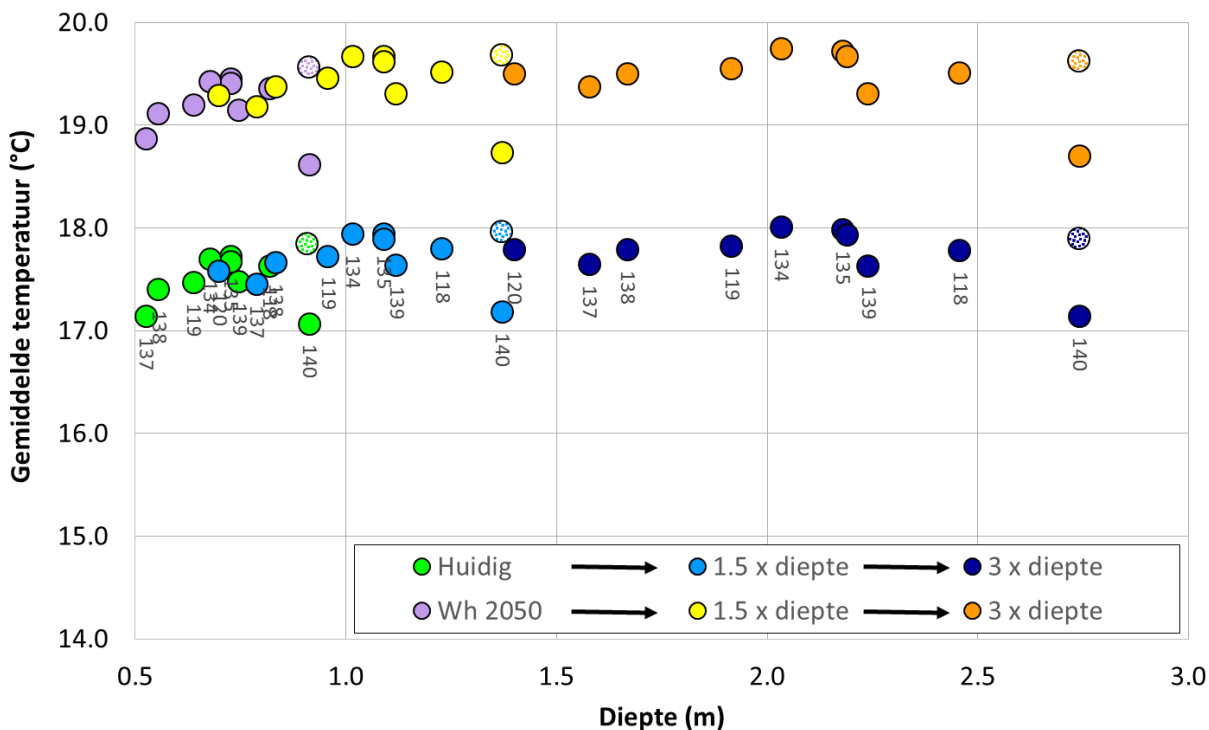
Het verdiepen van een waterpartij is een mogelijke maatregel om hitte te beperken, aangezien te verwachten valt dat een klein laagje water sneller opwarmt dan een diepe plas.

De berekeningen laten zien dat ondiepe wateren inderdaad hogere maximale temperaturen bereiken dan diepere wateren (afbeelding 6). In het huidige klimaat is de temperatuur in het hier bestudeerde vijversysteem zo'n 30°C bij een diepte van 0,47 meter (ondiepste vijver). De temperatuur bij een diepte van 2,7 meter (huidige diepste vijver met een factor 3 verdiept) is ongeveer vier graden lager. De verklaring voor deze temperatuurafname met diepte is dat ondiep water overdag sneller opwarmt dan dieper water, omdat ruwweg eenzelfde hoeveelheid energie minder water hoeft op te warmen.



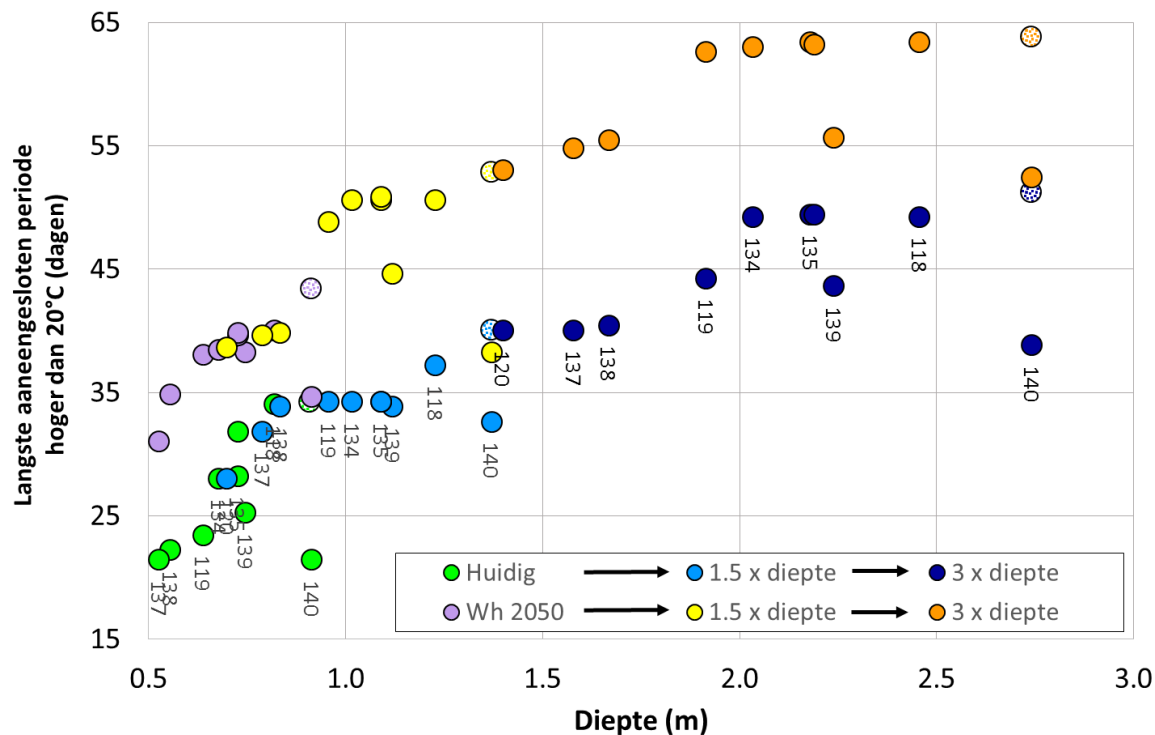
Afbeelding 5. Maximum watertemperatuur per vijver van de gehele zomerperiode (gemiddeld voor vijf zomers) afgezet tegen de diepte (huidige diepte, 1.5 en 3 x verdiept) van de vijver. Naarmate de diepte toeneemt, nemen de maximum watertemperaturen af. Dit is het geval in het huidige en het toekomstige klimaat. Vijver 140 heeft twee waarden: het gevulde bolletje is met aanvoer van grondwater en het gestippelde bolletje is zonder aanvoer van grondwater

In tegenstelling tot de maximale temperaturen, neemt de *gemiddelde* watertemperatuur juist licht toe met diepte (afbeelding 7), namelijk van gemiddeld 17,3°C bij 0,47 meter naar zo'n 17,6°C bij 2,2 meter. Het aantal uren met warm water ($T > 20^{\circ}\text{C}$) neemt met diepte ook toe, met maximaal 4 procent. De verklaring voor de hogere gemiddelde temperaturen is dat diep water, hoewel het minder snel opwarmt en minder hoge maximumtemperaturen bereikt, ook weer minder snel afkoelt. Als water gaat afkoelen is het temperatuurverschil tussen lucht en water van belang. Water met een hogere temperatuur koelt sneller af dan water met een lagere temperatuur. Maar zelfs bij een gelijke temperatuur zal ondiep water sneller blijven afkoelen via de uitwisseling van warmtestraling. Deze is dan ongeveer gelijk voor diep en ondiep water, maar ondiep water heeft nu eenmaal een kleinere energie-inhoud. Omdat de afvoer van energie in hartje zomer gemiddeld minder is dan de gemiddelde toevoer overdag blijft de gemiddelde watertemperatuur iets hoger bij een diepere vijver.



Afbeelding 6. Gemiddelde watertemperatuur per vijver voor de gehele zomerperiode (gemiddeld voor vijf zomers) afgezet tegen de diepte (huidige diepte, 1.5 en 3 x verdiept) van de vijver. De watertemperaturen voor het huidige klimaat staan weergegeven in groen en lichtblauw en donkerblauw, voor 2050 zijn ze weergegeven in paars, geel en oranje. Met klimaatverandering stijgen de gemiddelde temperaturen. Naarmate de diepte toeneemt (tot 2.2. m), nemen de gemiddelde temperaturen iets toe. Vijver 140 heeft twee waarden: met (het gevulde bolletje) en zonder aanvoer van grondwater (het gestippelde bolletje)

Door het verdiepen neemt de aaneengesloten periode met warm water gemiddeld fors toe: van 26 naar 44 dagen (een toename van 73%; afbeelding 8). Dit is te verklaren doordat bij een diepe vijver de grenswaarde van 20°C weliswaar minder snel wordt bereikt, maar het water als het eenmaal warm is, ook lastiger weer afkoelt.



Afbeelding 7. Langste aaneengesloten periode met een watertemperatuur hoger dan 20°C per vijver van de gehele zomerperiode (gemiddeld voor vijf zomers), afgezet tegen de diepte (huidige diepte, 1.5 en 3 x verdiept) van de vijver. Naarmate de diepte toeneemt, nemen de lengtes van de periodes toe. Dit is het geval in het huidige en het toekomstige klimaat. Vijver 140 heeft twee waarden: met (het gevulde bolletje) en zonder aanvoer van grondwater (het gestippelde bolletje)

Verdiepen van vijvers met een factor 1,5 of zelfs 3, zorgt er dus niet voor dat de gemiddelde temperaturen afnemen. Deze neemt juist licht toe. Ook zorgt het voor een grote toename van de lengte van de periode met warm water.

Discussie

Welke watertemperatuurindicator is van belang?

In deze studie zijn verschillende indicatoren berekend: gemiddelde en maximale watertemperatuur en de lengte van de periode waarin het water warmer is dan 20 graden. We weten echter nog niet welke van deze indicatoren het beste inzicht geeft in de waterkwaliteit. Dit onderzoek maakt duidelijk dat de gemiddelde temperaturen licht toenemen bij dieptes tot 2,2 meter en dat de maximale temperaturen afnemen bij toenemende diepte, maar het is onduidelijk wat dit precies betekent voor de waterkwaliteit. Zo is bijvoorbeeld onbekend of schadelijke blauwalgen gebaat zijn bij een watertemperatuur die gemiddeld relatief hoog is, maar waarbij de dag- en nachttemperaturen relatief dicht bij elkaar liggen (dus bij de diepere vijvers), of dat zij beter groeien bij een sterker wisselende dag- en nachttemperatuur, maar waarbij de gemiddelde temperatuur lager is (bij de ondiepere vijvers). Dezelfde vraag gaat op voor

botulisme. Het zou kunnen dat voor sommige schadelijke micro-organismen geldt dat de maximumtemperatuur belangrijker is dan de gemiddelde temperatuur. Ook is het mogelijk dat juist de langste aaneengesloten periode met temperaturen boven een bepaalde waarde X een goede graadmeter is voor het voorspellen van blauwalgen of botulisme. Hier is vervolgonderzoek voor nodig, ook om de kritieke temperatuur X te definiëren.

Extrapoleren van de resultaten naar wateren in Nederland

De watertemperaturen in het vijversysteem in Dieze-Oost te Zwolle zijn gedurende de vijf geselecteerde warme zomers voor het huidige klimaat gedurende gemiddeld 33 procent van het zomerhalfjaar 20°C of hoger. Het is aannemelijk dat dit ook geldt voor oppervlaktewater op locaties met een vergelijkbare situatie (vergelijkbare dieptes, skyview, gebouwhoogte e.d.). Op plaatsen met een lagere skyview is het te verwachten dat de maximumtemperaturen afnemen omdat er meer schaduw op de vijver valt. Daar staat tegenover dat vijvers op zulke plekken ook minder afkoelen en misschien blootstaan aan een wat hogere luchttemperatuur door het hitte-eilandeffect. Hoe de gemiddelde temperaturen zich gedragen is al met al lastig te voorspellen. Dit is ook sterk afhankelijk van de hoeveelheid instroom van grondwater. Er is bij de huidige berekeningen geen rekening gehouden met een mogelijk verhoogde instroom van grondwater in het geval van verdiepen; dit zou de gemiddelde temperatuur mogelijk kunnen verlagen. Vervolgonderzoek, zoals een gevoeligheidsanalyse, zou hier verder duidelijkheid in moeten geven.

Betrouwbaarheid van het model

De Cool Water Tool is een fysisch realistisch model, dat in eerdere validaties zeer goed de gemeten temperaturen kon simuleren. Het is dan ook te verwachten dat de modeluitkomsten voor het huidige klimaat realistisch zijn. Er zit een grote variatie tussen de vijf gebruikte halfjaarsekken. Dit is terug te zien in de watertemperatuursekken. Van jaar tot jaar kunnen de watertemperaturen dus flink verschillen. Dit onderzoek is uitgevoerd voor dieptes van maximaal 2,7 meter. De CWT kan gebruikt worden voor modelberekeningen tot dieptes van maximaal 3 meter. Bij grotere dieptes speelt gelaagdheid waarschijnlijk een te grote rol en dit is niet meegenomen in de CWT. Voor berekeningen aan zulke systemen is een ander type model nodig [2], [9]. De resultaten uit dit onderzoek zijn dus niet zonder meer te extrapoleren naar wateren dieper dan 3 meter.

Wat kunnen we met de resultaten?

De resultaten van dit onderzoek kunnen gebruikt worden om de mogelijkheden voor verkoeling van de vijvers verder te onderzoeken. Met de watertemperatuursekken kan bijvoorbeeld in meer detail worden onderzocht of warmtewinning uit water energie-efficiënt is. Daarnaast kunnen deze resultaten helpen om bijvoorbeeld klimaatstrategieën voor het water in de stad te formuleren.

Conclusies

Volgens de berekeningen zijn de watertemperaturen in het vijversysteem in Dieze-Oost gedurende de vijf geselecteerde warme zomers voor het huidige klimaat in het zomerhalfjaar gemiddeld 33 procent van de tijd 20°C of hoger. In 2050 zal de gemiddelde watertemperatuur met iets meer dan 1,7°C zijn gestegen. De vijvers zijn dan in het zomerhalfjaar gemiddeld 44 procent van de tijd 20°C of warmer. Het aantal aaneengesloten dagen met warm water ($T_w > 20^\circ\text{C}$) stijgt in 2050 met 46 procent, tot 38 dagen. Zowel in het huidige als in het toekomstige klimaat zijn de watertemperaturen dus een aanzienlijk deel van de tijd hoger dan 20°C, met mogelijk negatieve gevolgen voor de waterkwaliteit.

Dit onderzoek suggereert dat hoewel verdiepen met een factor 1,5 of 3 de maximumtemperaturen laat afnemen, het aantal uren met warm water toeneemt, evenals de maximale lengte van een aaneengesloten periode met warm water. Verdiepen resulteert verder in een lichte toename van de gemiddelde temperaturen. Risico's op waterkwaliteitsproblemen zouden bij verdiepen kunnen toenemen indien deze afhangen van de maximale lengte van een aaneengesloten periode met warm water of het aantal uren met warm water, maar ze zouden kunnen afnemen als blijkt dat de waterkwaliteit sterk afhangt van de maximumtemperatuur.

Vervolgonderzoek is nodig om te onderzoeken welke indicatoren het meest van belang zijn voor waterkwaliteit.

Referenties

1. Oke, T.R. (1982). 'The energetic basis of the urban heat island'. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society* 108 (455): 1-24.
2. Jacobs, C.M.J., Deneer, J.W. & Adriaanse, P.I. (2010). *Modelling water temperature in TOXSWA*. Alterra report 2099, ISSN 1566-7187, 60 pp.
3. Jacobs, C.M.J., Rivière, I.J. La & Goosen, H. (2014). Cool water Tool. *Tijdschrift voor Landschapsecologie en Milieukunde* 31 (3): 133-138.
4. KNMI (2015). *KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie*. KNMI, De Bilt, 34 pp.
5. <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/lijsten/warmtegetallen>, geraadpleegd op 14 april 2018.
6. <https://www.kadaster.nl/-/top10nl>, geraadpleegd op 14 april 2018
7. Watson, I. D., Johnson, G. T. (1987). 'Graphical estimation of sky view-factors in urban environments'. *Journal of Climatology* 7 (2): 193-197.
8. Steenbergen, J. (2009). *Computing Sky Factors from geo-data using a GIS*. MSc-thesis. Centre for Geo-Information. Thesis Report GIRS-2009-12.
9. Jacobs, C.M.J., Maat, H.W. ter, Elbers, J.A. & Stuyt, L.C.P.M. (2009). *Conditionering van de Watertemperatuur in Buitenvijvers voor de Aquacultuur*. Alterra Report, 90 pp, <http://edepot.wur.nl/176548>.