

NKWK Klimaatbestendige Stad

Stedelijke Waterkwaliteit, Klimaat en Adaptatie

Achtergrondrapport

Mei 2021

NKWK Klimaatbestendige Stad
Stedelijke Waterkwaliteit, Klimaat en Adaptatie
Achtergrondrapport

Auteurs

Jesse Limaheluw, RIVM
Bart-Jan Vreman, Arcadis
Suzanne van der Meulen, Deltares
Dick Belgers, Wageningen Environmental Research
Andy Bruijns, Arcadis

Contact

Jesse Limaheluw, RIVM
jesse.limaheluw@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Nationaal Kennis- en Innovatieprogramma Water en Klimaat (NKWK) en werd gefinancierd door het Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat).

Inhoudsopgave

1	Inleiding – 4
2	Aanpak – 5
2.1	Literatuuronderzoek – 5
2.2	Samenwerking case-partners – 5
2.3	Gebruikersbijeenkomsten – 6
2.4	Ontwikkeling eindproducten – 6
3	Effecten van Klimaatverandering op stedelijke waterkwaliteit – 7
3.1	Klimaatverandering in Nederland – 7
3.1.1	Veranderingen in watertemperatuur en ijsbedekking – 7
3.1.2	Veranderingen in neerslag en de impact op waterkwaliteit – 8
3.1.3	Zeespiegelstijging – 9
3.2	Ecologische kwaliteit – 10
3.2.1	Abiotische factoren – 10
3.2.2	Biologische effecten – 15
3.3	Gebruikskwaliteit – 20
3.3.1	Wateronttrekkingen – 21
3.3.2	Energie – 24
3.3.3	Regulering klimaat (lokaal), waterkwaliteit en -kwantiteit – 26
3.3.4	Recreatie – 29
3.3.5	Gebruik van ruimte op het water – 32
4	Effecten van klimaatadaptatiemaatregelen op stedelijke waterkwaliteit – 35
4.1	Groene daken: sedum, daktuinen of urban agriculture – 35
4.2	Infiltratievoorzieningen – 35
4.3	Waterdoorlatende of waterpasserende bestrating – 37
4.4	Vergroenen van de stedelijke omgeving – 38
4.5	Afstroming en berging van regenwater op wegen – 38
4.6	Afkoppelen van gemengde riolering – 39
5	Oplossingsrichtingen – 40
5.1	Inlaten van (gebiedsvreemd) water in perioden van droogte – 42
5.2	Bergingszakken – 42
5.3	Schaduw creëren nabij waterpartijen – 42
5.4	Helofytenfilters – 43
5.5	Baggeren/verdiepen van ondiepe waterpartijen – 43
5.6	Acceptatie en bewustzijn – 44
6	Synthese en aanbevelingen – 45
6.1	Synthese en kernboodschappen – 45
6.2	Aanbevelingen – 46
6.2.1	Aanbevelingen aan regionale en lokale overheden – 46
6.2.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek – 48
7	Referenties – 50
Bijlage 1 – 55	
Bijlage 2 – 57	

1 Inleiding

Steden zijn bijzonder gevoelig voor de gevolgen van klimaatverandering. Tegelijkertijd wonen er steeds meer mensen in de stad. Om ook in de toekomst leefbaar te kunnen blijven, zullen steden zich moeten aanpassen aan klimaatverandering. Stedelijk water gaat hierin een belangrijke rol spelen. Het kan helpen om negatieve effecten van klimaatverandering te beperken, bijvoorbeeld door het bieden van verkoeling. Het waarborgen van de waterkwaliteit wordt dus steeds belangrijker. Klimaatverandering brengt in dit opzicht grote uitdagingen met zich mee: de kwaliteit van stedelijk water wordt sterk beïnvloed door klimaatverandering. Ook kunnen klimaatadaptatiemaatregelen onbedoelde effecten hebben op de waterkwaliteit. Dit kan risico's opleveren, bijvoorbeeld voor gezondheid, en de bestaande of beoogde functies van het water in gevaar brengen.

De invloeden van klimaatverandering en klimaatadaptatiemaatregelen op stadswaterkwaliteit zijn bij veel partijen, zoals gemeenten, nog onvoldoende in beeld en onder de aandacht gebracht. Daarnaast bestaan er nog veel onzekerheden over deze invloeden. Hierdoor wordt het lastig om in te schatten hoe bestaande risico's gaan veranderen, of welke nieuwe risico's gaan ontstaan. Verschillende aspecten van dit probleem zijn belicht in eerdere projecten.

Het Stedelijke Waterkwaliteit, Klimaat en Adaptatie (SWKA) project bouwt hierop voort. Het doel van dit project was om, in samenwerking met gemeenten en waterschappen, beter inzicht te krijgen in de effecten van klimaatverandering en adaptatiemaatregelen op waterkwaliteit, en om advies te bieden om met deze effecten om te gaan. Hierbij is gekeken naar zowel ecologische functies als gebruiksfuncties van stedelijk water. Er zijn concrete voorstellen opgesteld waarmee gemeenten en waterschappen zelf aan de slag kunnen om problemen beter in beeld te krijgen en geschikte oplossingen te identificeren. Informatie uit de (wetenschappelijke) literatuur is aangevuld door praktijkvoorbeelden die zijn opgehaald met interviews en bijeenkomsten met gemeenten en waterschappen.

Deze rapportage dient als volledig overzicht van de uitkomsten van het project. In Hoofdstuk 2 is kort de aanpak van de verschillende projectonderdelen beschreven. In Hoofdstuk 3 worden de effecten van klimaatverandering op stedelijk water beschreven. Dit hoofdstuk is opgedeeld drie secties: in Sectie 3.1 worden de relevante aspecten van klimaatverandering in Nederland toegelicht, in Sectie 3.2 bespreken we de effecten op ecologische functies, en in Sectie 3.3 worden de effecten op gebruiksfuncties beschreven. Hoofdstuk 4 gaat in op de onbedoelde effecten van klimaatadaptatiemaatregelen op stedelijke waterkwaliteit. In Hoofdstuk 5 beschrijven we een aantal mogelijke oplossingen. De grijze tekstkaders bieden aanvullende ervaringen en voorbeelden vanuit de praktijk van de gemeenten en waterschappen waarmee in dit project is samengewerkt. In het laatste hoofdstuk vatten we de belangrijkste bevindingen samen, en bieden we een aantal brede aanbevelingen.

2 Aanpak

Het project is ingedeeld in twee fasen. De eerste fase richtte zich op het identificeren van problemen voor stedelijk water gerelateerd aan of veroorzaakt door klimaatverandering of -adaptatiemaatregelen. Hiertoe is een literatuuronderzoek uitgevoerd, en zijn interviews en een gebruikersbijeenkomst georganiseerd. Het doel van de tweede fase was om mogelijke oplossingen in kaart te brengen, en praktische bouwstenen te formuleren om deze oplossingen toe te passen. Samenwerking met gebruikers vond opnieuw plaats via interviews en een gebruikersbijeenkomst.

2.1 Literatuuronderzoek

Om in kaart te brengen wat er bekend is over de effecten van klimaatverandering en -adaptatiemaatregelen op stedelijke waterkwaliteit is een literatuuronderzoek uitgevoerd. Een eerste zoekopdracht werd uitgevoerd in Scopus met zoektermen gerelateerd aan klimaatverandering en -adaptatie (*climate change, global warming, greenhouse effect, climate sensitivity, climate variability, climate adaptation*) en waterkwaliteit (*water quality, water pollution*), en werd door de zoekterm *urban* gefocust op het stedelijk gebied. Een tweede zoekopdracht is uitgevoerd om aanvullende literatuur over klimaatadaptatiemaatregelen op te halen. Hier werden zoektermen *green infrastructure* en *blue infrastructure* (en combinaties) toegevoegd aan de zoekopdracht. Zoektermen gerelateerd aan klimaatverandering werden hier weggelaten. Op basis van titel en abstract werd beoordeeld of een artikel relevant was voor dit onderzoek. Aanvullend is gezocht naar relevante grijze literatuur, zoals vorige NKWK-rapportages, rapportages van de organisaties in het projectteam, en publicaties van gemeenten en waterschappen. De geïncludeerde literatuur is gelezen en verwerkt in Hoofdstuk 3.

2.2 Samenwerking case-partners

Samenwerking met specifieke gemeenten en waterschappen (case-partners) is in de eerste plaats vormgegeven via gestructureerde interviews. Het doel van deze interviews was om beter inzicht te krijgen in lokale problematiek, toegepaste oplossingen, behoeften, en regionale verschillen. De case-partners waren de gemeente Amsterdam en Waternet, de gemeente Groningen en Waterschap Noorderzijlvest, en de gemeente Hoeksche Waard en Waterschap Hollandse Delta. Case-partners hebben aanvullend inzicht gekregen in tussentijdse producten en zijn betrokken bij de ontwikkeling van de eindproducten (Sectie 2.4).

Interviews vonden plaats in de eerste en tweede fase van het project. Voorafgaand aan de interviews zijn interviewprotocollen opgesteld (Bijlage 1), waarin de structuur van het interview en de belangrijkste vragen en te bespreken onderwerpen werden vastgelegd. Uitkomsten van het eerste interview zijn opgenomen in de uitwerking van Hoofdstuk 3. Daarnaast vormden deze uitkomsten de basis voor de verdere discussie

in het tweede interview. De uitkomsten van het tweede interview zijn verwerkt in Hoofdstuk 5 en gebruikt voor de ontwikkeling van de eindproducten. De interviews zijn getranscribeerd door uitgetypt.nl.

2.3 Gebruikersbijeenkomsten

Voor beide fasen van het project werd een gebruikersbijeenkomst georganiseerd. Het doel van deze bijeenkomsten was enerzijds het delen van tussenresultaten onder een brede groep potentiële gebruikers, en anderzijds het ophalen van lokale perspectieven en behoeften. Om deze doelen te behalen waren beide bijeenkomsten opgedeeld in twee delen: een plenair deel waarin resultaten werden gepresenteerd, en een tweede deel waar, onder leiding van een projectteamlid, werd gediscussieerd over de lokale problematiek (eerste bijeenkomst) of oplossingen (tweede bijeenkomst). In het plenaire deel werden tijdens de eerste bijeenkomst de belangrijkste uitkomsten van het literatuuronderzoek, gecombineerd met voorbeelden uit de interviews, gepresenteerd. Bij de tweede bijeenkomst is het plenaire deel volledig ingevuld aan de hand van de interviews. Bij alle onderdelen van de bijeenkomsten waren notulisten aanwezig om vragen en antwoorden bij te houden voor verdere verwerking in deze rapportage. Alle DPRA-werkregio's en de case-partners waren uitgenodigd voor het bijwonen van de bijeenkomst, met het verzoek de uitnodiging verder te verspreiden onder andere relevante partijen. Deelnemerslijsten zijn opgenomen in de bijlage van dit rapport (Bijlage 2).

2.4 Ontwikkeling eindproducten

Het hoofdproduct van dit project is een themapagina Stedelijk Water op het Kennisportaal Klimaatadaptatie. Alle opgehaalde kennis wordt via deze webpagina ontsloten. De webpagina volgt wat betreft structuur en inhoud de eindrapportage. Twee interactieve overzichtsafbeeldingen zijn ontwikkeld om de opgehaalde kennis visueel samen te vatten. Inrichting van de webpagina, en het geschikt maken van de rapportageteksten is gedaan door Stichting CAS. De overzichtsafbeeldingen zijn binnen het projectteam ontwikkeld. Case-partners hebben feedback geleverd op de inhoud van de eindrapportage.

3 Effecten van Klimaatverandering op stedelijke waterkwaliteit

Dit hoofdstuk biedt een breed overzicht van de mogelijke effecten van klimaatverandering, zoals geïdentificeerd in wetenschappelijke en grijze literatuur. We beschrijven in Sectie 3.1 eerst de aspecten van klimaatverandering in Nederland die relevant zijn in het kader van stedelijke waterkwaliteit. In Sectie 3.2 worden effecten op de ecologische kwaliteit besproken. Deze sectie bestaat uit een onderdeel over abiotische factoren (3.2.1) en een onderdeel over biotische factoren (3.2.2). In Sectie 3.3 worden de mogelijke gevolgen voor gebruikskwaliteit besproken. De grijze tekstkaders lichten de besproken effecten verder toe aan de hand van praktijkvoorbeelden die zijn opgehaald met de interviews en gebruikersbijeenkomsten.

3.1 Klimaatverandering in Nederland

Stijgende (water)temperaturen, veranderingen in neerslag, lichtklimaat, en atmosferische CO₂-concentratie, maar ook zeespiegelstijging zijn allemaal facetten van klimaatveranderingen die stedelijke watersystemen direct en indirect zullen beïnvloeden. Hoe klimaatverandering zich in de toekomst zal gaan voortzetten hangt af van het gevoerde klimaatbeleid. Bij uitvoering van de afspraken in het akkoord van Parijs wordt verwacht dat de jaargemiddelde temperatuur rond 2100 ongeveer 3 °C hoger zal zijn ten opzichte van het pre-industriële niveau, hoewel verschillende landen hun ambities inmiddels hebben aangescherpt (1).

3.1.1 *Veranderingen in watertemperatuur en ijsbedekking*

De jaargemiddelde temperatuur in Nederland is trendmatig toegenomen, en was in 2019 ongeveer 2,1 (±0,6) °C hoger dan in 1907¹. Het grootste deel van deze toename heeft de afgelopen decennia plaatsgevonden; tussen 1980 – 2019 was de gemiddelde stijging ongeveer 0,5 graad per decennium. Over dezelfde periode is ook een stijging in oppervlaktewatertemperatuur geobserveerd, zowel in de grote rivieren als in kleinere wateren². Verschillende factoren, waaronder klimaatverandering, maar ook koelwaterlozingen hebben aan deze ontwikkeling bijgedragen. Naast een toename in de gemiddelde temperatuur, wordt verwacht dat ook het voorkomen van hittegolven, zoals die van 2003, 2019 en 2020, sterk in frequentie zal toenemen (2-4).

Een ander duidelijk zichtbaar gevolg van klimaatverandering, gerelateerd aan een toename in watertemperatuur, is de verkorting van de periode waarin stadswateren door ijs zijn bedekt. Gemiddeld genomen is de duur van de ijsbedekking op het noordelijk halfrond de laatste decennia aanzienlijk verkort. De duur van de ijsbedekking is sterk gerelateerd aan het aantal vorstdagen. Het aantal vorstdagen per winter (dagen met een etmaalgemiddelde temperatuur onder nul graden Celsius) varieert sterk

¹ Bron: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0226-temperatuur-mondiaal-en-in-nederland?ond=20883>

² Bron: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0566-temperatuur-oppervlaktewater?ond=20883>

in de tijd, maar over een langere periode is er een duidelijk dalende lijn te zien. De KNMI'14 scenario's voorspellen warmere winters (5), waardoor de frequentie en de duur van de ijsbedekking naar verwachting nog verder af zullen nemen.

3.1.2 *Veranderingen in neerslag en de impact op waterkwaliteit*

Alle KNMI'14 scenario's (5) geven aan dat het aantal intense (cluster)buien verspreid over het hele jaar toe zal nemen. De gevolgen hiervan voor de waterkwaliteit zullen over het algemeen negatief zijn, bijvoorbeeld door een toename van de hoeveelheid *runoff* (oppervlakkige afvoer) en plaatselijk ook door riooloverstorten (6, 7). De extra waterstroom naar het oppervlaktewater gaat gepaard met een toename van de organische-stofbelasting, en nutriëntenbelasting. Het moment waarop de intense buien vallen, is van grote invloed op de mate waarin het negatieve effect van extra *runoff* optreedt. In de zomer zal dit eerder tot problemen lijden dan in de winterperiode. De mate waarin het aantal overstorten vanuit rioolsystemen toeneemt, hangt sterk af van de mate waarin maatregelen zijn genomen om het voorkomen van overstorten tegen te gaan, zoals het scheiden van afvalwatersystemen.

De jaarlijkse neerslaghoeveelheid in Nederland is in de periode 1910-2019 gelijkmatig gestegen van 692 naar 873 millimeter³. Dit is een toename van 26% in 110 jaar. De grootste stijging heeft plaatsgevonden in de wintermaanden, namelijk 43% over de periode 1910-2019. Voor de lente, zomer en herfst bedragen de toenames respectievelijk 27%, 17% en 22%. De neerslagpatronen binnen seizoenen zijn minder sterk veranderd.

In lijn met deze observaties geven de KNMI'14 scenario's (5) aan dat de hoeveelheid neerslag in de winter en in de lente verder toe zal nemen, en dat de hoeveelheid zomerse neerslag minder sterk zal stijgen. De neerslag in de zomer zal vooral vallen gedurende korte hevige buien waarbij wateroverlast kan optreden. Lange perioden met droogte in combinatie met de verwachte toename in verdamping kan, afhankelijk van het watersysteem, in de zomer leiden tot een grotere behoefte aan inlaatwater vanuit bijvoorbeeld de grote rivieren, een toename van de verblijftijd, een daling van de (grond)waterpeilen, en een afname in debiet (8). Fluctuaties van het waterpeil door veranderingen in het netto neerslagpatroon, treedt dan vooral op in geïsoleerde wateren zoals stadsvijvers. Tijdens langdurige droogte kan door het uitzakken van het waterpeil en verdamping een volledige (tijdelijke) droogval plaatsvinden in deze systemen.

Stilstaande wateren worden in Nederland vaak op peil gehouden door een gecontroleerd in- en uitlaatregime. De extra benodigde inlaat tijdens droogte heeft tot gevolg dat de waterkwaliteit met de daarbij behorende flora en fauna van deze watersystemen sterk kan gaan lijken op die van het inlaatwater.

³ Bron: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0508-jaarlijkse-hoeveelheid-neerslag-in-nederland?ond=20883>

Praktijkvoorbeelden: gevolgen van klimaatverandering

Verschillende gemeenten en waterschappen merken op dat de problematiek van wateroverlast lange tijd meer aandacht heeft gekregen dan droogte. Inmiddels zijn ook problemen door droogte in een groot deel van Nederland aan de orde, en is er een toenemende behoefte aan inzichten en oplossingen op dit thema. In de gemeente Hoeksche waard wordt bijvoorbeeld aangegeven dat extreme neerslag met de daar bij horende piekafvoeren niet het ergste probleem is. De laatste keer dat er aanzienlijke wateroverlast was, was in 2015. De droogteperioden van de laatste jaren zijn een veel groter knelpunt.

In Groningen heeft men de afgelopen jaren slechts één extreme neerslagsituatie gehad. Dit leverde weinig problemen op voor het afvoersysteem. Laaggelegen gebieden in de stad lopen wel vaker vol. Ook in Groningen zijn de droogteperioden van de laatste jaren een groter knelpunt. Zeker in vijvers waar het water flink kan uitzakken. Deze systemen zijn de laatste jaren robuuster gemaakt door de waterpartijen met elkaar te verbinden. Ook worden pompen ingezet om water vanuit de ene waterpartij naar de andere te krijgen. In het boezemsysteem van de stad is het afgelopen jaar water ingelaten vanuit het IJsselmeer. Er wordt nu meer en vaker water ingelaten. De peilen worden in de stad in de zomerperiode maximaal opgezet. Het boezemsysteem wordt, wat nutriënten betreft, ook sterk beïnvloed door de landbouw. De gemeente heeft daar weinig invloed op. Het waterrioleringsbeleid van de stad is zo ingericht dat bij vervanging er een gescheiden stelsel wordt aangelegd waardoor er gewoon regenwater wordt geloosd op de vijvers.

In Amsterdam neemt de wateroverlast door piekbuien toe. Die waren er vroeger ook, maar de afgelopen jaren komen ze frequenter voor. Het oude centrum van Amsterdam heeft een gemengd waterafvoer stelsel en buiten het centrum is het stelsel gescheiden. Water dat buiten het centrum valt bereikt dus niet de rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) maar komt in de gracht of in de grond terecht. Gemiddeld vijfmaal per jaar vindt er in het centrum (gemengde stelsel) een overstort plaats. Het duurt gemiddeld drie dagen voordat de waterkwaliteit weer normaal is. Amsterdam zet in op het vasthouden en hergebruiken van water als belangrijkste adaptatiemaatregel. Men verwacht echter geen effect op de waterkwaliteit bij deze maatregelen. Men verwacht netto niet veel minder water uit het regenwaterriool. Het riool functioneert nog bij een neerslag van 35 mm in een uur. Men wil dit uitbreiden naar 60-100 mm neerslag in een uur, vooral door het water ergens tijdelijk te bergen. Maatregelen zijn verder bijvoorbeeld het verminderen van verharding, en het aanleggen van groene of blauwe daken.

3.1.3 Zeespiegelstijging

De zeespiegel zal naar verwachting nog eeuwenlang blijven stijgen. Projecties over de zeespiegelstijging zijn sinds publicatie van de KNMI'14 scenario's naar boven bijgesteld, maar variëren sterk afhankelijk van het klimaatscenario. Ten opzichte van 1995 kan de zeespiegel aan de

Nederlandse kust in 2100 ongeveer 1 meter zijn gestegen bij uitvoering van het wereldwijd vastgestelde klimaatmitigatiebeleid (9).

3.2 Ecologische kwaliteit

3.2.1 Abiotische factoren

Abiotische factoren betreffen de fysische en chemische aspecten van de waterkwaliteit. In deze sectie zijn mogelijke effecten van klimaatverandering op vijf chemische abiotische factoren van stedelijk oppervlaktewater uitgewerkt:

- Microverontreinigingen
- Zuurstof
- Fosfaat
- Stikstof
- Chloride

Op basis van de uitgevoerde literatuurstudie en de samenwerking met gemeenten en waterschappen is vastgesteld dat klimaatverandering van invloed is op deze abiotische factoren van stedelijk oppervlaktewater.

3.2.1.1 Microverontreinigingen

Tijdens intense buien, vooral na een langdurige droogteperiode, kunnen microverontreinigingen zoals bandenslijpsel, koper van autoremmen, en olieresten (koolwaterstoffen) in het oppervlaktewater terecht komen (10, 11). Vooral bij gescheiden rioelstelsels zal regenwater, wat valt op verharde oppervlakten zoals wegen en parkeerplaatsen, microverontreinigingen kunnen meevoeren, die dan uiteindelijk in het oppervlaktewater kunnen belanden. Microverontreinigingen zijn in potentie schadelijk voor het aquatische milieu (11). Er is echter weinig bekend over de concentraties van deze stoffen in het oppervlaktewater en/of in de waterbodem van stadswateren. Veel waterbeheerders hebben, vanwege de hoge kosten, een groot aantal van deze microverontreinigingen niet in het meetpakket zitten.

Ook de historische belasting van toxische stoffen in sommige stadswateren, bijvoorbeeld bij voormalige industrieterreinen, kunnen in de toekomst problemen gaan geven. Een breed scala aan verontreinigingen in de waterbodem is afkomstig van industriële opwerking van materialen, grotendeels vrijgekomen als bijproduct. Bij hogere temperaturen en een langere verblijftijd van het water kunnen deze stoffen vrij komen. In dit geval zijn de processen in bodem en water die bij een hogere temperatuur in het algemeen sneller verlopen belangrijk: hydrolyse, redoxreacties, vervluchtiging en microbiële afbraak (12).

Praktijkvoorbeelden: Microverontreinigingen

In de Hoeksche waard worden microverontreiniging niet gemeten. Omdat regenwater dat valt op verharde oppervlakken microverontreinigingen kan meevoeren, verwacht men vanwege de voortzettende ombouw van gemengde naar gescheiden stelsels wel een toename van microverontreinigingen in het oppervlaktewater van het stedelijk gebied.

In Groningen worden microverontreinigingen en medicijnresten gemeten in een aantal vijvers. Na overstorten worden verhoogde concentraties van deze stoffen waargenomen. Na enige tijd verdwijnen deze verhoogde concentratie weer naar het niveau van voor de overstorten.

In Amsterdam verwachten waterbeheerders dat bij hogere temperaturen en een langere verblijftijd van het water er in sommige gebieden een grote invloed zal zijn van de historische belasting van toxische stoffen.

3.2.1.2 Zuurstof

Hogere watertemperaturen – eventueel in combinatie met een langere verblijftijd – leiden tot grotere dag-nachtfluctuaties in zuurstofconcentraties. Door de hogere watertemperatuur neemt tevens de kans op zuurstofloosheid toe (13). De zuurstofconcentratie wordt in grote mate bepaald door de watertemperatuur. Dit komt enerzijds doordat de oplosbaarheid van zuurstof afneemt als het water opwarmt, en anderzijds doordat de stofwisseling en daarmee het zuurstofverbruik, van alle in het water en in het sediment aanwezige organismen toeneemt. Dit gaat zowel op voor de primaire productie, die overdag plaatsvindt en waarbij zuurstof wordt geproduceerd, als voor de respiratie (zuurstofgebruik), waarbij overdag en 's nachts zuurstof wordt geconsumeerd. Over het algemeen neemt de respiratie sterker toe dan de productie (14), waardoor de zuurstofconcentratie in het water daalt. Bij extreme situaties zoals hittegolven, met name in ondiepe wateren met een bodem die veel organisch materiaal bevat, kan dat snel leiden tot zuurstofloosheid (15).

Onder invloed van klimaatverandering kan de frequentie van het optreden van gelaagdheid in temperatuur (stratificatie) in ondiepe systemen toenemen. Terwijl in diepe systemen (> 5 meter) de watertemperatuur bij het sediment als gevolg van klimaatverandering niet of nauwelijks toe zal nemen, gebeurt dit naar verwachting in ondiepe systemen wel. Dit zal leiden tot een grotere afbraaksnelheid van organisch materiaal. Wanneer er veel organisch materiaal in het sediment aanwezig is, wat veelal het geval is in eutrofe systemen, kan dit leiden tot zuurstofloosheid nabij het sediment (16). Extreme buien kunnen ertoe leiden dat het riool vaker over zal storten op het oppervlaktewater. Dit leidt vervolgens tot een grotere zuurstofvraag en mogelijk zuurstofloosheid, zeker als de overstorten plaatsvinden in een warme zomer (15).

Praktijkvoorbeelden: stijgende watertemperatuur

In Groningen worden enkele kwetsbare vijvers, waar overstorten op zitten, gemonitord op zuurstof en temperatuur. Een temperatuur van 25 °C wordt hier aangehouden als kritische grens voor een aantal ingrepen. Mobiele beluchters worden dan ingezet als noodvoorziening. Deze kritische grens van 25 °C wordt de laatste jaren vaker gehaald.

3.2.1.3 Fosfor

Klimaatverandering leidt waarschijnlijk tot een hogere fosforbelasting van stedelijke watersystemen. Hierbij kan het gaan om zowel interne als externe processen. De toename in interne fosforbelasting wordt vooral veroorzaakt door de als gevolg van opwarming versnelde mineralisatie. Hierbij komt fosfor vrij. Wanneer ook zuurstofconcentraties afnemen, zoals beschreven in Sectie 3.2.1.2, kan er bovendien aan ijzer gebonden fosfor vrijkomen (interne eutrofiëring). De hogere externe fosforbelasting wordt voornamelijk veroorzaakt door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden *runoff* en de frequentie van doorspoeling van het systeem (verblijftijd van het water).

Hogere temperaturen versnellen de afbraak van organisch materiaal in de waterkolom en in het sediment. Als organisch materiaal wordt afgebroken komt er fosfor vrij. Als het warmer wordt, neemt de interne fosforbelasting dus toe. Als gevolg van klimaatverandering zal met name in ondiepe systemen de temperatuur nabij het sediment toenemen. Een temperatuurverhoging van ongeveer vijf graden kan in sommige gevallen de fosforbelasting vanuit het sediment meer dan verdubbelen (6, 17). Hoe lang de toename in fosforbelasting vanuit het sediment als gevolg van opwarming aanhoudt, hangt af van de historische belasting van het systeem en de hiermee samenhangende dikte van de sedimentlaag. Bij hogere temperaturen neemt de kans dat de toplaag van het sediment zuurstofloos wordt toe (16). Hierdoor kan de fosforbelasting vanuit het sediment toenemen.

De door opwarming gestimuleerde toename in interne fosforbelasting wordt gezien als één van de belangrijkste factoren die de eutrofiëring in (opwarmende) ondiepe systemen in stand houdt (6, 16, 18).

De uiteindelijke fosforconcentratie wordt mede bepaald door de verblijftijd van het water. Klimaatverandering beïnvloedt deze verblijftijd: bij minder neerslag neemt de verblijftijd toe, tenzij het systeem met inlaatwater wordt doorgespoeld. Doorspoelen vermindert de verblijftijd, maar inlaatwater kan ook een bron zijn van verontreinigingen. Daarom is deze maatregel niet altijd een oplossing voor fosforproblematiek (zie ook Hoofdstuk 5). Bij meer neerslag neemt de verblijftijd af.

Praktijkvoorbeeld: fosfor

Droog laten vallen van stedelijke watergangen wordt door verschillende gemeenten en waterschappen ook genoemd als maatregel om fosfaat uit systeem te verwijderen. Door deze droogval wordt het ijzer in het sediment geoxideerd. Dit kan vervolgens fosfaat binden, waardoor de nalevering van fosfaat afneemt.

3.2.1.4 Stikstof

Klimaatverandering leidt naast een hogere interne en externe fosforbelasting naar alle waarschijnlijkheid ook tot een hogere stikstofbelasting. Echter, hogere temperaturen kunnen ook leiden tot meer stikstofverwijdering door denitrificatie (omzetting van nitraat naar stikstof)(16). De hogere interne stikstofbelasting wordt vooral veroorzaakt door de door opwarming versnelde mineralisatie. Hierbij komt stikstof vrij. De hogere externe stikstofbelasting wordt voornamelijk veroorzaakt door veranderingen in het neerslagregime en de hiermee samenhangende hoeveelheden *runoff* en de frequentie van doorspoeling van het systeem (verblijftijd van het water) (19-21). Daarnaast zullen veranderingen in neerslagpatronen ook van invloed zijn op de hoeveelheid stikstof die via regen neerslaat (natte depositie). Hogere stikstof concentraties leiden uiteindelijk tot eutrofiëring van het aquatisch systeem.

Praktijkvoorbeelden: Nutriënten

In Groningen hebben ze in de stedelijke boezem geen echt structurele waterkwaliteitsproblemen. Tegelijkertijd zijn de concentraties van wel vrij hoog, vooral vanwege de overstorten op de grachten bij piekbuien en door aanvoer van nutriëntenrijk water uit het landelijk gebied.

Verschillende deelnemers van de gebruikersbijeenkomsten merken op dat ze een hogere baggerfrequentie als oplossing proberen aan te dragen binnen hun werkgebied. Hiermee kan de toevoer van nutriënten naar het oppervlaktewater (nalevering) enigszins worden gestuurd.

Het waterstelsel in het Westen is erg eutroof. Verschillende gebruikers merken op dat het "zelfreinigend" vermogen van water omhoog moet. Als er water wordt ingelaten in een stadssysteem, vanwege de droogte, dan zal het water (vaak uit agrarische gebieden) wat ingelaten wordt minder nutriëntrijk moeten zijn.

3.2.1.5 Chloride

Klimaatverandering zal naar verwachting leiden tot hogere chlorideconcentraties. Dit komt onder andere doordat hoeveelheid zoute kwel, mede door een stijgende zeespiegel, zal toenemen. Ook wordt de hoeveelheid ingelaten 'gebiedsvreemd' water vanuit bijvoorbeeld de grote rivieren groter, terwijl de chlorideconcentraties in de rivieren in de zomer juist hoog kunnen zijn. Tot slot neemt de verdamping toe, waardoor de chlorideconcentraties (evenals die van andere elementen en verontreinigingen) oplopen. Bij extreme buien kunnen de

chlorideconcentraties door verdunning en afvoer weer sterk afnemen. De chlorideconcentraties zijn sterk afhankelijk van het inlaatregime, zoute kwel en indamping (16).

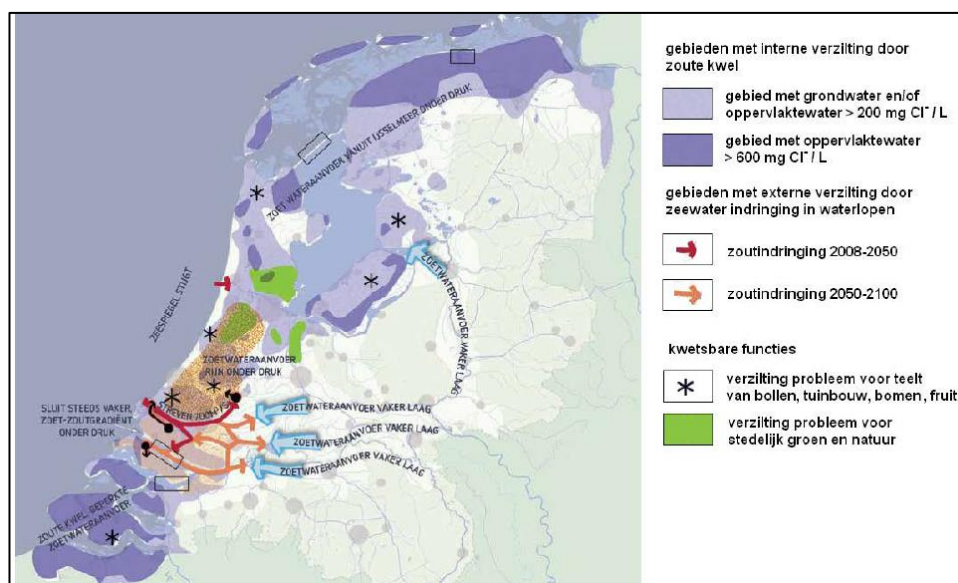
Praktijkvoorbeelden: Verzilting

In Amsterdam is men bang dat de zouttong oprukt en dat deze tot voorbij Weesp komt. Dat zal vooral consequenties hebben voor de zoetwaterecologie van Amsterdam. Het bellenscherm in het Amsterdam-Rijnkanaal is weer operationeel sinds het voorjaar, maar deze werkt alleen goed bij een hoge afvoer. De boezem in het centrum van Amsterdam is brak. In sommige delen van Amsterdam (Bijlmer, nieuwe Bullewijk) lijkt het chloridegehalte toe te nemen, mede veroorzaakt door de droogte. Zoute bronnen blijven hier over waar de zoete bronnen wegvallen.

De Hoeksche waard geeft aan dat ze vaak een dilemma ervaren bij de beslissing al dan niet rivierwater in te laten met een chloridegehalte van >300 mg/l Cl. Het brakke water wordt dan toch ingelaten omdat de schade aan bebouwing/gebouwen bij uitzakken van het peil groter is dan de eventuele ecologische schade. Ook bij zeer lage zuurstofgehalten van <1 mg/l wordt brak water ingelaten om te voorkomen dat de aquatisch fauna doodgaat aan zuurstofgebrek. De verwachting is dat de Cl concentraties van het oppervlaktewater in de toekomst hoger zullen zijn, vooral als de zouttong verder naar binnen komt. Men verwacht zeker effecten op de aquatische ecologie.

In Groningen is verzilting momenteel geen probleem. Cl concentraties zijn maximaal 185 mg Cl/l. Er is echter één uitzondering; de Piccardthofplas. Deze plas van 30 meter diep heeft zoute kwel en daarmee een bijzondere aquatische ecologie.

De zeespiegelstijging zal leiden tot een verhoging van de zoute grondwaterdruk. Bij gelijkblijvende waterstanden in de binnenwateren zal de hoeveelheid zoute kwel en hiermee de zoutbelasting van de watersystemen toenemen. Bij dalende waterstanden, bijvoorbeeld door droogte, zal deze hoeveelheid kwel nog extra toenemen. Hoeveel de plaatselijke kwelflux (zouttong) toeneemt, is afhankelijk van de afstand van de zee tot nabije hoger liggende zoetwatermassa's. Regio's in de nabijheid van de Noordzee en Waddenzee zullen hier voornamelijk mee te maken krijgen (Figuur 1). Door de temperatuurstijging neemt de verdamping toe. Volgens de KNMI'14 scenario's gaat het voor de zomers (in 2050) om een verdampingstoename van 3 tot 15 procent (5). In geïsoleerde stadswateren kan dit extra waterverlies in droge perioden leiden tot indamping, waardoor de concentratie van chloride en andere stoffen toeneemt.



Figuur 1. Gebieden met kans op verzilting door zoute kwel. Bron: (22)

3.2.2 Biologische effecten

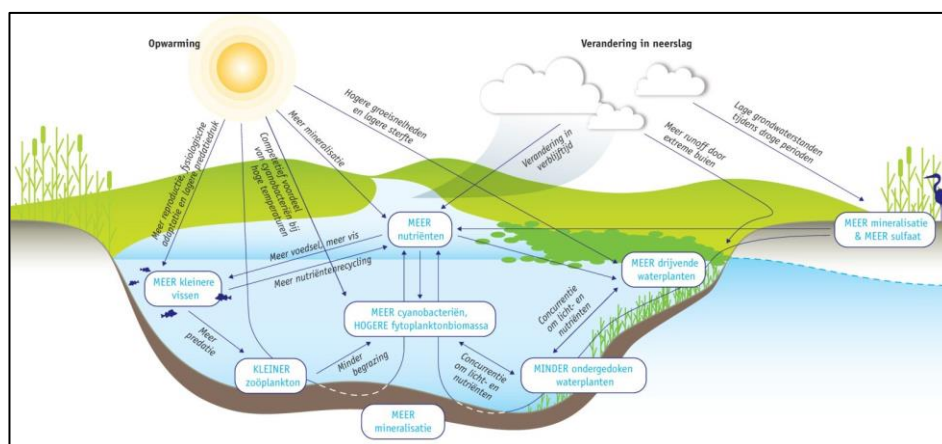
Zes biologische effecten van klimaatverandering van stedelijk oppervlaktewater zijn uitgewerkt in deze rapportage:

- Fytoplankton
- Blauwalgen
- Waterplanten
- Vis
- Exoten
- Muggen

Op basis van de uitgevoerde literatuurstudie en de bespreking met gemeenten en waterschappen is vastgesteld dat klimaatverandering, adaptatiemaatregelen (die veelal getroffen zijn ten behoeve van de hydrologie) en de veranderende stedelijke waterkwaliteit impact hebben op de aquatische ecologie van stedelijk oppervlaktewater.

3.2.2.1 Fytoplankton, blauwalgen, en waterplanten

Klimaatverandering kan leiden tot een langer groeiseizoen met hierdoor in het voor- en najaar een hogere fytoplanktonbiomassa. Bij gelijkblijvende nutriëntenbelasting leiden hogere temperaturen niet automatisch tot een toename in fytoplankton zomerbiomassa.



Figuur 2. Eutrofiërende effecten van klimaatveranderingen (overgenomen uit 16)

Klimaatverandering heeft wel een duidelijk effect op de fytoplanktonbiomassa via de toename van nutriëntenbelastingen zoals beschreven in Sectie 3.3.1, en via de invloed op de competitie tussen ondergedoken waterplanten en fytoplankton (Figuur 1). Over het algemeen resulteren hogere nutriëntenbelastingen in hogere fytoplanktonbiomassa's (23-26). Hogere watertemperaturen leiden vaak tot een andere fytoplankton soortensamenstelling. De fytoplanktongroep die het meest in verband wordt gebracht met klimaatverandering, is die van de cyanobacteriën (blauwalgen) (6, 21, 27-29). Hogere temperaturen zijn gunstig voor blauwalgen. Zo groeien sommige beter bij hogere temperaturen dan veel soorten groenalgen en/of kiezelwieren, waardoor ze een competitief voordeel hebben (30). Vooral bij een totaal-P belasting $> 2,59$ g P/m²/jaar, een zuurstofconcentratie van < 6 mg/L en een watertemperatuur van > 25 °C zal de kans op een dominantie van cyanobacteriën toenemen (23, 29, 31). Kosten et al. (27) adviseert om ter compensatie van de effecten van een stijging van de watertemperatuur met 1 °C, de totale nutriënten concentratie te verlagen met maar liefst een derde.



Figuur 3. Blauwalgenbloei (bron: Bart-Jan Vreman)

Een ander voordeel van hogere temperaturen voor cyanobacteriën werkt via de stratificatie van de waterkolom. Stratificatie werkt met name in het voordeel van cyanobacteriën die hun drijfvermogen kunnen reguleren. Terwijl veel fytoplanktonsoorten tijdens de stratificatie naar beneden

zakken, kunnen cyanobacteriën aan het wateroppervlak dikke drijfslagen vormen. Deze drijfslagen beschaduwden onderliggende, niet-drijvende fytoplanktonsoorten die daardoor licht-gelimiteerd kunnen raken (23).

Praktijkvoorbeelden: Blauwalgen

In de Hoeksche waard heeft nog niet "veel" problemen met blauwalgen. Op twee locaties wordt zwemwater af en toe afgesloten.

In Groningen heeft de Kardingerplas (zwemplas) elk jaar problemen met blauwalgen. De blauwalgenbloei treedt ook steeds vroeger in het jaar op. Bijzonder is dat de nutriënten concentraties hier heel laag zijn. Ook in het Noorderplantsoen zijn er problemen met blauwalgen. Hier zijn echter voorzieningen getroffen in de vorm van bergingszakken. Deze moeten ervoor zorgen dat bij een overstort het water eerst wordt opgeslagen in zakken. Later loopt het dan weer het riool in.

In Amsterdam zagen ze ook dat bij droogte er langere verblijftijden waren, wat weer een enorme algenpiek met zich meebracht. Het is vooral de afwisseling van droog en nat wat de algenproblemen veroorzaakt. In april was er een door algenbloei gedomineerd systeem in de grachten van Amsterdam mede door het afgenomen aantal boten in de grachten. Dankzij de langere verblijftijd (>2 weken) van water verwacht men ook meer blauwalgenproblemen in Amsterdam. Het IJ heeft geen algenprobleem vanwege de korte verblijftijd van het water.

Klimaatverandering zal hoogstwaarschijnlijk de kans op hoge bedekkingen met ondergedoken waterplanten verkleinen. Zachtere winters (met minder ijsgang) veranderen ook de soortensamenstelling van waterplanten. Zo is er in de kleinere stadswateren een grotere kans op een dominantie van drijvende planten zoals kroos (*Lemna spp.*) (Figuur 4). Drijvende waterplanten, zoals kroos, en groene overwinterende ondergedoken waterplanten, zoals *Elodea spp.*, zullen het meest profiteren van zachte winters (32). Waterplanten hebben verschillende overwinteringsstrategieën. Ze kunnen overwinteren in het sediment (zaden, wortelknolletjes, winterknoppen). Sommige meerjarige waterplanten kunnen als plant in de waterkolom of op het wateroppervlak overwinteren. Zachtere winters zijn gunstig voor deze laatste groep (33). Tijdens zachte winters kunnen deze planten een relatief hoge bedekkingen houden en soms zelf een lichte groei vertonen (34). Doordat ze in het voorjaar al aanwezig zijn hebben ze dan een competitief voordeel ten opzichte van de in het sediment overwinterende soorten.



Figuur 4. Klein geïsoleerd stadswater in het centrum van Wageningen met een 100% bedekking van kroos (bron: Dick Belgers).

Praktijkvoorbeelden: woekerende waterplanten

In de Hoeksche Waard wordt een toename van kroos waargenomen. De plant sterft in de winter niet meer af. In Groningen was er in 2018 100% kroosbedekking in de stedelijke boezem.

In Amsterdam verwacht men in de toekomst meer problemen met woekerende waterplanten omdat deze planten in de winter niet meer doodgaan. Ze hebben hier nog geen problemen met woekerende kroosvegetaties. Een vijver in het Willemspark was in mei 2020 helder en de waterplanten kwamen daar tot ontwikkeling, mede door de droogte waardoor er geen aanvoer van nutriëntrijk water uit de polder plaatsvond. Toen dat weer opgang kwam was de helderheid verdwenen.

3.2.2.2 Vis

Klimaatverandering kan leiden tot een soortenverschuiving van vissen, waarbij koude soorten zullen verdwijnen en de dichtheden van bodemwoelende (benthivore) vis zoals karper en brasem zullen toenemen. Hogere temperaturen leiden bovendien tot een langere paaitijd. Hierdoor zijn er langere tijd kleine vissen aanwezig die vaak sterk prederen op zoöplankton wat weer kan leiden tot een hogere fytoplankton biomassa (16). De watertemperatuur heeft ook invloed op de dichtheid van bepaalde vissoorten. Dit effect is het duidelijkst in niet stromende, ondiepe wateren wanneer er tijdens een lange ijsperiode, plaatselijk vissterfte optreedt. Deze vissterfte wordt dan vooral veroorzaakt doordat er zuurstofloosheid optreedt onder het ijs (35). Wanneer het ijs met sneeuw bedekt is, is de zuurstofafname in het water het snelst omdat er onder de donkere omstandigheden geen zuurstof productie plaats kan vinden. Met de verwachte afname van langdurige ijsvorming in

stadswateren, vanwege klimaatopwarming, zal dit fenomeen de komende decennia minder gaan optreden. De vissterfte in de zomer zal door klimaatverandering mogelijk toenemen doordat extreem hoge zomertemperaturen in stilstaande eutrofe wateren tot zuurstofloosheid kunnen leiden (16). Bij hogere temperaturen kan de zuurstofconcentratie in het water dalen. Tegelijkertijd hebben vissen bij hogere temperaturen meer zuurstof nodig. Een toename van de vissterfte bij hoge temperaturen komt meestal dan ook door een zuurstoftekort en niet door directe temperatuurgerelateerde stress (16). Bij lage zuurstofconcentraties of zuurstofloosheid wijken vissen in geïsoleerde wateren, indien mogelijk, uit naar diepere delen of migreren ze naar andere zuurstofrijkere wateren (36).

Praktijkvoorbeelden: Vissterfte

In Groningen zijn recent alle overstortvijvers gebaggerd en uitgediept zodat vissen zich kunnen terugtrekken naar de koelere, diepere delen van de vijver.

In Amsterdam wordt genoemd dat iedere vissoort een watertemperatuur heeft waarboven deze sterft. Dat is voor de Snoek bijvoorbeeld 27 °C. Boven deze temperatuur zijn alle snoeken verdwenen, mits er schuilmogelijkheden zijn. Watergraafsmeer heeft alleen karper die daar het gehele watersysteem domineert. Er groeien hier geen waterplanten.

De Gemeente Molenlanden noemt dat de grootste problemen met betrekking tot vissen ontstaan tijdens droge zomers. Vissterfte is een "zichtbaar probleem" en krijgt veel media-aandacht.

3.2.2.3 Exoten en muggen

Klimaatverandering is over het algemeen niet de belangrijkste factor bij vestiging van nieuwe soorten in stadswateren. Wel kan het de abundantie van exoten sterk beïnvloeden, waarbij zachtere winters tot hogere abundanties leiden. Strenge winters kunnen fataal zijn voor sommige exoten, waardoor ze zich niet succesvol kunnen vestigen. Watersla (*Pistia stratiotes*) en Waterhyacint (*Eichhornia crassipes*) sterven in Nederland 's winters af en vormen mede hierdoor geen probleem in Nederlandse oppervlaktewateren. Wanneer de winters warmer worden, zou dit kunnen veranderen (16). Soorten als Grote waternavel (*Hydrocotyle ranunculoides*), Waterwaaier (*Cabomba caroliniana*) en de rode Amerikaanse rivierkreeft (*Procambarus clarkii*) komen ook onder relatief koude omstandigheden voor. Het succes van deze soorten in Nederland is dus niet direct te koppelen aan klimaatverandering (16).

Muggenontwikkeling is mogelijk in afvoerwater wat tijdelijk langer blijft staan dan gewenst. Vooral bij verstoppingen van kleine afvoersystemen, bijvoorbeeld ontstaan na piekbuien waarbij veel sediment is meegenomen (37).

Praktijkvoorbeelden: Exoten en muggen

In de Hoeksche waard denkt men dat de hoeveelheid exoten toeneemt omdat het water warmer wordt.

In Groningen zijn een aantal exoten die toenemen, waaronder de Grote waternavel. Tijdelijke wateropvang wordt zo ontworpen dat deze binnen afzienbare tijd weer leeg is, en er niet wekenlang een klein laagje water blijft staan. De meeste overstortvijvers leveren niet veel problemen op wat muggenoverlast betreft.

In de Hoeksche waard geen klachten over muggenoverlast. Wel vragen bewoners vaak over muggen bij bijeenkomsten over de aanleg van waterberging en natuurlijke oevers.

3.3 Gebruikskwaliteit

Dertien gebruiksfuncties van stedelijk oppervlaktewater zijn uitgewerkt in deze rapportage (Tabel 1). Op basis van de uitgevoerde literatuurstudie en de bespreking met gemeenten en waterschappen is vastgesteld dat klimaatverandering, adaptatiemaatregelen (die veelal getroffen zijn ten behoeve van de hydrologie) en de veranderende stedelijke waterkwaliteit impact hebben op deze gebruiksfuncties.

Tabel 1: Gebruiksfuncties van oppervlaktewater waarvan verwacht wordt dat klimaatverandering impact zal hebben op de gebruiksmogelijkheden. Functies die niet in dit overzicht staan vertonen overlap met functies die wel zijn uitgewerkt, zoals bijvoorbeeld recreatief varen (overlap met transport en zwemmen).

Categorie	Gebruiksfunctie	Omschrijving
Wateronttrekking	Irrigatie voedselgewassen	Irrigatiewater voor voedselgewassen, e.g. in volkstuinen en stadslandbouw.
	Irrigatie overige vegetatie	Irrigatiewater voor siertuinen en openbaar groenbeheer.
	Proceswater industrie	Water dat door de industrie wordt gebruikt als spoel-, ketel- of proceswater.
	Drinkwater	Oppervlaktewateronttrekking t.b.v. drinkwaterproductie.
Energie	Koelwater voor energie	Koud oppervlaktewater wordt ingezet als industrieel koelwater, e.g. in energiecentrales.
	Verwarmen/ verkoelen van woningen of utiliteitsbouw	Via een warmtewisselaar wordt thermische energie uit oppervlaktewater gebruikt voor verwarming of verkoeling van gebouwen.
Regulering	Klimaat (lokaal)	Water in combinatie met stedelijk groen kan hittestress verminderen.
	Waterkwaliteit- en kwantiteit	Eenzijds voor het op orde houden van waterpeilen om schade aan o.a. funderingen door droogte te voorkomen. Anderzijds om problemen met de waterkwaliteit

		te voorkomen (e.g. doorspoelen ter preventie van verzilting of zuurstofloosheid).
Recreatie	Zwemmen	Zwemmen en spelen in oppervlaktewater.
	Vissen	Sportvisserij
Ruimtegebruik	Wonen op/ aan water	Wonen en recreëren langs water, woonboten.
	Transport goederen	Transport van goederen over stadswater, bijvoorbeeld van bouwmaterialen of bevoorrading horeca.
	Transport personen	Openbaar vervoer over water, watertaxi's.

3.3.1 Wateronttrekkingen

Oppervlaktewater wordt onttrokken ten behoeve van onder andere irrigatie en industrie. De impact van klimaatverandering op onttrekkingen voor divers gebruik is vooral gerelateerd aan verminderde beschikbaarheid tijdens droge periodes, onder andere door verdamping, verzilting (Figuur 1) en een hogere verontreinigingsgraad na piekbuien.

3.3.1.1 Irrigatie van voedselgewassen

Er is een toename in watergebruik te verwachten in het stedelijk gebied (38). In delen van (West-)Nederland bevindt de tuinbouw zich binnen de gemeentelijke grenzen van het stedelijke gebied. De tuinbouw heeft een grote vraag naar water. Waar mogelijk wordt hemelwater lokaal, in zowel boven- als ondergrondse bassins, opgeslagen. In tijden van drogere omstandigheden is deze voorraad niet voldoende en wordt de grond- en oppervlaktewater voorraad aangesproken. Stedelijk oppervlaktewater wordt mogelijk ook gebruikt voor beregening van moestuinen en pluktuinen. Bij het gebruik van dit water dient rekening te worden met de kwaliteit van het water (e.g. pathogenen, toxische stoffen).

Klimaatverandering versterkt de achteruitgang van de kwaliteit van het irrigatiewater. Dit komt onder andere door toename van blauwalgenbloei en afnemende verdunning van toxische stoffen (zoals bestrijdingsmiddelen en industriechemicaliën), met name tijdens perioden van langdurige droogte (39). Tijdens natte periodes kan juist de input van pathogenen en microverontreinigingen toenemen (zie Sectie 3.2). In laag-Nederland vermindert verzilting ook de geschikte voorraad water (Figuur 1).

Praktijkvoorbeelden: irrigatie van voedselgewassen

Geïnterviewden in Hoeksche Waard, Amsterdam en Groningen, alsook de deelnemers van de gebruikersbijeenkomsten, geven aan dat grootschalige irrigatie van voedselgewassen met stedelijk oppervlaktewater nauwelijks plaatsvindt. Wel wordt genoemd dat bekend is dat oppervlaktewater wordt gebruikt voor beregening van bijvoorbeeld moestuinen.

3.3.1.2 Irrigatie van overige vegetatie

Oppervlaktewater kan in het stedelijk gebied ingezet worden als irrigatiewater voor bijvoorbeeld siertuinen, en voor jonge aanplant, zoals bomen, bloemperken en hagen in openbare groenvoorzieningen. De vraag naar irrigatiewater stijgt mogelijk als gevolg van klimaatverandering en vanwege de inzet van vergroening als klimaatadaptatiemaatregel.

De impact van klimaatveranderingen op de kwaliteit van irrigatiewater voor niet-voedselgewassen is nog niet duidelijk. Mogelijk leiden in de toekomst droogte en een verslechterde waterkwaliteit tot afnemende waterbeschikbaarheid van voldoende kwaliteit. Zie hiervoor de beschrijving onder "irrigatie voedselgewassen".

Praktijkvoorbeelden: Irrigatie van overige vegetatie

In gemeente Hoeksche Waard worden grassportvelden beregenend met water uit de sloot. In droge zomers ontstaat daar een watertekort. Dat is het gevolg van een combinatie van droogte en een ongunstige plaatsing van de pompen en hoeveelheid water die wordt onttrokken. Ook tuinen in deze gemeente worden beregend met oppervlaktewater door bewoners die daar zelf een pomp in leggen.

In Amsterdam wordt in het kader van klimaatadaptatie ingezet op vergroening. Waterbeheerder Waternet krijgt ook steeds vaker de vraag of oppervlaktewater gebruikt kan worden voor beregening van buurttuinen en pluktuinen. Mogelijk leiden dergelijk initiatieven tot een hogere vraag naar irrigatiewater uit het oppervlaktewatersysteem. Het is echter niet bekend welk water daarvoor aangewend gaat worden. Bekeken wordt in hoeverre hiervoor grachtwater gebruikt kan worden.

Er zijn volkstuinen aanwezig in en rondom Groningen. Men weet niet of oppervlaktewater wordt gebruikt voor het besproeien van de tuinen. Steden zetten steeds meer in op vergroening, enerzijds voor verkoeling en anderzijds als klimaatmitigatiemaatregel.

Uit de gebruikersbijeenkomst volgt dat de verwachting is dat door klimaatverandering problemen met de beschikbaarheid van voldoende (irrigatie)water ontstaat voor stedelijk groen.

3.3.1.3 Proceswater industrie

Oppervlaktewater wordt door de industrie onder andere gebruikt als spoelwater en proceswater (40). Door verzilting als gevolg van klimaatverandering kan deze functie negatief beïnvloed worden. Wanneer de chlorideconcentratie te hoog wordt, moeten in de installaties die het water verwerken andere materialen worden gebruikt die minder gevoelig zijn voor corrosie, en kan een andere voorbehandeling nodig zijn. Dit kan leiden tot hogere productiekosten blijkt uit een literatuurstudie en interviews (41).

Dit risico geldt alleen:

- voor industriële installaties die niet bestand zijn tegen hoge chloridegehalten

- indien gebruik gemaakt wordt van water dat zouter wordt als gevolg van klimaatverandering
- indien de verzilting stijgt tot boven een kritische grens.

Willet (42) hanteert een grenswaarde van 1500 mg Cl⁻/l voor grondwatergebruik door de industrie. Deze waarde is gebaseerd op een classificatie van het zoutgehalte van grondwater. Het is niet bekend wat daadwerkelijk een kritische chlorideconcentratie is voor de industrie.

Praktijkvoorbeelden: Proceswater

Geïnterviewden in Hoeksche Waard, Amsterdam en Groningen zijn niet bekend met problemen voor de industriële watergebruikers als gevolg van verzilting. Dat komt mogelijk doordat Rijkswaterstaat veelal beheerder is van de wateren waaruit de industrie oppervlaktewater onttrekt.

3.3.1.4 Drinkwater

Drinkwater wordt voor ongeveer 60% gewonnen uit grondwater en voor 40% uit oppervlaktewater (43). Drinkwaterwinning uit oppervlaktewater vindt vaak plaats buiten de stad. Er is echter wel interesse bij private partijen om decentraal drinkwater te winnen uit lokaal stedelijk oppervlaktewater (44). Het is niet bekend of dergelijke kleinschalige toepassing daadwerkelijk plaats gaan vinden.

De impact van klimaatverandering op drinkwaterproductie hangt vooral samen met de beschikbaarheid van voldoende water van goede kwaliteit. Problemen zijn te verwachten met verzilting en een hogere verontreinigingsgraad door minder verdunning als gevolg van lagere debieten (43). Voor iedere drinkwaterwinning is een gebiedsdossier opgesteld. In deze dossiers zijn de kenmerken van de winning beschreven en wordt ingezoomd op de kwaliteit van het water. Getoetst wordt aan de geldende drinkwaternormen (zoals het Besluit kwaliteitseisen en monitoring water, Bkmw, 2009⁴, Drinkwaterbesluit⁵, Drinkwaterregeling⁶ en Drinkwaterwet⁷). Wanneer een stof de norm overschrijdt kan dit leiden tot een innamestop. Een belangrijke norm is het chloridegehalte. Zeker in West-Nederland waar verzilting een rol speelt kan een te hoge chlorideconcentratie leiden tot een innamestop. De milieukwaliteitseis vanuit het Bkmw 2009 is gesteld op 150 mg Cl/l.

Praktijkvoorbeelden: Drinkwater

In Amsterdam, Groningen en Hoeksche Waard wordt geen drinkwater geproduceerd met stedelijk oppervlaktewater. Uit de gebruikersbijeenkomst blijkt eveneens dat er in het stedelijk gebied van de deelnemende organisaties momenteel niet of nauwelijks oppervlaktewater wordt ingenomen ten behoeve van de drinkwaterproductie.

⁴ BKMW, 2009: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0027061/2017-01-01>

⁵ Drinkwaterbesluit: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0030111/2018-07-01>

⁶ Drinkwaterregeling: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0030152/2019-06-28>

⁷ Drinkwaterwet: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0026338/2015-07-01>

3.3.2 *Energie*

3.3.2.1 Koelwater voor industrie

Het overgrote deel van het industriële watergebruik betreft gebruik als koelwater⁸ (40). Na gebruik wordt het opgewarmde water weer geloosd op het oppervlaktewater (Figuur 5). Volgens Helpdesk Water neemt de koelcapaciteit af als de watertemperatuur van het ontvangende water meer dan 23 °C is in verband met lozingsbeperkingen.⁹

Klimaatverandering leidt naar verwachting tot een toename van lozingsbeperkingen van koelwater. Dit is het gevolg van hogere temperaturen en een verlaagd debiet van het ontvangende water in droge periodes. Uit een literatuur- en modelstudie van RIZA (45) blijkt dat de impact van lager debiet groter is dan van hogere luchttemperatuur en belasting vanuit het buitenland. In de periode 2031–2060 wordt op basis van een modelstudie verwacht dat in de zomer de gemiddelde afname van capaciteit van elektriciteitscentrales (nucleair en fossiel) 6.3–19% bedraagt in Europa. De kans op extreme beperking van de productie (>90%) zal verdrievoudigen (46). Volgens de Nationale Adaptatiestrategie (NAS) (47) leidt schaarste van koelwater (en/of windstilte) tot stijgende elektriciteitsprijzen op Europese schaal, 'waarschijnlijk in dit decennium' (2010-2020).

Naast lozingsbeperkingen kan klimaatverandering de koelwaterpotentie ook negatief beïnvloeden als gevolg van verzilting van het oppervlaktewater. Verzilting kan in zuidwest Nederland voor 6-14% (1-3 centrales) van de totale energieproductie leiden tot beperkingen. Andere centrales hebben niet te maken verzilting van het water dat zij gebruiken of zijn ingericht op het gebruik van verzilt water (41).



Figuur 5. Inlaatpunt koelwater energiecentrale (Bron: Marc Brink)

⁸ Bron: <https://www.clo.nl/en/node/45771>

⁹ Bron: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/crisismanagement/begrippen/toelichting/watertemperatuur/>

Praktijkvoorbeelden: Koelwater

Geïnterviewden in Hoeksche Waard, Amsterdam en Groningen zijn niet bekend met problemen voor de industriële watergebruikers als gevolg van klimaatverandering. Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor de wateren waar koelwater voor de industrie wordt onttrokken; mogelijk heeft Rijkswaterstaat aanvullende inzichten over dit onderwerp. Wel wordt in het beheergebied van Waterschap Noorderzijlvest "koel" water onttrokken, bijvoorbeeld voor het koelen van servers. Bij hogere watertemperaturen is het de vraag tot welke temperatuur het oppervlaktewater ingenomen kan worden en vervolgens weer geloosd mag worden.

Uit de gebruikersbijeenkomst blijkt dat het gebruik van water om te koelen in toenemende mate aandacht krijgt van het waterschap. De impact van deze functie op de waterkwaliteit, en het versterkende effect van een toenemende watertemperatuur als gevolg van klimaatverandering, is tot nu onderbelicht gebleken.

3.3.2.2 Verwarmen en verkoelen van woningen of utiliteitsbouw

Oppervlaktewater wordt ook gebruikt voor het verwarmen van gebouwen zoals woningen. Hierbij wordt in de zomer warmte onttrokken aan het water en opgeslagen in de ondergrond of het wordt in de winter onttrokken en direct gebruikt. In de winter wordt de warmte gebruikt voor verwarming en warm water. Andersom kan het water ook gebruikt worden om gebouwen te koelen. In het geval van diepe plassen kan het hele jaar door koude worden gewonnen.

Er zijn geen studies gevonden naar de impact van klimaatverandering op deze toepassingen van thermische energie-onttrekking uit oppervlaktewater (TEO) maar dit kan wel beredeneerd worden. De hoeveelheid thermische energie die kan worden onttrokken aan het water is afhankelijk van debiet, de watertemperatuur en het oppervlakte van het waterlichaam (48). Aangezien door klimaatverandering zowel het debiet als de watertemperatuur zullen veranderen, zal er enig effect van klimaatverandering zijn op de potentie voor thermische energie-onttrekking. Met een modelstudie kunnen deze effecten op lokaal niveau gekwantificeerd worden.



Figuur 6. Koud water uit de Nieuwe Meer in Amsterdam wordt gebruikt om gebouwen te koelen. (Bron: Marc Brink)

Praktijkvoorbeelden: Thermische energie

In Hoeksche Waard, Groningen en Amsterdam (Figuur 6) is thermische energie een belangrijk onderdeel van de visie op duurzame energie. In Hoeksche Waard en Amsterdam zijn kaarten beschikbaar met potentieel geschikte locaties. In Groningen wordt de potentie voor warmtewinning vanuit de Oosterparkvijver en de Kardingerplas onderzocht. Oppervlaktewater ten behoeve van koeling van gebouwen speelt daar op dit moment niet.

Het is niet bekend hoe de geschiktheid voor een TEO-lokaal wordt beïnvloed door klimaatverandering. Een geïnterviewde verwacht dat de potentie voor warmtewinning mogelijk groter wordt als gevolg van klimaatverandering omdat de watertemperatuur stijgt. Geïnterviewden in Hoeksche Waard en Amsterdam zien kansen om met behulp van warmtewinning uit oppervlaktewater ongewenste opwarming in de zomer tegen te gaan.

Voor het verwarmen en koelen van gebouwen geldt hetzelfde als voor koelwater in de industrie (Sectie 3.3.1). Uit de gebruikersbijeenkomst blijkt dat deze gebruiksvorm in toenemende mate aandacht heeft van het waterschap. De impact van deze functie op de waterkwaliteit, en het versterkende effect van een toenemende watertemperatuur als gevolg van klimaatverandering, is tot nu onderbelicht gebleken.

3.3.3 Regulering klimaat (lokaal), waterkwaliteit en -kwantiteit

De impact van klimaatverandering op de geschiktheid van oppervlaktewater voor regulering van het lokale klimaat, de waterkwaliteit en -kwantiteit hangt samen met hogere

(water)temperaturen, verzilting en andere waterkwaliteitsproblemen, en sterkere waterpeilschommelingen.

3.3.3.1 Klimaatregulatie – lokaal

De rol van ecosystemen met oppervlaktewater in het stedelijke gebied wordt in de toekomst steeds belangrijker. Wanneer dergelijke systemen, zoals stadsparken, goed worden ingericht ontstaat lokaal een koelere omgeving, verbeterde vochtthuishouding van de lokale atmosfeer en bodem en een verbetering van de water- en luchtkwaliteit (49).

Een groot areaal aan oppervlaktewater kan in verhouding tot een klein areaal openbaar groen (weinig verkoelende schaduwplekken) lokaal een negatieve uitwerking hebben op het dag-nachtritme van de buitentemperatuur. Stedelijk water warmt in de zomer relatief snel op en houdt deze warmte ook lang vast. Dit zorgt voor een stijging van de gemiddelde watertemperatuur en dempt hierdoor het dag-nachtritme van de buitentemperatuur¹⁰. Voor kleine stedelijke waterlichamen, zoals grachten of vijvers, is de invloed op de omgevingstemperatuur vrij beperkt. Jacobs et al. (50) vonden een maximale verkoeling overdag van 0,6 °C, en een verwaarloosbaar opwarmingseffect 's nachts. Wel wordt opgemerkt dat de omgeving van stedelijk water vaak mogelijkheden biedt voor vergroening, en dat het combineren van groene en blauwe maatregelen kan leiden tot een sterker verkoelend effect.

Praktijkvoorbeelden: regulering klimaat

In Hoeksche Waard en Amsterdam ziet men dat oppervlaktewater ook een averechts effect kan hebben op het gewenste lokale klimaat doordat bijvoorbeeld vijvers flink opwarmen waardoor lokaal hogere daggemiddelde temperaturen worden gemeten. De hittestress neemt hier toe.

3.3.3.2 Waterkwaliteit en -kwantiteit

Een voorbeeld van regulering van waterkwaliteit met behulp van oppervlaktewater is het spoelen van watersystemen om verzilting tegen te gaan, of om de algehele waterkwaliteit te verbeteren. Bij het reguleren van de waterkwantiteit kan gedacht worden aan het op peil houden van watergangen ten behoeve van verschillende gebruiksfuncties (e.g. wonen, scheepvaart) door oppervlaktewater uit een ander waterlichaam in te laten.

In droge perioden worden waterpeilen op orde gehouden door de aanvoer van extra oppervlaktewater. Klimaatverandering heeft een versterkend effect op enerzijds een toenemende watervraag en anderzijds een verslechtering van de waterkwaliteit. Extra water is, zoals duidelijk is geworden tijdens de droge zomers van 2018 en 2019, niet altijd voldoende voorhanden of van goede kwaliteit. Wanneer waterpeilen niet op het gewenste peil worden gehouden ontstaat mogelijk schade aan funderingen van gebouwen en andere infrastructurele werken. Doordat het water stilstaat en weinig wordt verversd nemen ook problemen met

¹⁰ Bron: <https://www.tno.nl/media/3960/factsheet-waterrobuuste-steden.pdf>

eutrofiering, blauwalgen, vissterfte en (micro)verontreinigingen toe (16). Dit water wordt dan ook minder geschikt voor ander doeleinden zoals zwemmen en het besproeien van stedelijk groen en volkstuinen. In delen van laag Nederland wordt extra water vanuit de grote rivieren ingelaten om bijvoorbeeld verzilting tegen te gaan¹¹. Dit water, zeker bij lage rivierwaterstanden, is niet altijd van goede kwaliteit (43).

Een ander effect van klimaatverandering is dat er ook perioden zijn met hevige neerslag. Wanneer de riolen het niet meer aankunnen kan wateroverlast op straat ontstaan, en kunnen overstorten in werking treden. Dit heeft eveneens een negatieve impact op gebruiksfuncties en de ecologie. Denk hierbij aan de afspoeling van microverontreinigingen en de toename van pathogenen. Het water wordt hierdoor minder geschikt om in te recreëren. Waterkwaliteitsmetingen uitgevoerd in bijvoorbeeld water in wadi's laten zien dat de (microbiologische) kwaliteit van dit water vaak slecht is (51), terwijl er na een flinke regenbui regelmatig in het stilstaande water wordt gespeeld. Daarnaast zorgen riooloverstorten, wanneer deze in werking treden, voor een tijdelijke verslechtering van de microbiologische waterkwaliteit, en mogelijk voor zuurstofloosheid als gevolg van biologische afbraakprocessen (15). Dit kan betekenen dat er vissterfte optreedt. Zeker voor wateren met een recreatieve functie (wonen aan het water, vissers en vaarrecreatie) heeft dit naast de waterkwaliteit ook gevolgen voor het gebruik.

Een ander knelpunt is dat stedelijke wateren vaak nog onvoldoende ingericht zijn op het vasthouden van water. Overtollig water in grachten en andere watergangen wordt snel afgevoerd. Erosie van oevers en bodem kan eveneens leiden tot schade aan de ecologie en gebruiksfuncties (52, 53).

Praktijkvoorbeelden: Waterkwantiteit versus -kwaliteit

In een aantal kernen binnen de gemeente Hoeksche Waard wordt doorgespoeld met rivierwater om de waterkwaliteit op peil te houden, bijvoorbeeld na riooloverstorten. Daarnaast wordt bij droogte rivierwater ingelaten ten behoeve van peilhandhaving. Dat is nodig om schade aan bebouwing te voorkomen.

Er is altijd voldoende water in de rivier om in te laten, maar als het chloridegehalte hoger is dan 300 mg/l is leidt dit tot ecologische schade in het zoetwatersysteem. Door klimaatverandering zullen de chlorideconcentraties hoger worden en de zouttong zal verder naar binnen komen. Die kan mogelijk helemaal tot aan Dordrecht reiken; dan is het rivierwater (Nieuwe Maas) aan de noordkant van de hele Hoeksche Waard te brak om in te laten. In de zomer van 2018 heeft men om die reden een paar keer de inlaat moeten sluiten bij vloed, wanneer de zouttong naar binnen komt. Bij Oud-Beijerland is de chlorideconcentratie in de Oude Maas dan hoger dan 800 mg/l. In Amsterdam kan de zouttong vanuit het Noordzeekanaal steeds verder landinwaarts reiken op het Amsterdam-Rijkkanaal dat water aanvoert naar het boezemsysteem (grachten en Amstel) van de stad. Dit is schadelijk voor de ecologie in gebieden waar brak water wordt

¹¹ <https://www.uvw.nl/extra-aanvoer-zoet-water-om-verzilting-in-westen-tegen-te-gaan/>

aangevoerd in een zoet milieu. Het water uit het Amsterdam-Rijnkanaal wordt hiermee dus minder geschikt als bronwater ten behoeve van regulering van de waterkwantiteit in de stad. Rijkswaterstaat grijpt in wanneer de chlorideconcentratie bij Diemen hoger is dan 370 mg/l; dan wordt de afvoer verhoogd door meer water in te laten vanuit de Lek.

Praktijkvoorbeelden: Overstorten versus waterkwaliteit

In Groningen wordt onder andere water via het IJsselmeer de boezem ingelaten om de waterpeilen op orde te houden en ten behoeve van de waterkwaliteit. Een voorbeeld hiervan is Oosterparkwijk. Deze wijk kent een aantal vijvers die kwetsbaar zijn. Er ontstaat regelmatig een verslechterde waterkwaliteit door het inwerking treden van riooloverstorten, hierdoor zijn de vijvers bijvoorbeeld gevoelig voor blauwalgen. Met een leiding vanuit de boezem worden de vijvers doorgespoeld.

3.3.4 *Recreatie*

Stedelijk water wordt steeds intensiever gebruikt voor recreatie zoals zwemmen en kanoën, recreatief varen of recreatie aan de waterkant. In deze studie is de impact onderzocht op twee vormen van recreatie waarvoor de meeste impact wordt verwacht van klimaatverandering: zwemmen en vissen.

3.3.4.1 Zwemmen

Zwemmen stelt van de hierboven genoemde recreatievormen de hoogste eisen aan waterkwaliteit. Zwemmen vindt niet alleen plaats in formeel zwemwater maar ook op allerlei andere plekken zoals grachten en kanalen. Onder andere als gevolg van hogere temperaturen wordt er meer gezwommen (54). Toename van waterrecreatie, inclusief zwemmen binnen en buiten daarvoor aangewezen locaties, wordt bevestigd door de geïnterviewden. Er zijn gemeenten die de ambitie hebben dat de waterkwaliteit buiten officiële zwemlocaties voldoet aan de eisen voor zwemwater.



Figuur 7. Zwemmen in de Groenlose gracht (Bron: <http://groenlo.nl/grolse-gracht-in-groenlo>)

Volgens de Nationale Adaptatiestrategie (47) wordt verwacht dat klimaatverandering leidt tot het vaker voorkomen van slechtere zwemwaterkwaliteit. Die verslechtering betreft een toename van concentraties van ziekteverwekkers (pathogenen) afkomstig uit ontlasting zoals *Campylobacter* (bacterie), norovirus en *Cryptosporidium* (parasiet). Voor alle drie wordt een toename verwacht na regenval als gevolg van afspoeling en riooloverstorten (7, 55). Ook is bekend dat watertemperatuur van invloed is op het voorkomen van de veroorzaker van zwemmersjeuk (larven van de parasiet *Trichobilharzia*), met hogere emissies bij hogere watertemperaturen (56). In kustwateren op het noordelijk halfrond zijn toenames in concentraties van *Vibrio* soorten, die onder andere wond- en oorinfecties, en maagdarmklachten kunnen veroorzaken, geobserveerd en gerelateerd aan stijgende watertemperaturen als gevolg van klimaatverandering (57). Projecties laten zien recreatie-gerelateerde risico's door *Vibrio* soorten in Nederland verder kunnen toenemen onder invloed van klimaatverandering (58). Omdat *Vibrio* soorten met name in zout en brak water voorkomen zal dit voor veel stedelijk oppervlaktewater in beperkte mate relevant zijn. Samen met een verwachte toename van de waterrecreatie, doordat het weer vaker geschikt wordt voor recreatie, stijgt het risico op infectieziekten. Dat leidt tot meer maag-darm- en huidklachten (54).

Naast verhoogde input van ziekteverwekkers door afspoeling en riooloverstorten zijn er tegengestelde klimaateffecten waarvan niet is te zeggen welke de overhand heeft. Het gaat om toename of afname van verdunning van reeds aanwezige pathogenen, veranderingen in de seizoensfluctuaties van input vanuit mest en RWZI's, het effect van veranderingen in temperatuur en UV-straling op de inactivatie, groei en sterfte van ziekteverwekkers, invloed van veranderingen in zoutgehalte, nutriënten en chlorofyl op de groei/overlevingscondities van *Vibrio* (een bacteriefamilie die kan reproduceren in een aquatisch milieu)(55, 59). Klimaatverandering kan ook leiden tot een toename van Cyanobacteriën (blauwalg) als gevolg van hogere watertemperaturen, zoals besproken in Sectie 3.2.2.1.

Er wordt in de literatuur niet gesproken over impact van veranderingen in chemische verontreinigingen en fysieke risico's voor zwemmers. Nader onderzoek zou hier meer inzicht in kunnen geven.

Praktijkvoorbeelden: Gevolgen voor recreatie

Geïnterviewden uit Amsterdam voegen een ander klimaateffect toe. Als gevolg van vaker voorkomende droogte zal ook vaker de verblijftijd van water toenemen. Hierdoor blijven verontreinigingen en pathogenen ook langer geconcentreerd. Men veronderstelt dat door de langere verblijftijd en hogere temperatuur ook de belasting van het water met chemische verontreinigingen uit de waterbodem mogelijk toeneemt. Dit zou kunnen spelen in voormalige industriële- en havengebieden zoals in het Johan van Hasselkanaal. Daarnaast leidt de afwisseling van zware buien en droogte in de relatief kleine wateren in het boezemsysteem (grachten en de Amstel) en de polders tot blauwalgproblematiek. Tijdens de natte periode komen er veel nutriënten in het water. Als het daarna een tijd droog is neemt de verblijftijd toe en komen de algen tot bloei. Deze afwisseling van natte en droge periodes neemt naar verwachting toe door klimaatverandering. Het IJ en Noordzeekanaal blijven altijd stromen, daar worden om die reden geen problemen verwacht. In het centrumgebied van Amsterdam leiden overstorten van het gemengde riool 2 tot 10 keer per jaar tot beperkte waterkwaliteit voor zwemmers. Na drie dagen is de waterkwaliteit wat betreft pathogenen weer terug op het normale niveau. In het gebied buiten het centrum ligt een gescheiden rioolstelsel. Op het gescheiden hemelwaterstelsel zitten veel nooduitlaten en foute aansluitingen. Daardoor is er bij iedere flinke bui, 20 tot 30 mm in een etmaal, een kans op verslechtering van de waterkwaliteit voor zwemmers.

In Mijnsheerenland, gemeente Hoeksche Waard, worden nu soms de zwemstranden afgesloten in verband met blauwalgen. Het is niet bekend in hoeverre er in overig stedelijk water in Hoeksche Waard problemen zijn met blauwalgen. Er is in Hoeksche Waard weinig informatie beschikbaar over de daadwerkelijke impact van piekbuien op de hoeveelheid microverontreinigingen en pathogenen in het stedelijke water. Er wordt niet gemonitord nabij overstorten en veel microverontreinigingen en pathogenen zitten niet in het standaard meetpakket. Wel verwacht men dat de verontreiniging toeneemt vanuit afspoeling in stedelijk gebied en landbouwgebied en vanuit het hemelwaterriool. Ook botulisme komt naar verwachting vaker voor als gevolg van een toename van zuurstofloosheid. Deze wordt veroorzaakt door de toename aan kroos, verhoogde bacteriële activiteit, overstorten en een langere verblijftijd van het water. Vanwege waterrecreatie buiten de formele zwemwateren zouden geïnterviewden wellicht willen monitoren op blauwalg en pathogenen in stedelijk water.

De gemeente Groningen verwacht dat er steeds meer gezwommen gaat worden in het stedelijk gebied (o.a. in stadsparken). Op dit moment wordt zwemmen in het stedelijk gebied ontraden, niet alleen omdat het fysiek onveilig is, maar ook omdat de waterkwaliteit te wensen over laat of helemaal niet bekend is. Bij (her)ontwikkeling van gebieden wordt steeds vaker aandacht besteed aan het zwemmen in stedelijk oppervlaktewater, maar dit staat in de kinderschoenen.

3.3.4.2 Vissen

In de toekomst zal gevestigd blijven worden, vooral recreatief. Van beroepsvisserij in het stedelijk gebied is doorgaans geen sprake. In stilstaand water zijn veelal soorten aanwezig die houden van helder water met waterplanten (plantminnende soorten zoals snoek, baars en blankvoorn). Als er geen waterplanten aanwezig zijn is het water is veelal troebeler dan zijn dit soorten die van een slibbige bodem houden (karper en brasem). Deze laatste groep is over het algemeen beter bestand tegen een slechtere waterkwaliteit (o.a. hogere watertemperaturen, blauwalgen en lagere zuurstofconcentraties).



Figuur 8. Vissen in de Groenlose gracht (foto: [Gelderse Hengelsport Vereniging](#))

Zoals besproken in Sectie 3.2.2.3, zijn er vissen die beter gedijen bij een hogere watertemperatuur dan bij een lagere temperatuur. Een verhoogde watertemperatuur kan leiden een verandering van de visgemeenschap, verhoogde groeisnelheden en fenologische afwijkingen (60). Ook zijn er vissen die beter bestand zijn tegen (micro)verontreinigingen dan anderen.

Uit dit onderzoek kunnen geen conclusies worden getrokken over de invloed van klimaatverandering op de aantrekkelijkheid van stedelijk oppervlaktewater voor sportvissers.

Praktijkvoorbeelden: gevolgen voor (sport)visserij

In de Hoeksche Waard verwacht men een toename van karpers omdat dit een warmteminnende soort is. Er wordt veel en steeds meer gevestigd in Amsterdam, met name op karper en brasem. Mogelijk heeft klimaatverandering hier een positieve invloed op via hogere watertemperatuur. In Groningen zijn in verband met opwarmend water al diepere (koelere) plekken aangebracht waar vissen kunnen schuilen.

3.3.5 Gebruik van ruimte op het water

3.3.5.1 Wonen op of aan het water

Wonen op het water (bijvoorbeeld in woonboten) en aan het water blijven ook in de toekomst belangrijke gebruiksfuncties. Deze functies zijn afhankelijk van een stabiele waterhuishouding (ten behoeve van funderingen en rioleringen) en een goede waterkwaliteit zonder muggen-, stank- en blauwalgenoverlast.

Voor zowel wonen op als aan het water kan klimaatverandering een direct effect (schade aan door lagere waterpeilen) maar ook een indirect effect hebben op het woongenot.

Praktijkvoorbeelden: gevolgen voor wonen op het water

Projectontwikkelaars maken in de Hoeksche Waard steeds vaker plannen voor wonen aan water, waarbij de kwaliteit van het watersysteem echter te wensen overlaat. Op diverse plekken in de Hoeksche Waard liggen woonboten zoals in Puttershoek. Binnen het stedelijk gebied van de gemeente Groningen en Amsterdam liggen veel woonboten. Het is niet bekend of de problemen met bijvoorbeeld muggen-, stank- en blauwalgenoverlast als gevolg van klimaatverandering zullen toenemen.

3.3.5.2 Transport

Stedelijk water is onderdeel van transportroutes voor lokaal, nationaal en internationaal transport van goederen en personen (e.g. Figuur 9). Dit betreft veelal transport door de stad of naar de stad. Transport binnen steden, zowel van goederen als bijvoorbeeld openbaar vervoer, is op dit moment beperkt. De vraag hiernaar zal, vooral voor goederentransport, waarschijnlijk toenemen omdat de beschikbare capaciteit van wegverkeer opraakt en gemeentes met vervoer over water invulling willen geven aan hun duurzaamheidsambities (44, 61-63).



Figuur 9. Mokum Maritiem city supplier afvalboot op de Amstel in Amsterdam. (Bron: Suzanne van der Meulen)

In de Nationale Adaptatiestrategie wordt vermeld dat klimaatverandering 'waarschijnlijk in deze eeuw' (tot 2100) leidt tot beperkingen van de scheepvaart (47). Dit is het gevolg van te laag peil tijdens droogte en/of te hoog peil bij piekafvoeren en beperkte afvoer als gevolg van een hoge zeewaterstand. Onderzoek naar deze effecten concentreert zich op grote

binnenvaartwegen in Europa, met name de Rijn. Volgens Jonkeren (64) zullen op de Rijn lage waterstanden waarschijnlijk veel vaker voorkomen dan hoge waterstanden. Een modelstudie voor drie bedrijven die bulktransport verzorgen over de Rijn in Duitsland laat zien dat in de periode 2021–2050 lage waterstanden leiden tot 1-5 extra dagen lege opslag verwacht worden, vooral aan het eind van de zomer/begin van de herfst. Dit leidt tot een toename van de benodigde opslagcapaciteit van 2.5% (65). In een modelstudie voor de Donau en de Rijn (buiten Nederland) worden in de toekomst op drie van de vier onderzochte locaties juist minder laagwaterdagen verwacht maar daarbij gelden grote lokale verschillen en grote onzekerheid (66).

Het is niet bekend wat de impact van klimaatverandering is op de mogelijkheden voor transport over water in stedelijk gebied in Nederland.

Praktijkvoorbeelden: Gevolgen voor transport op water

Geïnterviewden van Amsterdam bevestigen de trend dat het transport over water zal toenemen. Op dit moment zijn er ten aanzien van de waterhuishouding (te hoge of lage waterpeilen) nog geen problemen bekend. Ook de impact van klimaatverandering op deze functie is niet bekend. Binnen de Hoeksche Waard vindt geen transport over water plaats in stedelijk gebied. In Groningen vindt transport vooral plaats over de kanalen; men heeft hier nog niet veel last van belemmeringen door droogte.

4 Effecten van klimaatadaptatiemaatregelen op stedelijke waterkwaliteit

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de impact van klimaatadaptatiemaatregelen op de stedelijke waterkwaliteit. Per maatregel wordt het beoogde doel beschreven, en wordt inzicht geboden in de impact van deze maatregelen op de kwaliteit van het oppervlaktewater.

4.1 Groene daken: sedum, daktuinen of urban agriculture

Groene daken (e.g. Figuur 10) worden steeds vaker toegepast om extra waterberging te creëren, hittestress te verminderen en/of bij te dragen aan de biodiversiteit. Groene daken zijn er in verschillende uitvoeringen, met ieder andere voordelen. Een groen dak kan water bergen door een buffersysteem onder de vegetatie. Dit is vaak een krattensysteem. Het water dat op het dak valt infiltreert door de vegetatielaag heen en kan, middels een overstort, tijdelijk worden opgeslagen op het dak. Op deze manier kan het water vertraagd worden afgevoerd.

Groene daken zijn geïdentificeerd als mogelijke bron van verontreinigingen in het oppervlaktewater. Met name fosfor is aangemerkt als problematisch. Water dat wordt afgevoerd van groene daken kan relatief hoge concentraties van fosfor bevatten (ook in vergelijking met water dat afspoelt van niet-groene daken). Verhoogde fosforconcentraties kunnen veroorzaakt worden door bemesting (67). Dit kan versterkt worden wanneer het dak wordt gebruikt voor agrarische doeleinden met additionele bemesting. Vaker wordt dit probleem veroorzaakt door nutriëntenrijk substraat dat gedurende lange tijd fosfor kan afgeven (68-70). De daadwerkelijke nutriëntenbelasting van het watersysteem hangt wel samen met de capaciteit van een groen dak om water vast te houden (70).



Figuur 10. Een groen dak met verschillende soorten vegetatie (Bron: Arcadis).

4.2 Infiltratievoorzieningen

Er zijn verschillende soorten infiltratievoorzieningen (e.g. Figuur 11). Voorbeelden zijn wadi's of infiltratiestroken. Dit zijn met grind en zand gevulde greppels of sloten, die regenwater zowel kan vasthouden als

infiltreren. Een wadi is beloopbaar, maar niet zwaar belastbaar. Doordat wadi's beplant zijn, passen ze goed in groengebieden en groenstroken. Wadi's zijn goed inzetbaar in gebieden met voldoende infiltratiecapaciteit. Door regenwater tijdens een extreme bui naar een wadi toe te sturen kan, middels vertraagde afvoer door infiltratie, wateroverlast worden voorkomen.

Bioretentie, het proces waarbij verontreinigingen en sediment worden verwijderd uit regenwaterafvoer, wordt toegepast als een instrument om de waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering in stedelijke gebieden te helpen compenseren (37). Vegetatie kan een aanzienlijke invloed hebben op de stikstofverwijdering. Door gebruik te maken van wadi's, kan een grote hoeveelheid van de aanwezige stikstofvracht door de aanwezige planten worden weggevangen (37). Dit proces heet bioretentie. Fosforverwijdering lijkt minder te worden beïnvloed door de aanwezige planten dan stikstof. Het merendeel van de metaal- en koolwaterstofverwijdering in bioretentiecellen wordt toegeschreven aan niet-plantaardige mechanismen (37). Bioretentie-vegetatie heeft voordelen die verder gaan dan hydraulische processen en processen voor het verwijderen van verontreinigende stoffen. Planten leveren een belangrijke bijdrage aan de esthetiek van bioretentie, kunnen de behoefte aan irrigatie en bemesting verminderen, produceren voedsel en / of biomassa, zorgen voor thermische demping van regenwater, en zorgen voor een leefgebied voor dieren (37). Het laatste kan gezondheidsrisico's opleveren afhankelijk van de aanwezige soorten, en het gebruik (e.g. wordt er in de volgelopen wadi's gespeeld).



Figuur 11. Tijdelijke waterberging in het groen (Bron: Arcadis).

Het toepassen van wadi's met een bergingsfunctie of groene infiltratiestroken kan gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit. Een enkel onderzoek (71) laat zien dat groene infiltratiemaatregelen langs wegen een positief effect kunnen hebben op de chloridebelasting van oppervlaktewater veroorzaakt door afspoeling van strooizout. Hier staat wel tegenover dat een deel van het geïnfilterde chloride via deze route in het grondwater terecht zou kunnen komen. Daarnaast kan door het afstromen van regenwater van wegen andere verontreinigingen worden verzameld in de wadi, zoals bijvoorbeeld slijpsel (metalen), oliën en andere verontreinigingen. Onderzoek (72) toont aan dat wadi's verhoogde waarden van koper, lood of zink kunnen hebben, omdat verontreinigingen zich daar ophopen. In de meeste gevallen zijn de zware metalen afkomstig van een duidelijke bron c.q. toepassing.

Lampén et al. (73) vinden dat veel van deze maatregelen ook microbiologische risico's met zich meebrengen, en dat deze vergroot kunnen worden onder invloed van klimaatverandering. Vanwege de waterbergende functie kunnen bijvoorbeeld wadi's onbedoeld gebruikt worden voor waterrecreatie. Waterkwaliteitsmetingen laten zien dat water in wadi's bijna altijd fecaal verontreinigd is, en dus niet geschikt is voor recreatie (74, 75). Een deel van dit risico kan worden opgevangen door er bijvoorbeeld op toe te zien dat er in wadi's geen honden worden uitgelaten, of dat hondenpoep wordt opgeruimd. Ook het aanpakken van foutaansluitingen op de hemelwaterafvoer, die in sommige gevallen tot fecale verontreiniging van water in wadi's kunnen leiden, kan een oplossing zijn. Een groenere inrichting van een wadi kan positieve effecten hebben op waterkwaliteit, maar tegelijkertijd de microbiologische verontreinigingsdruk vergroten door een habitat te creëren voor dieren zoals vogels en ratten (76). Beiden zijn aangemerkt als bron voor ziekteverwekkers in het milieu, zoals *Campylobacter* en *Leptospira* (ratten).

4.3 Waterdoorlatende of waterpasserende bestrating

Door waterdoorlatende en waterpasserende bestrating toe te passen kan, mits er voldoende infiltratiecapaciteit is, (regen)water infiltreren in de bodem op de plek waar het valt. Hierdoor wordt tijdens extreme neerslag water sneller afgevoerd en kan wateroverlast worden voorkomen.

Bij het toepassen van waterpasserende verharding worden vaak kalkhoudende grindmengsels gebruikt om de voegen van de bestrating op te vullen. Het water kan gemakkelijk langs de grindmengsels stromen richting de bodem. Echter, deze grindmengsels zijn niet altijd bestand tegen de belasting die erop wordt uitgeoefend door het verkeer dat er overheen rijdt. Hierdoor kan het grindmengsel vermalen worden en kunnen kalkhoudende materialen infiltreren in de bodem en het grondwatersysteem.

Vaak wordt bij het toepassen van deze bestrating ook gekozen om een bufferlaag van grover gesteente aan te leggen onder de bestrating. Het water kan dan tijdelijk worden opgeslagen in deze bufferlaag, zodat het water vertraagd kan worden afgevoerd. Het is belangrijk om bij de

materiaalkeuze van het gesteente in de bufferlaag rekening te houden met de invloed op de kwaliteit van het grondwater.

Bij toepassing van waterpasserende/waterdoorlatende verharding op intensief gebruikte wegoppervlakken kunnen vervuilingsrisico's ontstaan door het afstromen van vervuild regenwater.¹²

4.4 Vergroenen van de stedelijke omgeving

Door klimaatverandering zullen tropische temperaturen vaker voor komen in de toekomst. Zeker in versteende binnensteden zal dit kunnen leiden tot hittestress door het stedelijk hitte-eilandeffect. Steeds meer gemeenten zijn zich bewust van de gevolgen van hittestress, zoals verminderde arbeidsproductiviteit maar ook hogere sterfte onder ouderen tijdens hittegolven. Daarom worden versteende gebieden meer en meer vergroend.

Naast de genoemde mogelijke effecten van groene daken en wadi's, kan ook ander stedelijk groen de waterkwaliteit beïnvloeden. Hoewel groene adaptatiemaatregelen een belangrijke bijdrage kun leveren aan het verbeteren van de waterkwaliteit, kan groen ook een bron van nutriënten zijn. Een aantal onderzoeken wijzen bijvoorbeeld uit dat bomen een grote bron kunnen zijn van fosfor in het stedelijk watersysteem, vanwege het afvallen en vergaan van bladeren (77, 78). Relatief eenvoudige interventies zoals het regelmatig opvegen van afgevallen blad kan een deel van deze potentiële nutriëntenbelasting opvangen (77). Ook de plaatsing van de bomen speelt een rol in de uiteindelijke impact; bomen die langs wegen staan kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan de nutriëntenvervuiling van afstromend regenwater omdat bladafval gemakkelijk van het wegoppervlak kan afspoelen en zo in het rioolstelsel terecht komt (78). Gebruikers geven ook aan dat bomen langs watergangen problemen kunnen opleveren vanwege bladinvall. Baggeren is hiervoor doorgaans een oplossing, maar door plaatsing van bomen en het type boom ook in overweging te nemen kunnen een deel van de problemen voorkomen worden.

Het belangrijk om te beseffen dat het aanleggen van extra vegetatie in de bebouwde omgeving extra druk kan leggen op de watervraag, zeker in perioden van droogte. Het is mogelijk om groene daken zelfvoorzienend te maken wat betreft bewatering, door water langer op te slaan in de bufferlaag. Het is hierbij wel belangrijk om de hoeveelheid water die geborgen kan worden af te stemmen op plantsoorten en vice versa, omdat deze een verschillende watervraag kunnen hebben.

4.5 Afstroming en berging van regenwater op wegen

Het wegdek wordt weer steeds vaker gezien als extra oppervlak om regenwater tijdelijk te bergen. Zo wordt water bijvoorbeeld geborgen op straat tussen de trottoirbanden, en worden (mol)goten en holle wegen steeds vaker toegepast. Dergelijke maatregelen kunnen (schade door) wateroverlast beperken. Ze kunnen de kwaliteit van het afgevoerde water

¹² <https://nl.urbangreenbluegrids.com/measures/porous-paving-materials/>

wel beïnvloeden. Door het water langer op het wegdek af te laten stromen, te bergen en te verzamelen kunnen allerlei verontreinigen worden verzameld, zoals bijvoorbeeld (zware) metalen en oliën, maar ook nutriënten of strooizout. Deze verontreinigingen kunnen dan via infiltratie, hemelwaterafvoer, of overstorten van gemengde riolering in het (oppervlakte)watersysteem komen. Alternatieve maatregelen, zoals bijvoorbeeld het vergroten van het rioolstelsel, kunnen echter ook negatieve gevolgen hebben voor de waterkwaliteit. In grotere riolen zijn de stroomsnelheden gemiddeld lager waardoor vuil zich gemakkelijker ophoopt. In het geval van overstorten zal de vervuilingdruk dan groter zijn in vergelijking met een situatie met kleinere riolen waarin aanvullend waterberging op straat plaats vindt.



Figuur 12. Oppervlakkige verzameling en -afstroming van hemelwater middels molgoten. (Bron: Arcadis)

4.6 Afkoppelen van gemengde riolering

Om wateroverlast te verminderen worden wegen en trottoirs afgekoppeld van het rioolstelsel. Door het afkoppelen komt er minder hemelwater in de riolering. Het regenwater wordt na het afkoppelen in de bodem geïnfiltreerd of afgevoerd richting het oppervlaktewatersysteem. Door het afkoppelen kan de capaciteit van de riolering bij regenbuien efficiënter worden gebruikt. Dit kan een positief effect hebben op waterkwaliteit, bijvoorbeeld doordat de rioolcapaciteit minder vaak overschreden wordt en er daardoor minder vaak overstorten zullen optreden, of doordat er meer hemelwater op het oppervlaktewater wordt aangevoerd wat de doorspoeling kan verbeteren. Tegelijkertijd kan dit aangevoerde water verontreinigen bevatten, zoals bijvoorbeeld besproken voor microverontreinigingen (Sectie 3.2.1.1), en kunnen microbiologische risico's geïntroduceerd worden door foutaansluitingen (79).

5 Oplossingsrichtingen

In dit hoofdstuk worden oplossingen en denkrichtingen uiteengezet die nu al worden toegepast om waterkwaliteit te verbeteren. Deze maatregelen komen voort uit de literatuurstudie, de gebruikersbijeenkomsten en interviews, die in het kader van dit rapport zijn uitgevoerd.

Er zijn veel mogelijke maatregelen om een goede waterkwaliteit te kunnen borgen of om juist om te gaan met een veranderende waterkwaliteit. Een aantal van deze maatregelen zijn ter indicatie opgenomen in Tabel 2. De maatregelen zijn ingedeeld in drie categorieën: preventie, adaptatie en acceptatie. Met preventieve maatregelen kan worden voorkomen dat de waterkwaliteit verslechterd. Het is ook mogelijk adaptief maatregelen te nemen. Met deze maatregelen wordt het probleem niet voorkomen, maar kan het wel effectief beperkt worden en zal deze minder erg zijn dan in een situatie zonder maatregelen. Hierdoor kunnen ook kansen ontstaan voor nieuwe technieken om het water veilig te gebruiken.

In de volgende secties worden een aantal voorbeelden besproken die al zijn toegepast in de werkgebieden van de case-partners.

Tabel 2 Overzicht met voorbeelden van preventie-, adaptatie-, en acceptatie maatregelen die genomen kunnen worden ten behoeve van de waterkwaliteit.

Voorbeelden van maatregelen ten behoeve van de waterkwaliteit

Verandering	Gebruikers	Preventie	Adaptatie	Acceptatie
<i>Verziltning door kwel en/of zeespiegelstijging</i>	Irrigatie Ecologie Drinkwater	Waterpeil hoger houden	Watersysteem meer doorspoelen; bubble barrier Ontziltinstallatie inzetten	Zilte landbouw Brakwater ecologie -
<i>Zuurstofloosheid</i>	Ecologie	Aanbrengen natuurlijke(re) gradiënten met koele diepe plekken; Geen overstorten in stedelijk water; Verlagen organische belasting	Watersysteem meer doorspoelen; Beluchten; Droogleggen waterpartij	Vissterfte toestaan
<i>Micro-verontreinigingen door afstroming</i>	Ecologie Drinkwater Zwemwater Irrigatie	Water filteren voor afstroming	Watersysteem meer doorspoelen	Opladen systeem
<i>Toename mineralisatie</i>	Ecologie	Baggeren waterpartijen	Watersysteem meer doorspoelen; Droogleggen waterlichaam	Eutrofiëring

Verandering	Gebruiker	Preventie	Adaptatie	Acceptatie
<i>Kroosvorming</i>	Ecologie	Terugbrengen nutriëntenbelasting	Watersysteem meer doorspoelen	Oogsten voor consumptie; non-food toepassingen zoals biocomposiet
<i>Blauwalgen</i>	Ecologie	Terugbrengen nutriëntenbelasting	Watersysteem meer doorspoelen	Blauwalg dominant systeem
	Zwemwater Irrigatie	Doorstroming verbeteren	Symptoombestrijding	Vaker negatief zwemadvies
<i>Eutrofiering</i>	Ecologie	Baggeren; Terugbrengen nutriëntenbelasting	Watersysteem meer doorspoelen	Eutroof aquatisch systeem accepteren
<i>Muggen</i>	Ecologie	Droogleggen waterpartij; beperken broedplaatsen	-	Muggenoverlast
<i>Exoten</i>	Ecologie	-	Uitzetten predatoren	Exoten oogsten voor consumptie of non-food toepassingen zoals biocomposiet; Meer voorlichting
<i>Stijgende watertemperatuur</i>	Ecologie	Verdiepen ondiep water	Schaduw toevoegen rond waterlichaam; warmteonttrekking voor WKO	Soorten die alleen gedijen bij hoge temperaturen
<i>Meer nutriënten door vergroening</i>	Ecologie	Water infiltreren in bodem i.p.v. afstromen over oppervlakte; Minder meststoffen gebruiken	Introductie meer droogteresistente soorten	Eutrofiëring
<i>Toename riooloverstorten: organische stoffen en nutriëntenbelasting</i>	Ecologie	Afkoppelen rioolsystemen	Bergingszakken of filters plaatsen bij overstort	Eutrofiëring en zuurstofgebrek accepteren; Communicatie over risico's
	Zwemwater			
<i>Meer afstroming verontreinigingen door afkoppelen hemelwater</i>	Ecologie	Bioretentie in bijv. Wadi's; Hemelwater infiltreren	Verdunnen verontreinigingen door doorspoelen watersysteem; Afkoppelen/scheiden rioolsystemen	Opladen van systeem
<i>Droogvallen van waterlichamen</i>	Ecologie Drinkwater Zwemwater Irrigatie	Waterpartijen verbinden	Watersysteem meer doorspoelen	Accepteren dat watergangen soms droog liggen
<i>Verstoring ecologie door gebiedsvreemd water</i>	Ecologie	Kiezen voor inlaat met lage belasting	Watersysteem meer doorspoelen	Aangepaste aquatische flora en fauna
<i>Toename pathogenen (e.g. door afstroming en riooloverstorten)</i>	Irrigatie	Bron aanpakken/omleiden; Afkoppelen rioolsystemen; Terugbrengen nutriëntenbelasting; Doorstroming verbeteren	-	Monitoring en modellering; voorspelling- en waarschuwingssystemen; Communicatie over risico's
	Zwemwater			

5.1 Inlaten van (gebiedsvreemd) water in perioden van droogte

In een periode met droogte kunnen waterlichamen droogvallen. Om dit te voorkomen wordt vaak extra water ingelaten van externe watersystemen. Dit gebiedsvreemde water heeft andere eigenschappen dan het oorspronkelijke water en dat kan nadelige gevolgen hebben. Zo wordt er soms gebiedsvreemd water ingelaten ook als dat zouter is. De gevolgen hiervan zijn niet goed in beeld, want er is niet altijd monitoring. Vaak heeft het in stand houden van het waterpeil prioriteit over ecologie. Het inlaten van dit water gebeurt op sommige locaties nu enkele malen in de zomer, waardoor aangenomen wordt dat het effect op de ecologie beperkt is. Wanneer dit in de toekomst frequenter moet worden toegepast, zal er gezocht moeten worden naar meer structurele oplossingen. Zoals bijvoorbeeld de afhankelijkheid van rivierwater op kwetsbare plekken verminderen door het vasthouden van hemelwater. Hier moet dan een buffersysteem worden aangelegd waarin het hemelwater lang genoeg kan worden opgeslagen om het in droge periodes weer te kunnen gebruiken.

5.2 Bergingszakken

Een bergingszak (ook wel vuilfuik) is voorbeeld van een vuilemissiereducerende randvoorziening voor rioolstelsels, die achter de overstort geplaatst wordt. Het filter hangt aan de overstortrand. Als het riool overloopt, dan stroomt het rioolwater via de bergingszak in het oppervlaktewater. Het drukverschil zorgt ervoor dat het afvalwater door het filter geperst wordt. Het afvalwater wordt op die manier gefilterd en het achterblijvende afval verzamelt zich in de teen van het filter. Daardoor raakt het filter niet verstopt. Mocht het filter onverhoopt toch te veel weerstand geven, dan kan het afvalwater langs het filter stromen via de bypass. De hydraulische weerstand zal daardoor nooit toenemen en daarmee geen risico vormen voor 'water op straat'. Deze voorziening voorkomt met name zichtbare vervuiling van het oppervlaktewater, zoals plastics of wc-papier, en heeft daarmee ook een positief op de beleving van het water. Het is toepasbaar voor lozingen vanuit zowel gescheiden als gemengde stelsels. In Groningen zijn deze zakken al een tijd in gebruik. De zakken hebben hier een positief effect, omdat er veel overstortwater wordt opgevangen in plaats van direct afgevoerd.

5.3 Schaduw creëren nabij waterpartijen

Een maatregel om toename van watertemperatuur tijdens warme dagen te verminderen is het creëren van extra schaduw rondom de waterpartijen. Dit kan worden gedaan door bomen aan te planten of met abiotische maatregelen zoals schaduwdoeken. Doordat het waterlichaam minder opwarmt in de schaduw zal de zuurstofafname beperkt blijven en kan vissterfte worden voorkomen. Dergelijke maatregelen kunnen bovendien bijdrage aan het verlagen van de omgevingstemperatuur. Bij plaatsing van groen in nabijheid van water is het belangrijk om rekening te houden met mogelijke risico's, zoals een toename in nutriëntenbelasting veroorzaakt door bladval (Sectie 4.4), of microbiologische risico's (Sectie 4.1).

5.4 Helofytenfilters

In de gemeente Groningen en Amsterdam worden helofytenfilters (Figuur 13) of rietzand filters toegepast. Kort gezegd is dit een plantenfilter met lagen zand, grint en schelpen, waar het vervuilde water langzaam door naar beneden zakt. De grootte van dit systeem hangt af van de hoeveelheid water dat gezuiverd moet worden. Boven op het filter groeien moerasplanten (helofyten). De wortels van deze planten nemen een groot deel van de zuivering tot hun rekening.

Er bestaan drie verschillende varianten helofytenfilters:

1. *Verticaal doorstromend helofytenfilter*, voor zwaar vervuild water.
2. *Horizontaal doorstromend helofytenfilter*, voor licht tot matig vervuild water.
3. *Vloeveld*, voor grote hoeveelheden licht vervuild water.



Figuur 13. Helofytenfilters in De Leemvallei, Leek (Bron: Arcadis).

5.5 Baggeren/verdiepen van ondiepe waterpartijen

Het baggeren van ondiepe waterpartijen kan bijdragen aan een verbetering van de waterkwaliteit. Door een waterpartij te verdiepen en meer water toe te laten, warmt het waterlichaam minder makkelijk op tijdens warme dagen. Hierdoor wordt de zuurstofopname van het water minder gehinderd door de hitte en kan vissterfte en stank worden voorkomen.

Ook bevat de bagger op de bodem van een waterlichaam soms veel nutriënten. Deze komen vanuit de bagger langzaam in het water terecht. Zo kan bagger een bijna onuitputtelijke voedingsbron zijn voor bijvoorbeeld (blauw)algen. Door te baggeren wordt een deel van de voedingsstoffen weggehaald en mogelijk blauwalg voorkomen.

5.6 Acceptatie en bewustzijn

Naast het nemen van preventie- of adaptatiemaatregelen om de waterkwaliteit te verbeteren, kan het accepteren van een (tijdelijk) verslechterde waterkwaliteit of een verschuiving van soorten in flora en fauna ook als maatregel worden gezien. Daarbij speelt het creëren en vergroten van bewustzijn van de verschillende gebruikers een belangrijke rol. Het kan bijvoorbeeld gaan om het vergroten van het bewustzijn op niet-officiële zwemlocaties van de risico's en gevolgen van ziekteverwekkers in het water. In dat geval kunnen mensen zelf de afweging maken om al dan niet te gaan zwemmen. Een dergelijke strategie kan bijvoorbeeld helpen om de infectierisico's van overstorten te beperken. Soms kan een probleem niet structureel worden opgelost. In dat geval kan het nodig zijn om te accepteren dat een zwemlocatie bijvoorbeeld (vaker) tijdelijk buiten gebruik is door een toename in de frequentie van algengroei in de zomer door klimaatverandering.

Een ander voorbeeld is de toenemende verzilting in het oppervlaktewater in kustgebieden. Het is mogelijk allerlei maatregelen te treffen om dit tegen te gaan, maar een andere oplossing is het bewust maken van de gebruikers, in dit geval agrariërs, en omgaan met het zoutere water. Bijvoorbeeld door over te stappen op zilte landbouw (80).

Om bewustzijn te vergroten is het belangrijk duidelijk te communiceren met de gebruikers. Het opzetten van kaartportalen, zoals de Klimateffectatlas, kan hierbij helpen. Daarnaast weten bewoners vaak niet waar sommige (klimaat)maatregelen voor dienen. In Hoeksche Waard wisten de bewoners bijvoorbeeld niet dat de plas water, een zogenaamde vijver, in hun buurt eigenlijk een wadi was, een tijdelijk buffer voor hemelwater. Het vergroten van bewustzijn kan niet alleen bijdragen aan acceptatie van dergelijke maatregel, maar kan ook ongewenst gebruik, zoals recreëren in een volgelopen wadi, voorkomen.

6 Synthese en aanbevelingen

6.1 Synthese en kernboodschappen

Het klimaat is van invloed op het functioneren van aquatische systemen in de stad. Klimaatverandering leidt in toenemende mate tot veranderingen in het watersysteem, en het gebruik van water, die van invloed zijn op de ecologische en gebruikskwaliteit. Er is een breed spectrum aan effecten in kaart gebracht. Vaak ontstaan deze effecten door een samenspel van factoren. Klimaatadaptatiemaatregelen kunnen de waterkwaliteit ook beïnvloeden. Hoewel de effecten van klimaatverandering landelijk zullen optreden, blijkt uit de samenwerking met gebruikers duidelijk dat het per gebied verschilt wat de belangrijkste problemen zijn of worden. Deze rapportage kan dienen als startpunt om dit lokaal en regionaal in kaart te brengen.

Klimaatverandering en -adaptatiemaatregelen leiden tot veranderingen in het watersysteem die van invloed zijn op de kwaliteit van stedelijk water. Klimaatverandering vergroot de vervuilingdruk op stedelijk water. Een belangrijk effect dat in een groot deel van het land wordt geobserveerd is bijvoorbeeld de door opwarming gestimuleerde toename in interne fosfor- en stikstofbelasting. Deze problematiek kan onbedoeld vergroot worden door aanvullende nutriëntenbelasting van stedelijk groen. Deze effecten hebben vaak zowel gevolgen voor ecologische als gebruiksfuncties. Zo kan een hogere nutriëntenbelasting, in combinatie met hogere temperaturen en veranderende neerslagpatronen, leiden tot het vaker voorkomen van bloei van schadelijk blauwalgen. Dit heeft verdere ecologische effecten, maar is ook een risico voor het gebruik van water voor recreatie of irrigatie van (voedsel)gewassen. De beschikbaarheid van water voor irrigatie van stedelijk groen kan bijvoorbeeld ook beperkt worden door toenemende droogte of verzilting. En voor zwemmers kan het risico op gezondheidsklachten toenemen door de soms verwachte toename van aanwezigheid van ziekteverwekkende bacteriën en virussen.

Voor sommige functies of klimaateffecten is nog niet in kaart gebracht of en hoe de kwaliteit van het water wordt beïnvloed.

Er zijn bijvoorbeeld nog vragen over de impact van piekbuien en langere verblijftijden, in droge periodes, op het afstromen en/of vrijkomen van microverontreinigingen. Het is niet bekend wat dit betekent voor de ecologie. Ook is onduidelijk wat het totaaleffect is van veranderingen in watertemperatuur en debiet op de potentie voor thermische energie-onttrekking voor het verkoelen en verwarmen van woningen. Daarnaast is nog onvoldoende onderzocht wat het effect is van thermische energiewinning op het aquatische milieu. De toename van ziekteverwekkers in water heeft mogelijk niet alleen impact op de geschiktheid voor waterrecreatie maar ook de veiligheid van irrigatie van voedselgewassen. In verschillende steden worden voormalige industrie- en havengebieden getransformeerd tot woonwijken. Er zijn vragen over de impact van langere verblijftijden, in droge periodes, op het vrijkomen

van chemische verontreinigingen uit de waterbodem. Het is niet bekend wat dit betekent voor de gezondheidsrisico's van zwemmen.

Naast de waterkwaliteit kan ook het gebruik van het water door klimaatverandering en -adaptatiemaatregelen veranderen. Dit kan gevolgen hebben voor de maatschappelijke impact van veranderingen in het watersysteem. Mede door de warmere zomers wordt er steeds meer gerecreëerd in en op het water. Waterbeheerders zien dat er ook buiten formele zwemlocaties steeds meer gezwommen wordt. De combinatie van lokale achteruitgang van de waterkwaliteit en een toename van recreatie leidt tot toenemende gezondheidsrisico's. In het kader van klimaatadaptatie hebben veel gemeentes plannen voor vergroening van het stedelijk gebied. Mogelijk leidt dit tot een toename van de vraag naar irrigatiewater. Het is echter niet bekend of hier dan oppervlaktewater voor wordt gebruikt.

Kennis over de impact van klimaatverandering op kwaliteit van water komt vooral uit nationale en internationale studies die niet (specifiek) gericht zijn op stedelijk water. De interviews illustreren dat inzichten uit die studies niet één op één te vertalen zijn naar daadwerkelijke impact in stedelijke gebieden. Ten eerste zijn er verschillen tussen gebieden en zelfs binnen gebieden in de kwetsbaarheid van stedelijk water voor klimaatverandering. Verzilting is bijvoorbeeld niet in heel Nederland aan de orde, en temperatuurstijgingen hebben meer invloed op kleine dan op grote wateren. Daarnaast verschilt stedelijk water in sommige opzichten van de wateren die zijn onderzocht in landelijke of internationale studies. Zo worden voor de grote rivieren toenemende transportbeperkingen voorspeld als gevolg te lage of te hoge waterstanden terwijl geïnterviewde lokale waterbeheerders dergelijke problemen niet verwachten in hun stedelijk gebied. Onderzoek naar de impact van klimaatverandering op zwemwater is toegespitst op formeel zwemwater. Stadsgrachten of andere stedelijke oppervlaktewateren kennen echter andere of aanvullende risico's voor zwemmers die mogelijk ook beïnvloed worden door klimaatverandering.

6.2 Aanbevelingen

Dit rapport kan gebruikt worden om potentiële effecten van klimaatverandering en klimaatadaptatiemaatregelen op waterkwaliteit voor een specifiek stedelijk gebied te identificeren. Tegelijkertijd zijn er nog veel openstaande vragen, en is vervolgonderzoek nodig. In deze paragraaf zijn aanbevelingen geformuleerd voor regionale en lokale overheden (waterschappen en gemeenten) voor het toepassen van de uitkomsten en voor vervolgonderzoek.

6.2.1 *Aanbevelingen aan regionale en lokale overheden*

1. *Voer een regionale scan uit van relevante klimaateffecten op waterkwaliteit.* Dit rapport biedt een eerste verkenning van de impact van klimaatverandering op de ecologie en gebruikskwaliteit van stedelijk oppervlaktewater. Deze generieke inzichten kunnen gebruikt worden om op regionaal of lokaal niveau een scan uit te voeren naar effecten die daar mogelijk van belang zijn. Deze scan biedt een waterbeheerder de

mogelijkheid om effecten, die gerelateerd zijn aan klimaatverandering, systematisch in kaart te brengen. Daarnaast kan de scan ook worden ingezet om de toekomstige effecten van klimaatveranderingen verder uit te werken.

De scan of verkenning kan daarnaast onderdeel uitmaken van een bredere klimaatstresstest. De effecten die met standaard klimaatstresstesten in kaart worden gebracht, zoals wateroverlast of hitte, zijn vaak relevant met betrekking tot de stedelijke waterkwaliteit. Daarnaast hebben maatregelen om deze effecten tegen te gaan, en die volgen uit een klimaatstresstest, vaak ook invloed op de waterkwaliteit. Het koppelen van een regionale scan aan een bredere klimaatstresstest helpt waterschappen en gemeenten om waterkwaliteit integraal mee te nemen in het ontwikkelen van klimaatadaptatiebeleid. Vanwege het meenemen van gebruikskwaliteit in dit onderzoek kan ook rekening gehouden worden met te verwachten toekomstige gebruiksfuncties van stedelijk oppervlaktewater. Risico's voor of door (veranderend) gebruik van stedelijk water kunnen hierbij eveneens ruimtelijk in kaart worden gebracht.

2. Onderzoek lokale effecten, rekening houdend met verschillen in kwetsbaarheid en ambities. De scan kan als basis dienen voor gericht onderzoek naar specifieke effecten binnen een gebied, of naar de kwetsbaarheid van specifieke locaties voor veranderingen in ecologie en gebruikskwaliteit. Verschillende gebruikers hebben aangegeven dat er in het kader van klimaatverandering behoefte is aan verbeterd kwantitatief inzicht in lokale waterkwaliteit. Dergelijke informatie is vaak niet beschikbaar vanuit de wetenschappelijke literatuur en moet dus lokaal onderzocht worden. Het gaat bijvoorbeeld om monitoring van microverontreinigingen, of het in kaart brengen van microbiologische waterkwaliteit op niet-officiële zwemlocaties. De scan, eventueel als onderdeel van een klimaatstresstest, helpt bij het prioriteren van de te onderzoeken effecten of locaties. Het is raadzaam om samen te werken met Rijkswaterstaat voor de grote wateren die door of langs stedelijk gebied lopen.

3. Deel kennis en ervaring

Uit de interviews en gebruikersbijeenkomsten blijkt dat bij veel gemeenten en waterschappen dezelfde vragen leven over waterkwaliteit in relatie tot klimaatverandering en -adaptatiemaatregelen. Enkele waterbeheerders zijn al onderzoek gestart naar de lokale veranderingen in waterkwaliteit. Wij adviseren om deze voorbeelden toegankelijk te maken voor andere waterbeheerders via het Kennisportaal Klimaatadaptatie, en om activiteiten te organiseren waarin kennis en ervaring actief worden gedeeld. Het thema stedelijk water en klimaatadaptatie raakt aan verschillende delen van de organisatie van gemeenten en waterschappen. Er zijn naast deze gebruikers vaak ook andere partijen, zoals waterbedrijven of sportverenigingen, met belangen. Wij adviseren om kennisdeling en samenwerking binnen, en tussen organisaties te versterken.

6.2.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

1. Vergroot kennis over effecten op specifieke gebruiksfuncties in stedelijke context. Naast het in kaart brengen van lokale effecten bestaan er ook bredere kennishiaten. Deze vragen betreffen vooral de impact van klimaatverandering op gebruikskwaliteit van stedelijk water. In samenwerking met andere waterbeheerders en onderzoekers kan kennis worden ontwikkeld over gebruiksfuncties van stedelijk oppervlaktewater waarvoor klimaateffecten onvoldoende in beeld zijn:

- Impact van verzilting, toename microverontreinigingen en pathogenen op de kwaliteit van irrigatiewater voor voedselgewassen en ander stedelijk groen.
- Impact van veranderingen in hydrologie en watertemperatuur op potentie voor thermische energiewinning uit oppervlaktewater.
- De zwemwaterkwaliteit buiten de officiële zwemplekken is, afgezien van evenementen, niet of nauwelijks in beeld. Lokale impact van klimaatverandering op risico's voor zwemmers zijn daardoor ook moeilijk vast te stellen, ook voor andere risico's dan die van pathogenen en blauwalgen.
- Impact van veranderingen in visgemeenschap, -samenstelling en -biomassa op sportvisserij. Het is niet bekend of deze verandering door vissers als positief of negatief wordt ervaren.
- Impact van klimaatverandering op mogelijkheden voor transport over water in stedelijk gebied.

2. Vergroot kennis over toepassen van adaptatiemaatregelen

Zoals beschreven in dit rapport is van verschillende maatregelen bekend dat deze van invloed zijn op stedelijke waterkwaliteit. De genoemde klimaatadaptatiemaatregelen worden meestal niet ingezet ten behoeve van de waterkwaliteit. Hoewel er nu al rekening wordt gehouden met bepaalde effecten van waterkwaliteit, geven waterbeheerders en stedelijke planners aan dat er nog steeds onvoldoende praktisch toepasbare kennis is over de impact van ontwerp- en beheerkeuzes bij klimaatadaptatiemaatregelen op waterkwaliteit. Extra onderzoek is bijvoorbeeld nodig voor het in kaart brengen van effectieve maatregelen waarbij negatieve effecten van klimaatmaatregelen op waterkwaliteit zoveel mogelijk beperkt blijven.

Dankwoord

De auteurs bedanken Jeroen Hoogenraad (Arcadis) voor het maken van de visualisaties van de resultaten voor de themapagina stedelijk water op het Kennisportaal Klimaatadaptatie. We bedanken tevens alle gebruikers, met name onze case-partners (Gemeente Amsterdam en Waternet, Gemeente Groningen en Waterschap Noorderzijlvest, en Gemeente Hoeksche Waard en Waterschap Hollandse Delta), die via deelname aan interviews, gebruikersbijeenkomsten, en/of door het leveren van inhoudelijke feedback op de eindproducten een bijdrage hebben geleverd aan dit onderzoek. Ten slotte bedanken we Menno van Bijsterveld en Anna Stolk (Stiching CAS) voor het inrichten van de themapagina stedelijk water op het Kennisportaal Klimaatadaptatie, en voor het opstellen van de webteksten op basis van dit rapport.

7 Referenties

1. United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2020. Nairobi: UNEP; 2020.
2. Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*. 2004;427(6972):332-6.
3. Junk J, Goergen K, Krein A. Future heat waves in different european capitals based on climate change indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(20).
4. Russo S, Sillmann J, Fischer EM. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*. 2015;10(12):124003.
5. KNMI. KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. De Bilt: KNMI; 2014.
6. Jeppesen E, Kronvang B, Meerhoff M, Søndergaard M, Hansen KM, Andersen HE, et al. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *J Environ Qual*. 2009;38(5):1930-41.
7. Sterk A, de Man H, Schijven JF, de Nijs T, de Roda Husman AM. Climate change impact on infection risks during bathing downstream of sewage emissions from CSOs or WWTPs. *Water Research*. 2016;105:11-21.
8. Hellman F, Vermaat J. Het effect van klimaatverandering op de waterhuishouding en nutriëntenstromen in veenweidepolders. *H twee O : tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*. 2011;44(3):25-8.
9. Haasnoot M, Kwadijk J, van Alphen J, Le Bars D, van den Hurk B, Diermanse F, et al. Adaptation to uncertain sea-level rise; how uncertainty in Antarctic mass-loss impacts the coastal adaptation strategy of the Netherlands. *Environmental Research Letters*. 2020;15(3):034007.
10. Sun N, Yearsley J, Baptiste M, Cao Q, Lettenmaier DP, Nijssen B. A spatially distributed model for assessment of the effects of changing land use and climate on urban stream quality. *Hydrological Processes*. 2016;30(25):4779-98.
11. Mahbub P, Goonetilleke A, Ayoko GA, Egodawatta P. Effects of climate change on the wash-off of volatile organic compounds from urban roads. *Science of the Total Environment*. 2011;409(19):3934-42.
12. de Nijs ACM, Driesprong A, den Hollander HA, de Poorter LRM, Verweij WHJ, Vonk JA, et al. Risico's van toxische stoffen in de Nederlandse oppervlaktewateren Bilthoven: RIVM; 2008.
13. Gooré Bi E, Monette F, Gasperi J. Analysis of the influence of rainfall variables on urban effluents concentrations and fluxes in wet weather. *Journal of Hydrology*. 2015;523:320-32.
14. Sand-Jensen KAJ, Pedersen NL, Søndergaard M. Bacterial metabolism in small temperate streams under contemporary and future climates. *Freshwater Biology*. 2007;52(12):2340-53.
15. Moss B, Kosten S, Meerhoff M, Battarbee RW, Jeppesen E, Mazzeo N, et al. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*. 2011;1(2):101-5.

16. Kosten S, Schep S, van Weeren BJ. Een frisse blik op warmer water: Over de invloed van klimaatverandering op de aquatische ecologie en hoe je de negatieve effecten kunt tegengaan. Amersfoort: STOWA; 2011.
17. Boers PCM. Studying the phosphorus release from the Loosdrecht Lakes sediments, using a continuous flow system. *Hydrobiological Bulletin*. 1986;20(1):51-60.
18. Genkai-Kato M, Carpenter SR. EUTROPHICATION DUE TO PHOSPHORUS RECYCLING IN RELATION TO LAKE MORPHOMETRY, TEMPERATURE, AND MACROPHYTES. *Ecology*. 2005;86(1):210-9.
19. Bouraoui F, Grizzetti B, Granlund K, Rekolainen S, Bidoglio G. Impact of Climate Change on the Water Cycle and Nutrient Losses in a Finnish Catchment. *Climatic Change*. 2004;66(1):109-26.
20. Chang H. Water Quality Impacts of Climate and Land Use Changes in Southeastern Pennsylvania*. *The Professional Geographer*. 2004;56(2):240-57.
21. Jeppesen E, Kronvang B, Olesen JE, Audet J, Søndergaard M, Hoffmann CC, et al. Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia*. 2011;663(1):1-21.
22. de Boer H, Radersma S. Verzilting in Nederland: oorzaken en perspectieven. Wageningen: Wageningen UR Livestock Research 2011. Report No.: 531.
23. Kosten S, Kardinaal E, Faassen E, Netten J, Lürling M. Klimaat & waterkwaliteit : klimaatinvloed op waterkwaliteit en het voorkomen van cyanobacteriële toxines. Utrecht: Programmabureau Kennis voor Klimaat; 2011.
24. Wu Q, Xia X, Mou X, Zhu B, Zhao P, Dong H. Effects of seasonal climatic variability on several toxic contaminants in urban lakes: Implications for the impacts of climate change. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2014;26(12):2369-78.
25. Veraart AJ, de Klein JJ, Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics. *PLoS One*. 2011;6(3):e18508.
26. Velthuis M, de Senerpont Domis LN, Frenken T, Stephan S, Kazanjian G, Aben R, et al. Warming advances top-down control and reduces producer biomass in a freshwater plankton community. *Ecosphere*. 2017;8(1):e01651.
27. Kosten S, Huszar VLM, Bécares E, Costa LS, van Donk E, Hansson L-A, et al. Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Global Change Biology*. 2012;18(1):118-26.
28. Paerl HW, Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*. 2009;1(1):27-37.
29. Paerl HW, Huisman J. Blooms Like It Hot. *Science*. 2008;320(5872):57.
30. Jöhnk KD, Huisman JEF, Sharples J, Sommeijer BEN, Visser PM, Stroom JM. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*. 2008;14(3):495-512.
31. Ladwig R, Furusato E, Kirillin G, Hinkelmann R, Hupfer M. Climate change demands adaptive management of urban lakes: Model-based assessment of management scenarios for Lake Tegel (Berlin, Germany). *Water (Switzerland)*. 2018;10(2).

32. Netten JJC, Van Zuidam J, Kosten S, Peeters ETHM. Differential response to climatic variation of free-floating and submerged macrophytes in ditches. *Freshwater Biology*. 2011;56(9):1761-8.
33. Adams MS, McCracken MD. Seasonal Production of the Myriophyllum Component of the Littoral of Lake Wingra, Wisconsin. *Journal of Ecology*. 1974;62(2):457-65.
34. Jeppesen E, Moss B, Bennion H, Carvalho L, DeMeester L, Feuchtmayr H, et al. Interaction of Climate Change and Eutrophication. *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*. 2010:119-51.
35. Bruijns MM. Vissterfte door de vorst. *De Levende Natuur*. 1964;67(2):36-40.
36. Lund SS, Landkildehus F, SØndergaard M, Lauridsen TL, Egemose S, Jensen HS, et al. Rapid changes in fish community structure and habitat distribution following the precipitation of lake phosphorus with aluminium. *Freshwater Biology*. 2010;55(5):1036-49.
37. Muerdter CP, Wong CK, Lefevre GH. Emerging investigator series: The role of vegetation in bioretention for stormwater treatment in the built environment: Pollutant removal, hydrologic function, and ancillary benefits. *Environmental Science: Water Research and Technology*. 2018;4(5):592-612.
38. Brolsma RJ, Buma J, van Meerten H, Dionisio M, Elbers JA. Effect van droogte op stedelijk gebied, Kennisinventarisatie. Delft: Deltares; 2012.
39. Malakar K, Mishra T, Patwardhan A. A framework to investigate drivers of adaptation decisions in marine fishing: Evidence from urban, semi-urban and rural communities. *Science of the Total Environment*. 2018;637-638:758-70.
40. van der Zeijden PTH, Muizer AP, Braaksma RM, Pasaribu MN. *Industriewater in Nederland*. Zoetermeer: EIM; 2009.
41. van Cleef R, Laro J. *Het zoete en bittere van verzilting*. H2O. 2008.
42. Willet J, King J, Wetser K, Dykstra JE, Oude Essink GHP, Rijnaarts HHM. Water supply network model for sustainable industrial resource use a case study of Zeeuws-Vlaanderen in the Netherlands. *Water Resources and Industry*. 2020;24:100131.
43. Wessels M, Weideman P, Hoijsink R, Vreman BJ, Schreuders R. *Rivierdossier Waterwinningen Rijndelta: Feitendossier*. 's-Hertogenbosch: Arcadis; 2019.
44. van der Meulen ES, Sutton NB, van de Ven FHM, van Oel PR, Rijnaarts HHM. Trends in Demand of Urban Surface Water Extractions and in Situ Use Functions. *Water Resources Management*. 2020;34(15):4943-58.
45. RIZA. *Potentiële Koelcapaciteit Rijkswateren 2005-2050*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat/RIZA; 2005.
46. van Vliet MTH, Yearsley JR, Ludwig F, Vögele S, Lettenmaier DP, Kabat P. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Climate Change*. 2012;2(9):676-81.
47. Waterstaat MvIe. *Nationale Adaptatie Strategie 2016 (NAS)*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat 2016.
48. Kruit K, Schepers B, Roosjen R, Boderie P. *Nationaal potentieel van aquathermie: Analyse en review van de mogelijkheden*. Delft: CE Delft; 2018. Report No.: 18.5S74.116.
49. Smith P, Ashmore MR, Black HIJ, Burgess PJ, Evans CD, Quine TA, et al. *REVIEW: The role of ecosystems and their management in*

- regulating climate, and soil, water and air quality. *Journal of Applied Ecology*. 2013;50(4):812-29.
50. Jacobs C, Klok L, Bruse M, Cortesão J, Lenzholzer S, Kluck J. Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate*. 2020;32:100607.
51. STOWA, RIONED. Water in de openbare ruimte heeft risico's voor de gezondheid. Een gezondheidsrisicoanalyse voor fontein, bedriegertjes, water op straat en water in wadi's. STOWA & Stichting RIONED; 2014.
52. Wang M, Zhang DQ, Su J, Dong JW, Tan SK. Assessing hydrological effects and performance of low impact development practices based on future scenarios modeling. *Journal of Cleaner Production*. 2018;179:12-23.
53. Sohn W, Kim JH, Li MH, Brown R. The influence of climate on the effectiveness of low impact development: A systematic review. *Journal of Environmental Management*. 2019;236:365-79.
54. Verweij WHJ, van der Wielen J, van Moorselaar I, van der Grinten E. Impact of climate change on water quality in the Netherlands Bilthoven: RIVM; 2010. Report No.: RIVM Report 607800007/2010
55. Sterk A, Schijven J, De Nijs T, De Roda Husman AM. Direct and indirect effects of climate change on the risk of infection by water-transmitted pathogens. *Environmental Science and Technology*. 2013;47(22):12648-60.
56. Poulin R. Global warming and temperature-mediated increases in cercarial emergence in trematode parasites. *Parasitology*. 2006;132(Pt 1):143-51.
57. Vezzulli L, Grande C, Reid PC, Hélaouët P, Edwards M, Höfle MG, et al. Climate influence on *Vibrio* and associated human diseases during the past half-century in the coastal North Atlantic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2016;113(34):E5062-E71.
58. Sterk A, Schets FM, de Roda Husman AM, de Nijs T, Schijven JF. Effect of Climate Change on the Concentration and Associated Risks of *Vibrio* Spp. in Dutch Recreational Waters. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis. 2015;35(9):1717-29.
59. Sterk A, Schijven J, de Roda Husman AM, de Nijs T. Effect of climate change on runoff of *Campylobacter* and *Cryptosporidium* from land to surface water. *Water Res*. 2016;95:90-102.
60. Teurlincx S, Kuiper JJ, Hoevenaar ECM, Lurling M, Brederveld RJ, Veraart AJ, et al. Towards restoring urban waters: understanding the main pressures. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2019;36:49-58.
61. Janjevic M, Ndiaye AB. Inland Waterways Transport For City Logistics: A Review Of Experiences And The Role Of Local Public Authorities. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2014;138:12.
62. Maes J, Sys C, Vanelslander T. Vervoer Te Water: Linken Met Stedelijke Distributie. Antwerpen: Steunpunt Goederen- en personenvervoer; 2012.
63. Berents R, Straver H. Watervisie Amsterdam 2040 : een ruimtelijk-economisch perspectief op het gebruik van het water met een uitvoeringsagenda tot 2018. Amsterdam: Gemeente Amsterdam; 2016.
64. Jonkeren OE. Adaptation to Climate Change in Inland Waterway Transport Amsterdam: Vrije Universiteit Amsterdam; 2009.
65. Scholten A, Rothstein B, Baumhauer R. Mass-cargo-affine industries and climate change. *Climatic Change*. 2014;122(1):111-25.

66. Christodoulou A, Christidis P, Bisselink B. Forecasting the impacts of climate change on inland waterways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020;82:102159.
67. Roijackers V. *Nature-based Solutions: Inspiratieboek*. Eindhoven: Gemeente Eindhoven; 2018.
68. Mitchell ME, Matter SF, Durtsche RD, Buffam I. Elevated phosphorus: dynamics during four years of green roof development. *Urban Ecosystems*. 2017;20(5):1121-33.
69. Todorov D, Driscoll CT, Todorova S, Montesdeoca M. Water quality function of an extensive vegetated roof. *Science of The Total Environment*. 2018;625:928-39.
70. Kuoppamäki K, Lehvävirta S. Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar. *Landscape and Urban Planning*. 2016;152:39-48.
71. Burgis CR, Hayes GM, Henderson DA, Zhang W, Smith JA. Green stormwater infrastructure redirects deicing salt from surface water to groundwater. *Science of The Total Environment*. 2020;729:138736.
72. Boogaard F. Bodemvervuiling in wadi's onderzocht met nieuwe methode. *H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*. 2019;2019(mei).
73. Lampén H, van Leuken J, Schets FM, de Man H, de Roda Husman AM. Integrale benadering van klimaatadaptatiemaatregelen voor gezondheid in de stedelijke leefomgeving. RIVM; 2018.
74. De Man H, Van Den Berg HHJL, Leenen EJTM, Schijven JF, Schets FM, Van Der Vliet JC, et al. Quantitative assessment of infection risk from exposure to waterborne pathogens in urban floodwater. *Water Research*. 2014;48(1):90-9.
75. de Man H, Leenen I. Water in de openbare ruimte heeft risico's voor de gezondheid. STOWA en Stichting RIONED; 2014.
76. Löhmus M, Balbus J. Making green infrastructure healthier infrastructure. *Infection Ecology & Epidemiology*. 2015;5(1):30082.
77. Bratt AR, Finlay JC, Hobbie SE, Janke BD, Worm AC, Kemmitt KL. Contribution of Leaf Litter to Nutrient Export during Winter Months in an Urban Residential Watershed. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(6):3138-47.
78. Janke BD, Finlay JC, Hobbie SE. Trees and Streets as Drivers of Urban Stormwater Nutrient Pollution. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(17):9569-79.
79. STOWA. *Afkoppelen: Kansen en Risico's van Anders Omgaan met Hemelwater in de Stad*. Amersfoort: STOWA; 2019.
80. Blom-Zandstra M. Zilte landbouw: Wat zijn de mogelijkheden? *Bodem*. 2017;27(4):14-7.

Bijlage 1

Interviewvragen eerste ronde (voorbeeld gemeente Groningen/WS Noorderzijlvest)

Interview Stedelijke waterkwaliteit, klimaat en adaptatie (SWKA)

Bij alle vragen ligt de focus op stedelijk water.

Onderdeel 1: *Wat is de impact van klimaatverandering op uw watersysteem (Groningen) met betrekking tot de hydrologie en ecologie?*

- Wat kunt u vertellen over temperatuurstijging van het oppervlaktewater? Weke veranderingen treden al op of zijn verwacht in de toekomst, wat is de impact?
- Verandering van waterpeilen en debiet als gevolg van extremen in neerslag
- Is er sprake van verzilting? Zo ja, wat is de impact?
- Is er in het stedelijk gebied op dit moment sprake van (te) hoge nutriëntenconcentraties, eutrofiëring en/of een blauwalgenproblematiek?
- Ziet u/verwacht u een toename van (micro)verontreinigingen, nutriënten (m.n. fosfaat), blauwalgen en pathogenen in het oppervlaktewater als gevolg van weersextremen (piekbuien)? Denk hierbij aan de invloed van overstorten (first flush), run-off, etc.
- Heeft het stedelijk gebied als gevolg van klimaatadaptatiemaatregelen zoals afkoppelen van hemelwater te maken met stank- en muggenoverlast na hevige buien (m.n. in de zomerperiode)?
- Ziet u als gevolg van klimaatverandering (en eventueel hiermee samenhangende adaptieve maatregelen) veranderingen in het visbestand ontstaan?
- Zelfde vraag als hiervoor maar dan voor waterplanten.
- Ziet u een toename van invasieve exoten (bijvoorbeeld water crassula, cabomba, kreeften)

Onderdeel 2: *Wat is de lokale impact van de veranderingen in het watersysteem op de gebruiksmogelijkheden van het water?*

Selecteer circa 5 gebruiksfuncties die voor uw stad het meest relevant zijn. Dit mogen 1) functies zijn die nu al van toepassing zijn op het stedelijke gebied of 2) functies waarvan u verwacht dat ze in de toekomst een belangrijke rol gaan spelen. Laat u bij de selectie van functies niet leiden door hoeveel kennis er momenteel is over de impact van klimaatverandering op de potentie voor deze functie, Als een functie volgens u heel belangrijk is maar er is geen kennis over, dan willen we dat ook graag weten.

Keuzelijst:

- Vissen voor consumptie en recreatie
- Wateronttrekking voor:
 - drinkwaterproductie
 - irrigatie voedselgewassen en overige gewassen (zoals bomen, volkstuinen, etc.)
 - industriële processen (m.u.v. koelwater. Wel bv.: spoelwater)
- Thermische energie uit oppervlaktewater:
 - koelwater voor industrie, bv met water uit kanaal
 - koelen gebouwen met koude uit diepe plassen
 - verwarmen en/of koelen gebouwen met bv. thermische energie uit kanaal
- Reguleren waterkwaliteit m.b.v. oppervlaktewater (bv. inlaat water t.b.v. tegendruk verzilting, doorspoelen)
- Regulering lokaal klimaat m.b.v. oppervlaktewater (invloed van oppervlaktewater op luchttemperatuur)
- Primair contact met water
 - recreatie (zwemmen), pootje baden
 - zwemmen door honden
- Secundair contact recreatie (bv. kanoën, SUP)
- Recreatief varen (zonder contact tussen lichaam en water)
- Recreëren langs water & wonen aan water (niet op)
- Bouwen op water (bv. woonboten, drijvende fietsenstalling, zonnepanelen)
- Schaatsen
- Onder water opslag/infrastructuur (benutten ruimte onder water, bv. voor kabels, stofvrije opslag)
- Transport goederen & personen

Interviewprotocol tweede ronde

In ieder interview is gesproken over mogelijke oplossingen voor de specifieke waterkwaliteitsproblemen die tijdens het eerste interview naar voren zijn gekomen als relevant in het betreffende gebied.

Bijlage 2

De volgende organisaties hebben deelgenomen aan (een deel van) één of beide (dikgedrukt) gebruikersbijeenkomsten:

Gemeente Amersfoort/Platform Water Vallei en Eem

Gemeente Capelle aan den IJssel

Gemeente Enschede

Gemeente Ermelo

Gemeente Gorinchem

Gemeente Harderwijk

Gemeente Hardinxveld-Giessendam

Gemeente Molenlanden

Gemeente Nieuwegein

Gemeente Tilburg

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard

Samenwerking water Regio Achterhoek+

Waterschap Hollandse Delta

Waterschap Rivierenland

Waterschap Vallei en Veluwe

Evides Waterbedrijf

Provincie Zeeland

Provincie Zuid-Holland

STOWA / NKWK-KBS

TAUW

Wageningen University & Research

Waterketen WKGD