



Ronald Loeve, FutureWater
 Theo Claassen, Wetterskip Fryslân,
 Peter Droogers, FutureWater

Klimaatverandering en waterkwaliteit

Dat het klimaat in de afgelopen 100 jaar is veranderd, is een vaststaand feit. De zes warmste jaren sinds het KNMI begon met waarnemingen, vonden alle plaats in de afgelopen tien jaar⁴⁾. Dit jaar waren juli en september de warmste maanden ooit en was de maand augustus de natste in 100 jaar. Klimaatverandering en waterkwaliteit genieten al veel belangstelling. De invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit werd tot nu toe echter amper belicht. Daarom heeft Wetterskip Fryslân een verkennende studie geïnitieerd. Een combinatie van analyse van metingen met de kans op voorkomen in de toekomst maakt het mogelijk om relaties tussen klimaat en waterkwaliteit af te leiden. Daarnaast is met behulp van multi-lineaire regressie de relatie tussen klimaatparameters (temperatuur, neerslag en wind) en waterkwaliteit gekwantificeerd. Deze relatie, gekoppeld aan de KNMI'06-scenario's, geven kwantitatieve verwachtingen voor de toekomst.



Internationaal wordt veel onderzoek verricht naar klimaatverandering, waarbij waarnemingen en modellen bijdragen aan een snel groeiend inzicht in processen die het klimaat doen veranderen. Belangrijk in de projecties voor het toekomstige klimaat zijn de klimaatmodellen, die gebruikt worden om op wereldschaal projecties voor het toekomstige klimaat te genereren. Het KNMI heeft deze mondiale projecties in 1998 en dit jaar vertaald naar de schaal van Nederland⁷⁾. De eerste worden

aangeduid als de WB21-scenario's, de laatste als de KNMI'06-scenario's. Voor een analyse van de verschillen tussen beide klimaat-scenario's wordt verwezen naar het KNMI en Droogers en Van den Hurk¹⁾.

De invloed van klimaatverandering op waterkwaliteit krijgt in Nederland de volle aandacht. Hierop wordt al geanticipeerd met het Waterbeleid 21ste eeuw (WB21) en het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). Over de effecten van klimaatveranderingen

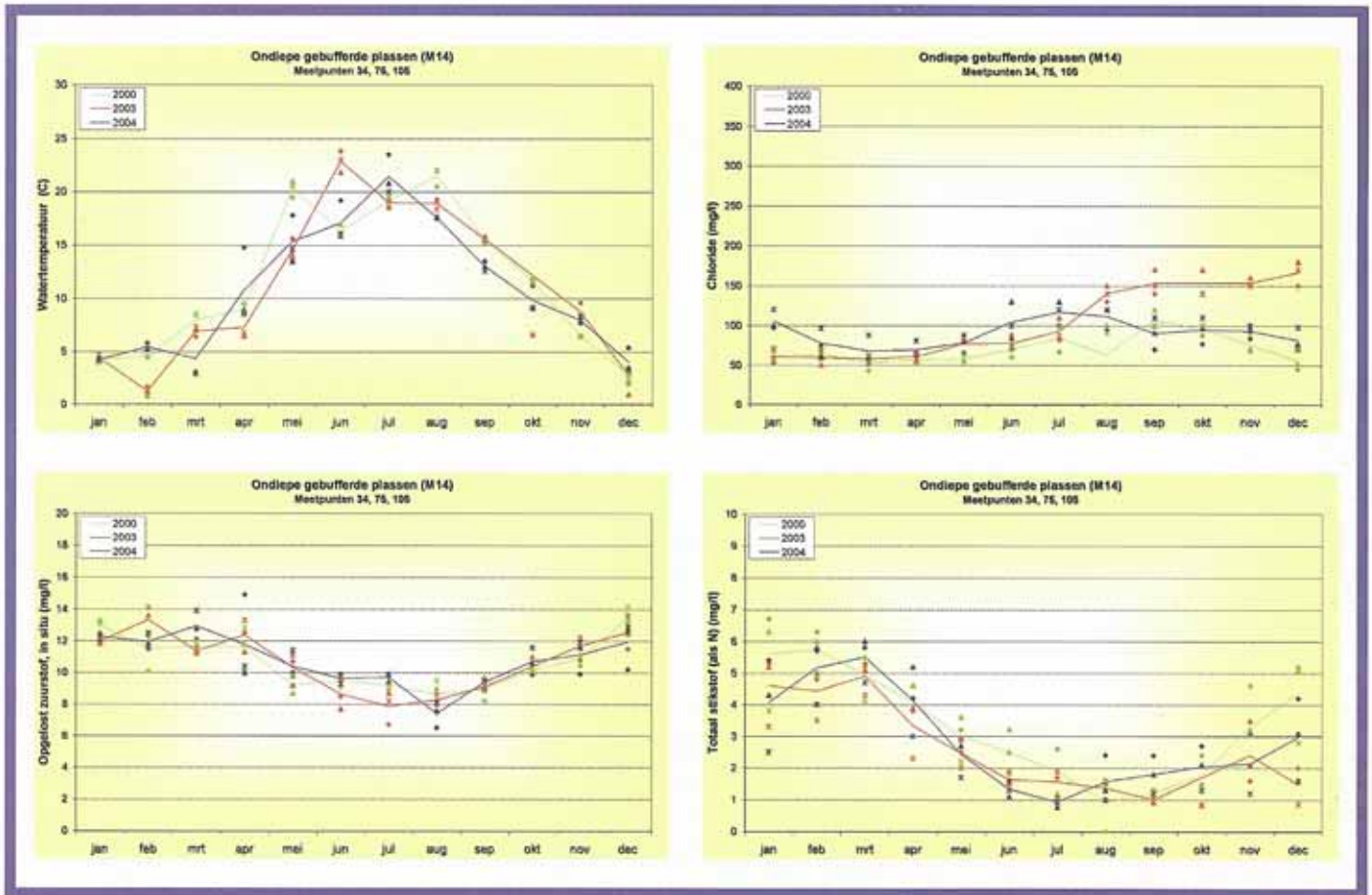
op rivierafvoeren en zeewaterstanden is veel gepubliceerd. Het lijkt duidelijk dat door klimaatverandering rivierafvoeren in de zomer afnemen en in de winter groter zullen zijn. Ook de kansen op extreem hoge of lage afvoeren nemen toe. Ook is duidelijk dat door meer perioden met extreme neerslag de wateroverlast in steden zal toenemen en er door overstortingen vanuit het rioolstelsel meer afvalwater rechtstreeks op het oppervlaktewater zal komen.

Geringe aandacht voor waterkwaliteit

Waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering zijn tot op de dag van vandaag in de discussies over klimaatverandering onderbelicht gebleven. Er is nog weinig onderzoek verricht naar de effecten van klimaatverandering en ook op beleidsniveau bestaat nog weinig aandacht voor de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit.

Dit nog onontgonnen terrein speelt op meerdere niveaus:

- Op Europees niveau, in het rapport van de European Environment Agency²⁾ 'Impacts of Europe's changing climate: an indicator-based assessment', worden de woorden waterkwaliteit en aquatisch niet één keer genoemd. In de definitie van 'goede ecologische toestand' in de Kaderrichtlijn water lijkt klimaatverandering geen rol te spelen. Op den duur zou de definitie van 'goede ecologische toestand' kunnen gaan



Afb. 1. Chemische waterkwaliteitsparameters in enkele Friese ondiepe gebufferde plassen (M14) in 2000, 2003 en 2004.

verschuiven als gevolg van klimaatverandering³¹;

- Op nationaal niveau, in het hoofdrapport aan de Tweede Kamer 'Klimaatverandering en klimaatbeleid: inzicht in keuzes voor de Tweede Kamer'³², worden waterkwaliteit en aquatische ecologie niet betrokken bij het overzicht van klimaateffecten. Recentelijk heeft de ministerraad ingestemd met het nationaal programma Adaptatie Ruimte en Klimaat (ARK) met als doel het klimaatbestendig maken van de ruimtelijke inrichting van Nederland. In het initiële plan van aanpak worden waterkwaliteit en ecologie genegeerd. In een recente brief van het ministerie van VROM aan de deelnemende waterschappen wordt echter duidelijk gesteld dat de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit tot nu toe onderbelicht zijn gebleven.

Deze geringe aandacht was voor Wetterskip Fryslân aanleiding om een verkennende studie te laten uitvoeren. Aspecten die daarbij beschouwd zijn, zijn de versterkende effecten op eutrofiëring, verstoring van aquatische levensgemeenschappen en voedselketens, vergrote kansen op exoten, ziekten en plagen en plaatselijke waterkwaliteitsverslechtering⁹.

Het verkregen inzicht in de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit zal worden betrokken bij nieuwe beheerplannen, het formuleren van waterkwaliteitsdoelen, evaluatiestudies en (voor zover relevant) bij het reguliere beheer.

Gegevens en analyse

Naast een uitgebreid literatuuronderzoek, waarin de effecten van klimaatverandering op verschillende waterkwaliteitsparameters worden beschreven, is een kwantitatieve analyse uitgevoerd met waterkwaliteitsgegevens van Wetterskip Fryslân³³. Twee typen analyses zijn uitgevoerd: een innovatieve aanpak waarin is gekeken naar trends in het verleden en de kans op voorkomen in de toekomst is beschreven én een multi-lineaire regressieanalyse om de verbanden te onderzoeken tussen drie klimaatparameters (neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid) en acht waterkwaliteitsparameters. De gevonden relaties zijn geëxtrapoleerd naar de toekomst.

Hierbij is gebruik gemaakt van waterkwaliteitsgegevens van de Friese watersystemen in de periode januari 1999-juni 2006. In totaal 19 meetpunten zijn meegenomen die representatief geacht worden voor acht KRW-watertypen. Daarbij is gebruik gemaakt van een beperkt aantal parameters per watertype met een maandelijkse meetfrequentie.

Trends uit het verleden

De jaren 2000, 2003 en 2004 zijn gekozen voor verdere analyse. Deze keuze was allereerst gebaseerd op de hoeveelheid neerslag in de betreffende jaren; het jaar 2000 is een gemiddeld jaar, 2003 een droog jaar en 2004 een nat jaar. Ook wat betreft temperatuur zijn deze jaren representatief. De zomer van 2003 was extreem warm. De zomer van 2000 komt goed overeen met het langjarig gemiddelde (1951-2005).

Parameterwaarden per meetpunt en het gemiddelde per KRW-watertype zijn op

maandbasis voor de drie verschillende jaren geanalyseerd. Hoewel de meetpunten specifiek zijn gekozen als zijnde representatief voor het bepaalde watertype, is een aanzienlijke spreiding van de parameterwaarden binnen een KRW-watertype aanwezig. Toch is voor een aantal parameters een duidelijke trend aanwezig:

- De watertemperatuur stijgt in alle KRW-watertypen als de luchttemperatuur stijgt;
- Het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) en de chlorideconcentraties stijgen in de warme en droge zomer van 2003 en blijven hoog in de herfst van 2003;
- De zuurstofconcentratie daalt zoals verwacht bij hogere watertemperaturen in de zomer in alle KRW-watertypen. Voor een aantal watertypen is echter geen eenduidige trend gevonden. Andere factoren, zoals biologische processen, spelen hier ook een rol. Met de huidige meetgegevens en -frequentie is het niet mogelijk om de effecten van een hogere temperatuur en van biologische processen te onderscheiden;
- De concentratie totaalstikstof daalt in de zomer. Het effect van de hogere temperaturen resulteert in een sterke denitrificatie en leidt in de zomer tot lagere stikstofconcentraties. Ook bestaat een correlatie tussen hogere seizoensneerslag en een hogere concentratie totaalstikstof, bijvoorbeeld in de herfst van 2000;
- De concentratie totaalfosfaat vertoont over het algemeen geen eenduidige trend binnen en tussen de verschillende jaren. In een aantal KRW-watertypen is sprake van iets lagere concentraties in de zomer.

Voor het belangrijkste KRW-watertype in Friesland (ondiepe gebufferde plassen, M14) worden in afbeelding 1 de metingen weergegeven voor watertemperatuur, chloride, opgelost zuurstof en totaalstikstof. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni-augustus) ligt in 2003 circa 1,6°C hoger dan in 2000 en 2004. De chlorideconcentratie stijgt in de zomer van 2003 ook boven de waarden in de jaren 2000 en 2004 en blijven hoger de rest van het jaar. In de zomer van 2003 is de gemiddelde chlorideconcentratie slechts acht procent hoger dan het gemiddelde van 2000 en 2004; de extreme stijging van de concentratie vindt echter pas plaats in augustus. De gemiddelde chlorideconcentraties in de herfst en winter van 2003 zijn anderhalf keer zo hoog als in 2000 en 2004. De hoeveelheid opgelost zuurstof toont de verwachte trend: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgelost zuurstof. In de zomer is de zuurstofconcentratie lager dan in de winter en in 2003, met de warmste zomer is de gemiddelde hoeveelheid opgeloste zuurstof circa tien procent lager dan in de zomers van 2000 en 2004. De metingen van totaalstikstof tonen een duidelijke trend: voor alle jaren geldt dat de gemeten waarden in de zomer lager zijn dan in de winter. Het effect van de hogere temperaturen resulterend in een sterke denitrificatie leidt in de zomer tot lagere concentraties totaalstikstof. Ook algengroei draagt bij aan lagere zomerse nutriëntengehalten. Daarnaast speelt de winterse uitslag van overtollig polderwater op de boezem een belangrijke rol. Door de hoge stikstofgehalten van het uitgemalen polderwater vertoont het boezemwater maxima in de winter. In de gemeten zomerwaarden tussen de verschillende jaren is geen verschil te zien. De waarden in de herfst

van 2000 zijn hoger dan in 2003 en 2004. Dit is te verklaren door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004; bij hogere neerslag kunnen de stikstofvrachten toenemen door uitspoeling. Ook was de herfst van 2000 warmer dan de herfst van 2003 en 2004, resulterend in extra denitrificatie.

De effecten van de warme zomer van 2003 zijn in detail geanalyseerd voor de verschillende watersystemen. Met behulp van de huidige meteorologische gegevens en de verschillende KNMI'06-klimaatscenario's is het mogelijk om te berekenen hoe vaak een jaar of zomer, zoals 2003, in de toekomst zal voorkomen.

Wordt gekeken naar de gemiddelde temperaturen, dan zien we dat:

- In 2050 de winters in scenario's G en G+ vergelijkbaar zijn met de zachte winter van 2004. Winters in de scenario's W gaan lijken op de zachte winter van 2000, terwijl de winter in het scenario W+ nog warmer wordt dan de zachte winter van 2000;
- De warme zomer van 2003 wordt in 2050 een standaardzomer in de klimaatscenario's G+ en W. De zomers in het KNMI'06-klimaatscenario's G+ zijn warmer dan de warme zomer van 2003, terwijl alleen in het scenario G de gemiddelde zomertemperatuur iets lager (0,9°C) ligt dan de gemiddelde zomertemperatuur van 2003;
- Als we kijken naar het aantal warme, zomerse en tropische dagen, dan blijkt dat in 2050 het jaar 2003 bijna een standaardjaar wordt in de KNMI'06-scenario's G+, W en W+. Het KNMI'06-scenario G is iets koeler. De waterkwaliteitseffecten van de warme zomer van 2003 komen in een toekomst met klimaat-

verandering veelvuldig voor en zullen zelfs zeer gebruikelijk zijn in een toekomstige normale zomer.

Multi-lineaire regressie

Om te onderzoeken of kwantitatieve verbanden bestaan tussen neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid én waterkwaliteitsparameters is een multi-lineaire regressie uitgevoerd (zie tabel 1). Daarbij is gebruik gemaakt van de meteorologische gegevens van het KNMI-station Leeuwarden. Hierbij is aangenomen dat deze gegevens representatief zijn voor het hele beheergebied van Wetterskip Fryslân.

De resultaten laten zien dat vooral de correlatiecoëfficiënt voor luchttemperatuur vaak statistisch significant is voor de verschillende waterkwaliteitsparameters. De correlatiecoëfficiënten voor neerslag zijn bijna allemaal niet significant. Mogelijk speelt het gebruik van de instantane meteorologische gegevens op de dag dat de waterkwaliteitsmeting is verricht hierbij een rol. De neerslag in de dagen voorafgaand aan de waterkwaliteitsmeting zal namelijk ook van invloed zijn op de verschillende geanalyseerde waterkwaliteitsparameters. Het gebruik van bijvoorbeeld de tiendaagse neerslagsom voorafgaande aan de waterkwaliteitsmeting zou mogelijk tot betere resultaten leiden. Ook voor de correlatiecoëfficiënt voor windsnelheid geldt dat ze zelden significant zijn voor de verschillende waterkwaliteitsparameters, behalve voor de watertemperatuur. Als voorbeeld zijn de resultaten van de multi-lineaire regressie voor de temperatuurcoëfficiënt gepresenteerd.

Uit tabel 1 blijkt dat vooral de coëfficiënten voor watertemperatuur, opgelost zuurstof en totaalstikstof significant en consistent zijn. Zuurgraad en totaalfosfaat tonen een consistente reeks coëfficiënten, al zijn ze minder vaak significant. De correlatiecoëfficiënten voor EGV en chlorideconcentratie vertonen een range aan verschillende waarden. Waarschijnlijk zijn sommige gevonden relaties locatie specifiek en zijn er mogelijk nog andere variabelen die niet zijn meegenomen in deze multi-lineaire regressie. Naast statistische significantie is ook de waarde van de correlatiecoëfficiënt van belang. Deze geeft aan hoe de waterkwaliteitsparameter reageert op een verandering van luchttemperatuur. Ten eerste is het teken van belang. Een positieve correlatiecoëfficiënt betekent een versterkend effect, een negatieve correlatiecoëfficiënt een afnemend effect. Ten tweede is de grootte van de correlatiecoëfficiënt van belang. Voor zuurgraad en totaalfosfaat zien we zeer lage coëfficiënten: een verandering in luchttemperatuur heeft nauwelijks effect op deze waterkwaliteitsparameters. Wat ook opvalt, is het geringe verschil in correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende KRW-watertypen voor een aantal waterkwaliteitsparameters. Zo lijkt de watertemperatuur, zuurgraad en totaalfosfaat in alle KRW-watertypen ongeveer hetzelfde te reageren op de luchttemperatuur. Voor totaalstikstof zijn wel verschillen te ontdekken tussen de verschillende watertypen: ondiepe laagveenplassen

Tabel 1. Temperatuurcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid voor Friese KRW watertypen.

KRW watertypen	meetpunt	temperatuur	elektrisch geleidingsvermogen	zuurgraad (in situ)	chloride	opgelost zuurstof (in situ)	zuurstof verzadiging	totaal stikstof (als N) (UV)	totaal fosfaat (als P) (UV)
		(in situ) °C	(in situ) us cm	(in situ) pH	(in situ) mg l	(in situ) mg l	(in situ) %	(in situ) mg l	(in situ) mg l
M1	11	1.00	3.35	0.01	1.59	-0.23	-0.86	-0.10	0.00
	37	1.02	-2.25	0.01	0.48	-0.09	0.54	-0.08	0.00
	147	1.14	3.88	0.02	0.66	-0.23	-0.39	-0.03	0.00
M3	627	0.97	2.47	0.01	0.13	-0.24	-0.63	-0.11	0.00
	39	1.06	-41.27	0.00	-5.28	-0.23	-0.25	-0.17	0.01
M7	106	1.05	11.49	0.04	2.78	-0.19	0.76	-0.17	0.00
	33	0.95	1.37	0.01	0.84	-0.23	-0.20	-0.17	-0.01
M8	92	1.13	0.76	0.02	0.45	-0.22	0.15	-0.09	0.00
	67	0.90	-7.03	0.02	-0.89		0.29	-0.11	0.00
M14	34	0.99	1.54	0.01	0.70	-0.21	0.22	-0.17	0.00
	105	0.96	0.05	0.02	0.03	-0.23	0.17	-0.07	0.00
	75	0.97	4.50	0.02	1.35	-0.22	0.13	-0.16	0.00
M25	261	0.89	3.78	-0.01	0.78	-0.33	-2.00	-0.04	0.01
	227	1.08	0.76	0.00	0.86	-0.26	-0.55	0.00	0.00
M30	128	1.08	5.51	0.01	0.68	-0.30	-0.94	-0.03	0.00
	15	1.04	-93.62	0.00	-19.08	-0.40	-1.77	-0.10	0.03
R5	136	0.96	36.38	0.00	19.02	-0.69	-3.02	0.02	-0.01
	3	1.06	24.20	0.01	11.88	-0.24	-0.04	-0.12	0.01
	264	0.97	5.37	0.02	0.30	-0.19	-0.44	-0.10	0.00

Groen: significant $p < 0,05$. Oranje: niet significant $p > 0,05$.



(M25) reageren het minst sterk (gemiddelde coëfficiënt: -0,02), terwijl grote diepe kanalen (M7) het sterkste reageren (gemiddelde coëfficiënt: -0,17). Hierbij moet worden opgetekend dat voor alle KRW-watertypen slechts een beperkt aantal meetpunten is gebruikt.

De multi-lineaire regressie correlatie-coëfficiënten vermenigvuldigd met de verwachte gemiddelde temperatuurstijging in de KNMI'06-klimaatscenario's geeft de verwachte waarden van waterkwaliteitsparameters. Tabel 2 geeft een voorbeeld voor de stijging van de watertemperatuur per watertype bij verschillende KNMI'06-klimaatscenario's (zomer 2050). Het eenduidige effect van klimaatverandering (temperatuurstijging) op de verschillende watertypen is bijna gelijk.

Conclusies

Hoewel de invloed van klimaatverandering op waterkwaliteit volop in de aandacht staat in Nederland, blijven de waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering in de discussies onderbelicht. Dit is deels te wijten aan het feit dat nog weinig bekend is over de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Wetterskip Fryslân heeft een eerste stap gezet om klimaatverandering

te betrekken bij analyses en beleid op het gebied van waterkwaliteit.

Uit literatuur en ook de analyse van de effecten van klimaatverandering op enkele waterkwaliteitsparameters in Friesland blijkt dat de beïnvloeding door klimaatverandering het meest coherent is voor fysische parameters, bijvoorbeeld watertemperatuur. Verwachte veranderingen in het chemische regime (bijvoorbeeld versnelde eutrofiëring, verlaagde zuurstofconcentratie) is minder coherent en is sterk afhankelijk van lokale condities. De effecten van klimaatverandering op nutriëntenvrachten zijn zeer gevoelig voor stroomgebiedkarakteristieken. Biologische veranderingen door klimaatverandering zijn door de complexe interacties moeilijk voorspelbaar. Kleine veranderingen in het klimaat kunnen dramatische effecten hebben. Ook hier geldt dat zonder een gedegen analyse van lokale waterkwaliteitsparameters geen specifieke uitspraken gedaan kunnen worden.

Analyse van trends uit het verleden geven een goede eerste indicatie van de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Deze analyse is echter meer beschrijvend en minder kwantitatief.

Multi-lineaire regressieanalyse van klimaat- en waterkwaliteitsparameters gekoppeld aan KNMI-scenario's geven bruikbare en kwantitatieve resultaten over de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Deze methode is zeer geschikt als een eerste quick scan naar de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit. In Friesland zijn alleen fysische en chemische waterkwaliteitsparameters geanalyseerd. De bruikbaarheid van deze methode voor biologische parameters is niet bekeken en kan, gezien de complexe interacties, mogelijk minder geschikt zijn.

Voor uitgebreidere analyses en het begrijpen van de verschillende onderliggende processen zijn waterkwaliteitsmodellen de methode om de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit te onderzoeken. Aanbevolen wordt om de relatie klimaatverandering en waterkwaliteit en de consequenties daarvan voor het waterbeheer in landelijk verband verder uit te diepen.

Tabel 2. Stijging watertemperatuur per KRW watertype bij verschillende KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050 (zomer).

KRW watertype	KRW code	gemiddelde correlatiecoëfficiënt $T_{lucht} - T_{water}$	watertemperatuur stijging (°C)			
			G	G+	W	W+
Gebufferde sloten	M1	1,05	0,9	1,5	1,8	2,9
Gebufferde (regionale) kanalen	M3	1,01	0,9	1,4	1,7	2,8
Grote diepe kanalen	M7	1,00	0,9	1,4	1,7	2,8
Gebufferde laagveensloten	M8	1,01	0,9	1,4	1,7	2,8
Ondiepe gebufferde plassen	M14	0,97	0,9	1,4	1,6	2,7
Ondiepe laagveenplassen	M25	1,02	0,9	1,4	1,7	2,9
Zwak brakke wateren	M30	1,02	0,9	1,4	1,7	2,9
Langzaam stromende rivier midden/benedenloop op zand	R5	0,97	0,9	1,4	1,7	2,7

Literatuur

- 1) Droogers P. en B. van den Hurk (2006). Waterbeheer en de nieuwe KNMI-klimaatscenario's. H₂O nr. 12, pag. 25-28.
- 2) EEA (2004). Impacts of Europe's changing climate: an indicator-based assessment. Rapport nr. 2.
- 3) Eisenreich S. (eds) (2005). Climate change and the European water dimension. A report to the European water directors. EU-rapport 21553.
- 4) KNMI (2003). De toekomst van het klimaat in Nederland.
- 5) Loeve R., P. Droogers en J. Veraart (2006). Klimaatverandering en waterkwaliteit. FutureWater. In opdracht van Wetterskip Fryslân.
- 6) Rooijers F., J. Verbeek, R. Hutjes, I. de Keizer, S. Slingerland, J. Faber, R. Wit, R. van Dorland, A. van Ulden, P. Kabat en E. van Ierland (2004). Klimaatverandering klimaatbeleid. Achtergrondrapport. Inzicht in keuzes voor de Tweede Kamer. CE in samenwerking met KNMI en Wageningen Universiteit.
- 7) Van den Hurk B., A. Klein Tank en J. Bessembinder (2006). Nieuwe klimaatscenario's beter onderbouwd door het KNMI. H₂O nr. 12, pag. 8-9.