



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

De invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit

RIVM rapport 607403001/2011
A.E.J. Hooijboer | A.C.M. de Nijs



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

De invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit

RIVM Rapport 607403001/2011

Inhoud

Colofon—4

Samenvatting—7

1 Inleiding—9

- 1.1 Achtergrond—9
- 1.2 Doel van het onderzoek—9
- 1.3 Werkwijze—9
- 1.4 Projectafbakening—9
- 1.5 Scenario's—10
- 1.6 Klimaatscenario's KNMI—11
- 1.7 Het voorspellen van de toekomst—13
- 1.8 Leeswijzer—14

2 Klimaat en organische stofgehalte van de bodem—15

- 2.1 Inleiding—15
- 2.2 Positieve terugkoppeling of afremming?—16
- 2.3 Hoe werkt klimaatafhankelijkheid van organische stof in de bodem?—17
 - 2.3.1 Temperatuurgevoeligheid van afbraak van organische stof—17
 - 2.3.2 Niet alleen temperatuur van invloed op afbraaksnelheid—17
 - 2.3.3 Organische stofbalans: de input van organisch materiaal—18
- 2.4 Organische stofgehalte van de bodem in de afgelopen vijftig jaar—19
- 2.5 Organische stofgehalte in de bodem in de toekomst—20

3 Klimaatverandering en oppervlaktewaterkwaliteit—21

- 3.1 Inleiding—21
- 3.2 Relatie tussen oppervlaktewater en grondwater—21
- 3.3 Recente beïnvloeding van grondwater door oppervlaktewater—21
- 3.4 Klimaat en oppervlaktewaterkwaliteit—22
 - 3.4.1 Algemeen—22
 - 3.4.2 Grote rivieren—22

4 Klimaatverandering en grondwaterkwantiteit—23

- 4.1 Grondwateraanvulling—23
- 4.2 Grondwaterstand—23

5 Klimaatverandering en grondwaterkwaliteit—25

- 5.1 Inleiding—25
- 5.2 Verzilting—25
 - 5.2.1 Interne en extern verzilting—25
 - 5.2.2 Verzilting en klimaatverandering—25
- 5.3 Nutriënten—26
 - 5.3.1 Fosfaat—26
 - 5.3.2 Stikstof—27
- 5.4 Pesticiden—29
- 5.5 Zware metalen—30

6 Discussie, conclusies & aanbevelingen—31

6.1 Conceptueel model—31

6.2 Conclusies—33

6.3 Aanbevelingen—33

Literatuurlijst—34

Colofon

© RIVM 2011

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

A.E.J. Hooijboer, RIVM
A.C.M. de Nijs, RIVM

Contact:
Ton de Nijs
Laboratorium voor Ecologische Risicobeoordeling
ton.de.nijs@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van VROM/IenM, in het kader van het programma Beleidsondersteuning Milieu en Ruimte (BMR).

Rapport in het kort

De invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit

Het is mogelijk dat klimaatverandering van invloed is op de kwaliteit van het grondwater omdat veel processen die de grondwaterkwaliteit beïnvloeden afhangen van temperatuur en vochtigheid. Of de grondwaterkwaliteit zal veranderen bij een veranderend klimaat en in welke mate is onduidelijk omdat eenduidig wetenschappelijk bewijs hierover ontbreekt.

Dit blijkt uit een literatuurstudie van het RIVM, waarin een overzicht is gemaakt van de beschikbare wetenschappelijke literatuur over de invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit. Grondwater is belangrijk voor de drinkwatervoorziening en de ecologie. Het is daarom van belang invloeden van klimaatverandering in een vroeg stadium te signaleren, zodat maatregelen kunnen worden genomen om deze invloeden tegen te gaan, indien deze veranderingen een verslechtering betekenen.

In het literatuuronderzoek is ook de invloed van klimaatverandering op de bodemkwaliteit, de grondwateraanvulling en de oppervlaktewaterkwaliteit meegenomen. Er zijn op dit moment namelijk nog te weinig artikelen verschenen die specifiek de invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit beschrijven. Aan de hand hiervan is onderzocht wat de klimaateffecten zijn op verzilting, nutriënten, pesticiden en zware metalen.

De beschikbare wetenschappelijke artikelen over de effecten van klimaatverandering op de bodem en de grondwaterkwaliteit spreken elkaar tegen. Zo zou een hogere temperatuur bijvoorbeeld volgens sommige onderzoeken tot een lagere grondwaterstand leiden, omdat er meer water verdampt. Volgens anderen zullen planten door de toegenomen concentratie CO₂ juist minder water verdampen waardoor de grondwaterstand zal toenemen.

Uit het onderzoek blijkt ook dat modellen die de verandering van grondwaterkwaliteit als gevolg van klimaatverandering simuleren nog niet aanwezig of niet nauwkeurig genoeg zijn. Het RIVM beveelt daarom aan meer onderzoek te doen en de bestaande modellen te verbeteren.

Trefwoorden:

klimaatverandering, grondwaterkwaliteit, verzilting

Abstract

The impact of climate change on groundwater quality in the Netherlands

There is a possibility that climate change will affect the quality of groundwater because many processes that influence the groundwater quality depend on temperature and humidity. If the groundwater quality will be affected by a changing climate, and to what extent is unclear because unequivocal scientific evidence is lacking on this.

This is the result of a literature review of the RIVM, which contains a list of available scientific knowledge on the impact of climate change on groundwater quality. Groundwater is important for water supply and for the environment. It is therefore important to know the impacts of climate change in an early stage so that measures can be taken to counteract these influences, if these changes represent a worsening.

In the literature review, the impact of climate change on soil quality, groundwater recharge and surface water quality are included. There are currently still too few articles that describe specifically the impact of climate change on groundwater quality. On the basis of this three aspects the impacts on salinity, nutrients, pesticides and heavy metals is examined.

The available scientific articles on climate change impacts on soil and groundwater are conflicting. For example, according to some studies, a higher temperature can lower the water table, because the evaporation is higher. According to other authors, due to elevated CO₂ concentrations, plants will evaporate less water so that the groundwater level will increase.

The study also shows that models that simulate the change of groundwater quality due to climate change are not available or not accurate enough. RIVM recommends to extend the research and to improve the existing models.

Keywords:

climate change, groundwater quality, salinization

Samenvatting

Het is voor beleidsmakers van groot belang om te weten hoe de kwaliteit van het grondwater zich zal ontwikkelen bij een veranderend klimaat. Tot nu toe zijn er weinig publicaties verschenen over dit onderwerp. Het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) heeft het RIVM opdracht gegeven om een overzicht te maken van de literatuur die over dit onderwerp is verschenen.

Er zijn drie belangrijke mechanismen die de invloed van klimaat op grondwater sturen. Ten eerste kan de bodemkwaliteit veranderen als gevolg van klimaatverandering. Ook de oppervlaktewaterkwaliteit wordt beïnvloed door het klimaat en dit kan effect hebben op de grondwaterkwaliteit. Ten derde kan het klimaat de grondwateraanvulling veranderen.

Een belangrijk voorbeeld hoe klimaat de bodemkwaliteit kan sturen is het organische stofgehalte. Het is bekend dat over het algemeen bodems in Noord-Europa veel meer organische stof bevatten dan een bodem in Zuid-Europa; klimaat heeft hier ook invloed op. Organische stof is belangrijk voor de grondwaterkwaliteit op een aantal manieren. Zo is het van invloed op het binden van zware metalen en organische verontreinigingen aan de bodem, is het belangrijk voor de fysische structuur van de bodem maar ook voor nitraatreductie. Uit de literatuur spreekt het vermoeden dat het organische stofgehalte van de bodem zal afnemen bij de verwachte veranderingen van het klimaat. Hiervoor is echter geen bewijs gevonden en dit blijkt ook niet uit alle modellen. Sommige auteurs menen dat het ook kan toenemen als gevolg van een grotere input van organische stof als gevolg van het veranderende klimaat.

Door klimaatverandering kan een serie parameters veranderen die de aanvulling van het grondwater bepaalt, zoals de hoeveelheid neerslag, de verdamping en de infiltratiecapaciteit. De hoeveelheid grondwateraanvulling is een directe aanjager van de grondwaterkwaliteit. Ook hier geldt dat er geen consensus bestaat in de literatuur over een toe- of afname van grondwateraanvulling als gevolg van klimaatverandering. Veel auteurs gaan ervan uit dat bij neerslag die met intensievere buien valt de grondwateraanvulling afneemt. Andere auteurs komen juist met tegengestelde conclusies, deze baseren zich onder andere op de afgenomen evapotranspiratie van planten bij toegenomen CO₂-concentratie.

Door klimaatverandering zullen we in Nederland rekening moeten houden met verzilting. Zoute kwel (interne verzilting) zal toenemen als gevolg van versnelde bodemdaling en zeespiegelstijging. De rivieren zullen in de zomermaanden ook zouter worden (externe verzilting) als gevolg van verminderde zomerafvoer en een hogere zeespiegel.

De nutriëntenconcentraties in het grondwater hebben een relatie met klimaat, maar de effecten zijn nog niet eenduidig aangetoond. Er is een vermoeden van afgenomen denitrificatiecapaciteit als grondwaterstanden dalen en het organische stofgehalte afneemt (het organische stofgehalte is belangrijk voor de afbraak van nitraat). Bij toegenomen zoute kwel verwachten we dat ook de flux van stikstof en fosfaat toeneemt.

De pesticidenconcentratie in het grondwater heeft ook een relatie met klimaatverandering, zowel de afbraak als de verspreiding van pesticiden kan veranderen. De belangrijkste factor voor het gehalte pesticiden in het grondwater is het gebruik van pesticiden in de landbouw. Deze is ook deels gerelateerd aan

klimaat doordat er andere gewassen geteeld kunnen worden bij andere klimatologische omstandigheden en er andere plantenziektes kunnen voorkomen.

De concentratie zware metalen in het grondwater is zowel afhankelijk van het organische stofgehalte als de zuurgraad (pH) van de bodem. Een hoog organische stofgehalte en een hoge pH zorgen voor de binding van zware metalen aan de bodem. In de literatuur zijn geen sluitende bewijzen gevonden voor een verandering van pH- of organische stofgehalte als gevolg van klimaatverandering.

Uit de literatuurstudie blijkt dat we rekening moeten houden met een verandering van de grondwaterkwaliteit door klimaatverandering. Helaas zijn de auteurs van de verschillende artikelen het niet eens over de richting waarin het zal veranderen. Omdat we op dit moment de processen slechts kwalitatief kunnen beschrijven en er een groot aantal processen invloed hebben, die vaak tegengesteld werken, kunnen we nu niet zeggen hoe de grondwaterkwaliteit zal veranderen. In een volgende studie zal aandacht besteed moeten worden aan de kwantitatieve invulling zodat bandbreedtes bepaald kunnen worden waarbinnen we veranderingen van de grondwaterkwaliteit verwachten.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De laatste jaren zijn veel artikelen verschenen over de verandering van het klimaat en de mogelijke gevolgen daarvan voor de aarde en de mens. Het is mogelijk dat de verandering van het klimaat ook invloed zal hebben op de kwaliteit van ons grondwater, tot nu toe is hier nog weinig over geschreven.

Het is voor beleidsmakers van groot belang om te weten hoe de kwaliteit van het grondwater zich zal ontwikkelen bij een veranderend klimaat. Het grondwater heeft vele gebruiksfuncties, met als belangrijkste drinkwatervoorziening, en is daarmee van groot economisch en maatschappelijk belang. Indien we kunnen voorspellen hoe de grondwaterkwaliteit gaat veranderen kunnen beleidsmakers in een vroeg stadium keuzes maken om hiermee om te gaan. Indien het negatieve effecten zijn kunnen deze wellicht (gedeeltelijk) teniet gedaan worden.

1.2 Doel van het onderzoek

In dit onderzoek is een overzicht gemaakt van de beschikbare kennis in de literatuur over het effect van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit. Hieruit blijkt waar kennishiaten zitten en welke potentiële problemen in de nabije toekomst nader onderzocht moeten worden. Het doel hiervan is het informeren van beleidsmakers zodat duidelijk wordt met welke gevolgen van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit in de toekomst rekening gehouden moet worden.

1.3 Werkwijze

Er zijn in de literatuur weinig artikelen bekend die direct de invloed van klimaat(verandering) op de grondwaterkwaliteit beschrijven. Om de invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit te bepalen kijken we daarom eerst naar de invloed op de bodemkwaliteit, op de oppervlaktewaterkwaliteit en op de grondwateraanvulling. We gaan er daarbij vanuit dat deze drie factoren samen hoofdzakelijk de grondwaterkwaliteit zullen bepalen:

1. De bodemkwaliteit (met name het organische stofgehalte van de bodem) kan invloed hebben op de grondwaterkwaliteit doordat veranderingen in de bodem doorwerken in de samenstelling van het grondwater via uitspoeling of juist door het binden van stoffen aan de bodem.
2. Het oppervlaktewater heeft via infiltratie naar het grondwater invloed op de grondwaterkwaliteit
3. Grondwateraanvulling beïnvloedt de grondwaterkwaliteit omdat de grondwaterstroming kan veranderen met mogelijk menging, verdunning of verzilting van het grondwater tot gevolg.

1.4 Projectafbakening

De verandering van het klimaat kan op verschillende manieren doorwerken op het grondwater in Nederland. Er kan daarbij onderscheid gemaakt worden tussen primaire, secundaire en afgeleide effecten. De belangrijkste primaire effecten zijn temperatuurstijging en verandering van het neerslagpatroon. De belangrijkste secundaire effecten zijn zeespiegelstijging en verandering van het afvoerregime van rivieren.

Daarnaast is er een heel aantal afgeleide klimaateffecten waarvan we er willekeurig een aantal noemen:

- Verhoogde druk op grondwaterbronnen door toegenomen irrigatie of drinkwatergebruik.
- Verandering van de landbouw, bijvoorbeeld het verbouwen van gewassen afkomstig uit zuidelijke klimaatregio's en het gebruik van daarbij behorende bestrijdingsmiddelen.
- Toename van het gebruik van zogenaamde 'personal care products' zoals zonnebrandcrème en het gebruik van nanodeeltjes om de werking hiervan te verbeteren.
- Introductie van gebiedsvreemde pathogenen en daarmee een toename van biocidengebruik en een verandering van medicijngebruik.
- Verandering van recreatie als gevolg van klimaatverandering.
- Migratie als gevolg van klimaatverandering.

Om het nog ingewikkelder te maken zijn er diverse socio-economische ontwikkelingen die mogelijk invloed kunnen hebben op de grondwaterkwaliteit en die geen relatie hebben met klimaatverandering. Hierbij kan men denken aan de vergrijzing, bevolkingsgroei, technologische ontwikkelingen bij de afvalwaterzuivering en diverse mogelijke beleidsontwikkelingen. Voor de toekomstige ontwikkeling van milieudruk en milieukwaliteit zijn in het rapport 'Welvaart en leefomgeving' scenario's opgesteld die een beeld geven van de toekomstige veranderingen (Janssen, 2006).

Al deze toekomstige ontwikkelingen zullen samen invloed hebben op de grondwaterkwaliteit. Het is in het kader van deze studie expliciet niet de ambitie om alle ontwikkelingen mee te nemen. Wij zullen ons in deze studie richten op de invloed van de meest directe gevolgen van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit.

1.5 Scenario's

Scenariodenken is het ontwikkelen, vergelijken en anticiperen op mogelijke toekomstscenario's (nl.wikipedia.org/wiki/Scenarioanalyse, geraadpleegd op 23-6-2011). Scenariostudies zijn gebaseerd op de gedachte dat de toekomst niet te voorspellen is; je kunt je er echter wel op voorbereiden door over mogelijke ontwikkelingen na te denken. Een scenario (het woord is afkomstig van toneel en film) is een beschrijving van een mogelijke toekomst, waarbinnen een bepaald plan ontwikkeld kan worden. Aangezien de toekomst niet voorspeld wordt, omvat een scenariostudie veelal meerdere scenario's.

Een misverstand dat vaak optreedt bij scenariodenken is dat de verschillende scenario's de uitersten zijn waarbinnen de veranderingen gaan plaatsvinden. Dit is per definitie niet correct, toch worden scenariostudies veelal zo opgezet om de mogelijke variatie in toekomstige ontwikkelingen goed in beeld te brengen. Scenario's zijn een hulpmiddel om de geest te scherpen en om percepties te veranderen. De toekomst is onvoorspelbaar en mensen hebben de neiging om de huidige ontwikkelingen naar de toekomst door te trekken. Scenario's helpen om te laten zien dat het allemaal heel anders kan lopen.

Een goed voorbeeld in het kader van deze studie zijn de klimaatscenario's van het KNMI (zie paragraaf 1.6). Deze scenario's bestaan uit vier toekomstbeelden waarop wij ons in deze studie gebaseerd hebben. Ze zijn plausibel, mogelijk volgens de modelberekeningen en consistent. Het wil echter niet zeggen dat één van deze vier

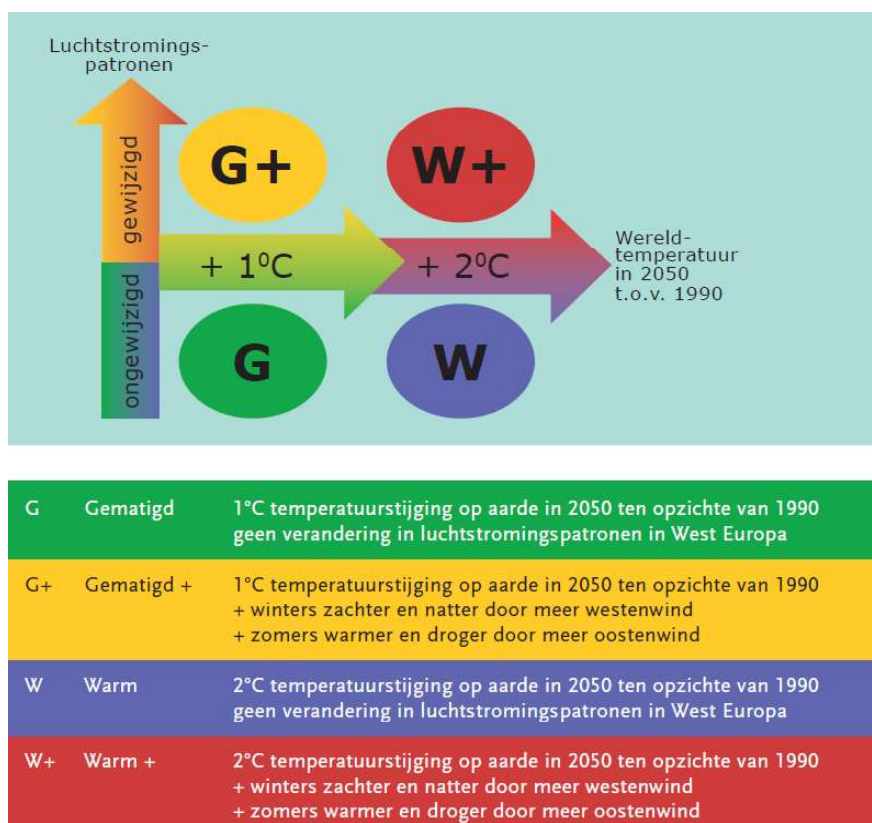
scenario's gaat plaatsvinden en de toekomst zich niet anders kan ontwikkelen. Scenariodenken is een hulpmiddel om te laten zien dat er veranderingen gaan plaatsvinden en dat deze veranderingen fors kunnen zijn.

1.6

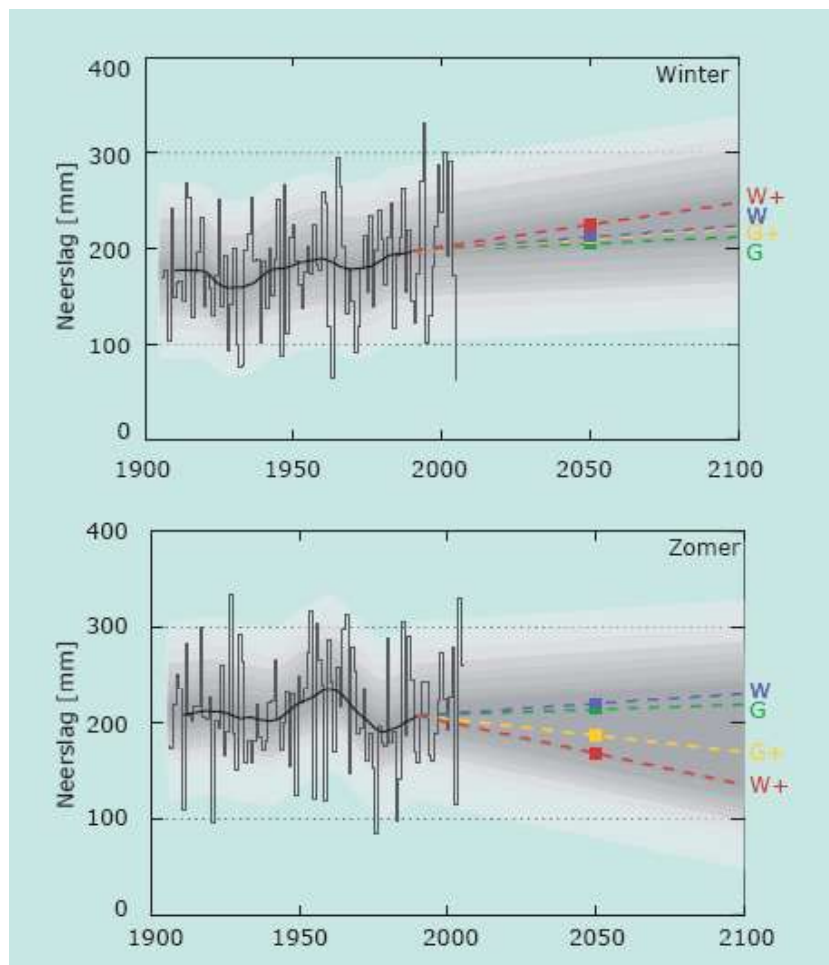
Klimaatscenario's KNMI

In 2006 heeft het KNMI een viertal klimaatscenario's gepubliceerd. Deze scenario's geven een beeld van de verwachte veranderingen in ons klimaat. De scenario's worden inmiddels breed gebruikt bij de voorspelling van klimaateffecten. Ook in onze studie maken we gebruik van de KNMI-scenario's (KNMI, 2006). In 2009 is er een aanvulling op deze publicatie gekomen waarin wordt gesteld dat de scenario's van 2006 nog onverminderd van kracht zijn. Hierin wordt ook geschreven dat het extreme scenario W+ waarschijnlijker wordt (KNMI, 2009).

De vier scenario's geven allen een plausibel en consistent beeld van het mogelijke toekomstige klimaat. Door vier scenario's te schetsen wordt invulling gegeven aan de onzekerheid die nu nog heerst over de mate van klimaatverandering. De onzekerheid zit voor een deel in de mate waarin luchtstromingen in West-Europa zullen veranderen. Dit heeft grote invloed op het neerslagpatroon dat op zijn beurt weer zeer belangrijk zal zijn voor de toekomstige toestand van het grondwater in Nederland. Ook is er nog onzekerheid over de mate van temperatuurstijging op aarde (zie Figuur 1 voor de scenario's, Figuur 2 geeft de verwachte halfjaarlijkse neerslag weer).



Figuur 1: De vier KNMI-klimaatscenario's (KNMI, 2006)



Figuur 2: Neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2005, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen) (KNMI, 2006)

De dikke zwarte lijn in Figuur 2 volgt een voortschrijdend dertigjaargemiddelde in de waarnemingen. De dikke gekleurde gestippelde lijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaarvariatie die is afgeleid uit de waarnemingen.

De vier klimaatscenario's verschillen behoorlijk van elkaar, er zijn echter veranderingen die in alle vier scenario's voorkomen en die we ongeacht het scenario in Nederland kunnen verwachten:

- De opwarming van de atmosfeer zet door, hierdoor komen zachte winters en warme zomers vaker voor.
- De winters worden gemiddeld natter en ook de extreme neerslaghoeveelheden nemen toe.
- De hevigheid van extreme regenbuien in de zomer neemt toe, maar het aantal zomerse regendagen wordt juist minder.
- De berekende veranderingen in het windklimaat zijn klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid.
- De zeespiegel blijft stijgen.

De totale gemiddelde jaarlijkse neerslag varieert wel per scenario. De jaarlijkse neerslag neemt toe of blijft gelijk in de scenario's G en W en neemt af in G+ en W+ (Figuur 2).

1.7 Het voorspellen van de toekomst

In de natuurwetenschappen worden modellen gebruikt om de toekomst te voorspellen. In een dergelijk model worden alle processen die spelen gesimuleerd inclusief de interacties tussen de verschillende processen. De grootte van parameters wordt geschat op basis van waarnemingen, eventueel met een bepaalde bandbreedte. De uitkomst hiervan geeft een toekomstverwachting. De voorspellingen van het KNMI zijn hier een voorbeeld van, door middel van modelberekeningen wordt binnen bepaalde onzekerheidsmarges een voorspelling gedaan van de toekomstige klimaatverandering. Hieruit zijn de vier klimaatscenario's afgeleid.

Modellen die de toekomstige grondwaterkwaliteit beschrijven zijn nu nog schaars. Daarom is er op dit moment in de wetenschappelijke literatuur nog geen eenduidig beeld beschikbaar van de gevolgen van temperatuurstijging, veranderende neerslagpatronen en rivierafvoer op bodem en grondwater.

Er is een aantal manieren om toch een voorspelling te doen van de effecten van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit:

1. Extrapoleren van effecten ontstaan in de vorige eeuw.
Het klimaat is de afgelopen decennia al veranderd. De temperatuur is toegenomen, het neerslagpatroon is ook merkbaar veranderd. Hebben deze klimaatveranderingen meetbaar effect gehad op de grondwater- of bodemkwaliteit? Onder andere Bellamy (2005) volgt deze methode. Het probleem hiermee is dat het besef dat het klimaat verandert nog niet zo heel oud is en voor een dergelijke analyse is een lange meetreeks nodig. De meetreeksen die nu beschikbaar zijn, zijn niet met het doel verzameld om de link tussen klimaatverandering en bodemkwaliteit vast te stellen. Daarnaast zijn de meetmethoden de laatste decennia sterk verbeterd.
2. Identificeren van temperatuurgerelateerde processen in de bodem.
Veel bodemprocessen zijn het gevolg van bioactiviteit en biologische processen verlopen over het algemeen sneller bij hogere temperaturen. Deze processen kunnen geëxtrapoleerd worden naar het warmere klimaat.
3. Identificatie van gebieden met ons toekomstig klimaat.
Als gevolg van de klimaatverandering zullen klimaatzones verschuiven. Naar verwachting zal het klimaat in Nederland in de zomer steeds meer gaan lijken op het klimaat rondom Parijs in Frankrijk en in de winter op de Po-vlakte in Noord-Italië (KNMI, 2006). Vergelijken van het verschil in (klimaatgerelateerde) bodemkwaliteit tussen beide gebieden kan inzicht geven in de veranderingen die ons te wachten staan. Een complicerende factor hierbij is dat het ontstaan van bodems op een tijdschaal gebeurt die veel langer is dan de verwachte klimaatverandering. Ook is het lastig om niet-klimaatgerelateerde parameters eruit te filteren zoals de geologische ondergrond en cultureel gerelateerd gebruik van landbouwgrond.

1.8 Leeswijzer

Na de inleiding in hoofdstuk 1 beschrijven we in hoofdstuk 2 wat er bekend is in de literatuur over de invloed van klimaatverandering op het organische stofgehalte van de bodem. In hoofdstuk 3 geven we daarna een overzicht van de invloed van klimaat op de oppervlaktewaterkwaliteit. Het effect van klimaatverandering op de grondwaterkwantiteit geven we in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 komen de grondwaterkwantiteit, organische stofgehalte van de bodem en oppervlaktewaterkwaliteit samen en beschrijven we de klimaateffecten op grondwaterkwaliteit in termen van verzilting (paragraaf 5.1), nutriënten (paragraaf 5.2), pesticiden (paragraaf 5.3) en zware metalen (paragraaf 5.4). Dit leidt tot het conceptuele model (paragraaf 6.1), conclusies (paragraaf 6.2) en de aanbevelingen (paragraaf 6.3).

2 Klimaat en organische stofgehalte van de bodem

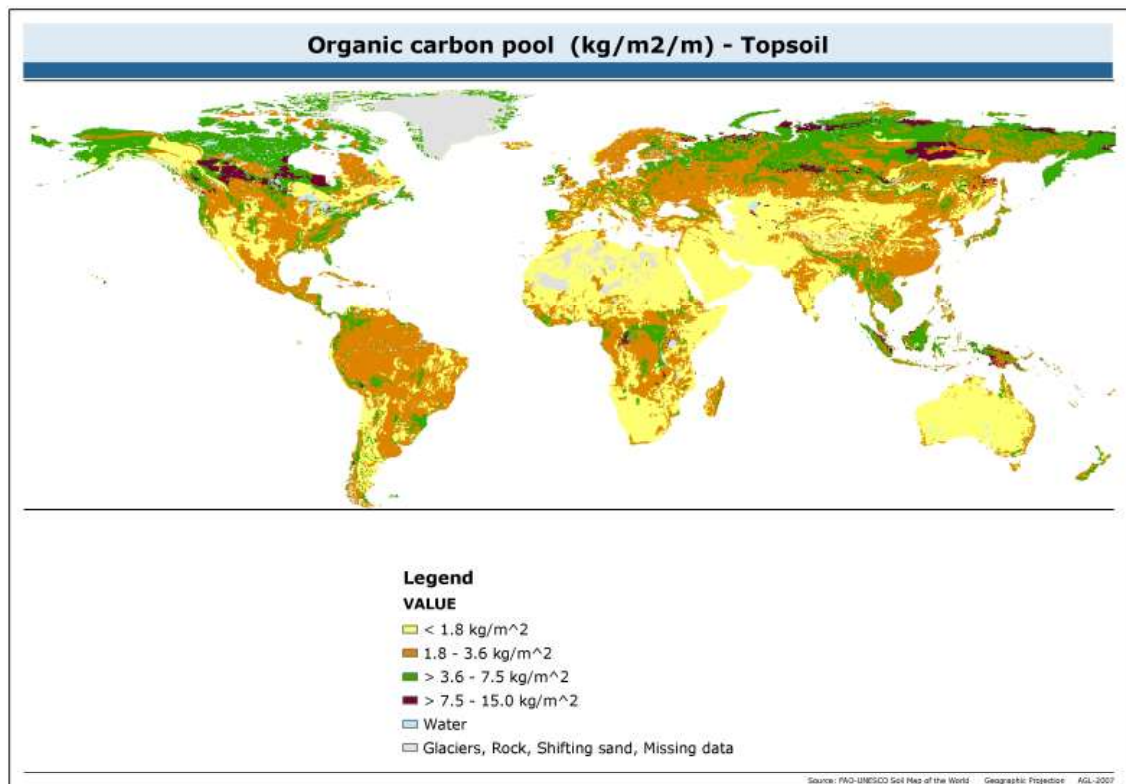
2.1 Inleiding

Organische stof in de bodem is het geheel aan levende en afgestorven planten en dieren in de bodem. Organische stof heeft een complex karakter, zij bestaat uit macromoleculen van verschillende samenstelling die bovendien verbindingen met anorganische bodemdeeltjes kunnen aangaan (Locher, 1990).

Het organische stofgehalte van de bodem beschouwen we als de sleutelparameter tussen bodemkwaliteit en grondwaterkwaliteit. We verwachten dat het organische stofgehalte van alle bodemparameters de grootste invloed heeft op de grondwaterkwaliteit. Organische stof speelt namelijk bij veel processen die de grondwaterkwaliteit beïnvloeden een grote rol:

- Zware metalen en organische verontreinigingen binden zich in sterke mate aan organische stof. Het is mogelijk dat indien het organische stofgehalte af- of toeneemt deze verontreinigingen meer of minder mobiel worden.
- Bij verandering van het organische stofgehalte in de bodem zullen de bodemfysische eigenschappen van de bodem ook veranderen waaronder de mate waarin de bodem in staat is om water vast te houden en de doorlatendheid van de bodem.
- Het nitraatgehalte van het grondwater wordt naast de input van stikstof (veelal door de landbouw) bepaald door de denitrificatiecapaciteit van de bodem. Dit hangt nauw samen met de het zuurstofgehalte van de bodem en de beschikbaarheid van een elektrondonor. Organische stof is vaak de belangrijkste elektrondonor.
- Afbraak van organische stof in veengebieden kan bodemdaling tot gevolg hebben. Dit kan de grondwaterstroming beïnvloeden waardoor bijvoorbeeld zoute kwel kan toenemen.
- Bij de afbraak van organische stof kunnen nutriënten vrijkomen.

Het is bekend dat in de gematigde zones het organische stofgehalte in de bodem hoger is dan in de drogere en warmere zones zoals Noord-Afrika. Dit valt meteen op bij een blik op de mondiale bodemkaart (Figuur 3). Deze organische stofkaart laat de distributie zien van organische stof tot een diepte van 1 meter in de bodem. Het is verleidelijk om te concluderen dat bij de huidige klimaatverandering de klimaatzones naar het noorden opschuiven en daarmee het organische stofgehalte van de bodem zal afnemen. Dit vereist de veronderstelling dat een ruimte-voor-tijd substitutie geschikt is om de toekomstige koolstofvoorraden in de bodem te beschrijven (Davidson en Janssens, 2006). Deze veronderstelling is moeilijk hard te maken.



Figuur 3: Wereldkaart met organische stofgehalte van de bodem, gebaseerd op een classificatie van de FAO-UNESCO Wereld Bodem Kaart (FAO-UNESCO, 2000)

Het gehalte aan organische stof is namelijk het gevolg van een aantal processen, die op een verschillende tijdschaal inwerken op de bodem en die ook op een verschillende manier beïnvloed worden door klimaatverandering. In de volgende paragrafen komen de belangrijkste aspecten van klimaatafhankelijkheid van organische stof aan bod.

2.2 Positieve terugkoppeling of afremming?

Klimaatverandering kan niet alleen het organische stofgehalte van de bodem beïnvloeden, maar het organische stofgehalte van de bodem kan ook weer het klimaat beïnvloeden. De hoeveelheid organische stof in de bodem is ongeveer twee- à driemaal de hoeveelheid koolstof die zich nu in de atmosfeer bevindt. De hoeveelheid koolstof vastgelegd in de huidige vegetatie is ongeveer gelijk aan de hoeveelheid koolstof in de atmosfeer (Houghton, 2007). Het is daarom belangrijk om de opbouw- en afbraaksnelheid te weten van organische stof onder (veranderende) klimatologische omstandigheden. Indien het koolstofgehalte in de bodem afneemt als gevolg van klimaatverandering, komt er meer CO₂ in de atmosfeer (Trumbore et al., 2008) en werkt het als een positieve terugkoppeling (de twee processen versterken elkaar). Het kan echter ook de klimaatverandering afremmen omdat de bodem juist meer CO₂ opneemt. Als de bodem netto organische stof opneemt wordt dit een 'sink' (afvoer) genoemd, indien de bodem organische stof afgeeft wordt dit een 'source' (bron) genoemd (Smith et al., 2008).

Smith et al. (2009) schrijven dat wereldwijd ongeveer 10-12% van de uitstoot van broeikasgassen een gevolg is van de landbouw. Aangezien de voedselproductie in de wereld volgens verwachting zal toenemen zal dit een significante factor blijven.

Het vasthouden of loslaten van organische stof op landbouwgrond speelt hierbij een grote rol.

2.3 Hoe werkt klimaatafhankelijkheid van organische stof in de bodem?

Bij de beschouwing van de klimaatgevoeligheid van de hoeveelheid organische stof in de bodem zijn er drie centrale vragen die beantwoord moeten worden (Smith et al., 2008):

1. Wat is de temperatuurgevoeligheid van de afbreekbaarheid van organische stof?
2. Hoe beïnvloedt klimaatverandering de koolstofbalans (het verschil tussen de input van organisch stof en de afbraak van organische stof)?
3. Welke afgeleide gevolgen van klimaatverandering spelen een rol bij de organische stofbalans van de bodem zoals veranderd landgebruik, verandering van atmosfeer, veranderingen in de waterbalans en neerslagpatronen?

2.3.1 *Temperatuurgevoeligheid van afbraak van organische stof*

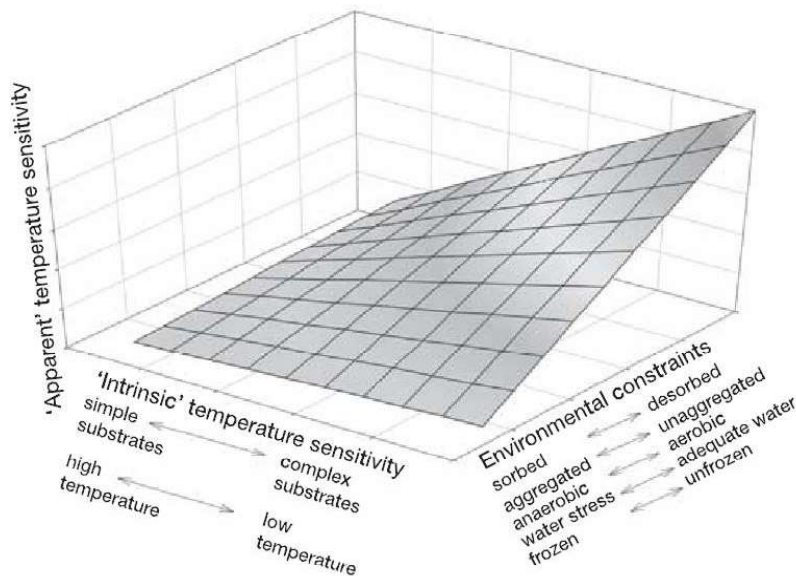
Het is bekend dat vers organisch materiaal van planten sneller uiteen valt bij hogere temperaturen. Het is een proces dat plaatsvindt door bacteriën en biologische processen verlopen sneller bij toegenomen temperatuur. De concentratie organische stof in de bodem wordt niet alleen bepaald door de hoeveelheid vers organisch materiaal. Organische stof in de bodem bestaat uit een grote range van organische componenten die ieder verschillende kinetische eigenschappen bezitten die de temperatuurafhankelijkheid van de afbraaksnelheid bepalen (Davidson et al., 2006). Vooral de invloed van het klimaat op organische stof dat gebonden is aan anorganische bodemdeeltjes is een belangrijke factor, omdat deze nog niet goed bekend is (Trumbore et al., 2008).

Er is in de literatuur een aantal lab- en veldexperimenten bekend waarin de temperatuurafhankelijkheid van organische stof in de bodem onderzocht is. Uit deze experimenten blijkt dat de afbraaksnelheid van organische stof vooral vlak na de temperatuurverandering toeneemt. Deze temperatuursafhankelijkheid van de afbraak van organische stof kan echter weer afnemen, dit wordt geïnterpreteerd als een aanpassing aan de omstandigheden. Het is goed mogelijk dat de afbraak van organische stof in veldproeven daardoor te hoog wordt ingeschat. Om deze reden is het moeilijk om veldproeven op te schalen naar klimaatverandering op lange termijn (Smith et al., 2008).

2.3.2 *Niet alleen temperatuur van invloed op afbraaksnelheid*

Er zijn veel auteurs die benadrukken dat de snelheid waarmee organische stof wordt afgebroken niet alleen afhankelijk is van de temperatuur maar ook van de vochtigheid van de bodem en de afbraaksnelheid kan daarom zowel toe als afnemen bij klimaatverandering (Smith et al., 2009). In drogere bodems met warmere omstandigheden kan afbraak van organisch materiaal afnemen omdat het gebrek aan vochtigheid de groei van bacteriën ook remt. In nattere en aerobe bodems zal de daling van de grondwaterspiegel tot gevolg hebben dat er meer afbraak plaatsvindt van organisch materiaal (Bellamy et al., 2005).

Davidson et al. (2006) beschrijven dat ook andere milieumomstandigheden die de afbraak van organische stof kunnen remmen (environmental constraints) klimaatafhankelijk zijn (zie ook Figuur 4). Enkele voorbeelden hiervan zijn de temperatuurafhankelijke adsorptie van organische stof aan mineralen of het smelten van permafrost. Hierdoor zijn de meeste modellen die de temperatuurafhankelijkheid van de afbraak van organische stof beschrijven te simplistisch.



Figuur 4: Factoren die bepalen wat de 'werkelijke' (apparent) gevoeligheid voor afbraak van organische stof is (Davidson et al., 2006)

2.3.3 Organische stofbalans

De hoeveelheid organische stof in de bodem wordt naast de afbraak daarvan natuurlijk ook bepaald door de aanvoer. De aanvoer van organische stof wordt bepaald door de aanwas van dode planten. De groei van planten (en dus de aanvoer van dode planten) gaat door de toegenomen temperatuur en de toegenomen kooldioxideconcentratie sneller.

De verandering van het organische stofgehalte van de bodem wordt dus uiteindelijk bepaald door de balans tussen input en output in relatie tot klimaatverandering (hogere temperaturen en veranderende neerslagpatronen). De verandering van deze balans bij een veranderend klimaat is op dit moment niet goed bekend, zowel mondiaal als lokaal (Smith et al., 2008). De meeste studies die verricht zijn op het gebied van organische stof en klimaatafhankelijkheid van afbraak zijn of op een kleine locatie of gedurende een beperkte meetperiode (Trumbore et al., 2008). We moeten er daarom rekening mee houden dat de reactie van organische stof zoals is vastgesteld in veldproeven nog geen evenwichtssituatie is tussen input en output (Smith et al., 2008).

De aanwas van organisch materiaal is ook afhankelijk van het vochtgehalte van de bodem. Uit het onderzoek van Smith et al. (2009) blijkt dat organische stof in jaren met grote droogte verdwijnt uit het systeem, samen met een toegenomen afbraak van organische stof. Het komt er dus op neer dat vochtigheid van de bodem ook twee kanten op werkt. Een te droge bodem zorgt voor minder afbraak doordat het te droog is voor bacteriën en de input neemt ook af als gevolg van slechte plantengroei.

De aanvoer van organisch materiaal is naast temperatuur, kooldioxideconcentratie en vochtigheid ook afhankelijk van de beschikbaarheid van nutriënten. Deze is in Nederland voor een groot gedeelte afhankelijk van het (kunst)mestgebruik in de

landbouw. Maar zoals we in hoofdstuk 5 zien is de nutriëntenconcentratie ook deels afhankelijk van klimaatverandering.

Kortom, de temperatuurseffecten van klimaatverandering op de organische stofconcentratie in de bodem hangen op een gecompliceerde manier samen met veranderingen in neerslag, verdamping en de bodemvochtigheid, CO₂-concentratie in de lucht maar ook met de depositie en uitspoeling van stikstof (Bellamy et al., 2005).

Een probleem om de klimaatafhankelijkheid van organische stof in de bodem vast te stellen is dat het door zoveel andere factoren ook beïnvloed wordt. Veranderend landgebruik kan bijvoorbeeld ook leiden tot een toe- of afname van het organische stofgehalte in de bodem. Het balansmodel van toegenomen plantengroei en toegenomen afbraak is dus eigenlijk te simpel, het zijn slechts twee factoren die meespelen (Smith et al., 2008). Andere factoren zijn de verschuiving van vegetatie als gevolg van veranderd klimaat, de aanpassing van de microbiologie in de bodem aan de klimaatverandering en de verandering van de bodemeigenschappen. Deze laatste vindt plaats op een veel langere tijdschaal dan de andere processen (Smith et al., 2008).

2.4 Het organische stofgehalte van de bodem in de afgelopen vijftig jaar

In de temperatuurmetingen van de afgelopen vijftig jaar zijn effecten van klimaatverandering duidelijk zichtbaar. Het KNMI meet tussen 1950 en 2000 een temperatuurstijging van een halve graad in Nederland (KNMI, 2006). Indien het klimaat effect heeft op het organische stofgehalte van de bodem zouden deze klimaateffecten mogelijk nu ook al zichtbaar kunnen zijn in een veranderd organische stofgehalte van de bodem.

Bellamy et al. (2005) beschrijven een zeer grote set van metingen in het Verenigd Koninkrijk waaruit blijkt dat tussen 1978 en 2003 de concentratie organische stof in de bodem gedaald is. De afname wordt vooral geconstateerd in organische stof rijke bodems. Aangezien deze afname niet te relateren valt aan het veranderde gebruik van de bodem wordt geconcludeerd dat klimaatverandering een mogelijke oorzaak is.

Smith et al. (2007) laten overtuigend zien dat de conclusies van Bellamy et al. (2005) voorbarig zijn en niet goed onderbouwd. Met een eenvoudig model laten ze zien dat de afname zeer onwaarschijnlijk is bij een temperatuurstijging van 1,5 graad. Verder worden andere verklaringen gegeven zoals het veranderde gebruik van dierlijke mest gedurende de meetperiode en de verbeterde landbouwtechnieken zodat er minder gewasresten achterblijven na de oogst.

Van Wesemael et al. (2010) beschrijven een model om een dataset van 600 meetlocaties met organische stofgehalte van de bodem tussen 1960 en 2006 op te schalen naar heel België. De auteurs vinden dat er in een aantal gebieden de organische stofconcentratie is afgenomen en in sommige gebieden toegenomen. Afname van organische stof in de bodem verklaren ze veelal met de ontwikkeling van betere drainage. De plaatselijke toename van organische stof in de bodem heeft volgens de auteurs veelal te maken met veranderend landgebruik (bijvoorbeeld een toename van veeteelt ten koste van akkerbouw). De auteurs stellen verder dat de verandering in organische stof in de bodem het effect is van veranderingen in landgebruik en ze concluderen in tegenstelling tot Bellamy et al. (2005) dat klimaatverandering de afgelopen veertig jaar geen significant of meetbaar effect op de organische stofconcentratie heeft gehad.

Ook uit andere bestudeerde literatuur wordt het niet duidelijk of de bodem op dit moment organische stof opneemt of juist afstaat (Smith et al., 2008). Schimel et al. (2001) zeggen dat de bodem als een sink werkt wat betreft organische stof. Bij Bellamy et al. (2005) werkt de bodem zoals gezegd als een source. Ook een andere studie van Sleutel et al. (2003) ziet een afname in organische stof op landbouwgrond tussen 1989 en 1999. Zoals hierboven beschreven is het niet noodzakelijk het gevolg van klimaatverandering als het organische stofgehalte van de bodem afgenomen is.

2.5 Organische stofgehalte in de bodem in de toekomst

Een aantal auteurs doen voorspellingen over het toekomstige organische stofgehalte in de bodem. Smith et al. (2009) modelleren de verandering van de organische stofconcentratie als gevolg van klimaatverandering voor Canada. Hiervoor selecteren ze 24 locaties en gebruiken ze twee klimaatscenario's. Uit het onderzoek blijkt dat organische stof kan afnemen of kan toenemen bij klimaatverandering. Er wordt geopperd dat de landbouw door aanpassen van de bedrijfsvoering ook CO₂ kan vastleggen in de bodem. Dit proces wordt mitigatie genoemd.

Smith et al. (2008) beschrijven in een overzichtsartikel een aantal modellen die de toekomst simuleren voor organische stof in de bodem. Sommige modellen voorspellen dat het een source gaat worden in de toekomst maar andere modellen spreken dit tegen. De auteurs verwachten wel dat het per regio verschilt. Zo wordt verwacht dat in noordelijke streken veel organische stof kan vrijkomen als de permafrost ontdooit. Ook veengebieden zijn gevoelig voor klimaatveranderingen. De vraag is of dat ook geldt voor de veengebieden in Nederland. De afbraak van veen in Nederland wordt voornamelijk veroorzaakt door het kunstmatig laag houden van de grondwaterstand.

3 Klimaatverandering en oppervlaktewaterkwaliteit

3.1 Inleiding

De koppeling tussen grondwaterkwaliteit en oppervlaktewaterkwaliteit gaat twee kanten op. Aan de ene kant kan het grondwater de oppervlaktewaterkwaliteit beïnvloeden door kwel (Dit is in deze studie geen onderzoeksonderwerp omdat we ons op de grondwaterkwaliteit richten). Aan de andere kant kan via infiltratie van oppervlaktewater het grondwater beïnvloed worden. De invloed van klimaat op de oppervlaktewaterkwaliteit kan daarmee doorwerken in de grondwaterkwaliteit.

3.2 Relatie tussen oppervlaktewater en grondwater

In grote delen van Nederland (veelal de lage delen) werkt het oppervlaktewater als een afvoer van grondwater. Ook in de hoger gelegen gebieden kan het oppervlaktewater een voornamelijk afvoerende werking hebben (bijvoorbeeld de beken in Limburg). Op lokale en regionale schaal kan de rol van infiltrerend oppervlaktewater echter van groot belang zijn, bijvoorbeeld in het rivierengebied en in de grote inrijingsgebieden in Nederland zoals in Overijssel (Paulissen, 2007).

Naast de natuurlijke infiltratie van oppervlaktewater wordt oppervlaktewater kunstmatig geïnfiltreerd in de kustduinen ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Ook de winning van oevergrondwater zorgt voor (een verhoogde) infiltratie van rivierwater. Oevergrondwater is grondwater dat bestaat uit natuurlijk geïnfiltreerd oppervlaktewater met een bijmenging van 10-90% gebiedseigen grondwater (Stuyfzand, 1996).

3.3 Recente beïnvloeding van grondwater door oppervlaktewater

Uit een aantal onderzoeken komt naar voren hoe groot de invloed van infiltrerend oppervlaktewater op de grondwaterkwaliteit is. In een KIWA-rapportage (Leunk, 2006) is een inventarisatie gemaakt van de grondwaterwinningen voor drinkwaterproductie in Nederland die onder invloed staan van infiltrerend oppervlaktewater. De auteur concludeert dat 71 Nederlandse winningen worden beïnvloed door infiltrerend oppervlaktewater. Er is onderscheid gemaakt tussen 58 grondwaterwinningen beïnvloed door grote rivieren of kanalen of regionaal oppervlaktewater en 13 oevergrondwaterwinningen. De auteurs stellen verder dat circa 29% van alle drinkwaterbronnen uit grondwater wordt beïnvloed door oppervlaktewater (dit percentage is bepaald op basis van waterwinningcijfers van 2004).

In de studie van Van der Aa (2008) is onderzocht in hoeverre in drinkwaterbronnen resten medicijnen zijn aangetroffen. Indien er medicijnen worden aangetroffen is dit een indicatie dat er beïnvloeding is van het grondwater door oppervlaktewater. In de studie is in twee van de zes grondwaterwinningen en in acht van de negen oevergrondwaterwinningen resten van medicijnen aangetroffen.

Absil (1997) heeft de kwaliteit van oeverinfiltratieputten vergeleken met die van grondwaterputten en concludeert hieruit dat de watersamenstelling in de putten met oeverinfiltratie wordt beïnvloed door het infiltrerende oppervlaktewater. Dit uit zich in hogere zoutconcentraties in het grondwater van de oeverinfiltratieputten in vergelijking met de dichtstbijzijnde omliggende putten waar alleen grondwater wordt gewonnen.

3.4 Klimaat en oppervlaktewaterkwaliteit

3.4.1 Algemeen

Veel chemische reacties die de oppervlaktewaterkwaliteit beïnvloeden verlopen sneller bij hogere temperaturen. Klimaatverandering zorgt voor een hogere snelheid van chemische processen in het oppervlaktewater (Verweij et al., 2010). Dit heeft een aantal gevolgen voor de oppervlaktewaterkwaliteit. Hogere temperaturen in het oppervlaktewater zullen er voor zorgen dat er minder zuurstof opgelost kan zijn in het oppervlaktewater. Ook zal bij hogere temperaturen de bioactiviteit hoger zijn waardoor ook meer zuurstof verbruikt wordt (Verweij et al., 2010). De gestegen oppervlaktetemperatuur zal gevolgen hebben voor de stikstofkringloop omdat zowel nitrificatie als denitrificatie sneller gaat.

Naast de gestegen temperatuur kunnen intensievere regenbuien ook zorgen voor verhoogde oppervlakkige afstroming van nutriënten en pesticiden naar de sloten (Verweij et al., 2010).

Klimaatverandering heeft ook invloed op de ecologische kwaliteit van het oppervlaktewater, zoals een toename van algenbloei. In ecologisch opzicht zal de klimaatverandering de bestaande stressfactoren voor het water, zoals verzilting, verzuring, eutrofiëring en versnipperde natuurgebieden, versterken (Verweij et al., 2010).

3.4.2 Grote rivieren

Klimaatverandering heeft een grote invloed op de waterkwaliteit van de grote rivieren. In de zomer wordt de afvoer van de grote rivieren lager, daarmee wordt het aandeel van lozingen relatief groter. Door de lage afvoer van rivieren kan ook zeewater verder landinwaarts trekken. De gevolgen van de droogte, het lage debiet en de lange duur daarvan kunnen als volgt worden samengevat (Zwolsman et al., 2005):

- een sterke verhoging van de watertemperatuur (tot 28°C bij Lobith);
- een sterke stijging in de gehalten aan chloride en fluoride;
- wisselende effecten op de concentraties aan zware metalen;
- beperkte effecten op de concentraties aan bestrijdingsmiddelen.

De stijging van het chloridegehalte in het rivierwater en de lagere beschikbaarheid in de zomer heeft ook effecten buiten het rivierengebied. Een toename van het neerslagtekort in de zomer (door minder neerslag en een grotere verdamping) leidt in polders met kwel van brak grondwater tot normoverschrijdingen van zoutconcentraties in het oppervlaktewater. De meest gebruikte methode om verzilting tegen te gaan bestaat tot op heden dan ook simpelweg uit het doorspoelen van het watersysteem met zoet water dat van buiten wordt aangevoerd (Ter Voorde, 2009).

Grote gebieden in noord- en west-Nederland zijn in de zomerperiode dus in meer of mindere mate afhankelijk van gebiedsvreemd water. Dit water wordt overigens niet alleen ingelaten ten behoeve van doorspoeling maar ook voor peilhandhaving en beregening. Het gebiedsvreemd water is in de zomerperiode doorgaans water uit de grote rivieren, al dan niet indirect via het IJsselmeer (Ter Voorde, 2009).

4 Klimaatverandering en grondwaterkwantiteit

4.1 Grondwateraanvulling

Het KNMI voorspelt dat het neerslagpatroon in Nederland zal veranderen. De winters zullen natter worden, de zomers droger of gelijk blijven. In het meest waarschijnlijke KNMI-scenario W+ valt er gemiddeld gezien minder neerslag in Nederland. Het ligt voor de hand dat dit effect heeft op de grondwateraanvulling, samen met de verdamping die ook temperatuurafhankelijk is.

Het is verleidelijk om te stellen dat door een verminderde neerslag en een toegenomen verdamping de grondwateraanvulling zal afnemen. Hiervoor is het proces echter te gecompliceerd. Bartholomeus et al. (2010) schrijven bijvoorbeeld dat de dynamiek van vegetatie-eigenschappen een cruciale rol speelt in de grondwateraanvulling. Ze laten zien dat door meer droogte in de zomer de grondwateraanvulling in deze gebieden kan toenemen doordat de bodembedekking afneemt.

Broers (2011) schrijft dat de primaire effecten van klimaat op de grondkwantiteit (veranderende neerslag en verdamping) op korte termijn waarschijnlijk kleiner zijn dan de impact van secundaire effecten van klimaatverandering zoals toegenomen grondwateronttrekking voor irrigatie en toegenomen drinkwaterverbruik. Deze impact hangt natuurlijk deels af van keuzes die door het beleid gemaakt worden.

Het effect van klimaatverandering op de evapotranspiratie van planten is ook niet eenduidig. Hunink et al. (2008) schrijven dat uit onderzoek blijkt dat toegenomen CO₂-concentratie tot meer biomassa (meer bladoppervlak) leidt en dus tot meer evapotranspiratie (dit wordt het LAI-effect genoemd, een afkorting van Leaf Area Index). Van de andere kant kunnen planten door de hoge CO₂-concentratie gemakkelijker aan koolstof komen zodat ze hun huidmondjes minder lang open hoeven te houden en transpiratie wordt gereduceerd (dit wordt het WUE-effect genoemd, een afkorting van Water Use Efficiency). Bunce (2004) geeft aan de hand van eigen experimenten en die van anderen, een overzicht van de waargenomen effecten op de LAI door verhoogde CO₂ concentratie. Bij de meeste gewassen wordt geen of een kleine toename van het LAI-effect geconstateerd, waardoor het WUE-effect kan overheersen. Ook Van der Gaast et al. (2009) schrijven dat experimenteel onderzoek lijkt uit te wijzen dat het WUE-effect groter is dan het LAI-effect en dat planten minder water gaan verdampen.

4.2 Grondwaterstand

Hunink et al. (2008) gebruiken een grondwaterstromingsmodel om de effecten van klimaatverandering op het grondwatersysteem te bepalen op basis van de vier klimaatscenario's van het KNMI. Zij doen dit voor het veenweidegebied en de Utrechtse Heuvelrug.

Veenweidegebied

Klimaatverandering zorgt in het veenweidegebied voor een (geringe) stijging van de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en een daling van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG), hierdoor is er sprake van een toegenomen dynamiek van de grondwaterstand. Dit zal met name in de zomer leiden tot verslechtering van de oppervlaktewaterkwaliteit doordat de oxidatie van veen de afspoeling van nutriënten zal toenemen. Ook wordt er in de zomer gebiedsvreemd water ingelaten dat vaak een mindere kwaliteit heeft.

Utrechtse Heuvelrug

Op de Utrechtse Heuvelrug zijn de verblijftijden van het grondwater veel hoger dan in het veenweidegebied. Dit traag reagerende grondwatersysteem laat de toegenomen variatie in de seizoenen daarom minder goed zien. De grondwaterstand wordt bepaald uit het neerslagoverschot van de voorgaande jaren. Bij twee van de vier scenario's leidt dit tot een grondwaterstandstijging, bij de twee andere scenario's tot een grondwaterstanddaling (stijging en daling beide ongeveer 25 cm).

5 Klimaatverandering en grondwaterkwaliteit

5.1 Inleiding

In de voorgaande drie hoofdstukken hebben we het literatuuronderzoek beschreven over de invloed van klimaatverandering op het organische stofgehalte van de bodem, de oppervlaktewaterkwaliteit en de grondwaterkwantiteit. In dit hoofdstuk zullen we deze drie factoren samenvoegen met gegevens uit de literatuur over de invloed van klimaat op grondwater.

5.2 Verzilting

5.2.1 *Interne en extern verzilting*

In de literatuur wordt er gesproken over twee soorten verzilting namelijk interne en externe verzilting (Stuurman, 2006).

Interne verzilting (dit wordt ook wel zoutwaterintrusie genoemd) treedt op bij een toename van brakke of zoute kwel. De oorzaken van interne verzilting zijn de inpolderingen en droogmakerijen en de bodemdaling als gevolg van ontwatering. De bron van zout bij interne verzilting zijn vaak sedimenten in mariene gebieden die zijn ingepolderd. Interne verzilting is een proces dat geïnitieerd is door natuurlijke geologische processen en de inrichting van Nederland. Het proces is al vele eeuwen gaande.

Externe verzilting (dit wordt ook wel chloridevervuiling genoemd in de literatuur) is het gevolg van zouter worden van de grote rivieren doordat zout water vanuit de zee landinwaarts doordringt.

Beide vormen van verzilting hangen ook samen: interne verzilting wordt bestreden door het doorspoelen met gebiedsvreemd zoeter water. De beschikbaarheid hiervan staat ook onder druk door externe verzilting.

5.2.2 *Verzilting en klimaatverandering*

Verzilting van grondwater is in Nederland met brak en zout water in de ondergrond, afhankelijkheid van rivierwateraanvoer en de stijging van de zeespiegel een van de meest in het oog springende aspecten van verandering van grondwaterkwaliteit door klimaatverandering.

Klimaatverandering heeft op verschillende manieren invloed op verzilting van het grondwater. Als gevolg van de verminderde aanvoer van rivierwater in de zomer en stijging van de zeespiegel dringt het zeewater dieper in het land, met als gevolg dat het rivierwater zouter wordt. Ook neemt de relatieve bijdrage van bovenstroomse (zout)lozingen in de rivieren toe bij lage afvoer. Infiltratie van rivierwater (natuurlijk of door oevergrondwaterwinning, zie ook paragraaf 3.2) heeft tot gevolg dat ook het grondwater zouter kan worden. Ook kan de druk op grondwater als drinkwaterbron groter worden als oppervlaktewater als drinkwaterbron niet beschikbaar is in de gewenste hoeveelheden of kwaliteit.

Klimaatverandering heeft ook gevolgen voor de interne verzilting. Als gevolg van de zeespiegelstijging wordt het stijghoogteverschil groter tussen grondwater en polderpeil en neemt de brakke kwel toe in de kustgebieden. Modelberekeningen wijzen uit dat de invloed van zeespiegelstijging op de verzilting zich uitstrekt over een strook van zeven kilometer langs de kust (Ter Voorde, 2009).

Het veenweidegebied is gevoelig voor daling van het maaiveld. Verdroging en temperatuurstijging kunnen dit proces versnellen, dit kan een toename van brakke kwel tot gevolg hebben.

5.3 Nutriënten

De uitspoeling van nutriënten van de bodem naar het grondwater is zowel afhankelijk van de aanvoer van nutriënten in het milieu als van de natuurlijke bodemomstandigheden. Het gebruik van meststoffen in de landbouw is de grootste input van nutriënten in de bodem. Hoe deze nutriënten vervolgens gebruikt worden in de bodem of deels uitspoelen hangt af van een aantal factoren waarvan er een aantal klimaatgerelateerd is.

5.3.1 Fosfaat

Fosfaat is een voedingsstof voor planten. De aanvoer van fosfaat in de bodem wordt bepaald door het gebruik van meststoffen in de landbouw en de afbraak van organisch materiaal.

Fosfaat in de bodem, afkomstig van bemesting op landbouwbedrijven, zal over het algemeen niet uitspoelen naar het grondwater. De mobiliteit van fosfaat in de bodem hangt af van de aanwezigheid van zuurstof en ijzer. In aerobe bodems, zoals de droge zandregio in Nederland, vinden we zeer weinig tot geen fosfaat in het ondiepe grondwater. We verklaren dit met de binding van fosfaat aan ijzeroxide en andere mineralen. In anaerobe bodems (bijvoorbeeld veenbodems), komt ijzer voor in gereduceerde vorm. Fosfaat kan hierdoor wel in oplossing zijn, we vinden hier dan ook veel hogere fosfaatconcentraties in het bovenste grondwater (Fraters, 2007). Op deze laag gelegen bodems vind echter vaak geen infiltratie plaats naar het diepere grondwater maar zal fosfaat uitspoelen naar het oppervlaktewater.

Indien fosfaat in het diepere grondwater wordt aangetroffen wordt het meestal geassocieerd met fosfaatrijke kwel (Van Vliet, 2010). Fosfaatrijke kwel treedt op in gebieden met mariene afzettingen in de ondergrond zoals in zeekleigebieden (Van Beek, 2007). Dat komt door de afbraak van organische stof, door de aanwezigheid van relatief goed oplosbare fosfaatmineralen en het zoute milieu waardoor fosfaat gemakkelijker in oplossing blijft. In het grondwater in veengronden zijn de organische fosforconcentraties ook relatief hoog, doordat bepaalde afgebroken organische verbindingen gemakkelijker in oplossing gaan. Daarnaast ligt het veenpakket vaak op mariene zand- of kleiafzettingen waardoor in de diepe ondergrond ook verhoogde fosforconcentraties worden aangetroffen (Schoumans, 2008).

Klimaatverandering in Nederland werkt op een aantal manieren door op de fosfaatconcentratie in het grondwater. Zuurstofhoudende of -loze omstandigheden, belangrijk voor de mobiliteit van fosfaat, kunnen we relateren aan de grondwaterstand. Bij een hoge grondwaterstand is de bodem anaeroob, hierdoor kan fosfaat in oplossing gaan. Naarmate de grondwaterstand hoger is, neemt de kans op fosforbelasting van het oppervlaktewater toe. Dit komt doordat het grondwater frequenter in contact komt met lagen waarin het fosfaat in de bodem is opgehoopt (Schoumans, 2008). Hoofdstuk 4 liet zien dat de invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand nog niet eenduidig beschreven is in de literatuur. Hellmann (2011) heeft voor een virtuele veenweidepolder de gevolgen gemodelleerd van het G- en W+-scenario van het KNMI. De auteur vindt in het W+-scenario een lagere fosfaatconcentratie in het slootwater. Zij verklaren dit door een hogere adsorptie van fosfaat aan (ijzeroxide in) de bodem door drogere

omstandigheden. Mogelijk heeft een verandering van de grondwaterstand ook invloed op de fosfaatconcentratie van het grondwater.

Klimaat heeft ook invloed op de fosfaatrijke kwel. Door de stijging van de zeespiegel neemt de kwelflux (plaatselijk) toe. In paragraaf 5.2.2 schreven we dat dit geldt voor een strook van ongeveer zeven kilometer langs de kust. Klimaat heeft ook invloed op de afbraak van veen door verdroging en temperatuurstijging waardoor fosfaatrijke kwel kan toenemen.

5.3.2 *Stikstof*

Stikstof is een belangrijke voedingstof voor planten. Stikstof komt in de bodem door atmosferische depositie, stikstoftoediening bij de landbouw of afbraak van organisch materiaal. In landbouwgebieden vindt het grootste deel van de stikstofbelasting door bemesting met dierlijke en kunstmest plaats. In natuurgebieden komt stikstof op de bodem door middel van atmosferische depositie van NH_x en NO_x (Reijnders, 2004).

Stikstof in het grondwater komt in vele verschijningsvormen voor, de belangrijkste opgeloste anorganische verbindingen zijn nitraat (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+).

Grondsoorten verschillen in de mate waarin stikstof uitspoelt naar grond- en oppervlaktewater. Voor de beschouwing van stikstof in grondwater maken we hiervoor onderscheid tussen laag-Nederland (kleiregio, veenregio en natte zandregio) en hoog-Nederland (droge zandregio en lössregio). Het verschil tussen hoog- en laag-Nederland wordt veroorzaakt door verschillen in denitrificatie. Denitrificatie treedt op onder zuurstofloze omstandigheden, dit wordt veroorzaakt door een hoge grondwaterstand. Daarnaast is er voor denitrificatie een energiebron nodig voor de bacteriën (meestal organische stof maar pyriet kan ook geoxideerd worden). Denitrificatie is in de veengronden hoog door het hoge organische stofgehalte en de hoge grondwaterstanden (Van Beek, 2007). Ook in de klei- en natte zandregio is de grondwaterstand relatief hoog. Het organische stofgehalte is vaak het hoogst bovenin de bodem. Daar komt dan ook de meeste denitrificatie voor.

Een ander verschil tussen hoog- en laag-Nederland is dat in laag-Nederland de infiltratie naar het grondwater lager is, uitspoeling van stikstof zal voornamelijk plaatsvinden naar het oppervlaktewater. In veel diepe polders heerst zelfs een kwelsituatie.

Ammonium (NH_4^+)

Ammonium wordt geassocieerd met de afbraak van organisch materiaal onder zuurstofloze omstandigheden, onder zuurstofrijke omstandigheden wordt ammonium namelijk omgezet in nitraat. Vooral in de veenregio komen hoge ammoniumconcentraties voor (Fraters, 2007). Vanwege de omzetting van ammonium in nitraat en de geringere mobiliteit van ammonium (het bindt zich aan negatief geladen kleideeltjes) is grootschalige infiltratie van ammonium vanaf de bodem naar het grondwater niet te verwachten. Juist in anaerobe bodems (bodems met een hoge grondwaterstand) verwachten we uitspoeling naar het oppervlaktewater in plaats van uitspoeling naar het grondwater.

Ammonium in het diepere grondwater is vaak het gevolg van zogenaamde nutriëntrijke kwel. Hierbij worden organische stof rijke lagen (veenlagen) in de ondergrond afgebroken (Van Vliet, 2010).

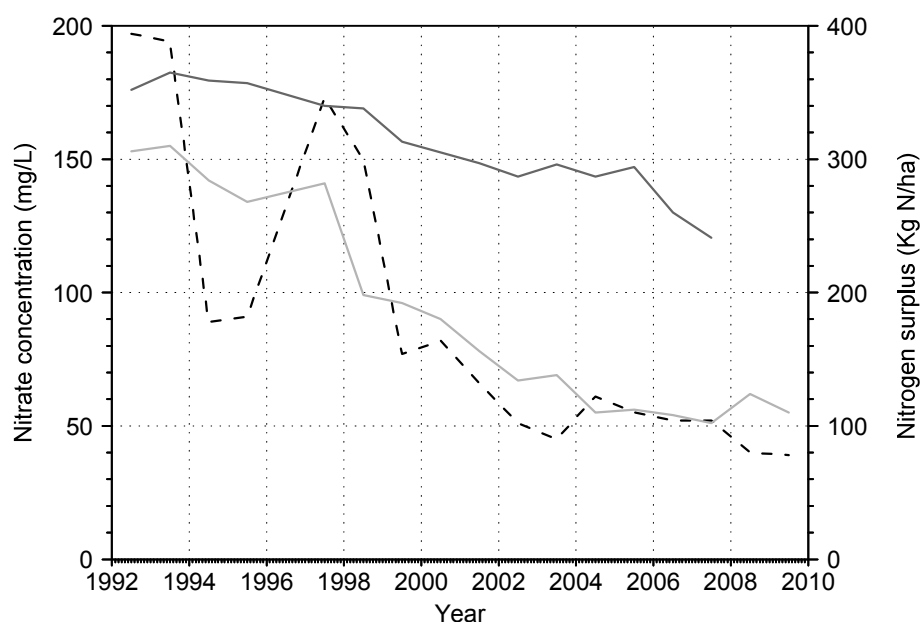
Klimaatverandering kan invloed hebben op de ammoniumconcentratie indien (net als bij fosfaat) kwel toeneemt door bodemdaling en (deels) door de zeespiegelstijging. Ook door de versnelde afbraak van veen kan de ammoniumconcentratie in het milieu toenemen.

Nitraat (NO_3^-)

Nitraat is in tegenstelling tot ammonium heel mobiel, het bindt zich niet aan de bodem en is goed oplosbaar. Onder zuurstofarme omstandigheden kan nitraat onder invloed van bacteriën en een elektrondonor zoals organische stof of pyriet afgebroken worden tot uiteindelijk stikstofgas. Dit proces heet denitrificatie. Onder zuurstofarme omstandigheden vinden we vaak veel minder nitraat in het grondwater dan onder zuurstofrijke omstandigheden.

In het Landelijk Meetnet Effecten Mestbeleid (LMM) worden hoge nitraatconcentraties vooral gemeten in de droge zandregio (Fraters, 2007). Deze gebieden zijn niet gedraineerd en uitspoeling van nutriënten vindt plaats naar het grondwater. Nitraat in de bodem kan uitspoelen naar het grondwater indien het met de infiltrerende neerslag onder de wortelzone belandt en niet meer beschikbaar is voor planten. Hierna kan het zich verder verspreiden.

De uitspoeling van nitraat heeft een zeer sterke correlatie met het neerslagoverschot. In natte jaren vindt verdunning plaats waardoor de nitraatconcentratie lager is. In de periode 1992 tot 1995 werd er in het LMM een gemiddeld veel lagere nitraatconcentratie gemeten terwijl dit niet gerelateerd kon worden aan het stikstofgebruik in de landbouw. Verdunning is waarschijnlijk de hoofdoorzaak, ook omdat chloridegehaltes ook laag zijn in die periode (Boumans et al., 1997). Zie hiervoor ook Figuur 5 met de jaarlijkse gemeten nitraatconcentratie, de gecorrigeerde nitraatconcentratie en het gemiddelde stikstof bodemoverschot op melkveehouderijen in de zandregio. We mogen daarom aannemen dat klimaatverandering, met name de hogere neerslag in de winter tot gevolg heeft dat er lagere nitraatconcentraties gemeten worden in het bovenste grondwater.



Figuur 5: Nitraatconcentratie (stippellijn), gecorrigeerde nitraatconcentratie (grijze lijn) en gemiddeld stikstof bodemoverschot (zwarte lijn) (Vrijhoef, 2011).

De afbraak van nitraat is ook klimaat gerelateerd. Denitrificatie vindt plaats door bacteriën, we mogen verwachten dat dit biologische proces sneller gaat bij hogere temperaturen. Denitrificatie vindt plaats in het grondwater, klimaatverandering kan mogelijk ook de grondwatertemperatuur beïnvloeden. Bense et al. (2004) vinden een grondwatertemperatuurstijging van 0,5-1 °C in de twintigste eeuw in Uden, Brabant. De temperatuurstijging relateren ze aan stijging van de luchttemperatuur over dezelfde periode. Het is waarschijnlijk dat dit alleen het bovenste grondwater betreft en niet geldt voor het gehele aquifer, maar aangezien nitraatreductie voornamelijk in het bovenste grondwater plaatsvindt is het mogelijk wel van invloed.

Rivett et al. (2008) geven een overzicht van de verschillende elementen die een rol spelen bij de denitrificatie van nitraat. Denitrificerende bacteriën komen praktisch overal voor. Bepalend voor de afbraak van nitraat is het zuurstofgehalte en de beschikbaarheid van een elektrondonor zoals organisch materiaal. In voorgaande hoofdstukken is beschreven dat voor zowel de grondwaterstand (hoofdstuk 4) als het organische stofgehalte (hoofdstuk 2) geen eenduidig bewijs is gevonden dat deze zullen veranderen bij klimaatverandering. Andere factoren zoals de nitraatconcentratie, nutriëntbeschikbaarheid, pH, temperatuur en de aanwezigheid van toxische stoffen lijken minder belangrijk te zijn. De auteurs schrijven dat meer onderzoek nodig is naar de optimale chemische, maar ook hydrologische condities voor de afbraak van nitraat in het veld alsook de invloed van bestrijdingsmiddelen op de denitrificerende bacteriën.

5.4

Pesticiden

Pesticiden hebben geen natuurlijke oorsprong en zijn het gevolg van het gebruik van bestrijdingsmiddelen in de landbouw. Naast het gebruik van pesticiden zijn de afbraak en het transport van pesticiden bepalend voor de hoeveelheid pesticiden in het grondwater.

Het effect van klimaatverandering op de pesticidenconcentratie en het transport hiervan is erg onzeker. Dit komt door de onzekerheid in de klimaatvoorspellingen, door de complexiteit van het natuurlijke milieu en, het belangrijkste, door de grote hoeveelheid klimaatgevoelige processen die elkaar beïnvloeden, versterken of opheffen.

Bloomfield et al. (2006) proberen het lot van pesticiden bij een veranderend klimaat te beschrijven door alle factoren die met pesticiden te maken hebben te beschrijven in een source-pathway-receptor analyse (bron-pad-ontvanger).

Bron

De invloed van het klimaat op de bronterm zijn klimaatgerelateerde veranderingen in de landbouw zoals de toegenomen teelt van bestaande gewassen (of de verandering van het aandeel van een bepaald gewas), het telen van andere gewassen die andere pesticiden gebruiken en veranderende fysische processen zoals een toenemende kans op erosie. Ook kan een verandering van klimaat effect hebben op het voorkomen van ziektes waardoor het gebruik van pesticiden kan veranderen.

Pad

Klimaatverandering kan invloed hebben op de verspreidingsweg waardoor uitspoeling van pesticiden naar bodem, oppervlaktewater en grondwater kan

veranderen. Dit zijn zowel effecten die direct op de stof werken (zoals verdamping en afbraak) als veranderende fysische bodemomstandigheden als veranderingen in de hydrologie. Uit de diverse factoren die gegeven zijn blijkt dat klimaatverandering zowel een positief als negatief effect kan hebben op de uitspoeling van pesticiden naar het grondwater. Door een hogere verdamping en afbraak neemt de pesticidenconcentratie in het grondwater af. Door de toegenomen buienintensiteit kan de infiltratie toenemen volgens Bloomfield et al. (2006), maar Boxall et al. (2010) schrijven juist dat de hogere intensiteit van de buien in de winter en de grote droogte in de zomer zal leiden tot verhoogde oppervlakkige afstroming waardoor pesticiden in het oppervlaktewater terechtkomen. De invloed van klimaatverandering op het grondwater als ontvanger zullen waarschijnlijk beperkt zijn (Bloomfield et al., 2006).

5.5 Zware metalen

Zware metalen binden zich in grote mate aan de bodem, hiervoor zijn het organische stofgehalte en de pH van de bodem van belang. In hoofdstuk 2 schreven we dat er in de literatuur geen consensus is of het organische stofgehalte van bodem zal toe- of afnemen. We hebben in de literatuur geen aanwijzingen gevonden dat de pH van de bodem zal veranderen als gevolg van klimaatverandering.

Visser et al. (2011) laten met een grondwatermodel voor de Keersop beek zien hoe de uitspoeling van zware metalen mogelijk wordt beïnvloed door klimaatverandering. De auteurs gaan ervan uit dat er in de toekomst jaarlijks minder neerslag zal vallen. 's Winters zal er iets meer neerslag vallen, 's zomers juist een stuk minder. Aangezien door de hogere temperaturen ook de verdamping toeneemt, nemen de auteurs aan dat de grondwateraanvulling zal afnemen en hiermee ook de afvoer van de Keersop beek. Aangezien de zware metalen (cadmium en zink) vooral in de bovenste laag van de bodem zitten heeft een daling van de grondwaterstand tot gevolg dat er minder zware metalen uitspoelen naar het oppervlaktewater.

Een verandering van organische stof gehalte is niet meegenomen in deze berekeningen. Ook is de aanname dat verdamping toeneemt en de grondwateraanvulling afneemt, hetgeen niet door iedereen wordt gedeeld zoals we al schreven in hoofdstuk 4. Bartholomeus et al. (2010) schrijven bijvoorbeeld dat door klimaatverandering het ook mogelijk is dat de vegetatie afneemt. Hierdoor neemt de evapotranspiratie af en daarmee de grondwateraanvulling weer toe.

6 Discussie, conclusies & aanbevelingen

6.1 Conceptueel model

Nadat we de verschillende aspecten van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit onderzocht hebben in de literatuur, willen we graag een kwalitatieve systeemschets geven van hoe klimaatverandering de grondwaterkwaliteit in zijn geheel beïnvloedt. Dit wordt ook wel een conceptueel model genoemd.

Een interessant voorbeeld van een conceptueel klimaat-grondwatermodel vinden we in Okkonen et al. (2010). Deze auteurs constateren dat het koppelen van klimaatmodellen met grondwatermodellen nog niet gebeurt. Zij geven een conceptueel model om de gevolgen van klimaatverandering op de hydrologie te beschrijven. In het model worden alle relevante factoren en hun interacties indicatief aangegeven (toename/afname) en de invloed op elkaar. Dit model beschrijft de situatie in Finland. Hier zijn bevroren bodems, sneeuwval en grondwateraanvulling vanuit peri-glaciale depressies belangrijk. Deze factoren spelen in Nederland geen rol. We hebben daarom op basis van het conceptueel model van Okkonen een eigen conceptueel model ontwikkeld voor de Nederlandse situatie (Figuur 6).

In het conceptuele model zijn alleen de primaire (temperatuur en neerslag) en secundaire effecten van klimaatverandering (rivierafvoer en zeespiegelstijging) meegenomen. Afgeleide klimaateffecten zijn zo veel mogelijk weggelaten zoals het aanpassen van de landbouw door klimaatverandering. Klimaatverandering werkt (uiteraard) door op alle parameters in het conceptueel model. Van de parameters heeft alleen het organische stofgehalte van de bodem een terugkoppeling met het klimaat. Hieronder worden de verschillende parameters gegeven en de directe invloed van klimaat hierop en de (indirecte) invloed van de andere parameters, in Figuur 6 wordt dit aangegeven met pijlen. Een '+' betekent een toename, een '-' betekent een afname, '+/-' wil zeggen dat de effecten onbekend zijn.

Hydrologie

Directe invloed van klimaat op de hydrologie

De invloed van klimaat op de grondwateraanvulling is niet eenduidig en in ieder geval niet wetenschappelijk bewezen. Dat de afvoer van rivieren zal afnemen in de zomer wordt algemeen onderkend.

Indirecte invloed van klimaat op de hydrologie

De grondwateraanvulling kan ook door de bodemprocessen beïnvloed worden als de bodem minder doorlatend wordt door afnemende organische stofgehalte of juist toeneemt doordat er scheuren in de grond komen.

Bodem

Directe invloed van klimaat op de bodem

Het is niet goed bekend wat de effecten van klimaatverandering op het organische stofgehalte van de bodem zullen zijn. Organische stof is een van de belangrijkste chemische bodemparameters wat betreft grondwaterkwaliteit. Veel auteurs vermoeden een afname, maar dit wordt niet overtuigend bewezen en bovendien ook tegengesproken.

Mogelijk zal de bodem fysisch gezien veranderen. Het gevaar op erosie door intensievere regenbuien is groter en droogtes kunnen leiden tot scheuren in de bodem.

Indirecte invloed van klimaat op de bodem

Grondwateraanvulling heeft invloed op de bodem omdat de bodem kan vernatten of juist verdrogen.

Oppervlaktewaterkwaliteit

Directe invloed van klimaat op de oppervlaktewaterkwaliteit

Klimaat is van invloed op de oppervlaktewaterkwaliteit omdat de temperatuur van het oppervlaktewater toeneemt. De oppervlakkige afspoeling van regen naar het oppervlaktewater kan ook toenemen.

Indirecte invloed van klimaat op de oppervlaktewaterkwaliteit

De kwaliteit van het oppervlaktewater wordt ook bepaald door de afvoer van rivieren (hydrologie) en de uitspoeling vanuit de bodem.

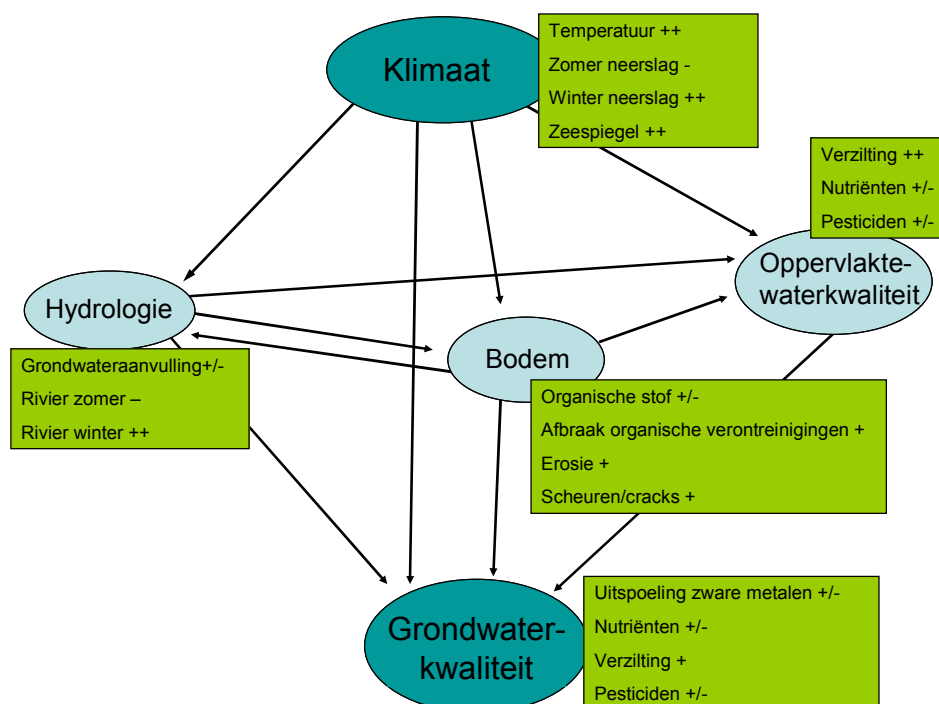
Grondwaterkwaliteit

Directe invloed van klimaat op de grondwaterkwaliteit

De directe invloeden van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit zijn gering.

Indirecte invloed van klimaat op de grondwaterkwaliteit

Zowel de bodem, de oppervlaktewaterkwaliteit als de hydrologie hebben invloed op de grondwaterkwaliteit maar aangezien het voor de meeste factoren onzeker is of ze toe- of afnemen kunnen we niet vaststellen wat voor effect het heeft. Een uitzondering hierop is verzilting, men gaat er in de literatuur van uit dat op sommige plaatsen het grondwater zouter zal worden.



Figuur 6: Conceptueel model van de invloed van klimaat op de grondwaterkwaliteit

6.2 Conclusies

In dit rapport hebben we een literatuuroverzicht gemaakt van de beschikbare kennis van de invloed van het klimaat op het grondwater.

Aangezien de invloed van het klimaat op de grondwaterkwaliteit deels via de bodem het grondwater zal bereiken is daarbij ook het effect van klimaatverandering op de bodem meegenomen. Ook hebben we in de studie de invloed van klimaat op grondwateraanvulling en oppervlaktewaterkwaliteit meegenomen.

Deze studie laat zien dat de mogelijke invloed van klimaatverandering op bodem en grondwater nog zeer onzeker is. Er zijn diverse effecten te verwachten van de veranderingen in temperatuur en neerslag. Deze verschillende effecten werken in veel gevallen tegengesteld. Omdat de dimensies van de effecten niet bekend zijn, is de invloed op de hydrologie moeilijk in te schatten. Grondwateraanvulling bijvoorbeeld kan afnemen maar ook toenemen bij een veranderend klimaat.

Hetzelfde geldt voor het organische stofgehalte in bodem. Er zijn aanwijzingen dat het sterk kan afnemen, maar het is ook mogelijk dat het kan toenemen. Omdat we deze belangrijke randvoorwaarden voor de grondwaterkwaliteit (bodem en grondwateraanvulling) niet goed kunnen voorspellen is de ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit in Nederland nog onzeker.

Wel verwachten we dat een toenemende verzilting van de grote rivieren en een lagere afvoer hiervan in de zomer negatieve effecten zal hebben op de grondwaterkwaliteit.

6.3 Aanbevelingen

Een mogelijke manier om de range aan potentiële veranderingen in de bodem- en grondwaterkwaliteit nader te onderzoeken is met behulp van modelsimulaties. Modelsimulaties bieden de mogelijkheid om de invloed van klimaatverandering op bodemstructuur en samenstelling te vertalen naar bodem- en grondwaterkwaliteit. Door een groot aantal scenario's te verkennen kan relatief eenvoudig een beeld worden gekregen onder welke omstandigheden klimaatverandering de grondwaterkwaliteit zodanig zal beïnvloeden zodat het beleid hier in de toekomst rekening mee kan houden (bijvoorbeeld in het kader van klimaatadaptatie).

Wij adviseren om een groot aantal mogelijke klimaatscenario's door te rekenen waarbij belangrijke parameters worden gevarieerd zoals hydrologische situatie, nutriënten, organische stofgehalte, de grondwaterspiegel voor verschillende typen bodem, zand, veen, klei, verschillende landgebruiksvormen als stedelijk, agrarisch, natuur alsook bij een verschillende mate van verontreiniging. Hiermee kunnen we bepalen wanneer het beleid mogelijkerwijs rekening dient te houden met de invloed van klimaatverandering op de grondwaterkwaliteit.

Literatuurlijst

- Absil, L.L.M. (1997) Grondwaterkwaliteit in stedelijk gebied en op locaties met oeverinfiltratie; twee selecties uit het Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit, Volume Rapport nummer 714871001, RIVM.
- Bartholomeus, R., B. Voortman, en F. Witte (2010) De toekomstige grondwateraanvulling [thema Grondwater]: H twee O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling, v. 43, p. 35-37.
- Beek, C.L. van (2007) Nutrient losses from grassland on peat soil: Wageningen, WUR.
- Bellamy, P.H., P.J. Loveland, R.I. Bradley, R.M. Lark en G.J.D. Kirk (2005) Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003: *Nature*, v. 437, p. 245-248.
- Bense, V.F. en H. Kooi (2004) Temporal and spatial variations of shallow subsurface temperature as a record of lateral variations in groundwater flow: *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, v. 109, p. B04103 1-13.
- Bloomfield, J.P., R.J. Williams, D.C. Gooddy, J.N. Cape en P. Guha (2006) Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater-a UK perspective: *Science of the Total Environment*, v. 369, p. 163-177.
- Boxall, A., A. Hardy, S. Beulke, T. Boucard, L. Burgin, P. Falloon, P. Haygarth, T. Hutchinson, S. Kovats, G. Leonardi, L. Levy, G. Nichols, S. Parsons, L. Potts, D. Stone, E. Topp, D. Turley, K. Walsh, E. Wellington en R. Williams (2010) Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture: Impactos das mudanças climáticas sobre a exposição humana indireta a elementos patogênicos e químicos da agricultura, v. 15, p. 743-756.
- Broers, H.P. (2011) minutes van de bijeenkomst van de Werkgroep Grondwater in oktober 2010, Brugge.
- Bunce, J.A. (2004) Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions: *Oecologia*, v. 140, p. 1-10.
- Davidson, E.A. en I.A. Janssens (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change: *Nature*, v. 440, p. 165-173.
- FAO-UNESCO (2000) Soil Map of the World, digitized by ESRI, in USDA-NRCS, ed.: Washington D.C., Soil Survey Division, World Soil Resources, p. Soil Climate Map.
- Fraters, B., L.J.M. Boumans T.C. van Leeuwen, J.W. Reijs (2007) De uitspoeling van het stikstofoverschot naar grond- en oppervlaktewater op landbouwbedrijven, RIVM Rapport 680716002/2007, RIVM.
- Gaast, J.W.J. van der, H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon (2009) Effecten van klimaatverandering op de watervraag in de Nederlandse groene ruimte: Wageningen, Alterra.
- Hellmann, F., J. Vermaat (2011) Het effect van klimaatverandering op de waterhuishouding en nutriëntenstromen in veenweidepolders: H twee O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling, v. 44, p. 25-28.
- Houghton, R.A. (2007) Balancing the global carbon budget, Volume 35, p. 313-347.

- Hunink, J., M. Boerefijn en J. Heijkers (2008) Effecten van klimaatverandering op het grondwatersysteem in Utrecht: H twee O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling, v. 41, p. 29-31.
- Janssen, L.H.J.M., V.R. Okker en J. Schuur (2006) Welvaart en leefomgeving, achtergronddocument, Centraal Planbureau, het Milieu- en Natuurplanbureau en het Ruimtelijk Planbureau.
- KNMI (2006) Klimaat in de 21e eeuw.
- KNMI (2009) Klimaatverandering in Nederland, aanvullingen op de KNMI'06 scenario's.
- Leunk, I., S. de Rijk (2006) Kaderrichtlijn Water maatregelen ten aanzien van de bescherming van winningen onder invloed van infiltrerend oppervlaktewater, KIWA.
- Locher, W.P., H. de Bakker (1990) Bodemkunde van Nederland.
- Okkonen, J., M. Jyrkama en B. Kløve (2010) A conceptual approach for assessing the impact of climate change on groundwater and related surface waters in cold regions (Finland): Une approche conceptuelle pour évaluer les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines et sur les eaux de surface dont elles dependent dans des régions froides (Finlande), v. 18, p. 429-439.
- Paulissen, M.P.C.P., R.C. Nijboer en P.F.M. Verdonschot (2007) Grondwater in perspectief; een overzicht van hydrochemische watertypen in Nederland: Wageningen, Alterra.
- Reijnders, H.F.R., G. van Drecht, H.F. Prins, J.J.B. Bronswijk, L.J.M. Boumans (2004) De kwaliteit van ondiep en middeldiep grondwater in Nederland in het jaar 2000 en verandering daarvan in de periode 1984-2000: Bilthoven, RIVM.
- Rivett, M.O., S.R. Buss, P. Morgan, J.W.N. Smith en C.D. Bemment (2008) Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes: Water Research, v. 42, p. 4215-4232.
- Schimel, D.S., J.I. House, K.A. Hibbard, P. Bousquet, P. Ciais, P. Peylin, B.H. Braswell, M.J. Apps, D. Baker, A. Bondeau, J. Canadell, G. Churkina, W. Cramer, A.S. Denning, C.B. Field, P. Friedlingstein, C. Goodale, M. Heimann, R.A. Houghton, J.M. Melillo, B. Moore Iii, D. Murdiyarso, I. Noble, S.W. Pacala, I.C. Prentice, M.R. Raupach, P.J. Rayner, R.J. Scholes, W.L. Steffen en C. Wirth (2001) Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems: Nature, v. 414, p. 169-172.
- Schoumans, O.F., J. Willems & G van Duinhoven (2008) 30 vragen en antwoorden over fosfaat in relatie tot landbouw en milieu. Wageningen, in Alterra, ed., p. 53.
- Sleutel, S., S. de Neve en G. Hofman (2003) Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland: Soil Use and Management, v. 19, p. 166-171.
- Smith, P., S.J. Chapman, W.A. Scott, H.I.J. Black, M. Wattenbach, R. Milne, C.D. Campbell, A. Lilly, N. Ostle, P.E. Levy, D.G. Lumsdon, P. Millard, W. Towers, S. Zaehle en J.U. Smith (2007) Climate change cannot be entirely responsible for soil carbon loss observed in England and Wales, 1978-2003: Global Change Biology, v. 13, p. 2605-2609.
- Smith, P., C. Fang, J.J.C. Dawson en J.B. Moncrieff (2008) Impact of Global Warming on Soil Organic Carbon, Volume 97, p. 1-43.
- Smith, W.N., B.B. Grant, R.L. Desjardins, B. Qian, J. Hutchinson en S. Gameda (2009) Potential impact of climate change on carbon in agricultural soils in Canada 2000-2099: Climatic Change, v. 93, p. 319-333.
- Stuurman, R., G. Oude Essink (2006) Monitoring zoutwaterintrusie naar aanleiding van de Kaderrichtlijn Water 'verzilting door zoutwaterintrusie en chloridevervuiling', TNO bouw en ondergrond.

- Stuyfzand, P.J., F. Luers (1996) Gedrag van milieugevaarlijke stoffen bij oeverinfiltratie en kunstmatige infiltratie: effecten van bodempassage gemeten langs stroombanen, Mededeling / KIWA (125) Nieuwegein.
- Ter Voorde, M., J. Velstra (2009) Leven met zout water, Acacia Water, Leven met water en STOWA.
- Trumbore, S.E. en C.I. Czimczik (2008) Geology: An uncertain future for soil carbon: Science, v. 321, p. 1455-1456.
- Van Beek, C. (2007) Nutrient losses from grassland on peat soil: Wageningen, WUR.
- Van der Aa, N.G.F.M., G.J. Kommer, G.M. de Groot, J.F.M. Versteegh (2008) Geneesmiddelen in bronnen voor drinkwater, RIVM.
- Van Vliet, M.E., A. Vrijhoef, L.J.M. Boumans, E.J.W. Wattel-Koekkoek (2010) De kwaliteit van ondiep en middeldiep grondwater in Nederland, RIVM, p. 196.
- Van Wesemael, B., K. Paustian, J. Meersmans, E. Goidts, G. Barancikova en M. Easter (2010) Agricultural management explains historic changes in regional soil carbon stocks: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 107, p. 14926-14930.
- Verweij, W., J. van der Wiele, I. van Moorselaar, E. van der Grinten (2010) Impact of climate change on water quality in the Netherlands, RIVM.
- Visser, A., J. Kroes M. van Vliet, S. Blenkinsop, H.P. Broers (2011) Climate change impact on the leaching of a heavy metal contamination in a small lowland catchment, Redbook of the GC10, EAWAG Zurich.
- Vrijhoef, A., L.J.M. Boumans (2011) A method for standardising groundwater nitrate concentrations, Redbook of the GC10, EAWAG Zurich.
- Zwolsman, G., A. Doomen (2005) Waterkwaliteit van de Rijn en de Maas bij (extreem) lage afvoeren, Delft Cluster.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl