

BTO 2014.027 | augustus 2014

BTO rapport

Risico's van klimaat-
verandering voor de
drinkwatersector

BTO

Risico's van klimaatverandering voor de drinkwatersector

BTO 2014.027 | Augustus 2014

Opdrachtnummer

400554-062

Projectmanager

Edu Dorland

Opdrachtgever

BTO

Kwaliteitsborger(s)

Gertjan Zwolsman

Auteur(s)

Gertjan Zwolsman (red.), Gijsbert Cirkel, Bas Hofs, Edwin Kardinaal, Kimberly Learbuch, Han Runhaar, Martin van der Schans, Patrick Smeets, Peter van Thienen, Paul van der Wielen, Flip Witte, Bas Wols

Verzonden aan

Dit rapport is verzonden aan BTO participanten en is openbaar

Jaar van publicatie
2014

Meer informatie

T 030-6069542
E gertjan.zwolsman@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



BTO XXX | Februari 2014 © KWR

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

Samenvatting

Inleiding

In het voorliggende rapport wordt een risicoanalyse gegeven van de mogelijke effecten van klimaatverandering voor de drinkwatervoorziening. Het doel van deze studie is om een inhoudelijk kader en een logische prioriteitstelling voor toekomstig onderzoek te scheppen voor de BTO themagroep Klimaatbestendige watersector. De studie is dus bedoeld als gemeenschappelijke basis voor de onderzoeksagenda van de themagroep in de komende jaren.

De studie bestaat uit acht inhoudelijke hoofdstukken, die elk bestaan uit de volgende onderdelen:

1. een beknopte beschrijving van de mogelijke directe en indirecte impacts van klimaatverandering op de drinkwatervoorziening;
2. een beschouwing van de omvang en effecten van de mogelijke impacts;
3. aanbevelingen voor verdiepend onderzoek om de ernst van de impacts beter in beeld te krijgen en mogelijke aanpassingen voor de bedrijfsvoering (adaptieve strategieën) te formuleren.

Op basis van een inventariserende workshop met de BTO Themagroep zijn de volgende onderwerpen (thema's) in dit rapport gekozen voor nadere uitwerking:

- Effecten van klimaatverandering op de landbouw
- Effecten van klimaatverandering op de drinkwatervraag
- Effecten van klimaatverandering op grondwater en natuur
- Effecten van klimaatverandering op de chemische kwaliteit van het oppervlaktewater
- Effecten van klimaatverandering op de microbiologische kwaliteit van het oppervlaktewater
- Effecten van klimaatverandering op nagroei in het distributienet
- Kwetsbaarheid van het leidingnet onder invloed van klimaatverandering
- Klimaatverandering en overstromingsrisico's van vitale drinkwater infrastructuur

De resultaten van de risicoanalyse en de kennisvragen worden hierna per thema kort samengevat. De BTO Themagroep maakt zelf een afweging welke thema's de komende jaren worden uitgewerkt in verdiepend onderzoek. Het voorliggende rapport legt hiervoor de basis.

1. Effecten van klimaatverandering op de landbouw

Klimaatverandering kan indirect van invloed zijn op de waterwinning in Nederland, en wel via veranderingen in landgebruik. Met name veranderingen in de landbouw zijn potentieel van grote invloed, omdat landbouw qua oppervlakte de dominante gebruiksfunctie is, en een belangrijke bron van verontreinigingen, bijvoorbeeld nutriënten en bestrijdingsmiddelen.

Daarbij moet de kanttekening worden gemaakt dat klimaatverandering niet de enige factor is die van invloed is op het landgebruik. Sociaaleconomische factoren zijn minstens zo belangrijk. Een belangrijke factor is bijvoorbeeld hoe het gemeenschappelijk landbouwbeleid (CAP) van de Europese Unie zich zal ontwikkelen. De EU streeft naar verdere verduurzaming en vermindering van de milieudruk door de landbouw. De toegenomen vraag naar voedsel en de liberalisering van de wereldhandel vormen echter tegenkrachten die het moeilijk zullen maken om dit voornemen te realiseren. Hoe deze factoren gaan uitpakken in de praktijk en wat hun relatieve belang is ten opzichte van klimaatverandering valt op dit moment niet te zeggen.

Effecten van klimaatverandering op de landbouw die kunnen doorwerken op de waterwinning betreffen:

- Grotere productiviteit door een langer groeiseizoen, hogere temperatuur en toegenomen koolzuurgehalte van de atmosfeer;
- Nieuwe teelten van warmte minnende soorten worden mogelijk (bijv. druiventeelt);
- Toename van ziektes en plagen door nattere omstandigheden (meer schimmels) en hogere temperaturen (nieuwe plaagsoorten, minder sterfte in winter, meer generaties plaaginsecten);
- Toename van het areaal aan open teelten;
- Toename van uitspoeling/verlies van nutriënten door vernatting;
- Toename beregeningsbehoefte (grondwater en/of oppervlaktewater).

Zowel de grotere productiviteit als de toename van ziektes en plagen leiden tot een groter gebruik van bestrijdingsmiddelen. Deels zal dit om bestaande middelen gaan, maar er zullen ook nieuwe middelen worden ontwikkeld. Het risico is vooral groot in scenario's waarin de zomers niet alleen warmer worden maar ook vochtiger (W scenario), vanwege de sterk toegenomen noodzaak voor bestrijding van schimmels, ziektes en plagen. Een dergelijke ontwikkeling wordt als een groot risico gezien voor de drinkwatervoorziening.

De risico's van toegenomen uitspoeling en afspoeling van nutriënten voor de drinkwater voorziening worden als beperkt ingeschat. Anders dan bij bestrijdingsmiddelen gaat het om een beperkt aantal stoffen (fosfaat, ammonium en nitraat) waarvan ammonium en fosfaat relatief goed zijn te verwijderen in de zuivering. Een eventuele toename van de uitspoeling van nitraat naar het grondwater wordt mogelijk gecompenseerd door toename van de denitrificatie onder natte omstandigheden. Wel zal een toename van nutriëntengehaltes in plassen, sloten en meren een extra bijdrage leveren aan het optreden van blauwalgenbloei, wat kan leiden tot een ander soort waterkwaliteitsproblemen (toxines).

Klimaatverandering kan ook leiden tot een substantiële toename van beregening uit grondwater, waardoor nadelige effecten op de natuur kunnen optreden. Mogelijk zal het draagvlak voor grondwateronttrekking als geheel hierdoor verminderen, waardoor de drinkwatervoorziening eveneens in het geding komt.

De volgende aanbevelingen voor onderzoek kunnen worden gedaan:

- Het leggen van een meer causale analyse relatie tussen klimaatparameters (temperatuur, neerslag) en het gebruik van bestrijdingsmiddelen, waardoor goed onderbouwde prognoses van het toekomstige gebruik en de emissies van bestrijdingsmiddelen in de landbouw kunnen worden gemaakt.

- Het in kaart brengen van de risico's van toekomstige concentraties aan bestrijdingsmiddelen voor de drinkwatervoorziening (gezondheidsrisico's, mogelijkheden detectie en verwijdering, kosten verwijdering).
- Verkenning van de gecombineerde invloed van klimaatverandering en toename van de beregeningsbehoefte op de omvang en dynamiek van grondwatervoorraden.

2. Effecten van klimaatverandering op de drinkwatervraag

Landbouwberegening kan in een droog jaar binnen enkele weken 200 miljoen m³ grondwater onttrekken. Dit komt overeen met 15% van de totale jaarlijkse grondwateronttrekking in Nederland. Vochttekorten in het groeiseizoen zullen onder alle klimaatscenario's toenemen, vooral onder scenario W+. Ten opzichte van de huidige situatie kan de beregeningsbehoefte in 2050 met tussen de 5 en 70% kan zijn toegenomen. Cijfers over beregeningsgiften zijn echter schaars en vaak onvolledig.

De berekende effecten van klimaatverandering op het gemiddelde drinkwaterverbruik zijn met enkele procenten toename klein ten opzichte van de effecten van socio-economische ontwikkelingen. Op extremen in het drinkwaterverbruik (piekvragen) kan klimaatverandering wel een significante invloed hebben. Deze bevindingen zijn echter gebaseerd op resultaten voor twee pompstations, die grote verschillen vertoonden. Een landelijk beeld ontbreekt.

De belangrijkste kennisvragen zijn:

- Hoe verandert de piekvraag naar grondwater door de landbouw bij klimaatverandering?
- Wat is de invloed van klimaatverandering op de ontwikkeling van drinkwater piekvragen in landelijk en stedelijk gebied? (differentiatie naar verschillende regio's/steden)

3. Effecten van klimaatverandering op grondwater en natuur

Door drinkwaterbedrijven, industrie en landbouw wordt jaarlijks ongeveer 1500 miljoen m³ uit de Nederlandse voorraad zoet grondwater onttrokken. De drinkwaterbedrijven onttrekken samen ongeveer 690 miljoen m³, en compenseren dat gedeeltelijk met de infiltratie van voorgezuiverd oppervlaktewater in de duinen. De netto onttrekking door de drinkwaterbedrijven bedraagt daardoor ongeveer 440 miljoen m³. Gemiddeld over Nederland is dit ongeveer 5% van het gemiddelde neerslagoverschot (250 mm/jr). Plaatselijk, zoals op de Veluwe, komt dit percentage echter veel hoger uit. Dat kan dan leiden tot schade aan landbouw en natuur.

Bepalend voor de voorraad zoet grondwater, alsmede de grondwaterstandsdiepte en -dynamiek is de grondwateraanvulling. Vooral op de hoge zandgronden (duinen, stuwwallen, dekzandruggen), de plekken waar de drinkwaterbedrijven actief zijn, is de grondwateraanvulling hoog omdat het neerslagoverschot hier niet wordt afgevoerd naar sloten en beken, maar geheel als grondwateraanvulling ten goede komt aan de grondwatervoorraad. De gemiddelde aanvulling kent een sterke ruimtelijke variatie, afhankelijk van de lokale hoeveelheid neerslag en de verdamping, maar ook van de eigenschappen van de vegetatie en het vermogen van de bodem om vocht vast te houden en na te leveren. Verschillen in grondwateraanvulling kunnen hierdoor oplopen tot een factor tien, afhankelijk van het type vegetatie.

Voor het bepalen van de grondwateraanvulling wordt gebruik gemaakt van hydrologische modellen, waarbij de grootte van de werkelijke verdamping, en daarmee de berekende grondwateraanvulling, sterk afhankelijk is van de manier waarop de vegetatie en de bodemeigenschappen zijn geschematiseerd en geparametriseerd. Echter, juist voor de op de hoge zandgronden veel voorkomende natuurlijke vegetaties zijn de belangrijke parameters

slecht bekend. Dit resulteert in fouten in de verdamping van minimaal 20%, die als een factor 2-3 extra doorwerken in de grondwateraanvulling. In de praktijk vallen deze fouten niet op, omdat hydrologische modellen worden geïjkt op grondwaterstanden. Bij het doorrekenen van klimaatscenario's is het echter cruciaal dat de verdamping goed wordt nagebootst. De noodzaak de aanvulling goed te berekenen komt evident naar voren uit de grote verschillen en soms tegenstrijdige resultaten van verschillende hydrologische modellen bij het bepalen van de effecten van klimaatscenario's. Op de hogere zandgronden kunnen de uitkomsten aanzienlijk van elkaar verschillen. En dan houden die modellen nog niet eens rekening met aanpassing van de vegetatie aan het klimaat, terwijl zulke aanpassingen wel van belang zijn. Zo zal door de toenemende CO₂ concentratie de transpiratie van planten afnemen en zal in droge gebieden de structuur van de vegetatie veranderen naar meer droogteresistente planten en open grond.

Een goede kwaliteit van het grondwater is van groot belang voor de drinkwatervoorziening. Excessieve uitspoeling van nutriënten en de hiermee samenvallende belasting van het grondwater met nitraat is een belangrijke bedreiging voor de Nederlandse drinkwatervoorziening. De belangrijkste bron van nutriënten in Nederlandse bodems is het gebruik van meststoffen in de landbouw. Hoe deze nutriënten worden verbruikt, bij hevige neerslag over het maaiveld afspoelen naar het oppervlaktewater, of uitspoelen naar het grondwater wordt sterk bepaald door het klimaat. Zo bepaalt de grondwateraanvulling de mate van indikking en uitspoeling van nutriënten en worden denitrificatieprocessen sterk beïnvloed door vocht en temperatuur. Hoe dit samenspel tussen hydrologie, bodemchemie en ecologie van invloed is op de uitspoeling van nitraat naar het grondwater onder verschillende klimaatscenario's is nog grotendeels onbekend.

Gerelateerd aan de uitspoeling van nitraat is de oxidatie van sulfide, zoals FeS en FeS₂ (pyriet). Toenemende uitspoeling van nitraat resulteert in versterkte oxidatie van pyriet en hieraan gerelateerde toename van zuur, sulfaat, hardheid, zware metalen (o.a. nikkel) en arseen in het grondwater en daarmee het ruwe water. Ook een toename van de grondwater dynamiek, zoals is te verwachten in de lagere natte gebieden, kan resulteren in versterkte oxidatie van pyriet. Juist in kwetsbare kwelgevoede natuurgebieden is veel zwavel vastgelegd in de vorm van pyriet. Hoe de kwelflux en daarmee de laagste grondwaterstand hier verandert als gevolg van veranderingen in grondwateraanvulling, is cruciaal voor het voortbestaan van deze gebieden.

Een voor de grondwaterkwaliteit cruciale factor die door klimaatverandering wordt beïnvloed, is het gehalte aan organische stof in de bodem. Zware metalen en organische verbindingen binden sterk aan organisch materiaal; organisch stof bepaalt ook tal van redoxprocessen, zoals denitrificatie en reductie van sulfaat; bij de afbraak van organische stof komen nutriënten en DOC vrij. Ook is het gehalte aan organische stof van grote invloed op de fysische eigenschappen van de bodem (waaronder het vermogen om water vast te houden) en daarmee op de grondwateraanvulling en de haalbaarheid van natuurdoelen. Klimaatverandering is via de temperatuur, vochtuithouding en aeratie van invloed op de ontwikkeling van organische stof in de bodem. Maar hoe deze factoren doorwerken op de organische stof gehalten in de bodem is thans onvoldoende bekend.

Veranderingen in de verdamping, de grondwateraanvulling, de dynamiek van het grondwatersysteem, de afbraak van organische stof en de grondwaterkwaliteit hebben grote gevolgen voor de standplaats van de vegetatie. Over het samenspel van deze veranderingen en de effecten van extremen op de vegetatiesuccessie bestaan nog veel vragen. Meer inzicht in deze aspecten is cruciaal voor het beantwoorden van vragen over de haalbaarheid van (verplichte) natuurdoelen en identificatie van toekomstige hotspots van biodiversiteit.

Samengevat zijn de belangrijkste onderzoeksvragen van klimaatverandering op het gebied van grondwater en natuur:

- Hoe groot is de grondwateraanvulling onder invloed van verschillende vegetatietypen?
- Hoe veranderen de verdampingseigenschappen van de vegetatie bij klimaatverandering?

Deze vragen hebben alle betrekking op de toekomstige hydrologie van het bodem-grondwater-vegetatie systeem. Daarnaast zijn er onderzoeksvragen op het gebied van grondwaterkwaliteit en natuurdoelen/biodiversiteit:

- Hoe verandert de organische-stofhuishouding van de bodem onder invloed van het klimaat?
- Wat is de invloed van klimaatverandering op de kwaliteit van het grondwater, in het bijzonder de afbraak (hogere temperatuur) en uitspoeling (meer piekbuien) van bestrijdingsmiddelen en nutriënten?
- Wat zijn de gevolgen van klimaatverandering voor de haalbaarheid van de natuurdoelen in het algemeen, en van waterbedrijven in het bijzonder?

4. Effecten van klimaatverandering op de chemische kwaliteit van het oppervlaktewater

Klimaatverandering heeft een grote impact op de rivierafvoer, de watertemperatuur en de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas. Dit is reeds gebleken in droge en warme jaren (2003, 2006, 2011) en wordt ook voorspeld door modelmatige berekeningen. De waterkwaliteit wordt daarnaast beïnvloed door andere ontwikkelingen, zoals de verwachte toename in medicijngebruik in de komende jaren (vergrijzing) en het eventueel verdergaand zuiveren van afvalwater op RWZI's. Deze ontwikkelingen zijn van groot belang voor de toekomstige waterkwaliteit maar worden verder niet beschouwd in de voorliggende analyse.

Deltares heeft in het kader van de Knelpuntenanalyse Zoetwater (onderdeel van het Deltaprogramma) afvoerscenario's gemaakt voor de Rijn en de Maas voor elk van de vier KNMI klimaatscenario's. De berekeningen zijn gemaakt voor drie hydrologische jaren, die model staan voor een gemiddeld jaar (1967), een droog jaar (1989) en een extreem droog jaar (1976). Uit deze prognoses blijkt dat in het W+ scenario zeer ernstige watertekorten optreden in de zomer en de herfst (in het jaar 2050). Mocht dit scenario realiteit worden, dan noopt dit bijvoorbeeld tot herziening van de huidige waterverdeling in Nederland. Een (extreem) voorbeeld kan zijn dat de huidige strategie van verziltingsbestrijding op de Nieuwe Waterweg wordt aangepast of zelfs losgelaten, omdat het hiervoor benodigde zoete water elders nodig is, bijvoorbeeld om het IJsselmeer op peil te houden.

Bij de huidige afvoerverdeling van het Rijnwater zal het W+ scenario leiden tot versterkte verzilting van de Lek. Dit zal leiden tot grotere verzilting van de oeverfiltratie winningen van Oasen bij Ridderkerk en rond de monding van de Lek (Lekkerkerk, Nieuw-Lekkerland). Maar ook de noodinname van Dunea bij Bergambacht zal onder het W+ scenario regelmatig te zout zijn voor infiltratie in de duinen (chloride > 300 mg/l). Ook de inname van Evides in het Haringvliet (Scheelhoek) is gevoelig voor verzilting, maar deze inname moet sowieso oostwaarts worden verplaatst vanwege de gedeeltelijke opening van de Haringvlietssluisen. Aan de andere kant lijkt verzilting onder het huidige waterbeheer geen risico op te leveren voor de waterinname uit het Lekkanaal, de Brabantsche Biesbosch en de Afgedamde Maas.

Bij een Maasafvoer onder de 60 m³/s bij Monsin (Luik) is er officieel sprake van een watertekort. Er is dan te weinig water beschikbaar voor de voeding van het Albertkanaal (in België, met drinkwaterfunctie), de Zuid-Willemsvaart, het Julianakanaal en de Grensmaas.

Deze situatie treedt nu al regelmatig op, maar zal usance zijn bij het W+ scenario, voor alle hydrologische jaren. De Grensmaas heeft een minimaal benodigde afvoer van 10 m³/s, maar dit debiet zal langdurig niet gehaald worden bij het W+ scenario (ook al bij een gewoon hydrologisch jaar). Dat zal grote gevolgen hebben voor de waterkwaliteit, ecologie en de drinkwaterfunctie van de Grensmaas.

Bij lage afvoeren staat de waterkwaliteit van de grote rivieren onder druk, doordat puntlozingen minder sterk worden verdund. Dit geldt met name voor de reguliere lozingen vanuit RWZI's. De bijdrage van RWZI lozingen aan de totale afvoer kan worden geschat op basis van het aantal inwoners in het bovenstrooms gelegen deel van het stroomgebied en een huishoudelijk waterverbruik van 125 l/p/d. Uit deze berekening blijkt dat de bijdrage van RWZI effluent aan de afvoer van de Rijn bij Lobith relatief beperkt is. Bij een typische laagwater afvoer op de Rijn (10 percentiel) is de bijdrage van RWZI effluent aan de totale afvoer 4 tot 7% in het huidige klimaat; dit percentage loopt op tot 6-9% bij het W+ scenario.

Voor de Maas is de situatie totaal anders. Reeds in het huidige klimaat is daar al sprake van een sterke beïnvloeding van de afvoer door RWZI effluent. Bij een typische zomerafvoer van de Maas (10-percentiel) is de bijdrage van RWZI effluent aan de afvoer bij Luik reeds 13% in een normaal jaar en dit percentage loopt op tot 32% in een zeer droog jaar. Deze situatie blijft onveranderd bij het G scenario, omdat de afvoer daarin min of meer gelijk blijft. Bij het W+ scenario is de Maasafvoer in de zomerperiode bijna gehalveerd en verdubbelt de bijdrage van RWZI effluent, namelijk tot 23% in een normaal jaar en 58% in een extreem droog jaar. Dit heeft grote gevolgen voor de waterkwaliteit en de drinkwaterfunctie van de Maas.

RWZI's zijn veruit de grootste "bron" (beter: doorgeeffluik) van humane geneesmiddelen in oppervlaktewater. In beginsel mag er dan ook een positief verband worden verwacht tussen de rivierafvoer en de concentraties aan geneesmiddelen in oppervlaktewater. Voor de Maas blijkt dat inderdaad het geval te zijn, al is er meestal geen sprake van een simpel lineair verband tussen afvoer en concentratie. Modelberekeningen van het RIVM en Deltares suggereren dat de concentraties aan geneesmiddelen zeer sterk kunnen toenemen bij (extreem) lage afvoeren, zowel in de Rijn als in de Maas. Deze berekeningen zijn echter niet gevalideerd en daarom vooralsnog indicatief. De kans op verdubbeling van de normale concentraties gedurende lange periodes is groot, de kans op vervijfvoudiging is klein. Somconcentraties van geneesmiddelen in de orde van 5-10 µg/L komen nu al voor in de Rijn en de Maas en deze gehalten zullen door klimaatverandering nog sterk kunnen toenemen.

Overschrijding van de maximale temperatuur van het rivierwater (25 °C) komt nu al voor in warme en droge maanden, zoals augustus 2003 en juli 2006. De maximaal waargenomen temperatuur van zowel de Rijn als de Maas tijdens deze hittegolven was 28°C, gevaarlijk hoog voor de ecologie en onwenselijk voor de drinkwater productie. Uit modelberekeningen van Deltares blijkt dat bij het G scenario de maximale temperatuur van het oppervlaktewater stijgt met ca. 0,7 °C in een normaal jaar tot ca. 1 °C bij een extreem droog jaar. De 25 °C grens wordt dan soms overschreden in een extreem droog jaar. Bij het W+ scenario stijgt de maximale watertemperatuur met ca. 2,5 tot 3 °C en vindt overschrijding van de 25 °C grens zeer frequent plaats (in 2050), ook tijdens een normaal hydrologisch jaar. Bij dit scenario kan de maximale watertemperatuur in een extreem droog jaar, afhankelijk van de locatie, oplopen van 27 °C tot ruim 30 °C. Deze resultaten zijn echter indicatief, omdat de maximale watertemperaturen buiten de range vallen waarop het model is afgeregeld.

Hoge watertemperaturen worden doorgaans afgevlakt door menging in de voorraad- en procesbekkens en door bodempassage. Hierdoor zal de watertemperatuur van het geleverde drinkwater minder hoog zijn dan de temperatuur van het ingenomen rivierwater tijdens een hittegolf. De grootste kans op knelpunten treedt dus op als bodempassage geen onderdeel uitmaakt van het zuiveringsproces. Dit is het geval bij de innamelocaties Gat van de Kerssloot (Maaswater), De Punt (Drentsche Aa) en deels ook bij Andijk (IJsselmeer).

De grootste risico's voor de waterzuivering liggen op het gebied van de langdurige lagere afvoeren van de rivieren en verzilting. Hier is het niet ondenkbaar dat het Maaswater van dermate slechte kwaliteit wordt (met name voor organische microverontreinigingen) dat extra innamestops of extra zuiveringsstappen nodig zijn om onberispelijk drinkwater te kunnen produceren of om water te kunnen infiltreren. Voor Rijnwater geldt hetzelfde als voor Maaswater, maar is de kans dat de effecten tot problemen leiden kleiner.

Het effect van hogere temperaturen op de zuivering is moeilijk te voorspellen, te meer als daarbij rekening wordt gehouden met het feit dat niet alleen de watertemperatuur, maar ook andere parameters (zoals NOM) gaan veranderen onder invloed van klimaatverandering. Bij relatief kleine veranderingen in temperatuur vallen de effecten voor de zuivering mee, en de veranderingen van de watertemperatuur in de winter zijn vooral positief. Bij veel hogere temperaturen in de zomer zijn mogelijk aanpassingen aan de zuivering of bedrijfsvoering nodig.

Kennisvragen (waterkwaliteit)

- Hoe kan de verzilting van de Lek bij klimaatverandering effectief worden bestreden? Opties zijn verandering van het waterbeheer (basisafvoer door de Lek) of accepteren van de verzilting en het zuiveringsproces daarop inrichten.
- Hoe zal de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas zich ontwikkelen bij het W+ scenario, gedurende lange periodes van watertekorten? Op welke concentraties aan (organische) microverontreinigingen (bijv. geneesmiddelen) moet de waterzuivering voorbereid zijn?
- Is de buffercapaciteit van de voorraadbekken en/of de procesbekken voldoende groot om (langdurig) hoge watertemperaturen van het rivierwater op te kunnen vangen? Zo nee: wat betekent een langdurige overschrijding van de 25 °C eis voor de drinkwater voorziening? Wat zijn effecten op de zuivering, wat is het effect op nagroei in het distributienet en de biologische stabiliteit van het drinkwater, wat is het effect op de watertemperatuur aan de tap?

Kennisvragen (zuiveringsprocessen)

- Wat is het netto effect van de verwachte temperatuurstijging op het rendement van diverse zuiveringsprocessen, in het bijzonder NF/RO (biofouling)? Gaan parameters zoals NOM, die bij diverse zuiveringsprocessen een belangrijke rol spelen, veranderen onder invloed van klimaatverandering, en zo ja, hoe?
- Blijven innamestops bij langere drogere periodes houdbaar (is er genoeg water van goede kwaliteit), of zijn andere strategieën nodig (alternatieve bronnen, opslag, uitbreiding zuiveringen)?

5. Effecten van klimaatverandering op de microbiologische kwaliteit van het oppervlaktewater

In oppervlaktewater komen van nature tal van micro-organismen voor. Een zeer beperkt deel van die organismen kan in potentie bij de mens ziektes veroorzaken. Hierbij wordt vaak onderscheid gemaakt tussen twee groepen micro-organismen, namelijk: toxineproducerende micro-organismen (zoals cyanobacteriën) en pathogenen van fecale oorsprong.

De concentraties van micro-organismen in het oppervlaktewater zijn onder andere afhankelijk van de mate van de (fecale) belasting, de verdunning, de overleving en de groei van micro-organismen. Deze factoren hangen samen met weersomstandigheden als temperatuur en neerslag. Als gevolg van klimaatverandering kunnen dergelijke factoren beïnvloed worden en daarmee de aanwezigheid van kwalijke micro-organismen.

Cyanobacteriën

Overmatige bloei van cyanobacteriën in oppervlaktewateren, zoals recreatiewateren en drinkwaterbekkens, vormt een potentieel gevaar voor de gezondheid van mens en dier. De gevaren worden met name veroorzaakt door twee eigenschappen van een aantal algemeen voorkomende cyanobacterie genera: ze zijn in staat om toxines te produceren en als gevolg van drijfvermogen/bodemgroei in staat om zich in grote hoeveelheden op te hopen.

Voor cyanobacteriën geldt dat hun groeiomstandigheden kunnen verbeteren of verslechteren afhankelijk van de beschikbare voedingsstoffen. Cyanobacteriën concurreren met andere algensoorten om licht en voedsel, maar zijn in het voordeel onder voedselrijke omstandigheden wanneer licht een beperkende groeifactor wordt. Ook bij hogere watertemperaturen (boven 25 °C) zijn cyanobacteriën in staat om beter te overleven dan andere, concurrerende, algengroepen. Onder het W+ klimaatscenario worden toenemende temperatuur, rustigere weersomstandigheden en regelmatigere piekbuien in de zomerperiode verwacht. De verwachting is dat onder dergelijke omstandigheden cyanobacteriën zeer hoge dichtheden kunnen bereiken en langdurig het algenbeeld in het oppervlaktewater zullen domineren. De concentraties aan cyanotoxines zullen navenant toenemen. De verhoogde concentratie aan cyanotoxines in het innamewater voor de drinkwaterproductie levert naar verwachting geen problemen op voor de zuiveringen die in Nederland operationeel zijn. Elke drinkwaterzuivering bevat meerdere barrières waarin cyanobacteriecellen en cyanotoxines afdoende worden verwijderd. Vooral nog is echter onduidelijk of dit ook geldt voor het hele scala aan toxines zoals dat door de diverse cyanobacteriegenera geproduceerd wordt. Welke cyanotoxines geproduceerd worden hangt samen met de samenstelling van de cyanobacterie populatie. De cyanobacterie populatie zou kunnen veranderen onder invloed van de hierboven genoemde klimaatfactoren.

Hieruit volgt de volgende onderzoeksvraag:

- Hoe veranderen de soortensamenstelling en dichtheden van cyanobacteriën in het ruwe water als gevolg van klimaatverandering?

Pathogenen

Pathogene micro-organismen van humane of dierlijke fecale oorsprong komen in het oppervlaktewater terecht door uitstroom van ruw en behandeld afvalwater, door afspoeling van het land of vanuit een directe bron; zoals bijvoorbeeld vogels in het water. De huidige risico's van besmetting van het oppervlaktewater spelen vooral bij de grote rivieren als de Maas en de Rijn. Deze rivieren hebben een groot stroomgebied en voeren door diverse landen en grote steden. Het water wordt hierdoor met humane, dierlijke en industriële afvalstromen besmet.

Pathogenen zullen in het milieu na verloop van tijd afsterven, of in ieder geval niet meer infectieus zijn (inactivatie). De snelheid waarmee dit gebeurt, is afhankelijk van het soort micro-organisme. Naast de tijd speelt de temperatuur een belangrijke rol.

Als door klimaatverandering de watertemperatuur stijgt kan dit meerdere effecten hebben. Door een hogere watertemperatuur neemt de inactivatie van fecale bacteriën, virussen en parasieten toe. Aan de andere kant, afhankelijk van hun groeicurve, kunnen opportunistische bacteriën sneller groeien in water met een hogere temperatuur.

Een toename in de temperatuur (en veranderend klimaat in het algemeen) kan ook zorgen voor een verandering in de natuurlijke populatie: de soorten, de aantallen en het gedrag. Dus andere vogelpopulaties kunnen andere zoönosen (mens-pathogene micro-organismen afkomstig van dieren) met zich meebrengen, of andere zoönosen kunnen opkomen als het gedrag van bestaande populaties verandert.

De bestaande drinkwaterzuiveringen zijn voldoende effectief om een eventuele toename van opportunistische pathogenen zodanig te reduceren dat er geen gevaar ontstaat voor de volksgezondheid (groei van opportunistische pathogenen in het leidingnet wordt later behandeld).

Hieruit volgen de volgende onderzoeksvragen:

- Kan er een verhoogd risico ontstaan van zoönosen door veranderende populatie of gedrag van dieren (watervogels) die drager of versterker zijn van (nieuwe) pathogenen?
- Kan verandering van de ruwwaterkwaliteit (bijv. NOM) door klimaatverandering de zuivering zodanig beïnvloeden dat deze pathogenen onvoldoende verwijderd?

6. Effecten van klimaatverandering op nagroei in het distributienet

Hiervoor is al gesignaleerd dat het uit oppervlaktewater geproduceerde drinkwater met een hogere temperatuur het pompstation zal verlaten in de toekomst. Daarnaast leidt een verhoging van de luchttemperatuur tot opwarming van het distributiesysteem en daarmee tot verhoogde drinkwatertemperaturen tijdens distributie. Hogere drinkwatertemperaturen hebben mogelijk een effect op nagroei van micro-organismen, omdat groei van micro-organismen deels wordt bepaald door de temperatuur. In een korte bureaustudie is onderzocht wat het risico is op het overschrijden van de wettelijke kwaliteitseisen van KG22, *Aeromonas*, bacteriën van de coligroep en het aantal legionellabacteriën en op groei van de meest belangrijke opportunistische ziekteverwekkende micro-organismen in drinkwater, zowel onder het huidige klimaat als in het toekomstige klimaat (2050, 2100).

Het risico van nagroei van micro-organismen in gedistribueerd drinkwater onder invloed van klimaatverandering (G en W+ scenario) is bepaald onder de aanname dat de stijging van de luchttemperatuur in dezelfde mate zal doorwerken in de temperatuur van het drinkwater in het distributiesysteem. De resultaten laten zien dat het risico op overschrijding van de wettelijke norm voor *Aeromonas* en legionellabacteriën in 2050 en 2100 groot tot zeer groot is in beide klimaatscenario's, terwijl het risico op overschrijding van de wettelijke norm voor KG22 in 2050 en 2100 zeer gering blijft. Het risico op groei van *Legionella pneumophila* in het gedistribueerde drinkwater is in 2050 in beide klimaatscenario's zeer gering. In het jaar 2100 is dat nog steeds het geval voor het gematigde klimaatscenario, maar voor het W+ scenario wordt het risico op groei van *L. pneumophila* in gedistribueerd drinkwater in 2100 ingeschat als matig. Het risico van klimaatverandering op het voorkomen van andere opportunistische ziekteverwekkende micro-organismen (non-tuberculeuze mycobacteriën, *P. aeruginosa*, *S. maltophilia* en ziekteverwekkende schimmels) kan niet goed worden geschat, omdat het effect van de watertemperatuur op groei van deze micro-organismen nog onduidelijk is.

De volgende onderzoeksvragen dienen te worden beantwoord:

- Wat is de invloed van drinkwatertemperatuur op de vermeerdering van opportunistische pathogenen (non-tuberculeuze mycobacteriën, ziekteverwekkende schimmels, *P. aeruginosa* en *S. maltophilia*) in het drinkwater distributiesysteem?
- Zijn drinkwaterstammen van opportunistische pathogenen genotypisch identiek aan patiëntstammen? Antwoord op deze vraag geeft duidelijkheid of het voorkomen van opportunistische pathogenen in drinkwater een probleem is voor de volksgezondheid.
- Wat is de gezondheidskundige betekenis van een toename van legionellabacteriën (anders dan *L. pneumophila*) in het drinkwater distributiesysteem?

7. Kwetsbaarheid van het leidingnet onder Invloed van klimaatverandering

Veranderende neerslagpatronen door klimaatverandering kunnen leiden tot grotere bewegingen van de bodem, en daarmee hogere belastingen op en spanningen in de buizen van de waterinfrastructuur. Analyse van storingsdata laat daarnaast zien dat bij hogere luchttemperaturen het aantal leidingbreuken toeneemt. Bij hogere luchttemperaturen zal het waterverbruik toenemen en daarmee de interne belasting op de buis. Er worden daarom drie typen klimaatgerelateerde risico's voor de integriteit van het drinkwaternet onderscheiden:

- a) Optreden van leidingbreuk door ongelijkmatige zettingen van de bodem. Uit storingsgegevens over de afgelopen 4 jaar blijkt dat voor ongeveer 13% van de storingen als oorzaak zetting wordt gegeven. In deze periode zijn echter geen zeer warme en droge zomers voorgekomen. Door klimaatverandering kunnen zeer droge zomers (type 2003) die nu eens in de tien jaar voorkomen veel vaker voorkomen, zodat leidingbreuk door zetting kan toenemen.
- b) Optreden van leidingbreuk door opzwellen van kleigronden (bij overgang droog-nat). Uit storingsgegevens blijkt dat ongeveer 15% van de storingen plaatsvindt in kleigrond. Het is niet bekend welk gedeelte hiervan als oorzaak opzwellen heeft, maar de inschatting is dat dat klein is. Door de toenemende droogte, afgewisseld met piekbuien, als gevolg van klimaatverandering gaat dit risico wel toenemen.
- c) Optreden van leidingbreuk door temperatuursverhogingen (toenemende belasting op de leiding). Op basis van extrapolatie van de storingsgegevens van de afgelopen 4 jaar is ingeschat dat het aantal storingen door temperatuurverandering met 11% kan toenemen in het W+ scenario.

De toename in leidingbreuken heeft tot gevolg dat het aantal leveringsonderbrekingen toeneemt (hoger aantal ondermaatse leveringsminuten; OLM). Als de breuk niet tijdig wordt gesignaleerd leidt dit tot extra waterverliezen. De overlast van deze leidingbreuken is meestal beperkt: hoewel het aantal leidingbreuken kan toenemen zullen de leidingbreuken nooit tegelijkertijd in een groot gedeelte van Nederland optreden. De verwachting is dat hoogstens op regionaal niveau meerdere leidingen tegelijk zouden kunnen breken tijdens periodes van hitte of extreme droogte. Een klein gebied kan dus korte tijd zonder water zitten totdat de breuk gerepareerd is. Bij grote breuken kunnen ontgrondingskuilen ontstaan, die mogelijk tot schade leiden in de omgeving. Daarnaast moet de kapotte leiding gerepareerd worden. Bij transportleidingen kan de overlast groter zijn. De kans op breuk is bij deze leidingen echter kleiner, omdat deze meestal zwaarder gedimensioneerd zijn.

Onderzoeksvragen zijn:

- **Hoe klimaatbestendig is PVC?** In de komende decennia zullen de leidingen meer en meer vervangen worden door PVC. Uit de huidige storingsdata blijkt vooralsnog dat PVC niet storingsgevoeliger wordt naarmate het ouder wordt. Dit is echter relatief jong materiaal. Wat gebeurt er als PVC verouderd? Is het dan nog steeds klimaatbestendig? Zo niet, zijn er alternatieven?
- **Regionale verschillen van storingen?** Klimaatverandering en de gevolgen hiervan, zoals droogte en zettingen, kunnen per regio verschillen in Nederland. Door gebruik te maken van gegevens van regionale weerstations, in combinatie met ruimtelijke storingsdata, kunnen mogelijk betere verbanden tussen weer en storing gevonden worden. Ook kan met behulp van satellietdata van zettingen (InSAR) of droogte (SMOS satelliet) een nauwkeuriger verband gevonden worden tussen storingen en droogte/zetting.

- **Klimaatextremen opzoeken?** In de analyse van de storingsdata over de afgelopen 4 jaar zitten weinig weersextremen. Belangrijke klimaateffecten kunnen hierdoor over het hoofd zijn gezien. Uitvoering van soortgelijke analyses voor andere meerjarige datasets (bijvoorbeeld uit het buitenland, waarin onze extremen wellicht meer de norm zijn) kan meer duidelijkheid scheppen.

8. Klimaatverandering en overstromingsrisico's van vitale drinkwater infrastructuur

Door klimaatverandering neemt de kans op overstromingen en extreme neerslag toe. In dit deelonderzoek is verkend wat de effecten van klimaatverandering zijn op risico's van overstroming van vitale drinkwater infrastructuur. Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van bestaande literatuur, aangevuld met een gerichte enquête over de ervaring van enkele drinkwaterbedrijven met overstromingen en wateroverlast situaties die in de afgelopen 10 jaar zijn opgetreden.

In het onderzoek zijn eerst de huidige overstromingsrisico's in beeld gebracht. Alle typen overstromingen, waaronder ook wateroverlast door extreme neerslag, kunnen leiden tot microbiologische besmetting. Met name besmetting van vitale infrastructuur die niet onder druk staat (zoals reinwaterkelders) is riskant voor de volksgezondheid aangezien dergelijk falen niet altijd tijdig wordt opgemerkt. Bovendien is de monitoring ook niet altijd op dergelijke besmettingsroutes ingesteld. Zware overstromingen door het falen van primaire waterkeringen kunnen door de hoge stroomsnelheid en grote waterdiepte fysieke schade veroorzaken aan de drinkwaterinfrastructuur. De omvang (blootstelling) van het effect kan bij elk overstromingsscenario groot zijn, namelijk het voorzieningsgebied van de besmette of beschadigde infrastructuur.

Vervolgens zijn per type overstroming de risico's van klimaatverandering bepaald:

- **Overstromen van buitendijkse gebieden:** Toename van overstromingskansen doordat in de toekomst hogere rivierwaterstanden vaker zullen voorkomen.
- **Falen van primaire waterkering:** Toename overstromingskansen door stijging zeespiegel en hogere piekafvoer op benedenrivieren. Klimaatverandering zorgt voor een snellere bodemdaling waardoor overstromingen zwaarder zijn (grotere inundatiediepte) en drempelhoogten van drinkwater infrastructuur eerder worden overschreden.
- **Falen van regionale waterkering:** Toename overstromingskansen door uitdroging van veendijken. Impact van een overstroming is beperkt doordat de hoeveelheid water in de boezems sterk gestuurd wordt door gemalen. Door bodemdaling kan de inundatiediepte wel groter zijn en drempelhoogten van drinkwatervoorzieningen zullen eerder worden overschreden.
- **Water op straat door extreme neerslag:** Toename van overstromingskansen, met name voor het W scenario.
- **Afstroming van extreme neerslag:** Toename van kans op neerslagextremen, met name voor het W scenario

In het onderzoek zijn een aantal kennisleemten en bijbehorende onderzoeksvragen geïdentificeerd.

Kennisleemte 1: Door klimaatverandering zal vaker respons nodig zijn wanneer de overstromingsfrequenties toenemen. Maar de respons blijft in eerste instantie hetzelfde. De vraag is wanneer de overstromingskansen zodanig toenemen dat het opweegt om meer

preventieve lange-termijn maatregelen toe te gaan passen dan in de huidige situatie. Oftewel, is de huidige overstromingsrisicobeheersing van bedrijven voldoende als de overstromingskansen toenemen door klimaatverandering of adaptatiemaatregelen (zoals aanwijzing noodoverloopgebieden)?

Kennisleemte 2: Voor de risicoanalyse is gebruik gemaakt van statistische relaties tussen extreme neerslag en besmetting van drinkwater uit de periode vóór 2003. Mogelijk zijn de faalkansen nadien gedaald doordat waterleidingbedrijven maatregelen hebben genomen om instromend hemelwater in reinwaterkelders te voorkomen of sneller te detecteren. De vraag is dan in hoeverre deze maatregelen effectief zijn geweest?

Kennisleemte 3: Waterleidingbedrijven hebben in hun leveringszekerheidsplan aangegeven hoe ze bij uitval van een systeemcomponent de leveringszekerheid kunnen garanderen. De vraag is of dit in de praktijk ook is getest, en of het ook nog mogelijk is om water te leveren bij gelijktijdige uitval van meerdere componenten door een gemeenschappelijke oorzaak, zoals grootschalige overstromingen?

Kennisleemte 4: Het blijkt lastig om tijdens een overstroming de waterkwaliteit zodanig goed te monitoren dat de kwaliteitseis van 10^{-4} ziektegeval per persoon per jaar gegarandeerd is. Wat zijn geschikte methoden (zoals *in situ* metingen of veldkits) om de kwaliteit van leidingwater vast te stellen tijdens een overstroming?

Tot slot is geconstateerd dat de HIS SSM module van Rijkswaterstaat geen rekening houdt met de aanwezigheid van kritische drinkwaterinfrastructuur bij het normeren van waterkeringen. Mogelijk kan in samenwerking met VEWIN geijverd worden voor een aanpak waarbij via een register van kritische infrastructuur ook rekening wordt gehouden met de drinkwatervoorziening in waterveiligheidsbeleid.

Inhoud

Samenvatting	3
Inhoud	15
1 Inleiding	17
1.1 Aanleiding voor dit rapport	17
1.2 Doel van dit rapport	19
1.3 Aanpak	19
1.4 Literatuur	20
2 Effecten klimaatverandering op de landbouw	21
2.1 Verantwoording	21
2.2 Inleiding	21
2.3 Mogelijk veranderingen en relevantie voor de waterwinning	21
2.4 Inschatting risico's	23
2.5 Conclusies en aanbevelingen / kennisvragen	27
2.6 Literatuur	27
3 Effecten klimaatverandering op grondwater onttrekkingen	29
3.1 Verantwoording	29
3.2 Toename van de beregeningsbehoefte	29
3.3 Invloed van klimaatverandering op de drinkwatervraag	31
3.4 Kennisvragen	34
3.5 Literatuur	35
4 Invloed klimaatverandering op grondwater kwantiteit, dynamiek en natuur(doelen)	37
4.1 Verantwoording	37
4.2 De huidige voorraad zoet grondwater in Nederland	37
4.3 De grondwateraanvulling: drijvende maar onzekere kracht achter het grondwatersysteem	38
4.4 Gevolgen van klimaatverandering voor de waterhuishouding volgens enkele recente hydrologische studies	42
4.5 Effecten klimaatverandering op verzilting van grondwaterwinningen	47
4.6 Klimaatverandering en grondwaterkwaliteit	48
4.7 Effecten klimaatverandering op natuur	55
4.8 Kennisvragen	59
4.9 Literatuur	60
5 Effecten klimaatverandering op afvoer en waterkwaliteit van de Rijn en de Maas	65
5.1 Verantwoording	65
5.2 Klimaatverandering en waterkwaliteit	65

5.3	Effecten klimaatverandering op de afvoeren van Rijn en Maas	65
5.4	Impact van lage afvoeren op de waterkwaliteit	70
5.5	Effecten klimaatverandering op de temperatuur van het oppervlaktewater	75
5.6	Effecten klimaatverandering op verzilting innamepunten oppervlaktewater	77
5.7	Wat betekenen deze effecten voor de zuivering ?	79
5.8	Kennisvragen	82
5.9	Literatuur	83
6	Effecten van klimaatverandering op de microbiologische kwaliteit van het oppervlaktewater	85
6.1	Verantwoording	85
6.2	Inleiding	85
6.3	<i>Clostridium botulinum</i>	85
6.4	Cyanobacteriën	86
6.5	Pathogenen	89
6.6	Kennisvragen	92
6.7	Literatuur	92
7	Microbiologische risico's van opwarming drinkwater door klimaatverandering	95
7.1	Verantwoording	95
7.2	Invloed van temperatuurstijging op nagroei in het drinkwater distributiesysteem	95
7.3	Risico klimaatverandering op nagroei problemen in het drinkwater distributiesysteem	98
7.4	Onderzoeksvragen	105
7.5	Literatuur	105
8	Kwetsbaarheid van het leidingnet voor klimaatverandering	107
8.1	Verantwoording	107
8.2	Effecten klimaatverandering op het leidingnet	107
8.3	Kans op optreden van de effecten	109
8.4	Risico voor de drinkwatervoorziening	110
8.5	Onderzoeksvragen	111
8.6	Literatuur	112
9	Overstromingsrisico's van drinkwater infrastructuur bij huidig en toekomstig klimaat	113
9.1	Verantwoording	113
9.2	Aanleiding	113
9.3	Kader voor de risicoanalyse	113
9.4	Beleidsmatig kader	117
9.5	Quick scan praktijkervaring overstromingen en drinkwater	118
9.6	Huidige risico's van overstroming voor de drinkwatersector	122
9.7	Invloed klimaatverandering op overstromingsrisico	130
9.8	Conclusie en kennisleemten	135
9.9	Literatuur	139

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor dit rapport

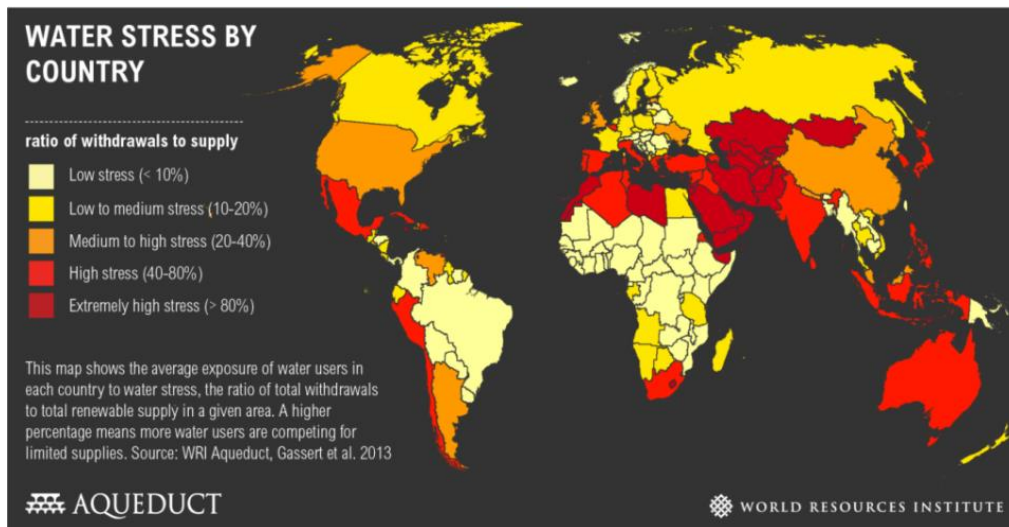
Uit het recente PBL rapport (2012): “Effecten van klimaat verandering in Nederland” blijkt zonneklaar dat het klimaat in Nederland verandert: Zo is de gemiddelde temperatuur in Nederland over de afgelopen eeuw met 1.7 graden Celsius gestegen en nam het aantal jaarlijkse zomerse dagen met bijna 20 toe. De totale hoeveelheid jaarlijkse neerslag steeg met ongeveer 20 procent en ook de frequentie van hevige regenbuien nam sterk toe. De gemeten temperatuurstijging in Nederland is circa tweemaal hoger dan die gemiddeld over de wereld en er is in Nederland in de afgelopen 20 jaar geen afzwakking van deze stijgende trend waarneembaar. Volgens de huidige inzichten zal de klimaatverandering in Nederland de komende eeuwen verder doorzetten, al is de omvang en het tempo van deze verandering onzeker. Zo kan de jaarlijkse neerslag in Nederland tot het einde van deze eeuw met 5 procent afnemen, maar ook met 6 procent stijgen. Deze onzekerheid bemoeilijkt het inspelen op klimaateffecten.

Klimaatverandering heeft in Nederland al uiteenlopende effecten. Sommige van deze effecten zijn gunstig, zoals productieverhoging in de landbouw, gemiddeld minder sterfte in de winterperiode en een toename van het aantal gunstige dagen voor recreatie. Voorbeelden van ongunstige effecten zijn de toename van wateroverlast als gevolg van piekbuien, een toegenomen kans op allergieën bij daarvoor gevoelige mensen, meer sterfte bij hittegolven en een toegenomen druk op de natuur. Ook deze effecten zullen naar verwachting doorzetten. Mogelijke kansen die voortvloeien uit de geografische positie van Nederland liggen er in het bijzonder bij de landbouw en de recreatie (PBL, 2012).

Ongunstige effecten van klimaatverandering hangen vooral samen met veranderingen in het optreden van extreme weerssituaties (droogte, noodweer, etc). Het gaat hier zowel om een toename van de kans als om een toename van het effect van extreme gebeurtenissen. De effecten manifesteren zich vooral in stedelijke omgeving (wateroverlast, hittestress) maar ook in het landelijk gebied (bijv. verdroging). Klimaatverandering is zowel van invloed op het aanbod van water als de vraag naar water. De beschikbaarheid van voldoende zoet water van de juiste kwaliteit voor de verschillende gebruiksfuncties (drinkwater, landbouw, industrie, energie, stedelijk water, natuur) is een steeds groter maatschappelijk probleem. In een groeiend aantal landen is er nu al sprake van water stress, zoals Figuur 1-1 laat zien.

Naast klimaatveranderingen zullen ook mogelijke wijzigingen in het socio-economische gebied, zoals vergrijzing, verstedelijking en voortschrijdende technologische ontwikkelingen, van invloed zijn op de toekomstige vraag en aanbod van water, en op mogelijke aanpassingsstrategieën. Het effect van klimaatverandering en de mogelijke aanpassing daaraan moet dus altijd in een brede maatschappelijke context worden bekeken.

Naar verwachting zullen de effecten van klimaatverandering de komende decennia doorzetten, al is de mate waarin dit zal gebeuren onzeker. Voor de (drink-)watersector betekent dit dat men moet uitgaan van prognoses, gebaseerd op klimaatscenario's, waarschijnlijkheidsberekeningen en risicoschattingen. Leidraad bij de inschatting van de risico's van klimaatverandering zijn de klimaatscenario's van het KNMI (Tabel 1-1), die ook in andere relevante beleidskaders worden gehanteerd, zoals het Deltaprogramma.



Figuur 1-1. Mate van water stress op mondiaal niveau (World Resources Institute, 2013).

Op hoofdlijnen laten de KNMI scenario's de volgende ontwikkelingen zien:

- de winters worden milder en natter (mate waarin varieert per scenario)
- de zomers worden warmer en veel droger (G+, W+) of enkel warmer (G, W)

Tabel 1-1. Samenvatting van de KNMI klimaatscenario's (2006).

Seizoen*	parameter	Scenario G	Scenario G+	Scenario W	Scenario W+
Winter	Gemiddelde temperatuur	+ 0,9 °C	+ 1,1 °C	+ 1,8 °C	+ 2,3 °C
Winter	Gemiddelde neerslaghoeveelheid	+ 4%	+ 7%	+ 7%	+ 14%
Zomer	Gemiddelde temperatuur	+ 0,9 °C	+ 1,4 °C	+ 1,7 °C	+ 2,8 °C
Zomer	Gemiddelde neerslaghoeveelheid	+ 3%	- 10%	+ 6%	- 19%
Zomer	Potentiële verdamping	+ 3%	+ 8%	+ 7%	+ 15%

* winter = januari t/m maart; zomer is juni t/m augustus

Concreet betekent dit bijvoorbeeld dat er meer regen zal vallen in de winter (in alle scenario's), waardoor de grondwateraanvulling toeneemt en de overstromingsrisico's stijgen. De kans op hittegolven en droogte neemt toe in de zomer, vooral bij de droge scenario's G+ en W+, door een toename van oostenwinden in de zomer. Bij de scenario's G en W wordt de toename van de potentiële verdamping gecompenseerd door de toename van de regenval, waardoor de effecten op de grondwater aanvulling minder groot zullen zijn.

De mogelijke effecten van klimaatverandering op de drinkwatervoorziening (van bron tot tap) zijn in beeld gebracht in eerder BTO onderzoek (KWR, 2007). Dit rapport is een goed uitgangspunt voor de huidige risicoanalyse, maar het is niet meer op alle punten actueel. Onlangs zijn er verschillende studies verschenen die meer licht werpen op de risico's van klimaatverandering voor drinkwater, namelijk:

- Het PBL rapport: "Effecten van klimaatverandering in Nederland: 2012";
- De aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse Zoetwatervoorziening in Nederland, uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma (Deltares, 2012);
- Het RIVM rapport "Effecten klimaatontwikkeling op de waterkwaliteit bij innamepunten voor drinkwater" (RIVM, 2012).

Deze rapporten werpen meer licht op relevante impacts voor de drinkwatervoorziening, zoals de verziltingsproblematiek van de innamepunten in de delta, de beschikbaarheid van Maaswater voor de drinkwatervoorziening, de kwaliteit van het oppervlaktewater tijdens langdurige droogte, de verdroging van waterwingebieden en natuurgebieden en de bedreiging van de fysieke infrastructuur door bijv. zettingen of overstroming.

Daarnaast hebben zich de afgelopen jaren diverse extreme weersituaties voorgedaan (hittegolven, piekbuien, langdurige droogte) die kunnen worden beschouwd als een voorproefje van de mogelijke effecten van klimaatverandering. Om deze redenen is een actualisatie van de eerder uitgevoerde risicoanalyse zeer gewenst.

1.2 Doel van dit rapport

Het doel van de studie is om een inhoudelijk kader te scheppen voor de BTO themagroep Klimaatbestendige watersector. De studie is bedoeld als gemeenschappelijke basis voor de onderzoeksagenda van de themagroep in de komende jaren. De studie moet leiden tot gefundeerde aanbevelingen voor verdiepend onderzoek. De Themagroep maakt zelf een afweging welke onderwerpen nader worden uitgewerkt, op basis van belang en urgentie van de voorgestelde onderwerpen.

1.3 Aanpak

Dit rapport bestaat uit acht deelstudies, die zijn gebaseerd op literatuuronderzoek, interviews met deskundigen en eigen expertise. Gezien het grote aantal aspecten dat wordt onderzocht, heeft deze studie noodzakelijkerwijs het karakter van een quick scan. Het is dus geen diepgaande analyse van alle mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector. Getracht is om snel te komen tot een eerste inschatting van de grootste risico's van klimaatverandering voor de sector, met een afgewogen balans tussen diepgang en mate van zekerheid. De grootste knelpunten worden opgepakt via vervolgonderzoek.

Op basis van een inventariserende workshop met de themagroep (november 2012) zijn de volgende onderwerpen (thema's) in dit rapport gekozen voor nadere uitwerking:

- Effecten van klimaatverandering op de landbouw
- Effecten van klimaatverandering op de winning van grondwater
- Effecten van klimaatverandering op grondwaterdynamiek en natuur
- Effecten van klimaatverandering op de chemische kwaliteit van het oppervlaktewater
- Effecten van klimaatverandering op de microbiologische kwaliteit van het oppervlaktewater

- Effecten van klimaatverandering op nagroei in het distributienet
- Kwetsbaarheid van het leidingnet onder Invloed van klimaatverandering
- Klimaatverandering en overstromingsrisico's van vitale drinkwater infrastructuur

1.4 Literatuur

- Deltares (2012). Zoetwatervoorziening in Nederland. Aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw. Deltares, Utrecht, 2e (gecorrigeerde) druk. F. Klijn, E. van Velzen, J. ter Maat & J. Hunink. Deltaprogramma, Deelprogramma Zoetwater.
- KWR (2007). Risicoanalyse van de gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector; waterkwaliteit, waterkwantiteit, ecologie, productie en distributie. J.J.G. Zwolsman, D.G. Cirkel, A. Doomen, M.H. Jalink, G. van den Berg, C. Maas, J. Vreeburg, G. Ijpelaar & G. Mesman. Rapport BTO 2007.032.
- PBL (2012). Effecten van klimaatverandering in Nederland: 2012. J. van Minnen & W. Ligtoet. PBL rapport 500193003.
- RIVM (2012). Effecten klimaatontwikkeling op de waterkwaliteit bij innamepunten voor drinkwater. S. Wuijts, C.I. Bak-Eijsberg, E.H. van Velzen & N.G.F.M. van der Aa. RIVM rapport 609716004/2012.

2 Effecten klimaatverandering op de landbouw

2.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Han Runhaar (KWR), op basis van een literatuurstudie en interviews met Greet Blom (PRI, Wageningen) en Leo Puijker (KWR).

2.2 Inleiding

Klimaatverandering kan indirect van invloed zijn op de waterwinning in Nederland, en wel via veranderingen in landgebruik. Met name veranderingen in de landbouw zijn potentieel van grote invloed, omdat landbouw qua oppervlakte de dominante gebruiksfunctie is, en een belangrijke bron van verontreinigingen, waaronder nutriënten en bestrijdingsmiddelen. In dit hoofdstuk wordt aangegeven welke invloed klimaatverandering kan hebben op het landbouwkundig gebruik en in hoeverre dat mogelijke risico's oplevert voor de waterwinning in Nederland. Daarbij moet de kanttekening worden gemaakt dat klimaatverandering niet de enige factor is die van invloed is op het landgebruik. Sociaaleconomische factoren zijn minstens zo belangrijk (Dekkers et al., 2012). Een belangrijke vraag in dit verband is hoe het gemeenschappelijk landbouwbeleid (CAP) van de Europese Unie zich verder zal ontwikkelen. Het streven van de EU is naar een verdere verduurzaming en vermindering van de milieudruk door de landbouw. De toegenomen vraag naar voedsel en de liberalisering van de wereldhandel vormen echter tegenkrachten die het moeilijk zullen maken om dit voornemen om te zetten in de praktijk.

Een andere factor die van invloed is op het gebruik van bestrijdingsmiddelen is ontwikkeling van nieuwe bestrijdingsmethoden. Gentechnologie en het inbouwen van natuurlijke resistentie tegen plagen is potentieel een zeer effectief middel om het middelengebruik te beperken (Blom-Zandstra en Goossen, 2010). Gentechnologie kan echter ook bijdragen aan een toename van het gebruik van middelen door het inbouwen van resistentie tegen bepaalde bestrijdingsmiddelen (zoals nu gebeurt met glyfosfaat).

Sociaal-economische en technologische ontwikkelingen zijn dus van groot belang voor de toekomstige landbouwpraktijk, maar worden hier verder buiten beschouwing gelaten. Het gaat in dit hoofdstuk nadrukkelijk om het benoemen van mogelijke risico's voor de drinkwatervoorziening door lange-termijn effecten van klimaatverandering op de landbouw. In hoeverre deze effecten ook daadwerkelijk zullen optreden kan niet worden aangegeven. Vanuit het perspectief van de landbouw kan klimaatverandering ook positieve effecten hebben, zoals een verlenging van het groeiseizoen en de teelt van andere gewassen.

2.3 Mogelijk veranderingen en relevantie voor de waterwinning

In de PBL-studie "Effecten van klimaatverandering in Nederland" (Van Minnen en Ligtoet, 2012) en in de PRI/Alterra-studie "Effecten van klimaatverandering op Landbouw en Natuur" (Blom et al., 2008) worden een groot aantal mogelijke effecten van klimaatverandering op de landbouw opgesomd. Een deel van de genoemde effecten is voor deze studie minder relevant omdat het gaat om effecten die alleen voor de landbouw zelf van belang zijn. Een deel van de genoemde effecten is echter ook mogelijk van invloed op de waterwinning. Deze effecten zijn:

- Grotere productiviteit door een langer groeiseizoen, hogere temperatuur en toegenomen koolzuurgehalte van de atmosfeer;
- Nieuwe teelten van warmte minnende soorten worden mogelijk;
- Toename van uitspoeling/verlies van nutriënten door vernatting.
- Toename van ziektes en plagen door nattere omstandigheden (schimmels) en hogere jaargemiddelde temperaturen (nieuwe plaagsoorten, minder sterfte in winter, meer generaties plaaginsecten).

Aanvullend op deze studies kunnen nog de volgende mogelijk relevante effecten worden benoemd:

- Toename open teelten
- Toename beregeningsbehoefte (grondwater en/of oppervlaktewater)

Zowel de grotere productiviteit als de toename van ziektes en plagen leiden tot een groter gebruik van bestrijdingsmiddelen. Deels zal dit om bestaande middelen gaan, maar er zullen ook nieuwe bestrijdingsmiddelen worden ontwikkeld. Door Blom et al. (2008, bijlage 1) wordt de mogelijke toename van ziektes en plagen verder uitgewerkt per type gewas, met vermelding van het achterliggende mechanisme (Tabel 2-1). Uit de opsomming van de achterliggende oorzaken is op te maken dat de grootste toename van plantenziekten te verwachten is in klimaatscenario's waarin temperatuurverhoging gepaard gaat met een toename van de neerslag in de zomer (het W scenario).

Tabel 2-1. Mogelijke toename ziekten en plagen als gevolg van klimaatverandering per gewas. Bron: Blom et al., 2008.

Gewas	Ziekten en plagen	Achterliggende oorzaak
Gras	engerlingen	vernatting
	aaltjes	meer generaties door hogere temperatuur
Granen	schimmelziekten	nat, warm najaar en minder koude winters
	Q-nematoden	verminderde wintersterfte
Maïs	maïswortelboorder	nat, minder koude winter
	aaltjes (<i>Pratylenchus</i> , <i>Meloidogyne</i>)	-
Suikerbieten	bietencysteaaaltjes	meer generaties bij hogere waterstanden
	<i>Rhizomania</i> (virusziekte)	vernatting
Aardappel	bruinrot (door bacterie <i>Ralstonia</i>)	verspreiding via oppervlaktewater bij vernatting
	stengelaaltjes	toename natte perioden
	aardappelziekte (door schijnschimmel <i>Phytophthora</i>)	hogere temperatuur en hoge relatieve luchtvochtigheid
	toename luisdruk en daarmee verspreiding van virussen	
Bloembollen	schimmelziekten en stengelaaltjes	hogere temperatuur en hoge relatieve luchtvochtigheid

Temperatuurverhoging kan de omstandigheden geschikt maken voor de teelt van meer warmte minnende soorten uit zuidelijke klimaatzones. Verhagen et al (2000) noemen zonnebloem, artisjok en druif als voorbeeld. De teelt van nieuwe gewassen kan leiden tot de introductie van nieuwe bestrijdingsmiddelen of een toename in het gebruik van nu al

gebruikte bestrijdingsmiddelen. Zo kan de uitbreiding van de druiventeelt leiden tot een forse toename van het gebruik van fungiciden, die in de druiventeelt veel worden toegepast. In landen als Griekenland, Spanje, Frankrijk, Italië, Oostenrijk en Portugal levert de teelt aan druiven de grootste bijdrage aan het totale landelijke gebruik aan bestrijdingsmiddelen. Het gaat met name om kopersulfaat, dat in grote hoeveelheden wordt gebruikt in de druiventeelt (tot enkele tientallen kg/ha). Deze stof vormt voor de drinkwaterbereiding geen serieuze bedreiging. In toenemende mate wordt echter ook gebruik gemaakt van meer actieve stoffen, zoals dithiocarbamaten. Deze stoffen kunnen wel een bedreiging opleveren voor de drinkwaterbereiding.

Temperatuurverhoging kan de omstandigheden ook geschikt maken voor de open teelt van gewassen die nu voornamelijk in kassen worden gekweekt. Gedacht kan worden aan snijbloemen. In vergelijking met teelten in kassen, is er bij teelten op volle grond meer uitstoot van bestrijdingsmiddelen. Volgens Blom (PRI, mond. med. Juni 2013) is het echter onwaarschijnlijk dat er als gevolg van klimaatverandering een verschuiving zal optreden naar open teelten. De betere beheersbaarheid van de groeiomstandigheden in kassen vormt een voordeel dat ook bij gemiddeld hogere temperaturen voor veel gewassen de doorslag zal blijven geven voor een gesloten teelt.

Door toename van intensieve buien zal de afspoeling van nutriënten uit landbouwpercelen toenemen. Hoe groot dit effect zal zijn is onbekend. Waar het gaat om stikstof kan het zelfs zijn dat er netto een afname van de belasting van grond- en oppervlaktewater plaatsvindt als gevolg van toegenomen denitrificatie bij vernatting.

Tenslotte kan een verlenging van het groeiseizoen in combinatie met drogere zomers leiden tot een toename van de beregening met grond- en of oppervlaktewater. Door Klijn et al. (2012) wordt in het scenario W+/RC voor 2050 een toename van het gewasverdampings-tekort met een factor 3 en een toename van de beregeningsbehoefte met circa 60% berekend. De toename van de beregeningsbehoefte is daarbij waarschijnlijk onderschat doordat wordt uitgegaan van de huidige beregeningsinfrastructuur.

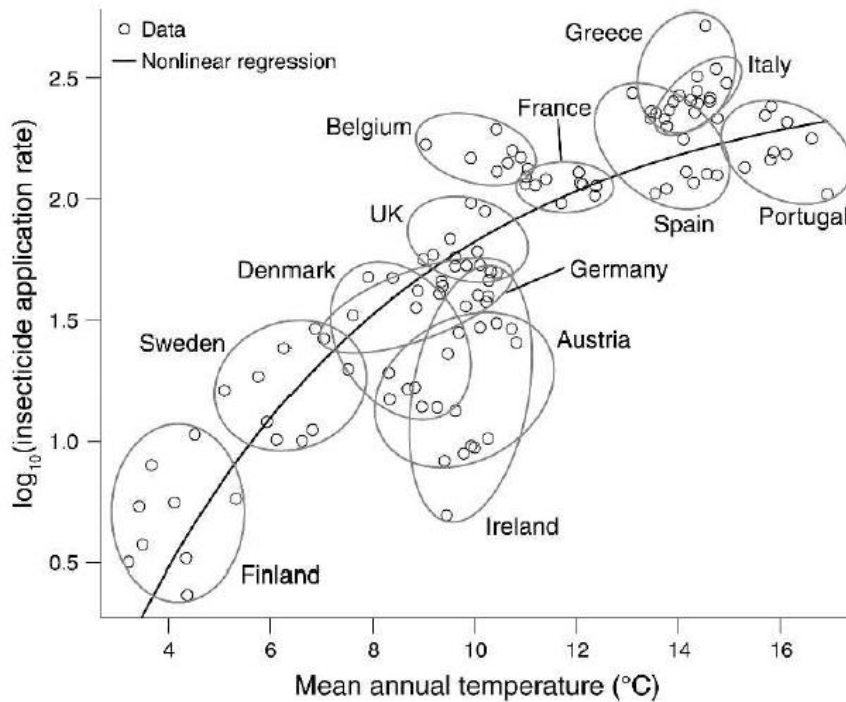
Beregening met grondwater kan leiden tot een vermindering van grondwatervoorraden. In hoeverre klimaatverandering zal leiden tot een toename van de beregening is sterk afhankelijk van het beleid. Op dit moment is het beleid ten aanzien van beregening zeer restrictief. Wanneer vaker zomerse droogtes optreden en tegelijkertijd de potentiële productie stijgt door hogere temperaturen zal de winstgevendheid van beregening echter sterk toenemen. Daarmee zal ook de druk toenemen om huidige restricties ten aanzien van beregening te laten vervallen.

2.4 Inschatting risico's

2.4.1 Toename bestrijdingsmiddelengebruik

Voor de waterwinning vormt met name de mogelijke toename van het gebruik van bestrijdingsmiddelen door de landbouw een risico. Uitbreiding van het aantal stoffen en toename van de hoeveelheden per stof in de bronnen voor drinkwaterbereiding kunnen leiden tot een aanzienlijke toename van de zuiveringskosten en van de risico's voor de volksgezondheid.

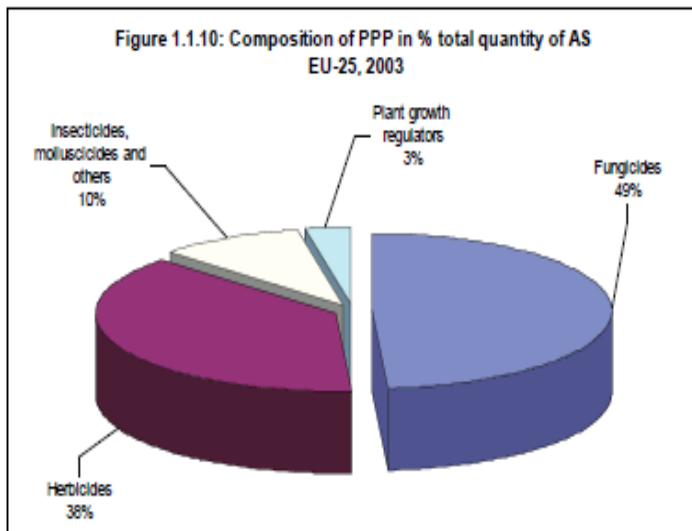
Door Kattwinkel et al. (2011) is onderzoek gedaan naar het verband tussen de (gemiddelde) luchttemperatuur en het gebruik van insecticiden in een groot aantal landen in Europa. Hoewel het gebruik van bestrijdingsmiddelen ook door andere factoren wordt bepaald, lijkt er een sterk verband aanwezig tussen het gebruik van insecticiden en de luchttemperatuur. Bij hogere temperaturen neemt het gebruik van insecticiden toe (Figuur 2-1).



Figuur 2-1. Relatie tussen pesticidegebruik (g/ha,jaar) en de jaargemiddelde temperatuur in verschillende EU landen. Uit: Kattwinkel et al. (2011).

Volgens de berekeningen door Kattwinkel et al. zou een temperatuurstijging van 2,6 $^{\circ}\text{C}$ tussen 1990 en 2050 in het W+ scenario leiden tot meer dan een verdubbeling van het insecticidegebruik (let op de logaritmische schaal in Figuur 2-1!). Daarbij dient wel de kanttekening te worden gemaakt dat het gebruik van pesticiden niet alleen wordt bepaald door klimaat en type gewas, maar ook door het milieubeleid en de handhaving daarvan. Het is niet onwaarschijnlijk dat het grotere insecticidegebruik in Griekenland, Italië, Spanje en Portugal mede wordt veroorzaakt door een lankmoediger beleid ten aanzien van het gebruik van bestrijdingsmiddelen, of een minder stringente handhaving. Een analyse van de toename van het pesticidegebruik in de Verenigde Staten tussen 2000 en 2090 door Chen en McCarl (2001) geeft veel lagere schattingen, in de orde van 10-20%. Daarbij is uitgegaan van relaties tussen klimaat (neerslag en temperatuur) en pesticide gebruik, afgeleid uit een analyse van het pesticide gebruik per staat en per gewas tussen 1991 en 1997. Uit deze analyse blijkt dat vooral de hoeveelheid neerslag van invloed is op het pesticide gebruik. Koleva (2010) berekent voor de Verenigde Staten tot 2100 een toename van het pesticidegebruik met 14 tot 33%, met de grootste toename in de staten Florida, California, Georgia en Texas.

Insecticiden maken maar een beperkt aandeel uit (ca. 10%) van het totale gebruik aan bestrijdingsmiddelen in Europa (zie Figuur 2-2). Het overgrote aandeel van het gebruik betreft fungiciden (werkzaam tegen schimmels) en herbiciden (onkruidbestrijding). Schimmels en onkruid groeien het beste onder warme en vochtige omstandigheden. De impact van klimaatverandering op het toekomstige gebruik van bestrijdingsmiddelen verloopt dus niet alleen via veranderingen van de luchttemperatuur, maar ook (en vooral) via veranderingen in neerslag dynamiek. Wanneer hogere temperaturen gepaard gaan met een toegenomen neerslag in de zomer zal het gebruik van fungiciden en herbiciden sterk toenemen, terwijl bij langdurig warme en droge zomers het gebruik van deze middelen juist zal afnemen. Daarom is voor uit- en afspoeling van fungiciden en herbiciden in tabel 2-2 naast scenario's G en W+ ook het klimaatscenario W opgenomen, omdat in dat scenario meer natte en warme zomers verwacht worden.



Figuur 2-2. Verdeling van het gebruik van bestrijdingsmiddelen in de EU (situatie 2003) over fungiciden, herbiciden en insecticiden. Bron: Eurostat, 2007.

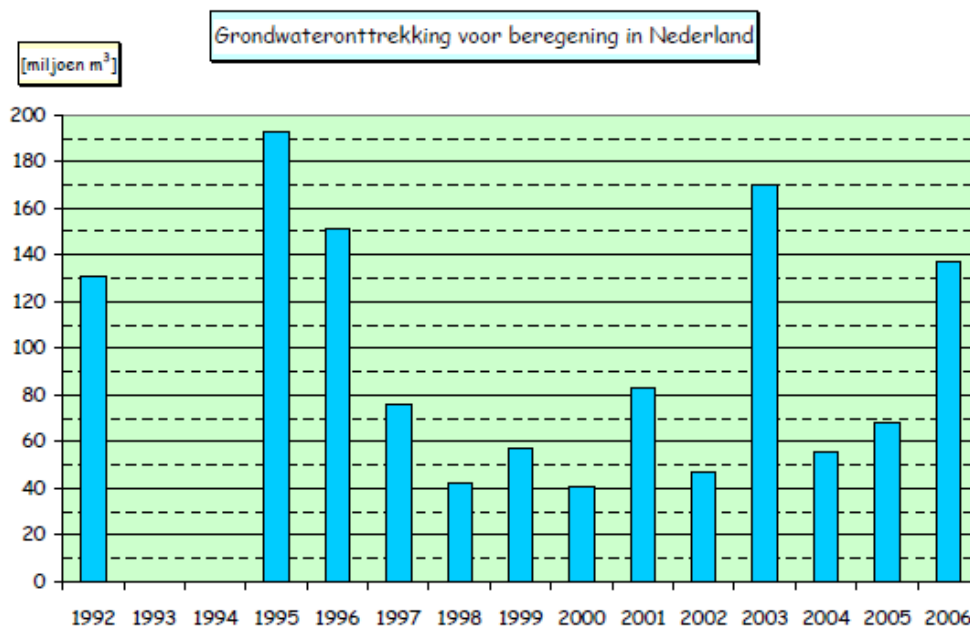
In Nederland zijn er voorlopig nog geen aanwijzingen dat temperatuurstijging leidt tot een toenemend middelengebruik. Hoewel de gemiddelde temperatuur in Nederland de afgelopen twintig jaar met bijna een graad is toegenomen (KNMI, 2008), is de belasting van het oppervlakte- en grondwater met bestrijdingsmiddelen juist afgenomen. Dat komt vooral door landelijk beleid, zoals de uitvoering van het meerjarenprogramma gewasbescherming. Eventuele effecten van een hogere temperatuur op het gebruik van bestrijdingsmiddelen zijn daardoor onopgemerkt gebleven.

2.4.2 Toename beregening

Toename van beregening vanuit grondwater kan leiden tot extra druk op grondwater voorraden. Dit risico is het grootste in scenario W+, waarin door toegenomen verdamping en afgenomen neerslaghoeveelheden in de zomer het verdampingstekort sterk toeneemt. In een jaar met een gemiddeld neerslagtekort wordt momenteel in Nederland volgens Stuurman et al. (2008) ca 100 miljoen m³ grondwater voor beregening onttrokken. Dit is 8-9 % van de totale jaarlijkse grondwateronttrekking in Nederland. In een droog jaar (1995, 2003) kan dit volgens Stuurman et al. oplopen tot 150-200 miljoen m³ (12-15% van de totale onttrekking; zie Figuur 2-3). Met name in scenario W+ zal de toegenomen verdamping in combinatie met een afgenomen hoeveelheid neerslag leiden tot een forse toename in de vraag naar grondwater voor beregening. Op basis van de statistische relatie tussen neerslagtekort en beregening uit grondwater schatten Stuurman et al. in dat in scenario W+ de beregening met grondwater in een gemiddeld jaar zal toenemen van 100 naar 185 miljoen m³. Omdat de grondwateraanvulling in de winter ook in scenario W+ juist toeneemt zal het netto effect op de winbare hoeveelheid grondwater beperkt zijn, zodat de grondwatervoorraad niet direct in gevaar komt. Wel zal de toegenomen grondwateronttrekking nadelige effecten hebben op de natuur, wat mogelijk het draagvlak voor grondwateronttrekking als geheel zal verminderen.

2.4.3 Toename nutriënten

De risico's van toegenomen uitspoeling en afspoeling van nutriënten voor de drinkwater voorziening worden als gering ingeschat. Anders dan bij bestrijdingsmiddelen gaat het om een beperkt aantal stoffen (fosfaat, ammonium en nitraat) waarvan ammonium en fosfaat relatief goed zijn te verwijderen. Wel zal een toename van nutriëntengehaltes in plassen, sloten en meren een extra bijdrage leveren aan het optreden van blauwalgenbloei (zie Hoofdstuk 6), met mogelijke risico's voor de waterkwaliteit (cyanotoxines).



Figuur 2-3. Jaarlijkse grondwateronttrekking voor beregening in Nederland, door Stuurman et al. (2008) afgeleid uit ramingen van CBS-LEI voor heel Nederland (gegevens t/m 1999) en provinciale ramingen (vanaf 2000).

2.4.4 Risicomatrix

De hiervoor besproken mogelijke effecten van klimaatverandering op het landgebruik en de risico's daarvan voor de drinkwatervoorziening worden samengevat in onderstaande Tabel.

Tabel 2-2. Inschatting risico's van veranderingen in landgebruik door klimaatverandering op de drinkwatervoorziening

Indirecte effecten landgebruik	Ernst	Scenario	Verwachte verandering				Risico
			Af-naming	gelijk blijvend	toename	sterke toename	
Uit- en afspoeling pesticiden	groot*	G					gering
		W+				?	matig tot groot
Uit- en afspoeling fungiciden / herbiciden	groot*	G					gering
		W+					zeer gering
		W					groot
Schaarste grondwater	matig	G					gering
		W+			?	?	matig tot groot
Uit- en afspoeling nutriënten	Gering **	G			?		gering
		W+			?		gering

*) Gezondheidsrisico's, hoge zuiveringskosten, uitgebreide schaal (diffuse verontreiniging)

***) Relatief goed te verwijderen, beperkt gezondheidsrisico (alleen voor nitraat)

2.5 Conclusies en aanbevelingen / kennisvragen

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat klimaatverandering kan leiden tot sterke toename van emissies van bestrijdingsmiddelen uit de landbouw. Het risico is vooral groot in scenario's waarin de zomers niet alleen warmer maar ook vochtiger worden (W scenario), vanwege de sterk toegenomen noodzaak voor bestrijding van schimmels, ziektes en plagen.

Naast klimaatverandering zijn er andere belangrijke factoren van invloed op het gebruik van bestrijdingsmiddelen in de landbouw, waarbij met name technologische innovatie (zoals gentechnologie) en sociaal-economische factoren (EU landbouwbeleid) moeten worden genoemd. Hoe deze factoren gaan uitpakken in de praktijk en wat hun relatieve belang is ten opzichte van klimaatverandering valt op dit moment niet te zeggen.

Klimaatverandering kan daarnaast leiden tot een substantiële toename van beregening uit grondwater, waardoor nadelige effecten op de natuur kunnen optreden, wat mogelijk het draagvlak voor grondwateronttrekking als geheel zal verminderen.

De volgende aanbevelingen voor onderzoek kunnen worden gedaan:

1. *Nader uitwerken risico's bestrijdingsmiddelen bij klimaatverandering*

- Het leggen van een meer causale relatie tussen klimaat parameters (temperatuur, neerslag) en het gebruik van bestrijdingsmiddelen, waardoor onderbouwde prognoses van het toekomstige gebruik en de emissie van bestrijdingsmiddelen in de landbouw kunnen worden gemaakt.
- Het in kaart brengen van de risico's van toekomstige concentraties aan bestrijdingsmiddelen voor de drinkwatervoorziening (gezondheidsrisico's, mogelijkheden detectie en verwijdering, kosten verwijdering)

2. *Verkenning van de gecombineerde invloed van klimaatverandering en toename van de beregeningsbehoefte op de omvang en dynamiek van grondwatervoorraden.*

Bij de uitwerking van deze onderzoeksvragen ligt samenwerking met Alterra, PRI, Deltares en PBL voor de hand.

2.6 Literatuur

- Blom, G., M. Paulissen, C. Vos en H. Agricola, 2008. Effecten van klimaatverandering op Landbouw en Natuur. Nationale knelpuntenkaart en Adaptatiestrategieën. Rapport 182, Plant Research International, Wageningen.
- Blom, G. & H. Goosen, 2010. Klimaatverandering: kansen voor de landbouw. Rapport 345. Plant Research International, Wageningen.
- Cheng, C.C. & B.A. McCarl, 2001. An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change. *Climatic Change* 50:475-487.
- Dekkers, J., E. Koomen, C. Jacobs-Crisioni & B. Rijken (2012). Scenario-based projections of future land use in the Netherlands. VU University, Amsterdam.
- Eurostat, 2007. The use of plant protection products in the European Union. Data 1992-2003. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Kattwinkel, M., Kuhne, J, Foit, K. & M. Liess, 2011. Climate change, agricultural insecticide exposure, and risk for freshwater communities. *Ecological Applications* 21: 2068-2081.

- Klijn, F., E. van Velzen, J. ter Maat en J. Hunink, 2012. Zoetwater voorziening in Nederland. Aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw. Deltares, Utrecht, 2e (gecorrigeerde) druk.
- KNMI, 2008. De toestand van het klimaat in Nederland 2008. KNMI, De Bilt.
- Koleva, N.G., & U.A. Schneider, 2009. The impact of climatic change on the external cost of pesticide applications in US agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability* 7: 203-216.
- Koleva, N.G., 2010. Climate change and pesticide use. An integrated economic analysis. Dissertation, University Hamburg.
- Ligtvoet, W. & J.G. van Minnen (eds.), 2012. Effecten van klimaatverandering in Nederland. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- Stuurman, S., P. Baggelaar, W. Berendrecht, J. Buma, P. de Louw & G. Oude Essink, 2008. Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering. TNO-rapport 2008-U-R0074/B. TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht.
- Verhagen, A., Blom, M., Kuikman, P.J., Den Belder, E., Brandenbrugg, W.A., Elderson, J., Hermans, C.M.L., Schaap, B.F., Van den Akker, J.J.H., Vellinga, T.V. & C. Waalwijk, 2009. Naar een klimaatbestendiger landbouw in Nederland. Quickscan en agendering van onderzoek. Nota 613. PRI, Wageningen.

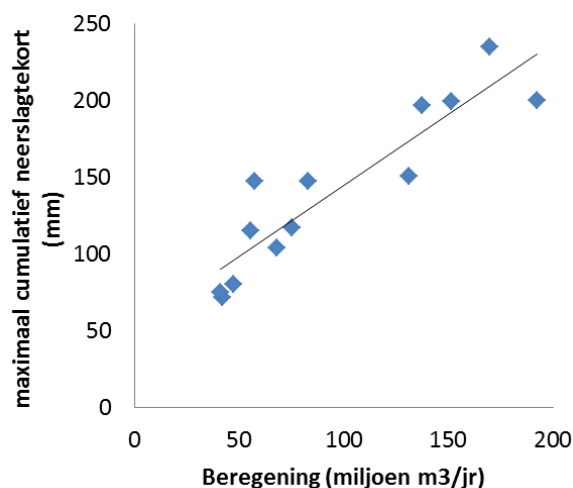
3 Effecten klimaatverandering op grondwater onttrekkingen

3.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Gijsbert Cirkel (KWR), op basis van beschikbare literatuur en expertkennis.

3.2 Toename van de beregeningsbehoefte

Vochttekort is de belangrijkste aanleiding voor beregening in landbouwgebieden. Sinds het extreem droge jaar 1976 is het aantal beregeningsinstallaties in Nederland sterk toegenomen. Beregening vindt plaats uit oppervlaktewater, maar ook uit grondwater. Het grootste aantal beregeningsinstallaties waarbij grondwater wordt onttrokken, bevindt zich in Noord Brabant en Limburg. Daarna volgen de provincies Gelderland en Overijssel. De grondwateronttrekkingen voor beregening kunnen aanzienlijk zijn en oplopen van 42 miljoen m³/jr in een nat jaar (1998) tot 170 miljoen m³/jr in een droog jaar (2003). In een jaar met een gemiddeld neerslagtekort wordt in Nederland momenteel ongeveer 100 miljoen m³ grondwater voor beregening onttrokken (Stuurman *et al.*, 2008). Dit is ongeveer 8% van de totale netto grondwateronttrekking. In droge jaren kan de onttrekking oplopen tot 200 miljoen m³ wat overeenkomt met 16% van de totale netto jaarlijkse grondwateronttrekking in Nederland (Figuur 3-1). Het bijzondere van onttrekkingen voor beregening is dat deze in een periode van enkele weken per jaar plaats vindt. De intensiteit van de onttrekking is dan ook zeer hoog. Stuurman *et al.* (2008) becijferen dat binnen deze korte periodes de onttrekking voor beregening 2 tot 3 maal groter is dan alle overige Nederlandse onttrekkingen samen.



Figuur 3-1. Beregening uit grondwater (miljoen m³/jr) uitgezet tegen het maximaal cumulatief neerslagtekort (mm) (Brouwer *et al.*, 2000; Boerefijn & Aarts, 2007; van der Veen & Vrolijk, 2007; Stuurman *et al.*, 2008).

Gezien de sterke relatie tussen het weer en de beregeningsgift werken veranderingen in het klimaat direct door op de beregeningsbehoefte van de landbouw. Door Stuurman *et al.* (2008) is met behulp van de regressielijn in Figuur 3-1 en de KNMI-2006 scenario's geschat hoe de watervraag voor beregening kan toenemen bij ongewijzigd beleid. Als gevolg van toenemende zomerdroogte neemt de beregeningsbehoefte uit grondwater in een gemiddeld jaar toe met respectievelijk 5, 11, 30 en 68 miljoen m³/jr in respectievelijk de scenario's G, W, G+, W+, aldus deze berekening. Hiermee kan de grondwateronttrekking voor beregening in 2050 tussen de 5 en 70% toenemen. Ook de kans op droge jaren neemt toe. Uit de studie van Stuurman *et al.* (2008) blijkt dat de herhalingstijd van een droog jaar als 2003 (met een beregeningsgift uit grondwater van ca. 170 miljoen m³/jr) verschuift van 10 jaar naar 2 jaar.

Uiteraard is er naast het klimaat nog een aantal andere ontwikkelingen die de onttrekking door beregening beïnvloeden. De belangrijkste hierbij is de ontwikkeling van het areaal landbouwgrond en het type teelt. Daarnaast speelt het door de overheid gehanteerde beleid een grote rol. Een duidelijke trend is een toename in bedrijfsgrootte, waardoor het voor bedrijven makkelijker wordt om te investeren in beregeningsinstallaties. Hoewel het totale areaal landbouwgrond afneemt, neemt het areaal waterintensieve teelten (boomkwekerijen, vollegrondsgroente, pot en perkplanten) nog steeds toe (CBS, 2012). De verwachting is dan ook dat ook de beregeningvraag zal blijven toenemen. De meeste provincies voeren actief beleid op beregening, waarbij restricties gelden op de pompcapaciteit, de onttrekkingsdiepte en de afstand tot natuurgebieden. In Noord-Brabant en Limburg wordt een flexibel stand-still beleid gevoerd om de hoeveelheden grondwater niet verder aan te tasten. In de huidige situatie wordt de beschikbare (vergunde) capaciteit alleen tijdens droogtes volledig benut. Met het toenemen van het aantal droge zomers zal dus ook de benutting van de huidige vergunde capaciteit en daarmee de effecten op de omgeving toenemen. Hoewel het beleid de toename zal temperen, is het gezien het maatschappelijke belang niet waarschijnlijk dat dusdanige beleidsmatige drempels worden opgeworpen dat de toename geheel teniet wordt gegaan (Boerefijn & Aarts, 2007).

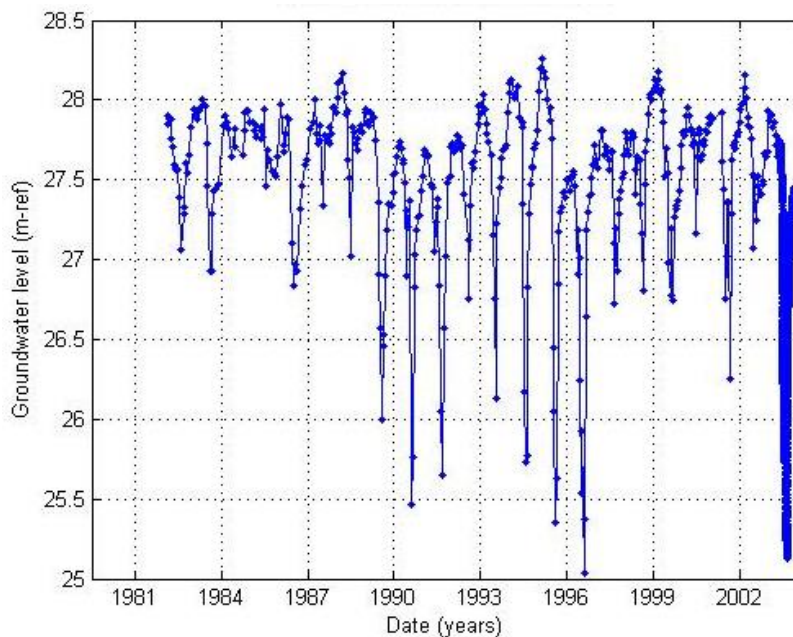
Naast beregening wordt in met name het oosten en zuiden van het land ook grondwater onttrokken voor veedrenking. Volgens Stuurman *et al.* (2008) bedraagt deze onttrekking in Nederland ca. 30-35 miljoen m³/jr. Hoewel deze hoeveelheid vele malen kleiner is dan die voor beregening, zal ook hier een effect van klimaatverandering op piekvragen optreden, vooral doordat vee op warme dagen meer zal drinken.



Figuur 3-2. Grondwateronttrekking ten behoeve van landbouwberegening kan door klimaatverandering sterk toenemen.

Zoals al aangegeven vindt de onttrekking ten behoeve van beregening plaats over slechts korte periodes per jaar. De intensiteit van de onttrekkingen is daarmee vele malen hoger dan die van andere grondwater onttrekkers, zoals de drinkwaterbedrijven en de industrie. De intensiteit van de onttrekkingen en de relatie met droge jaren is goed zichtbaar in stijghoogtemetingen wanneer wordt onttrokken onder kleilagen (Figuur 3-3). De scherpe stijghoogteverlaging (met uitschieters tot 2.5 m) wordt in Noord Brabant aangeduid als het Extreem Lage Standen (ELS)-effect (van Geer & Lourens, 2001; Cirkel *et al.*, 2004). Uit onderzoek van Boerfijn en Aarts (2007) naar de effecten van beregening in het Langbroekerwetering gebied blijkt dat de regionale grondwaterstand 1-5 cm wordt verlaagd door beregening in een gemiddeld jaar. Nabij de onttrekkingsputten kan de verlaging oplopen tot 1 a 2 meter. Afhankelijk van de traagheid van het systeem kan het na stopzetting van de onttrekking weken tot maanden duren eer de grondwaterstand weer is hersteld. Tijdens droge jaren zijn de effecten vele malen groter.

De effecten van beregening kunnen dus zeer aanzienlijk zijn. Daarnaast vallen de pieken in beregeningsonttrekking samen met piekvragen van drinkwater en de grootste waterbehoefte voor natuur. In de provincie Noord-Brabant wordt bijvoorbeeld gevreesd voor het volledig droogvallen van beken tijdens droogtes als gevolg van het door beregening wegvallen van kwel (Stuurman *et al.*, 2008).



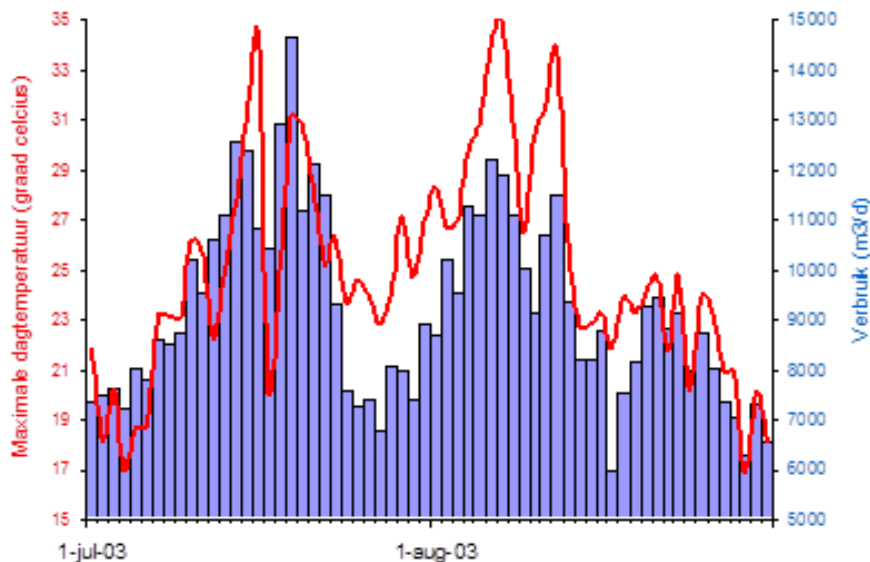
Figuur 3-3. Scherpe dalingen van de stijghoogte ($m+NAP$) als gevolg van grondwateronttrekkingen voor beregening (ELS-effect)(Cirkel *et al.*, 2004).

3.3 Invloed van klimaatverandering op de drinkwatervraag

Het klimaat is een belangrijke factor voor de dynamiek van het drinkwaterverbruik. Hittegolven zijn over het algemeen duidelijk terug te zien in het afzetpatroon van pompstations (Figuur 3-4). Veranderingen in het klimaat zijn dan ook aanleiding tot een grotere vraag naar de productie van drinkwater uit grondwater. In hoeverre zullen bijvoorbeeld warmere en drogere zomers leiden tot een toename van de drinkwatervraag bij de consument en daarmee tot een toename van de onttrekking? Is de huidige productie- en distributiecapaciteit toereikend? Informatie over de klimatologische invloed op het drinkwaterverbruik is echter schaars. (Herrington, 1998) laat zien dat een gemiddelde temperatuurstijging van 1,1 graden een stijging van het waterverbruik van ongeveer 5% ten gevolg heeft (toegeschreven aan douchen en gebruik in de tuin). Dergelijke toenames zijn

klein ten opzichte van de invloed van demografische en socio-economische ontwikkelingen (Murdock *et al.*, 1991; Herrington, 1998). De gevolgen van klimaatverandering voor de piekfactor zijn volgens het onderzoek van Herrington groter: de watervraag in 'piekweken' kan in 30 jaar stijgen met 40% ten opzichte van het referentiejaar 1991.

Over de invloed van klimaat op de drinkwaterafzet in de Nederlandse situatie zijn in de periode 2005-2007 een aantal studies verschenen (Cirkel *et al.*, 2005; Cirkel *et al.*, 2006; Zwolsman *et al.*, 2007). In het kader van deze studies zijn door middel van tijdreeksanalyse empirische relaties opgesteld tussen klimaat gerelateerde variabelen en het drinkwater verbruik op de schaal van een voorzieningsgebied. Hierbij is zowel een landelijk (Budel) als een stedelijke afzetgebied (Tilburg) in de analyse betrokken. Vervolgens is met de opgestelde relaties een aantal klimaatscenario's doorgerekend. Het ging hierbij om de toen beschikbare WB21 scenario's Laag, Midden, Hoog en Droog. Een update naar de KNMI 06 scenario's heeft nog niet plaatsgevonden. De laatste drie genoemde scenario's zijn echter in hoofdlijnen vergelijkbaar met de scenario's G, W en W+.

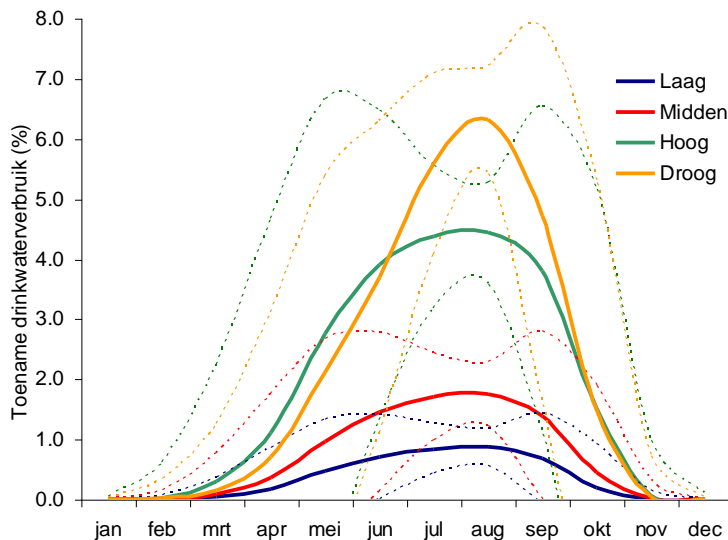


Figuur 3-4. Tussen de maximale dagtemperatuur en het drinkwaterverbruik bestaat een duidelijk verband. Met rood is de maximale dagtemperatuur weergegeven, met blauw de dagafzet van waterproductiebedrijf Budel voor de zeer warme zomer van 2003 (Cirkel *et al.*, 2005).

De bestudeerde afzetgebieden vertonen een duidelijk verschillend afzetpatroon. In het relatief stabiele afzetpatroon van de stedelijke winning (Tilburg) is het weekritme van werken en vrijetijd overheersend met een terugkerende daling van het waterverbruik in het weekend. Ook zijn duidelijke effecten van vakantieperiodes zichtbaar met een scherpe daling van het waterverbruik. De landelijke winning (Budel) heeft een vlakker weekpatroon met juist meer verbruik in het weekend. Verder zijn sterke seizoenschommelingen zichtbaar. Om de relatie tussen klimaat (het weer) en waterverbruik te leggen zijn voor de verbruiksreeksen van Budel en Tilburg tijdreeksmodellen ontwikkeld. Uit de analyse kwamen als belangrijkste verklarende variabelen naar voren: a) het aantal graden overschrijding van 17 °C en b) het potentieel neerslagtekort. Voor een uitgebreidere beschrijving van de modellering wordt verwezen naar Cirkel *et al.* (2005).

Met behulp van de gevonden relaties tussen weer en verbruik zijn vervolgens de toenmalige klimaatscenario's doorgerekend (zie Figuur 3-5). Uit de analyse blijkt dat het gemiddelde drinkwatergebruik als gevolg van klimaatverandering in het afzetgebied van Budel kan toenemen tot 6.3% in de zomer in het scenario Droog (grofweg met W+ vergelijkbaar). Het

stedelijke afzetgebied (Tilburg) laat een veel geringer effect zien met een gemiddelde toename tot 1.9% in de zomer in het Droog scenario. Deze berekende effecten zijn klein ten opzichte van de effecten van socio-economische ontwikkelingen. Uit Baggelaar *et al.* (2010) blijkt dat socio-economische ontwikkelingen een vele malen groter effect (tientallen procenten) hebben op de gemiddelde drinkwatervraag.



Figuur 3-5. Toename van het drinkwaterverbruik in voorzieningsgebied Budel voor vier WB21 klimaatscenario's Laag, Midden (G), Hoog (W) en Droog (W+) (Cirkel *et al.*, 2005)

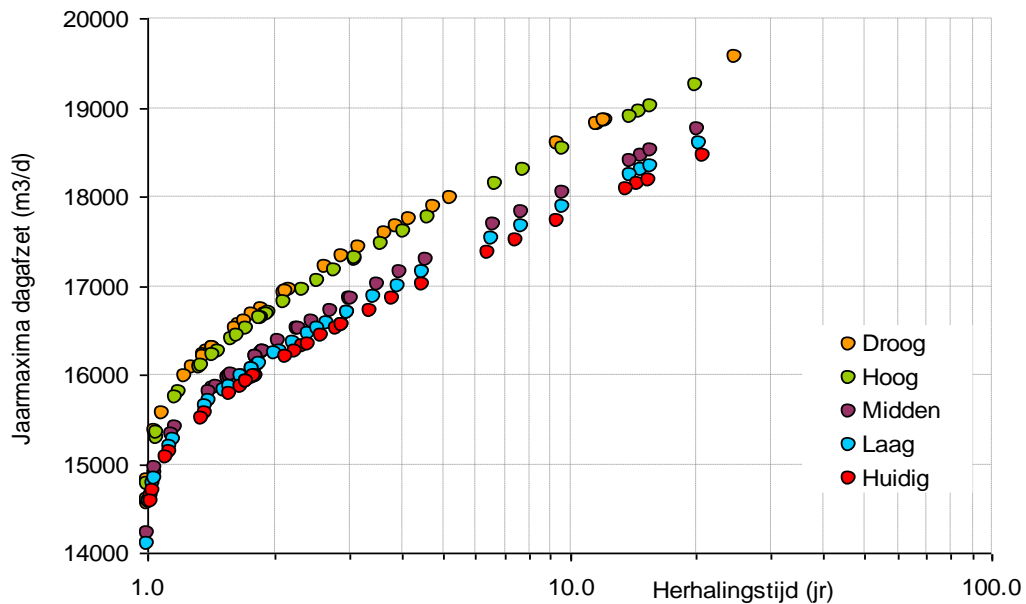
Voor de productiecapaciteit zijn echter niet alleen het gemiddelde verbruik en mogelijke gemiddelde toenames van belang, maar ook (en vooral) de extremen. Op extremen in het drinkwaterverbruik kan klimaatverandering wel een significante invloed hebben. Een veel gebruikte maat voor de extremen is de maximale dagafzet en de piekfactor. De maximale dagafzet is gedefinieerd als de hoogste dagsom in een bepaald jaar. De piekfactor is gedefinieerd als de dagafzet gedeeld door de gemiddelde dagafzet over een bepaald jaar. In Tabel 3-1 zijn de effecten op de maximale dagafzet en piekfactor weergegeven.

Tabel 3-1. Effect van klimaatverandering op maximale dagafzet en piekfactoren.

Scenario	Budel		Tilburg	
	Toename maximale dagafzet (%)	Toename piekfactor (%)	Toename maximale dagafzet (%)	Toename piekfactor (%)
Midden (G)	1.6	1.1	0.35	0.23
Hoog (W)	4.3	2.6	0.53	0.35
Droog (W+)	6.0	3.7	1.26	0.61

Vervolgens zijn de herhalingstijden van de jaarmaxima van de dagafzet bepaald met behulp van een Gumbel verdeling. Als voorbeeld zijn de resultaten weergegeven voor jaarmaxima van de dagafzet van Budel (Figuur 3-6). Uit deze analyse blijkt dat de kans op extremen sterk zal toenemen. De herhalingstijd van een dagverbruik van 18000 m³/d bedraagt in de huidige situatie bijvoorbeeld ca. 13,5 jaar, maar neemt in scenario Droog af naar ongeveer 5,2 jaar.

Ook in Tilburg komen dergelijke verschuivingen naar voren. Het klimaateffect is bij deze winning echter relatief klein ten opzichte van andere factoren. Dit in tegenstelling tot het landelijke gebied rond Budel waar het waterverbruik veel sterker wordt beïnvloed door het weer (Zwolsman *et al.*, 2007). Meer studie naar de relatie tussen klimaat en waterverbruik in verschillende typen afzetgebieden is noodzakelijk om generieke uitspraken te kunnen doen.



Figuur 3-6. Invloed van klimaatverandering (WB21 scenario's) op de jaarmaxima van de dagafzet van waterproductiebedrijf Budel. (Cirkel *et al.*, 2005; Cirkel *et al.*, 2006). De gepresenteerde scenario's midden, hoog en droog zijn in grote lijnen vergelijkbaar met de KNMI 2006 scenario's G, W en W+.

3.4 Kennisvragen

Op basis van dit hoofdstuk onderscheiden we de volgende kennisvragen op het gebied van toekomstig grondwaterverbruik voor landbouwberging en drinkwaterproductie:

1. *Hoe groot is hoeveelheid voor landbouwberging onttrokken grondwater en hoe zijn deze onttrekkingen verdeeld over Nederland?*

Toelichting: Er bestaat een grote inconsistentie in de beschikbare beregeningscijfers. Verbetering van de cijfermatige onderbouwing van bereging uit grondwater is cruciaal om uitspraken te kunnen doen over de huidige en toekomstige invloed van bereging op het grondwatersysteem.

2. *Hoe werken kortdurende, maar intensieve onttrekkingen voor bereging, door op natuurwaarden?*

Toelichting: Stijghoogtedalingen als gevolg van bereging kunnen aanzienlijk zijn. Het is nog onbekend hoe deze dalingen, via reductie van kwel, doorwerken op natuurwaarden (beken, kwelafhankelijke natuur).

3. *Hoe werkt klimaatverandering, gebruik makend van de nieuwste klimaat scenario's, door op het waterverbruik op het niveau van voorzieningsgebieden?*

Toelichting: Verandering van de drinkwatervraag als gevolg van klimaatverandering heeft invloed op allerlei beleidsbeslissingen ten aanzien van waterproductie en distributie op de middellange en lange termijn. De beperkte bestaande gegevens zijn gebaseerd op de verouderde WB21 scenario's en moeten nodig worden geactualiseerd naar de nieuwste KNMI scenario's, die inmiddels beschikbaar zijn gekomen (voorjaar 2014).

4. *Hoe kan de voorspelling van (klimaat)gerelateerde extremen in waterverbruik verbeterd worden?*

Toelichting: De tot nu toe opgestelde modellen hebben moeite met het goed modelleren van extremen in de waterverbruiksreeksen. Daarnaast zijn veranderingen in weerextremen (hittegolven) niet in de gebruikte scenario's meegenomen. Deze extremen zijn echter cruciaal bij de vraag of een productielocatie of distributienet wel voldoende goed is ingericht op klimaatverandering.

5. *Hoe reageert het drinkwaterverbruik in verschillende Nederlandse voorzieningsgebieden op klimaatinvloeden?*

Toelichting: Uit de analyse van het waterverbruik in de stad Tilburg en het landelijk gebied van Budel blijken grote verschillen in de invloed van het weer (klimaat) op het waterverbruik. Of deze invloeden representatief zijn voor heel Nederland is onduidelijk.

3.5 Literatuur

- Baggelaar, P.K., Hummelen, A.M. & Büscher, C. (2010) Vier scenario's voor de drinkwatervraag in 2040. In. KWR 2010.012, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Boerefijn, M. & Aarts, F. (2007) Omvang en effecten van beregening uit grondwater in de provincie Utrecht. In, p. 81, Utrecht.
- Brouwer, F.M., van Bruchem, C., Haag, D.M. & Pleijsier, L.K. (2000) Landbouw, Milieu en Economie 1999. In. Centraal Bureau voor de Statistiek/Landbouw-Economisch Instituut, Voorburg / Heerlen / Den Haag.
- CBS (2012) *Landbouw in vogelvlucht*. <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/landbouw/publicaties/landbouw-vogelvlucht/default.htm>.
- Cirkel, D.G., Maas, C. & Von Asmuth, J.R. (2004) What ELS? Evaluatie van het voorlopige meetnet voor Extreem Lage Stijghoogten van de provincie Noord-Brabant. Rapport KWR 04.073, Kiwa N.V., Nieuwegein.
- Cirkel, D.G., Baggelaar, P.K. & Doomen, A. (2005) Klimaatverandering en grondwaterwinning - Effecten van klimaatverandering op drinkwaterverbruik en grondwaterdynamiek. Rapport KWR 05.030, Nieuwegein.
- Cirkel, D.G., Van Griensven, E. & Broers, E. (2006) Klimaatverandering en grondwaterwinning. *H2O*, 22, 39-42.
- Herrington, P.R. (1998) Analysing and Forecasting Peak Demands on the Public Water Supply. *Water and Environment Journal*, 12, 139-143.
- Murdock, S., Albrecht, D., Hamm, R. & Backman, K. (1991) Role of Sociodemographic Characteristics in Projections of Water Use. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117, 235-251.
- Stuurman, R., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., de Louw, P. & Oude Essink, G. (2008) Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering. In. TNO, Utrecht.
- van der Veen, H. & Vrolijk, H. (2007) Watergebruik in de agrarische sector. In, p. 23. Landbouw-Economisch Instituut, projectcode 31105, Den Haag.

- van Geer, F.C. & Lourens, A. (2001) Trends in de stijghoogte en relatie tussen verschillende dieptes, versie 2. In. Rapport NITG 01-125-B, NITG-TNO, Delft.
- Zwolsman, G.J.J., Cirkel, D.G., Doomen, A., Jalink, M.H., Van den Berg, G., Maas, C., Vreeburg, J., Ijpelaar, G. & Mesman, G. (2007) Risicoanalyse van de gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector; waterkwaliteit, waterkwantiteit, ecologie, productie en distributie. In. BTO 2007.032, Kiwa WR, Nieuwegein.

4 Invloed klimaatverandering op grondwater kwantiteit, dynamiek en natuur(doelen)

4.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Flip Witte en Gijsbert Cirkel (beiden KWR), op basis van beschikbare literatuur en expertkennis.

4.2 De huidige voorraad zoet grondwater in Nederland

Nederland beschikt over relatief grote voorraden zoet grondwater. Dat komt door de geologische opbouw van de Nederlandse ondergrond, die tot op grote diepte uit goed doorlatende ongeconsolideerde pakketten zand en grind bestaat. Over duizenden tot tienduizenden jaren heeft zoet water kunnen infiltreren en in deze pakketten voorraden zoet water kunnen opbouwen. Door Stuurman *et al.* (2008) is een schatting gemaakt van de totale Nederlandse voorraad zoet grondwater (<300 mg Cl/l) in de ondergrond tot 300 m beneden NAP. De totale hoeveelheid zoet grondwater tot deze diepte zou iets meer dan 1100 miljard m³ bedragen. Het grootste deel van deze voorraad bevindt zich in de dikke zandpakketten van Noord Brabant. In Zeeland en Zuid Holland is weinig tot zeer weinig zoet grondwater aanwezig.

De landelijke zoetwatervoorraad is echter niet in evenwicht met de huidige waterhuishouding van Nederland. Stuurman *et al.* (2008) geven hiervoor twee oorzaken. Het gaat allereerst om de autonome verzilting van laaggelegen gebieden door ontwatering tot beneden zeeniveau. Door ontwatering van de bodem (een traag en continu proces) en de aanleg van droogmakerijen gedurende de 17^e tot en met de 20^e eeuw (een relatief abrupte verandering) is de bodem in veen- en kleigebieden over grote oppervlaktes gedaald tot (ver) beneden zeeniveau, en daarmee de ontwateringsbasis. Deze historische ontwikkelingen zijn, door de traagheid van het grondwatersysteem, nog steeds van invloed op de verdeling van zoet, brak en zout grondwater. Zelfs bij een gelijkblijvende zeespiegel zou het autonome verziltingproces nog een aantal eeuwen kunnen duren. Een tweede oorzaak is de onttrekking –voor drinkwater, landbouw en industrie –van zoet grondwater in de afgelopen twee eeuwen. Deze oorzaak is vooral van toepassing op de zoetwatervoorraden in de Nederlandse kustduinen, waar vanaf ca. 1850 grote hoeveelheden grondwater zijn onttrokken. Dit resulteerde in grondwaterstandsverlaging en opkegeling van brak en zout grondwater (Stuyfzand, 1993). In de jaren vijftig van de vorige eeuw is overgegaan op infiltratie van voorgezuiverd rivierwater, waardoor de zoetwatervoorraad onder de duinen zich weer opbouwt.

Volgens het RIZA grondwaterregister (Stuurman *et al.*, 2008) wordt in Nederland ongeveer 1500 miljoen m³ grondwater onttrokken door drinkwaterbedrijven, industrie en landbouw, waarvan ongeveer 690 miljoen door de Nederlandse drinkwaterbedrijven (Geudens, 2012). In totaal wordt jaarlijks ongeveer 250 miljoen m³ geïnfiltrerd in onder meer de duingebieden, zodat de netto grondwateronttrekking ongeveer 1250 Mm³ per jaar bedraagt, waarvan ca. 440 Mm³ door de drinkwaterbedrijven. Uitgespreid over heel Nederland (35000 km²) correspondeert die 440 Mm³ met een laagje water van 12.6 mm, ofwel met ongeveer 5% van het gemiddelde neerslagoverschot (250 mm/jr) in Nederland.

4.3 De grondwateraanvulling: drijvende maar onzekere kracht achter het grondwatersysteem

4.3.1 Invloed van vegetatie op de grondwateraanvulling

Van groot belang voor de voorraad zoet grondwater, alsmede voor de diepte en dynamiek van de grondwaterspiegel en de afvoer van beken en rivieren, is de grondwateraanvulling: de hoeveelheid water die door de wortelzone percoleert en zich vervolgens bij het grondwater voegt. Voor de drinkwaterbedrijven is dit belang vooral groot op de hoger gelegen zandgebieden zoals de duinen, stuwwallen en dekzandruggen, omdat grondwater hier niet meteen wordt afgevoerd naar sloten en greppels. Daardoor zijn deze hogere zandgronden belangrijke voedingsgebieden van zoetwatervoorraden.

Gemiddeld gezien valt in Nederland ongeveer 800 mm per jaar, waarvan circa 550 mm verdampt, resulterend in een neerslagoverschot van 250 mm. Oppervlakkige afstroming naar het oppervlaktewater is op de meeste plaatsen in Nederland, met uitzondering van verharde oppervlakken en Zuid-Limburg, een zeldzaam verschijnsel. Dat betekent dat de grondwateraanvulling vrijwel overal gelijk is aan het neerslagoverschot, tenminste op de lange termijn beschouwd. Over een lange tijdperiode bezien (enkele jaren of meer), is berging van water in de onverzadigde zone immers een verwaarloosbare post.

De (gemiddelde) grondwateraanvulling kent echter een sterke ruimtelijke variatie, afhankelijk van neerslag en atmosferische vraag, maar ook van de eigenschappen van het type vegetatie (o.a. aerodynamische ruwheid, interceptiecapaciteit, watergebruiksefficiëntie) en het vermogen van de bodem om vocht vast te houden en na te leveren. Vooral donker naalddhout, zoals Fijnspar en Douglas schijnt veel te verdampen, volgens Dolman *et al.* (2000) ongeveer 730 mm/jr. Dat komt door de hoge interceptiepost, in zomer en winter, van deze soorten: de verdamping van neerslagwater dat in de naalden is gevallen en van daaruit verdampt, zonder de bodem te bereiken. Kaal zand verdampt weer veel minder, ongeveer 200 mm/jaar. Voorlopige cijfers uit recent onderzoek aan mossen en korstmossen laat zien dat deze wortelloze planten ongeveer net zo weinig verdampen als kaal zand (Witte *et al.*, 2012a; Voortman *et al.*, in prep.).

Deze voorbeelden laten geven aan dat het verschil in grondwateraanvulling wel een factor 10 kan verschillen, afhankelijk van de vegetatie (bij 800 mm/jr neerslag: 70 mm/jr onder een Douglasbos en 600 mm/jaar onder een open mosvegetatie).

4.3.2 Berekening van de grondwateraanvulling: niet echt robuust

Voor het bepalen van de grondwateraanvulling wordt gebruik gemaakt van hydrologische modellen, waarbij de grootte van de berekende grondwateraanvulling sterk afhankelijk is van de manier waarop de vegetatie en de bodemeigenschappen zijn geschematiseerd en geparametriseerd (Witte *et al.*, 2009b; Bartholomeus *et al.*, 2010; Bartholomeus *et al.*, 2011a; Witte *et al.*, 2012b). Voor natuurlijke vegetaties en bossen zijn belangrijke parameters als de interceptiecapaciteit, bodembedekking en worteldiepte vaak slecht bekend. Bovendien worden verdampingsprocessen vaak op een wat 'fuzzy'-achtige wijze gemodelleerd.

Op basis van de literatuur (bijvoorbeeld Massop *et al.* (2005), Moore and Heilman (2011), Zhang *et al.* (2010)) schatten wij dat de fout in de berekening van de werkelijke verdamping onder het huidige klimaat in de meeste hydrologische modellen minimaal 10% bedraagt. In het Nederlandse klimaat werkt deze fout gemiddeld twee tot drie keer zo hard door in de berekende grondwateraanvulling. Ga maar na: uitgaande van een jaarlijkse verdamping van 550 mm geeft een fout in de gesimuleerde verdamping van 10% (wat dus zeer bescheiden is) een afwijking in de grondwateraanvulling van 55 mm/jr, ofwel 22% bij een neerslag van 800 mm/jr. Een dergelijk verschil is ernstig omdat de grondwateraanvulling, zoals vermeld, de drijvende kracht is achter grondwaterstroming: in het huidige Nederlandse klimaat komt een

fout in de verdamping dus eveneens minimaal 2-3 keer sterker terug in de gesimuleerde grondwaterstand. In de praktijk vallen zulke fouten niet op omdat hydrologische modellen worden geïjkt aan gemeten grondwaterstanden en, in het gunstige geval, ook aan gemeten afvoeren, door bijvoorbeeld het doorlaatvermogen van het bovenste watervoerende pakket aan te passen. Dit hoeft voor het gebruik onder de huidige klimaatcondities geen probleem te zijn, maar bij het doorrekenen van een extreem scenario, zoals het warme klimaatscenario W+ (Van den Hurk *et al.*, 2006), is het van belang dat alle verdampingsposten (transpiratie, interceptie en bodemverdamping) goed worden nagebootst. Valt de neerslag bijvoorbeeld steeds meer in piekbuien, in plaats van gelijkmatig verdeeld over het jaar, dan leidt dat op jaarbasis tot een lagere interceptieverdamping. Dit effect is alleen zichtbaar in de uitkomsten als de interceptiepost expliciet is gemodelleerd.

Een fuzzy-achtige benadering is het gebruik van gewasfactoren en van de door het KNMI verstrekte Makkink-verdamping. De Makkink referentie wordt tegenwoordig door vrijwel alle hydrologische modellen gebruikt. In die referentie zit een empirische factor die in de jaren vijftig van de vorige eeuw bepaald is voor een grasland aan de hand van de toen heersende meteorologische condities. Zou die factor in andere jaren zijn gemeten, dan had hij een andere waarde gehad (Bartholomeus & Witte, 2013). Hetzelfde geldt voor de gewasfactoren waarmee nagenoeg alle regionale hydrologische modellen rekenen voor het vaststellen van de potentiële verdamping: Bartholomeus *et al.* (2013) hebben laten zien dat het gebruik van deze empirische factoren kan resulteren in aanzienlijke fouten in de voorspelde potentiële verdamping, en daarmee in de grondwateraanvulling. Vooral voor bossen kan de fout tientallen procenten bedragen, zelfs als verdamping van interceptiewater expliciet wordt gesimuleerd.

4.3.3 Aanpassing van verdampingseigenschappen aan klimaatverandering

Bovendien moet rekening worden gehouden met het feit dat verdampingseigenschappen van de vegetatie door klimaatverandering kunnen veranderen. Zo wordt de transpiratie van planten beïnvloed door de CO₂ concentratie in de atmosfeer (Medlyn *et al.*, 1999; Gedney *et al.*, 2006; Witte *et al.*, 2006b; Witte *et al.*, 2006a; Kruijt *et al.*, 2008; De Boer *et al.*, 2011). Planten zetten hun huidmondjes open om CO₂ op te nemen en daarmee diffundeert tegelijkertijd water uit het blad via de huidmondjes naar de atmosfeer: transpiratie. De invloed van CO₂ op de transpiratie is tweeledig: enerzijds zorgt een verhoogde CO₂ concentratie voor een verhoogde fotosynthese zodat meer biomassa wordt geproduceerd waardoor de transpiratie toeneemt; anderzijds neemt de watergebruiksefficiëntie van planten toe doordat planten makkelijker in hun koolstofbehoefte kunnen voorzien. Het gevolg van beide tegengestelde krachten is waarschijnlijk een reductie van de verdamping. Zo meent Gedney *et al.* (2006) op grond van een statistische analyse te hebben aangetoond dat de afvoer van de rivieren op aarde is toegenomen door de stijging van de atmosferische CO₂ concentratie. Voor Nederland is de netto-reductie van de potentiële verdamping, bij een stijging van de CO₂-concentratie met 150 ppm, becijferd op gemiddeld 4% voor loofbos, struweel, C4 gewassen en overige natuur, 2% voor grasland en droge voedselarme gebieden en 3% voor overige landbouwgewassen en naaldbos (Witte *et al.*, 2006a; Kruijt *et al.*, 2008). Deze percentages zijn indicatief en omgeven door grote onzekerheden.

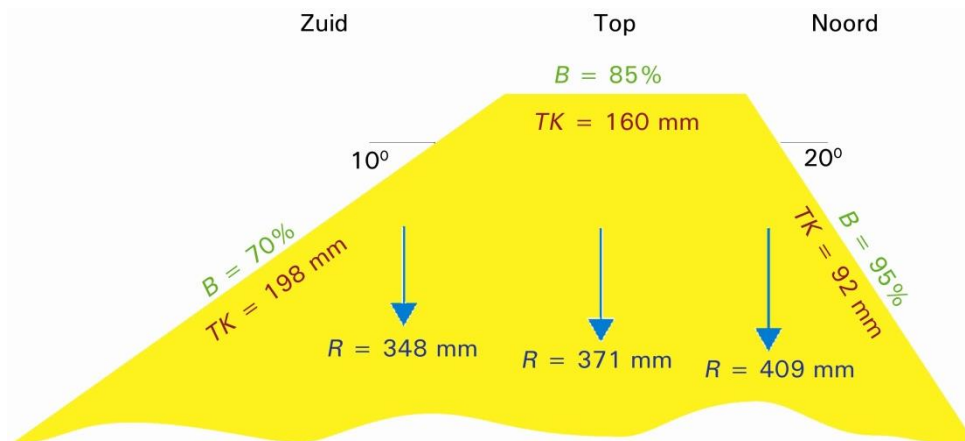
Een andere vegetatieaanpassing, waar geen enkel hydrologisch model nog rekening mee houdt, is dat in droge natuurgebieden de structuur van de vegetatie kan veranderen. Wanneer bijvoorbeeld droge perioden vaker optreden en in intensiteit toenemen, zal de structuur en de soortensamenstelling van de vegetatie zich daarop moeten instellen. Plantensoorten met een aan droogte aangepaste morfologie zullen dan de overhand krijgen, of soorten die de droge zomerperiode overleven in de vorm van zaad. Doordat ze geen wortels hebben waarmee ze water aan de zandondergrond kunnen onttrekken, gaan ook mossen en korstmossen heel zuinig om met water. Ten slotte kan het ontstaan van kale grond worden opgevat als een aanpassing aan droogte, niet op plantniveau, maar op ecosysteemniveau. Binnen de duinen, maar ook op de stuwwallen, zijn aanpassingen aan

droogte af te lezen aan het verschil in noord- en zuidhellingen. Fraaie voorbeelden daarvan zijn te vinden in Meijndel, waar de zuidhellingen veel kaler en mosrijker zijn dan de noordhellingen (Figuur 4-1). Wat de aanpassing aan droogte voor de grondwateraanvulling in het huidige klimaat betekent, is voor een gemiddeld duin in de Amsterdamse waterleidingduinen (AWD) weergegeven in Figuur 4-2. De aanvulling bedraagt gemiddeld 350 tot meer dan 400 mm/jaar, afhankelijk van de helling en de oriëntatie ten opzichte van de zon. Dat is veel meer dan het gemiddelde neerslagoverschot in de AWD van 221 mm/jaar. Deze cijfers zijn echter, door gebrek aan kennis over de verdamping van droogteminnende vegetaties, met grote onzekerheden omgeven.

Toenemende droogte op hogere zandgronden in combinatie met een toename van de intensiteit van buien zal vermoedelijk een stimulans betekenen voor de vestiging van langzaam groeiende struwelen, die veel van hun biomassa investeren in een diep wortelstelsel om in droge tijden voldoende water tot hun beschikking te hebben (Kulmatiski, in press). In combinatie met de eerder genoemde stimulering van kale grond en mossen, leidt dit mogelijk tot een mozaïek achtige vegetatie, waarin heesters, mossen en kale grond elkaar afwisselen (Figuur 4-3).



Figuur 4-1. Aanpassing van de vegetatie aan droogte in Meijndel: links een grazige en bedekte noordhelling, rechts een mosrijke en kale zuidhelling.



Figuur 4-2. Schematische zuid-noord doorsnede van een grondwateronafhankelijk duin in de Amsterdamse Waterleidingduinen (Witte et al., 2008). Behalve de waargenomen gemiddelde bedekking B zijn ook het berekende potentiële vochttekort TK en de grondwateraanvulling R voor het huidige klimaat gegeven (cijfers zeer indicatief, berekend uit een simulatie van 30 jaar met het model SWAP (Van Dam et al., 2008)). TK is het vochttekort dat een hypothetische korte en de grond volledig bedekkende grasmat zou ondervinden, wanneer die op het duin zou groeien.



Figuur 4-3. Referentiebeeld voor de grondwateronafhankelijke zandgronden onder een droger klimaat? De foto toont de duinen van het eilandje Anholt, gelegen in het Kattegat (Denemarken). De neerslag bedraagt hier 600 mm/jr. Gegevens over de verdamping konden niet worden achterhaald, maar vermoed wordt dat deze post zeker zo hoog is als in de Nederlandse kustduinen (veel windinvloed op dit kleine eiland, globale straling 3000 Wh/m²/jr tegen 2900 Wh/m²/jr voor de Nederlandse duinen, temperatuur in augustus vergelijkbaar; 16 tegen 17 °C). Foto: B. Sparrius.

4.4 Gevolgen van klimaatverandering voor de waterhuishouding volgens enkele recente hydrologische studies

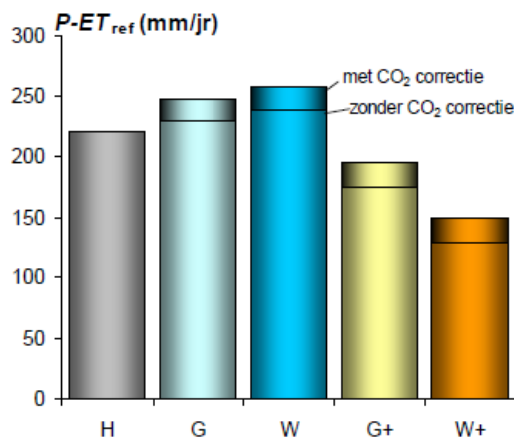
In diverse studies zijn de gevolgen van klimaatverandering voor de waterhuishouding van Nederland, of voor delen van Nederland, berekend. Wij bespreken hier deze resultaten tegen de achtergrond van de in de vorige paragraaf genoemde beperkingen in de berekeningswijze van de grondwateraanvulling.

4.4.1 Vochttekort

De klimaatscenario's leiden volgens modelsimulaties in alle gevallen tot een toename van vochttekort, dat wil zeggen tot een groter jaarlijks verschil tussen de potentiële en de werkelijke verdamping van gewassen en natuurlijke vegetaties. Volgens berekeningen met het PAWN-instrumentarium (Vermulst *et al.*, 1998) neemt het vochttekort gemiddeld over heel Nederland toe van 16 mm/jr in de huidige situatie naar 33 mm/jr in scenario W+. Daarnaast neemt in scenario W+ het vochttekort in droge jaren sterk toe ten opzichte van de huidige situatie. Waar het vochttekort in het huidige klimaat in een droog jaar toeneemt met 59 mm/jr, is dat verschil in scenario W+ maar liefst 124 mm/jr. Ook de variatie in het weer neemt toe. Dit uit zich in het verschil in vochttekort tussen een gemiddeld en een droog jaar. Voor het huidige klimaat, W en W+ bedragen deze verschillen achtereenvolgens 59, 68 en 81 mm (Witte *et al.*, 2009a).

4.4.2 Grondwateraanvulling op de hogere zandgronden

In Figuur 4-4 is het effect van de vier klimaatscenario's (2050) op het potentiële neerslagoverschot met en zonder CO₂ effect weergegeven voor de Amsterdamse waterleidingduinen. Hoewel de absolute waarden kunnen afwijken, zijn de veranderingen niet wezenlijk anders in andere delen van Nederland. Uit Figuur 4-4 blijkt dat het potentiële neerslagoverschot (neerslag met referentiegewasverdamping volgens Makkink) in de scenario's G & W nagenoeg gelijk blijft of toeneemt. Bij de + scenario's neemt het potentiële neerslagoverschot sterk af. De afname bij het W+ scenario is hierbij het hoogst met een daling van 33% tot 42 %, afhankelijk van het wel of niet meenemen van het CO₂-effect.

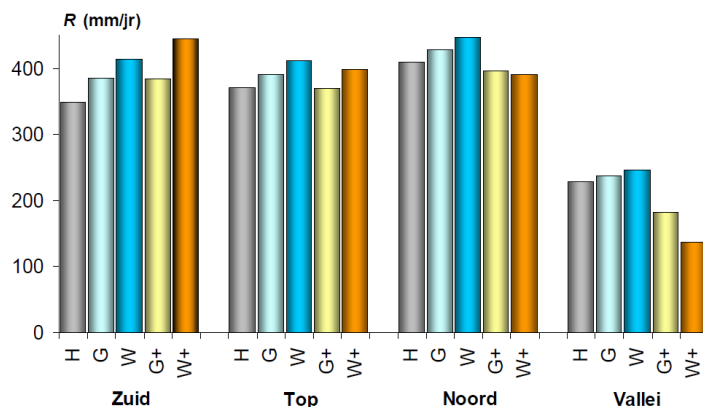


Figuur 4-4. Potentieel neerslagoverschot (neerslag, P minus referentieverdamping, E_{ref}) voor het huidige klimaat (H) en vier klimaatscenario's, met en zonder CO₂ effect. Voorbeeld berekend voor de Nederlandse kustduinen (Witte *et al.*, 2008).

Zoals aangegeven hoeft een sterke daling van het potentiële neerslagoverschot niet te betekenen dat de grondwateraanvulling navenant afneemt. Onder te droge omstandigheden reduceren planten hun waterverlies (transpiratie) door het sluiten van huidmondjes of het afsterven van plantendelen. De werkelijke verdamping neemt hierdoor sterk af ten opzichte van de potentiële verdamping. Daarnaast is het temporele neerslagpatroon van belang: naarmate de neerslag minder gelijkmatig verdeeld over het jaar valt, neemt de

interceptieverdamping af. Ten slotte zijn de bodemfysische eigenschappen van de bodem van belang. Bij zandgronden, arm aan organische stof en met een diepe grondwaterstand, blijft geïnfiltrerd regenwater niet lang in de wortelzone hangen, en is er geen capillaire nalevering vanuit het grondwater. Het neerslagoverschot van de winter is hierdoor nauwelijks beschikbaar voor verdamping in de zomer en komt ten goede aan de grondwateraanvulling. Analoog hieraan hoeft een toename van het potentiële neerslagoverschot niet te resulteren in een toename van de grondwateraanvulling.

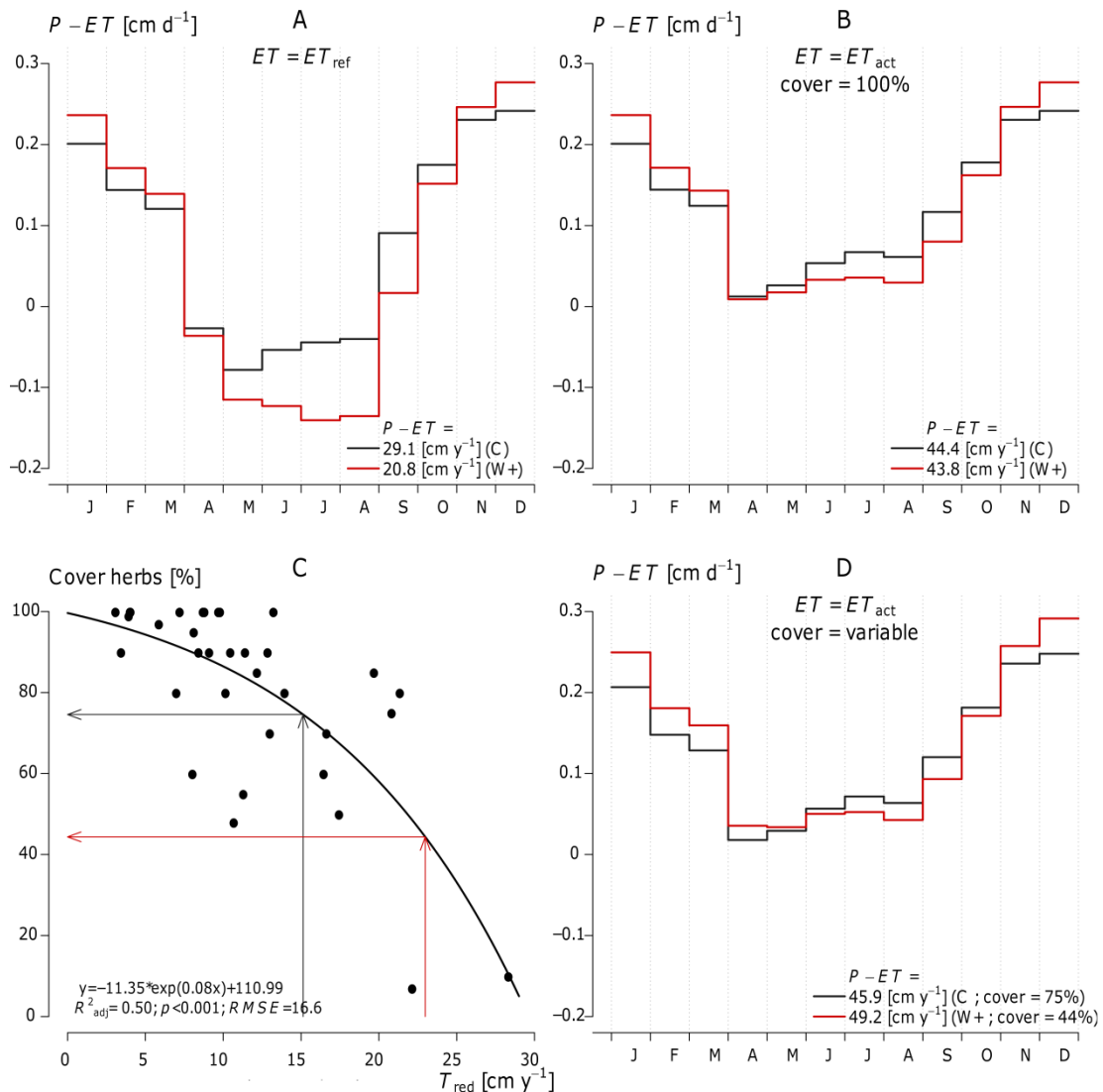
Met het model SWAP is de toekomstige grondwateraanvulling (2050) voor een representatief duin berekend (Figuur 4-2), waarbij rekening gehouden is met zowel een afname van de vegetatiebedekking door toegenomen droogte, als met het CO₂-effect. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4-5. Volgens deze zeer indicatieve resultaten blijft de grondwateraanvulling onder de duinen in alle scenario's gelijk of stijgt hij, ook in de droge W+ scenario's. In de duinvallei, waarvoor is aangenomen dat de vegetatie het hele jaar door potentieel kan verdampen, daalt de grondwateraanvulling aanzienlijk onder beide plus-scenario's, en stijgt hij een beetje onder G en W. Door stijging van de grondwateraanvulling op de duinen, stijgt de grondwaterstand in de duinen echter toch, volgens Kamps *et al.* (2008).



Figuur 4-5. Effect van klimaatscenario's op de grondwateraanvulling in de Amsterdamse waterleidingduinen (H = huidig klimaat). Resultaten opgesplitst voor noord- en zuidhellingen, duintoppen en duinvalleien (Witte *et al.*, 2008). Voor de laatste categorie is potentiële verdamping verondersteld.

Voor een hogere zandgrond midden in Nederland is onlangs een vergelijkbare verkennende berekening voor W+ (2050) gemaakt, alleen zonder rekening te houden met het CO₂-effect: zie Figuur 4-6. Op hogere zandgronden is het effect van een verhoogde CO₂-concentratie op de werkelijke verdamping beperkt: het waterbesparend effect van meer CO₂ leidt er alleen toe dat de bodem iets later alsnog uitdroogt (Brotsma *et al.*, 2010). Wanneer we aannemen dat de vegetatie het hele jaar bestaat uit een de grond volledig bedekkend grasland, daalt de grondwateraanvulling onder W+ met 6 mm/jr naar 438 mm/jaar. Wanneer echter rekening wordt gehouden met een afname van de bedekking door wortelende planten bij toenemende droogte, stijgt de aanvulling met 33 mm/jr naar 492 mm/jr.

Opgemerkt moet worden dat in de hier aangehaalde studies niet is gekeken naar het effect van klimaatverandering op de verdamping van bossen.



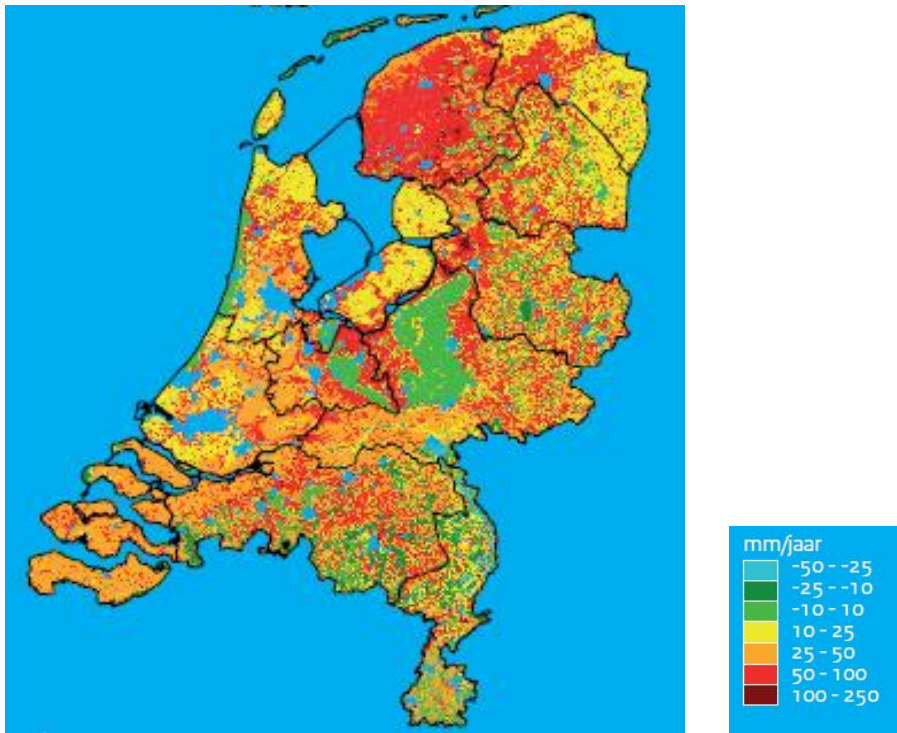
Figuur 4-6. Maandgemiddelde neerslag min verdamping ($P-ET$) voor het huidige klimaat (zwarte lijn) en het W+ klimaat in 2050 (rode lijn), gebaseerd op 30 jaar meetgegevens van station De Bilt en simulaties van de werkelijke ET met SWAP (Van Dam et al., 2008) voor een grondwateronafhankelijke zandbodem: (A) neerslag P minus Makkink ET; (B) P minus werkelijke ET van een volledig de bodem bedekkend grasland; (C) empirische relatie tussen jaarlijkse transpiratiereductie T_{red} (volgens Bartholomeus et al. (2011b)) en waargenomen bedekking van wortelende planten, gebaseerd op 35 vegetatieopnamen over heel Nederland; (D) P - werkelijke ET van een grasland wiens bedekking van wortelende planten is aangepast aan de droogte volgens de relatie in figuur C.

4.4.3 De grondwateraanvulling in lager gelegen gebieden

In gebieden met hoge grondwaterstanden en met een goede bodemtextuur is er voldoende water om vaak potentieel te verdampen. Dat betekent dat verwacht mag worden dat in grondwaterafhankelijke gebieden de grondwateraanvulling op jaarbasis waarschijnlijk zal dalen onder het G+ scenario, en zeker onder W+. Toename van het CO₂-gehalte tempert in deze gebieden echter enigszins de toegenomen verdamping. Volgens berekeningen met het PAWN instrumentarium compenseert een toename van de CO₂ concentratie met 150 ppm gemiddeld in Nederland een temperatuuroptoenname van 1 °C (Kruij et al., 2008).

4.4.4 Hydrologische modeluitkomsten niet eensluidend

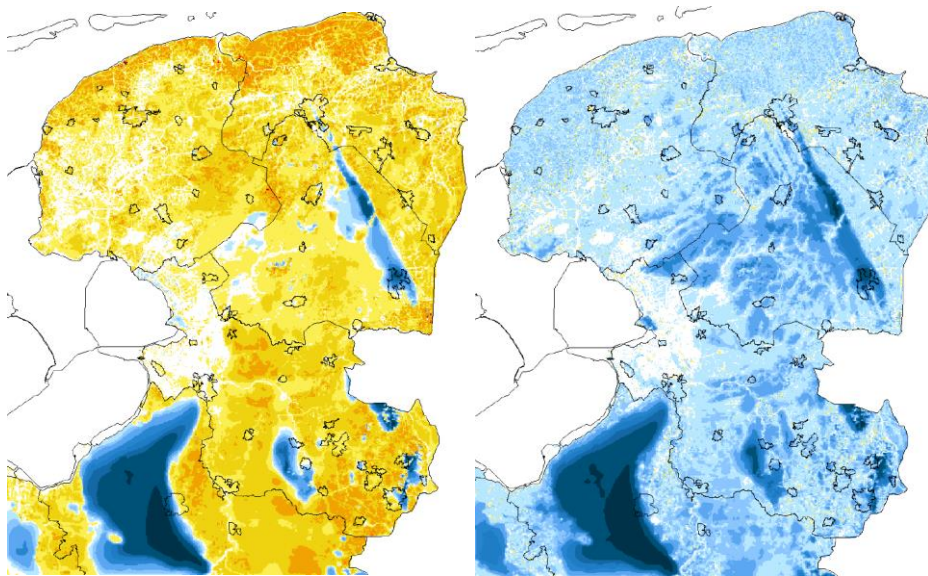
Op basis van de voorgaande twee paragrafen (zie ook Stuurman et al., 2008) zou men kunnen concluderen dat in de hooggelegen zandgronden (o.a. duinen, stuwwallen, hoge dekzandruggen) op jaarbasis de grondwateraanvulling min of meer gelijk blijft, of mogelijk zelfs licht stijgt. En in lager gelegen gebieden zou de grondwateraanvulling bij de G+ en W+ scenario's afnemen en bij de G en W scenario's (beperkt) toenemen. Deze conclusies zijn in overeenstemming met modelresultaten van MIPWA voor Noord Nederland (Stuurman et al., 2008), PAWN voor Nederland (Figuur 4-7) (Van Beek et al., 2008) en het AWD model voor het duingebied van Waternet (Kamps et al., 2008). De conclusies wijken echter vooral voor het W+ scenario af van resultaten met SIMGRO voor de Gelderse Vallei en aangrenzende stuwwallen (Hermans et al., 2009) en recent uitgevoerde berekeningen met het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) in het kader van het Deltaprogramma (Klijn et al. 2012). Deze studies wijzen juist op een daling van de grondwateraanvulling op de hoge zandgronden in het W+ scenario, en dus op een daling van de grondwaterstand. Om de oorzaak van de verschillen tussen de studies te achterhalen is een inhoudelijke vergelijking van de verschillen in modelstructuur en input noodzakelijk, wat buiten de het bereik van deze studie valt.



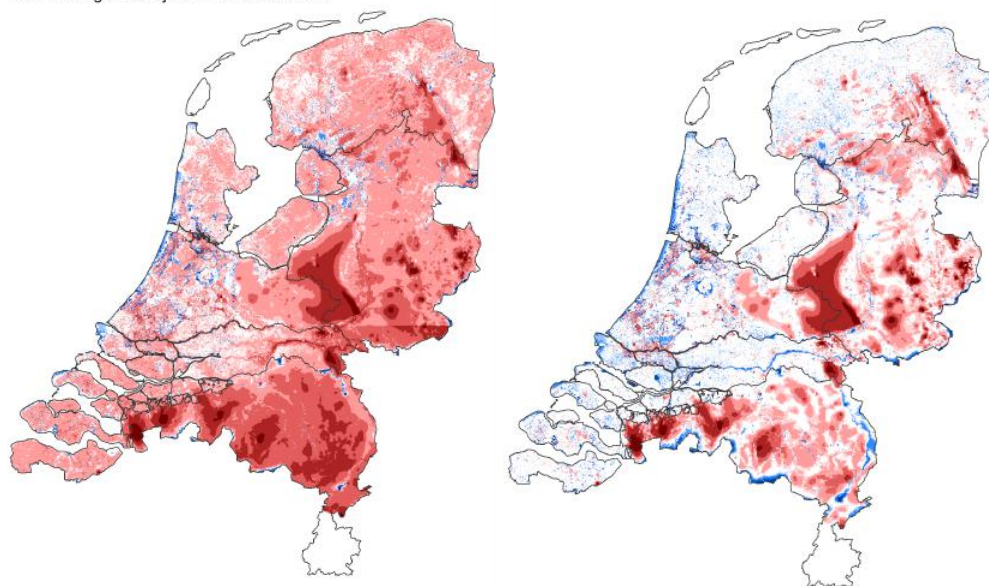
Figuur 4-7. Verandering van de werkelijke verdamping volgens het W+ scenario ten opzichte van de huidige situatie, zoals berekend met een gedetailleerd waterbalansmodel (Bron: RWS waterdienst, PBL). Zichtbaar is dat de werkelijke verdamping op de hoge, droge, zandgronden (Duinen, stuwwallen, hoge dekzandruggen) gelijk blijft of zelfs afneemt ten opzichte van de huidige situatie. In gebieden met wateraanvoer of ondiepe grondwaterstanden neemt de werkelijke verdamping sterk toe.

Zoals aangegeven werken verschillen in grondwateraanvulling min of meer recht evenredig door in de grondwaterstand. De verschillen tussen de modelstudies uit zich dan ook in grote verschillen in de berekende grondwaterstanden bij met name het W+ scenario (Figuur 4-8, Figuur 4-9) op de hogere zandgronden. Het is hierdoor moeilijk om op basis van de huidige stand van de modellen uitspraken te doen over veranderingen in grondwater dynamiek op de hoge zandgronden.

In peilbeheerste gebieden en gebieden met relatief ondiepe grondwaterstanden zijn de modeluitkomsten eenduidiger. In deze gebieden daalt in het W+ scenario de grondwaterstand bij alle modellen. Dat komt niet alleen door de drogere zomers, maar ook doordat de toegenomen winterneerslag in deze gebieden wordt afgevoerd naar het oppervlaktewater stelsel, zodat de toename niet ten gunste komt van hoge grondwaterstanden in de zomer.



Figuur 4-8. Verandering van respectievelijk de GLG en GHG in het W+ scenario ten opzichte van huidig klimaat, zoals berekend met MIPWA (Stuurman et al., 2008). Blauw = stijging, oranjegeel = daling.



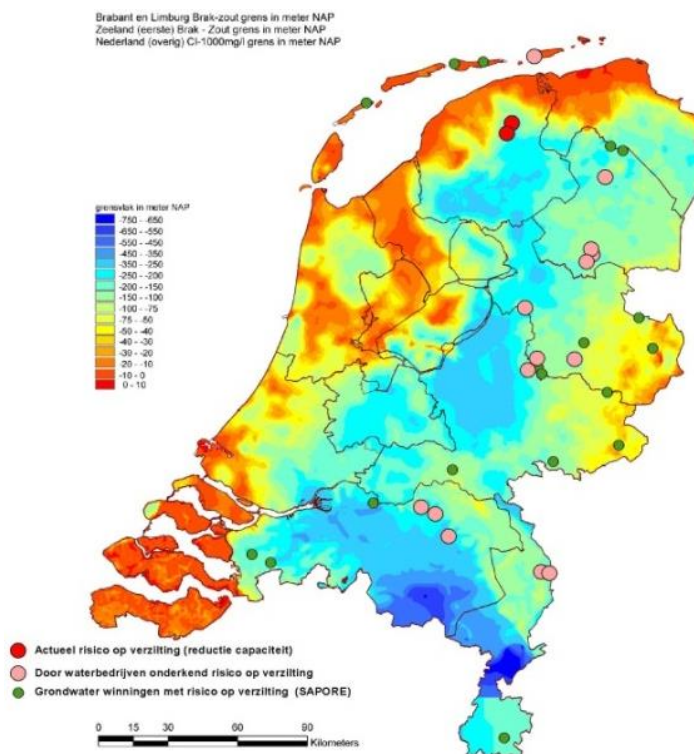
Figuur 4-9. Verandering van respectievelijk de GLG en GHG in het W+ scenario, zoals berekend met het NHI (Klijn et al., 2012). Rood = daling, blauw = stijging.

4.5 Effecten klimaatverandering op verzilting van grondwaterwinningen

4.5.1 Achtergrond

De zoutconcentratie van het grondwater in de ondiepe ondergrond is sterk afhankelijk van de regionale geologie. Bijvoorbeeld door breukwerking kan de kans op verzilting nihil zijn (centrale slenk) of juist hoog (Peelhorst). Een toename van de onttrekking kan leiden tot het aantrekken van (fossiel) brak grondwater. De chlorideconcentratie kan hierdoor tot boven de drinkwater norm van 150 mg/l stijgen. In het verleden betekende verzilting van een winveld veelal reductie van de winning of zelfs sluiting. Door technologische ontwikkelingen en nieuwe concepten (o.a. het zoethouder concept) is het thans mogelijk om verzilting beheersbaar te houden.

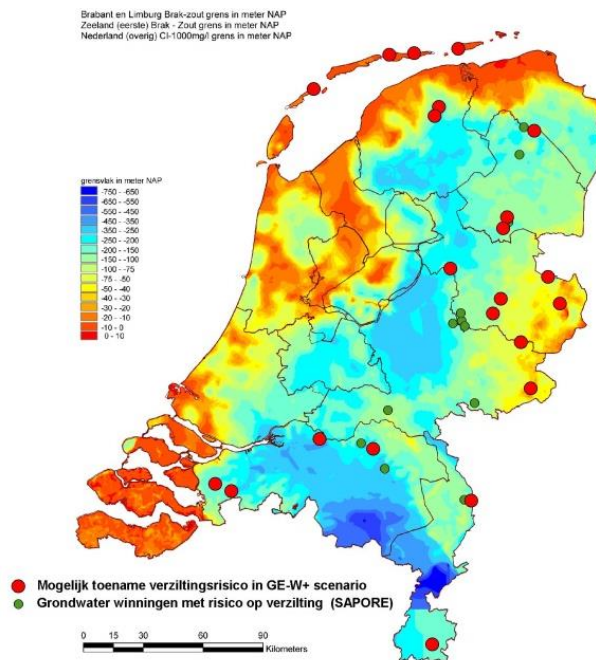
Toch is voorkomen nog steeds beter dan genezen. Ter indicatie van het risico op verzilting is door Stuyfzand (2002) een risicosystematiek ontwikkeld: SAPORE, SALinization POtential for water Resources. In het kader van de landelijke zoetwaterverkenning (Klijn *et al.*, 2012) is de SAPORE systematiek gecombineerd met een inventarisatie bij waterbedrijven. Op basis hiervan is een overzicht opgesteld waarbij onderscheid is gemaakt tussen theoretisch risico, onderkend risico en actuele verzilting. Het resultaat van deze inventarisatie is weergegeven in Figuur 4-100. Het gaat in totaal om 36 winningen met risico op verzilting waarvan er 14 zijn onderkend en twee (Noordbergum en Garyp) kampen met actuele reductie van de wincapaciteit. Voor de 14 onderkende winningen geldt dat zolang de vergunning niet wordt overschreden, het risico op verzilting in de huidige situatie beheersbaar is. Het in Figuur 4-100 geschetste beeld komt overeen met een recente door het RIVM uitgevoerde screening op chloridegehalten in onttrekkingsputten voor drinkwater productie (Wuijts *et al.*, 2013).



Figuur 4-100. Risico op verzilting van grondwaterwinningen door opkegeling van brak grondwater. Rood: actuele verzilting, roze: onderkend risico, groen: grondwaterwinning met risico volgens SAPORE.

4.5.2 Effecten

Zoals al aangegeven in hoofdstuk 3 is het effect van klimaatverandering op de gemiddelde grondwater onttrekking gering. Hiermee is ook het risico van verzilting van grondwater winningen als direct gevolg van klimaatverandering beperkt. Een andere route waarmee klimaatverandering effect kan hebben op de verzilting van grondwaterwinningen is zeespiegelstijging. Uit modelberekeningen (Ter Voorde & Velstra, 2009) blijkt echter dat de invloed van zeespiegelstijging op verzilting zich beperkt tot een strook van 7 km langs de kust. De hier gelegen drinkwaterwinningen liggen alle binnen de duinen, waar de zoetwater bel de komende tientallen jaren juist zal blijven groeien door het overgaan op infiltratie van voorgezuiverd rivierwater. Socio-economische scenario's hebben een vele malen grotere impact op het waterverbruik en daarmee op het verziltingsrisico van grondwaterwinningen. Uit de zoetwaterverkenning in het kader van het Deltaprogramma komt naar voren dat door het gecombineerde effect van klimaatverandering en socio-economische ontwikkeling, verzilting bij 22 winningen een knelpunt kan vormen in het Global Economy W+ scenario (Figuur 4-111). Dat het onderkende verziltingsrisico op een aantal locaties (o.a. Deventer) zich niet vertaalde in een verhoogd risico in het GE W+ scenario, wordt veroorzaakt door de ten opzichte van de vergunning relatief lage onttrekking in de periode 2006-2008. Een nadere analyse voor deze winningen is gewenst.



Figuur 4-111. Winningen met door toenemende vraag (overschrijding duurzame capaciteit) mogelijk verhoogd risico op verzilting in het 'GE W+' scenario. Bron: Knelpuntenanalyse Zoetwater (Klijn et al., 2012)

4.6 Klimaatverandering en grondwaterkwaliteit

4.6.1 Achtergrond

Nederland is voor de drinkwatervoorziening voor ca. 60% afhankelijk van grondwater. Een goede kwaliteit van het grondwater is dan ook van groot economisch en maatschappelijk belang. Om tijdig te kunnen anticiperen is het voor drinkwaterbedrijven belangrijk inzicht te hebben in factoren die de kwaliteit van het grondwater (negatief) kunnen beïnvloeden. Een nog weinig onderzochte factor is de invloed van klimaatverandering. Dat het klimaat invloed heeft op de grondwaterkwaliteit is evident. Echter, er is nog veel onduidelijk over hoe veranderingen in meteorologische omstandigheden doorwerken in de kwaliteit van het

grondwater. Deze onduidelijkheid wordt deels veroorzaakt door de verschillende manieren waarop het klimaat de grondwaterkwaliteit kan beïnvloeden. Voorbeelden hiervan zijn: het effect van de bodemtemperatuur op de snelheid van bodemreacties, de invloed van neerslag en verdamping (grondwateraanvulling) op de concentraties van stoffen in het grondwater en het effect van neerslag en verdamping op de grondwaterstandsdynamiek en daarmee op de aeratie van de ondergrond. Naast deze min of meer directe relaties kan de grondwaterkwaliteit ook secundair door klimaatverandering worden beïnvloed. Hierbij kan gedacht worden aan verandering in grondwaterstromingspatronen als gevolg van zeespiegelstijging of verandering van de grondwateraanvulling door veranderingen in rivierafvoeren (Hooijboer & de Nijs, 2011). Daarnaast zijn ook indirecte effecten van klimaatverandering van invloed op de grondwaterkwaliteit, zoals veranderingen in de teelt van gewassen en de hieraan gerelateerde veranderingen in het gebruik van meststoffen en bestrijdingsmiddelen (hoofdstuk 2; Hooijboer & de Nijs, 2011).

Net als bij de ontwikkeling van de drinkwatervraag zijn ook voor de ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit socio-economische ontwikkelingen van belang die geen relatie hebben met klimaatverandering. Het gaat hierbij onder andere om vergrijzing, toepassing van nieuwe technieken in landbouw, industrie en afvalwaterzuivering, en om veranderingen in de bevolkingsdichtheid. Al de in het bovenstaande genoemde ontwikkelingen bepalen samen de toekomstige grondwaterkwaliteit.

In deze paragraaf focussen we op de genoemde directe klimaateffecten. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om de invloed van temperatuurstijging en veranderingen in neerslag en verdamping, maar ook om de invloed van afgeleide hydrologische effecten als grondwateraanvulling en grondwaterstandsdynamiek. Zoals al besproken in paragraaf 4.4.4 bestaat echter juist over deze afgeleide hydrologische effecten veel onzekerheid. Dit maakt iedere schatting van de effecten op de grondwaterkwaliteit hoogst onzeker. Dit geldt vooral voor de grondwateraanvulling op de hogere zandgronden onder scenario W+, waar de hydrologische modellen sterk verschillende uitkomsten laten zien, en dat terwijl ze nog niet eens rekening houden met aanpassingen van bodem en vegetatie aan het klimaat. In lager gelegen (peilbeheerste) gebieden met ondiepe grondwaterstanden zijn de hydrologische effecten eenduidiger. In deze gebieden neemt volgens de modellen de grondwateraanvulling bij de G+ en W+ scenario's af en bij de G en W scenario's (beperkt) toe. De grondwaterdynamiek neemt in de scenario's toe met hogere grondwaterstanden in de winter en lagere standen in de zomer. Vooral onder het W+ scenario kunnen de zomergrondwaterstanden in deze gebieden sterk dalen, behalve in gebieden die worden gevoed door een sterke kwel vanuit een hoger gelegen zandgebied, mits de grondwateraanvulling in dit voedingsgebied toeneemt (het laatste is, zoals vermeld, hoogst onzeker).

Daarnaast speelt ook de bodem een grote rol in de manier waarop hydrologische effecten van klimaatverandering doorwerken op de grondwaterkwaliteit. Zo is de bodemvocht huishouding en daarmee de verdamping en grondwateraanvulling sterk afhankelijk van het gehalte organische stof in de bodem. Het gehalte organische stof is zijn beurt weer afhankelijk van het vochtgehalte van de bodem. Over de precieze relatie tussen bodemvocht en organische stof opbouw bestaan echter nog veel vragen (Fujita *et al.*, 2013). Een ander aspect is scheurvorming als gevolg van droogte. Drogere omstandigheden leiden in principe tot meer indikking van opgeloste stoffen in de onverzadigde zone en daarmee tot hogere concentraties in het ondiepe grondwater (van Beek, 2004). Als echter door uitdroging van de bodem scheurvorming optreedt (kleiige, moerige bodems) kan regenwater van zomerse piekbuien snel diep in de bodem doordringen waardoor minder indikking optreedt. Door sterke uitdroging kan echter ook de infiltratiecapaciteit van bodems afnemen. Sommige zandbodems kunnen door droogte hydrofoob worden waardoor zomerse piekbuien minder goed infiltreren en oppervlakkig worden afgevoerd naar laagten waar ze via preferente stroombanen het grondwater voeden.

In de volgende paragrafen wordt, de grote onzekerheden in het oog houdend, een overzicht gegeven van mogelijke directe effecten van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit. Dit overzicht is deels gebaseerd op het literatuuroverzicht van Hooijboer en de Nijs (2011) over klimaatverandering en grondwater kwaliteit.

4.6.2 Organische stof

Bij het beschrijven van de effecten van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit staan we eerst stil bij de rol van organische stof in de bodem. De hoeveelheid organische stof in de bodem en de afbreekbaarheid hiervan, is sterk bepalend voor de grondwaterkwaliteit. Zo binden zware metalen en organische verbindingen sterk aan organisch materiaal, bepaalt organische stof tal van redoxprocessen, zoals denitrificatie en reductie van sulfaat, en komen bij de afbraak van organische stof nutriënten en DOC (opgelost organisch koolstof) vrij.

De omzetting van vers plantenmateriaal en organische stof in de bodem is een grotendeels bacterieel proces dat sneller verloopt bij hogere temperaturen. In de bodem vastgelegde organische stof bestaat uit een groot aantal verschillende, vaak complexe macromoleculen. De temperatuurafhankelijkheid van de afbraaksnelheid van deze macromoleculen kan onderling sterk verschillen (Davidson & Janssens, 2006). Daarnaast kan door temperatuurverandering ook een verandering in de bacteriepopulatie optreden wat van invloed kan zijn op de afbraaksnelheid en de aard van de afbraakproducten. Volgens Hooijboer and de Nijs (2011) blijkt bijvoorbeeld uit verschillende lab- en veldexperimenten dat de afbraaksnelheid vooral direct na een temperatuursverandering toeneemt, maar vervolgens weer kan afnemen. Daarnaast benadrukken verschillende auteurs dat de afbraaksnelheid van organisch materiaal niet alleen afhankelijk is van temperatuur, maar ook van vochtigheid en aeratie (Smith *et al.*, 2009; Fujita *et al.*, 2013). Onder zeer droge omstandigheden neemt de afbraak van organische stof af, en neemt ook de aanvoer van organische stof door afnemende plantengroei af. Ook onder zeer natte omstandigheden kan de afbraak van organisch materiaal worden geremd door gebrek aan zuurstof. Volgens Hooijboer and de Nijs (2011) is de invloed van onder meer temperatuur en vochtgehalte op de balans tussen aanvoer en afvoer van organisch materiaal nog onvoldoende bekend. Naast de directe klimaateffecten spelen vele andere milieufactoren een rol die deels door klimaatverandering worden beïnvloed. Voorbeelden hiervan zijn veranderingen in microbiële populatie, adsorptie van organische stof aan minerale oppervlakken, het wel of niet tijdelijk bevroren van de bodem, de verdeling van organische stof in de bodem en de aanvoer van nutriënten (Davidson *et al.*, 1998). Uiteraard wordt de hoeveelheid organische stof ook bepaald door de aanvoer van organisch materiaal, dat wil zeggen de (klimaatafhankelijke) plantengroei. Hogere temperaturen en hogere CO₂ gehalten kunnen leiden tot een toename van de plantengroei en daarmee tot hogere aanvoer van organisch materiaal. Concluderend kan gesteld worden dat er momenteel zowel in Nederland als internationaal onvoldoende kennis is over de ontwikkeling van organische stof in bodems. Ontwikkeling van kennis op dit vlak is cruciaal voor zowel de grondwaterkwantiteit (organische stof is van invloed op de bodemfysische eigenschappen en daarmee op de verdamping en de grondwateraanvulling) als voor de grondwaterkwaliteit (redoxprocessen, mineralisatie, adsorptie etc.).

4.6.3 Nutriënten

Excessieve uitspoeling van nutriënten en de hiermee samenvallende belasting van het grondwater met o.a. nitraat is een belangrijke bedreiging voor de Nederlandse drinkwatervoorziening. De belangrijkste bron van nutriënten in Nederlandse bodems is het gebruik van meststoffen in de landbouw. Hoe deze nutriënten worden verbruikt of uitspoelen is afhankelijk van een groot aantal factoren. Een aantal van deze factoren hebben een directe relatie met het klimaat. De belangrijkste factoren zijn neerslag en temperatuur en de redoxtoestand van de bodem, die mede wordt bepaald door de dynamiek van de grondwaterstand. In onderstaande bespreken we de doorwerking van deze factoren op respectievelijk fosfaat, nitraat en ammonium.

Fosfaat

De mobiliteit van fosfaat wordt bepaald door adsorptie aan ijzer en aluminium (hydr)oxiden en andere mineralen. In de goed ontwaterde en bekalkte landbouwgebieden in de zandregio's zal van landbouwbemesting afkomstig fosfaat over het algemeen niet of nauwelijks uitspoelen naar het diepere grondwater. In nattere gebieden (bijvoorbeeld veenbodems) kan anaerobie optreden waardoor ijzeroxides reduceren. Het gebrek aan ijzeroxides kan er vervolgens toe leiden dat fosfaat in oplossing gaat. Uitspoeling vindt in deze gebieden echter vooral plaats richting het oppervlaktewater en niet richting het diepere grondwater. In Holoceen Nederland komt lokaal kwel voor van brak tot zout (fossiel) Holoceen transgressiewater. Door het langdurig contact met overvloedig aanwezig organisch materiaal, is dit water diep anoxisch en bevat het water extreem hoge gehalten aan fosfaat (Stuyfzand, 1993).

Klimaatverandering kan de fosfaatconcentratie in het grondwater op een aantal manieren beïnvloeden. De belangrijkste route verloopt via de redoxtoestand van de bodem. Bij langdurig hoge grondwaterstanden wordt de bodem anaeroob en kan fosfaat mobiel worden door het reduceren van ijzer(hydr)oxiden, bij drogere omstandigheden zal het zuurstofgehalte in de bodem juist toenemen, waardoor de ijzer(hydr)oxiden stabiel blijven. Daarnaast kan door de stijgende temperatuur en veranderende vochtcondities de afbraak van organische stof toenemen en daarmee ook de belasting van het grondwater met fosfaat toenemen. Ten slotte kan door zeespiegelstijging de invloed van fosfaatrijke kwel in West Nederland toenemen.

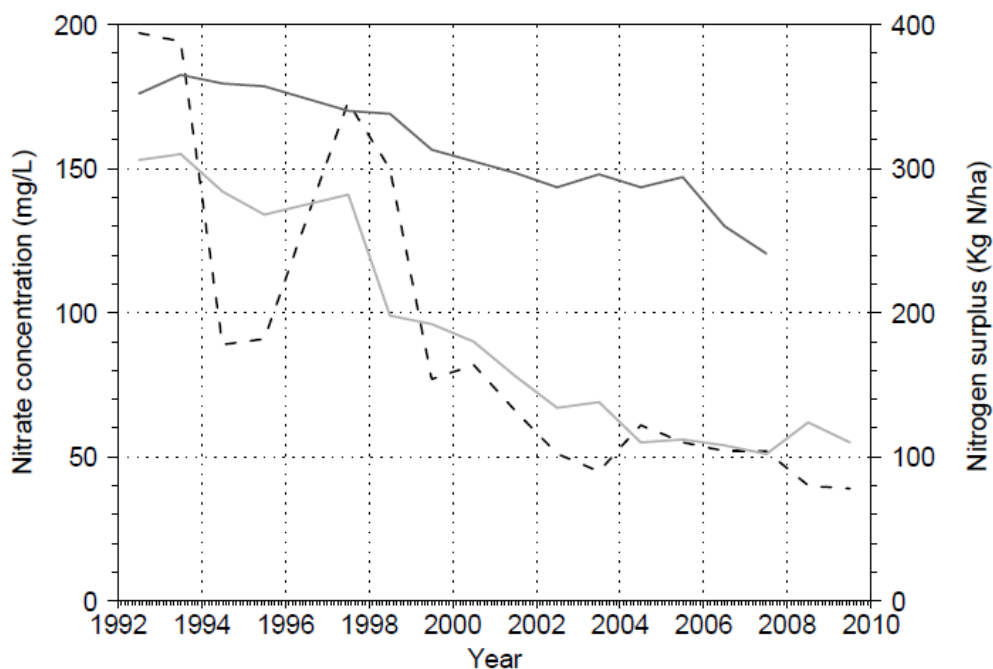
Ammonium en nitraat

Een voor de drinkwatervoorziening relevanter nutriënt is stikstof. Belangrijke bronnen van stikstof zijn bemesting, afbraak van organisch materiaal en atmosferische depositie (Reijnders, 2004). De belangrijkste vormen waarin stikstof in de bodem voorkomt zijn nitraat (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+). Ammonium wordt vooral gevormd door afbraak van organisch materiaal onder zuurstofloze omstandigheden. Het eerder genoemde Holocene transgressiewater bevat naast fosfaat ook zeer hoge ammoniumconcentraties. Ammonium is door de binding aan kleideeltjes weinig mobiel en wordt onder zuurstofrijke condities omgezet naar nitraat. In tegenstelling tot ammonium en fosfaat is nitraat zeer mobiel en een belangrijke probleemstof voor de drinkwaterproductie uit grondwater. Volgens Wuijts *et al.* (2013) komt nitraat bij 11 grondwaterwinningen in normoverschrijdende concentraties voor in onttrekkingsputten. Door van Loon (2012) wordt aangegeven dat 48 grondwaterwinningen te maken hebben met gevolgen van vermisting. Onder zuurstofarme condities kan nitraat door bacteriën in aanwezigheid van organische stof of pyriet worden omgezet naar (inert) stikstofgas (N_2). Onder zuurstofarme of -loze omstandigheden is de concentratie nitraat dan ook laag of geheel afwezig. Als gevolg van bovenstaand proces wordt echter organische stof en pyriet afgebroken. Als gevolg van de afbraak van organische stof zullen de ammonium- en fosfaatconcentratie van het grondwater toenemen. Ook kan de concentratie opgeloste organische stof (DOC) in het grondwater toenemen en kunnen kleurproblemen ontstaan bij het drinkwater. Bij oxidatie van pyriet wordt sulfaat gevormd en kunnen arseen en zware metalen als nikkel en zink vrijkomen. Ook wordt bij de oxidatie van pyriet zuur gevormd, waardoor in de bodem aanwezige kalk wordt opgelost en de hardheid van het grondwater sterk kan toenemen (van Beek, 2004).

De uitspoeling van nitraat hangt sterk samen met de patronen in neerslag en verdamping. In natte jaren vindt aanmerkelijk meer verdunning plaats waardoor de nitraatconcentratie in het grondwater uiteindelijk lager is (Hooijboer & de Nijs, 2011; Vrijhoef & Boumans, 2011); Figuur 4-122). Als gevolg van droge jaren kan de nitraatconcentratie in het grondwater juist stijgen zoals bleek uit monitoring rond puttenveld 't Klooster (van Beek, 2004). Bedraagt de grondwateraanvulling in gemiddelde jaren zo'n 350 mm, in droge jaren is deze aanvulling aanzienlijk minder, bijvoorbeeld 100 mm/jr. Bij gelijke aanvoer van stikstof aan maaiveld door bijvoorbeeld mest of atmosferische depositie, zal de concentratie van nitraat in het bodemvocht ruwweg 3,5 keer hoger zijn in een droog jaar. Deze hoge concentraties zijn

boven in de bodem aanwezig en zullen afhankelijk van de dikte van de onverzadigde zone soms pas na jaren naar het grondwater zijn uitgespoeld (Zwolsman *et al.*, 2007).

In gebieden met relatief hoge grondwaterstanden en/of met een goede bodemtextuur (lössbodems) zal de grondwateraanvulling onder het G+ en zeker het W+ scenario dalen. De nitraatconcentraties zullen hierdoor, bij gelijke belasting aan maaiveld, dus waarschijnlijk stijgen. Bij de G en W scenario's zal de aanvulling gelijk blijven of licht dalen wat resulteert in gelijkblijvende of licht stijgende nitraatconcentraties in het grondwater. De ontwikkeling van de grondwateraanvulling op de hoge zandgronden is nog erg onduidelijk: modellen wijzen zowel op daling, gelijk blijven, als stijging bij scenario W+ (zie paragraaf 4.4.4). Dat maakt de toekomstige ontwikkeling van de nitraatconcentraties in deze gebieden zeer onzeker. Daarnaast zullen ook veranderingen in neerslagpatronen gevolgen hebben voor de nitraatconcentratie. In alle scenario's neemt de hevigheid van zomerse neerslagbuien toe, maar hun frequentie af. Een toename in de regenintensiteit aan het eind van de zomer kan er toe leiden dat veel van het door mineralisatie gevormde nitraat dat in de bodem is opgehoopt, snel uitspoelt tot buiten het bereik van planten. Hevige buien op droge (hydrofobe) grond, kunnen leiden tot overschrijding van de infiltratiecapaciteit en resulteren in oppervlakkige afvoer waardoor de aanvulling in de zomer via preferente stroombanen verloopt, wat juist tot een lagere nitraatconcentratie van de grondwateraanvulling leidt.



Figuur 4-122. In de periode 1992-1995 werd in het Landelijk Meetnet Mestbeleid een opvallende daling in de gemiddelde nitraatconcentraties (gestippelde lijn) geobserveerd, welke niet was te verklaren met het gemiddelde stikstofoverschot (zwarte lijn). Mede op basis van chlorideconcentraties kon verdunning als belangrijkste oorzaak worden aangewezen (Vrijhoef & Boumans, 2011).

Naast indikking is ook de mate van denitrificatie klimaatafhankelijk. Door stijging van de bodemtemperatuur zullen bacteriële processen in de bodem sneller verlopen en daarmee ook denitrificatie. Echter, ook de aanwezigheid van zuurstof en de beschikbaarheid van een elektronendonor zoals organisch materiaal zijn van belang. In de 'natte' scenario's G en W kan de zuurstofbeschikbaarheid afnemen en daarmee de denitrificatie van nitraat toenemen. In de droge scenario's G+ en W+ kan de denitrificatie juist afnemen door sterkere aeratie van de bodem. Als de bodem echter te sterk uitdroogt kan microbiële activiteit en daarmee de afbraak van organisch materiaal en de productie van nitraat worden geremd. Uiteraard is dit

laatste vooral van belang voor natuurgebieden en in mindere mate voor bemeste landbouwgronden. Over hoe klimaatverandering ingrijpt op beschikbaarheid van organisch materiaal en denitrificatie is nog veel onduidelijk. Rivett *et al.* (2008) geven aan dat meer onderzoek nodig is naar de optimale ecologische, hydrologische en chemische condities voor afbraak van nitraat.

4.6.4 Sulfaat en hardheid

Atmosferische depositie van zwavel is sinds de jaren '80 van de vorige eeuw door effectief beleid sterk afgenomen. Zo daalde de hoeveelheid zwavel per jaar van 60 kg S/ha in de jaren tachtig naar de huidige waarden van minder dan 10 kg S/ha (Cirkel *et al.*, 2013). Toch nemen de sulfaatgehalten in het Nederlandse grondwater nog steeds toe (Mendizabal *et al.*, 2012). Dit wordt deels veroorzaakt door de traagheid van het grondwatersysteem, maar diverse auteurs wijzen ook op de oxidatie van pyriet door atmosferische zuurstof als gevolg van dalende grondwaterstanden (Smolders *et al.*, 2006; Boman *et al.*, 2010) en op oxidatie van pyriet door nitraat als gevolg van excessieve bemesting (Appelo & Postma, 2005; Juncher Jørgensen *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009). Zoals Cirkel *et al.* (2013) laten zien, bestaat er een duidelijke relatie tussen pyrietoxidatie en de hardheid van het grondwater. Bij oxidatie van pyriet wordt immers zuur gevormd waardoor kalk wordt opgelost.

Op basis van bovenstaande kan worden afgeleid dat klimaatverandering via verschillende paden de sulfaatconcentratie en hardheid van het grondwater kan beïnvloeden. Deze lopen enerzijds indirect, via veranderingen in de afbraak van pyriet door o.a. temperatuurstijging en veranderingen in de nitraatconcentratie van het grondwater, maar ook meer direct via het oxideren van pyriet door atmosferische zuurstof als gevolg van het diep uitzakken van de grondwaterstand. Een duidelijk verband tussen stijgende sulfaatconcentraties, toename van de hardheid en diep wegzakkende grondwaterstanden (als gevolg van een serie droge jaren) is aangetoond rond het puttenveld 't Klooster (van Beek, 2004).

Oxidatie door atmosferische zuurstof is vooral van belang voor (voormalige) kwelgebieden en gebieden met stagnerend grondwater, zoals de Gelderse vallei, waar pyriet ondiep in het bodemprofiel voorkomt (Van Beek *et al.*, 2001; Cirkel *et al.*, 2013). Juist voor deze gebieden duiden de G+ en W+ scenario's op een toename van de grondwaterdynamiek en een daling van de laagste grondwaterstanden. Een kanttekening hierbij is, dat als de grondwateraanvulling in het W+ scenario op de hoge zandgronden sterk toeneemt (wat zeer onzeker is), de navenant toenemende kwelflux (een deel van) de grondwaterstands daling lokaal kan compenseren. Juist in natte (kwelgevoede) natuurgebieden is in de afgelopen eeuw veel zwavel vastgelegd in de vorm van ijzersulfiden. Deze gebieden zijn hierdoor uitermate kwetsbaar geworden voor een toenemende grondwaterdynamiek en daarmee gepaard gaande oxidatie. Het is om deze reden van groot belang meer inzicht te krijgen in de effecten van klimaatverandering op de grondwateraanvulling op de hogere zandgronden en de hieraan gerelateerde kwelfluxen naar de lager gelegen (natuur)gebieden.

4.6.5 Zware metalen

Zware metalen binden sterk aan de bodem. Hiervoor zijn onder meer het organische stofgehalte en de pH van de bodem van belang. Zoals besproken is er over de ontwikkeling van organische stofgehalten in de bodem als gevolg van klimaatverandering nog veel onduidelijk. Volgens Hooijboer and de Nijs (2011) zijn er in de literatuur geen aanwijzingen dat de pH zal veranderen. Bodem pH is echter afhankelijk van een groot aantal fysische, chemische en biologische factoren, zoals grondwaterstromingspatronen, redoxcondities en ontwikkelingen in plantengroei en organische stof. Het is hierdoor vooralsnog onmogelijk om harde uitspraken te doen over pH verandering als gevolg van klimaatverandering.

Ondanks de sterke binding van zware metalen aan de bodem zal een toename van de grondwateraanvulling resulteren in versterkte uitspoeling. Dit effect is echter nog onvoldoende gekwantificeerd (Hooijboer & de Nijs, 2011). Ook door verwerking of oxidatie

van mineralen kan de concentratie van bepaalde zware metalen in het grondwater toenemen. Een duidelijk voorbeeld is de oxidatie van pyriet (FeS_2). Pyriet bevat in het algemeen bijmenging van zware metalen als nikkel, zink, en kobalt, maar ook arseen (Van Beek *et al.*, 2001; Werkgroep pyriet, 2002; Cirkel *et al.*, 2013). Zoals aangegeven kan een toenemende grondwaterstandsdynamiek als gevolg van klimaatverandering resulteren in versterkte oxidatie van pyriet en daarmee grotere belasting van het grondwater met zware metalen.

4.6.6 Bestrijdingsmiddelen

Klimaatverandering beïnvloedt zowel de toepassing van bestrijdingsmiddelen als het gedrag van bestrijdingsmiddelen in het milieu. Wat betreft de invloed van klimaatverandering op de toepassing van bestrijdingsmiddelen gaat het hierbij vooral om de volgende drie aspecten (Blom *et al.*, 2008; Ligtvoet & van Minnen, 2012; zie ook hoofdstuk 2):

- Hogere productiviteit door een langer groeiseizoen, hogere temperatuur en toegenomen koolzuurgehalte atmosfeer;
- Toename ziektes en plagen door nattere omstandigheden (schimmels) en hogere temperaturen (nieuwe plaagsoorten, minder sterfte in winter, meer generaties plaaginsecten)
- Nieuwe teelten van warmteminnende soorten

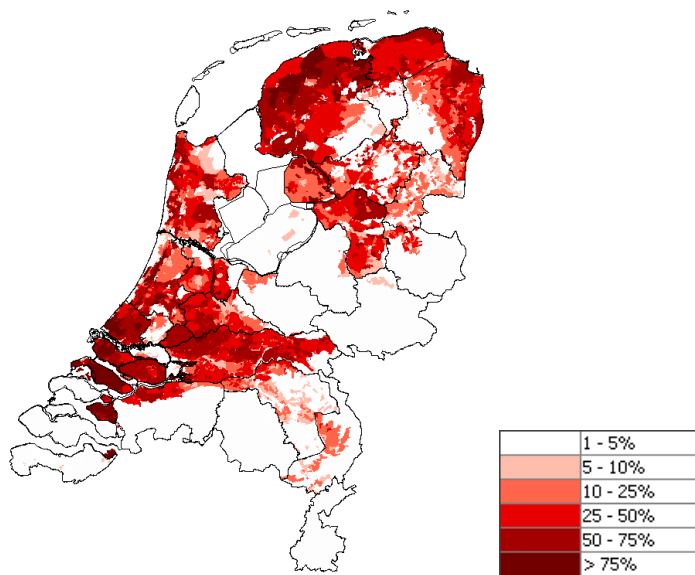
Bovendien heeft klimaatverandering effect op de verspreiding van bestrijdingsmiddelen in het milieu. Hogere temperaturen kunnen resulteren in een toename van de vervluchtiging en meer afbraak en daarmee in een verlaging van de concentraties in het grondwater. Intensievere buien, daarentegen, kunnen leiden tot versterkte afspoeling en infiltratie van bestrijdingsmiddelen in de bodem. Klimaatverandering kan dus zowel een positief als negatief effect hebben op de uitspoeling van bestrijdingsmiddelen naar het grondwater. Onduidelijk is welke processen de overhand zullen hebben (Hooijboer en de Nijs, 2011).

4.6.7 Infiltrerend oppervlaktewater

In grote delen van Nederland wordt oppervlaktewater aangevoerd om in droge periodes te kunnen voldoen aan de watervraag (Figuur 4-133). In het rivierengebied en de grote wegzijgingsgebieden van bijvoorbeeld Overijssel, kan infiltrerend oppervlaktewater een belangrijke aanvulling vormen op het grondwater. Dit infiltrerende oppervlaktewater is uiteraard van invloed op de grondwaterkwaliteit en daarmee op de grondstof van ondiepe grondwaterwinningen. Leunk and De Rijk (2006) laten zien dat 58 Nederlandse grondwaterwinningen worden beïnvloed door infiltrerend oppervlaktewater. Het gaat hierbij vooral om oppervlaktewater uit regionale wateren, in 15 gevallen gaat het echter (ook) om beïnvloeding door grote kanalen of rivieren. Samen met de 13 oevergrondwaterwinningen zijn deze winningen goed voor 29% van het voor de drinkwatervoorziening opgepompte grondwater.

Zowel het aandeel van infiltrerend oppervlaktewater op de waterbalans van een gebied, als de kwaliteit van dit infiltrerende water wordt beïnvloed door klimaatverandering. Uit berekeningen voor de droogtestudie blijkt dat de wateraanvoer in het G scenario nauwelijks verschilt ten opzichte van de huidige situatie. In het W+ scenario neemt de neerslag af, maar de verdamping toe. De noodzakelijke bijdrage van infiltrerend oppervlaktewater op de waterbalans neemt hierdoor toe voor de 2050 tijdshorizon (Klijn *et al.*, 2012).

De verwachting is echter dat door klimaatverandering de afvoer van rivieren in de zomer dramatisch kan gaan dalen. Volgens een onderzoek in opdracht van de Deltacommissie kan de Rijnaafvoer in 2050 's zomers tot 35% zijn gedaald en in 2100 zelfs tot 60% (Vellinga *et al.*, 2009). Een dergelijk lage afvoer gaat gepaard met een slechtere waterkwaliteit (Van Vliet & Zwolsman, 2008; Wuijts *et al.*, 2012) en met een grotere concurrentie om het beschikbare zoete water tussen landbouw, natuur en andere belanghebbenden.



Figuur 4-133. Gebieden waar aanvoer van oppervlaktewater mogelijk is. Percentages geven het aandeel water uit het hoofwatersysteem aan (Klijn *et al.*, 2012).

De kwaliteit van het regionale oppervlaktewater wordt, waar externe wateraanvoer mogelijk is (Figuur 4-133), sterk bepaald door de kwaliteit van het hoofwatersysteem. De conclusies uit hoofdstuk 5 over de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit van de grote rivieren zijn dus ook op grote delen van het regionale watersysteem van toepassing. Echter ook bij infiltrerend oppervlaktewater waar geen wateraanvoer vanuit het hoofwatersysteem mogelijk is spelen kwaliteitsproblemen. Het gaat hierbij om verminderde verdunning van RWZI-effluent en industriële lozingen tijdens droogte en verhoogde uit- en afspoeling van stoffen en overstorten bij extreme buien na periodes van droogte (van den Berg *et al.*, 2004).

4.7 Effecten klimaatverandering op natuur

Wat klimaatverandering voor de natuur betekent, is nog verre van duidelijk. Op een globaal schaalniveau zal klimaatverandering leiden tot verschuivingen in de arealen van soorten: soorten van een warmer klimaat zullen toenemen, terwijl soorten van een kouder klimaat, op de langere termijn, zullen verdwijnen uit Nederland. Voor de hogere planten in Nederland zijn zulke gevolgen van klimaatverandering onderzocht door (Tamis *et al.*, 2000). De veranderingen hebben te maken met de directe invloed van temperatuur op het functioneren van organismen, bijvoorbeeld via de bestendigheid van planten tegen vorst en hitte, of via het uitlopen van bloemknoppen na het bereiken van een bepaalde temperatuursom (Noest *et al.*, 1995; Walther *et al.*, 2002). Het is echter aannemelijk dat de grootste effecten van klimaatverandering op de biodiversiteit optreden via wijzigingen in de waterhuishouding (Bazzaz *et al.*, 1996; Van Oene & Berendse, 2001). Door temperatuurstijging en toename van droge periodes die worden afgewisseld met intensievere regenval, zal de vochtdynamiek in de bodem veranderen (Easterling *et al.*, 2000; Weltzin *et al.*, 2003; Porporato *et al.*, 2004; Fay *et al.*, 2008; Knapp *et al.*, 2008). De bodemvochthuishouding is van essentieel belang voor de vegetatie, omdat deze invloed heeft op cruciale factoren voor de plantengroei, zoals de zuurgraad en de beschikbaarheid van water, zuurstof en nutriënten (Easterling *et al.*, 2000; Weltzin *et al.*, 2003; Porporato *et al.*, 2004; Witte *et al.*, 2007; Knapp *et al.*, 2008; Levine *et al.*, 2008; Bartholomeus *et al.*, 2011c).

Op basis van literatuuronderzoek, modelstudies en deskundigenoordeel zijn de gevolgen van klimaatverandering voorlopig als volgt, beoordeeld (zie de schetskaart in Figuur 4-14) (Witte *et al.*, 2009a; Witte *et al.*, 2009b; Witte *et al.*, 2012b; Van Bodegom *et al.*, 2013):

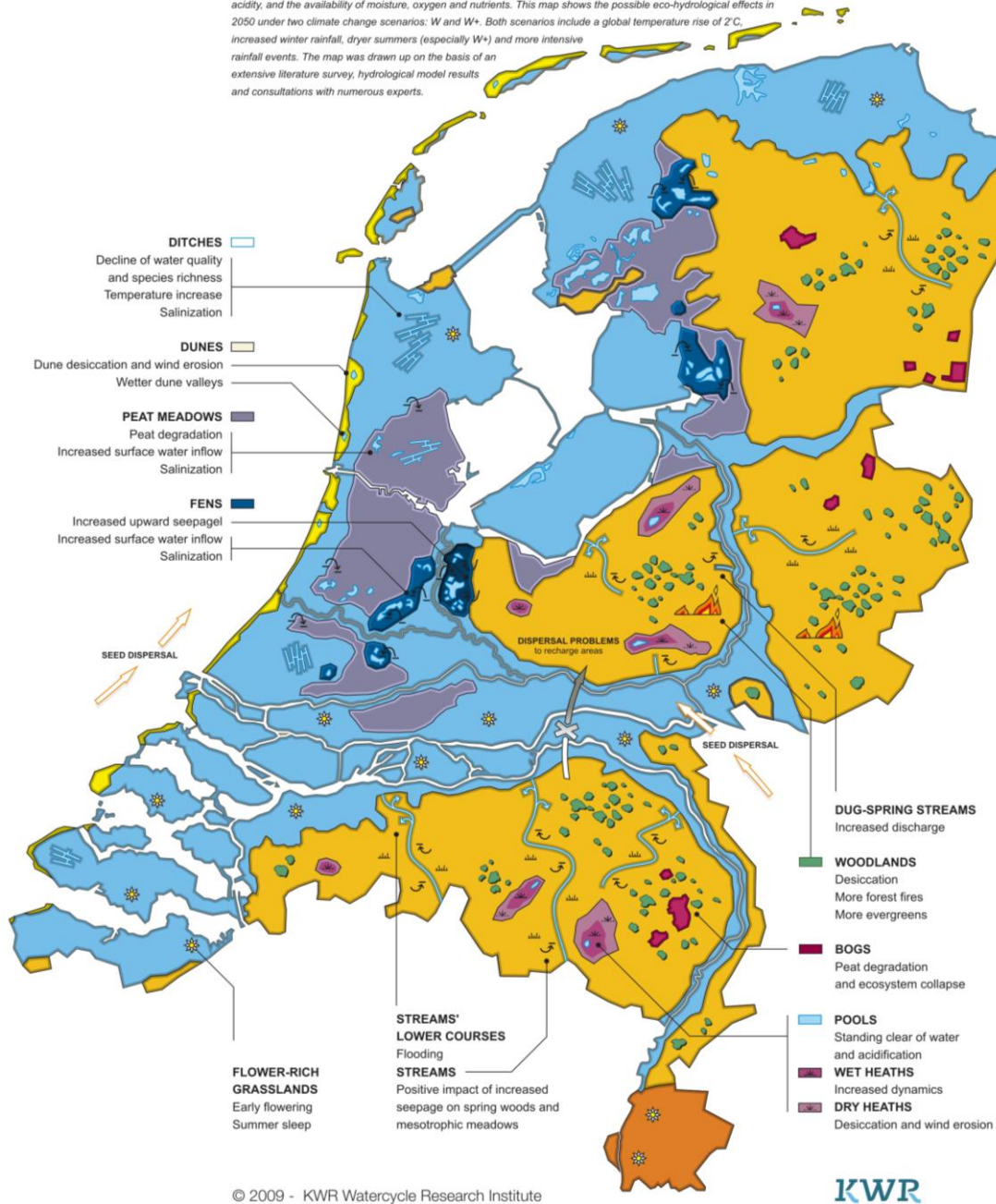
- Klimaatverandering zal vooral gevolgen hebben voor vegetaties die voor hun watervoorziening geheel zijn aangewezen op de atmosfeer. Grondwateronafhankelijke vegetaties op hoge zandgronden – zoals stuwwallen, duinen en hogere dekzandruggen – zullen onder alle scenario's te maken krijgen met een groter vochttekort in het groeiseizoen. Onder scenario W+ is de toename van dat tekort aanzienlijk, wat zal leiden tot een opener vegetatie en een toename van het aandeel vroege bloeiers en soorten die in zomerslaap gaan. Verschillende bomen zullen de grotere droogte niet overleven. Het aantal wintergroene soorten in bossen zal toenemen en bij de droge scenario's G+ en W+ zal er sprake zijn van een verhoogd risico op bosbranden.
- Ook in natte en alleen door regenwater worden gevoede ecosystemen kunnen grote veranderingen optreden. Door de toegenomen vochtdynamiek en temperatuur zullen karakteristieke vegetaties van hoogvenen, vennen en natte heiden het moeilijker krijgen. De ontwikkeling van levend hoogveen in Nederland is onder scenario W+ waarschijnlijk kritiek.
- De kwel naar lage gebieden als beekdalen, duinvalleien en de randen van grote infiltratiegebieden zal toenemen onder het relatief natte scenario G en W. Dat gebeurt mogelijk ook onder het droge scenario W+. Dat komt doordat de bodem in hoger gelegen infiltratiegebieden in dit scenario 's zomers zo ver uitdroogt, dat de werkelijke verdamping door de vegetatie sterk wordt gereduceerd en, dientengevolge, de jaarlijkse grondwateraanvulling stijgt. De toename van de grondwateraanvulling en kwel onder W+ zijn echter hoogst onzeker omdat de toekomstige verdampingseigenschappen van de vegetatie in het voedende infiltratiegebied thans nog niet bekend zijn. De kweltoename zou gunstig zijn voor de biodiversiteit van sprengen, beken, natte duinvalleien en door kwelwater gevoede schraallanden, zoals die voorkomen in het laagveenmoeras net aan de westelijke voet van de Utrechtse Heuvelrug. Daar staat bij scenario W+ een ongunstige verandering tegenover, namelijk dat als de kweltoename onvoldoende is, de grondwaterstand in de loop van de drogere zomer dieper kan wegzakken. Voor een dergelijk kweltoename moet het infiltratiegebied voldoende groot zijn.
- Benedenlopen van beken krijgen vaker te maken met overstromingen, wat bij de huidige kwaliteit van het beekwater voor verschillende vegetaties ongunstig zal zijn.
- De waterkwaliteit van sloten en meren zal vermoedelijk achteruitgaan doordat in de zomer de watertemperatuur stijgt, de peilen dalen, de verzilting toeneemt en de invloed van sulfaatrijk water uit de grote rivieren toeneemt. Laagveenmoerassen, zoals de Nieuwkoopse plassen en de Weerribben, waaruit veel water wegzijgt naar een diep ontwaterde omgeving, zullen zonder aanvullende maatregelen (denk aan een ander peilbeheer) in de zomer meer aanvoer van oppervlaktewater nodig hebben. Door de slechtere kwaliteit van dit oppervlaktewater, moet voor een achteruitgang van de biodiversiteit worden gevreesd. Dat geldt ook voor de biodiversiteit van het veenweidegebied, niet alleen wegens de grotere invloed van kwalitatief slecht oppervlaktewater, maar ook doordat een lagere grondwaterstand en een hogere temperatuur in de zomer zullen leiden tot een versnelde afbraak van het veen.

Eco-hydrological impact of climate change

Preliminary sketch map (W and W+ scenarios, 2050)

Authors: Jan-Philip M. Witte and Han Runhaar

Climate change, through its impact on the watercycle, will alter the diversity of plant species and plant communities. These alterations will in turn have an effect on habitat factors that are essential for plant growth such as salt levels, acidity, and the availability of moisture, oxygen and nutrients. This map shows the possible eco-hydrological effects in 2050 under two climate change scenarios: W and W+. Both scenarios include a global temperature rise of 2 C, increased winter rainfall, dryer summers (especially W+) and more intensive rainfall events. The map was drawn up on the basis of an extensive literature survey, hydrological model results and consultations with numerous experts.



Figuur 4-14. Ecohydrologische schetskaart met de veronderstelde gevolgen van klimaatverandering voor de natuur in Nederland (Witte et al., 2012b).

De hiervoor geschetste gevolgen zijn met grote onzekerheden omgeven. Dat komt niet alleen doordat het verre van bekend is hoe het klimaat precies gaat veranderen, al is een aantal trends die ten grondslag liggen aan bovenstaande schets wel duidelijk: het wordt warmer, de zomers worden meestal droger, de winters natter, neerslag zal meer in de vorm van piekbuien vallen. Maar ook het inschatten van de ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering is met minstens zo grote onzekerheden omgeven. **Een juiste analyse van deze gevolgen, valt of staat met een op maat gesneden modellering van de waterhuishouding.**

Een eerste punt van verbetering ligt in de modellering van de verdamping, vooral die van de hogere zandgronden. Weten we nog nauwelijks iets af van de verdamping van droogteminnende vegetaties, nog minder weten we hoe in droge gebieden de vegetatie-eigenschappen van de vegetatie zullen veranderen door klimaatverandering. Voor een klimaatrobuuste hydrologische modellering zullen we rekening moeten houden met enkele structurele aanpassingen van bodem en vegetatie aan het klimaat: (1) de *water use efficiency* van planten stijgt met een toenemend CO₂-gehalte; (2) het aandeel kale grond en het aandeel weinig verdampende mossen en korstmossen in de vegetatie van hogere zandgronden stijgt in drogere zomers, maar (3) tegelijk kan het aandeel langzaam groeiende dwergheesters toenemen; (4) toename van droge periodes zal doorgaans leiden tot een verhoogde afbraak van organische stof, wat nadelig is voor de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht. Zolang deze aanpassingen niet zijn gekwantificeerd, zijn hydrologische modellen waarschijnlijk niet geschikt voor het simuleren van effecten van klimaatscenario's op het watersysteem, en zijn uitspraken over gevolgen van klimaatverandering voor de haalbaarheid van natuurdoelen met onacceptabel grote onzekerheden omgeven.

Grote onzekerheden vloeien ook voort uit de manier waarop de haalbaarheid van natuurdoelen wordt berekend. Huidige ecohydrologische modellen zijn onvoldoende bruikbaar in een nieuw klimaat omdat ze gebaseerd zijn op zeer indirecte verbanden tussen gemiddelde grondwaterstanden en vegetatiesamenstelling, ontleend aan het klimaat van de twintigste eeuw. Daarom zijn op fysiologisch processen gebaseerde relaties nodig, waarin de invloed van het klimaat is verwerkt. In samenwerking met de universiteiten (VU, WUR) en in opdracht van zowel BTO als de onderzoeksprogramma's Klimaat voor Ruimte en Kennis voor Klimaat, heeft KWR daarom de afgelopen jaren onderzoek gedaan naar klimaatrobuuste en op processen gebaseerde relaties tussen bodem, water en vegetatie. Deze relaties zijn en worden ingebouwd in het model PROBE-2. De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand, als voorspellende variabele voor de vegetatie, is inmiddels vervangen door grootheden die direct op de vegetatie inwerken: de beschikbaarheid in het wortelmilieu van zuurstof om te respireren en van water om te transpireren. Ook wordt de berekende voedselrijkdom van de bodem nu ingebouwd in PROBE. Daarmee zijn wel al een heel eind. Waar we echter nog te weinig kennis van hebben, is de opbouw en afbraak van organische stof onder invloed van klimaatverandering. Kennis hierover is dus niet alleen van belang voor het berekenen van de grondwateraanvulling, maar ook voor de berekening van de haalbaarheid van natuurdoelen. De hoeveelheid organische stof is van invloed op de hoeveelheid water en zuurstof die ter beschikking staat van de vegetatie, maar ook voor de hoeveelheid nutriënten die via de afbraak van organische stof voor de vegetatie beschikbaar komt. Bovendien is nog weinig bekend over de effecten van extremen op de vegetatie, terwijl ecologen de grote betekenis van extremen benadrukken en die extremen naar verwachting zullen gaan toenemen. Omdat het beleid vraagt om voorspellingen voor de langere termijn (2050 of 2100, bijvoorbeeld), is het ten slotte noodzakelijk dat rekening gehouden wordt met de successie van het systeem van bodem, water en vegetatie in een veranderend klimaat.

4.8 Kennisvragen

Op basis van dit hoofdstuk onderscheiden we de volgende kennisvragen, bijeengebracht in een aantal thematische categorieën:

Verdamping, grondwateraanvulling en grondwaterdynamiek

- a. *Wat is de verdamping van natuurlijke vegetaties, met name die van de hogere zandgronden?*

Toelichting: Hier is weinig over bekend, dus zijn hydrologische modellen tot nu toe geïjkt op dubieuze cijfers over de grondwateraanvulling. Dat ondermijnt de betrouwbaarheid van hydrologische berekeningen, zeker als het gaat om grote ingrepen in het grondwatersysteem en om de gevolgen van klimaatverandering.

- b. *Hoe passen verdampingseigenschappen van de vegetatie zich aan klimaatverandering aan (bijvoorbeeld: hoe veranderen op hogere zandgronden de aandelen wortelende planten, mossen en korstmossen, dwergheesters, kaal zand)?*

Toelichting: Deze kennis is noodzakelijk om klimaatprojecties te kunnen doen. Hydrologische modellen rekenen nu met een onveranderlijke vegetatie: de hei van 2000 staat er nog net zo bij in 2050 en 2100.

- c. *Hoe kan het verdampingsproces van natuurlijke vegetaties het beste in hydrologische modellen worden geschematiseerd?*

Toelichting: het gebruik van gewasfactoren om de potentiële verdamping van de vegetatie te berekenen is aantoonbaar onjuist bij klimaatprojecties.

- d. *Wat heeft verandering in de grondwateraanvulling voor gevolgen voor de zoete grondwatervoorraad, en voor de dynamiek van het grondwatersysteem?*

Toelichting: veranderingen in de verdamping werken versterkt door in de grondwateraanvulling. De hoogte van de grondwaterspiegel en de omvang van zoetwatervoorraden in de ondergrond zijn bijna volledig afhankelijk van de grondwateraanvulling.

- e. *Wat zijn de gevolgen van vegetatiebeheer op de grondwateraanvulling?*

Toelichting: Door actief in te grijpen in de vegetatie kan de grondwateraanvulling waarschijnlijk aanzienlijk worden verhoogd. Dit kan een oplossing zijn voor watertekorten, die zeker kunnen ontstaan als de zomers veel droger worden en de zomerafvoer van de grote rivieren aanzienlijk gaat afnemen.

Dynamiek van organische stof

- f. *Hoe verandert de hoeveelheid en afbreekbaarheid van organische stof in de bodem onder invloed van meteorologische omstandigheden, atmosferische depositie, en de vegetatie zelf?*

Toelichting: De hoeveelheid organische stof is cruciaal voor waterkwantiteits-, waterkwaliteits- en natuurvraagstukken. Zo beïnvloedt het gehalte organische stof bodemfysische eigenschappen (pF- en doorlatendheidskarakteristiek), en daarmee de hoeveelheid water in de bodem die beschikbaar is voor verdamping en de droogte- en zuurstofstress die de vegetatie ondervindt. Bovendien bepaalt de hoeveelheid organische stof mede de beschikbaarheid van nutriënten voor de vegetatie. Daarnaast is de ontwikkeling van organische stof van groot belang voor redoxprocessen als denitrificatie en reductie van sulfaat.

Grondwaterkwaliteit

- g. *Hoe verandert de uitspoeling van nitraat uit de onverzadigde zone naar het grondwater door klimaatverandering?*

Toelichting: Het is niet bekend hoe klimaatverandering, in samenspel met atmosferische depositie en bemesting, leidt tot veranderingen in de uitspoeling

van nitraat uit de wortelzone naar het grondwater. Temperatuurstijging kan leiden tot verhoogde omzetting van organische stof en daarmee het vrijkomen van nutriënten, maar in natte gebieden ook tot een verhoogde denitrificatie. Toenemende verdamping zal echter door indikking leiden tot hogere nitraatconcentraties in het bodemvocht. Dit kan na een hevige regenbui voor een nitraatpuls zorgen, met mogelijk normoverschrijdingen tot gevolg.

- h. *Wat is het effect van een veranderende grondwaterdynamiek op de oxidatie van pyriet en hiermee gepaard gaande stijging van sulfaat, hardheid, zware metalen en arseen in het grondwater rond drinkwaterwinningen?*

Toelichting: Diep wegzakkende grondwaterstanden kunnen leiden tot oxidatie van pyriet. Bij deze oxidatie wordt naast sulfaat ook zuur gevormd wat door het oplossen van kalk resulteert in verhoogde hardheid van het grondwater. Omdat pyriet vaak arseen en verschillende zware metalen bevat, kan oxidatie ook leiden tot verhoogde concentraties van deze stoffen in het grondwater.

- i. *Wat is het effect van klimaatverandering op de verspreiding van bestrijdingsmiddelen in bodem en grondwater?*

Toelichting: Veranderende meteorologische condities zijn van invloed op zowel het gebruik van bestrijdingsmiddelen als het gedrag en transport van deze stoffen in de bodem en het grondwater. Het is voornamelijk onduidelijk hoe de belasting van het grondwater met bestrijdingsmiddelen als gevolg van een veranderend klimaat zich zal ontwikkelen.

- j. *Hoe verandert de invloed van infiltrerend oppervlaktewater op zowel grondwaterkwantiteit en -kwaliteit rond drinkwaterwinningen?*

Toelichting: Infiltrerend oppervlaktewater bevat in veel gevallen een groot aantal voor de drinkwaterwinning ongewenste stoffen. Zowel de kwaliteit van het oppervlaktewater als de mate van infiltratie en het aandeel oppervlaktewater in het opgepompte water zal worden beïnvloed door een veranderend klimaat. De omvang van deze veranderingen is voornamelijk onbekend.

Haalbaarheid van natuurdoelen

- k. *Zijn de huidige natuurdoelen haalbaar onder het klimaat van de toekomst?*

Toelichting: veranderingen in de verdamping, in de grondwateraanvulling, in de dynamiek van het grondwatersysteem, en in de afbraak van organische stof hebben gevolgen voor de standplaats van de vegetatie. In welke mate kunnen huidige natuurdoelen worden gerealiseerd, waar is dit niet haalbaar en in welke mate kan er gemotiveerd van de doelen worden afgeweken? Waar liggen de toekomstige hotspots van biodiversiteit?

- l. *Hoe verloopt de successie van het systeem van bodem, water en vegetatie, en wat zijn de effecten hierop van weersextremen?*

Toelichting: nadere uitwerking van voorgaande vraag.

4.9 Literatuur

- Appelo, C.A.J. & Postma, D. (2005) *Geochemistry, Groundwater And Pollution*. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Bartholomeus, R.P. & Witte, J.P.M. (2013) Gewasfactoren en potentiële verdamping: geen klimaatrobuuste combinatie; het gebruik van gewasfactoren in klimaatprojecties nader onderzocht. In: KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Bartholomeus, R.P., Voortman, B. & Witte, J.P.M. (2010) De toekomstige grondwateraanvulling. *H2O*, 17, 35-37.

- Bartholomeus, R.P., Voortman, B.R. & Witte, J.P.M. (2011a) In search of the actual groundwater recharge. Project plan. In. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M. & Runhaar, J. (2011b) Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrology*,
- Bartholomeus, R.P., Voortman, B. & Witte, J.P.M. (2013) Metingen en proceskennis vereist voor betrouwbare verdampingsberekening in grondwatermodellen. *Stromingen*, **19**
- Bartholomeus, R.P., Witte, J.-P.M., van Bodegom, P.M., van Dam, J.C. & Aerts, R. (2011c) Climate change threatens endangered plant species by stronger and interacting water-related stresses. *J. Geophys. Res.*, **116**, G04023.
- Bazzaz, F.A., Bassow, S.L., Berntson, G.M. & Thomas, S.C. (1996) Elevated CO₂ and terrestrial vegetation: Implications for and beyond the global carbon budget. *Global Change and Terrestrial Ecosystems* (ed. by B. Walker and W. Steffen), pp. 43-76. Cambridge University Press, New York.
- Blom, G., Paulissen, M., Vos, C. & Agricola, H. (2008) Effecten van klimaatverandering op Landbouw en Natuur Nationale knelpuntenkaart en Adaptatiestrategieën. In. Rapport 182, Plant Research International, Wageningen.
- Boman, A., Fröjdö, S., Backlund, K. & Åström, M.E. (2010) Impact of isostatic land uplift and artificial drainage on oxidation of brackish-water sediments rich in metastable iron sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 1268-1281.
- Brolsma, R.J., Van Beek, L.P.H. & Bierkens, M.F.P. (2010) Vegetation competition model for water and light limitation. II: Spatial dynamics of groundwater and vegetation. *Ecol. Model.*, **221**, 1348-1363.
- Cirkel, D.G., Beek, C.G.E.M., Witte, J.P.M. & Zee, S.E.A.T.M. (2013) Sulphate reduction and calcite precipitation in relation to internal eutrophication of groundwater fed alkaline fens. *Biogeochemistry*, 1-19.
- Davidson, E.A. & Janssens, I.A. (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, **440**, 165-173.
- Davidson, E.A., Belk, E. & Boone, R.D. (1998) Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, **4**, 217-227.
- De Boer, H.J., Lammertsma, E.I., Wagner-Cremer, F., Dilcher, D.L., Wassen, M.J. & Dekker, D.C. (2011) Climate forcing due to optimization of maximal leaf conductance in subtropical vegetation under rising CO₂. *PNAS*, **108**, 4041-4046.
- Dolman, H., Moors, E., Elbers, J., Snijders, W. & Hamaker, P. (2000) Het waterverbruik van bossen in Nederland. In. Alterra, Wageningen.
- Easterling, D.R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R. & Mearns, L.O. (2000) Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, **289**, 2068-2074.
- Fay, P.A., Kaufman, D.M., Nippert, J.B., Carlisle, J.D. & Harper, C.W. (2008) Changes in grassland ecosystem function due to extreme rainfall events: implications for responses to climate change. *Glob. Change Biol.*, **14**, 1600-1608.
- Fujita, Y., Van Bodegom, P.M., Runhaar, J., Olde Venterink, H. & Witte, J.P.M. (2013) Predicting N mineralization across landscape using CENTURY model coupled with local hydrological conditions. *Global Biogeochemical Cycles*,
- Gedney, N., Cox, P.M., Betts, R.A., Boucher, O., Huntingford, C. & Stott, P.A. (2006) Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, **439**, 835-838.
- Geudens, P.J.J.G. (2012) Drinkwaterstatistieken 2012. In. Vereniging van waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN), Rijswijk.
- Hermans, F., Ott, J. & Van Bakel, J. (2009) Regionale hydrologische modellering ter onderbouwing van klimaateffecten. *H₂O*, **4**, 28-32.
- Hooijboer, A.E.J. & de Nijs, A.C.M. (2011) De invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit. In. RIVM rapport 607403001/2011, Bilthoven.

- Juncher Jørgensen, C., Jacobsen, O.S., Elberling, B. & Aamand, J. (2009) Microbial Oxidation of Pyrite Coupled to Nitrate Reduction in Anoxic Groundwater Sediment. *Environmental Science & Technology*, **43**, 4851-4857.
- Kamps, P., Nienhuis, G. & Witte, J.P.M. (2008) Effects of climate change on the water table in the coastal dunes of the Amsterdam Water Supply. *Proceedings of MODFLOW and more 2008*,
- Klijn, F., van Velzen, E., ter Maat, J. & Hunink, J. (2012) Zoetwatervoorziening in Nederland; aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw. In. Deltares
- Knapp, A.K., Beier, C., Briske, D.D., Classen, A.T., Luo, Y., Reichstein, M., Smith, M.D., Smith, S.D., Bell, J.E., Fay, P.A., Heisler, J.L., Leavitt, S.W., Sherry, R., Smith, B. & Weng, E. (2008) Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, **58**, 811-821.
- Kruijt, B., Witte, J.-P.M., Jacobs, C.M.J. & Kroon, T. (2008) Effects of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *J. Hydrol.*, **349**, 257-267.
- Kulmatiski, A. (in pres) Woody plant encroachment facilitated by increased precipitation intensity.
- Leunk, I. & De Rijk, S. (2006) Kaderrichtlijn water maatregelen ten aanzien van de bescherming van winningen onder invloed van infiltrerend oppervlaktewater. In. Rapport KWR 06.115, Kiwa WR, Nieuwegein
- Levine, J.M., McEachern, A.K. & Cowan, C. (2008) Rainfall effects on rare annual plants. *J. Ecol.*, **96**, 795-806.
- Ligtvoet, W. & van Minnen, J.G. (2012) Effecten van klimaatverandering in Nederland. In. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag
- Massop, H.T.L., Van Bakel, P.J.T., Kroon, T., Kroes, J.G., Tiktak, A. & Werkman, W. (2005) Op zoek naar de "ware" neerslag en verdamping; toetsing van de met het STONE 2.1-instrumentarium berekende verdamping aan literatuurgegevens en aan regionale waterbalansen, en de gevoeligheid van het neerslagoverschot op de uitspoeling van nutriënten. In. Alterra, Wageningen.
- Medlyn, B.E., Badeck, F.W., De Pury, D.G.G., Barton, C.V.M., Broadmeadow, M., Ceulemans, R., De Angelis, P., Forstreuter, M., Jach, M.E., Kellomäki, S., Laitat, E., Marek, M., Philippot, S., Rey, A., Strassemeier, J., Laitinen, K., Liozon, R., Portier, B., Roberntz, P., Wang, K. & Jstbid, P.G. (1999) Effects of elevated [CO₂] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. *Plant, Cell & Environment*, **22**, 1475-1495.
- Mendizabal, I., Baggelaar, P.K. & Stuyfzand, P.J. (2012) Hydrochemical trends for public supply well fields in The Netherlands (1898–2008), natural backgrounds and upscaling to groundwater bodies. *Journal of Hydrology*,
- Moore, G.W. & Heilman, J.L. (2011) Proposed principles governing how vegetation changes affect transpiration. *Ecohydrology*, **4**, 351-358.
- Noest, V., Van der Maarel, E. & Van der Meulen, F. (1995) Impact of climate change on the ecology of temperate coastal wetlands, beaches and dunes. *Climate Change, Impact on coastal habitation* (ed. by D. Eisma). Lewis Publishers, Boca Raton.
- Porporato, A., Daly, E. & Rodriguez-Iturbe, I. (2004) Soil water balance and ecosystem response to climate change. *Am. Nat.*, **164**, 625-632.
- Rivett, M.O., Buss, S.R., Morgan, P., Smith, J.W.N. & Bemment, C.D. (2008) Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, **42**, 4215-4232.
- Smith, W.N., Grant, B.B., Desjardins, R.L., Qian, B., Hutchinson, J. & Gameda, S. (2009) Potential impact of climate change on carbon in agricultural soils in Canada 2000–2099. *Climatic Change*, **93**, 319-333.
- Smolders, A.J.P., Moonen, M., Zwaga, K., Lucassen, E.C.H.E.T., Lamers, L.P.M. & Roelofs, J.G.M. (2006) Changes in pore water chemistry of desiccating freshwater sediments with different sulphur contents. *Geoderma*, **132**, 372-383.

- Stuurman, R., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., de Louw, P. & Oude Essink, G. (2008) Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering. In: TNO, Utrecht.
- Stuyfzand, P.J. (1993) *Hydrochemistry and Hydrology of the Coastal Dune area of the Western Netherlands*. PhD thesis Vrije Universiteit Amsterdam.
- Stuyfzand, P.J. (2002) Verziltingsrisico van de Nederlandse Puttenvelden voor de Drinkwatervoorziening door Brakwateropkegeling. In: BTO 2002.153, Kiwa WR Nieuwegein.
- Tamis, W., van't Zelfde, M., van Ek, R. & Witte, J. (2000) Modelling van de kansrijkdom van het biotisch herstel van natte en vochtige vegetaties. *RIZA rapport*,
- Ter Voorde, M. & Velstra, J. (2009) Leven met zout water: Overzicht huidige kennis omtrent verzilting. In: Rapportnr 45, Acacia Water, Leven met water & STOWA
- van Beek, C.G.E.M. (2004) Nitraat monitoring 't Klooster, resultaten 2003 en evaluatie resultaten 2000 t/m 2003. In: KWR 04.039, Kiwa WR, Nieuwegein
- Van Beek, C.G.E.M., Jalink, M. & Meuleman, A.F.M. (2001) De verzwaveling van grondwater in zandgronden. *Landschap*, **18**, 267-272.
- Van Beek, E., Haasnoot, M., Meijer, K.M., Delsman, J.R., Snepvangers, J.J.C., Baarse, G., Van Ek, R., Prinsen, G.F., Kwadijk, J.C.J. & Van Zetten, J.W. (2008) Verkenning kosteneffectiviteit van grootschalige maatregelen tegen droogteschade als gevolg van de G+ en W+ klimaatscenario's. In: Deltares, Utrecht (NL).
- Van Bodegom, P.M., Verboom-Vasijev, H., Witte, J.P.M., Vos, C.C., Bartholomeus, R., Cormont, A., Geertsema, W. & Van der Veen, M. (2013) Synthesis of ecosystem vulnerability to climate change in the Netherlands shows the need to consider environmental fluctuations in adaptation measures. *Regional Environmental Change*,
- Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. & Kroes, J.G. (2008) Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, **7**, 640-653.
- van den Berg, G.A., Bernhardt, L. & Doomen, M.A. (2004) Quick scan effecten droogte op waterkwaliteit: inventarisatie van actuele vragen. In: KWR 04.092, Kiwa WR, Nieuwegein
- Van den Hurk, B., Klein Tankink, A., Lenderink, G., Van Ulden, A., Van Oldenborgh, G.J., Katsman, C., Van den Brink, H., Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W. & Drijfhout, S. (2006) *KNMI Climate change scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI, De Bilt, NL.
- van Loon, A. (2012) De gevolgen van vermessing voor drinkwaterwinning in beeld. In: KWR, Nieuwegein. BTO 2012.221(s).
- Van Oene, H. & Berendse, F. (2001) Predicting responses of ecosystem processes to climate change and nitrogen deposition. *Long-term effects of climate change on biodiversity and ecosystem processes* (ed. by H. Van Oene, W.N. Ellis, M.M.P.D. Heijmans, D. Mauquoy, W.L.M. Tamis, A.J.H. Van Vliet, F. Berendse, B. Van Geel, R. Van Der Meijden and S.A. Ulenberg). Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Bilthoven, NL.
- Van Vliet, M.T.H. & Zwolsman, J.J.G. (2008) Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *J. Hydrol.*, **353**, 1-17.
- Vellinga, P., Katsman, C.A., Sterl, A. & Beersma, J.J. (2009) Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment carried out at the request of the Delta Committee. In: KNMI, De Bilt, NL.
- Vermulst, J.A.P.H., Kroon, T. & De Lange, W.J. (1998) Modelling the hydrology of the Netherlands on a nation wide scale. *Hydrology in a changing environment* (ed. by H. Wheater and C. Kirby), p. 710. John Wiley and Sons Ltd.
- Voortman, B.R., Bartholomeus, R.P., Witte, J.P.M. & al., e. (in prep.) Quantifying evaporation and transpiration based on comparison of surface temperature with mini-lysimeters. *HESS Hydrol. Earth Syst. Sci.*,
- Vrijhoef, A. & Boumans, L.J.M. (2011) A method for standardising groundwater nitrate concentrations. In: *Redbook of the GC10, EAWAG Zurich*

- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**, 389-395.
- Weltzin, J.F., Loik, M.E., Schwinning, S., Williams, D.G., Fay, P.A., Haddad, B.M., Harte, J., Huxman, T.E., Knapp, A.K., Lin, G., Pockman, W.T., Shaw, M.R., Small, E.E., Smith, M.D., Smith, S.D., Tissue, D.T. & Zak, J.C. (2003) Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, **53**, 941-952.
- Werkgroep pyriet (2002) Over het voorkomen en de afbraak van pyriet in de Nederlandse ondergrond. In: Witteveen + Bos, Deventer
- Witte, J.P.M., Kruijt, B. & Maas, C. (2006a) The effects of rising CO2 levels on evapotranspiration. In: Kiwa rapport KWR 06.004, Nieuwegein.
- Witte, J.P.M., Runhaar, J. & Van Ek, R. (2009a) Ecohydrologische effecten van klimaatverandering op de vegetatie van Nederland. In: KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, NL.
- Witte, J.P.M., Kruijt, B., Kroon, T. & Maas, C. (2006b) Verdamping planten daalt door toename atmosferische kooldioxyde. *H2O*, **5**, 29-31.
- Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Cirkel, D.G. & Kamps, P.W.T.J. (2008) Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. In: Kiwa Water Research, Nieuwegein, NL.
- Witte, J.P.M., Runhaar, J., Van Ek, R. & Van der Hoek, D.J. (2009b) Eerste landelijke schets van de ecohydrologische effecten van een warmer en grilliger klimaat. *H2O*, **16/17**, 37-40.
- Witte, J.P.M., Wójcik, R.B., Torfs, P.J.J.F., De Haan, M.W.H. & Hennekens, S. (2007) Bayesian classification of vegetation types with Gaussian mixture density fitting to indicator values. *J. Veg. Sci.*, **18**, 605-612.
- Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Voortman, B., Van der Hagen, H. & Van der Zee, S.E.A.T.M. (2012a) Droge duinvegetatie zeer zuinig met water. *Landschap*, **3**, 109-117.
- Witte, J.P.M., Runhaar, J., van Ek, R., van der Hoek, D.C.J., Bartholomeus, R.P., Batelaan, O., van Bodegom, P.M., Wassen, M.J. & van der Zee, S.E.A.T.M. (2012b) An ecohydrological sketch of climate change impacts on water and natural ecosystems for the Netherlands: bridging the gap between science and society. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 3945-3957.
- Wuijts, S., Bak-Eijsberg, C.I., Van Velzen, E.H. & Van der Aa, N.G.F.M. (2012) Effecten klimaatontwikkeling op de waterkwaliteit bij innamepunten voor drinkwater. Analyse van stofberekeningen. In: p. 51. RIVM, Bilthoven.
- Wuijts, S., Buis, E., Verweij, W., Dik, H.H.J. & Houweling, D.A. (2013) Tussenevaluatie gebiedsdossiers drinkwaterwinningen Aandachtspunten voor het landelijk beleid. RIVM Rapport 609716006/2013, Bilthoven.
- Zhang, K., Kimball, J.S., Nemani, R.R. & Running, S.W. (2010) A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resour. Res.*, **46**, W09522.
- Zhang, Y.-C., Slomp, C.P., Broers, H.P., Passier, H.F. & Cappellen, P.V. (2009) Denitrification coupled to pyrite oxidation and changes in groundwater quality in a shallow sandy aquifer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 6716-6726.
- Zwolsman, G.J.J., Cirkel, D.G., Doomen, A., Jalink, M.H., Van den Berg, G., Maas, C., Vreeburg, J., Ijpelaar, G. & Mesman, G. (2007) Risicoanalyse van de gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector; waterkwaliteit, waterkwantiteit, ecologie, productie en distributie. In: BTO 2007.032, Kiwa WR, Nieuwegein.

5 Effecten klimaatverandering op afvoer en waterkwaliteit van de Rijn en de Maas

5.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Gertjan Zwolsman (KWR) en is grotendeels gebaseerd op modelresultaten van Deltares. De berekeningen van Deltares zijn uitgevoerd in het kader van de Knelpuntenanalyse Zoetwater die is uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma (Klijn et al., 2012). De paragraaf over waterzuivering is geschreven door Bas Hofs (KWR).

5.2 Klimaatverandering en waterkwaliteit

Klimaatverandering heeft een duidelijk effect op de kwaliteit van het oppervlaktewater, bijvoorbeeld door een afname van de afvoer tijdens droogte (minder verdunning), een hogere watertemperatuur (mee algenbloei) en meer piekbuien (overstorten van de riolering). In dit hoofdstuk worden de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas beschreven en worden de consequenties benoemd voor de benodigde zuivering om drinkwater te kunnen produceren. Andere relevante drivers voor de waterkwaliteit, zoals de verwachte toename van het medicijngebruik in de komende jaren (vergrijzing) of de mogelijk verdergaande zuivering van communaal afvalwater, worden niet meegenomen. Deze ontwikkelingen zijn uiteraard ook van grote invloed op oppervlaktewater kwaliteit.

De toekomstige kwaliteit van het oppervlaktewater hangt op tenminste vier manieren samen met de gevolgen van klimaatverandering:

1. lagere afvoeren van de grote rivieren, met stevige effecten op de waterkwaliteit
2. toename van verzilting (mede veroorzaakt door (1))
3. hogere watertemperaturen, en
4. andere veranderingen (zoals bv. in natuurlijk organisch materiaal).

Voor elk van deze aspecten worden in dit hoofdstuk de grootte van het effect, de kans op het optreden en de gevolgen voor de zuivering besproken.

5.3 Effecten klimaatverandering op de afvoeren van Rijn en Maas

5.3.1 Inleiding

De Rijn en de Maas zijn (naast regenval) de belangrijkste bronnen van zoet water voor Nederland. De afvoer varieert in de tijd en verschilt per rivier. De Rijn heeft een groot en breed stroomgebied, met forse bijdragen van sneeuwmelt en grondwater. Het afvoerregime is gelijkmatig, met relatief beperkte verschillen tussen winter en zomer afvoer (ca. factor 10). De Maas is een echte regenrivier en kent dus geen buffering van de afvoer in de zomer door sneeuwmelt in het achterland. De Maas heeft bovendien een kleiner stroomgebied dan de Rijn, met veel steile hellingen en ondoorlatende ondergrond. Dat leidt tot een veel grilliger afvoerregime, met relatief grote verschillen tussen winter- en zomerafvoer (ca. factor 100). Het karakter van beide rivieren is dus wezenlijk anders. De Rijn is relatief 'betrouwbaar', de Maas zeer onvoorspelbaar.

Behalve de Rijn en de Maas zijn er nog twee andere grote rivieren die water naar Nederland aanvoeren: de Schelde en de Eems. Deze rivieren zijn echter brak als ze Nederland binnen stromen en vervullen dus geen rol van betekenis in de zoetwatervoorziening van Nederland.

Daarnaast zijn er nog kleinere grensoverschrijdende rivieren en beken, waarvan met name die in het Maasstroomgebied kwantitatief van belang kunnen zijn. Voorbeelden zijn de Jeker, Geul, Roer, Niers, Swalm en de Dieze. In het oosten van het land is de Overijsselse Vecht een relatief grote grensoverschrijdende rivier.

5.3.2 Afvoerprojecties voor de Rijn (2050)

Deltares heeft in het kader van de Knelpuntenanalyse Zoetwater (Deltaprogramma) afvoerscenario's gemaakt voor de Rijn en Maas voor elk van de vier KNMI klimaatscenario's. Men heeft dit gedaan door de KNMI-scenario's voor neerslag en verdamping toe te passen in hydrologische stroomgebiedsmodellen die de afvoer van de rivieren kunnen berekenen, als functie van regenval, verdamping, bodemgesteldheid etc. De rivierafvoeren zijn bepaald op dagbasis bij het huidige klimaat en bij een mogelijk toekomstig klimaat (in 2050 en 2100).

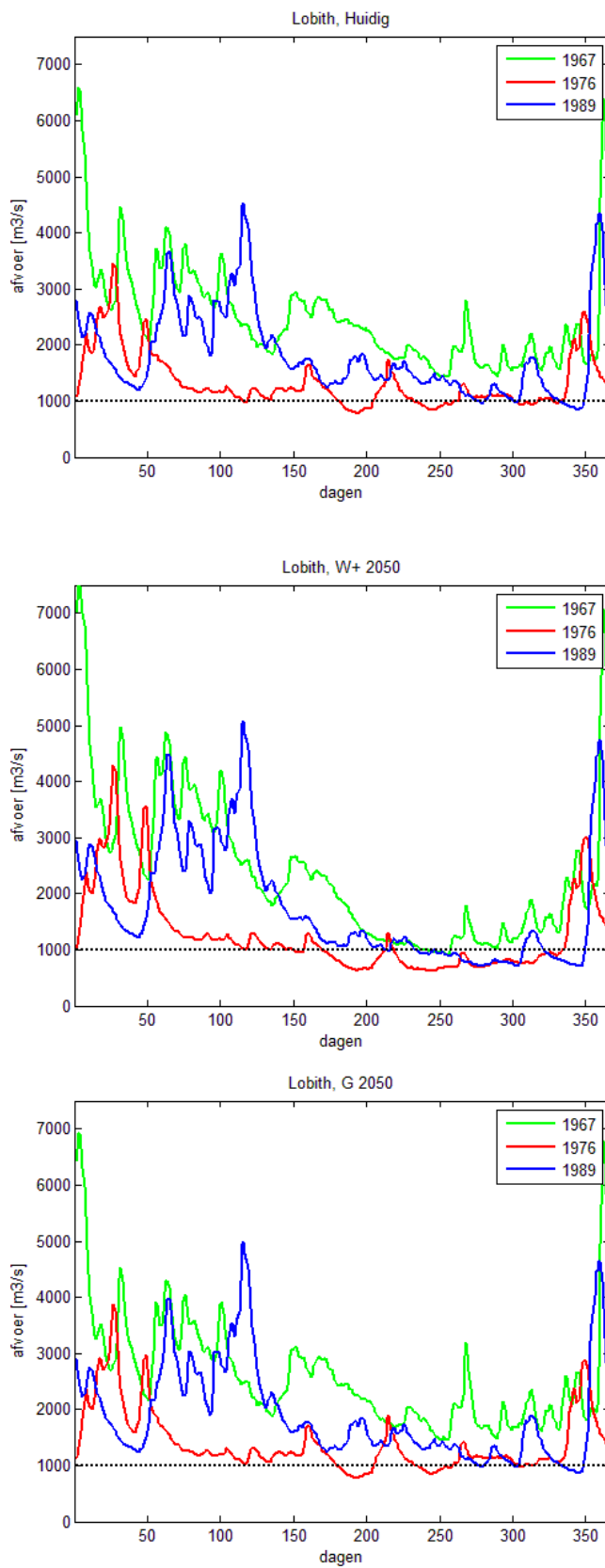
De berekeningen zijn gemaakt voor een afvoerreeks van 30 jaar (1961-1990) en voor een drietal hydrologische jaren, die model staan voor een gemiddeld jaar (1967), een droog jaar (1989) en een extreem droog jaar (1976). Onder het huidige klimaat is de herhalingsstijd van deze hydrologische jaren eens per twee jaar (1967), eens per 10 jaar (1989) en eens per 80 jaar (1976). Figuur 5-1 toont de berekende afvoer van de Rijn (Lobith) voor elk van de drie hydrologische jaren, bij het huidige klimaat en bij het toekomstige klimaat in 2050, dat zich waarschijnlijk tussen het G en W+ scenario zal bevinden. De belangrijkste afvoerverschillen tussen het huidige en toekomstige klimaat worden samengevat in Tabel 5-1.

Tabel 5-1. Projecties van de afvoer van de Rijn (Lobith) bij het huidige klimaat en toekomstig klimaat volgens het G en het W+ scenario (2050), voor drie karakteristieke hydrologische jaren.

Q (m3/s)	Huidig klimaat			G (2050)			W+ (2050)		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
MAX	6592	4531	3459	6916	4996	3862	7487	5070	4277
50-perc	2289	1593	1178	2326	1615	1201	2101	1291	1031
25-perc	1856	1303	1031	1899	1310	1078	1270	953	777
10-perc	1617	1047	935	1691	1068	957	1096	778	676
5-perc	1552	984	863	1619	993	858	998	738	656
2-perc	1475	898	828	1500	917	812	965	720	636
MIN	1433	855	782	1464	873	770	912	709	617

Aantal dagen met Q<drempel	Huidig klimaat			G (2050)			W+ (2050)		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
N<1400 m3/s	0	139	265	0	141	258	113	201	276
N<1000 m3/s	0	23	76	0	21	55	19	103	166
N< 900 m3/s	0	8	28	0	5	28	0	68	130
N< 800 m3/s	0	0	3	0	0	5	0	50	106
N< 700 m3/s	0	0	0	0	0	0	0	0	51

Tabel 5.1 laat zien dat de maximale afvoer van de Rijn (in de wintermaanden) licht toeneemt in het G scenario, en sterker stijgt bij W+. Dat betekent dat de kans op overstromingen in de winter zal toenemen. Alle klimaatscenario's wijzen namelijk in deze richting, alleen de mate waarin de winterafvoer toeneemt verschilt per scenario. Opmerkelijk is dat de zomerafvoer (zie bijv. 10-percentiel) niet daalt bij het G scenario. Bij het W+ scenario echter wordt een sterke daling van de Rijnafvoer voorzien in de zomer en de herfst. Zo daalt de 10-percentiel van de afvoer voor een gemiddeld hydrologisch jaar (1967) van 1617 m3/s bij het huidige klimaat naar 1096 m3/s bij het W+ scenario, een daling van 32%. Bij een droog jaar (1989) daalt de 10-percentiel afvoer met 26% en bij een zeer droog (1976) jaar met 28%.



Figuur 5-1. Afvoer van de Rijn (Lobith) in drie karakteristieke hydrologische jaren bij het huidige klimaat (boven), het G scenario (midden) en het W+ scenario (onder) in 2050.

De laagst denkbare Rijnafoer in 2050, berekend bij het W+ scenario in combinatie met een extreem droog jaar, bedraagt 617 m³/s (Tabel 5-1). Ter vergelijking: in het extreem droge jaar 1976 was de laagst gemeten afvoer bij Lobith 782 m³/s en in het eveneens zeer droge jaar 2003 was dat 795 m³/s. De laagste afvoeren bij Lobith treden overigens niet op in de zomer, maar in de herfst (typisch in de maanden september en oktober).

Bij een afvoer onder de 1400 m³/s bij Lobith is er officieel sprake van een zoetwater tekort. Uit tabel 5-1 blijkt dat deze situatie momenteel gangbaar is bij een droog jaar (1989) en een zeer droog jaar (1976). Bij Rijnafoeren onder de 1000 m³/s is er sprake van zeer ernstige watertekorten en kan de verzilting op de Nieuwe Waterweg onvoldoende worden bestreden. Afvoeren onder de 1000 m³/s zijn gewoon bij het W+ scenario (Tabel 5-1), met name bij een droog jaar (ruim drie maanden) en een zeer droog jaar (ruim 5 maanden). Mocht dit scenario realiteit worden, dan noopt dit tot herbezinning van de huidige waterverdeling in Nederland. Zo is het niet ondenkbaar dat de huidige strategie van verziltingsbestrijding op de Nieuwe Waterweg wordt aangepast of zelfs losgelaten, omdat het hiervoor benodigde zoete water elders nodig is (bijvoorbeeld om het IJsselmeer op peil te houden).

5.3.3 Afvoerprojecties voor de Maas (2050)

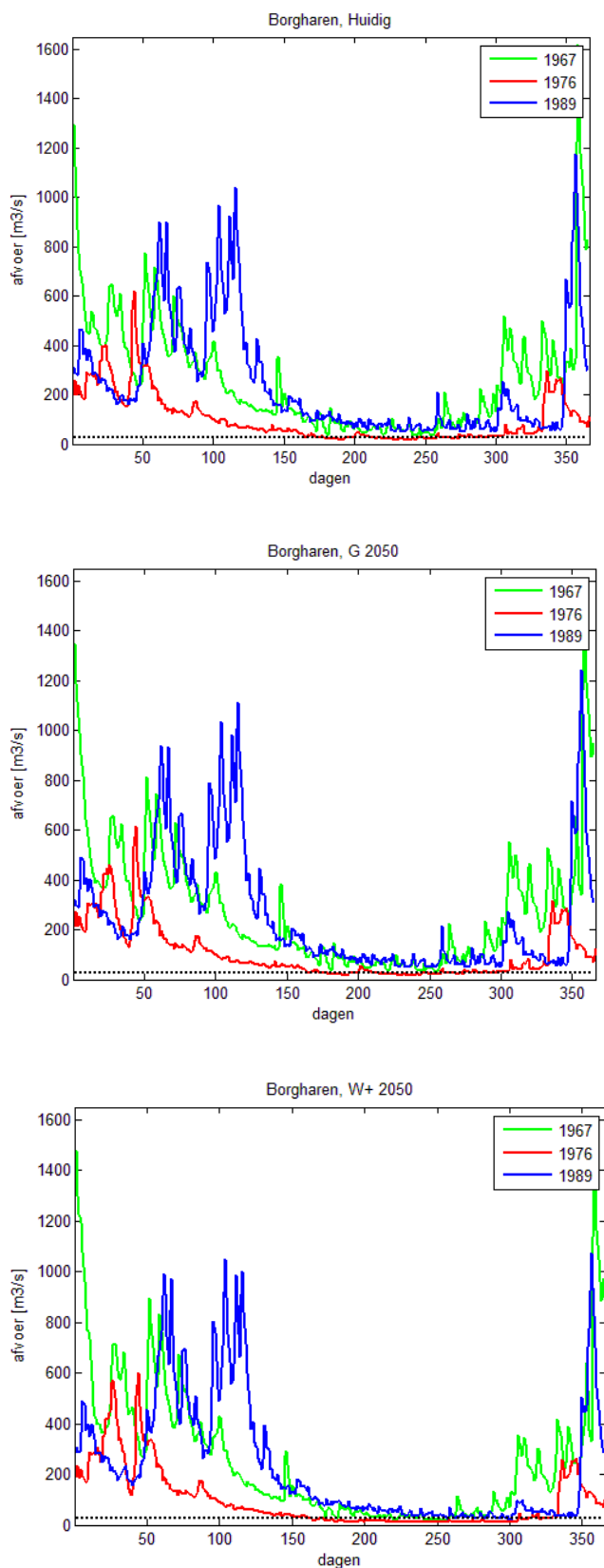
Figuur 5-2 toont de afvoer van de Maas (Borgharen) voor elk van de drie karakteristieke hydrologische jaren, bij het huidige klimaat en bij het G en W+ scenario in 2050. De statistiek van de verschillende afvoeren (NB bij Monsin) wordt samengevat in Tabel 5-2.

Tabel 5-2. Projecties van de afvoer van de Maas (Monsin, bij Luik) bij het huidige klimaat en toekomstig klimaat volgens het G en het W+ scenario (2050), voor drie karakteristieke hydrologische jaren.

Q (m ³ /s)	Huidig klimaat			G (2050)			W+ (2050)		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
MAX	1617	1176	618	1568	1242	615	1533	1073	599
50-perc	206	155	58	210	158	56	159	107	39
25-perc	90	82	29	90	81	28	51	49	15
10-perc	57	62	23	57	62	22	32	35	12
5-perc	47	55	21	45	55	20	25	31	12
2-perc	38	53	19	36	52	18	20	27	11
MIN	35	49	17	33	49	16	16	22	10

Aantal dagen met Q < drempel	Huidig klimaat			G (2050)			W+ (2050)		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
n < 60 m ³ /s	38	30	190	44	32	195	105	125	215
n < 50 m ³ /s	23	1	163	26	3	166	91	96	203
n < 40 m ³ /s	9	0	139	11	0	140	67	63	189
n < 30 m ³ /s	0	0	92	0	0	102	32	15	162
n < 20 m ³ /s	0	0	12	0	0	15	8	0	131
n < 10 m ³ /s	0	0	0	0	0	0	0	0	4

Tabel 5-2 laat zien dat de maximale afvoer van de Maas niet structureel toeneemt bij het G en W+ scenario (mogelijk wel bij het W scenario). Bij het W+ scenario daalt de winterafvoer licht, bij het G scenario is sprake van een lichte daling, stijging of gelijkblijvende maximale afvoer, afhankelijk van het hydrologische jaar. De zomerafvoer blijft nagenoeg constant bij het G scenario maar daalt sterk bij het W+ scenario. Zo daalt het 10-percentiel van de afvoer in een gemiddeld jaar van 57 m³/s naar 32 m³/s, een daling van 44%. Bij een droog jaar is de daling eveneens 44% en bij een zeer droog jaar is dat 48%. Ruwweg kan dus worden geconcludeerd dat de zomerafvoer van de Maas onder het W+ scenario bijna zal halveren.



Figuur 5-2. Afvoer van de Maas (Borgharen) in drie karakteristieke hydrologische jaren bij het huidige klimaat (boven), en bij het G scenario (midden) en het W+ scenario (onder) in 2050.

Bij een afvoer onder de 60 m³/s bij Monsin is er officieel sprake van een watertekort. Er is dan te weinig water beschikbaar voor de voeding van het Albertkanaal (in België, heeft een drinkwaterfunctie), de Zuid-Willemsvaart, het Julianakanaal en de Grensmaas. Deze situatie treedt nu al regelmatig op, maar zal usance zijn bij het W+ scenario, voor alle hydrologische jaren. De Grensmaas heeft een minimaal benodigde afvoer van 10 m³/s, maar uit Tabel 5-2 kan worden afgeleid dat dit debiet langdurig niet gehaald zal worden bij het W+ scenario, ook niet bij een gewoon hydrologisch jaar. Dat zal grote gevolgen hebben voor de ecologie en de drinkwaterfunctie van de Grensmaas.

5.4 Impact van lage afvoeren op de waterkwaliteit

5.4.1 Bijdrage van RWZI effluent aan de afvoer van de Rijn en de Maas

Bij lage afvoeren staat de waterkwaliteit van de grote rivieren onder druk, doordat puntlozingen minder sterk worden verdund (Doomen et al., 2006; Van Vliet & Zwolsman, 2007; Van Bokhoven en Zwolsman, 2007; Wuijts et al., 2012). Dit geldt bijvoorbeeld voor de reguliere lozingen vanuit RWZI's. De bijdrage van RWZI lozingen aan de totale afvoer van de Rijn en de Maas kan worden geschat op basis van het aantal inwoners in het stroomgebied en een schatting van het huishoudelijk waterverbruik (125 l/p/d). Voor de Rijn (43 miljoen inwoners bovenstrooms van Lobith) levert dit een continue effluentstroom op van 62 m³/s, voor de Maas (5 miljoen inwoners bovenstrooms van Luik) is dat 7,2 m³/s. Het is zeer illustratief om deze effluentstroom te vergelijken met de afvoer van de Rijn en de Maas bij het huidige en toekomstige klimaat (samengevat in de tabellen 5-1 en 5-2). Uit deze vergelijking blijkt dat de bijdrage van RWZI effluent aan de afvoer van de Rijn bij Lobith relatief beperkt is (minder dan 10%; zie tabel 5-3). Bij een typische laagwater afvoer op de Rijn (10 percentiel) is de bijdrage van RWZI effluent aan de totale afvoer 4 tot 7% in het huidige klimaat; dit percentage loopt op naar 6 tot 9% bij het W+ scenario.

Tabel 5-3. Bijdrage van RWZI effluent* aan de afvoer van de Rijn (Lobith), bij het huidige klimaat en toekomstig klimaat volgens het G en het W+ scenario (2050).

	Huidig klimaat			G 2050			W+ 2050		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
Q max	0,9%	1,4%	1,8%	0,9%	1,2%	1,6%	0,8%	1,2%	1,5%
50-perc	2,7%	3,9%	5,3%	2,7%	3,9%	5,2%	3,0%	4,8%	6,0%
25-perc	3,4%	4,8%	6,0%	3,3%	4,7%	5,8%	4,9%	6,5%	8,0%
10-perc	3,8%	5,9%	6,7%	3,7%	5,8%	6,5%	5,7%	8,0%	9,2%
5-perc	4,0%	6,3%	7,2%	3,8%	6,3%	7,3%	6,2%	8,4%	9,5%
2-perc	4,2%	6,9%	7,5%	4,1%	6,8%	7,7%	6,4%	8,6%	9,8%
Q min	4,3%	7,3%	8,0%	4,2%	7,1%	8,1%	6,8%	8,8%	10,1%

* Uitgangspunten: 43 miljoen inwoners bovenstrooms van Lobith; waterverbruik 125 l/p/d.

Voor de Maas is de situatie totaal anders. Reeds in het huidige klimaat is daar al sprake van een sterke beïnvloeding van de afvoer door RWZI effluent. Bij een typische zomerafvoer van de Maas (10-percentiel) is de bijdrage van RWZI effluent aan de afvoer bij Luik al 13% in een normaal jaar en dit percentage loopt op tot 32% in een zeer droog jaar (zie Tabel 5-4). Deze situatie blijft onveranderd bij het G scenario, omdat de afvoer daarin nauwelijks verandert. Bij het W+ scenario verdubbelt de bijdrage van RWZI effluent aan de zomerafvoer, namelijk tot 23% in een normaal jaar en 58% in een extreem droog jaar, doordat de Maasafvoer in de zomerperiode bijna gehalveerd is. Hieruit mag worden geconcludeerd dat de waterkwaliteit van de Maas sterk onder druk staat bij lage afvoeren en de huidige emissies vanuit RWZI's. Dat is reeds het geval onder het huidige klimaat, maar dit wordt verdubbeld onder het W+ scenario. Het is overigens mogelijk dat in de toekomst een grotere mate van zuivering zal plaatsvinden, juist vanwege de grote beïnvloeding van de waterkwaliteit bij lage afvoeren.

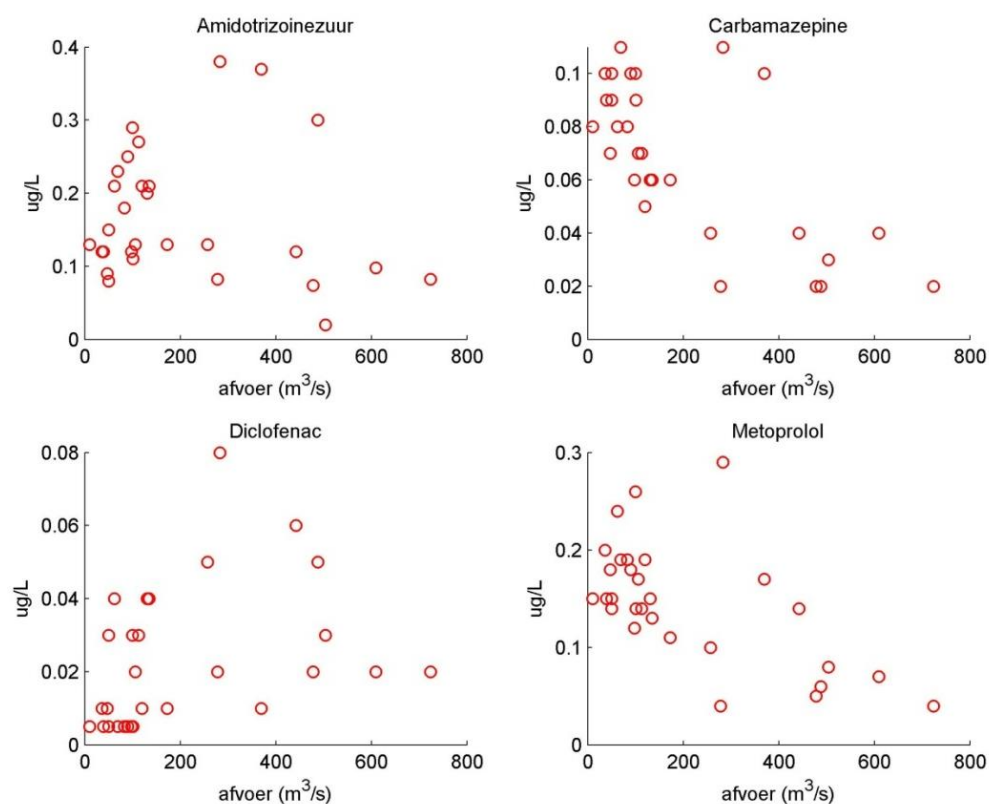
Tabel 5-4. Bijdrage van RWZI effluent* aan de afvoer van de Maas (Monsin) bij het huidige klimaat en toekomstig klimaat volgens het G en het W+ scenario (2050).

	Huidig klimaat			G 2050			W+ 2050		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
Q max	0,4%	0,6%	1,2%	0,5%	0,6%	1,2%	0,5%	0,7%	1,2%
50-perc	3,5%	4,7%	12%	3,4%	4,6%	13%	4,6%	6,8%	19%
25-perc	8,0%	8,8%	25%	8,0%	8,9%	26%	14%	15%	49%
10-perc	13%	12%	32%	13%	12%	33%	23%	21%	58%
5-perc	15%	13%	34%	16%	13%	36%	29%	23%	62%
2-perc	19%	14%	38%	20%	14%	40%	36%	27%	68%
Q min	21%	15%	43%	22%	15%	44%	47%	32%	75%

* Uitgangspunten: 5 miljoen inwoners bovenstrooms van Luik; waterverbruik 125 l/p/d.

5.4.2 Invloed van de afvoer op concentraties aan geneesmiddelen in de Maas

RWZI's zijn veruit de grootste "bron" (beter: doorgeefluik) van humane geneesmiddelen in oppervlaktewater. In beginsel mag er dan ook een positief verband worden verwacht tussen de afvoer en de concentraties aan geneesmiddelen in oppervlaktewater. Voor de Maas blijkt dat inderdaad het geval te zijn. Uit Figuur 5-3 blijkt dat de concentraties aan carbamazepine en metoprolol (geneesmiddelen) en amidotrizoïnezuur (een röntgencontrastmiddel) in de Maas bij Keizersveer toenemen bij dalende afvoer. Wel valt op dat de bandbreedte van de gemeten concentraties als functie van de afvoer groot is. Diclofenac is in het geheel niet gerelateerd aan de afvoer, wat zou kunnen wijzen op snelle afbraak in het watersysteem.



Figuur 5-3. Gemeten concentraties van vier farmaceutische stoffen in de Maas bij Keizersveer als functie van de afvoer (data 2010 t/m 2012).

Onlangs heeft KWR een studie afgerond naar de aanwezigheid van geneesmiddelen in de Maas en de belangrijkste zijrivieren in Zuid-Limburg. De metingen zijn vastgelegd in de rapportage "Geneesmiddelen in de watercyclus in Limburg" (Ter Laak et al., 2013). Tijdens deze studie is op een zestal locaties gedurende vier tijdstippen het voorkomen van 45 geneesmiddelen en 18 metabolieten onderzocht. De monsters zijn zowel genomen tijdens een periode van extreem lage afvoer in november 2011 ($Q = 14$ en $19 \text{ m}^3/\text{s}$) als tijdens een periode van aantrekkende afvoer (ca. $250 \text{ m}^3/\text{s}$) in december 2011. Een overzicht van de gemeten concentraties in de Maas bij Eijsden en het innamepunt bij Heel (Lateraalkanaal) wordt gegeven in onderstaande tabellen 5.5 en 5.6.

Uit Tabel 5-5 blijkt duidelijk dat de concentraties aan geneesmiddelen in de Maas relatief hoog zijn bij lage afvoeren (23 en 30 november 2011). Als de afvoer aantrekt (7-12-2011) dalen de concentraties van de meeste stoffen, maar niet zo sterk als zou mogen worden verwacht bij lineaire verdunning. Dit is een aanwijzing van een zgn. "first-flush" effect, een korte periode waarin de vracht aan geneesmiddelen sterk toeneemt door de plotseling stijgende hydraulische belasting van het riool en de waterzuivering, als gevolg van de zware regenval die vooraf gaat aan het aantrekken van de afvoer. Dit kan leiden tot overstorten van de riolering en verminderde verwijdering van geneesmiddelen op de rioolwaterzuivering. Dit is een tijdelijk effect; wanneer de hoge afvoer verder doorzet kunnen de concentraties aan geneesmiddelen verder dalen (12-12-2011) door verdunning.

Tabel 5-5. Concentraties van geneesmiddelen en afbraakproducten in de Maas bij Eijsden in november-december 2011 ($\mu\text{g}/\text{l}$). Alleen de stoffen met de hoogste concentratie (top-12) zijn aangegeven. Bron: Ter laak et al. (2013).

Stof	23-11-2011 ($Q = 19 \text{ m}^3/\text{s}$)	30-11-2011 ($Q = 14 \text{ m}^3/\text{s}$)	7-12-2011 ($Q = 252 \text{ m}^3/\text{s}$)	12-12-2011 ($Q = 245 \text{ m}^3/\text{s}$)
Metformine	3,90	4,20	2,90	1,90
Guanylurea	2,30	2,00	0,89	0,26
hydroxy Ibuprofen	0,39	0,50	0,44	0,24
Amidotrizoïnezuur	0,37	0,33	0,19	0,08
Tramadol (*)	0,33	0,36	0,24	0,05
Carbamazepine (**)	0,24	0,26	0,23	0,07
Sotalol	0,16	0,17	0,17	0,07
Venlafaxine	0,09	0,09	0,05	0,02
Paracetamol	0,04	0,14	<0,01	0,18
Naproxen	0,04	0,05	0,05	0,03
Diclofenac	0,04	0,05	0,04	0,03
Atenolol	0,04	0,05	0,04	0,02

* Incl. o-desmethyl tramadol; (**) incl. 1011-trans-diol carbamazepine

Ook bij het innamepunt van WML (het Lateraalkanaal) is er sprake van een relatie tussen de afvoer van de Maas en de concentraties aan sommige geneesmiddelen, maar deze relatie is minder sterk dan in de Maas bij Eijsden. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de onevenredig grote invloed van RWZI Panheel op de waterkwaliteit in het Lateraalkanaal ter hoogte van het innamepunt van WML (Ter laak et al., 2013). Hierdoor is de relatie tussen de afvoer van de Maas en de optredende concentraties aan geneesmiddelen minder eenduidig dan bij Eijsden (zie

Tabel 5-6).

Tabel 5-6. Concentraties van geneesmiddelen en afbraakproducten op het innamepunt van WML in het Latreaalkanaal (Heel) in november-december 2011 ($\mu\text{g/l}$). Alleen de stoffen met de hoogste concentratie (top-12) zijn aangegeven. Bron: Ter laak et al. (2013).

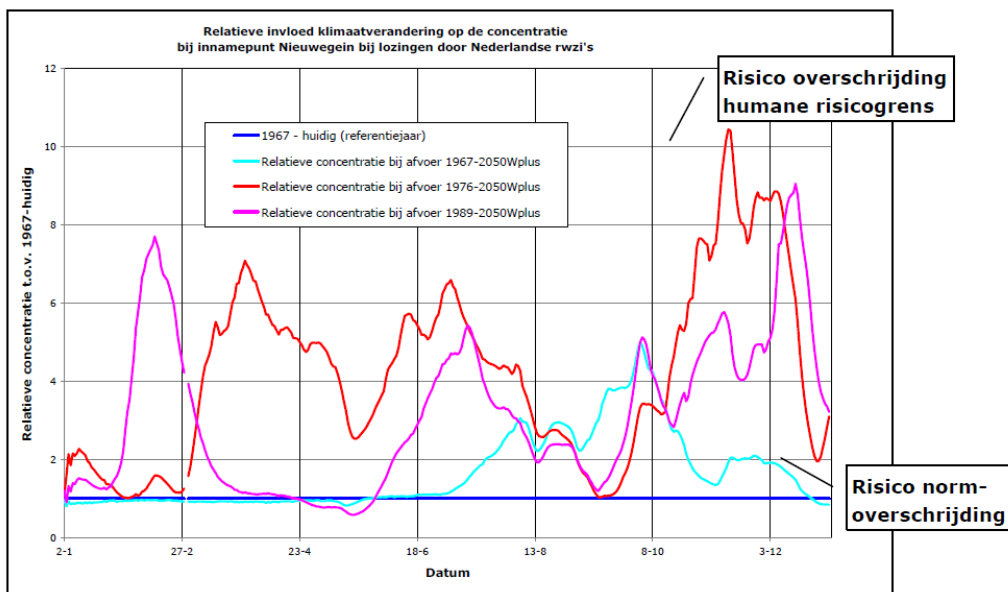
Stof	23-11-2011 (Q = 19 m ³ /s)	30-11-2011 (Q = 14 m ³ /s)	7-12-2011 (Q = 252 m ³ /s)	12-12-2011 (Q = 245 m ³ /s)
Metformine	1,50	1,40	2,00	2,20
Guanylurea	4,40	3,40	4,40	1,50
hydroxy Ibuprofen	0,10	0,10	0,17	0,22
Amidotrizoïnezuur	0,29	0,27	0,23	0,20
Tramadol (*)	0,12	0,11	0,23	0,18
Carbamazepine (**)	0,29	0,29	0,35	0,21
Sotalol	0,12	0,13	0,18	0,13
Venlafaxine	0,05	0,05	0,05	0,04
Paracetamol	<0,01	<0,01	0,05	<0,01
Naproxen	0,01	0,01	0,03	0,03
Diclofenac	0,02	0,02	0,04	0,03
Atenolol	0,02	0,02	0,04	0,03

* Incl. o-desmethyl tramadol; (**) incl. 1011-trans-diol carbamazepine

5.4.3 RIVM rapport effecten klimaatverandering op waterkwaliteit bij innamepunten

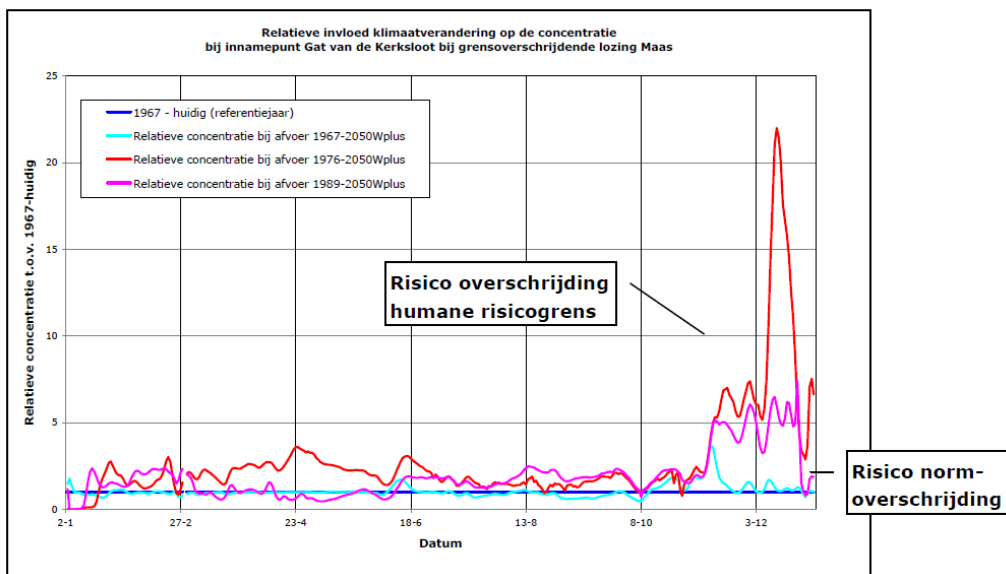
Het effect van klimaatverandering op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas kan worden onderzocht door de waterkwaliteit tijdens (extreem) droge perioden te vergelijken met die tijdens hydrologisch gemiddelde omstandigheden. Deze aanpak is door KWR in het verleden gevolgd (Doomen et al., 2006; Bokhoven & Zwolsman, 2007; Van Vliet & Zwolsman, 2007). Een andere aanpak is gebaseerd op modelberekeningen. De recente studie van het RIVM en Deltares "Effecten klimaatontwikkeling op de waterkwaliteit bij innamepunten voor drinkwater" (Wuijts et al., 2012) is daarvan een voorbeeld. In dit rapport zijn de resultaten van berekeningen beschreven voor waterkwantiteit en waterkwaliteit in de Rijn en Maas tijdens een normaal, droog, en een zeer droog jaar (1967, 1989 resp. 1976), zowel in het huidige klimaat als bij het W+ klimaatscenario. De waterkwaliteit is alleen relatief berekend, t.o.v. het normale jaar (1967), met een denkbeeldige stof X die niet wordt afgebroken. Dit is een worst-case scenario, want veel stoffen worden wel afgebroken (beter: omgezet). Het effect van binnenlandse vrachten (RWZI's) en buitenlandse vrachten is apart doorgerekend. Een voorbeeld van de resultaten van deze aanpak wordt gegeven in de Figuur 5-4 (inname Nieuwegein) en Figuur 5-5 (inname Biesbosch).

Voor de Rijn laten de hydrologische scenario's een daling in de gemiddelde afvoer bij Lobith zien van minder dan een factor 2 voor een zeer droog jaar t.o.v. een normaal jaar. In het W+ scenario is de minimale afvoer in een zeer droog jaar t.o.v. een normaal jaar iets meer dan een factor 2. Hiermee is de te verwachten concentratie van stof X ook iets meer dan een factor 2 hoger in een zeer droog jaar bij W+ ten opzichte van een normaal jaar bij huidig klimaat. Door de specifieke afvoersituatie van de Nederrijn/Lek is de relatieve bijdrage van Nederlandse RWZI's aan de waterkwaliteit op het innamepunt Nieuwegein echter groter dan op grond van de lage afvoer verwacht mocht worden. Op het innamepunt Nieuwegein wordt gemiddeld een factor 4 hogere concentratie van stof X berekend in een zeer droog jaar bij W+. De piekconcentraties lopen op tot een factor 10 hoger dan de concentraties in een normaal hydrologisch jaar bij het huidige klimaat (zie Figuur 5-4). Het RIVM rapport stelt dat een dergelijke factor kan leiden tot overschrijding van humane risicogrenzen.



Figuur 5-4: Relatieve concentratie van een conservatieve stof bij innamepunt Nieuwegein voor drie hydrologische jaren in 2050 onder het W+ scenario, ten opzichte van een gemiddeld jaar zonder klimaatverandering (1967-huidig). Met lozingen van Nederlandse RWZI's. Bron: Wuijts et al. (2012).

Voor de Maas bij Borgharen laten de scenario's een grotere daling, van een factor 3, in de gemiddelde afvoer zien (voor een zeer droog t.o.v. een normaal jaar). In het W+ scenario is de minimale afvoer te Borgharen in een zeer droog jaar bij W+ ten opzichte van een normaal jaar maar liefst een factor 7 lager. Hiermee zijn de te verwachten concentraties van stof X in de Maas gemiddeld een factor 3 hoger in een zeer droog jaar bij W+ ten opzichte van een normaal jaar bij huidig klimaat. Piekconcentraties lopen hier op tot een factor 10 hoger. Dat geldt niet alleen voor het innamepunt bij Heel, maar ook voor het 150 km stroomafwaarts gelegen innamepunt in de Brabantsche Biesbosch (Gat van de Kerksloot; zie Figuur 5-5).



Figuur 5-5. Relatieve concentratie van een conservatieve stof bij innamepunt Gat van de Kerksloot voor drie hydrologische jaren in 2050 onder het W+ scenario, ten opzichte van een gemiddeld jaar zonder klimaatverandering (1967-huidig). Zonder lozingen van Nederlandse RWZI's. Bron: Wuijts et al. (2012).

Er bestaat echter twijfel of deze modelresultaten realistisch zijn, vanwege de opbouw van de piekconcentratie en de timing ervan (in de maand december) die niet goed overeenkomt met meetgegevens van de waterkwaliteit in een droog jaar (bijv. 2003, 2011). Opgemerkt wordt dat het model waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd niet onderhevig is geweest aan calibratie, noch aan validatie. Er is dus geen koppeling gelegd met actuele meetgegevens, waardoor de modelresultaten op zijn best als indicatief kunnen worden gezien. Dit laat het algemene principe dat de waterkwaliteit verslechtert bij lage afvoeren echter onverlet.

De kans dat deze effecten optreden is zeer groot, maar hoe groot het effect is, is moeilijk te schatten. De kans op verdubbeling van de normale concentraties gedurende lange periodes is groot, de kans op vervijfvoudiging lijkt klein. Somconcentraties van geneesmiddelen in de orde van 5-10 µg/L komen nu al voor (zie Tabellen 5.5 en 5.6) en deze gehalten zullen door klimaatverandering nog sterk kunnen toenemen.

5.5 Effecten klimaatverandering op de temperatuur van het oppervlaktewater

Deltares heeft met fysische modellen de watertemperatuur van de Rijn en de Maas in beeld gebracht. De modellen zijn gecalibreerd op het huidige klimaat en vervolgens gebruikt om het effect van hogere luchttemperaturen op de watertemperatuur te onderzoeken. Dit is onder meer gedaan voor de innamepunten van oppervlaktewater voor de drinkwatervoorziening, in het kader van de Knelpuntenanalyse Zoetwater van het Deltaprogramma (Klijn et al., 2012). Hierbij moet worden aangetekend dat de watertemperatuur niet alleen afhangt van de luchttemperatuur maar ook sterk wordt beïnvloed door koelwater lozingen. Dat betekent dat de toekomstige watertemperatuur ook afhangt van de economische ontwikkeling en van beleidsmatige keuzes over de toekomstige energievoorziening. Deze effecten worden verdisconteerd in sociaal-maatschappelijke scenario's zoals Regional Communities (RC) en Global Economy (GE). Om de impact van economische ontwikkelingen te verdisconteren heeft Deltares berekeningen uitgevoerd voor een combinatie van klimaatscenario's en sociaal-maatschappelijke scenario's. In deze paragraaf worden enkel de resultaten getoond voor de berekeningen met het Global Economy model. De resultaten volgens het Regional Communities model wijken hier overigens maar beperkt van af.

De resultaten van de temperatuurmodellering van Deltares op de innamepunten van de drinkwaterbedrijven worden hieronder samengevat. Tabel 5-7 toont de gemodelleerde maximale watertemperatuur op de innamepunten bij huidig klimaat en bij een gewijzigd klimaat in 2050 volgens het G en het W+ scenario.

Tabel 5-7. Maximale watertemperatuur op de innamepunten van de waterbedrijven bij huidig klimaat en het G en W+ scenario in 2050, voor een normaal (1967), droog (1989) en extreem droog (1976) jaar.

Watersysteem (locatie)	Huidig klimaat			G scenario & Global Economy			W+ scenario & Global Economy		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
Lateraalkanaal (Heel)	24,6	22,7	26,8	25,6	23,6	28,4	28,1	25,9	30,2
Afgedamde Maas (Brakel)	23,1	23,1	25,7	24,0	23,9	26,5	26,0	25,8	28,4
Biesbosch (Gat vd Kerksloot)	22,7	22,8	25,9	23,5	23,6	26,7	25,2	25,4	28,6
Lekkanaal (Nieuwegein)	23,0	23,1	25,9	23,5	23,8	26,6	25,4	25,4	28,3
Ijsselmeer (Andijk)	21,7	22,7	24,8	22,6	23,5	25,6	24,4	25,4	27,4
Haringvliet (Scheelhoek)	21,5	21,8	24,2	22,4	22,6	25,1	24,0	24,3	27,1
Drentsche Aa (De Punt)	23,0	25,2	26,9	23,2	25,3	27,7	25,3	26,3	30,4

Tabel 5-7 laat zien dat overschrijding van de 25 °C grens bij het huidige klimaat kan voorkomen in een zeer droog jaar, zoals 1976. Dat is in overeenstemming met recente ervaringen. Eind juli 2006, op het einde van een langdurige hittegolf, werden maximale watertemperaturen van 28 °C gemeten, zowel in de Rijn (Lobith) als in de Maas (Eijsden) (Zwolsman & van Vliet, 2007). Bij het G scenario stijgt de maximale watertemperatuur met ca. 0,7 °C in een normaal en een droog jaar, tot ca. 1 °C bij een extreem droog jaar. De 25 °C grens wordt dan overal overschreden in een extreem droog jaar, maar doorgaans niet in een normaal of een droog jaar. Bij het W+ scenario stijgt de maximale watertemperatuur met ca. 2,5 tot 3 °C (in 2050) en vindt overschrijding van de 25 °C grens in de zomermaanden bijna overal plaats, ook tijdens een normaal hydrologisch jaar. Bij dit scenario kan de maximale watertemperatuur in een extreem droog jaar oplopen van 27 °C tot ruim 30 °C (!).

Hierbij moet wel worden aangetekend dat deze berekeningen indicatief zijn, omdat de maximale watertemperaturen buiten de range vallen waarop het model is gecalibreerd. Watertemperaturen tot 28 °C zijn daadwerkelijk gemeten in de Rijn en de Maas tijdens de hittegolf van juli 2006 en zijn dus fysisch mogelijk, maar een maximale watertemperatuur van ruim 30 °C in het Lateraalkanaal en de Drentsche Aa lijkt vooralsnog niet erg realistisch.

Tabel 5-8 toont het aantal overschrijdingen van de innamegrens van 25 °C bij huidig klimaat en bij gewijzigd klimaat in 2050. De effecten zijn in beeld gebracht voor een normaal hydrologisch jaar (1967), een droog jaar (1989) en een extreem droog jaar (1976). Het aantal overschrijdingen van de 25 °C eis varieert per klimaatscenario, hydrologisch jaar en de inname locatie. Met name bij innamepunten van Maaswater kan het aantal overschrijdingen van de 25 °C eis sterk oplopen, zie Tabel 5-8. In het worst case scenario (W+ en extreem droog jaar) is het Maaswater bijna twee maanden te warm voor inname op de locaties Heel en Gat van de Kerksloot. Op de innamepunten van Rijnwater is het water in het worst case scenario één tot anderhalve maand te warm voor inname.

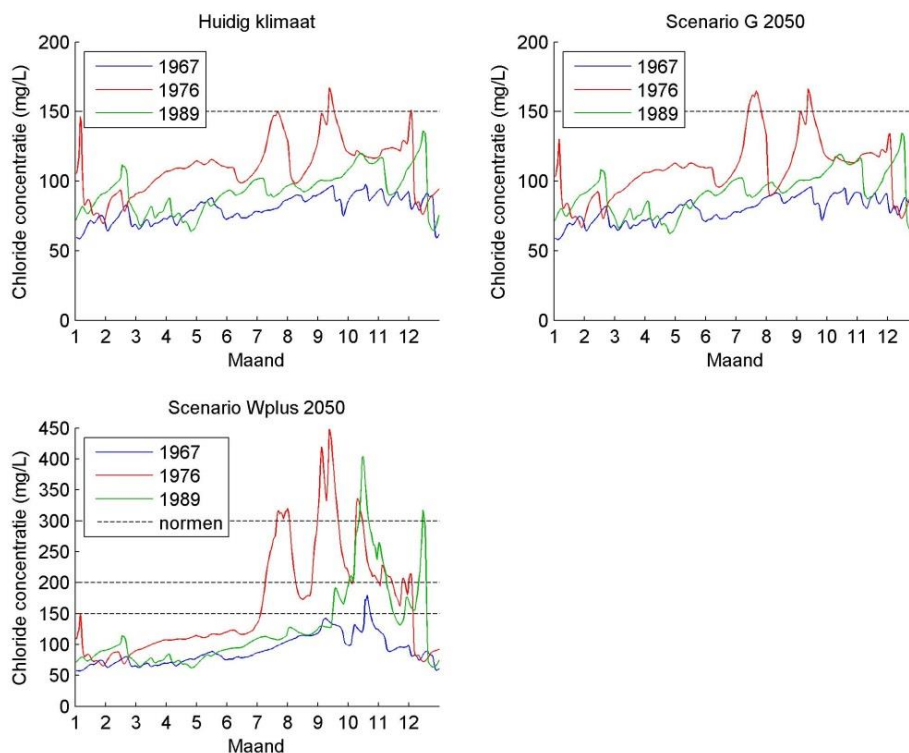
Tabel 5-8. Aantal dagen per jaar dat de 25 °C grens wordt overschreden op de innamepunten voor drinkwater bij huidig klimaat en het G en W+ scenario in 2050. Bron: Klijn et al. (2012).

Watersysteem (locatie)	Huidig klimaat			G scenario & Global Economy			W+ scenario & Global Economy		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
Lateraalkanaal (Heel)	0	0	15	11	0	26	32	10	50
Afgedamde Maas (Brakel)	0	0	10	0	0	21	17	17	36
Biesbosch (Gat vd Kerksloot)	0	0	8	0	0	27	1	12	55
Lekkanaal (Nieuwegein)	0	0	9	0	0	19	6	9	26
Ijsselmeer (Andijk)	0	0	0	0	0	7	0	1	24
Haringvliet (Scheelhoek)	0	0	0	0	0	1	0	0	46
Drentsche Aa (De Punt)	0	1	8	0	1	11	1	7	25

Hoge watertemperaturen worden doorgaans afgevlakt door menging in de voorraad- en procesbekkens (zie Figuur 5-6) en door bodempassage. Hierdoor zal de watertemperatuur van het geleverde drinkwater minder hoog zijn dan de temperatuur van het inname water tijdens warme perioden. De grootste knelpunten zullen zich daar kunnen voordoen waar bodempassage geen onderdeel uitmaakt van het zuiveringsproces. Als het water vanuit het bekken rechtstreeks tot drinkwater wordt verwerkt (Biesbosch, De Punt, Andijk) is de kans op overschrijding van de 25 °C norm van het drinkwater tijdens een (zeer) warme zomer reëel.

Uit Tabel 5-9 blijkt dat onder het W+ scenario de chlorideconcentratie in het Lekkanaal bij Nieuwegein (inname Waternet) kan oplopen tot boven de 150 mg/l, in een droog jaar (1989) en vooral in een zeer droog jaar (1976). Dit wordt niet zozeer veroorzaakt door indringing van zeewater, maar door de lage afvoer van de Rijn, waardoor de huidige (!) chloridevracht minder wordt verdund. De maximale chlorideconcentratie bij Nieuwegein, die optreedt bij de combinatie W+ en een zeer droog jaar (1976), bedraagt 181 mg/l. Deze piekconcentratie ligt ruim onder de norm voor duininfiltratie (max. 300 mg/l) en zal dan ook geen probleem zijn voor de bedrijfsvoering. Ook voor de drinkwaterproductie zal dit geen problemen opleveren, omdat de jaargemiddelde chlorideconcentratie bij dit worst case scenario ruim onder de 150 mg/l ligt (om precies te zijn: 124 mg/l). De piekconcentraties zullen dus voldoende worden afgevlakt tijdens de duinpassage.

Bij Bergambacht (noodinnamepunt Dunea) wordt in het huidige klimaat doorgaans aan de drinkwatereis voldaan, behalve in een zeer droog jaar (1976). Het aantal overschrijdingen van de 150 mg/l norm neemt sterk toe onder het W+ scenario, vooral bij een droog jaar (1989) en een zeer droog jaar (1976). Daarbij wordt de 300 mg/l grens voor duininfiltratie 12 dagen overschreden in een droog jaar en 39 dagen in een zeer droog jaar. Onder dergelijke omstandigheden mag het water niet in de duinen worden geïnfiltrerd. Het innamepunt Bergambacht is dus relatief gevoelig voor verzilting (zie ook figuur 5-7).



Figuur 5-7. Prognose van de chlorideconcentratie in de Lek bij Bergambacht bij huidig klimaat en het G en W+ scenario, voor een gemiddeld jaar (1967), een droog jaar (1989) en een zeer droog jaar (1976).

Het noodinnamepunt Beerenplaat (Evides) is onder het huidige klimaat al relatief gevoelig voor verzilting en deze gevoeligheid neemt toe bij het W+ scenario (niet bij het G scenario). Hetzelfde kan worden gesteld voor het innamepunt Scheelhoek in het Haringvliet (Evides). Echter, dit innamepunt gaat sowieso verplaatst worden vanwege het alternatief beheer van de Haringvlietssluisen (Kierbesluit).

Het belangrijkste innamepunt van Evides, Gat van de Kerksloot (Brabantsche Biesbosch), lijkt ongevoelig voor verzilting, waarbij wel moet worden opgemerkt dat de berekeningen van Deltares zijn uitgevoerd voor een zoet Volkerak. Wanneer het Volkerak weer zout wordt (momenteel is dat nog onzeker) zal dit een extra zoutbelasting opleveren op het Hollandsch Diep, die via getijdewerking deels zal doorwerken op het innamepunt Gat van de Kerksloot. Wat dat exact betekent voor de toekomstige chloride concentratie op het innamepunt is op dit moment niet te zeggen.

Het innamepunt Brakel (Dunea) is niet gevoelig voor verzilting. De resultaten van Deltares lijken anders uit te wijzen (tabel 5-9), maar navraag leerde dat deze resultaten betrekking hebben op een locatie ten noorden van de Wilhelminasluisen (dus beïnvloed door de Waal), terwijl het innamepunt van Dunea ten zuiden van de sluisen ligt (grotendeels Maaswater). Het is niet waarschijnlijk dat de chlorideconcentratie van het Maaswater bij een ander klimaat gaat stijgen tot boven de 150 mg/l (zie resultaten Gat van de Kerksloot).

Tabel 5-10. Prognose van de jaargemiddelde chloride concentratie van de Lek ter hoogte van winningen van oevergrondwater bij huidig klimaat en het G en W+ scenario in 2050. Bron: Wesselius en Haasnoot (2013).

locatie	Huidig klimaat			G scenario (2050)			W+ scenario (2050)		
	1967	1989	1976	1967	1989	1976	1967	1989	1976
Hagestein*	80	94	109	79	93	106	88	106	124
Lexmond	79	92	106	79	92	106	88	110	136
Schoonhoven	80	93	109	79	91	107	89	122	159
Bergambacht	80	93	110	79	92	108	90	124	162
Lekkerkerk	82	98	132	81	97	130	107	177	248
Ridderkerk	84	107	160	83	106	161	127	235	343

* Geen winning van oevergrondwater

Uit Tabel 5-10 blijkt dat de modelresultaten voor huidig klimaat en die voor het G scenario (2050) vrijwel identiek zijn. Bij het W+ scenario is duidelijk sprake van een toename van de verzilting. In het huidige klimaat speelt verzilting enkel een rol bij de winning Ridderkerk (op de Noord) en winningen rond de monding van de Lek (Lekkerkerk), en dat alleen in droge en zeer droge jaren. Bij het W+ scenario neemt de verzilting stroomopwaarts toe en is dan, bij droge en zeer droge jaren, merkbaar tot aan Lexmond. Overschrijdingen van de 150 mg/l grens (NB jaargemiddeld) treden bij het W+ scenario op bij Lekkerkerk en Ridderkerk, zowel in een droog jaar als (extremer) in een zeer droog jaar. De 150 mg/l grens kan ook worden overschreden bij Bergambacht en Schoonhoven in een zeer droog jaar bij het W+ scenario.

De chlorideconcentratie in het opgepompte grondwater van oeverwinningen wordt bepaald door de gemiddelde chlorideconcentratie in het Lekwater over vele jaren (Grakist et al., 2004). Het lijkt dan ook niet waarschijnlijk dat de oeverwinningen bij Schoonhoven en Bergambacht in gevaar komen bij het W+ scenario. Maar de winningen rond de monding van de Lek (Lekkerkerk, Nieuw-Lekkerland) en aan de Noord (Ridderkerk) zullen wel onder druk komen te staan bij het W+ scenario.

5.7 Wat betekenen deze effecten voor de zuivering ?

5.7.1 Langdurig lage afvoeren van de grote rivieren

Voor drinkwaterzuiveringen met eenvoudige zuiveringsprocessen geldt dat de verwachte toename aan medicijnresten en verwante stoffen potentieel problematisch mag worden genoemd. Dit geldt vooral als het water daarna wordt geïnfilteerd, aangezien het te

infiltreren water moet voldoen aan het Infiltratiebesluit Bodembescherming. Als het water niet voldoet aan het infiltratiebesluit, mag het in principe niet worden geïnfilterd. De kans op toename van het overschrijden van de in het infiltratiebesluit beschreven grenswaarden zal in de toekomst toenemen. Dunea heeft overigens besloten om de voorzuivering in Bergambacht (waarna het water in de duinen wordt geïnfilterd) uit te breiden, om ook in de toekomst aan het infiltratiebesluit te kunnen voldoen. Ook voor Heel zal de kans op het niet mogen infiltreren van het Maaswater in de toekomst toenemen (ook hier is al een alternatief voorhanden). Op de WRK te Nieuwegein staat een relatief eenvoudige voorzuivering, die er niet op ingericht is om organische microverontreinigingen te verwijderen. Ook hier bestaat het risico op dat het daar geproduceerde water (dat in de duinen wordt geïnfilterd) in de toekomst niet altijd voldoet aan het infiltratiebesluit.

De Nederlandse drinkwaterbedrijven hanteren het voorzorgsprincipe, d.w.z. dat stoffen die niet in het drinkwater horen in principe worden verwijderd door de drinkwaterzuivering. Voor oppervlaktewater, dat relatief (t.o.v. grondwater) veel antropogene invloed kent, worden daarom meestal meerdere barrières voor organische microverontreinigingen ingezet. Volledige verwijdering van organische microverontreinigingen (incl. medicijnresten) is echter niet haalbaar.

De vraag is hoe de verwijdering van organische microverontreinigingen in (drinkwater) zuiveringsprocessen verandert met de concentratie van deze microverontreinigingen, die o.i.v. klimaatverandering gaan veranderen. Voor een aantal processen (geavanceerde oxidatie, membraanfiltratie) is de verwachting dat de logverwijdering niet noemenswaardig verandert als de concentratie organische microverontreinigingen toeneemt met een factor 2-5 (zoals voor medicijnresten wordt voorzien). Voor actieve kool geldt echter dat bij hogere concentraties organische microverontreinigingen de kool zwaarder wordt belast, en dat de actieve kool vaker geregenereerd (of dat er meer poederkool gedoseerd) zou moeten worden om dezelfde logverwijdering te behalen. Dit geldt des te meer als ook de NOM concentratie gaat toenemen onder invloed van klimaatverandering (zoals in Scandinavië lijkt te gebeuren).

Bij hogere concentraties van organische microverontreinigingen in het oppervlaktewater kan het echter wenselijk zijn om de logverwijdering te verhogen, zodat het risico op effecten bij de klant op hetzelfde, zeer lage, niveau blijft. In dat geval zouden bij vervijfvoudiging van de concentratie aan medicijnen in het oppervlaktewater, de zuiveringsprocessen vijf keer zoveel moeten verwijderen. Dit is in de zuivering alleen haalbaar door een extra geavanceerde zuiveringsstap te introduceren, of door uitbreiding van een geavanceerde zuiveringsstap.

Op dit moment worden diverse NF/RO concentraten op het oppervlaktewateren geloosd. Vergunningen worden alleen toegekend als het effect van de lozing op het ontvangende oppervlaktewater minimaal is. Het is mogelijk dat de huidige concentraatlozingen op zoet oppervlaktewater door klimaatverandering in het gedrang komen.

5.7.2 Hogere temperaturen

Door klimaatverandering gaat de gemiddelde temperatuur in Nederland verder toenemen. Volgens berekeningen van Deltares neemt in het G scenario de gemiddelde temperatuur op de innamepunten voor drinkwater in 2050 met 0.8 °C toe (0.7 °C in de winter). In het W+ scenario is de gemiddelde temperatuur op de innamepunten in 2050 met 2.2 °C gestegen (1.8 °C in de winter). De kans op temperatuurstijging is zeer groot, maar de grootte van het effect is onzeker (minimaal 0.8 °C, maximaal 2.2 °C).

De stijging van de temperatuur heeft vooral effect op de microbiologische waterkwaliteit. Het effect van de hogere temperatuur van het ruwe water op zuiveringsprocessen is hieronder weergegeven. Deze effecten zijn grotendeels al beschreven in KWR rapport 2010.110: "Toenemende temperaturen van het water: effect op de zuivering en hoe te voorkomen in het distributienet" (Vries, 2010).

Adsorptieve processen: Deze zullen in de regel sneller zijn, omdat de diffusie van stoffen sneller is bij hogere temperaturen. Bij een temperatuurverhoging van 15 naar 18 °C neemt de viscositeit (=stroperigheid) van het water met ongeveer 10% af. Daarnaast veranderen de adsorptie-evenwichten o.i.v. de temperatuurverandering, maar dit effect wordt als klein ingeschat.

Fysisch-chemische processen: De snelheid van chemische reacties neemt toe met de temperatuur, maar bij een beperkte temperatuurstijging (1 tot 2 °C) is dit effect meestal klein. Het onthardingsproces zal wel beter verlopen bij hogere temperaturen. Ontharding in pelletreactoren werkt weliswaar al bij lagere temperaturen (>5 °C), maar het loogrendement neemt significant toe met de watertemperatuur. Bij hogere temperaturen is dus minder loog nodig om eenzelfde hardheidsreductie te bereiken. Voor coagulatie geldt dat hogere temperaturen de vlokvorming en bezinking versnellen, maar dat er wel andere vlokken worden gevormd (wat mogelijk nadelig is). Mogelijk is echter het effect van het veranderende karakter van het natuurlijk organisch materiaal dominant over het effect van de temperatuur. Voor ozonisatie heeft de lagere oplosbaarheid en de snellere afbraak van ozon bij hogere temperaturen een groter effect: ozonisatie verloopt bij hogere temperaturen minder effectief, ondanks de toegenomen afbraaksnelheid van stoffen en micro-organismen. Een belangrijk voordeel is dat er minder bromaat wordt gevormd (Vries, 2010).

Membraanprocessen: Voor membraanprocessen geldt dat de daling in de viscositeit van het water zorgt voor een verlaging in de benodigde hoeveelheid energie om het water door het membraan te persen. Bij hogere temperaturen neemt wel de kans op membraanvervuiling door micro-organismen (biofouling) toe. Waarschijnlijk overheerst dit laatste effect zodat het netto-effect negatief is (hogere kosten). Bij hogere temperaturen neemt bovendien de verwijdering van een significant deel van de organische microverontreinigingen door NF/RO af (Acero et al., 2010).

Biologische processen: Processen waarbij biologie een rol speelt, zullen in principe sneller verlopen bij een temperatuurstijging, ook al is deze beperkt. Vooral bij relatief lage temperaturen (in de winter) zullen de biologische zuiveringen bij een temperatuurstijging beter werken. Biologisch actieve koolfiltratie (BAKF) en diverse biologische processen in langzame en snelle zandfilters zullen bijvoorbeeld beter verlopen bij hogere temperaturen. Mogelijk nadeel is het eerder verstopten van zandfilters onder invloed van snellere biologische groei.

Samengevat is het effect van hogere temperaturen moeilijk te voorspellen. Dit is zeker het geval als daarbij rekening wordt gehouden met het feit dat niet alleen de watertemperatuur, maar ook andere relevante parameters kunnen veranderen o.i.v. klimaatverandering, zoals de NOM concentratie. Bij kleine veranderingen in temperatuur vallen de effecten voor de zuivering mee, en de veranderingen van de temperatuur in de winter zijn vooral positief. Waar bodempassage onderdeel uitmaakt van het zuiveringsproces, zal door piekafvlakking het effect van een hogere watertemperatuur op de nageschakelde zuivering gering zijn.

5.7.3 Kans op effecten en risico's

We onderscheiden vier risicogebieden:

- (i) langdurigere lagere afvoeren van de rivieren,
- (ii) toename van verzilting (mede veroorzaakt door (i)),
- (iii) hogere watertemperaturen, en
- (iv) andere veranderingen.

De grootste risico's voor de waterzuivering liggen op het gebied van de langdurige lagere afvoeren van de rivieren (minder verdunning van puntlozingen en toename van indringing zeewater). Het is niet ondenkbaar dat het Maaswater in de toekomst van dermate slechte kwaliteit wordt (bijv. medicijnresten) dat meer innamestops of extra zuiveringsstappen nodig zijn om onberispelijk drinkwater te kunnen produceren of om water te kunnen infiltreren. Voor Rijnwater geldt hetzelfde, maar is de kans dat de effecten tot problemen leiden kleiner. De problemen met verzilting concentreren zich voornamelijk rondom de oevergrondwater winningen aan de Noord en de monding van de Lek; hiervoor is aanpassing van de zuivering (RO) een mogelijke oplossing (met alle mitsen en maren die hieraan verbonden zijn).

Daarnaast liggen er kleinere risico's op het gebied van temperatuur en veranderingen in waterkwaliteitsparameters (zoals NOM, nitraat, etc.). De temperatuurstijging heeft naar verwachting in veel gevallen een positieve invloed (bv. hogere activiteit van biologische processen), maar kan ook nadelige gevolgen met zich meebrengen (bv. meer kans op biofouling). Helaas is het praktisch onmogelijk om zinnige kwantitatieve voorspellingen te doen over het effect van veranderingen in waterkwaliteitsparameters op de (drinkwater) zuiveringen. De kans dat er effecten op gaan treden is echter wel aanwezig, loopt uiteraard op met toenemende veranderingen, en is ook afhankelijk van de lokale omstandigheden.

5.8 Kennisvragen

5.8.1 Lage afvoeren en waterkwaliteit

- Hoe zal de waterkwaliteit van de Maas en de Rijn zich ontwikkelen bij het W+ scenario, gedurende lange periodes (maanden) van watertekorten? Op welke concentraties aan microverontreinigingen (geneesmiddelen e.d.) moet de waterzuivering voorbereid zijn?
- Wat betekent de structurele lage afvoer van de Maas onder het W+ scenario voor de impact van afvalwaterlozingen op het watersysteem? Wat zouden de consequenties moeten zijn voor verlenging van bestaande vergunningen en nieuwe aanvragen?
- Wat zijn de gevolgen van langdurig lage Rijnafoeren voor de verdeling van het zoete water over de verschillende riviertakken? In hoeverre zal de verzilting toenemen door een structurele onttrekking van Dunea bij Bergambacht? Hoe kan de drinkwaterfunctie van de Lek beter worden beschermd bij lage afvoeren?

5.8.2 Hoge watertemperaturen

- Hoe realistisch zijn de maximale watertemperaturen die door het temperatuurmodel van Deltares worden voorspeld bij het W+ scenario (check op calibratie en validatie)?
- Is de buffercapaciteit van de voorraadbekken en/of de procesbekken voldoende groot om (langdurig) hoge watertemperaturen van het rivierwater op te kunnen vangen?
- Indien de buffercapaciteit onvoldoende is: wat betekent een (langdurige) overschrijding van de 25 °C eis voor de drinkwatervoorziening? Wat zijn effecten op de zuivering, wat is het effect op nagroei in het distributienet en de biologische stabiliteit van het drinkwater, wat is het effect op de watertemperatuur aan de tap?

5.8.3 Impact op zuiveringsprocessen

- Blijven innamestops bij langere drogere periodes houdbaar (is er genoeg water van goede kwaliteit), of zijn andere strategieën nodig (alternatieve bronnen, opslag, uitbreiding zuiveringen)?

- Wat is het netto effect van de verwachte temperatuurstijging op diverse zuiveringsprocessen, in het bijzonder NF/RO (biofouling)?
- Gaan diverse waterkwaliteitsparameters (bv. NOM, nitraat, fosfaat, UV transmissie, etc.), die bij diverse zuiveringsprocessen een belangrijke rol spelen, veranderen onder invloed van klimaatverandering (en zo ja, hoe)?

5.9 Literatuur

- Acero, J.L., F.J. Benitez, F. Teva & A.I. Leal (2010), Retention of emerging micropollutants from UP water and a municipal secondary effluent by ultrafiltration and nanofiltration, *Chemical Engineering Journal*, 163 (2010) 264-272.
- Doomen, A., G. Zwolsman, J.P. van der Hoek en M. Kortleve (2006). Waterkwaliteit van de Rijn en de Maas bij lage afvoeren: een verkenning aan de hand van de droge zomer van 2003. *H₂O* 39 (13): 46-49.
- Grakist, G., C. van Genuchten & P. Jacobs (2004). Effect van zeewaterindringing op oevergrondwaterwinning in Ridderkerk. *H₂O* 37 (24): 25-27.
- Hooijboer, A.E.J. & A.C.M. de Nijs (2011). De invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit. RIVM rapport 607403001/2011.
- Klijn, F., E. van Velzen, J. ter Maat en J. Hunink (2012). Zoetwatervoorziening in Nederland. Aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw. Deltares, Utrecht, 2e (gecorrigeerde) druk. Geschreven in opdracht van Deltaprogramma, Deelprogramma Zoetwater.
- Ter Laak, T., H. Tolkamp & J. Hofman (2013). Geneesmiddelen in de Watercyclus in Limburg Fase 1: Voorkomen, herkomst en ernst van geneesmiddelen in het watersysteem. Rapport KWR 2013.011.
- Van Bokhoven, A.J. & J.J.G. Zwolsman (2007). Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Rijn. *H₂O* 40 (9): 34-37.
- Van Vliet, M.T.H. & J.J.G. Zwolsman (2007). Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Maas. *H₂O* 40 (9): 29-33.
- Vries, D. (2010). Toenemende temperaturen van het water: effect op de zuivering en hoe te voorkomen in het distributienet, in: KWR 2010.110 KWR, 2010.
- Wesselius, C. & M. Haasnoot (2013). Resultaten nieuwe berekeningen NDB model voor Deelprogramma Zoetwater fase 4". Memo Deltares, kenmerk 1207773-000-VEB-0017, 5 augustus 2013.
- Wuijts, S., C.I. Bak-Eijsberg, E.H. van Velzen & N.G.F.M. van der Aa (2012). Effecten klimaatontwikkeling op de waterkwaliteit bij innamepunten voor drinkwater. RIVM rapport 609716004/2012.
- Zwolsman, J.J.G. & M.T.H. van Vliet (2007). Effect van een hittegolf op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas. *H₂O* 40 (22), p. 41-44.
- Zwolsman, J.J.G. (2008). Klimaatbestendigheid van de drinkwatervoorziening in Nedeland gebaseerd op oppervlaktewater. Rapport KWR 08.070

6 Effecten van klimaatverandering op de microbiologische kwaliteit van het oppervlaktewater

6.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Kimberly Learbuch, Patrick Smeets en Edwin Kardinaal (allen KWR), op basis van beschikbare literatuur en expertkennis. Dit hoofdstuk beperkt zich tot het voorkomen van micro-organismen in het oppervlaktewater. Micro-organismen met ziekteverwekkende eigenschappen die in drinkwater kunnen groeien (opportunistische pathogenen) worden besproken in hoofdstuk 7.

6.2 Inleiding

Micro-organismen komen van nature voor in oppervlaktewater. Slechts een beperkt deel van die organismen kan bij de mens ziektes veroorzaken. In dit hoofdstuk wordt onderscheid gemaakt tussen twee groepen micro-organismen, namelijk:

- toxineproducerende micro-organismen zoals cyanobacteriën en *Clostridium botulinum*
- pathogenen van fecale oorsprong, die infecties bij de mens kunnen veroorzaken.

De concentratie van micro-organismen in het oppervlaktewater is onder andere afhankelijk van de mate van de (fecale) belasting, de verdunning, de overleving en de groei van micro-organismen. Deze factoren hangen samen met weersomstandigheden als temperatuur en neerslag en worden dus beïnvloed door klimaatverandering (van der Wal et al., 2012).

6.3 *Clostridium botulinum*

Clostridium botulinum is een gram-positieve bacterie die zich onder zuurstofloze condities kan vermeerderen. Het organisme komt voor in de (water)bodem en is in staat sporen te vormen die overleven tijdens ongunstige condities voor groei. Diverse stammen van *C. botulinum* zijn in staat om verschillende typen toxine te produceren die het zenuwstelsel aantasten. De toxinen van het type A, B en E (zeer zelden ook type F) zijn ziekteverwekkend voor de mens. Deze toxinen veroorzaken symmetrische, afdalende, slappe verlamming, die uiteindelijk kan leiden tot de dood. Omdat het oppervlaktewater onder normale condities zuurstofrijk is, is *C. botulinum* niet in staat te groeien in het oppervlaktewater. *C. botulinum* kan wel sterfte onder watervogels en vissen veroorzaken, waarna de bacterie en het toxine vrij komen in het oppervlaktewater. Sterfte onder vogels en vissen door *C. botulinum* treedt voornamelijk op bij langdurige hitte en als gevolg daarvan zuurstofloze omstandigheden nabij de waterbodem. De meeste *C. botulinum* soorten die sterfte onder watervogels veroorzaken, produceren echter de voor de mens ongevaarlijke toxinetypen C en D. Soms worden bij dode watervogels en vissen echter het ook voor de mens ziekteverwekkende toxine B en E aangetroffen (Anoniem, 2013a en Kardinaal & van der Wielen, 2011).

De ziekte humaan botulisme komt nauwelijks voor in Nederland; vanaf 2000 zijn er 16 meldingen geweest, waaronder een cluster van patiënten in 2008. In de meeste gevallen echter wordt de ziekte waarschijnlijk veroorzaakt door een voedselinfectie (Anoniem, 2013a en Kardinaal & van der Wielen, 2011). Het optreden van botulisme is dus vooral een probleem voor de aquatische ecologie; er is geen sprake van bedreiging voor de drinkwatervoorziening. Daarom zal in dit hoofdstuk verder geen aandacht aan risico's van botulisme worden besteed.

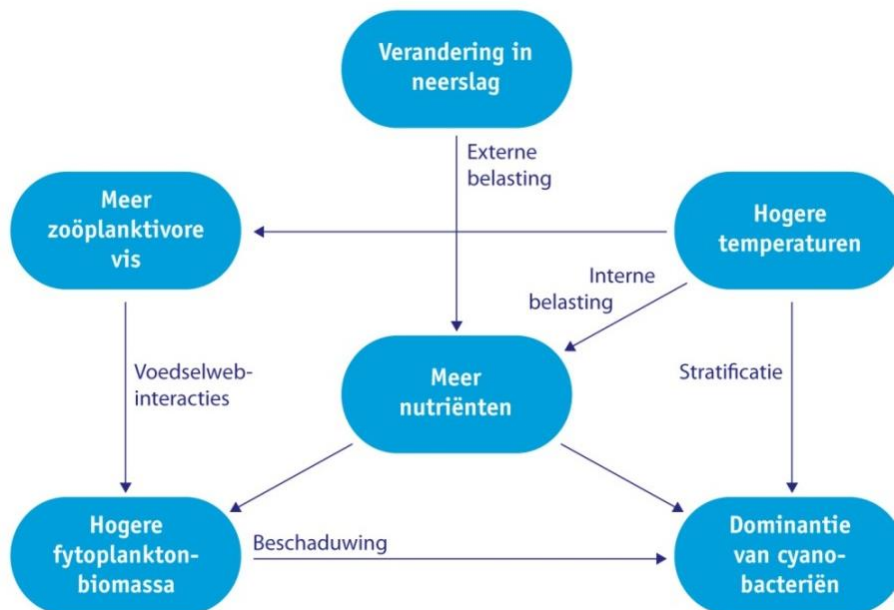
6.4 Cyanobacteriën

6.4.1 Huidige situatie

Cyanobacteriën (in de volksmond blauwalgen genoemd) omvat een diverse groep aan fototrofe bacteriën die in staat zijn om in oppervlaktewater tot grote dichtheden te groeien. Vanwege het vermogen van diverse geslachten om massaal naar het wateroppervlak te kunnen drijven, ontstaan drijfvlakken die vele vierkante kilometers kunnen innemen. Enkele van de geslachten zijn in staat om een breed scala aan toxische stoffen te produceren die gevaar op kunnen leveren voor mens en dier. De toxines kunnen onder andere leverschade of verlamingsverschijnselen veroorzaken. Bovendien zijn diverse geslachten verantwoordelijk voor huidirritaties. Bij langdurige blootstelling is er mogelijk sprake van Alzheimerachtige verschijnselen. De combinatie van hoge dichtheden met potentiële toxineproductie maakt dat cyanobacteriën een aanzienlijk gezondheidsrisico kunnen vormen. De aanwezigheid van drijfvlakken is met regelmaat aanleiding om zwemwaterlocaties te sluiten (Kardinaal & van der Wielen, 2011 en Kosten et al., 2011).

6.4.2 Risico's en bronnen van cyanobacteriën in het oppervlaktewater

Voor cyanobacteriën geldt dat hun groeiomstandigheden kunnen verbeteren of verslechteren afhankelijk van de beschikbare voedingsstoffen (van der Wal et al., 2012). Problemen met cyanobacteriën treden vooral op bij een combinatie van hoge nutriëntenconcentraties, hoge watertemperaturen en stagnante condities, omdat dan de biomassa het hoogst is (Kosten et al., 2011). Hogere temperaturen kunnen op verschillende manieren leiden tot dominantie van cyanobacteriën, zoals is te zien in Figuur 6-1.



Figuur 6-1. Hogere temperaturen kunnen op verschillende manieren leiden tot een dominantie van cyanobacteriën (Kosten et al., 2011b).

Cyanobacteriën kunnen zowel in het ingenomen water als in de bekkens/infiltratieplassen in de duinen voorkomen en groeien. Hoge dichtheden cyanobacteriën vormen in potentie een probleem voor de productie van drinkwater. Behalve de toxines die in het drinkwater kunnen belanden, kunnen ook geur en smaak van het water door de aanwezigheid van cyanobacteriën negatief beïnvloed worden (Kardinaal, 2011 en Kosten et al., 2011). De aanwezigheid van hoge dichtheden van cyanobacteriën kan leiden tot zuurstofloze condities in het ruwe water waardoor de drinkwaterproductie wordt bemoeilijkt (Kardinaal, 2013).

De huidige voorlopige WHO richtlijn voor cyanotoxines is uitsluitend gericht op één enkele toxine, namelijk microcystine-LR (dat is de meest toxische microcystine variant). Van deze toxine zijn volgens de WHO voldoende gegevens voorhanden om een voorlopige richtlijn op te stellen. Het voorgestelde maximaal toelaatbare microcystinegehalte in drinkwater bedraagt 1 µg/l. (Vernooij et al., 2011; WHO, 2003 en WHO, 2011).

6.4.3 Groei en sterfte van cyanobacteriën

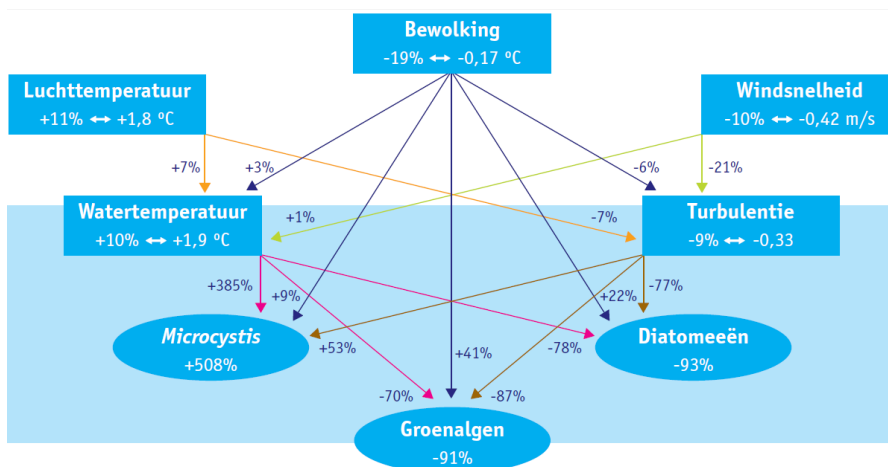
Cyanobacteriën concurreren met andere algensoorten om licht en voedsel, maar zijn in het voordeel onder voedselrijke omstandigheden wanneer licht een beperkende groeifactor is, en bij hogere watertemperaturen (boven 25°C) (van der Wal et al., 2012). Verontreiniging van natuur(zwem)water door cyanobacteriën is vooral gerelateerd aan de beschikbaarheid van nutriënten. In zoet oppervlaktewater speelt fosfaat een belangrijke rol voor hun groei. Wanneer een overmaat fosfaat aanwezig is, kunnen cyanobacteriën ten opzichte van andere algensoorten en waterplanten gaan domineren. Fosfaten komen onder andere in het water terecht via afspoeling van landbouwgrond en uitstroom van rioolwaterzuiveringsinstallaties (van der Wal et al., 2012; Kardinaal & van der Wielen, 2011 en Doomen et al., 2008).

Cyanobacteriën hebben ten opzichte van overige algen voordeel bij rustig water en relatief hoge watertemperaturen. Bovendien gedijen ze in eutrofe wateren zeer goed, zeker wanneer de hoeveelheid licht die in het water doordringt een beperkende factor gaat worden. Vanwege het drijfvermogen van diverse cyanobacterie geslachten zijn de cellen in staat om voldoende licht in te vangen voor de primaire productie (Paerl & Huisman, 2008 en Kardinaal & van der Wielen, 2011).

In de literatuur worden nog andere factoren benoemd die van belang zijn bij het in stand houden van cyanobacterie bloeien, namelijk gelaagdheid van de waterkolom (stratificatie), verblijftijd, zuurgraad (pH) en de beschikbaarheid van stikstof. Maar ook stroomsnelheid wordt genoemd als een kritische parameter die bepaalt of een drijfslag zich kan ontwikkelen (Doomen et al., 2008 en Vernooij et al., 2011).

6.4.4 Impact van klimaatverandering op cyanobacteriën bloei en dominantie

Figuur 6-2 laat in conceptuele zin zien hoe klimaatverandering de groei van cyanobacteriën positief kan beïnvloeden. Deze Figuur is een weergave van een model dat gemaakt is naar aanleiding van een *Microcystis* bloei in het Nieuwe Meer (nabij Amsterdam) gedurende de extreem warme zomer van 2003. Wanneer alle bepalende factoren samenvallen, kan een *Microcystis* populatie met wel 500 % toenemen. De toename van de watertemperatuur speelt daarin een belangrijke rol (+ 385 %) (Kardinaal & van der Wielen, 2011 en STOWA, 2009).



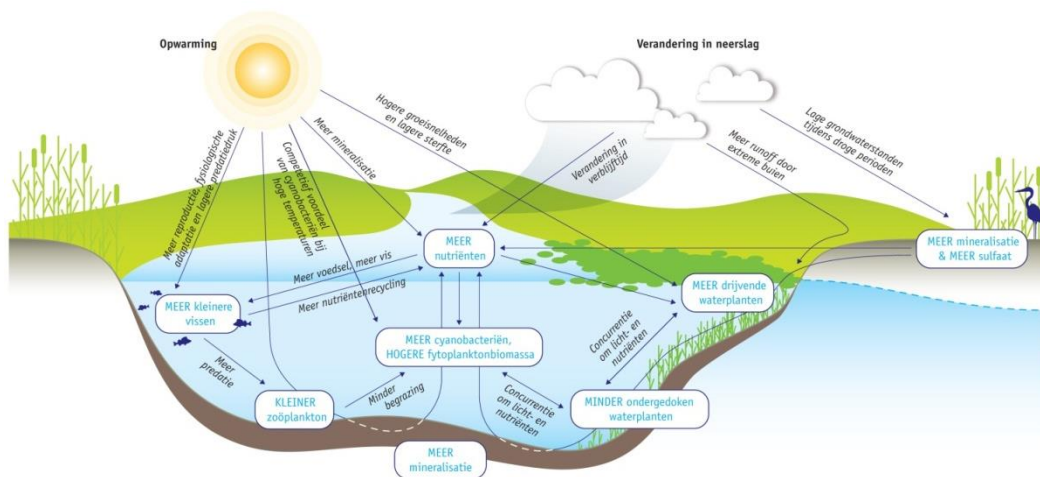
Figuur 6-2. Model van de effecten van hete zomers op de hoeveelheid planktonalgen; absolute en relatieve afwijkingen t.o.v. normale zomers en de invloed op algen zijn aangegeven (STOWA, 2009).

In het klimaatscenario W+ valt te verwachten dat de temperatuur van het oppervlaktewater stijgt met ca. 2 °C in het jaar 2050 (waarbij de watertemperatuur in de zomer tot 2,5 °C kan stijgen). Verhoogde temperaturen versnellen microbiologische processen waarbij organisch materiaal versneld omgezet zal worden tot beschikbare nutriënten waar cyanobacteriën hun voordeel mee kunnen doen: interne eutrofiëring. Bovendien zal de hoeveelheid neerslag afnemen in de zomer, wat resulteert in stagnant water. Mocht er toch neerslag vallen dan zal dat plaatsvinden in de vorm van pieken waarbij in korte tijd veel regen valt. Bij dergelijke buien is de kans op afspoeling en overstort van rioolstelsels waarschijnlijk: beide processen dragen bij aan de verrijking van het oppervlaktewater met nutriënten (Kardinaal & van der Wielen, 2011).

De toenemende watertemperatuur, de rustige weersomstandigheden en de piekafvoeren van de neerslag in de zomerperiode onder het W+ scenario leiden tot goede omstandigheden voor de groei van de cyanobacteriën. Onder deze omstandigheden kunnen cyanobacteriën zeer hoge dichtheden bereiken en langdurig het algenbeeld in het oppervlaktewater domineren (Kardinaal & van der Wielen, 2011; Doomen et al., 2008; Paerl en Huisman, 2008). Voor het G scenario geldt dit in mindere mate omdat de temperatuurstijging hier beperkt blijft tot 1 °C.

Een geleidelijke stijging van de watertemperatuur kan de mogelijkheid van het voorkomen van invasieve soorten bevorderen, waaronder *Cylindrospermopsis raciborskii* (Doomen et al., 2008). Deze (toxische) soort komt nu veelvuldig voor in Duitsland (Pearl & Huisman, 2008). De afgelopen 100 jaar is de temperatuur van de Rijn en de Maas met ca. 3 °C gestegen (!). Deze stijging is voor tweederde deel toe te schrijven aan een toename van koelwater lozingen, en voor een derde het gevolg van hogere luchttemperaturen in de afgelopen eeuw.

Verschillende studies geven aan dat klimaatverandering ook grote effecten zal hebben op nutriëntenbelastingen en de fytoplanktonbiomassa en -fenologie (de timing van jaarlijks terugkerende natuurverschijnselen zoals het optreden van een voorjaars-of zomerbloei van fytoplankton). Klimaatverandering versterkt hierbij de eutrofiëring (zie Figuur 6-3) (Kosten et al., 2011).



Figuur 6-3. Conceptuele weergave van het eutrofiërende effect van klimaatverandering (Kosten et al., 2011).

6.4.5 Risico van cyanobacteriën voor de drinkwatervoorziening bij huidig en veranderend klimaat

Recente studies door KWR hebben aangetoond dat voor de Nederlandse drinkwatersector niet te verwachten valt dat de aanwezigheid van cyanobacteriën en/of cyanotoxines in het ruwe water problemen op zal leveren voor de drinkwaterkwaliteit (Vernooij et al., 2011; Kardinaal, 2013). Zowel voor de verwijdering van de cellen als voor de verwijdering van de toxines zijn meerdere barrières aanwezig. Cellen en toxines worden op die manier voldoende verwijderd en zullen vooralsnog geen problemen opleveren voor de volksgezondheid. Een kanttekening hierbij is dat het onderzoek zich vooral heeft gericht op de stof microcystine. Overige toxines, met een ander werkingsmechanisme en ander gedrag in de zuivering, zijn niet diepgaand in beschouwing genomen. Daarnaast is het de vraag hoe het risico zich zal ontwikkelen bij klimaatverandering, gelet op de kans op toename van de intensiteit van cyanobacterie bloeien in warme droge zomers (zie Figuur 6-2).

6.5 Pathogenen

6.5.1 Huidige situatie

Pathogene micro-organismen van humane of dierlijke fecale oorsprong komen in het oppervlaktewater voornamelijk door uitstroom van ruw en behandeld afvalwater, door afspoeling van het land of vanuit een directe bron; zoals vogels in het water. Onder deze pathogene micro-organismen vallen virussen (norovirussen, enterovirussen, hepatitis A en E virussen), bacteriën (*Campylobacter*, *Salmonella*, *E. coli* 0157) en parasiterende protozoa (*Cryptosporidium*, *Giardia*). Deze pathogenen kunnen voornamelijk maag-darm infecties veroorzaken met diarree en braken tot gevolg, maar ook ernstiger ziektes en complicaties. Enterovirussen, *Cryptosporidium*, *Campylobacter* en *Giardia* komen algemeen voor in Nederlandse oppervlaktewateren (Schijven et al., 1995; Medema et al., 2001, De Roda Husman & Medema, 2005; Smeets et al., 2009).

Naegleria fowleri is een vrijlevende protozoa (eencellig dierlijk organisme) die voor komt in zoet oppervlaktewater. Dit organisme groeit met zuurstof en graast voornamelijk op bacteriën die in biofilms voorkomen, maar ze kunnen zich ook met vrij levende bacteriën voeden. *N. fowleri* veroorzaakt hersen(vlies)ontsteking bij mensen die meestal binnen een paar dagen fataal is. Mensen raken geïnfecteerd wanneer water met *N. fowleri* met kracht door de neusgaten wordt geduwd (bijvoorbeeld door in zwemwater te springen/duiken); *N. fowleri* dringt dan via het neusslijmvlies het lichaam binnen. Door deze bijzondere infectieroute van *N. fowleri* worden wereldwijd niet veel ziektegevallen gemeld. Groei van *N. fowleri* in oppervlaktewater treedt pas op wanneer de temperatuur langdurig boven de 27 tot 30°C is (Kardinaal & van der Wielen, 2011). Omdat er wereldwijd slechts sporadisch infecties optreden, wordt dit thans niet als een groot risico beschouwd.

Leptospira spp. zijn spiraalvormige, gramnegatieve en obligaat aerobe bacteriën die behoren tot de orde *Spirochaetales*. Een aantal *Leptospira*-soorten kunnen leptospirose (waaronder ook de ziekte van Weil valt) bij mensen veroorzaken. Deze ziekteverwekkende *Leptospira*-soorten komen voor in de nieren van verschillende diersoorten (bv ratten, muizen, honden) en komen via de urine van deze dieren in oppervlaktewater terecht. Wanneer de condities in het natuurlijke zwemwater gunstig zijn voor de bacterie (lauw en weinig stromend water), dan kan de bacterie in water overleven en worden overgedragen op mensen via de slijmvliezen of wondjes op de huid. Het ziektebeeld van leptospirose varieert van milde griepverschijnselen tot ernstige verstoringen van nier- en leverfuncties en/of hersenvliesontsteking, wat uiteindelijk kan leiden tot de dood. De overleving van *Leptospira*-bacteriën in het milieu is optimaal onder natte/vochtige omstandigheden, bij een temperatuur van 28 tot 30°C en een neutrale pH (Anoniem, 2013b en Kardinaal & van der Wielen, 2011). In Nederland worden gemiddeld twee tot zeven gevallen van leptospirose per jaar gemeld die gerelateerd zijn aan zwemmen in natuurlijk zwemwater (Hartskeerl & Goris, 2008).

6.5.2 Huidige risico's en bronnen van besmetting

De huidige risico's van besmetting van het oppervlaktewater spelen vooral bij de grote rivieren als de Maas en de Rijn. Deze rivieren hebben een groot stroomgebied en voeren door diverse landen en grote steden. Het water wordt hierdoor met humane, dierlijke en industriële afvalstromen besmet. Een ander probleem is besmetting van relatief schone bekkens voor de drinkwatervoorziening door watervogels die in het water verblijven (Smeets et al., 2009). Een verontreinigingsincident in een bron voor drinkwater kan leiden tot een korte piekconcentratie van pathogenen die onopgemerkt blijft maar op jaarbasis toch tot relevante microbiële risico's leidt. Zware regenbuien kunnen bijvoorbeeld leiden tot verontreinigingsincidenten door afspoeling van mest uit de landbouw, overstorten van gemengde riolen en uitval/bypass van rioolwaterzuiveringsinstallaties (Smeets et al., 2009). Grondwater en water dat na bodempassage wordt gewonnen is doorgaans goed beschermd tegen microbiologische risico's. Besmetting van gewonnen grondwater kan wel plaatsvinden door overstroming of hevige regenval (plasmvorming) bij de winput (kortsluitstroming).

6.5.3 Groei en sterfte van pathogenen

Pathogenen zullen in het milieu na verloop van tijd afsterven, of in ieder geval niet meer infectieus zijn. De snelheid waarmee dit gebeurt, is afhankelijk van het soort micro-organisme. Er kunnen enkele dagen tot vele jaren nodig zijn voordat alle micro-organismen in een verontreiniging zijn geïnactiveerd. Naast de tijd speelt de temperatuur een belangrijke rol bij de sterfte van pathogenen. De inactivatiesnelheid verdubbelt ongeveer bij een temperatuur toename van 10°C. Uit veldmetingen blijkt een positieve relatie tussen de concentratie van pathogenen en de rivierafvoer/stroomsnelheid, dus een toename in de rivierafvoer c.q. de stroomsnelheid in de winter en een lage temperatuur valt samen met een toename in pathogenen. Deze correlatie is gebaseerd op gemeten concentraties van *Giardia*, *Cryptosporidium* en enterovirussen (Schijven & de Roda Huisman, 2005). Waarschijnlijk wordt de positieve relatie tussen de concentratie van *Cryptosporidium* en *Giardia* en de rivierafvoer veroorzaakt door een toename in afspoeling; de toename van enterovirussen kan gerelateerd zijn aan een hoger aantal riooloverstorten in de winter (meer neerslag).

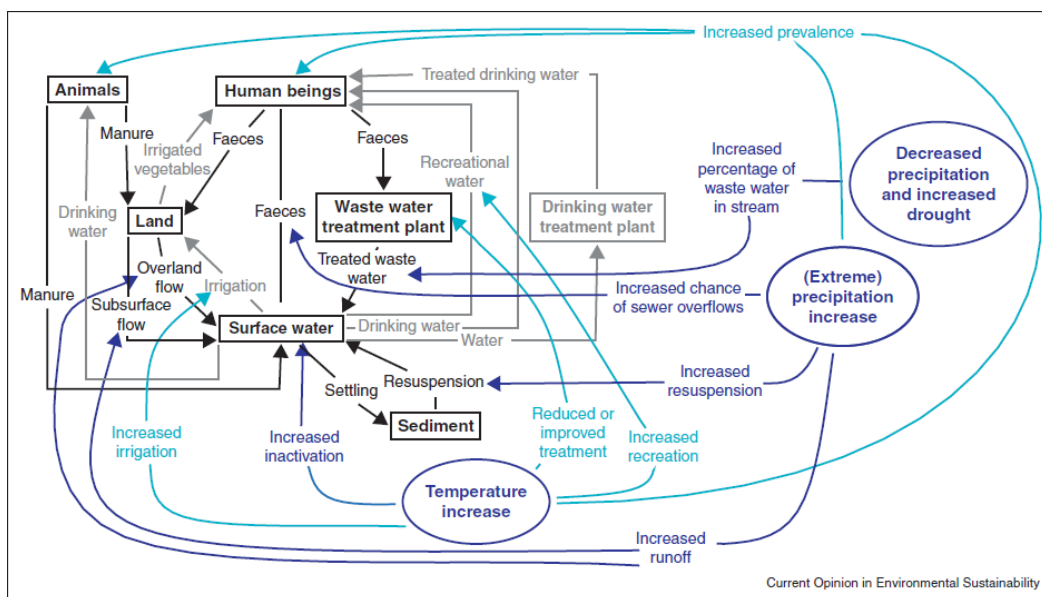
Een aantal fecale pathogenen kan zich onder gunstige omstandigheden vermenigvuldigen in het milieu. Cholera is hiervan het bekendste voorbeeld. Cholera komt op dit moment niet voor in Europa, en slechts enkele Europeanen lopen de ziekte in het buitenland op. In een recente studie (Shah, 2011) wordt een correlatie vastgesteld tussen klimaatverandering en cholera uitbraken, hoewel diverse wetenschappers over deze correlatie nog van mening verschillen. Cholera uitbraken vinden met name plaats tijdens warme zomermaanden; klimaatverandering kan mogelijk de intensiteit, duur en voorkomen van deze condities beïnvloeden (Semenza & Menne, 2009). Het is echter niet waarschijnlijk dat dit in Nederland zal leiden tot endemische cholera-gevallen.

6.5.4 Impact van klimaatverandering op aanwezigheid van pathogenen in oppervlaktewater

Figuur 6-4 toont een conceptueel model waarmee de invloed van klimaatverandering op de concentratie van pathogenen in oppervlaktewater inzichtelijk wordt gemaakt. Belangrijke drivers zijn de watertemperatuur en de neerslag.

Als door klimaatverandering de watertemperatuur stijgt kan dit meerdere effecten hebben. Door een hogere watertemperatuur neemt de inactivatie van fecale bacteriën, virussen en parasieten toe. Aan de andere kant, afhankelijk van hun groeicurve, kunnen opportunistische bacteriën sneller groeien in water met een hogere temperatuur (Schijven et al., 2005 en Hofstra, 2011). Een toename in de temperatuur (en veranderend klimaat in het algemeen) kan ook zorgen voor een verandering in de natuurlijke populatie: de soorten, de aantallen en het gedrag. Bijvoorbeeld andere vogelsoorten kunnen zich in ons land vestigen of als pleisterplaats gebruiken tijdens de trek. Deze kunnen andere ziektes bij zich dragen, ze in andere mate uitscheiden, op andere locaties en in hogere aantallen. Ook kunnen huidige

populaties hun gedrag veranderen, bijvoorbeeld een langere tijd doorbrengen in oppervlaktereservoirs. Dit kan een toename in fecaal materiaal betekenen (Ugarelli et al., 2011). Andere vogelsoorten kunnen andere zoönosen (mens-pathogene micro-organismen afkomstig van dieren) met zich meebrengen, of andere zoönosen kunnen opkomen als het gedrag van bestaande populaties verandert. Er kunnen meer pathogenen, andere pathogenen of bekende pathogenen met andere eigenschappen opkomen. De pathogenen kunnen persistenter worden in het milieu of minder goed verwijderd worden door de drinkwaterzuivering (resistentie tegen desinfectie met UV, ozon of chloordioxide). Ook kan de infectiviteit en de ziektelast hoger worden. Anderzijds kunnen ook juist gunstige effecten optreden, zoals minder ijsvorming waardoor watervogels niet meer zo snel naar de reservoirs voor drinkwater trekken. Het is niet bekend of nieuwe of veranderende zoönosen voor Nederland een bedreiging kunnen vormen.



Figuur 6-4. Concept model van de invloed van klimaatverandering op de concentratie van pathogenen in oppervlaktewater. Zwarte en grijze vierkanten representeren elementen waar pathogenen kunnen verblijven en waar sommige in staat zijn te reproduceren. De zwarte en grijze pijlen zijn de routes van de pathogenen van een element naar het volgende. Tijdens transport en verblijf in de lichamen kunnen de pathogenen worden geïnactiveerd. Blauwe cirkels zijn de verwachte veranderingen in klimaatvariabelen en de blauwe pijlen laten de verwachte veranderingen zien in de routes van de pathogenen. Grijze en lichtblauwe kleuren zijn in het artikel van Hofstra niet aan de orde gekomen, omdat de studie zich heeft gefocust op de concentratie van pathogenen in oppervlaktewater (Hofstra, 2011)

Een toename in neerslag en toename in extreme neerslag (ook in gebieden met een afname in jaarlijkse neerslag) kan de concentratie van pathogenen op verschillende manieren beïnvloeden. Een toename in extreme neerslag verhoogt het aantal riooloverstorten en bypasses of falen van afvalwaterzuiveringen waardoor er meer pathogenen in het oppervlaktewater terecht komen. Sommige studies geven aan dat bij ongewijzigd beleid deze bron kan verdubbelen in de komende 50 jaar (Ugarelli et al., 2011). De concentratie pathogenen kan echter lager zijn omdat het rioolwater sterk wordt verdund door regenwater in het riool en het ontvangende water. Dit is afhankelijk van de specifieke situatie. Ook afspoeling van mest en ander fecaal materiaal zal toenemen door een toename in neerslag en extreme neerslag, waarbij ook verdunning een rol speelt. Ten derde zorgt zware regenval voor hogere afvoeren (en stroomsnelheden) in waterlopen, wat leidt tot opwerveling van pathogenen in het sediment (Schijven & de Roda Huisman, 2005 en Hofstra, 2011).

Droogte kan de concentratie van pathogenen in oppervlaktewater verhogen (door minder verdunning met regenwater), maar de verblijftijd tussen lozing en inname wordt langer en de temperatuur waarschijnlijk hoger, dus worden er meer pathogenen geïnactiveerd (Schijven et al., 2011).

6.5.5 Risico van pathogenen voor de drinkwatervoorziening bij veranderend klimaat

Driejaarlijks wordt door middel van de analyse microbiologische veiligheid drinkwater (AMVD) bepaald of fecale pathogenen voldoende worden verwijderd bij bereiding van drinkwater uit oppervlaktewater (De Roda Husman & Medema, 2005). Hieruit blijkt doorgaans dat de Nederlandse systemen in de huidige situatie ruim voldoende presteren. In specifieke gevallen worden maatregelen genomen om de zuivering te verbeteren (Schijven & De Roda Husman, 2009). Meestal is er voldoende marge om een mogelijke toename van pathogenen in oppervlaktewater door klimaatverandering op te vangen. De analyse wordt iedere drie jaar uitgevoerd zodat tijdig kan worden gereageerd op eventuele trends. De zuiveringen zijn voldoende effectief om een eventuele toename van opportunistische pathogenen zodanig te reduceren dat er geen gevaar ontstaat voor de volksgezondheid (groei van opportunistische pathogenen in het leidingnet valt buiten deze studie).

Het is echter mogelijk dat de effectiviteit van de zuivering negatief wordt beïnvloed door veranderingen in waterkwaliteit door een samenspel van afspoeling, stroomsnelheid, temperatuur en droogte. Dit resulteert mogelijk in meer microbiologische activiteit (algengroei) in oppervlaktewaterreservoirs voor de drinkwatervoorziening (Ugarelli et al., 2011). De resulterende toename in organische stof (NOM) leidt dan tot een afname van de UV transmissie, waardoor UV desinfectie minder effectief is. Meer organische stof leidt ook tot een toename van het verbruik van desinfectiemiddelen (ozon, chloordioxide). Algen kunnen ook sedimentatie en filtratieprocessen verstoren. Zowel algen als opwerveling kunnen leiden tot een toename van de troebelheid, wat ook van invloed kan zijn op de effectiviteit van sedimentatie, filtratie, chemische desinfectie en UV desinfectie (Hijnen & Medema 2010). Deze effecten kunnen binnen een korte periode optreden (bijvoorbeeld bij algenbloei of extreme neerslag) zodat er weinig tijd is om adequaat te reageren.

6.6 Kennisvragen

6.6.1 Cyanobacteriën

Hoe veranderen de soortensamenstelling en dichtheden van cyanobacteriën in het ruwe water door klimaatverandering? Wat heeft dit voor gevolgen voor de aanwezigheid van toxines (type en concentratie) in het ruwe water en welke uitdagingen stelt dit aan de zuivering?

6.6.2 Pathogenen

Kan er een verhoogd risico ontstaan van zoonosen door veranderende populatie of gedrag van dieren (watervogels) die drager of versterker zijn van (nieuwe) pathogenen?

Kan verandering van waterkwaliteit door klimaatverandering de zuivering zodanig beïnvloeden dat deze onvoldoende pathogenen verwijdert? Voorbeelden zijn algenbloei (toename organische stof) en verhoogde troebelheid door opwerveling en afstroming.

6.7 Literatuur

Anoniem. 2013a. http://www.rivm.nl/Onderwerpen/Ziekten_Aandoeningen/L/Leptospirosen

Anoniem. 2013b. http://www.rivm.nl/Onderwerpen/Ziekten_Aandoeningen/B/Botulisme

De Roda Husman, A. M., en Medema, G.J. Inspectierichtlijn Analyse Microbiologische Veiligheid Drinkwater Artikelcode: 5318. VROM-inspectie, 2005

Doomen, A., de Hoogh, E. en Abrahamse, A. (2008) Cyanobacteria, climate change, and drinking water: Does current knowledge sufficiently support impact assessments? Rapport BTO 2008.002. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

- Hartskeerl, R. en Goris, M. 2008. Meer leptospirose in 2007. *Infectieziekten Bulletin* 19:301-302.
- Hijnen, W.A.M., en Medema, G.J. *Elimination of Micro-Organisms by Water Treatment Processes* KWR Water Cycle Research Institute Series. London: IWA Publishing, 2010.
- Hofstra, N. (2011) Quantifying the impact of climate change on enteric waterborne pathogen concentrations in surface water. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3:471-479
- Kardinaal, W.E.A. (2013) Cyanobacteriën: wat zit er in het ruwe water en hoe komen we ervan af. Rapport BTO 2013.016. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Kardinaal, W.E.A. en van der Wielen, P. (2011) Knelpuntanalyse Zwemwater. Rapport KWR 2011.044. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink (red.), 2009: Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's, KNMI, De Bilt.
- Kosten, S., Kardinaal, E., Faassen, E., Netten, J. en Lürling, M. (2011a) Klimaat & Waterkwaliteit. Klimaatinvloed op waterkwaliteit en het voorkomen van cyanobacteriële toxines. Rapport Kennis voor Klimaat / 043/ 2011, ISBN/EAN 9789490070489.
- Kosten, S., V. L. M. Huszar, E. Bécares, et al. (2011b). Warmer climate boosts cyanobacterial dominance in lakes. *Global Change Biology*. 18, 1: 118-126.
- Paerl, H.W. en Huisman, J. (2008) Blooms like it hot. *Science* Vol 320, 57-58.
- Medema, G.J., Ketelaars, H.A.M., Hoogenboezem, W. (2000). *Cryptosporidium en Giardia: voorkomen in rioolwater, mest en oppervlaktewater met zwem- en drinkwaterfunctie*. RIWA/RIVM/RIZA\Kiwaraapport. ISBN 9036953324.
- Schijven, J.F., Annema, J.A., de Nijs, A.C.M., Theunissen, J.J.H, Medema, G.J. (1995). Enterovirussen in het oppervlaktewater in Nederland – Emissie en verspreiding berekend met PROMISE en WATNAT – Pilotstudie. Rapport 289202023, RIVM, Bilthoven.
- Schijven, J., Bouwknegt, M., Rutjes, S. en de Roda Husman, A.M. (2011) Quantification of climate change impact on waterborne infection risks. 16th International Symposium on Health-Related Water Microbiology, WaterMicro 2011, September 18-23, Rotorua, New Zealand.
- Schijven, J. en de Roda Husman, A.M. (2005) Effect of climate changes on waterborne diseases in The Netherlands. *Water Science & Technology* 51, 5: 79-87.
- Schijven, J.F., and A.M. de Roda Husman. *Analyse Microbiologische Veiligheid Drinkwater. Ervaringen Dossierbehandeling 2006-7*. RIVM, Bilthoven, the Netherlands, 2009.
- Semenza, J.C. en Menne, B. (2009) Climate change and infectious diseases in Europe. *The Lancet* 9:365-375.
- Shah, S. (2011) Climate's strong fingerprint in global cholera outbreaks. *Yale environment* 360
http://e360.yale.edu/feature/climates_strong_fingerprint_in_global_cholera_outbreaks/2371/
- Smeets, P.W.M.H., Medema, G.J. en van Dijk, J.C. (2009) The Dutch Secret: how to provide safe drinking water without chlorine in the Netherlands. *Drink. Water. Eng. Sci.* 2: 1-14.
- STOWA, (2009) Blauwalgen: giftig groen. De biologie en risico's van cyanobacteriën. STOWA rapport 2009-43.
- Ugarelli, R., Leitão, J.P. do Céu Almeida, M. en Bruaset, S. (2011) Overview of climate change effects which may impact the urban water cycle. Rapport PREPARED 2011.011.
- Van der Wal, A., van Velzen, E. en Kardinaal, E. (2012) Effect van veranderingen in klimaat en ruimedruk op de microbiologische zwemwaterkwaliteit. *H2O* 16, 27-29.
- Vernooij, S., J. Ogier, M. Nederlof, C. Carpentier & W.E.A. Kardinaal (2011). "Cyanotoxines en Drinkwater", Rapport BTO 2011.115. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- WHO (2003) Cyanobacterial toxins: Microcystin-LR in drinking water. Background for development of WHO *Guidelines for Drinking-water Quality*. WHO, Geneva.
- WHO (2011) *Guidelines for drinking-water quality* – 4th edition ISBN 978 92 4 154815 1.

7 Microbiologische risico's van opwarming drinkwater door klimaatverandering

7.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Paul van der Wielen (KWR), op basis van bestaande literatuur en informatiebronnen.

7.2 Invloed van temperatuurstijging op groei in het drinkwater distributiesysteem

7.2.1 Introductie

De verwachting is dat klimaatverandering leidt tot hogere temperaturen en toename van het aantal zware regenbuien. Dergelijke weersveranderingen zouden mogelijk kunnen resulteren in verhoogde microbiologische risico's in relatie tot de drinkwatervoorziening. Deze risico's kunnen zich zowel voordoen in het ruwe water als in het drinkwater in het leidingnet.

- a) In het ruwe water: verhoogde kans op aanwezigheid van toxineproducerende micro-organismen zoals cyanobacteriën en pathogenen van fecale oorsprong (zie hoofdstuk 6).
- b) In het leidingnet: verhoogde groei van opportunistische ziekteverwekkers zoals *Legionella pneumophila*, nontuberculeuze mycobacteriën, *Pseudomonas aeruginosa* en *Aspergillus fumigatus*.

Omgevingscondities zoals hoeveelheid nutriënten, temperatuur, pH en verblijftijd bepalen de mate van groei en de samenstelling van de microbiële populaties in het drinkwater distributiesysteem. Temperatuurstijging van het drinkwater in het distributiesysteem heeft effect op: (i) de soortensamenstelling van de microbiële gemeenschap in het distributiesysteem, (ii) de wettelijke microbiologische kwaliteitsparameters en (iii) ziekteverwekkende micro-organismen die zich in het drinkwatermilieu kunnen vermeerderen (van der Kooij et al., 2009). De verandering van de soortensamenstelling van de microbiële gemeenschap in drinkwater door een temperatuurstijging zal in de meeste gevallen niet leiden tot problemen, omdat de meeste micro-organismen in drinkwater geen rol spelen bij de volksgezondheid, wettelijke microbiologische kwaliteitsparameters of esthetische aspecten (geur, smaak). De temperatuurstijging kan echter van invloed zijn op een aantal microbiologische parameters waarvoor maximumwaarden (kwaliteitseisen) zijn genoemd in het Waterleidingbesluit (zie paragraaf 7.2.2) en op groei van micro-organismen waarvan de aanwezigheid in drinkwater niet gewenst is om gezondheidskundige redenen (van der Kooij et al., 2009; zie paragraaf 7.2.3).

7.2.2 Wettelijke microbiologische waterkwaliteitsparameters

Het koloniegetal bij 22°C

Het koloniegetal bij 22°C (KG22) wordt bepaald op een voedselijk medium na kortdurende incubatie bij 22°C. Slechts een zeer kleine fractie van de in het water aanwezige bacteriën is in staat om onder deze condities kolonies te vormen. De wettelijke kwaliteitseis (geometrisch jaargemiddelde van KG22 in het distributiesysteem mag niet hoger zijn dan 100 kve/ml) is de afgelopen jaren in Nederland niet overschreden (van der Wielen & van der Kooij, 2011a). Metingen in de winter en zomer van 2010 hebben laten zien dat KG22 in de zomerperiode hoger is dan in de winterperiode, maar het geometrisch jaargemiddelde lag ook in dit onderzoek ver onder de kwaliteitseis (van der Wielen & van der Kooij, 2011b).

Aeromonas

Groei van *Aeromonas*-bacteriën in het distributiesysteem is een gevolg van de aanwezigheid van biofilm en sediment in de leidingen. Het koloniegetal van *Aeromonas* neemt meestal toe met toenemende verblijftijd in het distributiesysteem (Hiemstra, 1992). De wettelijke kwaliteitseis van *Aeromonas* (1000 kve/100 ml) wordt in de meeste voorzieningsgebieden niet overschreden (van der Wielen & van der Kooij, 2011a). In een beperkt aantal voorzieningsgebieden wordt de wettelijke kwaliteitseis echter meerdere malen per jaar overschreden. Een landelijk onderzoek naar het voorkomen van *Aeromonas* in het Nederlandse drinkwater heeft laten zien dat het aantal *Aeromonas* in drinkwater bereid uit oppervlakte ca 100 keer hoger is in de warme periode (juni t/m september) dan in de koude periode (januari t/m april) (Baggelaar et al., 1992). Een dergelijk temperatuursafhankelijk effect op groei van *Aeromonas* is ook in andere studies waargenomen (Burke et al., 1984; van der Wielen & van der Kooij, 2009).

Bacteriën van de coligroep

De bacteriën van de coligroep zijn in de wet opgenomen als bedrijfstechnische parameter (dus niet als indicator voor fecale verontreiniging). De wettelijke kwaliteitseis (1 kve/100 ml) wordt zelden overschreden in de Nederlandse voorzieningsgebieden. In 2007 werd deze norm bijvoorbeeld slechts in 0,01% van de metingen overschreden (van der Kooij et al. 2009). In Nederland wordt dus vrijwel geen nagroei van de bacteriën van de coligroep waargenomen, ook niet in de zomermaanden. In de Verenigde Staten is aangetoond dat bacteriën van de coligroep zich vermeerderen in het leidingnet bij temperaturen boven de 15°C met overschrijdingspercentages van 0,5 tot 0,9% (LeChevallier et al., 1996). Dit verschil tussen de VS en Nederland kan worden verklaard door de hoge mate van biologische stabiliteit van het drinkwater in Nederland in vergelijking met de VS. Zolang het Nederlandse drinkwater deze hoge mate van biologische stabiliteit behoudt, zal de temperatuur een ondergeschikte rol spelen bij de nagroei van bacteriën van de coligroep.

Legionellabacteriën

Bacteriën van de soort *Legionella pneumophila* kunnen een levensbedreigende longontsteking (legionellapneumonie) veroorzaken bij inademen van kleine druppeltjes water (aërosolen) met *L. pneumophila*. Door de grote uitbraak van legionellapneumonie in Bovenkarspel in 1999 is sinds 2004 een wettelijke kwaliteitseis voor legionellabacteriën opgenomen in het Drinkwaterbesluit. De kwaliteitseis voor legionellabacteriën (100 kve/l) is de wettelijke parameter die de laatste jaren percentueel het vaakst wordt overschreden in het drinkwaterdistributiesysteem (Versteegh en Dik, 2009; Versteegh en Dik, 2010; Versteegh en Dik, 2011). Het aantal legionellabacteriën in drinkwater wordt bepaald met een kweekmethode op een selectieve agarbodem. Slechts een deel van de legionellasoorten is in staat zich te vermeerderen op deze agarbodem (Wullings et al., 2005). In een onderzoek van 400 woninginstallaties werd in 4% legionellabacteriën aangetroffen (Oesterholt en van der Kooij, 2004). In alle gevallen ging het echter om groei van de soort *Legionella anisa*, die vrijwel ongevaarlijk is. *L. pneumophila*, die meer dan 95% van de gerapporteerde gevallen van legionellapneumonie in Nederland veroorzaakt (Versteegh et al., 2007), werd niet aangetroffen. *L. anisa* werd eveneens waargenomen in woninginstallaties waarbij als gevolg van de stadsverwarming opwarming van het koude water in de meterkast optrad tot ca. 25°C (Scheffer, 2004). Onderzoek met reïncultures van *L. anisa* en *L. pneumophila* heeft laten zien dat de opbrengst van *L. anisa* voornamelijk toeneemt in het temperatuurtraject van 20 tot 30°C, terwijl voor *L. pneumophila* de opbrengst voornamelijk toeneemt in het traject van 25 tot 35°C (van der Kooij et al., 2009b; van der Kooij et al., 2010).

7.2.3 Micro-organismen met een volksgezondheidskundige betekenis

Over het algemeen spelen de micro-organismen die zich weten te vermeerderen in het drinkwaterdistributiesysteem geen rol bij de volksgezondheid. Desondanks zijn een aantal ziekteverwekkende micro-organismen in staat zich te vermeerderen in drinkwater. Binnen

het BTO is daarom een literatuurstudie uitgevoerd met als doel te achterhalen welke ziekteverwekkende micro-organismen, bij opwarming van het leidingwater in Nederland, een mogelijk gezondheidsrisico vormen (van der Wielen & van der Kooij, 2009). Uit deze literatuurstudie bleek dat *L. pneumophila* de hoogste prioriteit heeft, gevolgd door nontuberculeuze mycobacteriën, *Pseudomonas aeruginosa*, *Aspergillus fumigatus* en *Stenotrophomonas maltophilia* (Figuur 7-1).

■ <i>Legionella pneumophila</i>	Very high
■ Non-tuberculous mycobacteria	
■ <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	High
■ Fungi / <i>Aspergillus fumigatus</i>	
■ <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	Moderate
■ <i>Acanthamoeba</i> spp	
■ <i>Burkholderia cepacia</i> complex	
■ <i>Burkholderia pseudomallei</i>	Low
■ <i>Chlamydia-like</i> bacteria	
■ <i>Aeromonas (hydrophila)</i>	
■ <i>Naegleria fowleri</i>	
■ <i>Actinobacter baumannii</i>	
■ <i>Afipia</i> spp.	
■ <i>Bosea</i> spp.	

Figuur 7-1. Prioriteit voor de verschillende opportunistische ziekteverwekkers in Nederland die in drinkwater kunnen groeien.

Legionella pneumophila

Hiervoor is al gesteld dat *L. pneumophila* verantwoordelijk is voor 95% van de gevallen van legionellapneumonie in Nederland. Per jaar worden in Nederland ongeveer 350 gevallen van legionellose gemeld. *L. pneumophila* wordt overgebracht door het inademen van kleine waterdruppels (aërosolen) en het is aangetoond dat drinkwater een transmissieroute kan zijn. *L. pneumophila* vermeerderd zich in protozoën (eencellige dierlijke organismen) die grazen op biofilms in drinkwaterinstallaties. Eind vorige eeuw is het effect van temperatuur op groei van *L. pneumophila* in drinkwater onderzocht en de resultaten van die studie toonden aan dat *L. pneumophila* langzaam groeide bij 25°C, terwijl snellere groei werd waargenomen bij 32, 35 en 37 °C (Wadowsky et al. 1985).

De afgelopen jaren is het effect van temperatuur op groei van *L. pneumophila* en *L. anisa* in natuurlijke drinkwaterbiofilms onderzocht als opdracht van het ministerie van VROM en binnen het BTO. Het doel van deze studie was om te achterhalen bij welke temperatuur de aantallen van *L. anisa* en/of *L. pneumophila* toenemen (van der Kooij et al., 2009b; van der Kooij et al., 2010; van der Kooij, 2013). De uitkomsten van deze onderzoeken laten zien dat bij drinkwatertemperaturen onder de 30°C de aantallen *L. pneumophila* zeer laag zijn ten opzichte van de aantallen *L. anisa*. Boven een drinkwatertemperatuur van 30°C zijn *L. pneumophila* en *L. anisa* in hoge aantallen aanwezig in de biofilm. Een watertemperatuur van ongeveer 30°C lijkt dus kritisch te zijn ten aanzien van groei van *L. pneumophila* in drinkwater distributiesystemen en/of drinkwaterinstallaties.

Non-tuberculeuze mycobacteriën (NTM), *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia*

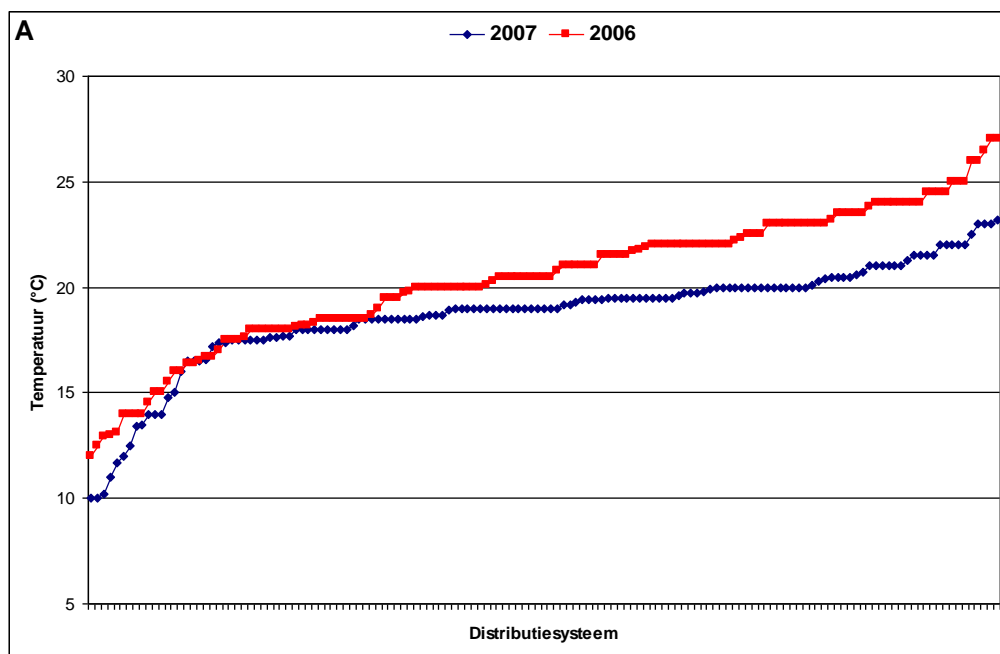
Non-tuberculeuze mycobacteriën, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia* veroorzaken ziekte bij mensen met een verzwakt immuunsysteem. Over het algemeen veroorzaken deze organismen longaandoeningen en worden ze overgedragen door het inademen van

aërosolen, hoewel *P. aeruginosa* en enkele NTM soorten ook huidinfecties veroorzaken. Omdat ziekten veroorzaakt door deze micro-organismen niet meldingsplichtig zijn in Nederland, is het aantal ziektegevallen in Nederland niet bekend. Daarnaast is de groei van deze micro-organismen in het drinkwatersysteem pas recent onderdeel geworden van het BTO-onderzoek, waardoor de factoren en condities die de groei van deze organismen in drinkwater beïnvloeden nog niet voldoende in kaart zijn gebracht. Momenteel wordt het effect van temperatuur op groei van *P. aeruginosa* en *A. fumigatus* in natuurlijke drinkwater biofilms onderzocht en de resultaten van dit BTO-onderzoek zullen eind 2013 beschikbaar zijn. Omdat deze opportunistische ziekteverwekkers in staat zijn te groeien bij de lichaamstemperatuur van mensen (37°C), is de verwachting dat hogere watertemperaturen hun groei in het drinkwater distributiesysteem bevorderen. Zo is voor *P. aeruginosa* bijvoorbeeld waargenomen dat de incidentie in drinkwater in landen met een warm klimaat (Togo, Israël) 25% hoger is dan in landen met een meer gematigd klimaat (landen in Midden-Europa; van der Wielen & van der Kooij, 2009).

7.3 Risico klimaatverandering op nagroeiproblemen in het drinkwater distributiesysteem

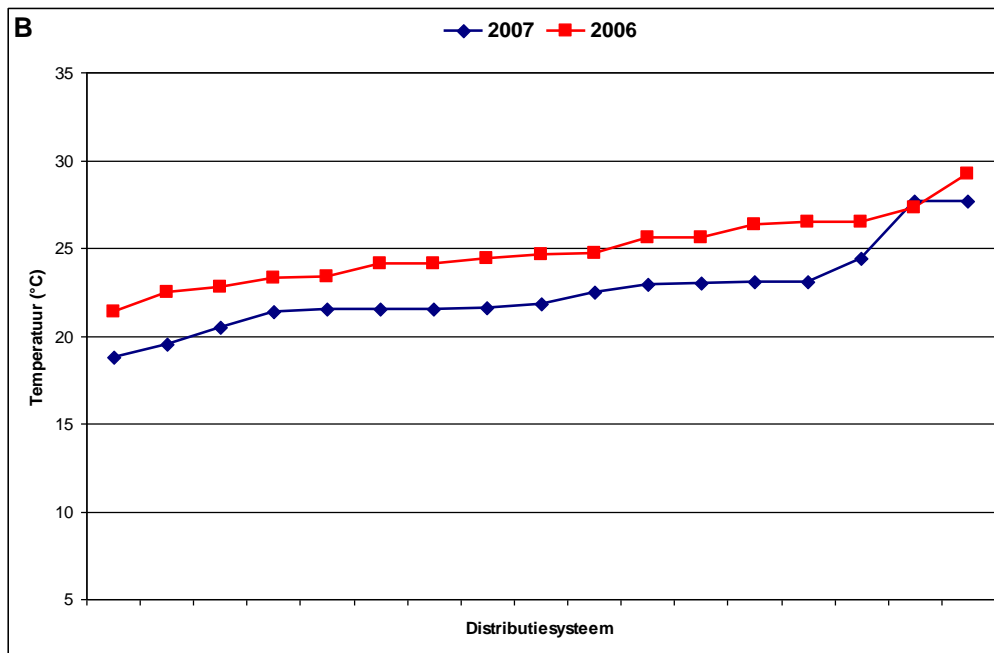
7.3.1 Watertemperatuur in het distributiesysteem

De temperatuur van het drinkwater bereid uit grondwater is bij het verlaten van het pompstation vrijwel altijd constant (ca. 8 tot 10°C). In het distributiesysteem treedt in de winter afkoeling op en in de zomer kan de drinkwatertemperatuur stijgen. In beide situaties zijn de temperatuurveranderingen afhankelijk van de buitentemperatuur, de verblijftijd van het water in het distributiesysteem en de ligging van het distributiesysteem (bodentype, diepte) (Blokker & Pieterse-Quirijns, 2013). De maximum temperatuur van het drinkwater in het distributiesysteem dat wordt gevoed met drinkwater bereid uit grondwater is in normale jaren vrijwel altijd beneden de 23°C (Figuur 7-2A; REWAB). In warme jaren zoals in 2006 kan de maximum temperatuur wel boven de 25°C uitkomen (Figuur 7-2A; REWAB), maar dat is bij slechts een beperkt aantal distributiesystemen het geval en maar een enkele keer per jaar.



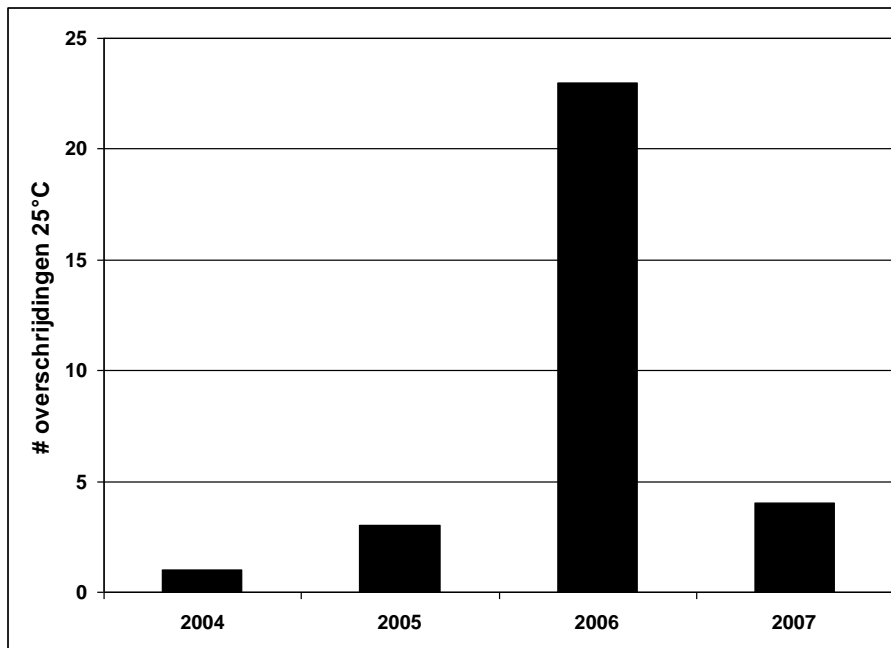
Figuur 7-2A. De maximum drinkwatertemperatuur in de Nederlandse distributiesystemen die worden gevoed met drinkwater bereid uit grondwater in een normaal jaar (2007) en een uitzonderlijk warm jaar (2006). De data zijn afkomstig uit de REWAB database. Elk streepje op de x-as representeert een Nederlands voorzieningsgebied/distributiesysteem zoals is opgenomen in de REWAB database.

De temperatuur van het drinkwater bereid uit oppervlaktewater varieert 'af pompstation' in de regel tussen ca 2°C in de winter tot ca 22°C in de zomer (van der Kooij et al., 2009). De drinkwatertemperatuur verandert tijdens transport in het distributiesysteem, waarbij in de winter in het algemeen opwarming plaatsvindt en in de zomer sprake kan zijn van enige afkoeling, maar lokale of tijdelijke opwarming kan eveneens optreden. In het jaar 2007 varieerde de maximale drinkwatertemperatuur in distributiesystemen die worden gevoed met drinkwater bereid uit oppervlaktewater tussen de 18 en 28°C (Figuur 7-2B; REWAB). In zeer warme jaren zoals 2006 is de maximale watertemperatuur iets hoger (Figuur 7-2B).



Figuur 7-2B. De maximum drinkwatertemperatuur in de Nederlandse distributiesystemen die worden gevoed met drinkwater bereid uit oppervlaktewater in een normaal jaar (2007) en een uitzonderlijk warm jaar (2006). De data zijn afkomstig uit de REWAB database. Elk streepje op de x-as representeert een Nederlands voorzieningsgebied/distributiesysteem zoals is opgenomen in de REWAB database.

In het Waterleidingbesluit is voor de temperatuur van het drinkwater op het punt van levering een maximum waarde van 25°C opgenomen. Micro-organismen reageren over het algemeen niet op momentane veranderingen van de temperatuur, behalve bij zeer grote veranderingen. Een overschrijding van de wettelijke kwaliteitseis voor de temperatuur heeft dus geen direct effect op de soortensamenstelling van micro-organismen in het drinkwater of op micro-organismen die betrokken zijn bij nagroei problemen. Pas wanneer de temperatuur voor een langere periode is verhoogd, treedt er microbiologische verandering in het drinkwater op. Van der Kooij et al. (2009) hebben daarom voorgesteld om een periode van ca vijf weken te hanteren, waarbij de temperatuur boven een bepaalde waarde moet zijn voordat de groei van micro-organismen wordt beïnvloed. De waarde van deze temperatuur is afhankelijk van het type nagroei probleem dat wordt beschouwd. Uit Figuur 7-2 volgt dat de maximale drinkwatertemperatuur boven de 25°C uit kan komen, maar over het algemeen zijn deze overschrijdingen incidenteel, zeker gezien het totaal aantal temperatuur waarnemingen in de Nederlandse voorzieningsgebieden (~20.000 per jaar). Een overschrijding van de wettelijke norm ten aanzien van de drinkwatertemperatuur betekent dus niet automatisch een verhoogd risico op problemen met nagroei; dit wordt mede bepaald door de duur van de overschrijding. In zeer warme jaren zoals 2006 komen overschrijdingen echter vaker voor, (Figuur 7-3; REWAB), en duren ze wellicht ook langer.



Figuur 7-3. Het aantal overschrijdingen van de wettelijke kwaliteitseis drinkwatertemperatuur (25°C) in de Nederlandse distributiesystemen in de periode 2004 t/m 2007.

7.3.2 Waarschijnlijkheid van nagroei

KG22

De wettelijke kwaliteitseis voor KG22 in het drinkwaterdistributiesysteem wordt momenteel nergens overschreden en het geometrisch jaargemiddelde is bij alle voorzieningsgebieden beduidend lager dan de wettelijke norm van 100 kve/ml. In het KNMI klimaatscenario G zal de luchttemperatuur in 2050 met ca 1°C zijn toegenomen en in 2100 met ca 2°C (Tabel 7-1).

Tabel 7-1. De verwachte gemiddelde zomertemperatuur en temperatuur van de warmste zomerdag onder KNMI klimaatscenario G en W+ (uit: van Minnen en Ligtoet, 2012).

Parameter	G	W+
2050		
Gemiddelde zomertemperatuur	+ 0,9°C	+ 2,8°C
Warmste zomerdag per jaar	+ 1,0°C	+ 3,8°C
2100		
Gemiddelde zomertemperatuur	+ 1,7°C	+ 5,6°C
Warmste zomerdag per jaar	+ 2,1°C	+ 7,6°C

Wanneer wordt aangenomen dat de drinkwatertemperatuur in dezelfde mate toeneemt als de luchttemperatuur, zullen de KG22-aantallen onder invloed van klimaatverandering toenemen. Naar verwachting zal deze toename beperkt zijn en niet leiden tot een

overschrijding van het de wettelijke kwaliteitseis voor KG22 in 2050 of 2100. In het klimaatscenario W+ zal de temperatuur ca 2,5 tot 3,0 °C zijn gestegen in 2050 en met ca 5 tot 6°C in 2100 (Tabel 7-1). De KG22-aantallen zullen met dit scenario nog verder toenemen, maar ook dan is de verwachting dat dit niet leidt tot een overschrijding van de wettelijke kwaliteitseis voor KG22.

Aeromonas

De wettelijke kwaliteitseis voor *Aeromonas* wordt thans jaarlijks bij een aantal voorzieningsgebieden overschreden. Onderzoek heeft laten zien dat de temperatuur een duidelijke invloed heeft op de aantallen *Aeromonas* in het gedistribueerde drinkwater, waarbij de aantallen lijken toe te nemen wanneer de temperatuur boven de 15°C uitkomt. Een temperatuurstijging van 1,0 tot 2,0 °C (scenario G) of van 2,5 tot 6 °C (scenario W+) zal daarom leiden tot het vaker overschrijden van de wettelijke kwaliteitseis van *Aeromonas*. Overschrijdingen zullen vaker binnen een distributiesysteem worden waargenomen, maar ook het aantal distributiesystemen met overschrijdingen zal toenemen.

Bacteriën van de coligroep

Een aantal bacteriesoorten behorende tot de bacteriën van de coligroep is in staat zich te vermeerderen in drinkwater. Deze bacteriesoorten hebben echter wel relatief hoge AOC-concentraties nodig om zich te vermeerderen en deze hoge AOC-concentraties komen over het algemeen niet voor in het Nederlandse drinkwater. Het is daarom niet te verwachten dat een toename van het aantal wettelijke overschrijdingen van de norm voor bacteriën van de coligroep zal optreden bij toenemende temperatuurstijging in het distributiesysteem.

Legionellabacteriën

De wettelijke kwaliteitseis voor legionellabacteriën in het gedistribueerde drinkwater wordt de afgelopen jaren relatief het vaakst overschreden van alle wettelijke parameters die zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit (Versteegh en Dik, 2010; Versteegh en Dik, 2011; Versteegh en Dik, 2012). Onderzoek heeft laten zien dat in het temperatuurstraject van 20 tot 30°C de ongevaarlijke legionellasoort *L. anisa* toeneemt, terwijl *L. pneumophila* pas toeneemt bij temperaturen van circa 30°C of hoger. Een temperatuurstijging van 1,0 tot 2,0 °C (klimaatscenario G) of van 2,5 tot 6 °C (klimaatscenario W+) zal daarom leiden tot verhoogde aantallen *L. anisa*, waardoor de wettelijke kwaliteitseis voor legionellabacteriën vaker wordt overschreden.

Legionella pneumophila

Groei van *L. pneumophila* in drinkwatergerelateerde biofilms is duidelijk gerelateerd aan de temperatuur, waarbij een temperatuur van circa 30°C kritisch lijkt te zijn voor groei van *L. pneumophila* in drinkwater distributiesystemen en drinkwater installaties. De temperatuur van het drinkwater komt met het huidige klimaat zelden boven de 25°C uit, waardoor *L. pneumophila* vrijwel nooit wordt waargenomen in het drinkwater distributiesysteem in Nederland. Het risico op groei van *L. pneumophila* in het drinkwater distributiesysteem met het huidige klimaat is dan ook zeer gering. Een temperatuurstijging van 1 tot 2°C in 2050 of 2100 (klimaatscenario G) zal niet leiden tot drinkwatertemperaturen die langere tijd rond de 30°C uitkomen in het distributiesysteem, waardoor de kans op groei van *L. pneumophila* in het distributiesysteem bij klimaatscenario G zeer gering zal blijven. In het klimaatscenario W+ zal de gemiddelde zomertemperatuur naar verwachting 2,8°C zijn gestegen in 2050. Een dergelijke temperatuurstijging zal ook niet leiden tot een drinkwatertemperatuur die voor langere tijd circa 30°C zal zijn, zodat de kans op groei van *L. pneumophila* ook in dat scenario zeer gering is. In 2100 zal de gemiddelde zomertemperatuur echter 5,6°C hoger zijn, waardoor de drinkwater temperatuur mogelijk voor langere tijd tussen de 25 en 30°C zal komen. In het scenario W+ is daardoor een geringe kans dat in 2100 *L. pneumophila* zich vaker weet te vermeerderen in het drinkwaterdistributiesysteem.

Non-tuberculeuze mycobacteriën (NTM), *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia*
De rol van drinkwatertemperatuur op de groei van NTM, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia* in drinkwater of drinkwatergerelateerde biofilms is tot dusverre niet onderzocht, waardoor het lastig is om uitspraken te doen over de kans dat deze micro-organismen in aantallen toenemen wanneer de drinkwatertemperatuur toeneemt. Voor *P. aeruginosa* en *A. fumigatus* wordt momenteel binnen het collectief BTO (themagroep Biologische Activiteit) onderzocht wat het effect van temperatuur is op groei van deze organismen in natuurlijke drinkwater biofilms. De resultaten van dit BTO-onderzoek worden eind 2013 verwacht, zodat eind 2013 beter onderbouwd kan worden aangegeven of hogere drinkwatertemperaturen de kans op groei van deze opportunistische ziekteverwekkers verhoogt. Met de huidige kennis wordt gesteld dat een toename van deze organismen kan worden verwacht bij hogere drinkwatertemperaturen, zoals die zullen optreden met klimaatscenario G en vooral W+.

7.3.3 Effecten

KG22, *Aeromonas* en bacteriën van de coligroep

Een overschrijding van de wettelijke norm voor KG22, *Aeromonas* of bacteriën van de coligroep heeft geen volksgezondheidskundige betekenis, waardoor het effect van een toename van het aantal wettelijke overschrijdingen minder groot is. Toch zijn overschrijdingen van de wettelijke norm voor KG22, *Aeromonas* of bacteriën van de coligroep ongewenst, omdat het leidt tot verhoogde meetinspanningen, discussie met de Inspectie van het Ministerie I&M en drinkwaterbedrijven daardoor minder vaak drinkwater met een onberispelijke kwaliteit kunnen leveren.

Legionellabacteriën

Wanneer *L. anisa* verantwoordelijk is voor een hoger aantal wettelijke overschrijdingen, dan heeft dat ook niet direct een duidelijke betekenis voor de volksgezondheid, omdat *L. anisa* alleen ziekte veroorzaakt bij mensen met een zeer verzwakt immuunsysteem. Desondanks zijn overschrijdingen van de wettelijke norm voor legionellabacteriën ongewenst, omdat het leidt tot verhoogde meetinspanningen, discussie over het effect op de volksgezondheid met de Inspectie van het Ministerie van I&M en RIVM en drinkwaterbedrijven daardoor minder vaak drinkwater met een onberispelijke kwaliteit kunnen leveren. Doordat een toename van overschrijdingen ook zal leiden tot discussie over de gevolgen voor de volksgezondheid, wordt het effect van een overschrijding van de wettelijke norm voor legionellabacteriën hoger ingeschaald dan het effect van een overschrijding van de wettelijke norm voor KG22, *Aeromonas* en bacteriën van de coligroep.

L. pneumophila

L. pneumophila is de belangrijkste veroorzaker van legionellapneumonie, een ziekte die dodelijk kan zijn voor patiënten. Groei van *L. pneumophila* in het distributiesysteem kan dus grote gevolgen hebben voor de volksgezondheid, hoewel de nuance moet worden geplaatst dat niet alle *L. pneumophila* stammen even virulent zijn en het ook mogelijk kan zijn dat stammen van *L. pneumophila* in drinkwater gaan groeien die niet of nauwelijks ziekte veroorzaken bij mensen. Zo komt *L. pneumophila* regelmatig voor in het drinkwater distributiesysteem op de Nederlandse Antillen (vanwege de hoge drinkwatertemperatuur) (Valster et al., 2011), maar is het aantal patiënten dat legionellapneumonie oploopt op de Nederlandse Antillen laag (pers. comm. Van der Kooij). Desondanks moet rekening worden gehouden met een hoger aantal patiënten met legionellapneumonie bij toenemende aantallen *L. pneumophila* in het distributiesysteem. Een tweede effect van verhoging van *L. pneumophila* in het distributiesysteem is dat het vertrouwen van de consument in drinkwater sterk afneemt en dat het imago van de drinkwaterbedrijven, als producenten van drinkwater met een onberispelijke kwaliteit, onherstelbaar wordt beschadigd. De effecten van hogere aantallen *L. pneumophila* in het drinkwaterdistributiesysteem zijn dus zeer ernstig.

Non-tuberculeuze mycobacteriën (NTM), *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia*

Het effect van een eventuele toename in aantallen NTM, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia* in het Nederlandse drinkwater is moeilijk te bepalen, omdat niet bekend is of drinkwaterstammen van deze micro-organismen ook verantwoordelijk zijn voor ziekte bij patiënten. Onderzoek met moleculaire methoden (zoals multilocus sequence based typing (MLST)) kan hier meer duidelijkheid over geven. Het belang van dergelijk onderzoek is ondertussen door KWR onderkend, waardoor in een verkennend onderzoek project binnen het BTO wordt onderzocht of de MLST methode kan worden toegepast voor de genotypering van drinkwaterstammen en patiëntstammen van *P. aeruginosa*. In andere landen is echter voor deze micro-organismen aangetoond dat drinkwaterstammen genotypisch overeenkomen met patiëntstammen (van der Wielen & van der Kooij, 2009). De verwachting is daarom dat een toename van deze micro-organismen in drinkwater zal leiden tot meer ziektegevallen. De effecten zullen echter minder groot zijn dan voor *L. pneumophila*, omdat de virulentie van deze micro-organismen beduidend lager is. Naast het effect op de volksgezondheid kan een verhoging van deze micro-organismen in drinkwater echter ook resulteren in verminderd consumentenvertrouwen en/of imagoschade voor de drinkwater bedrijven. De effecten van hogere aantallen NTM, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia* in het drinkwaterdistributiesysteem zijn dus nog moeilijk te kwantificeren, maar naar verwachting ernstig.

7.3.4 Schaalniveau

Onder invloed van de klimaatscenario's zal de opwarming van het distributiesysteem landelijk plaatsvinden, waardoor het schaalniveau van eventuele risico's beschreven in dit hoofdstuk landelijk zullen zijn. Toch zijn de effecten mogelijk groter bij productielocaties waar oppervlaktewater wordt gebruikt als grondstof, omdat de temperatuur van het oppervlaktewater (in tegenstelling tot grondwater) ook zal toenemen onder invloed van klimaatscenario's G en W+. Dit betekent dat het gedistribueerde drinkwater bereid uit oppervlaktewater vanaf het pompstation tot zekere afstand in het distributiesysteem een hogere temperatuur zal hebben. Voor drinkwater bereid uit grondwater geldt dat het reine water met een relatief lage temperatuur (~ 10 tot 12°C) het distributiesysteem instroomt en pas wordt opgewarmd in het distributiesysteem, waardoor de watertemperatuur pas op verdere afstand van het pompstation opgewarmd zal zijn tot relatief hoge waarden.

7.3.5 Risico's

Overschrijding wettelijke norm *Aeromonas*

De kans op een toename van de wettelijke overschrijding van *Aeromonas* is groot bij klimaatscenario G en zeer groot bij klimaatscenario W+, terwijl het effect van een wettelijke overschrijding matig is. Het risico op overschrijding van de wettelijke *Aeromonas* norm wordt daarom ingeschaald als matig tot groot (scenario G) of groot (scenario W+).

Tabel 7-2. Risico op overschrijding wettelijke kwaliteitseis *Aeromonas* onder het huidige klimaat en in 2050 en 2100 bij de klimaatscenario's G en W+

Risico	Huidig klimaat	G (2050)	G (2100)	W+ (2050)	W+ (2100)
Gering	X				
Matig		X	X		
Groot			X	X	X

Overschrijding wettelijke norm KG 22

De kans op een toename van de wettelijke overschrijding van KG22 bij het huidige klimaat en klimaatscenario's G en W+ is verwaarloosbaar klein, terwijl het effect van een wettelijke overschrijding matig is. Het risico (kans x effect) op overschrijding van de wettelijke norm voor KG22 wordt daarom in alle gevallen ingeschaald als zeer gering.

Overschrijding wettelijke norm bacteriën van de coligroep

De kans op een toename van de wettelijke overschrijding van bacteriën van de coligroep is bij het huidige klimaat en klimaatscenario's G en W+ verwaarloosbaar klein, terwijl het effect van een wettelijke overschrijding matig is. Het risico op overschrijding van de wettelijke norm van de bacteriën van de coligroep wordt daarom in alle gevallen ingeschaald als zeer gering.

Overschrijding wettelijke norm legionellabacteriën

De kans op een toename van de wettelijke overschrijding van legionellabacteriën onder klimaatscenario G is groot en bij klimaatscenario W+ zeer groot, terwijl het effect van een wettelijke overschrijding groot is. Het risico op overschrijding van de wettelijke norm KG22 wordt daarom ingeschaald als groot (scenario G) en groot tot zeer groot (scenario W+).

Tabel 7-3. Risico op overschrijding wettelijke kwaliteitseis legionellabacteriën bij het huidige klimaat en in 2050 en 2100 bij de klimaatscenario's G en W+

Risico	Huidig klimaat	G (2050)	G (2100)	W+ (2050)	W+ (2100)
Matig	X				
Groot		X	X	X	X
Zeer groot				X	X

Vermeerdering van *L. pneumophila* in drinkwater distributiesysteem

De kans op vermeerdering van *L. pneumophila* in het drinkwater distributiesysteem is onder klimaatscenario G verwaarloosbaar klein. Onder klimaatscenario W+ is dat ook het geval voor het jaar 2050, maar in het jaar 2100 bestaat er een geringe kans dat de temperatuur van het drinkwater zo ver is toegenomen dat *L. pneumophila* zich in het distributiesysteem weet te vermeerderen. Het effect van vermeerdering van *L. pneumophila* in het distributiesysteem is zeer groot. Het risico op vermeerdering van *L. pneumophila* in het distributiesysteem bij veranderd klimaat is dus over het algemeen zeer gering, alleen in 2100 bij klimaatscenario W+ wordt het risico ingeschaald op matig (Tabel 7-4).

Tabel 7-4. Risico van *L. pneumophila* in het drinkwater distributiesysteem met bij het huidige klimaat en in 2050 en 2100 bij de klimaatscenario's G en W+

Risico	Huidig klimaat	G (2050)	G (2100)	W+ (2050)	W+ (2100)
Zeer gering	X	X	X	X	
Matig					X

Non-tuberculeuze mycobacteriën, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia*

Zowel de kans op vermeerdering van opportunistische pathogenen zoals non-tuberculeuze mycobacteriën, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia* onder klimaatscenario's G en W+ in het drinkwaterdistributiesysteem als het effect hiervan op de volksgezondheid zijn vooralsnog niet duidelijk. Daarom kan er alleen een indicatief risico op vermeerdering van deze micro-organismen in het drinkwaterdistributiesysteem worden gegeven (Tabel 7-5).

Tabel 7-5. Risico van non-tuberculeuze mycobacteriën, *P. aeruginosa*, *A. fumigatus* en *S. maltophilia* in het drinkwater distributiesysteem bij het huidige klimaat en in 2050 en 2100 bij klimaatscenario's G en W+.

Risico	Huidig klimaat	G (2050)	G (2100)	W+ (2050)	W+ (2100)
Gering	X	X	X		
Matig				X	X

7.4 Onderzoeksvragen

Wat is de invloed van drinkwatertemperatuur op de vermeerdering van opportunistische pathogenen (non-tuberculeuze mycobacteriën, ziekteverwekkende schimmels, *P. aeruginosa* en *S. maltophilia*) in het drinkwater distributiesysteem?

Zijn drinkwaterstammen van opportunistische pathogenen genotypisch identiek aan patiëntstammen? Antwoord op deze vraag geeft duidelijkheid of het voorkomen van opportunistische pathogenen in drinkwater een probleem is voor de volksgezondheid.

Wat is de gezondheidskundige betekenis van een toename van legionellabacteriën (anders dan *L. pneumophila*) in het drinkwater distributiesysteem? Antwoord op deze vraag geeft duidelijkheid of de verwachte toename van legionellabacteriën (maar niet *L. pneumophila*) bij verdere opwarming ook een risico vormt voor de volksgezondheid.

7.5 Literatuur

- Baggelaar, P.K., Y.C. Drost, G. Nauta en D. van der Kooij, 1992. Landelijk overzicht van *Aeromonas*-bacteriën in drinkwater. In: *Aeromonas* in drinkwater: voorkomen, bestrijding en betekenis (ed. D. van der Kooij). Kiwa NV Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
- Blokker, E. J. M. and Pieterse-Quirijns, E. J., 2013. Modeling temperature in the drinking water distribution system. Journal - American Water Works Association, 105(1), E19-E29.
- Burke, V., J. Robinson, M. Gracey, D. Peterson en K. Partridge, 1984. Isolation of *Aeromonas hydrophila* from a metropolitan water supply: seasonal correlation with clinical isolates. Appl. Environ. Microbiol. 48(2):361-366.
- Hiemstra, P. 1992. Ervaringen met *Aeromonas*-bacteriën in drinkwater bereid uit grondwater. In: *Aeromonas* in drinkwater: voorkomen, bestrijding en betekenis (ed. D. van der Kooij). Kiwa NV Onderzoek en Advies, Nieuwegein.
- LeChevallier, M.W., N.J. Welch en D.B. Smith. 1996. Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. Appl. Environ. Microbiol. 62(7):2201-2211.
- Oesterholt, F. en D. van der Kooij. 2003. Legionella in woninginstallaties. H2O #4:19-20.
- Scheffer, W. 2004. Stadsverwarming jaagt temperatuur leidingwater op. Intech KS januari 2004:14-17.
- Valster, R.M., B.A. Wullings, R. van den Berg en D. van der Kooij. 2011. Relationships between free-living protozoa, cultivable *Legionella* spp., and water quality

- characteristics in three drinking water supplies in the Caribbean. *Appl. Environ. Microbiol.* 77(20):7321-7328.
- van der Kooij, D., B.A. Wullings en P.W.J.J. van der Wielen. 2009. Invloed van temperatuurstijging op nagroei van micro-organismen in het leidingnet. Rapportnummer KWR 09.052, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van der Kooij, D., A. Brouwer-Hanzens en H.R. Veenendaal. 2009b. Invloed van de watertemperatuur op de groei van *Legionella pneumophila* en *Legionella anisa* in biofilms. Rapportnummer KWR09.056, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van der Kooij, D., A. Brouwer-Hanzens en H.R. Veenendaal. 2010. Invloed van de temperatuur op de groei van *Legionella pneumophila* in een vloeibaar medium en in biofilms. Rapportnummer KWR 2010.057, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van der Kooij, D. 2013. Invloed van watertemperatuur en biofilmsamenstelling op de groei van *L. anisa* en *L. pneumophila* in drinkwatergerelateerde biofilms. In preparation.
- van der Wielen, P.W.J.J. en D. van der Kooij. 2009. Literatuurstudie naar opportunistisch ziekteverwekkende micro-organismen die zich in drinkwater kunnen vermeerderen. Eigenschappen en prioritering aanvullend onderzoek in relatie tot opwarming van het leidingwater. Rapportnummer BTO(s) 2009.001, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van der Wielen, P.W.J.J. en D. van der Kooij. 2009b. Invloed van watersamenstelling, afstand en seizoen op het ATP-gehalte in water en in sediment uit het leidingnet van zes pompstations. Rapportnummer BTO 2009.044, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van der Wielen, P.W.J.J. en D. van der Kooij. 2011 a. Inventarisatie van *Aeromonas* en koloniegetal 22°C in drinkwater en relaties met fysisch/chemische parameters. Rapportnummer BTO 2011.001, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- van der Wielen, P.W.J.J. en D. van der Kooij. 2011 b. Opportunistisch ziekteverwekkende micro-organismen in drinkwater. Rapportnummer BTO 2011.035, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Van Minnen, J. en W. Ligtoet. 2012. Effecten van klimaatverandering in Nederland: 2012. Rapportnummer 500193003, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- Versteegh, J.F.M., P.S. Brandsema, N.G.F.M. van der Aa, H.H.J. Dik en G.M. de Groot. 2007. Evaluatie legionellapreventie Waterleidingwater. Rapportnummer 703719020, RIVM, Bilthoven.
- Versteegh, J.F.M. en H.H.J Dik. 2010. De Kwaliteit van het drinkwater in Nederland in 2009. Rapportnummer 703719065, RIVM, Bilthoven.
- Versteegh, J.F.M. en H.H.J Dik. 2011. De Kwaliteit van het drinkwater in Nederland in 2010. Rapportnummer 703719081, RIVM, Bilthoven.
- Versteegh, J.F.M. en H.H.J Dik. 2012. De Kwaliteit van het drinkwater in Nederland in 2011. Rapportnummer 703719090, RIVM, Bilthoven.
- Wadowsky, R.M., R. Wolford, A.M. McNamara en R.B. Yee. 1985. Effect of temperature, pH and oxygen level on the multiplication of naturally occurring *Legionella pneumophila* in potable water. *Appl. Environ. Microbiol.* 49(5):1197-1205.
- Wullings, B., G. Wubbels en D. van der Kooij. 2005. Niet-kweekbare, nog niet beschreven legionellabacteriën algemeen aanwezig in drinkwater. *H2O* 25/25:43-46.

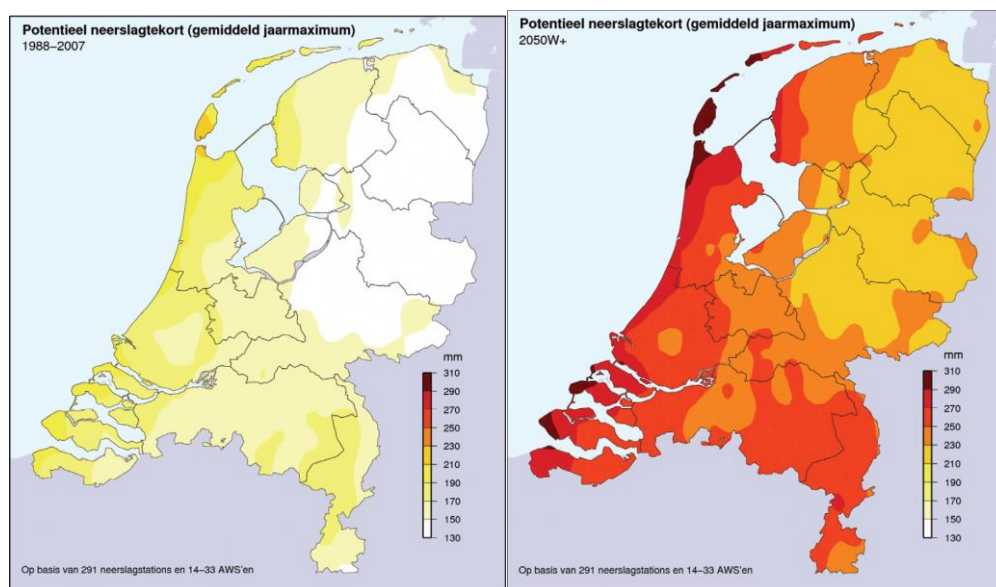
8 Kwetsbaarheid van het leidingnet voor klimaatverandering

8.1 Verantwoording

Dit hoofdstuk is geschreven door Bas Wols & Peter van Thienen (KWR), op basis van bestaande literatuur en informatiebronnen.

8.2 Effecten klimaatverandering op het leidingnet

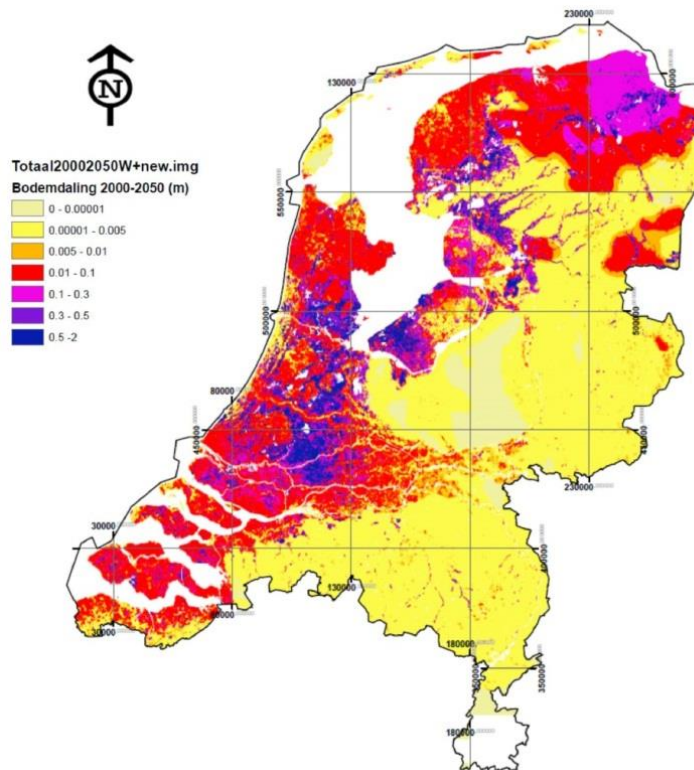
Veranderende neerslagpatronen door klimaatverandering kunnen leiden tot grotere bewegingen van de bodem, en daarmee hogere belastingen op en spanningen in de buizen van de waterinfrastructuur. Droogte is een belangrijk oorzaak voor de bodembewegingen. De droogte kan aanzienlijk toenemen in het W+ scenario (Figuur 8-1). Berekeningen van Deltares laten zien dat klimaatverandering kan resulteren in 10-20 cm additionele zetting in de veengebieden in Zuid- en Noord-Holland over de periode 2000-2050 (zie Figuur 8-2).



Figuur 8-1. Gemiddeld jaarmaximum van het potentieel neerslagtekort voor het huidige klimaat (links) en het W+ scenario (rechts), bron: KNMI (2009).

Daarnaast kan het veranderend neerslagpatroon leiden tot het periodiek opzwellen van kleigronden, met name als lange periodes van droogte opgevolgd worden door zeer natte periodes. Vanwege variaties in grondwaterstanden en bodemsamenstelling zullen deze bodembewegingen meestal ongelijkmatig verdeeld zijn langs de as van de leiding. Hierdoor ontstaat een belasting op de leiding. De spanning die vervolgens in het leidingmateriaal ontstaat is afhankelijk van de stijfheid van de grond, leiding en grootte van de zetting. Als de zetting te groot is kan de leiding uiteindelijk breken. Onderzoek aan drinkwaterleidingen in Canada, Australië en het Verenigd Koninkrijk laat zien dat in droge zomers het aantal leidingbreuken toeneemt (Hu and Hubble, 2007; Clayton et al. 2010; Gould et al., 2011), met name in bodems die sterk uitdrogen. In eerder onderzoek bij KWR is een model opgesteld om de spanningen in leidingen en kansen op leidingbreuk te berekenen als gevolg van bodembewegingen (Wols en Van Thienen, 2013a). Dit model is geïmplementeerd in een GIS

omgeving, waarmee een quick-scan gemaakt kan worden van de gevoeligheid van een leidingstelsel voor zettingen (van Daal en Wols, 2012).



Figuur 8-2: Additionele zetting door klimaatverandering in 2050 bij het W+ scenario, gebaseerd op verlaging grondwaterstand en hogere oxidatiesnelheid van het veen.

Een ander risico dat kan opspelen bij klimaatverandering is dat leidingen sneller breken bij hogere temperaturen (Wols en Van Thienen, 2014a). Bij hogere temperaturen neemt het waterverbruik toe en daarmee de interne belasting op de buis. Daarnaast kan een hogere bodemtemperatuur leiden tot thermische spanningen in de buis (Rajani and Tesfamariam, 2004).

Samengevat kunnen er drie typen risico's als gevolg van klimaatverandering voor de integriteit van het drinkwaterstelsel worden onderscheiden:

- a) Optreden van leidingbreuk door ongelijkmatige zettingen van de bodem.
- b) Optreden van leidingbreuk door opzwellen van kleigronden (bij overgang droog-nat).
- c) Optreden van leidingbreuk door temperatuursverhogingen (toenemende belastingen op de leiding).

De hogere temperaturen en veranderende neerslagpatronen die verwacht worden door klimaatverandering kunnen dus leiden tot een groter aantal leidingbreuken. Dit heeft tot gevolg dat het aantal leveringsonderbrekingen toeneemt (hogere OLM = ondermaatse leveringsminuten). Als de breuk niet tijdig wordt gesignaleerd leidt dit tot extra waterverliezen. Bij grote breuken kunnen ontgrondingskuilen ontstaan, die mogelijk tot schade leiden in de omgeving. Daarnaast moet de kapotte leiding gerepareerd worden. Bovendien kunnen leveringsonderbrekingen leiden tot imagoschade voor de desbetreffende waterbedrijven.

8.3 Kans op optreden van de effecten

Uit storingsgegevens geregistreerd in USTORE over de afgelopen 4 jaar blijkt dat voor ongeveer 13% van de storingen als oorzaak zetting wordt gegeven. In deze periode zijn echter geen zeer droge zomers voorgekomen. Volgens het KNMI (2009) komen warme en zeer droge zomers, zoals die van 2003, slechts eens in de 10 jaar voor in het huidige klimaat. In het W+ scenario (2050) kan dit volgens het KNMI verschuiven naar bijna ieder jaar; het jaar 2003 zou dan een gemiddelde zomer zijn. In het huidige klimaat wordt de kans op het optreden van leidingbreuk door zetting daarom ingeschat als matig: slechts eens in de 10 jaar komen dermate droge periodes voor dat regionaal meerdere leidingbreuken door zetting optreden. Eenzelfde kans wordt ingeschat voor het G scenario (2050), omdat hier weinig verandert in het neerslagpatroon. Voor het W+ scenario (2050) wordt een aanzienlijke toename van extreme droogtes en zettingen verwacht, zodat de kans op leidingbreuken wordt ingeschat als groot.

Uit storingsgegevens blijkt dat ongeveer 15% van de storingen plaatsvindt in kleigrond. Het is niet bekend welk gedeelte hiervan als oorzaak opzwellen heeft, maar de inschatting is dat dat klein is. Daarom wordt de kans op optreden van dit effect als gering ingeschat. De verwachte toename in droogte in het W+ scenario kan de kans wel vergroten naar matig. In het G scenario zal er weinig veranderen.

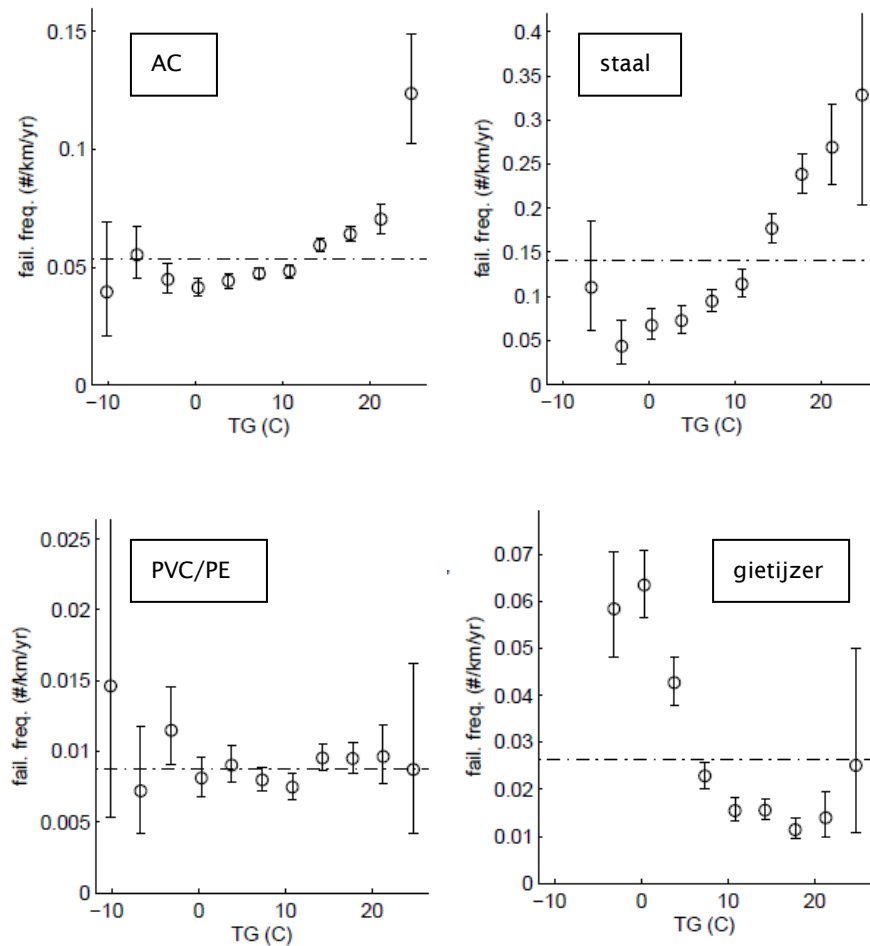
Berekening verwachte aantal storingen als gevolg van klimaatverandering

In Figuur 8-3 staat per materiaal de storingsfrequentie als functie van de gemiddelde dagtemperatuur, bepaald aan de hand van storingsdata over de jaren 2009-2012. Als de temperatuurverdeling over een jaar bekend is, en de totale lengte aan leidingmateriaal, kan een inschatting gemaakt worden van het verwachte aantal storingen. Temperatuurverdelingen voor toekomstige jaren bij verschillende klimaatscenario's kunnen via het KNMI verkregen worden (<http://climexp.knmi.nl/>).

Bijvoorbeeld in een bepaald jaar is gedurende 30 dagen de gemiddelde dagtemperatuur 16-17 graden. Hierbij hoort een storingsfrequentie van AC van 0.06 storing/km/ jaar. Als er 32500 km AC in de grond ligt, betekent dit dat er gedurende deze 30 dagen in totaal $0.06 \cdot 32500 \cdot (30/365) = 160$ storingen kunnen optreden. Door deze berekening te herhalen en te sommeren voor alle temperatuurklassen en leidingmaterialen kan een inschatting worden gemaakt het totaal aantal storingen in Nederland.

Analyse van de storingsgegevens in combinatie met weergegevens van het KNMI van de afgelopen 4 jaar toont aan dat asbest-cement (AC) en kleine stalen leidingen een sterke toename in storingen laten zien bij hogere temperaturen, terwijl gietijzeren leidingen het omgekeerde laten zien (hogere faalkansen bij vorst). PVC leidingen lijken ongevoelig voor de luchttemperatuur (Figuur 8-3; Wols en Van Thienen, 2014a). Uitgaande van deze temperatuurafhankelijke storingsgegevens en de verwachte temperatuurstijging door klimaatverandering, kan een grove inschatting gemaakt worden van de toename in storingen door klimaatverandering (Wols and Van Thienen, 2014a). Het huidige Nederlandse drinkwaterleidingnetwerk bestaat voornamelijk uit PVC+PE (67572 km), AC (32489 km) en gietijzer (13013 km) (gegevens uit 2010; Vewin, 2012). Momenteel is er voor deze drie materialen sprake van ca. 3300 storingen per jaar. Voor deze combinatie van materialen wordt een toename van 35 (1%) storingen verwacht voor het G scenario, en een toename van 330 (11%) in storingen voor het W+ scenario (zie kader). Let wel, deze toenames zijn geschat op basis van de storingsgegevens van de afgelopen 4 jaren. In deze jaren zijn geen extreme weersomstandigheden opgetreden (zoals extreme droogte of langdurige hittegolven), wat

mogelijk kan leiden tot een sterkere toename in storingen (met name bij het W+ scenario). Gezien de temperatuurafhankelijkheid zoals waargenomen in de afgelopen 4 jaar wordt de kans op optreden van leidingbreuk als gevolg van temperatuurstijging ingeschat als matig in het huidige klimaat. Voor het G scenario blijft dit gelijk, en voor het W+ scenario zal dit toenemen.



Figuur 8-3. Storingfrequenties waterleidingen als functie van de temperatuur voor AC, staal, PVC/PE en gietijzer (Wols en Van Thienen, 2014a).

8.4 Risico voor de drinkwatervoorziening

De toename in leidingbreuken door (verschil)zettingen zal met name optreden in klei en veengebieden. Deze gebieden zijn aanwezig in een groot gedeelte van west en noord Nederland (zie Figuur 8-2). Toename van de temperatuur kan voor alle AC en stalen leidingen in Nederland leiden tot verhoogde faalkansen (Figuur 8-3). De leidingbreuken zullen echter nooit tegelijkertijd in een groot gedeelte van Nederland optreden. De verwachting is dat hoogstens op regionaal niveau meerdere leidingen tegelijk kunnen breken tijdens periodes van hitte of extreme droogte.

De overlast van deze leidingbreuken is dus meestal beperkt: een klein gebied kan een korte tijd zonder water zitten totdat de breuk gerepareerd is. Daarna kan nog enige tijd een kookadvies gelden. Daarnaast kan door de leidingbreuk de grond eromheen uitspoelen, waardoor lokaal schade kan optreden (van Daal et al., 2011). Bij transportleidingen kan de

overlast groter zijn. De kans op breuk is bij deze leidingen echter kleiner, omdat deze meestal zwaarder gedimensioneerd zijn.

Voor de drie benoemde impacts (zettingen, opzwellen kleigronden, temperatuurverhoging) worden de effecten op de drinkwatervoorziening ingeschat op matig, omdat ze alle drie hoogstens overlast op lokale tot regionale schaal veroorzaken (uitgaande van een aantal leidingbreuken tegelijkertijd in een gebied als gevolg van extreem weer), terwijl de ernst van de overlast beperkt is.

Op basis van de inschatting van de kansen en effecten, zijn risicoschattingen opgesteld. De risico's bij het huidige klimaat en het G scenario worden als gering ingeschat, omdat de effecten beperkt zijn. De verwachting is dat alleen in het W+ scenario de risico's groter worden, omdat hogere temperaturen kunnen leiden tot een toename in leidingbreuken (landsbreed). Daarnaast kunnen de veranderende neerslagpatronen in het W+ scenario leiden tot het vaker voorkomen van extreme droogtes, afgewisseld met extreme regenbuien, zodat de kans op leidingbreuk als gevolg van zettingen of opzwellende kleigronden toeneemt.

8.5 Onderzoeksvragen

De volgende onderzoeksvragen zijn van belang:

- **Uitbreiding rekenmethodiek.** De huidige rekenmethodiek om faalkansen in leidingen te berekenen als gevolg van zetting is geldig voor continue leidingen zonder verbindingen. De rekenmethodiek kan verfijnd worden door het inpassen van verbindingen (wordt inmiddels aan gewerkt) en uitwerken van typische details (zadelpunten, T-splitsingen, etc.)
- **Validatie rekenmethodiek.** De rekenmethodiek is gebaseerd op vergelijkbare (gevalideerde) berekeningen voor spanningen in leidingen als gevolg van bodemdaling door tunnelbouw. Validatie met praktijkdata voor zettingen ontbreekt echter nog.
- **Hoe klimaatbestendig is PVC?** In de komende decennia zullen de leidingen meer en meer vervangen worden door PVC. Uit de huidige storingsdata blijkt voornamelijk dat PVC niet storingsgevoeliger wordt naarmate het ouder wordt. Dit is echter relatief jong materiaal. Wat gebeurt er als PVC verouderd? Is het dan nog steeds klimaatbestendig? Zo niet, zijn er alternatieven?
- **Regionale verschillen van storingen?** Klimaatverandering en de gevolgen hiervan, zoals droogte en zettingen, kunnen per regio verschillen in Nederland. Door gebruik te maken van gegevens van regionale weerstations kunnen mogelijk betere verbanden tussen weer en storing gevonden worden.
- **Analyse storingen met satellietdata?** Gebruik makend van satellietdata van zettingen (InSAR) of droogte (SMOS satelliet), in combinatie met ruimtelijke storingsdata, kan een nauwkeuriger verband gevonden worden tussen storingen en droogte/zetting.
- **Klimaatextremen opzoeken?** In de analyse van de storingsdata over de afgelopen 4 jaar zitten weinig weersextremen. Belangrijke klimaateffecten kunnen hierdoor over het hoofd gezien worden. Uitvoering van soortgelijke analyses voor andere langdurigere datasets (bijvoorbeeld uit het buitenland, waarin onze extremen wellicht meer de norm zijn) kan meer duidelijkheid scheppen.

8.6 Literatuur

- Clayton, C. R. I., M. Xu, et al. (2010). "Stresses in cast-iron pipes due to seasonal shrink-swell of clay soils." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management* 163(3): 157-162.
- Gould, S. J. F., F. A. Boulaire, et al. (2011). "Seasonal factors influencing the failure of buried water reticulation pipes." *Water Science and Technology* 63(11): 2692-2699.
- Hu, Y. and D. W. Hubble (2007). "Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34(5): 608-621.
- KNMI (2009). *Klimaat schetsboek Nederland: het huidige en toekomstige klimaat*, KNMI report 223, De Bilt.
- Rajani, B. and S. Tesfamariam (2004). "Uncoupled axial, flexural, and circumferential pipe-soil interaction analyses of partially supported jointed water mains." *Canadian Geotechnical Journal* 41(6): 997-1010.
- van Daal, K.H.A., Vogelaar, A.J., Mesman, G.A.M. (2011), *Inventarisatie risicovolle leidingen in een stedelijke omgeving – Koppeling rekenregels ontgrondingskuilen met GIS*. KWR Rapport BTO 2011.016, Nieuwegein.
- Van Daal, K. and B. A. Wols (2012). *Spanningsberekeningen voor leidingen als gevolg van grond-leiding interactie: modelimplementatie in GIS*. KWR rapport BTO 2012.242(s), Nieuwegein.
- Wols, B.A. and van Thienen P. (2013a), *Modelling the effect of climate change induced soil settling on drinking water distribution pipes, Computers and Geotechnics (under review)*
- Wols, B.A. and van Thienen P. (2014a), *Impact of weather conditions on pipe failure: a statistical analysis, Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA (under review)*.
- Wols, B.A. and van Thienen P. (2014b), *Impact of climate on pipe failure: predictions of failures for drinking water distribution systems, in preparation*.
- Vewin (2012). *Dutch drinking water statistics*. Association of Dutch Water Companies (Vewin), Den Haag.

9 Overstromingsrisico's van drinkwater infrastructuur bij huidig en toekomstig klimaat

9.1 Verantwoording

Deze studie is gebaseerd op bestaande literatuur, aangevuld met een enquête onder enkele drinkwaterbedrijven, overleg met de BTO-begeleidingsgroep en een risicobeoordeling door KWR-onderzoekers. De studie is uitgevoerd door Martin van der Schans, met bijdragen van Patrick Smeets en Ralph Beuken (KWR). Vanuit de waterbedrijven is Informatie aangeleverd door Arne Bosch (Waternet), Mark Elzerman (Vitens), Ate Oosterhof (Vitens), Alwin Hubeek (WML) en Heleen Westerink (Evides). Ook is informatie ingewonnen bij Henk van Hemert (STOWA) en Paul Neijenhuis (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden).

9.2 Aanleiding

Het klimaat in Nederland verandert. Door een stijgende zeespiegel en toenemende waterafvoer neemt de kans op overstromingen vanuit zee en de grote rivieren toe. En naar verwachting stijgt ook de kans op wateroverlast door intensere buien.

Bij een overstroming kan de drinkwatervoorziening stokken, bijvoorbeeld door besmetting van leidingwater of het uitvallen van pompstations. Drinkwaterbedrijven kunnen dit in hun directe reactie ondervangen met noodmaatregelen. Vervolgens moet ook een robuuste overgang naar een veiliger drinkwatervoorziening worden gegarandeerd. Dit kan kostbaar zijn, afhankelijk van de schade die is opgetreden.

De doelstelling van dit onderzoek is om de effecten van klimaatverandering op risico's van overstroming voor de drinkwatervoorziening te verkennen. Het onderzoek moet leiden tot gefundeerde aanbevelingen voor nader onderzoek.

Voor dit project is een beknopte literatuurstudie uitgevoerd. Bij de drinkwaterbedrijven is navraag gedaan naar de schade en herstel van enkele gedocumenteerde overstromingen in Nederland. Vervolgens is een kwalitatieve risicobeoordeling uitgevoerd. Deze beoordeling richtte zich op de huidige overstromingsrisico's en daaraan gerelateerde problemen voor de levering van drinkwater, en hoe deze risico's veranderen als gevolg van klimaatverandering. Op basis hiervan zijn de belangrijkste risico's en kennisleemten geïdentificeerd.

Paragraaf 9.3 behandelt het kader voor de analyse van overstromingsrisico's. Hierna volgt een beknopt overzicht van het beleidskader (paragraaf 9.4) en praktijkervaring met overstromingen op basis van bestaande literatuur (paragraaf 9.5). Dit vormt de basis voor de inventarisatie van huidige overstromingsrisico's – de nulsituatie – in paragraaf 9.6. Vervolgens worden in paragraaf 9.7 de effecten van klimaatveranderingen besproken. Tot slot worden conclusies getrokken over de klimaatrisico's en kennisleemten benoemd.

9.3 Kader voor de risicoanalyse

Voor dit onderzoek is gewerkt met een risico-benadering. De ongewenste gebeurtenis is een verstoring van de drinkwatervoorziening door overstromingen. Door klimaatverandering verandert de overstromingsfrequentie, met als gevolg een verhoogde kans op verstoring van de drinkwaterlevering. Om een toename van de overstromingskansen door klimaatverandering in perspectief te plaatsen, is er ook aandacht voor de gevolgen van

overstromingen en mogelijke maatregelen. Het kader voor de analyse wordt in deze paragraaf verder toegelicht.

9.3.1 Overstromingsscenario's

In dit onderzoek zijn vijf typen overstromingen beschouwd welke relevant zijn voor de drinkwatersector:

1. Overstroming van buitendijkse gebieden
2. Overstroming van een polder door het falen van een primaire waterkering.
3. Ondiepe inundatie door het falen van een regionale waterkering.
4. Wateroverlast door extreme neerslag ("water-op-sstraat")
5. Afstroming door extreme neerslag

Deze typering sluit aan bij het onderscheid dat de Nederlandse overheid maakt bij haar waterveiligheidsbeleid.

Daarnaast onderscheiden de typen overstromingen zich van elkaar door een afwijkende oorzaak, de kans op voorkomen en inundatiepatronen zoals waterdiepte en stroomsnelheid. Ieder type overstromingen brengt derhalve andere risico's voor de drinkwatervoorziening met zich mee, en wordt op een andere wijze beïnvloed door klimaatverandering.

9.3.2 Overstromingsrisico waterveiligheid

Het overstromingsrisico wordt in niet-drinkwater gerelateerde waterveiligheidsstudies vaak bepaald door de overstromingskans te vermenigvuldigen met de gevolgen van een overstroming (risico = kans x gevolg). De overstromingskans is uitgedrukt als kans per jaar en de gevolgen in zowel euro's schade als aantal slachtoffers door verdrinking. Onderstaande Figuur illustreert dat het risico zowel een economische component (euro's per jaar) als slachtofferrisico (aantal slachtoffers per jaar) kan omvatten (V&W 2007).

Dijkring	Economisch risico: overstromingskans maal de economische schade [miljoen €/jaar]	Gevolg: gemiddelde economische Schade* [miljoen €]	Gevolg: slachtoffers** [aantal]	Jaarlijkse overstromingskans
Noordoostpolder	2,1	1.900	5 - 1400	1/900
Zuid-Holland Land van Heusden/ De Maaskant	2,3	5.800	30 - 6100	1/2500
	37	3.700	5 - 800	>1/100

* De gemiddelde schade bij de verschillende overstromingsscenario's.
 ** De marge geeft de aantallen slachtoffers weer bij verschillende overstromingsscenario's en verschillende scenario's voor evacuatie.

Figuur 9-1. Risico's die zijn berekend voor drie dijkringen (Bron: Project Veiligheid Nederland in Kaart; VNK2).

9.3.3 Overstromingskansen drinkwatervoorziening

Voor dit onderzoek gaat het om de kans op een zodanige overstroming dat deze effecten heeft op de drinkwatervoorziening. Deze kans wordt niet alleen bepaald door de kans dat

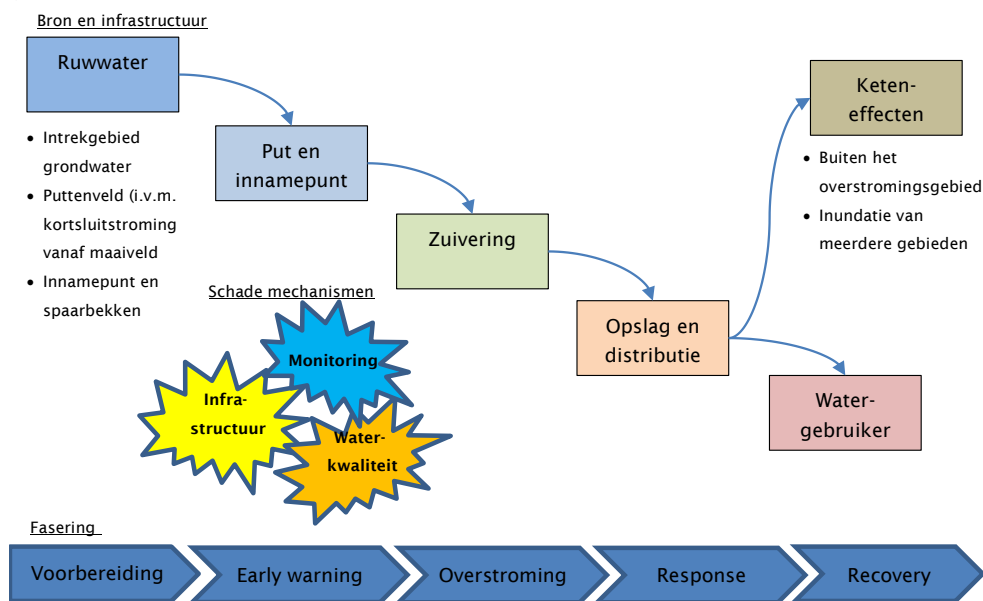
een gebied overstroomt (de overstromingskans) maar ook door de faalkans bij overstroming. Deze faalkans is op haar beurt weer afhankelijk van het inundatiepatroon en zal toenemen naarmate de inundatiediepte, stroomsnelheid en verontreinigingsgraad groter zijn. Maar de condities van de infrastructuur (gebouwen, leidingen, installaties), zoals drempelhoogte (passieve veiligheid), en de respons van het waterleidingbedrijf (actieve veiligheid) zijn ook van invloed op de faalkans.

9.3.4 Gevolgen van overstroming voor drinkwatervoorziening

De ernst van een overstroming wordt mede bepaald door de schademechanismen die optreden. Besmetting van ruw- of reinwater of het uitvallen van waterzuivering kan ertoe leiden dat leidingwater niet langer aan de normen van het drinkwaterbesluit voldoet en niet veilig is voor menselijke consumptie. Besmetting is met name riskant wanneer de monitoring ontregeld raakt of ontoereikend is voor extra besmettingsroutes die ontstaan door overstromingen van het distributiesysteem, waardoor verontreinigingen niet tijdig kunnen worden gedetecteerd. Daarnaast kan schade optreden aan de infrastructuur. Hierbij valt te denken aan het onderlopen van gebouwen, kortsluiting in elektrische circuits, opdrijven van installaties of leidingbreuken door eroderen van de bodem.

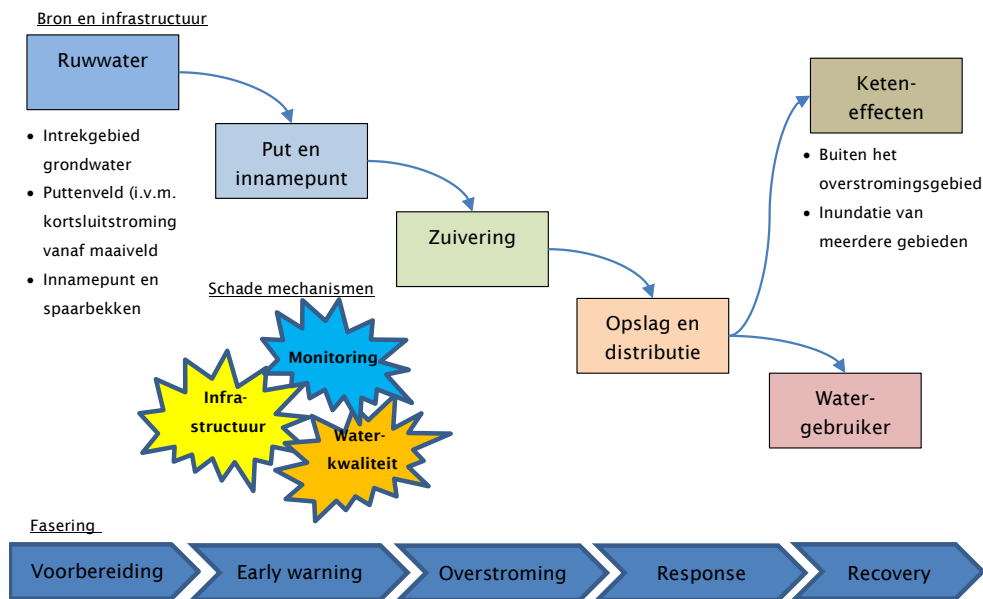
Schade, besmetting en ontregeling van de monitoring kan in de hele drinkwaterketen plaatsvinden

(



Figuur 9-2): van de kwaliteit van het ruwe water via de zuivering, opslag en distributie, levering aan de gebruiker tot aan keteneffecten buiten het overstroomde gebied.

De drinkwaterketen bepaalt hoe groot de omvang (blootstelling) van een overstroming is voor de drinkwatervoorziening. De blootgestelde populatie is afhankelijk van het voorzieningsgebied dat wordt bediend vanuit het punt waar de besmetting optreedt c.q. het voorzieningsgebied van de beschadigde drinkwater infrastructuur. Door keteneffecten kan de drinkwatervoorziening tot ver buiten het overstroomde gebied verstoord raken. Aan de andere kant kan door levering vanuit elders de drinkwatervoorziening in delen van overstroomde gebieden mogelijk juist intact blijven. Er is geen één op één relatie te leggen tussen de populatie die is blootgesteld aan besmet water en het geïnundeerde gebied. De andere schademechanismen, beschadiging van drinkwaterinfrastructuur en ontregeling van monitoring, vinden juist wel plaats in het ondergelopen gebied.



Figuur 9-2. Raamwerk voor beoordeling van overstromingen op de drinkwatervoorziening.

Dit onderzoek hanteert de volgende conceptuele vergelijking voor het in beeld brengen van het overstromingsrisico:

Risico = overstromingskans x faalkans bij overstroming x blootgestelde populatie x ernst / beheersmaatregelen

9.3.5 Fasering en beheersmaatregelen

Bij overstromingen speelt een keten van oorzaak gevolg relaties. Bijvoorbeeld: Hoge rivierafvoer → dijk bezwijkt → putten onder water → putschacht lekt → ruw water verontreinigd → zuivering niet ingericht op deze mate van verontreiniging → distributie verontreinigd drinkwater → humane consumptie verontreinigd water → mensen worden ziek. Ingrepen zijn op veel momenten mogelijk zoals: dijk verzwaren, zandzakken, winputten ophogen, pompstation uitzetten, tijdelijk chloren van drinkwater, kookadvies uitvaardigen.

De gevolgen en mogelijke beheersmaatregelen verschillen dus per fase. Drinkwaterbedrijven kunnen zich voorbereiden, bijvoorbeeld door aanpassingen te doen aan de infrastructuur of rampenplannen te oefenen met derden.

Bij een reële dreiging gaat de *early warning* fase in werking en komt de crisisorganisatie bijeen om zich voor te bereiden op een eventuele overstroming, als er nog voldoende tijd is.

Tijdens de overstroming komt het brongebied en / of de drinkwaterinfrastructuur onder water te staan waardoor deze mogelijk deels uitvalt. De vraag in het overstroomde gebied kan afnemen maar daarbuiten juist toenemen door toestroming van evacuees. Bedrijven kunnen in respons op de overstroming maatregelen nemen om de drinkwatervoorziening op gang te houden door bijvoorbeeld chloren van water of overschakelen op nooddrinkwater voorziening.

Tijdens de herstelfase (*recovery*) ligt de nadruk op het herstellen en weer veilig opstarten van de drinkwatervoorziening. Het effect op de installaties en leidingen kan groot zijn en dit moet worden hersteld. Ook moet duidelijk zijn of er kans is dat het drinkwater besmet is geraakt tijdens de overstroming.

Voor een uitgebreider overzicht van mogelijke preventieve- en beheersmaatregelen met betrekking tot putten wordt verwezen naar de rapportage "Flood Proof Wells" (Rambags et al., 2011). De hygiëncodes voor winning, zuivering, opslag en distributie van drinkwater geven richtlijnen voor het reinigen en opstarten van installaties die (mogelijk) besmet zijn.

9.3.6 Klimaatscenario's

Door het KNMI zijn in 2012 vier klimaatscenario's gedefinieerd: G-, G+, W- en W+. In deze studie worden het minst extreme G- scenario en het meest extreme W+ scenario beschouwd. Het G-scenario gaat uit van gematigde veranderingen. Bij W+ zijn de veranderingen groter door een hogere opwarming en verandering van de luchtcirculatie boven Noord-West Europa.

De analyse van de effecten van klimaatscenario's op het overstromingsrisico richt zich met name op de vraag hoe kansen op een overstroming veranderen door klimaatverandering. Een hogere overstromingskans leidt namelijk tot een hogere kans op verstoring. Daarnaast is er aandacht voor het verband tussen het overstromingspatroon en de gevolgen van een overstroming. Overstromingen met een grotere gebiedsomvang, stroomsnelheid en waterdiepte leiden over het algemeen tot een hogere faalkans, een grotere blootgestelde populatie en ernstiger schade. Dit verband is echter niet volledig één-op-één te leggen. Zo kan voor installaties met een groot aantal inwoners in het voorzieningsgebied een besmetting door een kleine overstroming ook al tot een grote blootstelling leiden.



Figuur 9-3. Raamwerk voor de beoordeling van klimateffecten op de drinkwatervoorziening.

9.4 Beleidsmatig kader

9.4.1 Wet- en regelgeving en organisatie van waterveiligheid

Sinds 2007 is de Europese Richtlijn Overstromingsrisico's van kracht die het kader vaststelt voor internationale samenwerking op het gebied van hoogwaterbescherming. Verder verplicht de richtlijn lidstaten tot het beoordelen van overstromingsrisico's en opstellen van risicobeheerplannen.

De Nederlandse overheid heeft voor alle primaire dijkringen veiligheidsnormen opgezet (bijlage II Waterwet). Voor regionale en overige waterkeringen zijn respectievelijk de Provincie en Waterschap bevoegd gezag. Hierbij geldt een zekere mate van beleidsvrijheid in het selecteren welke veiligheidsnormen opportuun zijn (bron: website Helpdesk Water). Voor wateroverlast zijn afspraken gemaakt tussen verschillende overheden in het Nationaal Bestuursakkoord Water.

Afhankelijk van de schaalgrootte ligt de regie voor respons op rampen zoals een overstroming bij burgemeester, veiligheidsregio of het ministerie van binnenlandse zaken. In de veiligheidsregio werken de verschillende hulpverleners samen aan het voorkomen en

bestrijden van rampen. Bijvoorbeeld door het opstellen van rampenplannen en gezamenlijk oefenen hoe te handelen bij rampensituaties.

9.4.2 Huidige methoden voor normering waterveiligheid

De veiligheidsnormen voor overstromingen zijn in de regel gebaseerd op de berekende economische gevolgschade en het aantal slachtoffers van een overstroming. Hierbij wordt gewerkt met HIS SSM (Highwater Information System – Damage and Casualties Module, Deltares 2007) en sinds kort voor kleine overstromingen de STOWA waterschadeschatter (Hoes *et al.* 2013). Probleem voor de drinkwatersector is dat drinkwatervoorzieningen niet expliciet zijn meegenomen in deze schadeberekeningen. Zo bleek bijvoorbeeld bij de normering van polder Loenderveen dat er geen rekening mee was gehouden dat Waternet op deze locatie water wint uit de Waterleidingplas. Hierdoor was een te lage veiligheidsklasse bepaald. Ook bleek het niet mogelijk om vast te stellen welk veiligheidsniveau de polder wel zou moeten hebben gegeven de aanwezige drinkwatervoorzieningen (Prinsen 2004). Op dit moment loopt een traject om de HIS SSM module te actualiseren (pers. med. Henk van Hemert, STOWA).

Conclusie: Drinkwaterinfrastructuur is (op dit moment) niet expliciet meegenomen in de risicoanalyse en daaraan gekoppelde veiligheidsnormen van waterkeringen.

9.4.3 Verstorings-risicoanalyses drinkwaterbesluit

Voor drinkwaterbedrijven geldt geen specifieke wetgeving hoe te handelen in geval van overstromingen. Maar via de Drinkwaterwet (artikel 37) zijn bedrijven verplicht om een leveringszekerheidsplan op te stellen. In artikel 47 en bijlage B van het Drinkwaterbesluit van 2011 wordt voorgeschreven hoe bedrijven de verstorings-risicoanalyse moeten uitvoeren. Overstromingen kunnen onderdeel uitmaken van de risicoanalyse. Alle bedrijven hebben hun leveringsplan inmiddels vastgesteld.

9.5 Quick scan praktijkervaring overstromingen en drinkwater

Sinds Nederland is begonnen met de aanleg van collectieve drinkwatervoorzieningen zijn diverse overstromingen opgetreden. Deze paragraaf concentreert zich op de beschikbare literatuur naar effecten op de drinkwatervoorziening van een beperkt aantal cases.

9.5.1 Illustraties van drinkwateraspecten bij overstromingen in Nederland

Watersnood 1953: Tijdens de ramp was in de overstroomde gebieden een groot gebrek aan drinkwater. Maar ook in Middelburg, dat hoger op het eiland Walcheren ligt en dus droog bleef, stakte de drinkwatervoorziening door inundatie van pompstations buiten de stad (Livius 2013). De ramp trof 20 waterleidingbedrijven. Voor tien bedrijven ging het om een betrekkelijk korte onderbreking van de waterlevering. Bij vier bedrijven raakte het leidingnet beschadigd: Rotterdam, Noordwest-Brabant, Tholen en Zeeuws-Vlaanderen. Naar Noord-Beveland werd een 500 m lange plastic buis als noodwaterleiding gelegd. Bewoners werden verder huis-aan-huis van nooddrinkwater voorzien (Anonymus, 2005).

Tuindorp 1960: In 1960 werd Tuindorp Oostzaan door verzakking van een dijk opgeschrikt door een overstroming. Circa 15.000 mensen werden uit hun huizen verdreven. De vermoedelijke aanleiding was een gesprongen waterleiding in de kade. Over gevolgschade voor de drinkwatervoorziening is niets bekend (Roos 2011, van Baaren 2010).



Figuur 9-4 zandzakken om een drinkwaterput te beschermen op pompstation Onnen, 1998 (Bron: WBG)



Figuur 9-5 Amsterdam, Tuindorp Oostzaan 1960, watersnood, (Bron: Stadsarchief Gemeente Amsterdam)

Itteren 1995: Het dorp Itteren is in 1995 geëvacueerd in verband met hoge waterpeilen op de Maas. Dit heeft tot maatschappelijke ontwrichting geleid. Maar voor de drinkwatervoorziening waren zover bekend geen maatregelen noodzakelijk.

Onnen 1998: De polder waarin de zuivering en puttenveld van pompstation Onnen liggen is in 1998 bewust zes weken onder water gezet als noodoverloop om inundatie van de stad Groningen te voorkomen. Het Waterschap was zich niet bewust dat er een pompstation in deze polder lag. Het waterleidingbedrijf was vooraf niet ingelicht en werd overvallen door het binnendringende water. De gevolgen van de overstroming zijn beperkt gebleven. Zo is de drinkwatervoorziening tijdelijk overgenomen door andere pompstations zonder grote consequenties voor de leveringszekerheid. De kelders van het pompstation zijn gedeeltelijk gevuld om schade door opdrijving te voorkomen. Een aantal putten is uit voorzorg uitgeschakeld i.v.m. risico op kortsluiting. Andere pompen zijn aangehouden om het ruwwaternet op druk te houden. Zo is voorkomen dat verontreinigingen het ruwwaternet instroomden. Verontreiniging van de bodem door afzetting van sediment is niet bemeaten maar zou vermoedelijk geen consequenties hebben aangezien de putten 50 – 100 m diep liggen en door kleilagen zijn afgeschermd. Nadat het water was gezakt zijn de putten bemonsterd en vervolgens weer in gebruik genomen (Leeuwis-Tolboom 2002). Inmiddels zijn preventieve maatregelen genomen door nieuwe putten en electriciteitskasten op terpjes te leggen en het zuiveringsstation te omdijken (Rambags et al., 2011).

Roosteren 2002, 2003, 2011: Het puttenveld van Roosteren (WML) ligt in de uiterwaarden van de Maas en is in het verleden enkele malen overstroomd. Er zijn meerdere preventieve maatregelen genomen zoals het aanleggen van putten op terpen boven de hoogst gemeten waterstand, waterdicht afsluiten van putten en peilbuizen om verontreiniging van de aquifer te voorkomen en het uit het veld verwijderen van apparatuur die verontreinigd kan raken of niet waterbestendig is. Het Operationeel Beheerplan voorziet in veiligheidsprocedures als de verwijderingscapaciteit voor protozoa afneemt door oplopende rivierwaterstanden en kortere bodempassage. De waterkwaliteit wordt extra gemonitord en putten die onder water lopen of dicht bij de rivier liggen worden uit productie genomen om kortsluitstroming naar de winning te voorkomen. De putten worden na de overstroming geruime tijd afgespuid en bemonsterd. Alleen in de ondiepe Maasputten is in het verleden een beperkte, kortdurende bacteriologische besmetting geconstateerd na overstromingen. Het winpakket is niet verontreinigd met Maaswater (DHV 2002; Rambags et al., 2011, pers. med. Alwin Hubeek).

Stortbuien 1995-2000: Door Lieverloo *et al* (2003) is onderzoek uitgevoerd naar microbiologische verontreiniging van drinkwater tijdens opslag, transport en distributie. Uit evaluatie van gerapporteerde verontreinigingsincidenten in de periode 1995 -2000 bleek dat er een (statistisch) verband bestaat met stortbuien (neerslagintensiteit > 7 mm/uur). Het is niet onwaarschijnlijk dat verontreinigingen in de omgeving van winputten en op de daken

van behandelingsystemen en reinwaterkelders bij stortbuien via lekkage binnendringen wat onder normale weersomstandigheden niet meetbaar optreedt. Ook uit andere literatuur is bekend dat extreme neerslag tot verontreiniging van drinkwater kan leiden.

Wilnis 2003: Dat de kwetsbaarheid van met name veenkaden niet onderschat moet worden, bleek in 2003 toen de dijk bij Wilnis het begaf als gevolg van uitdroging tijdens een zeer droge periode. Het dorp stond tijdelijk blank maar dit had verder geen gevolgen voor de drinkwatervoorziening. De meeste schade aan drinkwatervoorzieningen trad op in het hoger gelegen deel ten zuiden van de kadebreuk. Dit gebied liep niet onder maar door de plotselinge daling van het waterpeil in de boezem traden verzakkingen op en braken gas-, water- en elektriciteitsleidingen (Paul Neijenhuis, pers. Mededeling. Wikipedia - Kadebreuk Wilnis 2003).



Figuur 9-6 Overstroming van Wilnis door het falen van een veenkade in een droge periode in augustus 2003.

Achterhoek 2010: In 2010 zijn grote gebieden rondom Lichtenvoorde en Lochem onder water gelopen doordat de sloten na een hevige stortbui het overtollige hemelwater niet konden afvoeren en buiten hun oevers traden. Belangrijke oorzaak was de hoge neerslag van 100 mm in een groot gebied in combinatie met hydraulische weerstand door achterstallig maaibeheer in sloten. Opvallend is dat er grote inzet was van de brandweer en waterschap om het gebied droog te krijgen maar dat het drinkwaterbedrijf geen problemen heeft ervaren (bron: Vitens). Blijkbaar is de drinkwaterinfrastructuur in het gebied niet merkbaar beïnvloed geweest door deze overstroming.

9.5.2 Ervaringen in het buitenland

In de internationale literatuur zijn diverse gevallen beschreven van de invloed van overstromingen op de drinkwatervoorziening (Jackubicka et al 2010, Sinisi and Aergeerts 2010). Zo zijn in de jaren 2000 – 2009 in Europa 11 gevallen van watertekorten door overstromingsschade gerapporteerd en ook gevallen waarin mensen ziek werden door microbiologische besmetting (DWI 2012: 83). Hierna volgen twee voorbeelden ter illustratie van de mogelijk effecten op drinkwatervoorziening.

Walkerton (Canada) 2000: In Walkerton zijn 7 mensen gestorven en 2321 mensen ziek geworden door het drinken van verontreinigd drinkwater. Belangrijkste pathogenen waren *E. Coli*, *E157:H7* en *Campylobacter Jejuni*. De oorzaak is herleid tot een put die besmet was door het overstromen van een mestopslag waarna de verontreiniging sterk geconcentreerd in het ondiepe winpakket infiltreerde. De zeer lokale overstroming werd veroorzaakt door hevige neerslag. Opvallend aan deze casus is dat het waterleidingbedrijf, ondanks metingen die aantoonde dat het water besmet was, geen advies afgaf om water niet te drinken c.q. te koken. Bovendien was uit eerdere metingen van *E. Coli* al langer bekend dat de betreffende

put onveilig was. Enkele medewerkers van het bedrijf zijn dan ook vervolgd vanwege nalatigheid (O'Connor 2002).

Severn (Verenigd Koninkrijk) 2007: In juli 2007 traden grootschalige overstromingen op door het buiten de oevers treden van de Severn. Hierbij liep ook het innamepunt voor de drinkwaterbereiding bij Mythe onder water. Het Waterbedrijf WTW wist de schade aan het pompstation te beperken door elektrische installaties tijdig af te sluiten (voorkomen van kortsluiting) en de kelder te vullen (ter voorkoming van opdrijven). Ongeveer 140 000 huishoudens zaten tijdelijk zonder leidingwater en kregen drinkwater via mobiele noodvoorzieningen. Na de overstroming bleek het pompstation deels beschadigd en ondergelopen. Het pompstation was enkele dagen later weer operationeel na herstel van installaties, leegpompen en desinfecteren ter voorkoming van microbiologische besmetting. Enkele onderdelen van het pompstation zijn robuuster hersteld dan in de oorspronkelijke situatie als preventie tegen toekomstige overstromingen.

Omdat er geen directe verbinding mogelijk was met andere pompstations, was het leidingnet gedurende de overstroming niet onder druk te houden. Hierdoor was er een grote kans dat faecaal besmet omgevingswater het leidingnet instroomde. Het drinkwater is daarom tijdelijk extra gechlloreerd bij het opnieuw onder druk zetten van het leidingnet. Daarnaast zijn tijdens deze opstart 1500 watermonsters geanalyseerd. Severn Trent geeft in haar rapportage helaas niet aan welke analyses zijn uitgevoerd en hoeveel niet voldeden maar spreekt van "minimale waterkwaliteitsissues" (Severn Trent Water 2007).



Figuur 9-7 Ondergelopen pompstation, Mythe, Gloucestershire, VK, 2007 (bron: Sinisi and Aergeerts 2010)

9.5.3 Praktijkrichtlijnen om risico's voor drinkwater te beperken

Flood proof wells (Rambags et al., 2011): Door KWR is in het kader van het EU project Prepared een overzicht opgesteld hoe de drinkwaterleidingbedrijven de leveringszekerheid van een puttenveld tijdens overstromingen kunnen garanderen. Het document geeft richtlijnen voor de locatieselectie, inrichting van putinfrastructuur en beheersmaatregelen voorafgaand aan en gedurende de overstroming. Er is minder aandacht voor de herstelfase. De maatregelen zijn deels gebaseerd op praktijkervaring bij overstromingen en deels op basis van een theoretische beschouwing van mogelijke blootstellingen van putten.

VEWIN/DHV, aanwijzing noodoverloopgebieden (2002): Na de bijna-overstromingen van de grote rivieren in 1993 en 1995 zijn plannen gemaakt om de overstromingsrisico's voor dichtbevolkte gebieden te reduceren door de aanwijzing van noodoverloopgebieden. Hierop heeft VEWIN een onderzoek laten uitvoeren met aanbevelingen hoe rekening te houden met de drinkwatervoorziening bij de aanleg van noodoverloopgebieden. Aanwijzing van noodoverloopgebieden vergt aanzienlijke investeringen om de leveringszekerheid te garanderen en schade aan de drinkwater infrastructuur bij overstroming te voorkomen.

Uit de reacties van waterleidingmedewerkers die in het rapport zijn opgenomen valt op te maken dat met name elektrische installaties kwetsbaar worden bevonden. Verder is uitval van meerdere pompstations lastig op te vangen voor o.a. Brabant Water omdat de eigen distributienetten niet zijn verbonden met de distributienetten van collega waterbedrijven ten noorden van de grote rivieren.

Rampenplannen van overheid: Door Rijkswaterstaat zijn diverse overstromingsscenario's beschouwd en rampenplannen opgesteld. Wat opvalt is dat deze cases zich met name richten op de noodsituatie zelf. Zo is er op het gebied van drinkwater vaak alleen aandacht voor nooddrinkwatervoorziening met tankwagens (HKV Waterdienst 2008), of het bouwen van woningen met een nooddrinkwatervoorziening in de kelder (Grontmij 2011). Hoe de permanente drinkwatervoorziening na de ramp weer op gang te krijgen, komt veel minder aan bod. Een voorbeeld is het onderzoek naar terugkeer na overstromingen in Overijssel uitgevoerd door van den Braak (2006). In dit onderzoek worden ook termijnen genoemd voor het herstel van de drinkwatervoorziening via het leidingnet. Opvallend is dat het rapport de herstelfase beschrijft voor een aantal gevallen, waaronder Onnen (1998), maar zonder vermelding van de inundatie van het gelijknamige pompstation.

9.5.4 Resumé

Fysieke schade aan pompstations en innamepunten en besmetting van het ruwe (grond)water of soms zelfs het drinkwater zijn ernstige geconstateerde gevolgen van overstromingen.

Fysieke schade lijkt met name op te treden bij diepere overstromingen wanneer het water kracht heeft om installaties te beschadigen of kortsluiting in elektrische circuits veroorzaakt. Dit is een relevante onderscheid voor het bepalen van de gevolgen van de verschillende typen overstromingen. Leidingen liggen beschermd onder de grond maar kunnen ook beschadigen door verzakking zoals in het voorbeeld bij Wilnis (2003) of wanneer het water met hoge stroomsnelheden overstroomt en grond wegspoelt.

Besmetting kan optreden bij alle typen overstromingen die zijn benoemd in het kader voor de risicoanalyse, van diepe inundaties tot lokale stortbuien. Het besmettingsrisico betreft met name microbiologische besmetting die bovendien soms lastig te detecteren is (zie kader).

Intermezzo. Besmetting met pathogene micro-organismen en verborgen falen.

Besmettingen met pathogene micro-organismen zijn lastig op tijd te detecteren. Bovendien zijn toegepaste detectiemethoden onvoldoende gevoelig om het maximaal toelaatbare infectierisico van 10^{-4} per persoon per jaar voor drinkwater te garanderen (De Roda Husman & Medema 2005), zeker bij overstromingen. De monitoringsdichtheid is bij de zuivering groter dan in de rest van het leidingnet. Dit betekent dat bij een onverhoopte besmetting van het reine water met overstromingswater zgn. "verborgen falen" kan optreden.

Het onder druk houden van het leidingnet is een belangrijke manier om te voorkomen dat besmet water naar binnen lekt. Het risico op verborgen falen speelt dan ook met name in reinwaterkelders die niet onder druk staan. De overige delen van het distributienet worden onder druk gehouden en de drukken worden continue gemonitord zodat gebieden waar onderdruk optreedt kunnen worden "ingeblokt" en lokale kookadviezen uitgegeven. Het besmettingsrisico is beperkt omdat in Nederland in de leidingen een druk van minimaal 2 bar (20 meter) en meestal 5 bar wordt gehanteerd. Bij hoogteverschillen in het terrein bestaat een grotere kans op lage druk in de leiding. Maar in de overstromingsgevoelige gebieden van Nederland zijn de hoogteverschillen doorgaans beperkt.

Afgezien van de hiervoor genoemde praktijkvoorbeelden, is documentatie van effecten van overstromingen op de drinkwaterlevering over het algemeen beperkt. Mogelijk betekent dit dat de effecten vaak niet zo groot zijn dat zij tot een onderzoek leiden. Er is met name weinig informatie beschikbaar over metingen van de waterkwaliteit in het leidingnet tijdens en vlak na overstromingen. Dergelijke metingen worden of weinig uitgevoerd of worden niet gepubliceerd.

9.6 Huidige risico's van overstroming voor de drinkwatersector

Deze paragraaf beschouwt vijf typen overstromingen (overstromingsscenario's) welke relevant zijn voor de drinkwatersector:

1. Hoog water in buitendijkse gebieden
2. Overstroming van een polder door het falen van een primaire waterkering.
3. Ondiepe inundatie door het falen van een regionale waterkering.
4. Wateroverlast door extreme neerslag ("water-op-sstraat")
5. Afstroming door extreme neerslag

Per overstromingsscenario worden achtereenvolgens de kansen en gevolgen besproken. De resultaten zijn samengevat in Tabel 9-1. Hierbij wordt alleen gekeken naar de huidige situatie. De klimaateffecten komen in de volgende paragraaf aan bod.

Tabel 9-1. Overzicht van risico's voor verschillende typen overstromingen.

Type overstroming	Hoog water buitendijks	Falen primaire waterkering	Falen regionale waterkering	Extreme neerslag (water op straat)	Extreme neerslag (afstroming)
Overstromingskans	Max. 1:25 jaar	Max. 1:1250 jaar	Max. << 1:10 jaar*	Max. 1:10 jaar	Stortbui
Zwaarte overstroming (Inundatiepatroon)	Matig	zwaar	Matig	Licht	Heel licht
Mogelijke gevolgen:					
Infrastructuur (leveringszekerheid)	Installaties zijn 'overstromings-proof', anders grote schade	Grote schade, hoge kosten voor vervanging	Schade, herstelkosten	Geen schade	Geen schade
Besmetting (waterkwaliteit)	Mogelijk putten preventief buiten werking	Grote kans op besmetting	Matige kans op besmetting	Mogelijk besmetting	Mogelijk besmetting
Monitoring	Extra monitoring	Extra metingen nodig bij herstart levering	Extra metingen nodig bij herstart levering	Kans op verborgen falen	Kans op verborgen falen

(*)De genoemde 1:10 jaar betreft de maatgevende hoogwaterstand. De overstromingskans door het falen van van regionale keringen is in de praktijk veel kleiner.



9.6.1 Hoog water in buitendijks gebied

Door hoog water in de grote rivieren kan infrastructuur gelegen in buitendijkse gebieden onder water lopen. Een voorbeeld is de overstroming van het puttenveld van Roosteren. Het innamewerk van pompstation Heel ligt buitendijks en kan bij hoge waterstanden opdrijven wanneer niet tijdig maatregelen worden genomen. De winning Klotputten in Eindhoven ligt aan de Dommel, waar geen dijken zijn. Bij zeer hoog water kan het puttenveld onderlopen. Naast pompstation Roosteren, Klotputten en Heel zijn bij de auteurs van dit rapport geen buitendijkse waterwinningen bekend. Daarnaast liggen er ondergrondse distributieleidingen naar woningen in buitendijkse gebieden.

Overstromingskansen: Het pompstation Roosteren (WML) wordt gesloten bij Maaspeilen boven de NAP + 28,5 m (DHV 2002) wat neerkomt op een herhalingstijd van 25 jaar (bron: Rijkswaterstaat). De herhalingstijd van overstroming van andere buitendijkse drinkwaterinfrastructuur is in het kader van deze studie niet onderzocht.

Zwaarte overstroming en gevolgen: Rivieroverstromingen kunnen optreden na perioden van extreme neerslag in het stroomgebied van de grote rivieren, eventueel in combinatie met smelten van sneeuw in de Alpen. Dergelijke hoogwatergolven zijn één tot twee weken van tevoren voorspelbaar. Een overstroming uit zee kan het gevolg zijn van een combinatie van springtij met een zware storm uit het noord-westen.

Overstroming van buitendijkse gebieden leidt tot matig zware effecten. Het water komt geleidelijk en voorspelbaar opzetten. Waterdiepte en stroomsnelheden zullen per locatie verschillen maar kunnen groot zijn (diepte > 1 m; snelheid > 1 m/s). Het hoge water strekt zich uit over de hele lengte van de rivier.

In Nederland zal, bij dit type overstromingen, schade aan de infrastructuur niet snel optreden omdat deze is aangepast aan inundaties. De ondergrondse distributieleidingen worden niet kwetsbaar geacht bij een overstroming. Uitzondering vormt het innamepunt Heel dat kan opdrijven als de waterpeilen extreem hoog worden.

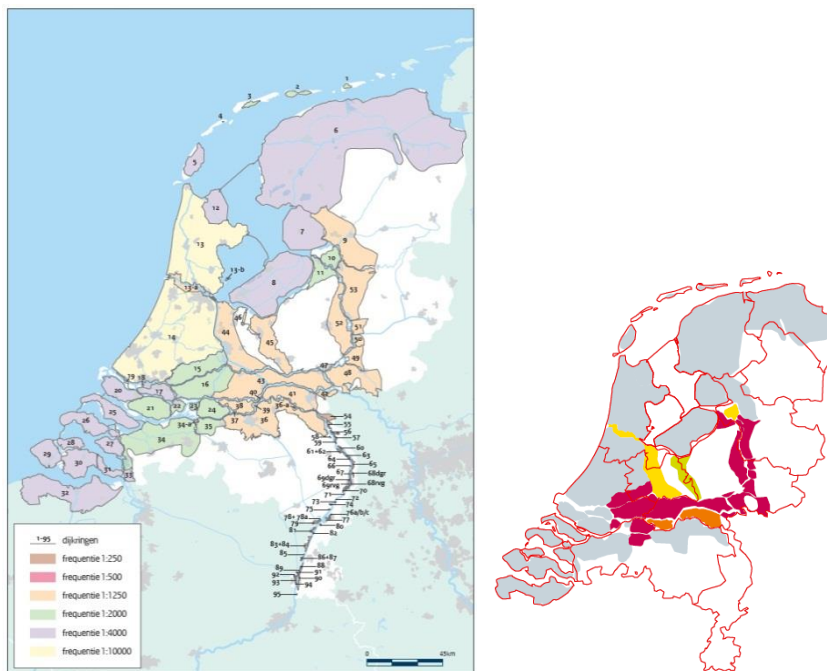
De mate van verontreiniging van het overstromingswater is groot, maar de faalkans, i.e. de kans dat besmet water het leidingnet ingaat wordt gering geacht omdat er draaiboeken klaarliggen hoe om te gaan met overstromingen. Bovendien heeft het personeel van deze winningen ervaring hoe om te gaan met dergelijke overstromingen. De potentiële blootstelling is gelijk aan het leveringsgebied van de buitendijkse winningen.

Voor Roosteren en Klotputten liggen draaiboeken klaar hoe de waterkwaliteit te monitoren bij een overstroming. Zolang er geen kortsluitstroming plaatsvindt blijft de monitoring voldoende betrouwbaar om pathogenen te detecteren. Anders is er een kans op verborgen falen.

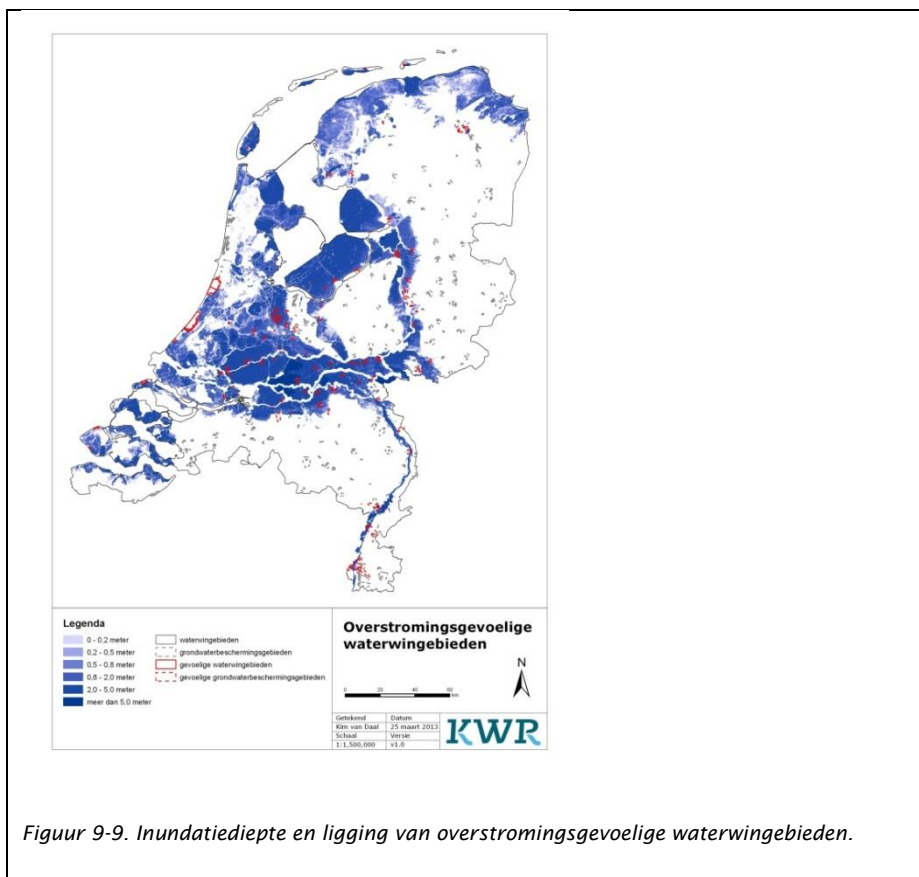
9.6.2 Diepe overstroming van een polder door het falen van een primaire waterkering

Overstromingen vanuit zee en vanuit de grote rivieren kunnen grootschalige inundatie van polders veroorzaken. In totaal liggen 74 grondwaterwinningen oftewel 31% van het totaal binnen een grondwaterbeschermingszone die gevoelig is voor dit type overstromingen. Een voorbeeld van dit type overstroming is de watersnoodramp uit 1953.

Overstromingskansen: Het falen van een primaire waterkering langs de zee, grote rivieren of IJsselmeer leidt tot diepe inundaties van de achterliggende polder(s). Dit heeft catastrofale maatschappelijke gevolgen. Om die reden hebben de primaire keringen een bij wet vastgelegde veiligheidsnorm die varieert van 1:1250 jaar in het rivierengebied tot 1:10.000 jaar in de Randstad.



Figuur 9-8 Veiligheidsnorm per dijkringgebied in Nederland (bron: Rijkswaterstaat). Op de rechterkaart is in oranje en rood aangegeven welke dijkringen momenteel niet aan de wettelijke veiligheidsnormen voldoen (bron: Janssen et al. 2006).



Figuur 9-9. Inundatiediepte en ligging van overstromingsgevoelige waterwingebieden.

Zwaarte overstroming en gevolgen: Met dit type overstromingen kunnen grote gebieden diep onder water komen te staan. Sommige van de in Figuur 9-8 weergegeven dijkringen omvatten enkele miljoenen inwoners en diverse drinkwaterinfrastructuren. De drinkwatervoorziening kan in het gehele leveringsgebied dat bij deze infrastructuur hoort, ontregeld raken. Overigens zal de watervraag binnen het overstroomde gebied sterk dalen, maar neemt de vraag aan de randen toe door toestroming van evacuees.

Bij doorbraak van een primaire waterkering treden vaak grote inundatiediepten op tot meer dan 5 m. De stroomsnelheden zijn groot, boven de 1 m/s, met name nabij de bres. De waterpeilen zullen sneller stijgen bij een overstroming uit zee dan vanuit een rivier omdat de toevoer van water vanuit zee bijna oneindig groot is. Hoewel het hoge water voorspelbaar is, is niet goed van tevoren te voorspellen of een dijk zal doorbreken.

Als gevolg van de grote inundatiediepte kan veel schade optreden aan de infrastructuur (fysieke schade, opdrijven van installaties, kortsluiting). Bij grote stroomsnelheden kunnen door erosie delen van installaties en het leidingnet wegslaan. In dat geval moeten de bovengrondse drinkwaterinstallaties en delen van het leidingnet volledig worden herbouwd.

Vaak zal het leidingwater besmet raken. Water kan de leidingen instromen door onderlopen van reinwaterkelders of door het drukloos worden van het distributienet.

Op de langere termijn zijn er risico's voor de kwaliteit van het gewonnen grondwater. Vaak treedt tijdens hoogwatersituaties een verslechtering op van de rivierwaterkwaliteit, bijvoorbeeld door het overstorten van de riolering en het overstromen van bedrijfsterreinen. De vrijkomende pathogenen en chemische stoffen zullen verdund in de bodem infiltreren. Dit risico geldt overigens ook voor het andere type overstromingen, zij het in mindere mate.

9.6.3 Inundatie van een polder door het falen van regionale waterkering

Het is niet bekend hoeveel winningen de kans lopen op inundatie door het falen van een regionale kering. Het gaat vermoedelijk globaal om dezelfde lage gebieden (en winningen) die ook gevoelig zijn voor het falen van een primaire waterkering. Voorbeelden van het falen van regionale waterkeringen die in paragraaf 9.4 zijn genoemd, zijn de dijkdoorbraak in Tuindorp (1960), de dijkdoorbraak bij Wilnis in 2003 en het (bewust) laten onderlopen van Pompstation Onnen in 1998.

Overstromingskansen: Regionale en overige waterkeringen zijn keringen die een regionaal of lokaal belang dienen. In de regel gelden er minder strenge veiligheidsnormen dan bij primaire keringen omdat de gevolgschade geringer is. De wettelijk gezien maximaal toelaatbare overschrijdingskans van maatgevend hoge waterstanden (MHW) varieert van 1:10 jaar als de schade gering is bij falen (<8 miljoen euro; geen slachtoffers) tot 1:1000 jaar bij grote schade (> 250 miljoen euro; wel slachtoffers). Overigens zijn de overstromingskansen in de praktijk veel kleiner dan de bovengenoemde overschrijdingskansen omdat er veiligheidsmarges zijn ingebouwd. Zo is een extra kruinhoogte aanwezig en zal een kering niet direct falen als er water overheen stroomt (cf. resultaten Ijkdijk). Uit de hiervoor genoemde voorbeelden van Tuindorp (1960) en Wilnis (2003) blijkt dat de sterkte van de regionale waterkeringen mogelijk meer maatgevend is voor de overstromingskans dan de hoogte.

Zwaarte overstroming en gevolgen: falen van een regionale waterkering leidt in de regel tot minder zware overstromingen dan het falen van een primaire kering. Het peilverschil tussen buitenwater en maaiveld is kleiner. Bovendien wordt na verloop van tijd de hoeveelheid water in (bemalen) boezems beperkend en zal geen water het gebied meer instromen. Dit leidt tot kleinere overstromingsdiepten. Daarnaast beschermt een regionale kering een minder groot gebied dan de primaire dijkringen.

De gevolgen voor de drinkwatersector zijn naar verwachting minder groot dan bij het falen van een primaire waterkering maar groter dan bij wateroverlast. Dit hangt natuurlijk ook af van de lokale situatie (stroomsnelheden, diepte, ligging drinkwaterinfrastructuur).

Vaak zal herstel nodig zijn van drinkwaterinstallaties zoals bij schade aan elektrische installaties en eventuele vervolgschade. Hierdoor kan de leveringszekerheid van het betrokken pompstation, zuivering of pomp in geding komen. In het voorbeeld van Wilnis moest door verzakking het leidingnet ook worden hersteld, maar dat zal bij dit type overstromingen meestal niet het geval zijn.

Bij overstroming van pompputten, zuiveringsstations en reinwaterkelders kan besmet water het ruwe of reine water besmetten. Vaak zal een deel van de bevolking in het getroffen gebied achterblijven waardoor een kookadvies nodig is, in ieder geval zolang geen levering vanuit niet-overstroomde gebieden plaatsvindt. Bij het weer opstarten van de levering vanuit overstroomde installaties is extra monitoring vereist voordat het kookadvies kan worden opgeheven omdat het verontreinigde water door het voorzieningsgebied verspreid kan zijn.

Intermezzo: inundatie van oppervlaktewaterwinnings.

In Nederland zijn een aantal locaties waar oppervlaktewater wordt ingenomen dat ofwel direct wordt gezuiverd of na een voorzuivering in de duinen wordt geïnfilterd: Andijk (IJsselmeer), Bethunepolder, Brabantse Biesbosch (Bergsche Maas), Brakel (Afgedamde Maas), Ouddorp en Haamstede (Haringvliet), Heel (Lateraalkanaal), Nieuwegein (Lekkanaal), Loenen (Amsterdam-Rijnkanaal), De Punt (Drentse Aa). De meeste infrastructuur van innamepunten ligt binnendijs, maar spaar- of procesbekkens kunnen ook buitendijs liggen. Alle in dit hoofdstuk genoemde type overstromingen kunnen dan ook optreden bij innamepunten.

Het veiligheidsniveau van een aantal innamepunten is in de praktijk beneden afgesproken normen. Zo heeft de Teskendam, die het bekken van pompstation Heel beschermt tegen verontreinigingen door Maaswater, in de praktijk een veiligheid van 1:500 jaar i.p.v. de afgesproken 1:1250 jaar (DHV 2002). Daarnaast voldoet het veiligheidsniveau van de Afsluitdijk, dat o.a. het innamepunt Andijk tegen zout water beschermt, niet aan de norm van 1:10.000 jaar (Rijksoverheid 2011).

Het overstromen van een groot innamepunt heeft verstrekkende keteneffecten in droge gebieden. Dit wordt in navolgende paragraaf geïllustreerd voor het innamepunt Andijk:

Overstroming van het IJsselmeer vanuit zee zal leiden tot uitval van de drinkwaterproductie van PWN, omdat de zuivering niet is ingericht op ontzilting. In dat geval kan de strategische reserve worden aangesproken (duinwater), maar dat zal leiden tot ecologische schade (verdroging). De andere optie is dat de drinkwatervoorziening van Noord-Holland geheel wordt overgenomen door Waternet. Dit is gedeeltelijk mogelijk gedurende een beperkte periode, maar de kans op falen van het systeem is relatief groot. Immers, dit impliceert een langdurige periode van maximale productie door Waternet en extreem hoge belasting van het distributienet, met grote kans op storingen en lekkages (Zwolsman 2008).

Het is dus belangrijk dat het leidingnet de noodlevering aankan. Drinkwaterbedrijven kunnen hiertoe overwegen om af en toe hun leidingen zwaarder te belasten om zwakke punten te vinden.

9.6.4 Wateroverlast door extreme neerslag

Bij extreme neerslag kan wateroverlast optreden als gevolg van het buiten de oevers treden van watergangen of door overbelasting van de riolering. Dit type overstromingen betreft o.a. de in paragraaf 9.4 genoemde voorbeelden van Walkerton (2000) en Achterhoek (2010).

Overstromingskansen: Voor overstromingen vanuit het oppervlaktewater is in het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) een herhalingstijd van maximaal 1:100 jaar afgesproken voor stedelijk gebied. In landelijke gebieden gelden veel minder strenge normen voor inundaties vanuit oppervlaktewater: 1:10 jaar voor grasland tot 1:50 jaar voor hoogwaardige land- en tuinbouw. Binnen de waterschapswereld is recent een discussie ontstaan of men bebouwing en bedrijven buiten de bebouwde kom als 1:10 jaar of 1:100 jaar moet normeren (Philips 2012). In wateroverlast studies zal geen onderscheid worden gemaakt voor installaties van drinkwaterbedrijven buiten de bebouwde kom; er gelden dezelfde overstromingsnormen als voor grasland. Voor water-op-sstraat door overbelasting van het riool geldt een herhalingstijd van maximaal 1:2 jaar.



Figuur 9-10. Voorbeeld van water op straat. (bron: Klopstra 2010)

Zwaarte overstroming en gevolgen: Wateroverlast door extreme neerslag is in de regel een lokaal verschijnsel. Bij het vollopen van de riolering gaat het vaak om enkele straten die onder water lopen. In enkele gevallen kan een heel beekstelsel de watergolf niet aan en overstromen één of meerdere dorpen enkele decimeters tot 1 meter onder water. Vaak is er extra marge doordat gebouwen (waaronder drinkwaterinstallaties) hoger liggen dan het staatsniveau (van Luitelaar, 2006).

De waterinfrastructuur zal over het algemeen geen schade ondervinden, mits kortsluiting in elektrische installaties in pomp- en opvoerstations kan worden voorkomen.

Zolang het leidingnet onder druk blijft kan er geen besmet water instromen. Maar wanneer een pompstation of reinwaterkelder onder water loopt heeft dit gevolgen voor de waterkwaliteit in het gehele voorzieningsgebied. Het voorbeeld van Walkerton laat zien dat overstroming van het intrekgebied ook tot besmetting kan leiden.

9.6.5 Instromend hemelwater door extreme neerslag

Door stortbuien kunnen (fecale) verontreinigingen in de omgeving van winputten en op de daken van zuiveringsinstallaties en reinwaterkelders via lekkage binnendringen, wat onder droge weersomstandigheden niet (meetbaar) het geval is. Uit een onderzoek uitgevoerd door van Lieverloo *et al* in 2003 blijkt een statistisch verband tussen stortbuien en besmettingsincidenten. Het verband is zowel gevonden voor buien met een intensiteit van > 3 mm/uur en >7 mm/uur. In de beschrijving van een aantal incidenten benoemen waterleidingbedrijven lekkages van daken, ontluchting etc. ook als (vermoedelijke) oorzaak van verontreinigingsincidenten, waarbij neerslagextremen soms als vermoedelijke medeoorzaak werd genoemd.

Ook verontreiniging van distributiereservoirs zou op deze wijze kunnen plaatsvinden. Daarnaast kan extreme of langdurige neerslag de hygiëne tijdens werkzaamheden aan transport- en distributieleidingen bemoeilijken.

Dit type overstromingen wordt, net als wateroverlast, veroorzaakt door extreme neerslag. Onderscheid is dat de problemen veroorzaakt worden door plasvorming of gebrekkige afvoer vanaf het terrein en installaties van het drinkwaterbedrijf en niet door het overstromen vanuit een watergang of rioolleiding. De verantwoordelijkheid voor het beheersen van de problemen ligt dus ook bij het drinkwaterbedrijf zelf en niet bij waterschap of gemeente.

Overstromingskansen: De kans op een stortbui met neerslagintensiteit van 7 mm/uur is bijna 5x per jaar (herhalingsstijd > 0,2 jaar). (Versteeg et al 2012). Voor stortbuien van 14 mm/uur geldt een herhalingsstijd van 1 jaar (Buishand en Wijngaard 2007).

Zwaarte overstroming en gevolgen: Extreme neerslag kan leiden tot besmetting van het leidingwater. De kans dat besmetting optreedt tijdens een stortbui lijkt gering aangezien het aantal geregistreerde besmettingsincidenten bij drinkwaterbedrijven veel geringer is dan de frequentie van extreme neerslag.

Schade aan infrastructuur ligt niet voor de hand bij dit type overstromingen, al zijn mogelijk wel aanpassingen aan de infrastructuur nodig om herhaling te voorkomen.

Intermezzo: effecten van hogere grondwaterstanden

In dit onderzoek is alleen gekeken naar overstromingsrisico's vanuit oppervlaktewater. Risico's door hogere grondwaterstanden, in het Engels ook wel aangeduid als *groundwater flooding*, zijn buiten beschouwing gelaten. Hogere grondwaterstanden kunnen echter wel degelijk gevolgen hebben voor de drinkwater infrastructuur. Zo kan bij een aantal pompstations de reinwaterkelder bij hoge grondwaterstanden opdrijven of besmet raken. Voorbeelden zijn pompstation Laren en Bremerberg waar het grondwater op peil gehouden wordt door respectievelijk een drainagesysteem en de winput zelf. Daarnaast kan door hogere waterstanden in de rivieren de kweldruk achter een dijk toenemen waardoor de kans toeneemt dat de afdekkende kleilaag opbarst en mogelijk ook leidingbreuken kunnen ontstaan. Door klimaatverandering kunnen de kansen op tijdelijk hogere grondwaterstanden en kweldruk toenemen.

9.6.6 Beheermaatregelen

Drinkwaterbedrijven en andere betrokkenen kunnen diverse maatregelen nemen om overstromingen te voorkomen of de gevolgen ervan te beperken. Hiervoor wordt verwezen naar de algemene aspecten van het leveringszekerheidsplan en de in paragraaf 9.2.5 genoemde beheersmaatregelen.

9.6.7 Resumé

Doorbraken van primaire keringen leiden tot zware overstromingen met hoge stroomsnelheid en dito inundatiediepten. Dit kan leiden tot microbiologische besmetting maar ook schade veroorzaken aan de infrastructuur waardoor helemaal geen water meer kan worden geleverd totdat de schade is hersteld.

Extreme neerslag leidt tot lichtere overstromingen. De kans dat gevolgschade optreedt door falen van de infrastructuur is beperkt. Wel is er gevaar voor de waterkwaliteit als besmet water de putten of reservoirs instroomt. Dit type overstroming wordt niet altijd tijdig opgemerkt waardoor besmettingsroutes kunnen optreden die de gangbare monitoringsystemen vaak niet goed kunnen detecteren (te lage frequentie; te hoge detectielimiet) om een besmettingskans van 10^{-4} per persoon per jaar te garanderen.

De omvang (blootstelling) kan bij elk overstromingsscenario groot zijn, namelijk het voorzieningsgebied van de besmette of beschadigde infrastructuur. Bij doorbraak van een primaire waterkering zal in de regel een groter gebied met meer installaties overstromen dan bij andere typen overstromingen, waardoor de gevolgen ook meerdere voorzieningsgebieden kunnen omvatten. Mogelijk zijn er ook nog cumulatieve effecten als meerdere winningen uitvallen bij levering uit andere gebieden.

De leveringsplannen voorzien in vervangende waterlevering en noodleveringsplannen bij uitval van één of meerdere pompstations. Het is de vraag of en hoe de levering in de praktijk kan doorgaan als er meerdere pompstations overstromen.

9.7 Invloed klimaatverandering op overstromingsrisico

9.7.1 Klimaatscenario's

Voor dit onderzoek zijn twee klimaatscenario's beschouwd: G en W+. Het G scenario gaat uit van gematigde veranderingen. Bij W+ zijn de veranderingen groter door sterkere opwarming en verandering van de atmosferische circulatie.

De verhoging van de temperatuur leidt tot een toename van het smeltwater en uitzetting van het aanwezige water. Volgens het KNMI stijgt de zeespiegel deze eeuw met 35 tot 85 centimeter. Ook de stormen zijn heviger; zij stuwen het zeeniveau extra op en slaan hogere golven verder over de zeeweringen. Bovendien krijgen rivieren, door toename van neerslag in de winter, te maken met hoge piekafvoeren. En door intensere buien in de zomer komt wateroverlast veel vaker voor (PBL 2012).

9.7.2 Hoog water in buitendijkse gebieden

Toename overstromingskansen: Hoewel er tot op heden geen trendmatige veranderingen zijn waargenomen in de rivierafvoer zal de piekafvoer in de toekomst naar alle verwachting wel toenemen. Dit komt met name door een toename van de neerslag en aanvoer van smeltwater door opwarming in het voorjaar. Onder het G scenario zou de maximale afvoer van de Rijn tot het jaar 2100 kunnen stijgen van 16.000 tot 18.500 kubieke meter per seconde, en onder het meest extreme W+ scenario tot zelfs 21.500 kubieke meter per seconde (PBL 2012).

Voor de Maas zijn de verwachte veranderingen van de piekafvoeren kleiner. Een afvoer die eens in de 1.250 jaar op de Maas voorkomt, ligt nu op 4.100 kubieke meter per seconde. Tot 2100 kan dit toenemen tot 4.250 kubieke meter per seconde in het G scenario en tot 4.850 kubieke meter per seconde in het W+ scenario (PBL 2012).

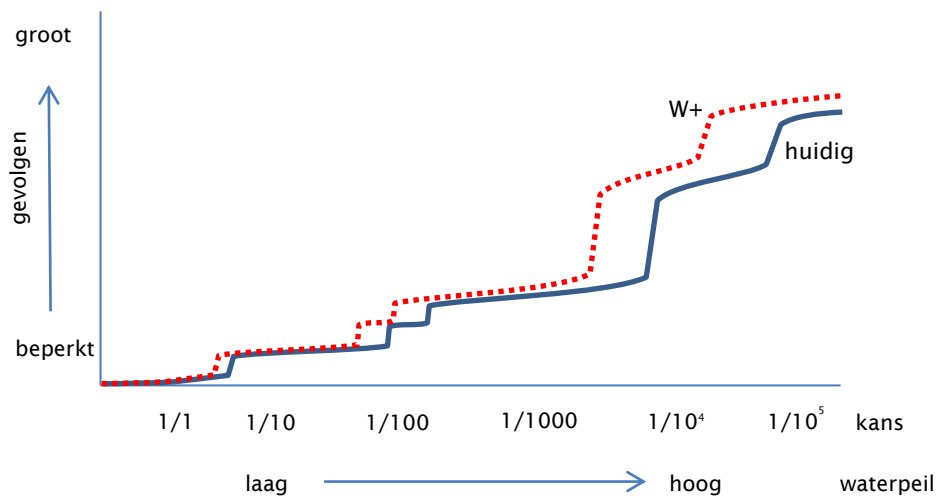
De hoeveelheid water die Nederland bereikt wordt mede bepaald door het waterbeheer in Duitsland en België. Wanneer deze landen hun dijken ophogen zal de maatgevende afvoer in Nederland verder toenemen en daarmee ook de frequentie dat buitendijkse gebieden inunderen (PBL 2012).

Gevolgen: De gevolgen van een overstroming met gegeven extreme waterstanden zijn ongeveer gelijk aan de huidige situatie. Zoals hierboven aangegeven neemt de kans dat dergelijke extreme waterstanden optreden wel toe.

Intermezzo: verband tussen overstromingskansen en gevolgen

Onderstaande figuur illustreert het verband tussen overstromingskansen en gevolgen bij klimaatverandering. Voor alle typen overstromingen geldt dat de levering faalt wanneer het waterpeil boven een bepaalde drempelwaarde uitstijgt en besmetting of schade aan de infrastructuur optreedt. De mate waarin de drempelwaarde wordt overschreden doet er dan verder weinig meer toe, totdat de drempelwaarde van een ander systeemonderdeel of

voorzieningsgebied wordt overschreden. Door maatregelen te nemen zoals het verhogen van dijken wordt de overstromingskans gereduceerd. Onderstaande figuur illustreert dat de gevolgen van alle typen overstromingen vaak stapsgewijs toenemen.



Figuur 9-11. Illustratie dat het gevolg van overstroming voor de drinkwatervoorziening stapsgewijs toeneemt bij het overschrijden van bepaalde drempelhoogten. Door klimaatverandering neemt de kans op overschrijding van deze drempelhoogten toe.

9.7.3 Overstroming van een polder door het falen van een primaire waterkering

Toename overstromingskansen: In Tabel 9-2 zijn de herhalingstijden weergegeven voor het overstromen van de waterkeringen rondom de Rijn, uitgaande dat de dijken op de huidige hoogte gehandhaafd blijven. Hierin is te zien dat de maatgevende hoogwaterstanden bij het G en W+ scenario veel frequenter zullen voorkomen dan in de huidige situatie.

In werkelijkheid zullen de keringen naar verwachting worden opgehoogd zodat ze een maatgevende Rijnafvoer van 18.000 m³/s veilig kunnen afvoeren in plaats van de huidige 15.000 m³/s. Daar staat tegenover dat de afvoer in de toekomst mogelijk toeneemt als Duitsland zijn keringen ook ophoogt en verstevigt. Het nog verder ophogen van de keringen brengt extra kosten met zich mee die nu nog niet zijn voorzien. Hierdoor is het op dit moment niet te voorzien of het veiligheidsniveau in de toekomst op de huidige normen gehandhaafd blijft, verslechtert of mogelijk zelfs verbetert door het uitvoeren van achterstallige ophogingen.

Tabel 9-2. Geschatte herhalingstijden voor overstromingen vanuit de Rijn, wanneer de waterkeringen op het huidige niveau worden gehandhaafd (bron PBL 2012).

Klimaat	Herhalingstijd (bij huidige hoogte keringen)
Huidige	1 : 2267 jaar
G scenario	1 : 615 jaar
G+ scenario	1 : 222 jaar
W scenario	1 : 186 jaar
W+ scenario	1 : 66 jaar

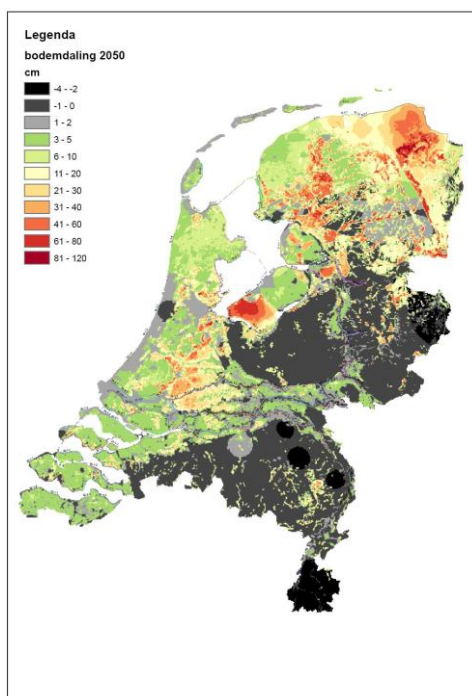
Naast hogere rivierafvoer zal door zeespiegelstijging ook een grotere kans ontstaan op overstromen vanuit zee. In onderstaande Tabel is aangegeven hoeveel zeespiegelstijging mogelijk zal optreden in de komende decennia.

Tabel 9-3. KNMI scenario's voor zeespiegelstijging in 2050 (Bron: PBL 2012; Tabel 3-1).

	Wereldwijde temperatuur stijging (2050)	Absolute zeespiegel stijging NL (2050)
G/ G+ scenario	+ 1 °C	0,15 – 0,25 m
W/ W+ scenario	+ 2 °C	0,20 – 0,35 m

Gevolgen van overstroming: De overstromingsdiepte zal waarschijnlijk toenemen in de toekomst. Hiervoor zijn verschillende oorzaken te noemen. Ten eerste komt dit doordat de neerslagpieken en hoogwaterstanden hoger zijn. Feitelijk betreft het dus een grotere kans op extreme waterstanden.

Daarnaast stijgt door bodemdaling het waterpeil relatief t.o.v. het maaiveld en komt een gebied met name bij overstromingen vanuit de grote rivieren nog dieper onder water te staan. Een voorspelling van de bodemdaling is te zien in Figuur 9-12. Door klimaatverandering in met name het W+ scenario nemen de zomertemperatuur en de verdamping toe. De veenbodems drogen in de zomer verder uit en er treedt extra maaiveld daling op: 10% in het G scenario en 35% in het W+ scenario t.o.v. het huidige klimaat. Dit kan in gebieden met sterke bodemdaling in 2050 al snel enkele decimeters verschillen (Jansen et al., 2009).



Figuur 9-12 Toekomstvoorspelling van bodemdaling tot 2050. Rood = sterke bodemdaling; groen = beperkte bodemdaling; grijs = geen daling (bron: Kuijper et al., 2011).

Tot slot kan de overheid in reactie op hogere rivierafvoer en zeespiegelstijging besluiten om de dijken te verzwaren. Uiteraard kunnen de drinkwaterbedrijven ook maatregelen nemen zoals het verhogen van installaties of winputten. In dat geval zal de kans op overstroming mogelijk niet toenemen, maar neemt de zwaarte van de overstroming (overstromingsdiepte) wel toe.

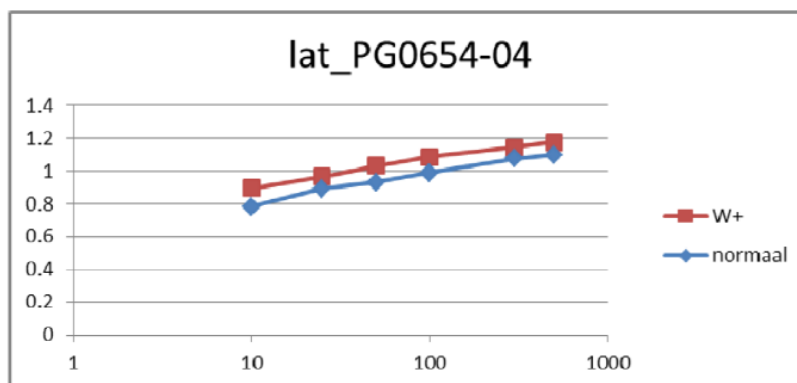
Het is de vraag of bodemdaling en hogere bedijking ook tot zwaardere gevolgen van een eventuele overstroming leidt voor de drinkwatersector. Dit komt omdat de schade aan drinkwaterinstallaties en besmetting wordt bepaald door het al dan niet overschrijden van een drempelwaarde. De mate waarin drempelwaarden worden overschreden heeft weinig gevolgen voor de hoogte van de schade. Een zelfde analogie geldt voor besmetting van drinkwater: besmet water is onveilig voor humane consumptie, ongeacht de mate van besmetting.

9.7.4 Inundatie van een polder door het falen van een regionale waterkeringen

Toename overstromingskansen: Er is weinig bekend over de overstromingsrisico's van regionale waterkeringen in relatie tot klimaatverandering. De meeste regionale waterkeringen liggen langs boezems waarvan de hoogste waterstand in de praktijk bepaald wordt door het al dan niet instellen van een maalstop uit de omliggende polders. Bij toekomstige toename van neerslagextremen zal dus meer water in de polder op maaiveld komen te staan en blijft de boezem veilig (pers. med. Henk van Hemert, STOWA, 12 juni 2013).

Voor veenkades kan, door het optreden van langere droge perioden, de faalkans door uitdroging toenemen. Ook hier is nog weinig over bekend en dit zal ook sterk afhangen of de waterschappen hun veenkades in droge perioden nat houden (pers. med. Henk van Hemert, STOWA, 12 juni 2013).

Voor regionale en overige waterkeringen die gevoed worden door vrij afwaterende gebieden zullen de maatgevende hoogwaterstanden wel toenemen. Op landelijke schaal is hier weinig over bekend, maar er is wel door individuele waterschappen naar gekeken. Zo heeft het Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden een onderzoek uitgevoerd waarin de toetshoogte van regionale waterkeringen is bepaald voor verschillende klimaatscenario's (Philips et al 2012). Hieruit kwam naar voren dat voor dat voor het studiegebied bij een extreem W+ scenario de maatgevende hoogwaterstanden met circa 0,1 m toenemen.



Figuur 9-13. Berekende maximale waterhoogte op boezem Eiland van Schalkwijk. De herhalingsstijd is weergegeven op de x-as (Bron: Philips 2012).

Gevolgen: Klimaatverandering zorgt voor een snellere bodemdaling waardoor overstromingen zwaarder zijn (grotere inundatiediepte) en drempelhoogten van drinkwatervoorzieningen eerder worden overschreden dan in de huidige situatie.

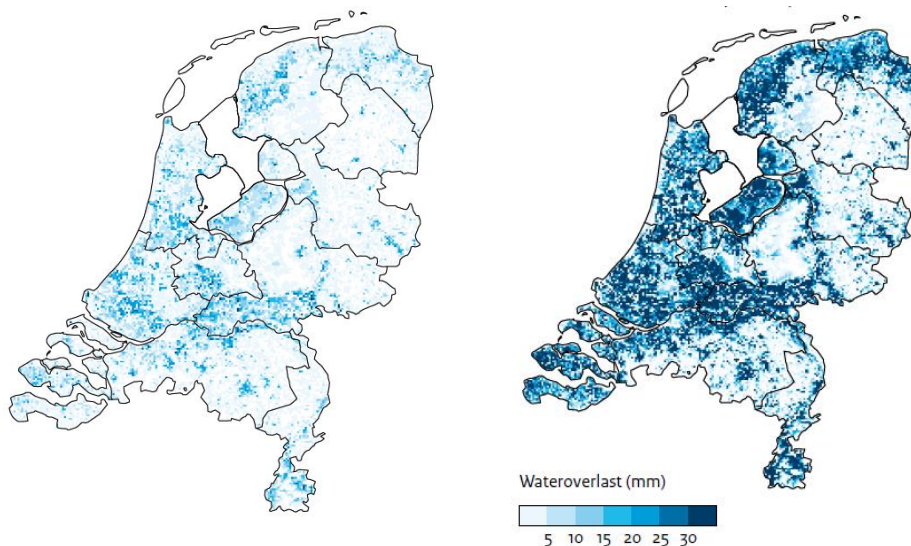
Toename overstromingskansen: In alle KNMI'06-scenario's stijgt de temperatuur, waardoor de lucht meer waterdamp kan bevatten. En als het gaat regenen, dan kan er per bui ook meer neerslag vallen. De verwachting is dat de kans op extreme neerslag door opwarming in de eenentwintigste eeuw verder toeneemt. Deze extremere neerslag zal zich vertalen in een grotere kans op wateroverlast. De grootste toename wordt verwacht in die scenario's waarin de luchtcirculatie gelijk blijft (G-/W-scenario's). De mogelijk kortdurende neerslagextremen (die vaak bepalend zijn voor wateroverlast) stijgen in die scenario's het meest. In de G+ en W+ scenario's zullen de effecten minder groot zijn (PBL 2012).

Om de kans op wateroverlast te kunnen kwantificeren zijn de veranderingen in het neerslagpatroon gecombineerd met modellen die ontwatering en afwatering beschrijven. Deze studies laten zien dat de kans op wateroverlast in grote delen van Nederland toeneemt (Figuur 9-14). De berekeningen geven aan dat de grootste toename in de lage delen van Nederland en langs de grote rivieren te verwachten is. In deze gebieden komen hogere grondwaterstanden voor; hierdoor is er een geringe bergingscapaciteit in de bodem. In hoeverre de veranderingen in de piekbuien daadwerkelijk tot wateroverlast zullen leiden zal echter sterk afhangen van de lokale werking van de watersystemen (PBL 2012).

Gevolgen: De gevolgen van een overstroming met gegeven waterdiepte zijn vergelijkbaar met de huidige situatie. Alleen de overstromingskansen nemen toe door klimaatverandering.

Huidige situatie 1:100 jaar

W-scenario 1:100 jaar



Figuur 9-14 Wateroverlast in de huidige situatie (links) en als gevolg van het W-scenario bij een herhalingstijd van 1:100 jaar (bron: Immerzeel et al. 2010).

9.7.5 Instromend hemelwater door extreme neerslag

Toename overstromingskans: In de bovenstaande paragraaf is aangegeven dat de kans op extreme neerslag door klimaatverandering zal toenemen. De neerslagintensiteit per uur tijdens extreme buien in de zomer zal waarschijnlijk nog sterker toenemen dan de extremen van de neerslaghoeveelheid per dag. Voor de dagelijkse hoeveelheden geldt dat de totale hoeveelheid beschikbare waterdamp in de atmosfeer een beperkende factor is. Buien worden intenser terwijl hun duur waarschijnlijk afneemt.

Ten behoeve van de KNMI'06 scenario's was geen informatie bekend over veranderingen in neerslaghoeveelheden per uur uit klimaatmodellen. Daarom is voor praktisch gebruik aangenomen dat de uurintensiteit voor het G (en W) scenario procentueel ongeveer evenveel toeneemt als de dagelijkse hoeveelheid. De procentuele toename van de extreme dagelijkse neerslaghoeveelheden in de G+/W+ scenario's geven waarschijnlijk wel een onderschatting van de toename van de extreme neerslagintensiteit per uur. Dit komt omdat andere factoren zoals verandering in de luchtstromingspatronen en mogelijke bodemuitdroging onvoldoende zijn meegenomen in de modelberekeningen (KNMI 2009).

Gevolgen: De gevolgen van drinkwaterbesmetting met afstromend hemelwater zijn vergelijkbaar met de huidige situatie. Bodemdaling leidt niet tot een toename van de overstromingsgevolgen omdat de waterinfrastructuur niet sneller zakt dan de bodem. Alleen nemen de kansen toe door klimaatverandering.

Tabel 9-4. Statistiek voor neerslag extremen in het huidige klimaat voor verschillende herhalingstijden en perioden in mm. De statistieken zijn gebaseerd op metingen in De Bilt (1906 – 2003) en het toekomstige klimaat. Voor een neerslagperiode van 1 uur is het W+ scenario weggelaten vanwege onzekerheden rondom de modelberekeningen (Bron: KNMI 2009).

Neerslagperiode	1 uur (mm)			1 dag (mm)		
	Huidig	G	W+	Huidig	G	W+
1 jaar	14	15	-	33	36	36
10 jaar	27	30	-	54	60	60
100 jaar	43	48	-	79	88	88

9.8 Conclusie en kennisleemten

Het onderzoek heeft in beeld gebracht wat de huidige risico's zijn van overstromingen voor de drinkwatervoorziening. Ook is bepaald hoe deze risico's veranderen als gevolg van klimaatverandering. In deze paragraaf worden de conclusies getrokken en is aangegeven welke kennisleemten er zijn rondom de drinkwatervoorziening en klimaatverandering. Tot slot worden in deze paragraaf kennisleemten benoemd op het gebied van overstromingsrisico's van de drinkwatervoorziening, los van klimaatverandering.

9.8.1 Invloed van klimaatverandering op de overstromingsrisico's

De risico's van klimaatverandering voor de drinkwatervoorziening betreffen met name een toename van de overstromingskansen. Bij het W+ scenario nemen de risico's iets meer toe t.o.v. het G scenario behalve voor overstromingen van het type "wateroverlast". De hoogste risico's op overstroming worden verwacht bij het W scenario omdat dit een relatief warm en nat scenario is.

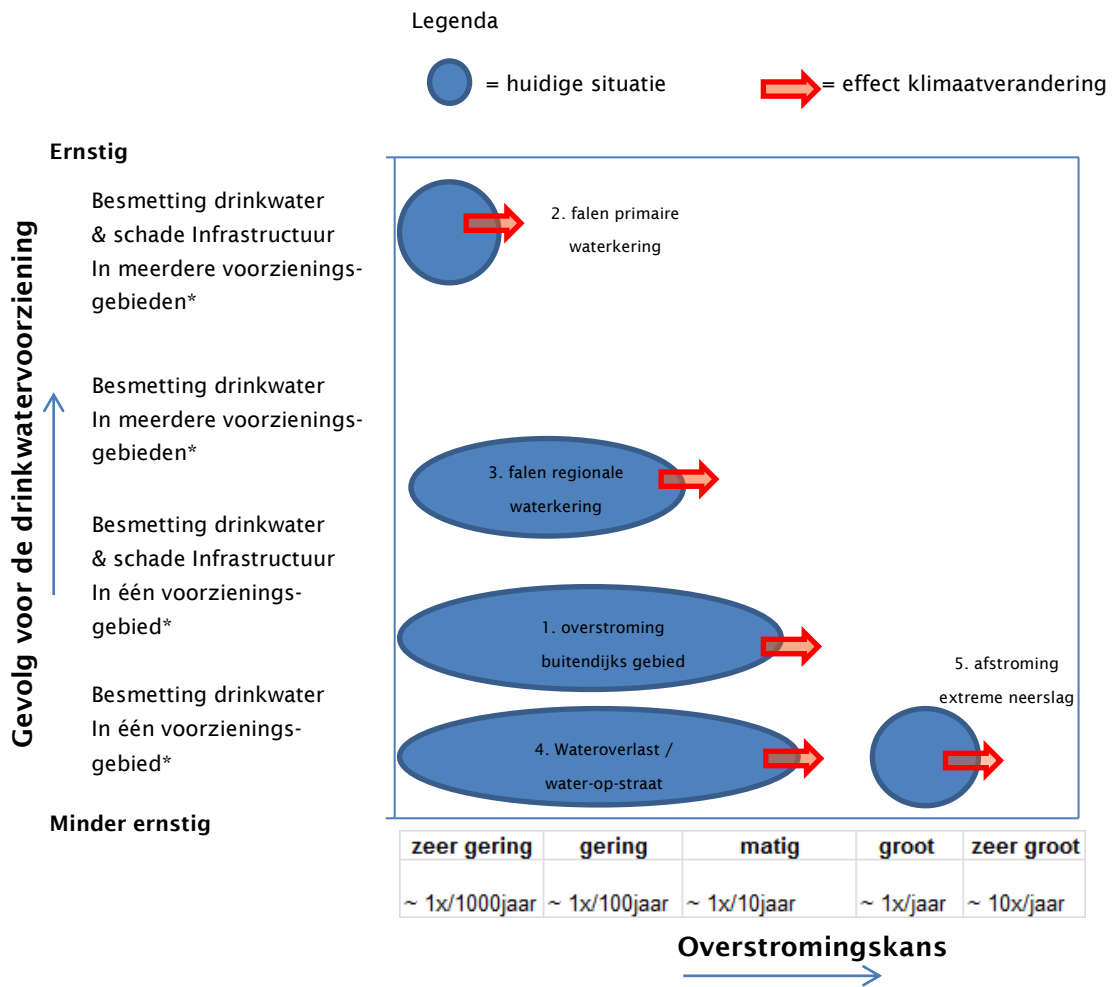
De gevolgen van overstromingen worden bepaald door de zwaarte van de overstroming en de omvang van het voorzieningsgebied (de blootstelling). De omvang kan afwijken van het overstroomde gebied. Vaak zal het falen van een primaire waterkering tot een grotere blootstelling leiden (want meerdere voorzieningsgebieden) dan een lokale overstroming door extreme neerslag. Ook kan er, naast besmetting, schade optreden aan de infrastructuur die eerst moet worden hersteld voordat de reguliere levering weer kan worden hervat.

De resultaten van de risicoanalyse voor klimaatverandering zijn in *Figuur 9-15* samengevat per overstromingsscenario:

- *Overstromen van buitendijkse gebieden*: Toename van overstromingskansen doordat in de toekomst hogere rivierwaterstanden vaker zullen voorkomen.
- *Falen van primaire waterkering*: Toename overstromingskansen door stijging zeespiegel en hogere piekafvoer op de benedenrivieren. Klimaatverandering zorgt voor een snellere bodemdaling waardoor overstromingen zwaarder zijn (grotere inundatiediepte) en drempelhoogten van drinkwater voorzieningen eerder worden overschreden.
- *Falen van regionale waterkering*: Toename overstromingskansen is beperkt doordat de hoeveelheid water in de boezem gestuurd wordt door gemalen. Klimaatverandering zorgt voor een snellere bodemdaling waardoor overstromingen zwaarder zijn (grotere inundatiediepte) en drempelhoogten van drinkwatervoorzieningen eerder worden overschreden.
- *Water op straat door extreme neerslag*: Toename van overstromingskansen, met name voor het W scenario en, in mindere mate, het G scenario.
- *Afstroming van extreme neerslag*: Toename van kans op neerslagextremen, met name voor het W scenario en (minder) het G scenario.

De overheid zal in de toekomst maatregelen nemen in het kader van de waterveiligheid om te zorgen dat de frequentie van overstromingen gelijk blijft aan de huidige situatie. Uitzondering vormt beleid dat gecontroleerde overstromingen zou toestaan zoals de aanwijzing van noodoverloopgebieden. Daarnaast is het de vraag of het nemen van maatregelen voor waterveiligheid maatschappelijk betaalbaar is.

In bovenstaande analyse is overigens geen rekening gehouden met mogelijke demografische verschuivingen richting Randstad waardoor de gevolgen (blootgestelde populatie) van overstromingen voor de drinkwaterleveringen sterk zou toenemen.



Figuur 9-15. Overzicht klimaateffecten van overstromingsrisico's voor de drinkwatersector. In de figuur is aangegeven wat de kansen (x-as) zijn van verschillende typen overstromingen en mogelijke gevolgen voor de drinkwatervoorziening (y-as). Hierbij is onderscheid gemaakt door de huidige situatie met blauwe bollen aan te duiden en met een pijl aan te geven welke verandering kan optreden als gevolg van klimaatverandering.

(*) bedoeld wordt het voorzieningsgebied van één installatie; bijvoorbeeld een pompstation of winveld.

9.8.2 Kennisleemten klimaatverandering

Vorbereiding

De kennisleemte m.b.t. klimaatverandering zit met name in de voorbereidingsfase. Door klimaatverandering zal vaker een respons nodig zijn doordat de overstromingsfrequenties toenemen. Maar de respons blijft in eerste instantie hetzelfde. De vraag is wanneer de overstromingskansen zodanig toenemen dat het opweegt om meer preventieve lange-termijn maatregelen toe te gaan passen dan in de huidige situatie.

- ➔ onderzoeksvraag 1: is de huidige beheersing van het overstromingsrisico van drinkwaterbedrijven voldoende als de overstromingskans toeneemt door klimaatverandering of adaptatiemaatregelen (zoals aanwijzing noodoverloopgebieden)?

Overstromingsfase

De in dit rapport gepresenteerde informatie over de statistische relatie tussen extreme neerslag en besmetting van drinkwater stamt uit de periode vóór 2003. Mogelijk zijn de faalkansen nadien gedaald doordat waterleidingbedrijven maatregelen hebben genomen.

- onderzoeksvraag 2: Een mogelijk onderzoeksthema is om te evalueren of het afgelopen decennium maatregelen zijn genomen om instromend hemelwater te voorkomen of sneller te detecteren. De vraag is dan in hoeverre deze maatregelen effectief zijn geweest, i.e. zijn er minder frequent besmettingen geconstateerd? T.o.v. het onderzoek in 2003 zijn nu ook vlakdekkende neerslagbeelden beschikbaar. Deze beelden zijn vaak nauwkeuriger dan het gebruik van neerslaggegevens van het dichtstbijzijnde meteorostation voor het bepalen van de piekneerslag die is gebruikt in 2003.

Responsfase

De gecombineerde Nederlandse drinkwatervoorziening is gebaseerd op redundantie. Alle infrastructuur is vervangbaar of uitwisselbaar zolang een beperkt deel van het systeem het begeeft en niet alles in een groot gebied tegelijk uitvalt. Waterleidingbedrijven hebben in hun leveringszekerheidsplan aangegeven hoe ze bij uitval van een systeemcomponent de leveringszekerheid kunnen garanderen. De vraag is of dit in de praktijk ook is getest en of het ook nog mogelijk is om voldoende water te leveren bij gelijktijdige uitval van meerdere componenten (keteneffecten van pompstations, zuiveringen, opjaagstation) door een gemeenschappelijke oorzaak (zoals grootschalige overstromingen).

- onderzoeksvraag 3: Zijn de leidingen in staat om grootschalige noodlevering te leveren? En is dit ook mogelijk bij gelijktijdige uitval van meerdere systeemcomponenten/ winningen? Een mogelijkheid om dit te onderzoeken is door via een praktijktest het bestaande leidingnet maximaal te belasten (stresstest leidingen).

Het blijkt lastig om tijdens een overstroming de waterkwaliteit zodanig goed te monitoren dat de kwaliteitseis van 10^{-4} ziektegeval per persoon per jaar gegarandeerd is. Een dergelijke kwaliteitseis vergt een groot aantal metingen en gevoelige detectiemethoden. Met name als niet gedetecteerd wordt dat overstromingswater het drinkwatersysteem binnendringt bestaat er kans dat een besmetting niet wordt opgemerkt (verborgen falen). Ook is het de vraag of het noodzakelijk is om dezelfde kwaliteitseisen te hanteren tijdens een calamiteit.

- onderzoeksvraag 4: Welke kwaliteitseisen dient men tijdens een ramp zoals een overstroming te hanteren? Moet je blijven streven naar 10^{-4} infectierisico per jaar en 10^{-6} additioneel kankerrisico? Of kun je overschakelen op een hoger infectierisico (bijvoorbeeld 10^{-4} per dag) met als doel om uitbraak van ziekten te voorkomen? Of kun je een kwalitatief risico hanteren dat uitgaat van voorkomen dat overstromingswater in contact komt met drinkwater, onafhankelijk van het infectierisico?
- onderzoeksvraag 5: Wat zijn geschikte methoden om de kwaliteit van leidingwater tijdig vast te stellen tijdens een overstroming? Denk bijvoorbeeld aan een inventarisatie van snelle screeningsmethoden. Hierbij moet rekening worden gehouden met eventueel lastige omstandigheden (geen lab beschikbaar). Er valt hierbij te denken aan *in situ* metingen of veldkits.

Herstelfase

Na een ernstige overstroming moet de drinkwatervoorziening weer op gang worden geholpen. De opbouw moet voldoende snel zijn om de bevolking terug te laten keren na overstroming. De vraag is of hier al normen/plannen voor zijn in huidige onderzoeken van Rijksoverheid en Provincies. Bij overstromingsrisico's wordt met name gekeken naar de nood-drinkwatervoorziening tijdens een overstroming. De lange termijn is niet beschreven. Op basis van dergelijke onderzoeken vindt ook normering plaats van waterkeringen. De vraag is hoe de drinkwatervoorziening hierin is meegenomen. Hoe worden effecten van overstromingen op de drinkwatervoorziening meegenomen in huidige methoden zoals HIS SSM en STOWA-Schadeschatter? En zijn hier verbeteringen wenselijk?

- onderzoeksvraag 6: Wat zijn de mogelijkheden om input te leveren richting Rijkswaterstaat over de actualisatie van HIS SSM of andere modules zodat kritische drinkwaterinfrastructuur in de toekomst ook wordt meegewogen bij het normeren van waterkeringen? Welke rol zou VEWIN hier kunnen spelen? Is het wenselijk dat drinkwatervoorzieningen in HIS SSM terecht komen of via een apart register van kwetsbare infrastructuur apart worden meegenomen in de normering van waterkeringen?
- onderzoeksvraag 7: Er is een lopend BTO 5-jarenplan "recovery". Mogelijk kan hierbij worden aangehaakt om de risico's van verontreiniging door overstromingen in beeld te brengen voor het opstarten van de drinkwatervoorziening.

KWR heeft richtlijnen opgesteld voor ontwerp van overstromingsbestendige puttenvelden (Flood Proof Wells, KWR 2012).

- onderzoeksvraag 8: Is er behoefte onder drinkwaterbedrijven aan richtlijnen voor klimaatbestendige inrichting van de rest van het leidingnet? Of een checklist voor waterleidingbedrijven om na te gaan of ze voorbereid zijn op overstromingen? Vitens kan voor dit onderwerp mogelijk ook al het e.e.a. inbrengen uit eerdere studies die het bedrijf heeft verricht.

Een deel van de hierboven genoemde onderzoeksvragen heeft ook betrekking op de huidige situatie, dus de huidige risico's van overstromingen voor de drinkwatervoorziening, los van klimaatverandering. Deze vragen zouden dus ook onder een ander BTO thema kunnen worden opgepakt, zoals Asset Management.

9.9 Literatuur

Anonymus. *Watersnoodramp 1953*. VWO-profielwerkstuk. 2005

Baaren, H van. *Amsterdam Waterbestendig*. Waternet. 2010.

Braak, W.E.W. van den, B. Kolen, A.M. Tonk. *Terugkeren na een overstroming*, HKV & Provincie Overijssel. 2006.

Buishand, T.A., R. Jilderda, J.B. Wijngaard. *Regionale verschillen in extreme neerslag*. KNMI Scientific report ; WR 2009-01, De Bilt, 2009.

HKV, Waterdienst Rijkswaterstaat. *Capaciteitenplanning Ergst Denkbare Overstromingsscenario's*. projectnr. 176401 071218 - DA17 versie 1.0. juni 2008

- Hoes, O., N. Schuurman, E. van Leeuwen. *WaterSchadeSchatter (WSS); gebruikershandleiding*. STOWA rapport 2013-11, Amersfoort. 2013
- Immerzeel, W., H. Goosen, M. de Groot, P. Droogers. *Klimaatatlas: ontwikkeling wateroverlastkaarten*. H20 (10). 2010.
- Jakubicka, T., F. Vos, R. Phalkey, M. Marx. Health impacts of floods in Europe. Data gaps and information needs from a spatial perspective. MICRODIS-report. November 2010.
- Jansen, P.C., E.P. Querner, C. Kwakernaak. *Effecten van waterpeilstrategieën in veenweidegebieden; Een scenariostudie in het gebied rond Zegveld*. Wageningen, Alterra. Alterra rapport 1516. 2007.
- Jansen, P.C., E.P. Querner, C. Kwakernaak. *Behoud van veenbodems door ander peilbeheer; Maatregelen voor een robuuste inrichting van het westelijk veenweidegebied*. Wageningen, Alterra rapport 2009. 2009
- Janssen, L.H.J.M., V.R. Okker, J. Schuur. Welvaart en Leefomgeving; een scenariostudie voor Nederland in 2040. Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau en Ruimtelijk Planbureau. 2006
- KNMI. Klimaatverandering in Nederland. Aanvullingen op de KNMI'o6 scenario's. 2009. <http://www.knmi.nl/klimaatsscenarios/documents/brochure09.pdf>
- Klopstra D., H. Vreugdenhil, H. Hakvoort, R. Verhoeven. Evaluatie regionale wateroverlast augustus 2010 Waterschap Rijn en IJssel. HKV Lijn in Water. 2010
- Kuijper, B, J. Stijnen & E. van Velzen, 2012. Overstromingskansen Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw. Deltares.
- Leeuwis-Tolboom, J.A.M. Verkenning van de consequenties voor de drinkwatervoorziening. DHV, VEWIN. 2002
- Leunk, I. *Waterberging in een wingebed*. KWR 2011.079. september 2011.
- Lieverloo, J.H.M. van, A. Esveld-Amanatidou, W.A.M. Hijnen, J.Th. Groennou. *Microbiologische verontreiniging van gedistribueerd drinkwater tijdens opslag, transport en distributie. Evaluatie en beheersing van risico's van incidentele afwijkingen en verontreinigingen*. BTO 2002.130 (c). November 2003
- Livius. De watersnoodramp (1953). In: *Gewone mensen verhalen van vroeger*. <http://www.livius.org/gewonemensen/overzicht.html>
- Luitelaar, H. van, Stedelijke Wateropgave; Vergelijking normen voor water op straat en inundatie. Stichting Rioned. 2006
- Luyendijk, E., M. Booltink, W. Visser, M. van Kruining, E. de Bruin, E. Tromp, N. Asselman. *Handreiking Overstromingsrobuust Inrichten*. Provincie Utrecht. 2011.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (V&W). *Waterveiligheid: begrippen begrijpen*. Den Haag, november 2007
- O'Connor, D.R. *Report of the Walkerton Enquiry; The Events of May 2000 and related Issues. Part I*. Ontario 2002.

- PBL (2012). Effecten van klimaatverandering in Nederland: 2012. J. van Minnen & W. Ligtoet. PBL rapport 500193003.
- Philips, S. *Normering overige keringen en watersysteemtoetsing Eiland van Schalkwijk, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden*, Hydrologic 2012.
- Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). *Effecten van Klimaatverandering in Nederland*. 2012
- Prinsen, G., E. Verschelling, M.A.M. van Dorst, ir. E. Peijnenborgh ing. H.H. van der Beek. *Toetsing kruinhoogten boezemkaden binnen Dijkkring 14 en 44. Deelrapport. Hoogheemraadschap van Amstel, Gooi en Vecht*. WL Delft Hydraulics projectnummer 12260104. 2004.
- Rambags, F., K.J. Raat, I. Leunk, G.A. van den Berg. *Flood proof wells. Guidelines for the design and operation of water abstraction wells in areas at risk of flooding*. KWR PREPARED 2011.007. 2011
- Rijksoverheid. *Afsluitdijk krijgt versterkte toplaat*. Nieuwsbericht, 24-06-2011
- Rijkswaterstaat. *Referentie waterstanden Rijkswaterstaat* (www.rijkswaterstaat.nl). n.d.
- Rijkswaterstaat. *Project Veiligheid Nederland in Kaart (VKN2)*. 2013
- Roda Husman, A. M. de, G. Medema. *Inspectierichtlijn Analyse Microbiologische Veiligheid Drinkwater* Artikelcode: 5318. VROM-inspectie, 2005.
- Roos, J. de. *De Vergeten Watersnood. Tuindorp Oostzaan overstroomd, januari 1960*. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. 2011.
- Severn Trent Water. *Gloucestershire 2007. The Impact of the July Floods on the Water Infrastructure and Customer Service. Final Report*. 2007
- Sinisi, L., R. Aergeerts. *Guidance on Water Supply and Sanitation in Extreme Weather Events*. World Health Organisation, Regional Office for Europe. 2010
- Versteeg, R., H. Hakvoort, S. Bosch, M. Kallen. *Meteobase. Online archief van neerslag- en verdampingsgegevens voor het waterbeheer*. sto wa 2012-48. 2012.
- VEWIN/DHV, 2002. *Aanwijzing en inzet van noodoverloopgebieden; verkenning van de consequenties voor de drinkwatervoorziening*. Dossier T8508-01-002.
- Zwolsman G.J. *Klimaatbestendigheid van de drinkwatervoorziening in Nederland gebaseerd op oppervlaktewater*. KWR, 2008.

Wet en regelgeving

- Wet van 18 juli 2009, houdende nieuwe bepalingen met betrekking tot de productie en distributie van drinkwater en de organisatie van de openbare drinkwatervoorziening (Drinkwaterwet)
- Besluit van 23 mei 2011, houdende bepalingen inzake de productie en distributie van drinkwater en de organisatie van de openbare drinkwatervoorziening (Drinkwaterbesluit)