

Klimaatverandering en waterkwaliteit

Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân



Omslagfoto's: Blauwalgen. Bron: Laboratorium Wetterskip Fryslân
Botulisme. Bron: Botulisme folder Wetterskip Fryslân

Klimaatverandering en waterkwaliteit

augustus 2006

Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân
Uitvoerder: FutureWater

Begeleiders: T. Claassen (Wetterskip Fryslân)
Projectgroep klimaatverandering en waterkwaliteit
Wetterskip Fryslân, Postbus 36, 8900 AA Leeuwarden

Auteurs: R. Loeve (FutureWater)
P. Droogers (FutureWater)
J. Veraart (Alterra)

Voorwoord

Het voor u liggende rapport is opgesteld in opdracht van Wetterskip Fryslân en beschrijft de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering zijn tot op de dag van vandaag in de discussies over klimaatverandering in Nederland onderbelicht gebleven. Wetterskip Fryslân wil de op dit moment beschikbare informatie zodanig ordenen en presenteren dat het bewustzijn voor het belang van deze aspecten toeneemt binnen het waterschap en in de bestuurlijke afwegingen meegewogen kan worden. Het belangrijkste middel om de beschikbare informatie te vergaren is het in deze studie uitgevoerde literatuuronderzoek. Additioneel zijn waterkwaliteitsgegevens van Wetterskip Fryslân geanalyseerd zodat ook nog indicatieve kwantitatieve uitspraken gedaan kunnen worden over de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit in het beheergebied van Wetterskip Fryslân.

Een onderzoek naar de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit lijkt als geroepen te komen. Tijdens deze studie maakten we de heetste maand juli sinds het begin van de temperatuurregistratie van het KNMI in 1706 mee. In Fryslân is deze zomer botulisme en een hoge concentratie van blauwalgen geconstateerd.

De studie is tot stand gekomen met behulp van belangrijke bijdragen van projectgroep klimaatverandering en waterkwaliteit: Dhr. Theo Claassen, Dhr. Michiel Bootsma, Mw. Jeannet Bijleveld, Dhr. Harrie Kiewiet, Dhr. Pier Schaper en Dhr. Roelof Veeningen werkzaam bij Wetterskip Fryslân. Daarnaast heeft Mw. Froukje Grijpstra (Wetterskip Fryslân) een grote hoeveelheid waterkwaliteitgegevens geleverd. Allen worden bedankt voor de prettige en waardevolle samenwerking.



Ronald Loeve

FutureWater
Generaal Foulkesweg 28
6703 BS Wageningen
tel: 0317 460050
email: info@futurewater.nl
web: www.futurewater.nl

Samenvatting

De invloed van klimaatverandering op waterkwaliteit staat vol in de aandacht in Nederland. Waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering zijn tot op de dag van vandaag in de discussies over klimaatverandering in Nederland onderbelicht gebleven. Dit is deels te wijten aan het feit dat er nog weinig bekend is over de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Echter er zijn wel indicaties te ontleen aan effecten van extreme weersomstandigheid op de waterkwaliteit in het verleden.

In deze studie is een uitgebreid literatuuronderzoek uitgevoerd en zijn voor een beperkt aantal waterkwaliteitsparameters metingen geanalyseerd voor het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Ook is er een set van relevante vragen opgesteld die in een mogelijke vervolgstudie kunnen worden vertaald naar toekomstig beleid en maatregelen. Van de drie in deze studie onderzochte *drivers* voor veranderingen in waterkwaliteit; luchttemperatuur, neerslag en wind, blijkt temperatuur het meeste effect te hebben op de waterkwaliteit gevolgd door neerslag. Over wind als *driver* voor veranderingen in waterkwaliteit is weinig literatuur gevonden en ook de analyse in Fryslân toont weinig correlaties. Uit de literatuur en ook de analyse van de effecten van klimaatverandering op de verschillende waterkwaliteitsparameters in Fryslân blijkt dat de beïnvloeding door klimaatverandering het meest coherent is voor fysische parameters (b.v. watertemperatuur). Verwachte veranderingen in het chemische regime (b.v. versnelde eutrofiëring) is minder coherent en is sterk afhankelijk van lokale condities. Biologische veranderingen door klimaatverandering zijn door de complexe interacties inherent onvoorspelbaar. Kleine veranderingen in het klimaat kunnen dramatische effecten hebben.

De volgende effecten van temperatuurstijging, neerslag en droogte op verschillende waterkwaliteitsparameters zijn gevonden:

- Uit metingen blijkt dat een hogere luchttemperatuur resulteert in een hogere watertemperatuur. Daarnaast beschrijft de literatuur dat verhoogde straling tot een verhoging van de watertemperatuur leidt.
- De literatuur beschrijft de mogelijkheid van een stijging van de alkaliniteit door klimaatverandering. Echter bij de analyse van de waterkwaliteitsparameters in Fryslân is geen eenduidige relatie gevonden.
- Het zuurstofgehalte wordt duidelijk beïnvloed door een hogere watertemperatuur; bij een hogere watertemperatuur kan er minder zuurstof oplossen in het water.
- Een hogere temperatuur resulteert over het algemeen in lagere stikstofconcentraties.
- Hogere neerslag leidt tot stijgende totaal stikstofconcentraties in het water door uitspoeling en oppervlakkige afstroming vanuit landbouwgebieden.
- Fosfaatconcentraties in het oppervlaktewater worden vooral beïnvloed door neerslag. Een toename van de netto neerslag zal leiden tot een toename in de fosfaatconcentraties.
- Hogere grondwaterstanden leiden tot een hogere concentratie van fosfaten in het oppervlaktewater in stroomgebieden met veel landbouw en een geschiedenis van bemesting.
- De chlorideconcentraties in de droge zomer van 2003, met extreem lage afvoeren in de grote rivieren stijgen aanzienlijk, in de Rijn, IJsselmeer en in alle KRW watertypen in het beheergebied van Wetterskip Fryslân. De concentratie bleef hoog in de herfst van 2003.
- Algengroei wordt gestimuleerd door hogere watertemperaturen. Daarnaast resulteert de hogere temperatuur in dominantie van blauwalgen. Klimaatverandering met hogere temperaturen kan leiden tot het vaker voorkomen van door blauwalgen gedomineerde watersystemen.

- (Toekomstige) temperatuurstijging zal leiden tot een areaalverschuiving van soorten (exoten) naar het noorden.

De effecten van de warme en droge zomer van 2003 zoals hierboven beschreven komen in de toekomst veel vaker voor. De zomer van 2003, nu nog een extreem, zal volgens verschillende KNMI'06 scenario's in 2050 een standaard zomer worden. In 2100 is het de verwachting dat de zomers nog warmer zullen zijn. Ook minder koude winters, met invloed op de aquatische ecologie, zullen vaker voorkomen in de toekomst.

Er is gebruik gemaakt van een zeer beperkt aantal metingen per KRW watertype en de meetfrequentie van eens per maand of eens per vier weken is mogelijk te laag om voor bepaalde waterkwaliteitsparameters goede uitspraken te doen.

In de multi-lineaire regressie analyse die is uitgevoerd om te onderzoeken of er verbanden bestaan tussen luchttemperatuur, neerslag en windsnelheid en een aantal waterkwaliteitsparameters valt op dat er een gering verschil in correlatiecoëfficiënten is tussen de verschillende KRW watertypen voor een aantal waterkwaliteitsparameters. Zo lijkt de watertemperatuur, zuurgraad en totaal fosfaat in alle KRW watertypen ongeveer hetzelfde te reageren op de luchttemperatuur. Voor totaal stikstof zijn er wel verschillen te ontdekken tussen de verschillende watertypen: Ondiepe laagveenplassen (M25) reageren het minst sterk, terwijl Grote diepe kanalen (M7) het sterkste reageren. Hierbij moet worden opgetekend dat voor alle KRW watertypen slechts een beperkt aantal meetpunten is gebruikt.

Ten slotte zijn de belangrijkste aanbevelingen voor beleid en nader onderzoek aangegeven. Voor beleid zijn dit:

- De definitie van 'goede ecologische toestand' in de Kaderrichtlijn Water (KRW) speelt klimaatverandering geen rol, echter klimaatverandering zal de waterkwaliteit in de toekomst sterk beïnvloeden. Het bereiken van een 'goede ecologische toestand' van het oppervlakte water zal nog moeilijker realiseerbaar worden. Op den duur zou de definitie van 'goede ecologische toestand' kunnen gaan verschuiven als gevolg van klimaatverandering.
- Huidig waterbeheer gericht op heldere, waterplantgedomineerde watersystemen voortzetten.
- Inlaten van gebiedsvreemdwater met de verkeerde kwaliteit kan leiden tot grotere schade dan de schade veroorzaakt door droogte.
- De ontwerpafoer van rioleringen zal omhoog moeten om neerslagpieken in stedelijke gebieden te kunnen opvangen.
- De behandeling van afvalwaterlozingen het minimaliseren van watervervuilingen zorgt voor een lagere gevoeligheid voor klimaatverandering. Verder verlagen van stikstof- en fosfaatconcentraties in RWZI effluent. Verbeteringen van de waterkwaliteit in eutrofe meren op lange termijn wordt bereikt door verwijdering van externe nutriëntenaanvoer.
- Vergroten ruimtelijke samenhang van ecosystemen en verkleinen van de hoeveelheid teveel en te weinig water. Maatregelen combineren met waterkwantiteitsmaatregelen zoals waterbergingsgebieden.

Voor nader onderzoek zijn dit:

- De effecten van klimaatverandering op biologische waterkwaliteitsparameters, zoals blauwalgen, fytoplankton, en E-coli, analyseren met behulp van gegevens van Wetterskip Fryslân.

- Effecten van de veranderende waterkwaliteit als gevolg van klimaatverandering op verschillende functies zoals landbouw, recreatie en visserij onderzoeken.
- Analyse van meer meetpunten per KRW watertype zodat een betere gemiddelde waarde kan worden bepaald en de grote spreiding van meetwaarde minder effect heeft op de analyse resultaten.
- Analyse van langere meetreeksen voor de multi-lineaire regressie analyse.
- Keuze voor andere analyse jaren gebaseerd op temperatuur.
- Gebruik van bijvoorbeeld de 10-daagse neerslagsom voorafgaan aan de waterkwaliteitsmeting in plaats van instantane meteorologische gegevens op de dag van de waterkwaliteitsmeting voor een multi-lineaire regressie analyse
- Onderzoek of lagere windsnelheden (windkracht 4, 5 en 6) nu al vaker voorkomen dan in het verleden.
- Genereren van toekomstige meteorologische tijdsreeksen voor Leeuwarden voor het hele jaar inclusief lente en herfst.

Inhoudsopgave

SAMENVATTING	5
1 INLEIDING	13
1.1 Aanleiding tot het project	13
1.2 Doelstelling	13
1.3 Uitgangspunten	14
1.4 Leeswijzer	14
2 KLIMAATVERANDERING	15
2.1 Achtergrond	15
2.2 WB21 scenario's	16
2.3 KNMI'06 scenario's	17
2.4 Klimaat scenario's voor Fryslân	19
2.5 Effecten van klimaatverandering voor Nederland	21
2.5.1 Temperatuur: gemiddelden en extremen	21
3 EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING OP WATERKWALITEIT	23
3.1 Achtergrond	23
3.1.1 Processen, tijd- en ruimtelijke schaal	25
3.2 Klimaatverandering (temperatuur)	27
3.2.1 Invloed op watertemperatuur	27
3.2.2 Invloed op zuurgraad	29
3.2.3 Invloed op zuurstofgehalte	29
3.2.4 Invloed op stikstofgehalte	30
3.2.5 Invloed op algen	30
3.2.6 Invloed op macrofyten	33
3.2.7 Invloed op macrofauna	35
3.2.8 Invloed op vissen	36
3.2.9 Invloed op botulisme	37
3.2.10 Invloed op schelpdieren in de Waddenzee	38
3.3 Klimaatverandering (neerslag en afvoeren)	38
3.3.1 Inleiding	38
3.3.2 Invloed op chlorideconcentratie	40
3.3.3 Invloed op Elektrisch Geleidend Vermogen	46
3.3.4 Invloed op zuurstofgehalte	46
3.3.5 Invloed op stikstofconcentraties	47
3.3.6 Invloed op fosfaatconcentraties	47
3.3.7 Invloed op droogvallen	48
3.4 Klimaatverandering (wind)	50
3.5 Klimaatverandering (kooldioxide: CO ₂)	51
3.5.1 Invloed op algen en macrofyten	51
3.6 Klimaatverandering (zeespiegelstijging)	51
3.6.1 Invloed op chlorideconcentraties	51
3.7 Exoten	52
4 WATERSYSTEMEN IN FRYSLÂN	55
5 EFFECTEN VAN KLIMAATVERANDERING OP DE FRIESE WATERSYSTEMEN	59
5.1 Inleiding	59
5.2 Gegevens	59
5.2.1 Meteorologie	59
5.2.2 Waterkwaliteit	61

5.3	Analyse waterkwaliteitsparameters in 2000, 2003 en 2004	63
5.3.1	Gebufferde sloten (M1)	63
5.3.2	Ondiepe gebufferde plassen (M14)	64
5.3.3	Ondiepe laagveenplassen (M25)	65
5.3.4	Gebufferde (regionale) kanalen (M3)	65
5.3.5	Zwak brakke wateren (M30)	66
5.3.6	Grote diepe kanalen (M7)	67
5.3.7	Gebufferde laagveensloten (M8)	68
5.3.8	Langzaam stromende rivier midden/benedenloop op zand (R5)	69
5.3.9	Synthese	69
5.4	Multi-lineaire regressie	70
5.4.1	Methode	70
5.4.2	Resultaten	71
5.4.3	Discussie	74
5.5	Invloed van klimaatverandering	75
6	CONSEQUENTIES WATERBELEID EN ONDERZOEK	81
6.1	Inleiding	81
6.2	Consequenties voor waterbeleid	82
6.3	Consequenties voor toekomstig onderzoek	84
7	CONCLUSIES	89
8	LITERATUUR	93
BIJLAGE 1		101

Tabellen

Tabel 1.	Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050.	17
Tabel 2.	Herhalingstijden voor neerslag (in mm d ⁻¹) voor Leeuwarden.	20
Tabel 3.	Aantal dagen (in 30 jaar) waarbij een gemiddelde temperatuur wordt overschreden (Leeuwarden).	20
Tabel 4.	Voorbeeld van typische reactiesnelheden in verandering na een verlaging van nutriëntenconcentraties.	26
Tabel 5.	Overzicht waterkwaliteitsparameters en oorzaken: verwijzing naar paragrafen.	27
Tabel 6.	Gemodelleerde chlorideconcentraties bij lage afvoeren van de Rijn (Lobith) (de Bruijn en van Mazijsk, 2003).	42
Tabel 7.	De jaargemiddelde chlorideconcentraties bij het innamepunt voor drinkwater Ridderkerk (Jacobs, 2005).	42
Tabel 8.	Kentallen beheergebied Wetterskip Fryslân (www.wetterskipfryslan.nl).	56
Tabel 9.	Seizoen- en jaartemperatuur en neerslag, 2000, 2003, 2004 KNMI station Leeuwarden.	60
Tabel 10.	Aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in 2000, 2003 en 2004 voor station Leeuwarden.	61
Tabel 11.	KRW watersystemen en meetpunten chemische waterkwaliteitsparameters.	62
Tabel 12.	Temperatuurcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid.	72
Tabel 13.	Neerslagcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid.	73
Tabel 14.	Windcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid.	74
Tabel 15.	Overzicht van gemiddelde temperaturen in de referentieperiode 1976-2001 en een indicatie van de temperaturen in de vier klimaatscenario's in 2050 en 2100, gebaseerd op getransformeerde tijdreeksen.	77
Tabel 16.	Gemiddeld aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in de referentieperiode 1976-2005 en een indicatie van het aantal dagen in de vier klimaatscenario's rond 2050, op basis van getransformeerde tijdreeksen (KNMI).	77
Tabel 17.	Aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in de referentieperiode 1976-2005 en een indicatie van het aantal dagen in de vier klimaatscenario's rond 2100, op basis van getransformeerde tijdreeksen (KNMI).	78
Tabel 18.	Stijging watertemperatuur per KRW watertype bij verschillende KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050 (zomer).	79

Figuren

Figuur 1. Afwijking van de seizoens- en jaargemiddelden in De Bilt (KNMI, 2003).....	15
Figuur 2. Grid zoals toegepast voor de berekeningen van de klimaatprojecties door het HadCM3 GCM.....	16
Figuur 3. Schematische indeling van de KNMI'06 klimaatscenario's. G en G+ hebben een Gematigde opwarming van +1°C in 2050 t.o.v. 1990, terwijl W en W+ uitgaan van een Warmer klimaat (+2°C). De "+" geeft aan dat in de scenario's rekening wordt gehouden met een sterke verandering van de gemiddelde luchtstromingen.....	18
Figuur 4. Redenen tot bezorgdheid voor Nederland (MNP, 2005a).....	21
Figuur 5. Voorbeeld van een kansverdeling van zomergemiddelde temperaturen en de veranderingen daarin als gevolg van geleidelijk opwarming (MNP, 2005a).....	22
Figuur 6. Directe en indirecte effecten van klimaatverandering op ecosystemen (van Vliet, 2001).....	23
Figuur 7. Voorbeeld van manifestatie van klimaatgebonden fenomenen.....	25
Figuur 8. Relatie tussen procestijden en ruimtelijke schaal van effecten.....	26
Figuur 9. Watertemperatuur in het IJsselmeer (Andijk) in 2001, 2002 en 2003 (Zwolsman en Doomen, 2005).....	28
Figuur 10. Carbonaatevenwicht in oppervlaktewater afhankelijk van de pH.....	29
Figuur 11. Schematisch diagram van eutrofiëringproces in aan ondiep eutroof meer (aangepast van Jayaweera en Asaeda, 1995).....	32
Figuur 12. Simulatie van chlorofyl-a biomassa bij verschillende temperaturen in het eutrofe deel van het Bleiswijksezoommeer (aangepast van Jayaweera en Asaeda, 1995).....	33
Figuur 13. De levenscyclus van zoutwater-zannichellia (Zannichellia pedunculata). (Van Vierssen en Van Wijk, 1982).....	34
Figuur 14. Ecoregio's in Europa (Illies, 1978). De pijlen duiden op de verwachte richting van verplaatsing van macrofaunagemeenschappen (van den Hoek en Verdonschot, 2001).....	36
Figuur 15. Botulisme slachtoffers in het beheergebied van Wetterskip Fryslân (1994-2006).....	37
Figuur 16. Chloride in het IJsselmeer (Andijk) in 2001, 2002 en 2003 (Zwolsman en Doomen, 2005).....	41
Figuur 17. Modelleringschloridebelasting van de Rijn na aftrek van de invloed van de kalimijnen bij verschillende debieten (de Bruijn en van Mazijk, 2003).....	41
Figuur 18. Zoutconcentratie in het oppervlaktewater (gemiddeld over afwateringseenheden), in de huidige situatie voor het gemiddelde jaar (links) en het extreem droge jaar (rechts) (Riza, 2005).....	43
Figuur 19. Fractie systeemvreemd water in een gemiddeld jaar (1967, links) en een extreem droog jaar (1976, rechts) (Riza, 2005).....	44
Figuur 20. Zuurstof in het IJsselmeer (Andijk) in 2001, 2002 en 2003 (Zwolsman en Doomen, 2005).....	46
Figuur 21. Relatie tussen neerslag en stikstofvruchten per seizoen voor de Conestoga Rivier, Pennsylvania, V.S., 1977-1997 (Chang, 2004).....	47
Figuur 22. Stroomgebied Fryslân.....	55
Figuur 23. Waterlichamen naar categorieën en typen, stroomgebied Rijn Noord (www.kaderrichtlijnwater.nl).....	57
Figuur 24. Minimum, gemiddelde en maximum maandtemperatuur in 2000, 2003 en 2004 voor KNMI station Leeuwarden.....	60
Figuur 25. Maandneerslag in 2000, 2003 en 2004 voor KNMI station Leeuwarden.....	61
Figuur 26. Locaties van geselecteerde chemische waterkwaliteitsmeetpunten.....	62
Figuur 27. Waargenomen gemiddeld aantal zomerse dagen (maximum temperatuur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) per jaar voor 1971-2000, en voor vier plaatsen in Nederland de klimaatscenario's voor 2050. De verschillen in het aantal zomerse dagen tussen de vier plaatsen worden veroorzaakt door verschillen in het huidige klimaat (KNMI, 2006b).....	76
Figuur 28. Relatie tussen zoutgehalte en opbrengstschade landbouwgewassen (MNP, 2005b).....	85
Figuur 29. Chemische waterkwaliteitsparameters in gebufferde sloten (M1) in 2000, 2003 en 2004.....	101
Figuur 30. Chemische waterkwaliteitsparameters in ondiepe gebufferde plassen (M14) in 2000, 2003 en 2004.....	102
Figuur 31. Chemische waterkwaliteitsparameters in ondiepe laagveenplassen (M25) in 2000, 2003 en 2004.....	103
Figuur 32. Chemische waterkwaliteitsparameters in gebufferde (regionale) kanalen (M3) in 2000, 2003 en 2004.....	104
Figuur 33. Chemische waterkwaliteitsparameters in zwak brakke wateren (M30) in 2000, 2003 en 2004.....	105
Figuur 34. Chemische waterkwaliteitsparameters in grote diepe kanalen (M7) in 2000, 2003 en 2004.....	106
Figuur 35. Chemische waterkwaliteitsparameters in gebufferde laagveensloten (M8) in 2000, 2003 en 2004.....	107
Figuur 36. Chemische waterkwaliteitsparameters in langzaam stromende rivier (R5) in 2000, 2003 en 2004.....	108

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot het project

Klimaatverandering zal een grote impact krijgen op verschillende aspecten van het waterbeheer. De precieze aard en omvang daarvan en het tempo is nog onduidelijk (Droogers et al., 2004). De invloed van klimaatverandering op waterkwaliteit staat vol in de aandacht in Nederland, en hier wordt al op geanticipeerd met Waterbeleid 21^{ste} eeuw (WB21) en het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). Waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering zijn tot op de dag van vandaag in de discussies over klimaatverandering in Nederland onderbelicht gebleven. Waterkwaliteitsprocessen hebben een lange doorwerking en het duurt lang voor de effecten van beleid zichtbaar zijn (Claassen, 2006). Het is daarom zaak om tijdig kennis te nemen van de mogelijke trends en grootheden van de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit, zodat het beleid tijdig kan worden aangepast. Voor meer informatie over tijdschalen van processen zie paragraaf 3.1.1.

Zoals in het projectplan van Wetterskip Fryslân (Claassen, 2006) verwoord, moeten in 2009 de nieuwe waterplannen zijn vastgesteld voor het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Het waterschap wil als voorbereiding op de nieuwe waterplannen een beter inzicht krijgen in de effecten van klimaatveranderingen op de waterkwaliteit in Fryslân.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze studie is:

Inventarisatie van de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit in het beheergebied van Wetterskip Fryslân, consequenties voor het waterbeleid en het formuleren van eventuele onderzoeks- en beleidsvragen die deze effecten oproepen.

Het resultaat van deze studie zoals vastgelegd in het projectplan van Wetterskip Fryslân (Claassen, 2006) is drieledig: (i) een beschrijving van de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit (chemisch en ecologisch) in Fryslân. (ii) identificatie van de consequenties voor het waterbeleid (kwaliteit), (iii) opstellen van relevante vragen die in een mogelijke vervolgstudie kunnen worden vertaald naar toekomstig beleid en maatregelen. Daarnaast zal deze studie bijdragen aan een groter bewustzijn binnen Wetterskip Fryslân van de mogelijke effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit.

1.3 Uitgangspunten

Uitgangspunt bij deze studie vormen de nieuwe klimaatscenario's (KNMI'06) zoals gepresenteerd door Staatssecretaris Schultz van Haegen op 30 mei 2006. Het opstellen van regionale klimaatscenario's behoren niet tot deze studie.

Het middel om de doelstelling te bereiken is een state-of-the-art literatuurstudie. Uitgebreide modelmatige analyses zijn tijdens deze studie niet uitgevoerd. Om toch kwantitatieve uitspraken te kunnen doen over de waterkwaliteit van de Friese watersystemen is gebruik gemaakt van een beperkt aantal waterkwaliteitsgegevens van Wetterskip Fryslân. Voor acht Kaderrichtlijn watertypen zijn één of twee meetpunten worden geanalyseerd voor de jaren 2000, 2003 en 2004. Deze jaren zijn initieel gekozen op basis van de hoeveelheid neerslag, waar 2000 een gemiddeld jaar is, 2003 een droog jaar en 2004 een nat jaar. De effecten van temperatuur, neerslag, wind zijn meegenomen in de literatuurstudie en in de analyses op de volgende waterkwaliteitsparameters (indien beschikbaar):

- Chemisch
 - o watertemperatuur
 - o chloride
 - o pH
 - o O₂
 - o fosfaat
 - o stikstof
 - o EGV
- Biologisch
 - o algen
 - o fytoplankton
 - o E-coli

Het uitvoeren van studies voor de onbeantwoorde vragen en kennishiaten valt niet onder dit project, net zo min als het uitvoeren van maatregelen.

1.4 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 wordt uitgebreid ingegaan op klimaatverandering en de verschillende klimaatscenario's, waaronder een vergelijking tussen de WB21 en de KNMI'06 klimaatscenario's. Hoofdstuk 3 is de kern van deze studie: een uitgebreid literatuuronderzoek naar de effecten van klimaatverandering op waterkwaliteit. Hoofdstuk 4 geeft een korte beschrijving van de watersystemen in Fryslân. Een analyse van effecten van klimaatverandering op de Friese watersystemen is uitgevoerd in hoofdstuk 5. Hiervoor zijn meetgegevens gebruikt van Wetterskip Fryslân. Hoofdstuk 6 beschrijft de mogelijke consequenties voor waterbeleid en bevat een set van relevante vragen voor vervolgstudie en onderzoek. Hoofdstuk 7 sluit af met conclusies. Een uitgebreide literatuurlijst is aan het eind van deze rapportage opgenomen (8. Literatuurlijst).

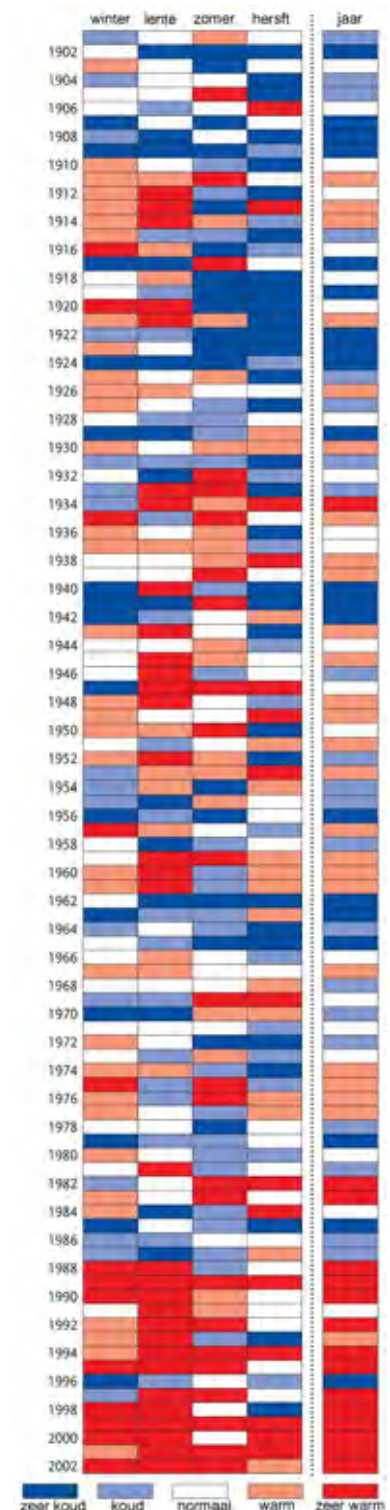
2 Klimaatverandering

2.1 Achtergrond

Uitstoot van broeikasgassen, zoals CO₂, hebben geleid tot een versterkt broeikaseffect, waardoor de aarde opwarmt. Er bestaat geen twijfel meer dat ons klimaat in de afgelopen honderd jaar is veranderd (Oreskes, 2004). De zes warmste jaren sinds de waarnemingen van het KNMI zijn begonnen, hebben alle plaats gevonden in de afgelopen 10 jaar: 1995, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003 (KNMI, 2003) (zie Figuur 1). Bovendien is er een intensivering van de neerslag waargenomen, waarbij zowel de totale neerslag als meer intensievere buien optreden.

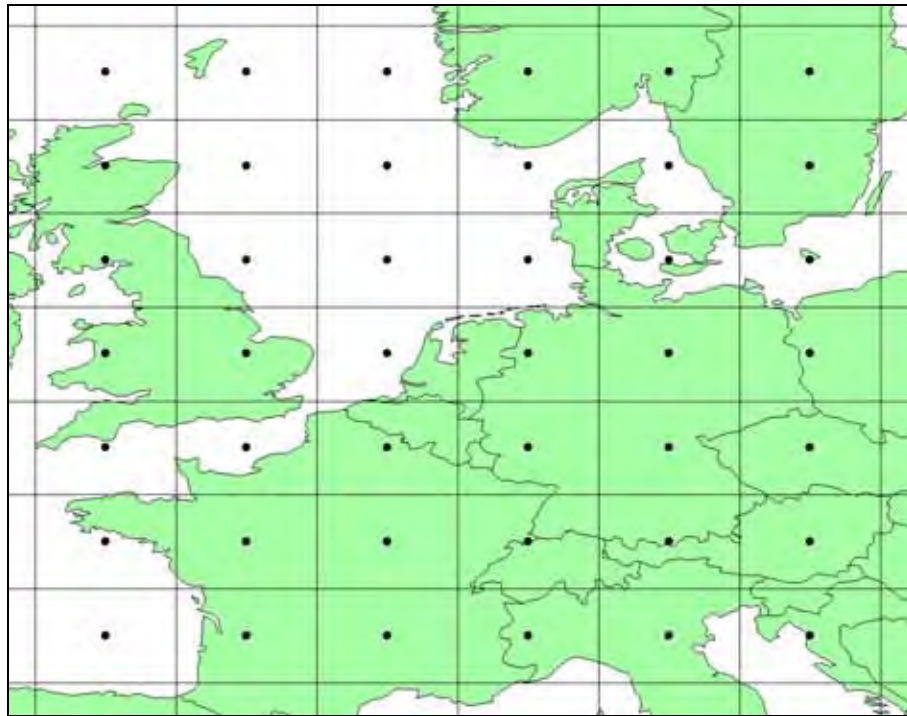
Internationaal wordt er veel onderzoek gedaan naar klimaatverandering waarbij waarnemingen en modellen hebben bijgedragen tot een snel groeiend inzicht in processen die het klimaat doen veranderen. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is het meest gezaghebbende orgaan op het gebied van klimaatverandering. Het IPCC inventariseert de wetenschappelijke, technische en sociaal-economische kanten van klimaatverandering, de mogelijke gevolgen en de wijze waarop vermindering van broeikasgas uitstoot en adaptatie strategieën kunnen worden gerealiseerd. Naast een secretariaat in Zwitserland zijn er wereldwijd honderden instituten en tienduizenden mensen die op één of andere manier bij het IPCC betrokken zijn. De belangrijkste uitgaven van de IPCC zijn de zogenaamde "Assessments Reports", die ongeveer elke vijf jaar verschijnen (IPCC, 2001). Het vierde "Assessment Report" verschijnt begin 2007.

Belangrijk in de projecties voor het toekomstige klimaat zijn de klimaatmodellen, die gebruikt worden om projecties voor het toekomstige klimaat te genereren op wereldschaal. Deze klimaatmodellen zijn gebaseerd op fysische processen die beschreven worden door wiskundige vergelijkingen. Deze klimaatmodellen worden vaak aangeduid als GCM, General Circulation Model. Tegenwoordig wordt ook vaak de term AOGCM (Atmosphere-Ocean General Circulation Model) gebruikt, om expliciet te maken dat er een koppeling is tussen oceanografische en atmosferische modelcomponenten.



Figuur 1. Afwijking van de seizoens- en jaargemiddelden in De Bilt (KNMI, 2003).

GCMs berekenen het klimaat op wereldschaal door de hele aarde te verdelen in een driedimensionaal grid. De horizontale resolutie van dit grid is ongeveer 250 km en de verticale 1 km, afhankelijk van het GCM. Met andere woorden alle eigenschappen binnen een gebied van 250 bij 250 km worden geacht constant te zijn! Een illustratie van deze resolutie is te zien in Figuur 2, waarbij duidelijk is dat heel Nederland wordt weergegeven door drie homogene gebieden. Interessant is nog dat het westelijke grid-punt dat over Nederland valt door het GCM wordt beschouwd als oceaan.



Figuur 2. Grid zoals toegepast voor de berekeningen van de klimaatprojecties door het HadCM3 GCM.

Het KNMI heeft deze mondiale projecties vertaald naar de schaal van Nederland, waarbij als uitgangspunt de globale temperatuurstijging is genomen. De neerslagverwachtingen vanuit de GCMs zijn niet gebruikt voor de verwachtingen in Nederland. In plaats daarvan is de relatie tussen temperatuur en neerslag geëxtrapoleerd (Droogers en van den Hurk, 2004). Het KNMI heeft in 2000 (Kors et al., 2000) en in 2006 (Van den Hurk et al., 2006) klimaatscenario's voor Nederland opgesteld. De eerste worden aangeduid als de WB21 scenario's, de laatste als de KNMI'06 scenario's.

2.2 WB21 scenario's

De hoge rivierstanden in 1993 en 1995 en de wateroverlast door extreme neerslag in 1998 hebben geleid tot het instellen van de Commissie Waterbeheer 21^e Eeuw (WB21). Het rapport van deze commissie en de wettelijke verankering hiervan in het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) geven richtlijnen betreffende de te verwachte klimaatveranderingen. Deze richtlijnen, soms toekomstbeelden genoemd, geven in een aantal scenario's weer wat het te verwachten klimaat in 2050 en 2100 is (Kors et al., 2000). Het tweede "Assessment Report" van het IPCC uit 1995 vormde de basis voor de WB21

scenario's. Het KNMI heeft deze scenario's vertaald naar drie mogelijke scenario's (laag, centraal en hoog) voor 2050 en 2100. Uitgangspunt was de temperatuurprojecties van een zevental GCMs en de relatie tussen temperatuur en neerslag in Nederland. Een overzicht van deze scenario's is te zien in Tabel 1.

Tabel 1. Vergelijk tussen WB21 en KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050.

	WB21			KNMI'06			
	Laag	Centraal	Hoog	G	G+	W	W+
Zomer (juni, juli, augustus)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.4	+1.7	+2.8
warmste zomerdag (°C)				+1.0	+1.9	+2.1	+3.8
gemiddelde neerslag (%)	+0.5	+1	+2	+3	-10	+6	-19
aantal natte dagen (%)				-2	-10	-3	-19
neerslag op 1% natste dag (%)	+5	+10	+20	+13	+5	+27	+10
referentieverdamping (%)	+2	+4	+8	+3	+8	+7	+15
windsnelheid (%)				0	+1	0	+2
zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45	15-25	15-25	20-35	20-35
Winter (december, januari, februari)							
gemiddelde temperatuur (°C)	+0.5	+1	+2	+0.9	+1.1	+1.8	+2.3
koudste winterdag (°C)				+1.0	+1.5	+2.1	+2.9
gemiddelde neerslag (%)	+3	+6	+12	+4	+7	+7	+14
aantal natte dagen (%)				0	+1	0	+2
neerslag op 1% natste dag (%)	+5	+10	+20	+4	+6	+8	+12
referentieverdamping (%)	+2	+4	+8	+3	+8	+7	+15
windsnelheid (%)				0	+1	0	+2
zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45	15-25	15-25	20-35	20-35

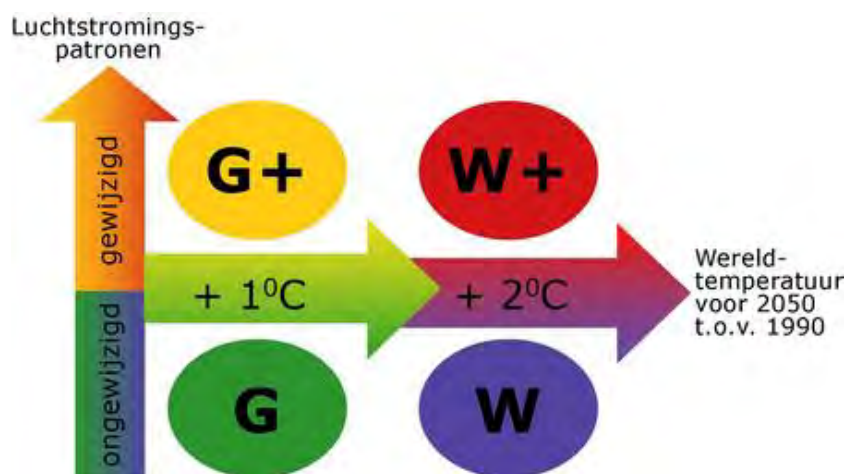
In het Nationaal Bestuursakkoord Water is afgesproken dat eind 2005 het watersysteem getoetst moet zijn voor wateroverlast uitgaande van minimaal het WB21 Centrale scenario. Deze toetsing is door de meeste waterbeheerders inmiddels uitgevoerd. Veranderend inzicht in klimaatprocessen hebben de WB21 scenario's echter achterhaald en zijn vervangen door de nieuwe KNMI'06 scenario's. Het is vooralsnog onduidelijk in hoeverre waterbeheerders deze nieuwe scenario's zullen gaan gebruiken.

2.3 KNMI'06 scenario's

De nieuwe KNMI'06 scenario's zijn op 30 mei 2006 door Staatssecretaris Schultz van Haegen gepresenteerd. De nieuwe scenario's zijn een update van de vorige generatie die ten behoeve van de commissie Waterbeheer 21e Eeuw (WB21) waren opgesteld. Net als de WB21 klimaatscenario's worden er in de nieuwe scenario's (kortweg aangeduid als de KNMI'06 klimaatscenario's) getallen gegeven voor de verandering van neerslag, temperatuur, potentiële verdamping, wind en zeeniveau. Ook worden naast seizoensgemiddelde waarden ook veranderingen in een aantal extreme grootheden gekwantificeerd, zoals de temperatuur op de warmste of koudste dag van het jaar, of de verandering van de 10-daagse neerslagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden.

Een aantal grootheden is op een andere manier gedefinieerd dan in de WB21 scenario's (zoals de vervanging van bijvoorbeeld "intensiteit van zomerse buien" door "dagsom die eens per 10 jaar wordt overschreden"), en er zijn nieuwe grootheden bijgekomen (zoals het aantal dagen met neerslag). De keuze van de variabelen is echter niet wat het meest in het oog springt bij de KNMI'06 klimaatscenario's. De indeling van drie naar vier scenario's en de definitie van deze scenario's is aanzienlijk gewijzigd.

In de WB21 scenario's werd gesproken van een "laag", "midden" en "hoog" scenario, later nog aangevuld met een "hoog droog" scenario ten behoeve van de Droogtestudie. De nieuwe KNMI'06 klimaatscenario's bevatten nu vier scenario's (Figuur 3). Deze vier zijn gebaseerd op analyse van GCM resultaten die aangaven dat de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur rond 2050 hoogst waarschijnlijk ergens tussen de $+1^{\circ}\text{C}$ en $+2^{\circ}\text{C}$ uitkomt. Deze temperatuurstijgingen vormen het uitgangspunt voor de Gematigde (G) en Warme (W) klimaatscenario's. Echter, voor het klimaat in Nederland is niet alleen de wereldgemiddelde temperatuur van belang: ook de gemiddelde windrichting speelt een cruciale rol. Winters met een sterke westelijke stroming zijn in de regel een stuk milder en natter dan wanneer de stroming minder sterk westelijk is. En een deel van de bestudeerde klimaatmodellen laat zien dat de statistiek van de westelijke stromingen behoorlijk kan veranderen wanneer de wereldgemiddelde temperatuur stijgt. Sommige modellen laten in de winter een sterkere westelijke stroming zien, terwijl in de zomer juist meer dagen voorkomen met een oostelijke windrichting. Die gaat gepaard met een grotere kans op warm en droog weer. De veranderingen in stromingspatronen zijn echter het gevolg van een serie complexe processen en daarom wijken verschillende modellen ook sterk van elkaar af. De klimaatscenario's nemen deze onzekere veranderingen mee. Naast de twee scenario's zonder verandering in luchtstroming zijn er nu twee scenario's, waarin de verandering in luchtstroming wel is meegenomen: de G+ en W+ scenario's.



Figuur 3. Schematische indeling van de KNMI'06 klimaatscenario's. G en G+ hebben een Gematigde opwarming van $+1^{\circ}\text{C}$ in 2050 t.o.v. 1990, terwijl W en W+ uitgaan van een Warmer klimaat ($+2^{\circ}\text{C}$). De "+" geeft aan dat in de scenario's rekening wordt gehouden met een sterke verandering van de gemiddelde luchtstromingen.

Een verkennende studie die de oude WB21 met de nieuwe KNMI'06 scenario's vergelijkt, is onlangs gepubliceerd (Droogers en Van den Hurk, 2006). Voor het proefgebied, een peilvak in Groningen nabij Stadskanaal, kwamen de volgende conclusies naar voren:

- Watersystemen die gedimensioneerd zijn op **afvoernormen** volgens het WB21 **Hoge** scenario voldoen aan alle vier de KNMI'06 scenario's.
- Watersystemen die gedimensioneerd zijn op **afvoernormen** volgens het WB21 **Centrale** scenario voldoen alleen aan de twee gematigde KNMI'06 scenario's (G en G+).
- Droogtegevoeligheid, en dus **wateraanvoerbehoefte**, gebaseerd op het WB21 **Centrale** scenario komt overeen met het minst extreme KNMI'06 scenario (G). Zelfs het WB21 **Hoge** scenario geeft een lagere wateraanvoerbehoefte dan drie van de vier KNMI'06 scenario's.

Voor zover bekend is er nog geen enkele studie uitgevoerd waar de WB21 scenario's zijn vergeleken met de KNMI'06 scenario's voor wat betreft waterkwaliteitsaspecten.

2.4 Klimaat scenario's voor Fryslân

Het KNMI heeft een uitermate informatieve website gepresenteerd met achtergrondinformatie betreffende de nieuwe scenario's inclusief de mogelijkheid om dagelijkse tijdreeksen voor de vier scenario's te verkrijgen. Dit is gebeurd door tijdreeksen over de periode 1976-2005 te transformeren in tijdreeksen voor rond 2050 en 2100. Het KNMI geeft aan dat bij het gebruik van deze tijdreeksen twee belangrijke punten moeten worden meegenomen:

- Het transformeren van historische tijdreeksen is slechts één manier om tijdreeksen voor de toekomst te verkrijgen. De volgorde van temperatuurwisselingen, jaar-op-jaar variaties, etc. in de getransformeerde tijdreeksen wordt sterk bepaald door wat er in het verleden is gebeurd;
- De getransformeerde tijdreeksen geven geen voorspellingen voor wat in een bepaald toekomstig jaar de neerslag en temperatuur zal zijn. In de toekomst kan de volgorde van "jaren" in de getransformeerde tijdreeksen anders zijn, maar ook de variatie binnen jaren.

Een groot nadeel van de door het KNMI aangeleverde getransformeerde reeksen is dat ze alleen voor de zomer (juni, juli, augustus) en voor de winter (december, januari, februari) worden gegeven. Bovendien zijn er geen stations beschikbaar die in Fryslân liggen. Er is daarom gebruik gemaakt van de gegevens zoals aangegeven in Tabel 1 om de nieuwe scenario's voor Leeuwarden te genereren. Voor wat betreft de getransformeerde reeksen is de periode 1976 tot en met 2005 als basis genomen. Voor de neerslag zijn naast de gegevens in Tabel 1 de volgende aannames gedaan:

- als winter is het winterhalfjaar genomen (oktober tot en met maart)
- als zomer is het zomerhalfjaar genomen (april tot en met september)
- de volgende drie transformatiestappen zijn gebruikt (X staat voor het betreffende getal volgens één van de scenario's):
 - o 1: wijzig random X natte dagen
 - o 2: verhoog elke natte dag met X%
 - o 3: verhoog de 1% natste dagen (in 30 jaar) met X%, uitgaande van een lineaire vermindering van de toename met de intensiteit.
- neerslagen zijn gefit volgens een Weibul verdeling om tot herhalingstijden te komen

Resultaat van deze analyse geeft de herhalingstijden aan voor de huidige situatie en de vier KNMI'06 scenario's (Tabel 2). Belangrijk bij deze tabel is dat het KNMI momenteel de methoden aan het

onderzoeken is voor het maken van getransformeerde reeksen voor herfst en voorjaar. De gepresenteerde herhalingstijden zouden daarom mogelijk kunnen wijzigen.

Tabel 2. Herhalingstijden voor neerslag (in mm d⁻¹) voor Leeuwarden.

T (jaar)	huidig	2050			
		G	G+	W	W+
1	27	30	29	32	31
10	51	59	55	67	57
25	66	77	70	90	73
50	79	95	85	113	88
100	96	116	103	141	106
500	149	186	160	237	163
1000	179	228	193	296	196

Voor wat betreft de transformatie van de temperaturen naar nieuwe getransformeerde reeksen is dezelfde methode aangehouden gebaseerd op Tabel 1. Het verschil met de neerslag is dat stap 1 (aanpassen aantal natte dagen) niet hoeft te worden uitgevoerd. De uitgangspunten in Tabel 1 geven aan wat er gemiddeld gaat wijzigen in de temperatuur wat de basis vormt voor toekomstige analyses voor de invloed op waterkwaliteit in het beheergebied van Wetterskip Fryslân.

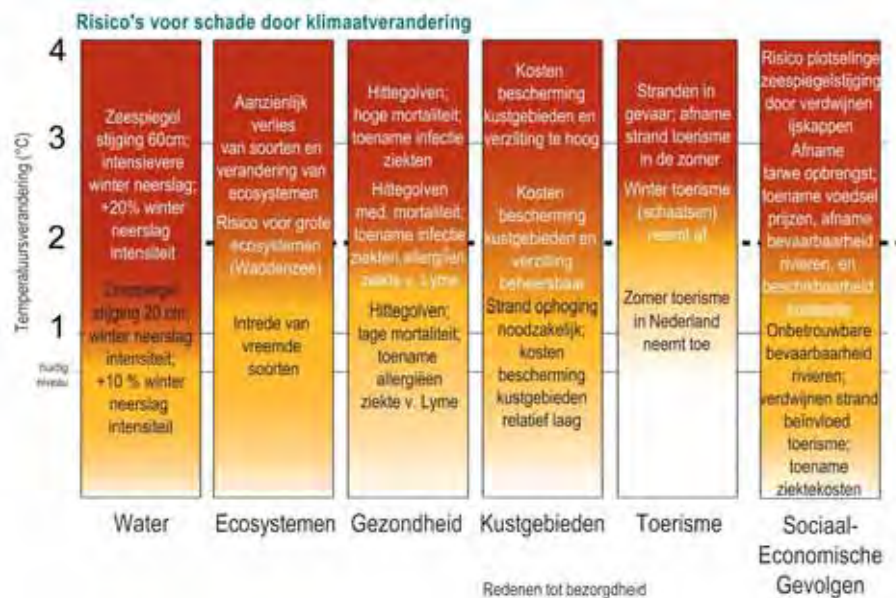
Een andere belangrijke factor is echter hoe vaak een bepaalde temperatuur wordt overschreden. Aan de hand van de getransformeerde temperatuurreeksen is bepaald hoe vaak een gemiddelde dagtemperatuur wordt overschreden. In Tabel 3 blijkt duidelijk dat een aantal kritische temperaturen voor nutriëntomzettingsprocessen en algengroei aanzienlijk zal gaan toenemen onder klimaatverandering.

Tabel 3. Aantal dagen (in 30 jaar) waarbij een gemiddelde temperatuur wordt overschreden (Leeuwarden).

Temp. (°C)	huidig	2050			
		G	G+	W	W+
20	250	398	508	614	947
21	156	242	321	373	625
22	92	152	195	233	380
23	49	92	115	128	239
24	20	60	81	93	143
25	2	35	54	60	101
26	0	12	35	41	73
27	0	2	16	23	54
28	0	0	2	6	38
29	0	0	0	1	27
30	0	0	0	0	12

2.5 Effecten van klimaatverandering voor Nederland

Van Ierland et al. (2001) en Kok et al. (2001) rapporteren uitgebreid over de eindconclusies van het NOP impact project naar de gevolgen voor Nederland van een opwarmingsrange tot 4° Celsius voor water, ecosystemen, gezondheid, de kustzone, toerisme en naar de sociaal-economische gevolgen (Figuur 4). De conclusie uit de studie is dat één van de grootste 'perceived reasons for concern' voor Nederland op het gebied van water ligt; Nederland zal in ernstige mate worden beïnvloed door klimaatverandering via veranderingen in het watersysteem (MNP, 2005a).

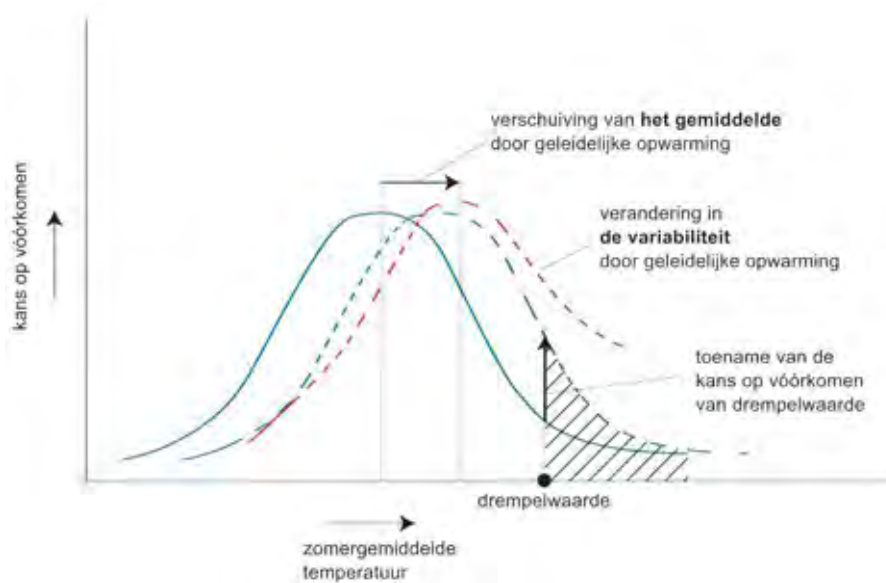


Figuur 4. Redenen tot bezorgdheid voor Nederland (MNP, 2005a).

Al gaat de aandacht bij klimaatverandering meestal uit naar de kans op meer extremen in zowel temperatuur als neerslag, voor de ecologie is een verhoogde kans op minder strenge winters minstens even zo belangrijk. Minder koude winters hebben effect op onder andere het ontbreken of verkorten van ruststadia voor planten en dieren, het overleven van exoten en ziektekiemen en op dominantie van bepaalde soorten.

2.5.1 Temperatuur: gemiddelden en extremen

De kans dat hittegolven voorkomen verandert als de gemiddelde temperatuur stijgt. De door de mens veroorzaakte opwarming verschuift de statistische verdeling van zomertemperaturen in de richting van warmere condities. Dit heeft een groot effect op de kans dat de temperaturen een gekozen drempelwaarde overschrijden in het rechterdeel van de kansverdeling: de kans op extreme zomers neemt waarschijnlijk meer toe als het gemiddelde van de kansverdeling opschuift door de geleidelijke opwarming (zie Figuur 5) (MNP, 2005a). De vorm van de kansverdeling (de variabiliteit) kan mogelijk óók veranderen door menselijke invloed, maar de achterliggende fysische oorzaken zijn nog maar gedeeltelijk bekend (Schär et al., 2004).



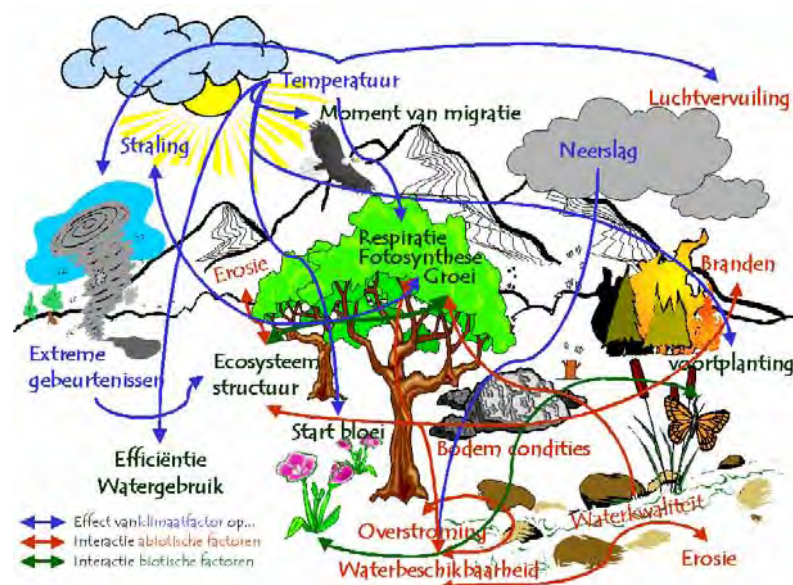
Figuur 5. Voorbeeld van een kansverdeling van zomergemiddelde temperaturen en de veranderingen daarin als gevolg van geleidelijk opwarming (MNP, 2005a).

3 Effecten van klimaatverandering op waterkwaliteit

3.1 Achtergrond

De effecten van klimaatverandering in Nederland zijn nu nog beperkt; ze zullen echter in de komende decennia toenemen (Milieu en Natuurplanbureau, 2005). De precieze aard en omvang van de effecten van klimaatverandering in Nederland zijn nog onduidelijk (Droogers et al., 2004), dit geldt voor zowel waterkwantiteit als voor waterkwaliteit. De invloed van klimaatverandering op de waterkwantiteit en ook op zeedefensie worden al meegenomen in het WB21 en NBW. Over de effecten van klimaatveranderingen op de rivierafvoeren en zeewaterstanden is veel gepubliceerd. Het lijkt duidelijk dat door klimaatverandering de 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. Over effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit is nog weinig bekend. Er zijn wel indicaties te ontleen aan effecten van extreme weersomstandigheid op de waterkwaliteit in het verleden.

De mogelijke effecten van klimaatverandering op oppervlakte- en grondwater kunnen worden onderscheiden in indirecte en directe effecten van klimaatverandering (Kabat en van Schaik, 2003; Van Walsum et al., 2002). Directe effecten zijn veranderingen in de hydrologische cyclus als gevolg van temperatuurveranderingen en verandering in het neerslagpatroon. Indirecte effecten zijn weer het gevolg van deze veranderingen in de hydrologische cyclus en hebben betrekking op de chemische en ecologische dimensies van het betreffende waterlichaam. Figuur 6 geeft de vele interacties (zowel direct als indirect) tussen klimaatverandering en ecosystemen weer.



Figuur 6. Directe en indirecte effecten van klimaatverandering op ecosystemen (van Vliet, 2001).

In Figuur 6 valt meteen op hoe complex de verschillende interacties en beïnvloedingen van klimaat inwerken op verschillende ecosystemen. Het klimaat beïnvloedt ecosystemen op zowel directe als indirecte manieren (Figuur 6):

- Direct:
Klimaatvariabelen kunnen als abiotische factor direct het succes van vestiging, groei, reproductie en verspreiding van een individu (uiteindelijk voor de hele soort) beïnvloeden. Hierbij gaat het om het beïnvloeden van fotosynthese, respiratie, lengte groeiseizoen, watergebruiksefficiëntie en schade aan organisme (van Vliet, 2001).
- Indirect abiotisch:
Naast het klimaat is ook een groot aantal andere abiotische factoren bepalend voor het succes van productie en reproductie. Voorbeelden hiervan zijn branden, grondwaterstand, bodemstructuur, nutriëntenbeschikbaarheid en luchtkwaliteit. Veel van deze abiotische factoren worden ook weer in meer en minder sterke mate beïnvloed door klimaatsvariabelen (van Vliet, 2001).
- Indirect biotisch:
De veranderingen in abiotische factoren resulteren in een verandering in overlevingskansen en uiteindelijk van populatiegrootte en soortensamenstelling. Deze veranderingen zullen weer doorwerken op het gehele ecosysteem via veranderingen in concurrentie-, predator-prooi, parasitaire en symbiotische verhoudingen (van Vliet, 2001).

Eisenreich (2005) beschrijft de invloed van klimaatverandering op meren in Europa.

Samenvattend:

- De beïnvloeding door klimaatverandering van meren is het meest coherent voor fysische parameters: eerder smelten van ijs, een stijging van de watertemperatuur en een sterkere thermische stratificatie (in diepe meren) in een warmere toekomst.
- Verwachte veranderingen in het chemische regime van meren (bijvoorbeeld versnelde eutrofiering, verlaagde zuurstofconcentratie) is minder coherent en is sterk afhankelijk van lokale condities en het type meer.
- Biologische veranderingen door klimaatverandering zijn door de complexe interacties inherent onvoorspelbaar. Kleine veranderingen in het klimaat kunnen dramatische effecten hebben op biota, vooral in extreme habitats (bijvoorbeeld op hoge breedtegraden en hoogten).

In het rapport van de European Environment Agency (EEA, 2004) *"Impacts of Europe's changing climate: An indicator-based assessment"*, worden de woorden *waterkwaliteit* en *aquatisch* niet één keer genoemd. Alle natuurindicatoren betreffen de terrestrische natuur en de indicatoren betreffende water gaan allen over waterkwantiteit. Hoewel de onzekerheden groot zijn, geldt dat de relatie tussen klimaat(verandering) en effecten op hydrologie worden onderkend door zowel experts als beleidsmakers. Voor wat betreft het effect van klimaatverandering op waterkwaliteit en aquatische ecosystemen verschillen de meningen van experts, stakeholders en beleidsmakers.

Ook dichterbij huis in het hoofdrapport aan de tweede kamer *Klimaatverandering en Klimaatbeleid: Inzicht in keuzes voor de Tweede Kamer* (Rooijers et al., 2004) worden waterkwaliteit en aquatische ecologie niet betrokken bij het overzicht van klimaatseffecten. Een geïntegreerde analyse waarin waarnemingen uit het veld (klimaat en waterkwaliteit) gecombineerd worden met experimenten en scenario studies is in Nederland voor aquatische ecosystemen nog nauwelijks gedaan, met uitzondering van enkele studies in de Nederlandse Waddenzee (Wolff et al., 1995). In de definitie van 'goede ecologische toestand' in de EU Kaderrichtlijn Water lijkt klimaatverandering geen rol te spelen.

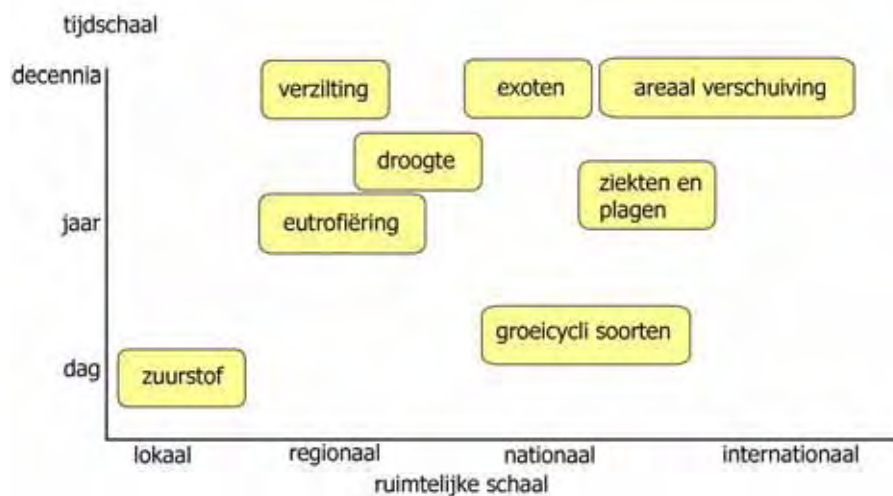
Op den duur zou de definitie van 'goede ecologische toestand' kunnen gaan verschuiven als gevolg van klimaatverandering (Eisenreich, 2005).

De effecten van klimaatverandering op nutriëntenvrachten zijn zeer gevoelig zijn voor de stroomgebiedkarakteristieken zoals hydro-klimatologie, geohydrologie en landgebruik (Chang, 2004; Lahmer et al., 2001). Klimaat, rivierafvoer en landgebruik zijn bekende *drivers* van de waterkwaliteit in rivieren, echter het bepalen van de relatieve effecten van elk van deze *drivers* blijft een belangrijke uitdaging voor de wetenschap. Veel valt te leren voor een toekomst van klimaatverandering van hoe aquatische ecosystemen heden reageren op klimaatvariabiliteit en weersextremen.

Met dit alles in het achterhoofd is er een uitvoerig literatuuronderzoek uitgevoerd om te kijken of er echt niet meer informatie is te achterhalen over de invloed van klimaatverandering op verschillende waterkwaliteitsparameters.

3.1.1 Processen, tijd- en ruimtelijke schaal

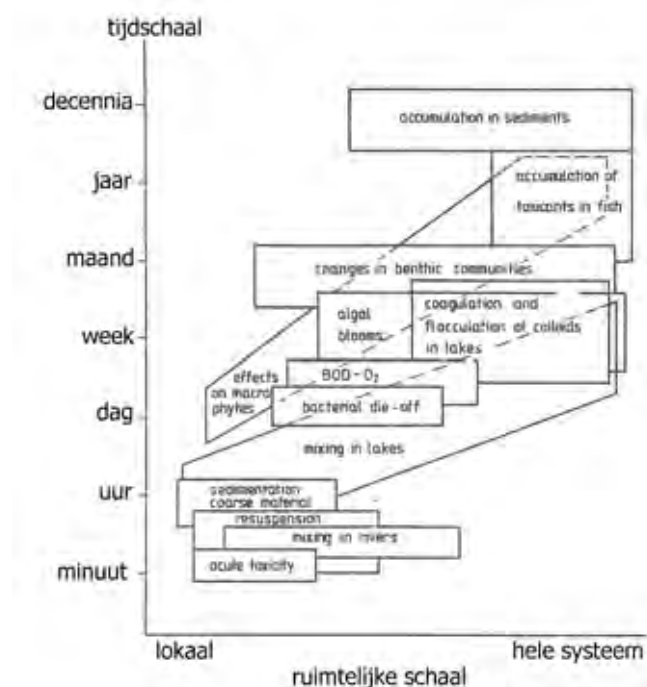
Dat er effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit en aquatische ecosystemen zijn staat vast, echter hoe en ook met welke snelheid is nog niet voor alle processen duidelijk. Figuur 7 geeft voor een aantal waterkwaliteitsfenomenen de manifestatie van klimaatverandering en de ruimtelijke effecten van de veranderingen weer. Lokale effecten kunnen zich vaak binnen korte tijdsbestekken (bijvoorbeeld een dag) manifesteren, bijvoorbeeld zuurstofgebrek in het water, terwijl grote nationale en zelfs internationale manifestaties van effecten zoals de areaalverschuiving van soorten zich in tijdsbestekken van decennia afspelen.



Figuur 7. Voorbeeld van manifestatie van klimaatgebonden fenomenen.

Ook Figuur 8 geeft een relatie aan tussen processen de snelheid van deze processen en de schaal van de effecten, terwijl Tabel 4 de reactiesnelheden in verandering na een verlaging van nutriëntenconcentraties weergeeft. Uit deze figuur en tabel wordt snel duidelijk dat waterkwaliteitsprocessen een lange doorwerking kunnen hebben en dat het zichtbaar worden van effecten van beleid lang kan duren. Een voorbeeld is de accumulatie van gif in vissen. Al is de waterkwaliteit door beleid ondertussen verbeterd, vissen zullen nog langere tijd gif bevatten. Hetzelfde

geldt voor gif in sediment. De aanvoer van schoon sediment kan al jaren plaatsvinden doordat bovenstrooms nieuw beleid heeft gezorgd voor een verbetering van de waterkwaliteit, echter het giftige sediment blijft in het watersysteem aanwezig of wordt geleidelijk afgebroken of bedolven onder schoner sediment.



Figuur 8. Relatie tussen procestijden en ruimtelijke schaal van effecten.

Tabel 4. Voorbeeld van typische reactiesnelheden in verandering na een verlaging van nutriëntenconcentraties.

	Dagen	Weken	Maanden	Jaren
Waterchemie	+			
Sedimentchemie			+	+
Algengemeenschappen		+	+	
Diatomeeën		+	+	
Vasculaire waterplanten			+	+
Benthische macro-invertebraten			+	+
Fytoplankton		+		
Zoöplankton		+	+	
Vissen			+	+

In deze studie zijn drie belangrijke *drivers* voor veranderingen in waterkwaliteit onderzocht: temperatuur, neerslag en wind. Daarnaast is gekeken naar de effecten van zeespiegelstijging en een hogere CO₂ concentratie in de atmosfeer. Tabel 5 geeft een overzicht van *drivers* en waterkwaliteitsparameters met een verwijzing naar de volgende paragrafen.

Tabel 5. Overzicht waterkwaliteitsparameters en oorzaken: verwijzing naar paragrafen.

parameter	Klimaatvariabele			
	Lucht-temperatuur	Neerslag/afvoeren	CO ₂	Zeepspiegel stijging
Chemisch				
watertemperatuur	3.2.1			
chloride/EGV		3.3.2 en 3.3.3		3.6.1
zuurgraad	3.2.2			
Zuurstof	3.2.3	3.3.4		
stikstof	3.2.4	3.3.5		
fosfaat		3.3.6		
Biologisch				
algen	3.2.5		3.5.1	
macrofyten	3.2.6		3.5.1	
macrofauna	3.2.7			
vissen	3.2.8			
fytoplankton		Geen specifieke literatuur		
E-coli		Geen specifieke literatuur		

3.2 Klimaatverandering (temperatuur)

3.2.1 Invloed op watertemperatuur

Temperatuur is één van de belangrijkste sturende factoren in biologische systemen. De temperatuur heeft direct invloed op groei, fysiologie, levenscyclus en het gedrag van soorten (Magnuson et al., 1997, Vannote en Sweeney, 1980). De verspreiding van veel soorten is afhankelijk van het temperatuurregime en een verandering van dit regime kan grote gevolgen hebben voor de levensgemeenschappen in het oppervlaktewater. Klimaatverandering leidt tot een directe verhoging van de temperatuur, echter er is weinig bekend over de invloed van temperatuursverandering op aquatische ecosystemen. Wanneer de temperatuur van oppervlaktewater boven de 25°C komt, zal het risico veel groter worden dat het zuurstofgehalte (te) laag is waardoor bijvoorbeeld vissterfte kan optreden. Een te hoge watertemperatuur kan vooral optreden in ondiep oppervlaktewater of bij onvoldoende doorstroming. Daarom geldt er voor oppervlaktewater een grenswaarde van 25°C Maximaal Toelaatbaar Risico (MTR-waarde), conform de WVO. Daarnaast is er een grenswaarde van 30°C voor te lozen koelwater, met dien verstande dat in de zomer een temperatuursprong van maximaal 7°C ten opzichte van het ontvangende water geldt. De achtergrondtemperatuur van het oppervlaktewater hangt nauw samen met het debiet van de rivieren. In droge zomers, zoals in 2003, kan er dan sprake zijn van een verminderde beschikbaarheid of innamestop voor koelwater.

Klimaatverandering grijpt in op de directe warmte-uitwisseling tussen de atmosfeer en het water en indirect doordat de atmosferische omstandigheden veranderen waardoor ook de lichtinstraling op het water kan veranderen. Voor (kleine) stromende watersystemen is vooral de directe warmte-uitwisseling belangrijk, terwijl voor (grotere) stilstaande watersystemen de veranderende instraling het belangrijkste is. Warmte-uitwisseling vindt vooral plaats aan het wateroppervlakte. De warmte wordt verdeeld over de hele waterkolom door wind en stroming.

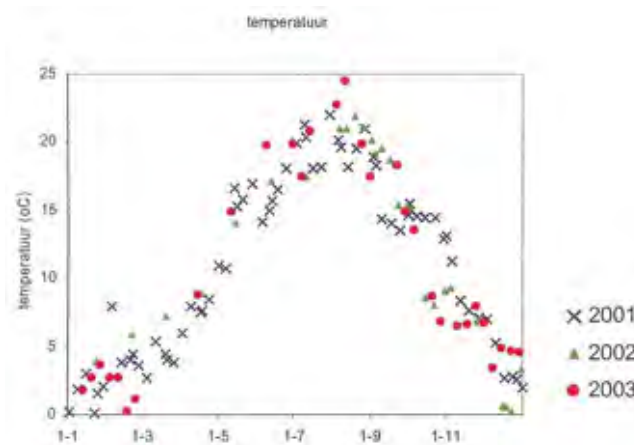
Bij de stralingsabsorptie door water komt warmte vrij. De mate van absorptie hangt af van de samenstelling van het water. Hoe meer opgelost organisch materiaal (dissolved organic carbon: DOC) hoe hoger de absorptie. Klimaatverandering die leidt tot een verandering in DOC heeft een effect op de warmteopname van het water. Dit zou betekenen dat wateren met een hoger DOC gehalte sterker zullen opwarmen bij stijgende luchttemperatuur dan wateren met een laag DOC gehalte.

Verdamping heeft invloed op de oppervlaktewatertemperatuur. Een hogere verdamping kan leiden tot een groter warmteverlies van het oppervlaktewater. De verdamping wordt bepaald door temperatuur, wind, waterdampspanning, luchtdruk en straling, allen factoren die worden beïnvloed door klimaatverandering.

De aanname dat door klimaatverandering de oppervlaktewatertemperatuur zal stijgen wordt bevestigd uit metingen van lucht- en watertemperatuur, verdamping en neerslag in en bij meren in Canada (Schindler et al., 1996), Zwitserland (Livingstone, 2003) en de Verenigde Staten (Winder en Schindler, 2004). Ook modelstudies naar de effecten van klimaatverandering op de watertemperatuur laten een stijging van de watertemperatuur zien voor een meer (Fang en Stefan, 1999) en een rivier (Goosssef et al. 2005) in de Verenigde Staten.

De temperatuur van stromend water heeft een sterk lineaire relatie met de luchttemperatuur. De watertemperatuur volgt met een bepaalde vertraging de luchttemperatuur. De vertraging is groter in grotere rivieren met een groter gebied en een groter stroomgebied (Ward, 1985, Webb et al., 2003)

Klimaatverandering kan ook de grondwatertemperatuur beïnvloeden. Een vuistregel is dat de gemiddelde grondwatertemperatuur gelijk is aan de jaargemiddelde luchttemperatuur + 1 °C (Meisner et al., 1988). Meisner et al. (1988) vertellen niet tot op welke diepte deze gemiddelde grondwatertemperatuur wordt berekend. Hoe ondieper hoe meer seizoenstemperatuurfluctuatie tot de "neutrale zone" waar de grondwatertemperatuur het hele jaar constant is. Bense en Kooi (2004) berekenen een grondwatertemperatuurstijging van 0,5 – 1 °C in de 20^{ste} eeuw in Uden, Brabant. De diepte van deze grondwatertemperatuurstijging wordt niet exact aangeven, maar is waarschijnlijk ondieper (figuur in publicatie) dan 10 m onder het maaiveld.

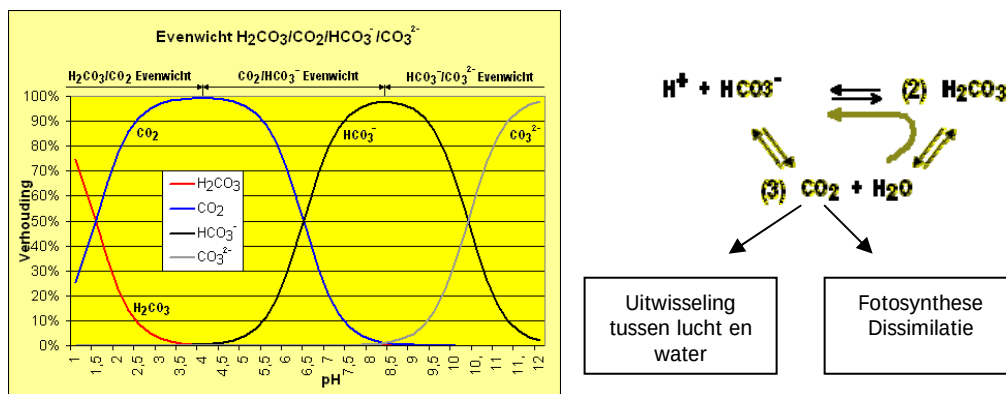


Figuur 9. Watertemperatuur in het IJsselmeer (Andijk) in 2001, 2002 en 2003 (Zwolsman en Doomen, 2005).

In Nederland heeft de droge en warme zomer van 2003 geleid tot lage afvoeren in de Rijn en Maas. De gevolgen van het lage debiet en de lange periode hebben geleid tot een sterke verhoging van de watertemperatuur van de Rijn en de Maas. Ook de temperatuur van het IJsselmeerwater, van belang voor Wetterskip Fryslân, werd sterk beïnvloed in de zomer van 2003. De maximum temperatuur van het IJsselmeerwater (Andijk) is in 2003 (augustus) circa 3 °C warmer dan in 2001 en 2002 (Figuur 9).

3.2.2 Invloed op zuurgraad

De pH kan stijgen als gevolg van klimaatverandering door een toename van de fotosynthese, wat nauw samenhangt met de carbonaatevenwichten (zie Figuur 10), de verlenging van het groeiseizoen en een toename van de vertering en daardoor een toename van de depositie van basische kationen, resulterend in een verhoging van de alkaliniteit. De effecten zullen het grootste zijn voor watersystemen met een klein stroomgebied ten opzichte van het wateroppervlakte, een lage pH en een kort groeiseizoen. Mogelijkerwijs heeft klimaatverandering een gunstig effect op de verzuringsbestrijding. Aan de andere kant meldt Parry (2000) dat klimaatverandering kan leiden tot de vorming van meer mycorrhiza associaties en toenemende verzuring. Ook het CO₂ bemestingseffect leidt tot zuurdere wateren. Verhoging van de zuurgraad is al aangetoond in alpine meren (Koinig et al., 1998) en meren in Canada (Schindler et al., 1996). Kalkrijke wateren zullen nauwelijks gevoelig zijn voor een CO₂ bemestingseffect door hun sterk bufferende werking.



Figuur 10. Carbonaatevenwicht in oppervlaktewater afhankelijk van de pH.

3.2.3 Invloed op zuurstofgehalte

Het zuurstofgehalte van het water wordt beïnvloed door BOD (Biochemical Oxygen Demand) en de watertemperatuur (Arnell, 1998). De oplosbaarheid van zuurstof in water is temperatuursafhankelijk (Kersting, 1983). Bij een hogere watertemperatuur kan er minder zuurstof oplossen in het water. Het zuurstofgehalte in het oppervlaktewater dient minimaal 4 mg l⁻¹ te zijn. Beneden deze waarde dreigt verstikking van het waterleven en in het bijzonder vissterfte (beneden 3 mg l⁻¹). Jenkins et al. (1993) toont in een simulatiestudie voor verschillende Britse rivieren aan dat vooral in rivieren met veel effluentlozingen (een hogere BOD) de gevolgen van een temperatuursstijging het grootst waren. De behandeling van afvalwaterlozingen en het minimaliseren van watervervuilingen zorgen niet alleen voor een betere kwaliteit water, maar ook voor een lagere gevoeligheid voor klimaatverandering. Minder zuurstofrijk water kan een groot effect hebben op vissen en andere zuurstofgevoelige soorten.

Het zuurstofgehalte van het water wordt ook sterk beïnvloed door biologische processen. Bij de fotosynthese door planten wordt zuurstof geproduceerd. De meeste zuurstof in een water is afkomstig van de fotosynthese in algen en onderwaterplanten. Bij respiratie door alle levende organismen wordt zuurstof geconsumeerd. Terwijl de zuurstofproductie 's nachts wegvalt door het ontbreken van zonlicht, gaat de zuurstofconsumptie door waterplanten en andere organismen normaal door. Dit heeft tot gevolg dat het zuurstofgehalte in een water 's nachts lager wordt dan overdag. Aan het einde van de nacht, dus tegen zonsopgang, kunnen daardoor zuurstofgehalten ontstaan die aanzienlijk lager zijn dan overdag. In sloten met veel ondergedoken waterplanten kan deze variatie aanzienlijk zijn. Zowel de zuurstofoplosbaarheid als de biologische processen worden door de temperatuur beïnvloed.

3.2.4 Invloed op stikstofgehalte

Een hogere temperatuur resulteert over het algemeen in snellere (bio-chemische) processen, echter verschillende processen hebben hun eigen gevoeligheid voor een bepaalde temperatuurstijging. Denitrificatie reageert sterker op een temperatuurstijging dan nitrificatie resulterend in lagere stikstofconcentraties (Jenkins et al., 1993).

Men vermoedt dat bodemvormende processen sneller verlopen bij stijgende temperaturen. Uitgaande van warmere en drogere zomers is het te verwachten dat het stikstofgehalte van de bodem zal afnemen (Parry, ed. 2000). Verhoogde microbiële activiteit als gevolg van klimaatverandering kan leiden tot versnelde N-fixatie, N-immobilisatie en denitrificatie. Bij hogere temperaturen zou een verhoogde mineralisatie kunnen leiden tot stikstofverliezen in de bodem (Lukewille and Wright, 1997, Kolb and Rehfuess, 1997, in: Parry ed., 2000). Andere onderzoekers stellen dat het stikstofgehalte niet zal veranderen bij klimaatverandering (Bradbury and Powlson, 1994, Pregitzer and Atkinson, 1993, in: Parry, ed., 2000). Een stijging van de temperatuur kan ook leiden tot een verhoogde mineralisatie van organische stikstof, waardoor er meer stikstof in beken en rivieren terecht zou kunnen komen (Arnell, 1998).

Een modelstudie in de Verenigde Staten (Abler et al., 2002) toont aan dat de landbouw één van de grootste bronnen van stikstof is in het studiegebied. Interessanter zijn echter de conclusies dat niet alleen klimaatverandering een effect heeft op de toekomstige stikstofvrachten. De invloed van klimaatverandering op landbouwprijzen en op de economische reacties van agrariërs zijn van wezenlijk belang voor toekomstige stikstofvrachten. De meeste literatuur legt een toekomstscenario op aan de huidige landbouweconomie, terwijl de economische reactie van agrariërs op klimaatverandering niet kan worden genegeerd. Verandering in landgebruik of landbouwmethode kunnen mogelijk grotere effecten hebben op de waterkwaliteit dan klimaatverandering.

3.2.5 Invloed op algen

Temperatuur heeft een directe invloed op het functioneren van een organisme. Het bepaalt onder andere de snelheid waarmee bepaalde levensprocessen verlopen en daarmee de temperatuurtolerantie van soorten. Algen zijn de primaire producenten in de voedselketen van aquatische ecosystemen. Daarom hebben veranderingen in algengemeenschappen directe gevolgen voor de hogere niveaus in de voedselketen.

Temperatuur heeft een positief effect op de groeisnelheid van algen als ook andere factoren zoals nutriënten en licht niet limiterend zijn. De temperatuurtolerantie van de meeste algensoorten is vrij breed (Patrick, 1974): 10 - 25 °C in laboratoriumproeven.

Temperatuur kan de algensoortensamenstelling beïnvloeden, doordat bij bepaalde temperaturen er verschuivingen optreden in populaties. Hierdoor kunnen bepaalde algensoorten het watersysteem gaan domineren. Hogere temperaturen resulteren eerder in een dominantie van blauwalgen, gevolgd door groenalgen en diatomeeën bij lagere watertemperaturen (Magnuson et al., 1997). Een temperatuurstijging als gevolg van klimaatverandering kan dus zorgen voor meer dominantie van blauwalgen in het watersysteem. Hierbij moet wel de kanttekening worden geplaatst dat niet alleen temperatuur van belang is voor de mogelijke dominantie van een soort, ook de hoeveelheid licht en de beschikbaarheid van nutriënten zijn van belang. In de literatuur zijn verschillende voorbeelden te vinden van meren waarvan de algensoortensamenstelling is veranderd na een verhoging van de temperatuur (door lozing van koelwater).

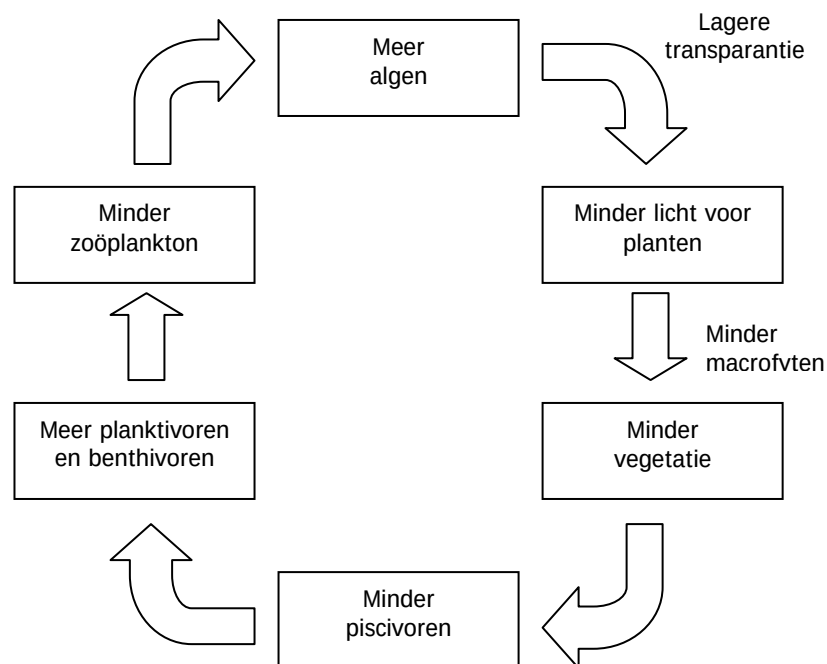
In een studie in Engeland (Carvalho en Kirika, 2003) leidt een verhoging van de wintertemperatuur waarschijnlijk tot een verhoging van de winter fytoplankton biomassa. Echter tegelijkertijd neemt de lente en herfst populatie van grazend zoöplankton toe en is het netto effect onduidelijk. Zij geven aan dat er zijn veel andere directe en indirecte effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit zijn, die de voorspelbaarheid van het effect van deze veranderingen nog verder verminderen.

Mooij et al. (2005) hebben een uitgebreide literatuurrecensie uitgevoerd naar de effecten van klimaatverandering op ondiepe meren in Nederland. Zij stellen dat de ondiepe meren in Nederland over het algemeen een gecontroleerde hydrologie en slecht ontwikkelde littorale zone hebben en daardoor moeilijk zijn te vergelijken met andere ondiepe meren in Europa.

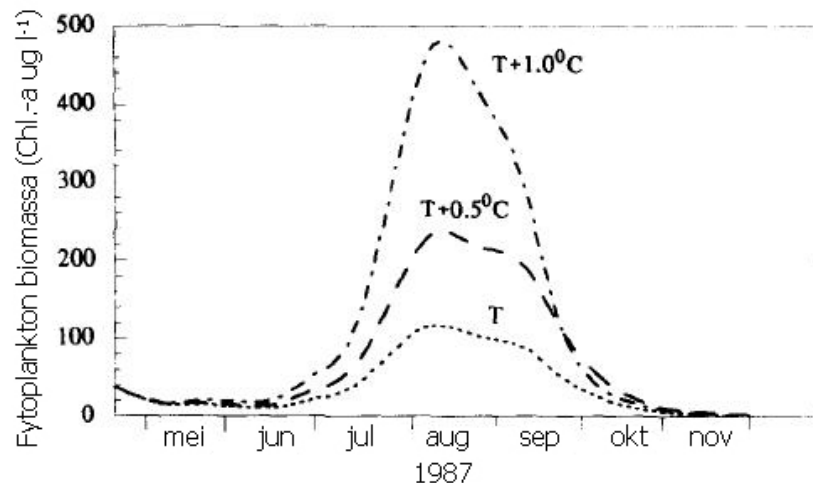
Volgens het concept van afwisselende stabiele fasen (Scheffer et al., 1993) kan een wisseling van een macrofyten gedomineerde heldere fase naar een fytoplankton gedomineerde troebele fase plotseling plaatsvinden bij een stijgende concentratie van nutriënten. Scheffer et al. (2001) concluderen uit tijdserieanalyse en modelstudie dat een temperatuurstijging door klimaatverandering waarschijnlijk zal leiden tot het vaker voorkomen van helder-water-fases. Van Donk et al. (2003) weerleggen met dezelfde dataset en model de conclusies van Scheffer en concluderen dat er geen link is tussen temperatuur en de waarschijnlijkheid van het voorkomen van een helder-water-fase. Jellepsen et al. (2003) gaan verder en stellen dat een temperatuurstijging de kans verhoogt dat meren in een stabiele-troebele-fase blijven steken. Volgens Mooij et al. (2005) zijn er verschillende bewijzen die dit bevestigen: (i) de interne nutriëntvracht stijgt bij een stijging van de temperatuur, (ii) zoöplanktivory door vissen zal waarschijnlijk stijgen door onder ander verminderde mortaliteit in de winter en (iii) sedimentsuspensie zal stijgen door *bioturbation* en wind (Schelske et al., 1995). In Nederlandse meren zijn de macrofyten die de helder-fase stabiliseren door licht gelimiteerd. Mechanismen die de vertroebeling handhaven of zelfs versterken zorgen voor het verhinderen van het vestigen van de macrofyten wat zorgt voor een stabilisatie van de troebele staat van de meren. Scheffer et al. (2003), in een antwoord op van Donk et al. (2003), weerlegt enkele kritieken en stelt dat de effecten van lange termijn klimaatveranderingen nog onduidelijk zijn, echter dat er meerdere aanwijzingen blijven bestaan die bij een gematigde temperatuurstijging wijzen op een door macrofyten gedomineerde (heldere fase) van ondiepe meren in Nederland.

Jayaweera en Asaeda (1995) geven een duidelijk schematisch diagram met het eutrofiëringproces in aan ondiep eutroof meer (Figuur 11). Uit hun onderzoek in het Bleiswijksezoommeer blijkt dat eutrofiëring van ondiepe meren leidt tot meer algenbiomassa, troebel water en een drastische achteruitgang van aantallen waterplanten. Zij stellen dat het essentieel is om het eutrofiëringproces te verminderen om de waterkwaliteit op een goed niveau te krijgen of te houden. De belangrijkste methode voor eutrofiëringcontrole is de aanvoer van externe nutriënten te verminderen. Uit onderzoek blijkt dat de aanwezigheid van veel vis het herstel van ondiepe meren belemmert. Een additionele maatregel zou bio-manipulatie kunnen zijn, waarin een vermindering van planktivoren en benthivoren en de introductie van piscivoren het herstel van het meer zal versnellen. Bio-manipulatie kan echter alleen succesvol worden uitgevoerd bij een laag nutriëntenniveau.

In hun onderzoek kijken Jayaweera en Asaeda (1995) ook naar de invloed van temperatuurstijging op de groei van chlorofyl-a biomassa. Figuur 12 geeft aan dat bij slechts een kleine temperatuurstijging de chlorofyl-a biomassa bijna vijf keer zo hoog wordt in de zomer. De invloed van temperatuurstijging in het eutrofe Bleiswijksezoommeer blijkt enorm. De invloed van temperatuurstijging in het deel van het Bleiswijksezoommeer waar bio-manipulatie had plaatsgevonden is nihil. Het eutrofe meer kan zelfs een oligotroof meer worden waar de primaire productie minimaal is en de verandering in temperatuur geen effect heeft op algenbiomassa of soortencompositie.



Figuur 11. Schematisch diagram van eutrofiëringproces in aan ondiep eutroof meer (aangepast van Jayaweera en Asaeda, 1995).



Figuur 12. Simulatie van chlorofyl-a biomassa bij verschillende temperaturen in het eutrofe deel van het Bleiswijksezoommeer (aangepast van Jayaweera en Asaeda, 1995).

Van der Veer et al. (1995) rapporteren dat in de Nieuwe Meer bij Amsterdam excessieve groei van fytoplankton (in het bijzonder *Cyanobacteria*: blauwalgen) door eutrofiëring een probleem is in de nazomer. In de Nieuwe Meer (diepte tot 30 m) is sprake van een temperatuurstratificatie in de zomer. *Microcystis* (blauwalgen) kunnen door hun drijfvermogen blijven drijven in de eutrofe zone en vormen drijfzaden. Door klimaatverandering en een stijgende temperatuur zal er in de toekomst meer kans bestaan op stratificatie in diepe plassen (meer dan 70 in Fryslân) en door het hierboven beschreven proces, meer kans op blauwalgen die een hinderlijke en soms giftige drijfzaden vormen.

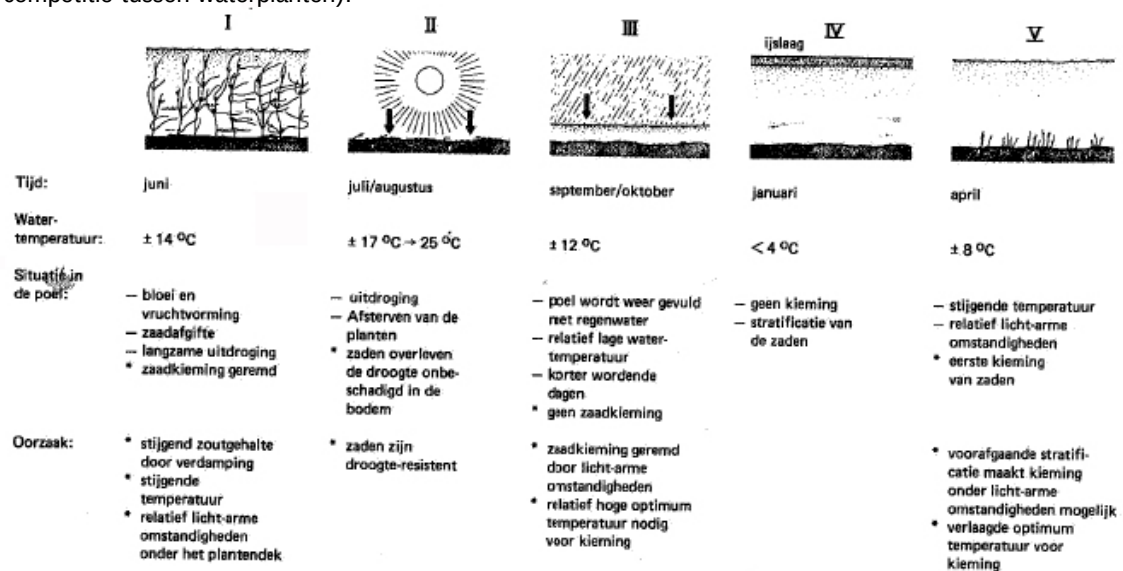
De klassieke wijze voor het herstellen van een goede waterkwaliteit in eutrofe meren is de verwijdering van externe nutriëntenaanvoer. Echter het kunstmatig mengen van het water in gestratificeerde meren, waardoor het voordeel van de blauwalgen met een hoog drijfvermogen teniet wordt gedaan ten opzichte van algen met een lager drijfvermogen, kan ook leiden tot een verbetering van de waterkwaliteit op korte termijn. Het *Cyanobacteria* percentage ten opzichte van de totale fytoplankton massa ging in de zomer van 90% omlaag naar 5% na het kunstmatig mengen van het water in de Nieuwe Meer en blauwalgen vormden geen probleem meer.

3.2.6 Invloed op macrofyten

Temperatuur is een belangrijke factor voor de ontwikkeling en reproductie, onder andere het tijdstip van bloei en uitkomen van zaden (Santamaría en van Vierssen, 1997) van (hogere) planten wordt beïnvloed. De morfologie van de planten wordt sterk beïnvloed door de temperatuur van het water. De structuur van het ecosysteem is van invloed op de grootte van de temperatuurseffecten. In ondiepe, niet gestratificeerde, waterplanten gedomineerde watersystemen, heeft een temperatuurstijging geen groot effect op de biomassa van de planten (McKee et al., 2002; Moss et al., 2003). Echter de soortensamenstelling in dit experiment in Engeland veranderde wel. In troebele, door algen gedomineerde watersystemen, kan klimaatverandering wel effect hebben en is de kans groter op bloei van blauwalgen (Moss et al., 2003). Een stijging van de temperatuur kan gevolgen hebben voor de samenstelling van de plantengemeenschappen. Een hogere voorjaarstemperatuur heeft invloed op

plantensoorten die een temperatuursafhankelijk ruststadium hebben. Deze soorten kunnen eerder tot ontwikkeling komen en hebben daardoor een competitief voordeel ten opzichte van soorten die een rustperiode hebben, die gereguleerd wordt door bijvoorbeeld daglengte. Dus niet alleen een hogere watertemperatuur in de zomer, maar zeker ook de tijd (wanneer er sprake is van een hogere watertemperatuur) is van belang.

Klimaatgebonden ongunstige milieuomstandigheden waar waterplanten een aantal overlevingsstrategieën voor hebben, betreffen onder andere temperatuurstress (hitte en koude), uitdroging, zoutgraad en anaërobie in de wortelzone (Bloemendaal en Roelofs, 1988). Belangrijke zaken die de adaptatieve capaciteit van waterplanten bepalen betreffen de mogelijkheden tot voortplanting (vegetatief of seksueel) en verspreiding (stroming, verspreiding door vogels). Vegetatieve voortplanting gaat bijvoorbeeld bij Schedefonteinkruid (*Potamogeton pectinatus*) via tubers (wortelknolletjes) en turionen (winterknoppen). Soms kunnen losgeslagen delen van een waterplant op andere plaatsen snel uitgroeien tot nieuwe individuen (Grote waternavel is hier een voorbeeld van). In grotere wateren zoals het Veluwemeer en Lauwersmeer sterven populaties Schedefonteinkruid geheel af en overwinteren uitsluitend door middel van wortelknolletjes. Ze produceren deze al relatief vroeg in het voorjaar, zodat ze hun overleving van de winter tijdig veiligstellen. Bij de kieming van de knolletjes speelt temperatuur een zeer belangrijke rol. Tubers zonder kou-inductie (geen blootstelling aan water van 4°C of kouder gedurende minimaal 8 weken) kiemen alleen bij hogere temperaturen (Bloemendaal en Roelofs, 1988). Na kou-inductie kiemen de tubers echter ook al bij veel lagere temperaturen en start het groeiseizoen eerder in het voorjaar (Bloemendaal en Roelofs, 1988). Onder de huidige klimaatscenario's van het KNMI neemt de kans op een periode van 8 weken met water kouder dan 4°C af. Voor de overleving van Schedefonteinkruid in de Nederlandse wateren heeft klimaatverandering geen gevolgen, dit is een cosmopoliet. Maar er kunnen wel consequenties zijn voor soorten die afhankelijk zijn van deze waterplant in het voorjaar (zoals foeragerende zwanen), en de structuur van de aquatische habitat kan ook veranderen (veranderende competitie tussen waterplanten).



Figuur 13. De levenscyclus van zoutwater-zannichellia (*Zannichellia pedunculata*). (Van Vierssen en Van Wijk, 1982).

Planten die voor hun overleving afhankelijk zijn van zaden moeten hun zaadproductie en –kieming nauwkeurig afstemmen op milieumomstandigheden. Deze soorten hebben vaak een korte levenscyclus zodat hun voortbestaan is verzekerd wanneer een ongunstige periode aanbreekt. Voor winterannuëlen (zie voorbeeld in Figuur 13) is een droge zomer een ongunstige omstandigheid, terwijl voor zomerannuëlen juist een koude winter ongunstig is. Bij de meeste soorten is de kieming een cruciale factor in de levenscyclus, deze is nauwkeurig afgestemd op een aantal milieufactoren zoals het zoutgehalte, kou-inductie, temperatuur en uitdroging. Een zaadbank kan bijvoorbeeld gezien worden als een vorm van risicospreiding. Sommige waterplanten hebben hun zaden zo geprogrammeerd dat ze niet kiemen wanneer de omstandigheden ongunstig zijn. En andersom: wanneer de omstandigheden wel gunstig zijn kiemen ze heel snel. Vooral bij 1-jarige planten is het van groot belang dat zaden op het juiste tijdstip (en op de juiste plaats) kiemen, omdat het hiervan afhangt of zich een populatie kan vestigen en ontwikkelen. Zaden van meerjarige planten en van planten die ook nog andere overlevingsorganen kunnen vormen, reageren in het algemeen veel minder uitgesproken op veranderende condities in hun omgeving. Voor dergelijke soorten is het juist een voordeel als de zaden niet allemaal in hetzelfde jaar kiemen, omdat populaties zo minder kwetsbaar zijn voor calamiteiten. De grootte van de zaadbank is bepalend in hoeverre de populatie gevoelig is voor “klimatologische vergissingen”, bijvoorbeeld wanneer door een snelle weersomslag kieming start terwijl het eigenlijk nog te vroeg in het voorjaar is.

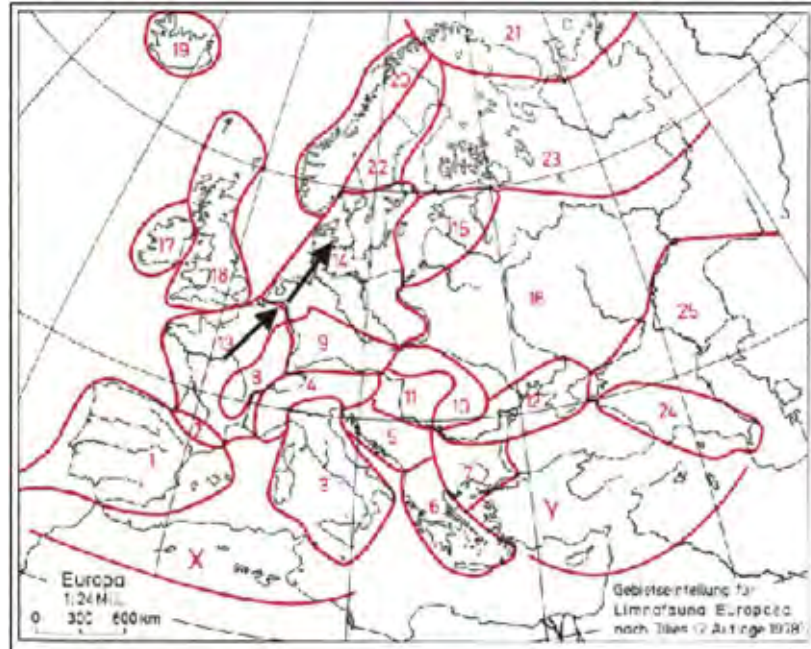
3.2.7 Invloed op macrofauna

Watertemperatuur heeft invloed op groei, metabolisme, reproductie, emergentie en de verspreiding van macrofauna (Vannote en Sweeney, 1980). Temperatuurstijging kan zowel een positief, neutraal als een negatief effect hebben op soortensamenstelling en diversiteit van macrofauna. Iedere soort heeft een specifiek temperatuurtraject waarbinnen de groei en de ontwikkeling optimaal is. Soorten die de levenscyclus voltooien binnen een geringe temperatuursvariatie zijn minder in staat om een temperatuursverhoging te compenseren, terwijl soorten die kunnen overleven in een ruime temperatuursvariatie zich beter kunnen aanpassen en mogelijk zelfs kunnen profiteren van een stijging van de watertemperatuur (van den Hoek en Verdonschot, 2001).

Bepaalde insecten overleven een ongunstige periode door inactief te worden: de diapauze. Voor bepaalde soorten moet de watertemperatuur dalen onder een bepaalde waarde om de diapauze te beginnen. Is de watertemperatuur hoger dan de drempelwaarden dan zal geen diapauze optreden en kunnen soorten zich minder goed ontwikkelen. Een voorbeeld is het larvestadium van bepaalde waterwantsen (*Micronecta*). Het minder koud worden van water door klimaatverandering heeft dus ook effect op aquatische ecosystemen.

Verschillende studies laten zien dat het effect van watertemperatuurverhoging op de soortensamenstelling in een watersysteem gering of niet aanwezig is: Nederland (de Kruik, 1983), Engeland (Mann, 1965; Langford, 1971; Wright et al., 2000). Een recentere studie naar de invloed van temperatuur op de areaalverschuiving van soorten toont aan dat bij een temperatuurverhoging van 1 – 4 °C voor Nederland het de verwachting is dat er een areaalverschuiving van soorten plaats zal vinden naar het noorden (Figuur 14). Van den Hoek en Verdonschot (2001) onderzochten de effecten van temperatuurstijging op de verspreiding van soorten in Nederland en concluderen dat circa 12% van de fauna in bekecosystemen in Nederland zal verdwijnen, 17% nieuw zal zijn en dat voor verreweg de

meeste macrofauna in stromend water (71%) er geen verandering is te verwachten. Voor een uitgebreide analyse per taxonomische hoofdgroep en per soort wordt verwezen naar Van den Hoek en Verdonchot (2001). De verschuiving is ook nu al deels zichtbaar. Voor meer informatie wordt verwezen naar de Natuurkalender (www.natuurkalender.nl) en de nieuwe uitgaven van de Flora van Nederland.



Figuur 14. Ecoregio's in Europa (Illies, 1978). De pijlen duiden op de verwachte richting van verplaatsing van macrofaunagemeenschappen (van den Hoek en Verdonchot, 2001).

Aangezien het effect van temperatuursverhoging per soort erg kan verschillen, voert het voor deze studie te ver om hier in detail verder op in te gaan.

3.2.8 Invloed op vissen

Het metabolisme en de groei van vissen wordt sterk beïnvloed door de watertemperatuur. Groei vindt zelfs alleen plaats als de watertemperatuur binnen een bepaalde range valt. De meeste vissoorten in Nederland groeien dan ook niet of amper in de winter als de temperaturen te laag zijn voor de groei. Een lichte stijging van de watertemperatuur in de winter kan een positief effect hebben, echter tegelijkertijd moet er ook voldoende voedsel aanwezig zijn om aan de verhoogde energiebehoefte te voldoen en de biologische interacties mogen zich verder niet wijzigen (Shuter en Meisner, 1992). Voor soorten die een lagere watertemperatuur nodig hebben om zich te kunnen voortplanten zou een stijging van de watertemperatuur een negatief effect hebben.

Een temperatuurstijging kan ook een verlenging van de voortplantingsperiode tot gevolg hebben. De Kruijk (1983) constateerde in de koelwaterpluim van de Flevocentrale in het IJsselmeer dat de paaitijd van Snoekbaars twee tot drie weken eerder begon, maar gelijk eindigde met de overige populatie in het IJsselmeergebied.

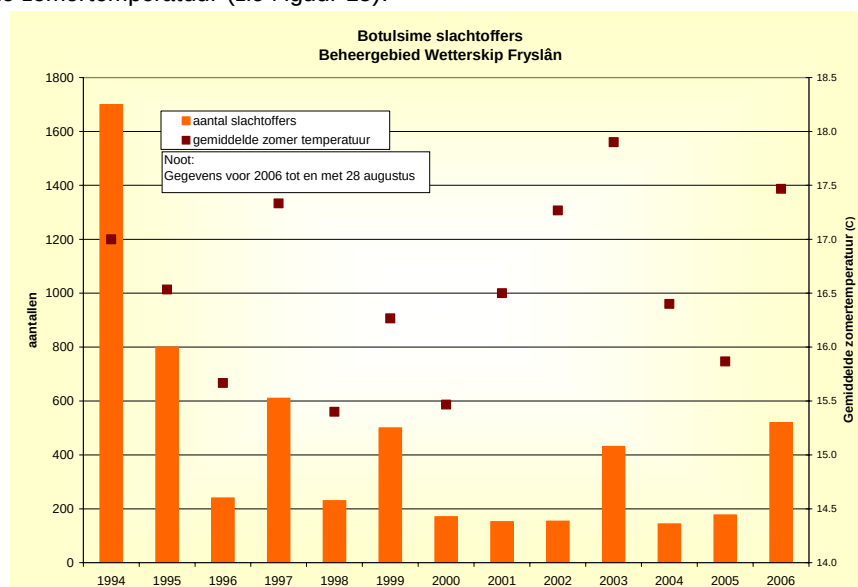
De effecten van een temperatuurstijging van het water op vissen hangen af van de grootte van de temperatuurstijging, de (thermische) eisen die de soort stelt aan het systeem en het watertype. Daarnaast bieden verschillende watertypen verschillende mogelijkheden voor soorten om te migreren naar een zone met de meest geschikte watertemperatuur.

Aangezien het effect van temperatuursverhoging per soort erg kan verschillen, voert het voor deze studie te ver om hier in detail verder op in te gaan.

3.2.9 Invloed op botulisme

Botulisme is een voedselvergiftiging bij mensen of dieren, die veroorzaakt wordt door opname van voedsel waarin zich de bacterie *Clostridium Botulinum*, botulinumtoxine, heeft gevormd. Er bestaan zeven verschillende typen van deze bacterie. De mens is vooral gevoelig voor de, gelukkig zeldzame, typen A, B, E, en F. Deze typen zijn na 1976 in Friesland niet meer aangetoond. Al tientallen jaren is bij gestorven watervogels in Fryslân steeds het type C vastgesteld dat schadelijk is voor watervogels. De bacteriën vermenigvuldigen zich snel bij gunstige omstandigheden als vuil, warm en ondiep stilstaand water. Gemeente Leeuwarden heeft baggeren van een aantal vaarten versneld vanwege regelmatig optreden botulisme. Botulisme verspreidt zich vooral via besmette kadavers. Gezonde watervogels nemen weefseldeeltjes en vliegenlarven (maden) op van de kadavers en worden hierdoor ziek. De bacterie kan ook rechtstreeks uit de bodem worden opgenomen (botulismefolder Wetterskip Fryslân).

In tegenstelling tot wat de meeste mensen denken, komt botulisme niet alleen in de zomer voor. Botulisme komt het gehele jaar voor, alleen zijn het aantal gevallen veel minder dan in de zomermaanden. Dat duidt al op een invloed van de temperatuur. Gunstige condities voor optreden botulisme zijn hoge temperaturen en aanwezigheid van organisch afval (van lozingen of in sediment). In de warme zomer van 2006 was het aantal slachtoffers opvallend hoger dan in jaren met een lagere gemiddelde zomertemperatuur (zie Figuur 15).



Figuur 15. Botulisme slachtoffers in het beheergebied van Wetterskip Fryslân (1994-2006).

3.2.10 Invloed op schelpdieren in de Waddenzee

De wintertemperatuur lijkt ook een belangrijke factor in het voortplantingssucces van schelpdieren. Hogere temperaturen in de winter leiden tot een lager voortplantingssucces in het daarop volgende voorjaar. De stijging van de watertemperatuur van de Waddenzee is waarschijnlijk de belangrijkste oorzaak van de achteruitgang van het nonnetje, een schelpdier. Het aantal volwassen nonnetjes is nu ongeveer een vijfde van wat er rond 1988 op de wadplaten lag (Beukema en Honkoop, 1995).

Schelpdieren vormen, naar hun biomassa, een van de belangrijkste diergroepen in de Waddenzee, gezien hun rol als voedselbron voor vogels en vissen. Zachte, warme winters hebben een nadelige invloed op de voortplanting van de belangrijkste soorten tweekleppige schelpdieren (kokkels, nonnetjes en mossels), zeker als dit vaker enige jaren achtereenvolgens gebeurt. Door hun korte levensduur en het variabele succes in hun voortplanting zijn de aantallen tweekleppigen in de Waddenzee onderhevig aan sterke jaarlijkse schommelingen. Opeenvolging van zachte winters in de periode 1988 tot en met 1990 leidde tot een grote achteruitgang van de stand. Veel vogels, zoals eidereenden en scholeksters stierven massaal in de winter van 1990/1991 en de visserij kwam in 1991 stil te liggen. Uit een langjarige serie gegevens over de bodemfauna in de westelijke Waddenzee was al eerder gebleken, dat speciaal na een strenge koude winter een extra grote nieuwe generatie van schelpdieren ontstaat (zie standen van 1947, 1963 en 1979 en 1987; strenge winters). Aan de hand van veldwaarnemingen en laboratoriumproeven is dit nader bestudeerd voor de kokkel, mossel en nonnetje (Beukema en Honkoop, 1995). Na een koude winter bleken volwassen tweekleppigen gemiddeld zwaarder (bij eenzelfde schelpenlengte) dan na een zachte winter door geringer gewichtsverlies bij lage wintertemperaturen. Verder lijkt van belang, dat de belangrijkste roofvijanden (garnalen en strandkrabben) na een zachte winter eerder en in grotere aantallen op de wadplaten verschijnen dan na een koude winter (Beukema en Honkoop, 1995).

3.3 Klimaatverandering (neerslag en afvoeren)

3.3.1 Inleiding

Waterkwaliteit wordt naast de direct menselijke belasting ook beïnvloed door "autonome" ontwikkelingen zoals klimaatverandering. Het betreft hier zowel korte termijn als lange termijn effecten. De lange termijn effecten van klimaatverandering zijn het gevolg van een geleidelijke verandering in landgebruik, resulterend in een verandering van de toepassing en de uitspoeling van chemische stoffen naar het grond- en oppervlaktewater. De korte termijn effecten van klimaatverandering hangen samen met de veranderingen in het optreden van extreme hydrologische gebeurtenissen. Door veranderingen van de neerslaghoeveelheid en het neerslagkarakter zullen de patronen in de rivierafvoeren van de Rijn en de Maas ook wijzigen (Beersma et al., 2004; De Wit, 2001; Middelkoop, 2000). Toename van de winterneerslag, niet alleen in Nederland maar ook elders in de stroomgebieden van Rijn en Maas, zal resulteren in een toename van de piekafvoer van deze rivieren. Bovendien zal in berggebieden meer neerslag vallen in de vorm van regen in plaats van sneeuw. Hierdoor neemt de Rijnaafvoer in de winter toe (KNMI, 2006a). In de zomer neemt in bepaalde klimaatscenario's de gemiddelde neerslag juist af. Tegelijkertijd neemt de verdamping toe (zolang er voldoende vocht aanwezig blijft). In de stroomgebieden van Rijn en Maas betekent dit een lagere rivierafvoer, en vaker een lage waterstand (KNMI, 2006a).

Lagere rivierafvoeren gecombineerd met hogere temperaturen hebben een negatieve invloed op de waterkwaliteit. In combinatie met zeespiegelstijging veroorzaken lagere rivierafvoeren het verder binnendringen van zout water vanuit zee (zie ook paragraaf 3.6).

Door intensievere buien is het ook mogelijk dat er meer oppervlakkige afstroming plaatsvindt over het maaiveld. Deze oppervlakkige afstroming komt in het aquatisch ecosysteem en kan zorgen voor een verslechtering van de waterkwaliteit. Voorbeelden hiervan zijn gevonden voor stikstof (paragraaf 3.3.5) en fosfaat (paragraaf 3.3.6).

Een ander gevolg van de extreme neerslag is de vergrote kans op overstorten van het rioleringsstelsel, wat leidt tot grotere emissies. Een landelijke quick-scan leert dat de emissie met 40% kan toenemen (Procencus, 2006). Al in 2004 geven Rooijers et al. in hun *"Klimaatverandering Klimaatbeleid. Achtergrondrapport Inzicht in keuzes voor de Tweede Kamer"* aan dat de ontwerpafvoer van rioleringen omhoog zal moeten om neerslagpieken in stedelijke gebieden te kunnen opvangen. Aan de andere kant is recentelijk in Fryslân een studie afgesloten naar de effecten van overstorten uit het gemengde rioolstelsel op de zuurstofconcentratie in het oppervlaktewater (Boogaard et al., 2006). Het effect van de vuiluitworp van het rioolstelsel in Heeg op het oppervlaktewater was veel kleiner dan verwacht. Slechts 15% van de overstortingen had een aantoonbaar negatief effect op de zuurstofconcentratie van het oppervlaktewater, terwijl in sommige gevallen het zuurstofgehalte in het oppervlaktewater zelfs toeneemt na een overstorting. Ook bij vergelijkbaar onderzoek bleken deze constateringen op te gaan. Een onderzoek bij Waterschap Vallei en Eem concludeerde dat er gemiddeld genomen geen sprake was van een hogere concentratie aan nutriënten na overstortingen, en verschillen in zuurstofhuishouding en algehele ecologische toestand bleken niet significant aantoonbaar (Boogaard et al., 2006). Stichting RIONED ziet op dit moment geen aanleiding om nieuwe ontwerpbuizen te maken. In de Leidraad Rioleringen zijn ontwerpers echter vrij om zelf een afweging te maken welke ontwerp buis wordt gebruikt. Naast de hogere kans op overstorten van het rioleringsstelsel zal een toename in de intensiteit van buien leiden tot een andere verhouding tussen de regenwateraanvoer (RWA) en droogweeraanvoer (DWA) naar de RWZI's. In principe zuivert verdunt afvalwater slechter, echter de exacte effecten van klimaatverandering op de zuiveringsefficiëntie zijn nog niet bekend.

Onderzoek naar waterkwaliteit tijdens extreme hydrologische gebeurtenissen staat nog in de kinderschoenen (Zwolsman en Doomen, 2005). Over het algemeen verslechtert de waterkwaliteit tijdens langdurige droogte door (i) verminderde verdunning van lozingen en (ii) door de hogere temperatuur en de daarmee samenhangende kans op algenbloei (zie paragraaf 3.2.5), zuurstofloosheid (zie paragraaf 3.2.3), vissterfte en botulisme.

De hoogte en duur van rivierwaterstanden hebben invloed op de kwel en wegzijging langs de grote rivieren (Heerwaarden et al., 2005). Klimaatveranderingen kunnen grote invloed hebben op de kwel en wegzijging gedurende het jaar. Van Heerwaarden et al. (2005) in een studie voor Waterschap Rivierenland rekenen nog met de klimaatscenario's uit het Basisrapport Waterbeleid voor de 21e eeuw (WB21, 2000) en de droogtestudie (ICIS, 2003). Hun conclusies zijn dat wanneer het hoge of het middenscenario werkelijkheid wordt de kwel heviger zal worden tijdens hoogwater in de winter en er meer water afgevoerd zal worden. Bovendien is dit lastig om af te voeren door de hogere rivierstanden. Het droge scenario zal juist voor problemen in de zomer en het najaar zorgen, omdat de rivierafvoeren drastisch lager worden waardoor er meer wegzijging zal plaatsvinden. In deze studie

wordt niet naar de waterkwaliteit gekeken, echter het inlaten van gebiedsvreemd water ten tijde van droogte kan de waterkwaliteit negatief beïnvloeden. In het zelfde gebied waar van Heerwaarden et al. (2005) hun onderzoek uitvoerden hebben Soppe et al. (2005) in de zomer van 2003 gemeten dat het inlaatwater (vanuit de rivieren) hogere stikstof- en fosforconcentraties heeft dan het uitlaatwater. Echter het is onbekend of dit ook voor langere periode geldt; de meetreeksen zijn te kort om goed gefundeerde uitspraken te doen over de relatie tussen in- en uitlaten.

3.3.2 Invloed op chlorideconcentratie

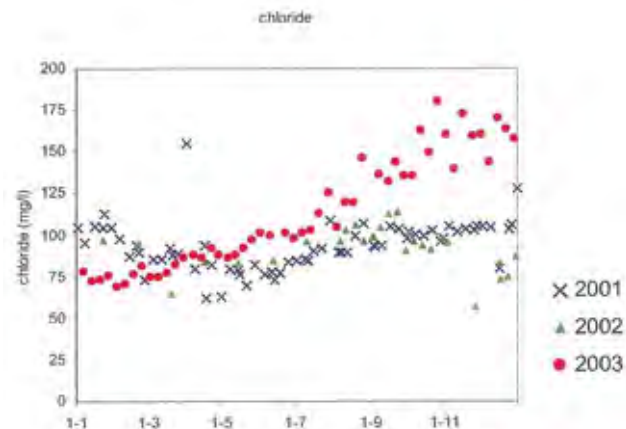
Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2004) stelt in de "Evaluatienota Waterbeheer Aanhoudende droogte 2003" dat de zomer van 2003 meer was dan een gemiddelde droge zomer, maar geen extreem droge zomer. Volgens V&W is de kwaliteit van het water gedurende de droogteperiode niet of nauwelijks in gevaar geweest. Wel wordt geconcludeerd dat doordat de warmte in 2003 lang aanhield, de temperatuur van het oppervlaktewater wel uitzonderlijk hoog werd en er veel water verdampte. De droge periode had een lagere afvoer van rivieren en beken tot gevolg. Zwolsman en Doomen (2005) plaatsen enkele kanttekeningen bij de conclusie van V&W en stellen dat deze alleen gebaseerd is op twee variabelen: watertemperatuur en chloridegehalte. Dit is een wankelende basis om te concluderen dat de effecten van droogte op de waterkwaliteit niet belangrijk zijn. Een andere kanttekening op de conclusies van V&W is dat deze vooral van toepassing zijn op de grote rivieren en minder op regionale watersystemen.

De droge zomer van 2003 heeft geleid tot lage afvoeren in de Rijn en Maas (www.waterbase.nl). De gevolgen van het lage debiet en de lange periode voor de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas hadden een sterke stijging van het chloridegehalte tot gevolg. De verhoging van het chloridegehalte wordt verklaard door de constante lozing in combinatie met een afname van de verdunning tijdens de lage afvoer periode. Voor Wetterskip Fryslân is de waterkwaliteit van het IJsselmeer van groot belang. Het IJsselmeer is de bron voor Wetterskip Fryslân voor het inlaten van (gebiedsvreemd-) water, noodzakelijk voor peilhandhaving, wateraanvoerbehoefte vanuit de landbouw en natuur, waterdoorvoer naar Groningen en verziltingsbestrijding. Het water van het IJsselmeer bestaat voor circa 70% uit Rijnwater (Breukel, 1993). Het chloridegehalte in het IJsselmeer is in de tweede helft van 2003 hoger dan in de voorgaande jaren (Figuur 16). Het maximum in 2003 was 180 mg l^{-1} , terwijl de maxima in 2001 en 2002 rond de 110 mg l^{-1} lagen.

De verhoogde chlorideconcentraties in het IJsselmeer (Andijk) kunnen waarschijnlijk niet volledig worden toegeschreven aan de hogere chlorideconcentraties in de Rijn. Andere chloridebronnen, zoals uitslagwater van aanliggende polders en brakke kwel kunnen een rol hebben gespeeld. Ook het grotere neerslagtekort (neerslag - verdamping) in 2003 heeft waarschijnlijk een bijdrage geleverd aan de hogere chlorideconcentratie in het IJsselmeer.

Als de Rijn een regenrivier wordt in een extreem klimaatscenario en de bijdrage van het afsmelten van sneeuw en ijs van de Alpen wegvalt, dan zullen extreem laagwater afvoeren vaker voorkomen en de debieten nog lager zijn dan nu het geval is. Zwolsman en Doomen (2005) berekenen bij dit extreme scenario dat het voorkomen van chlorideconcentraties boven de 200 mg l^{-1} zeer wel mogelijk is. Oppervlaktewater met chlorideconcentraties boven de 200 mg l^{-1} is ongeschikt voor de bereiding van drinkwater en voor de berekening van gevoelige gewassen. Wat exact het effect van deze hoge

chlorideconcentraties in de Rijn op de chlorideconcentraties in het IJsselmeer zal zijn is nog niet onderzocht.



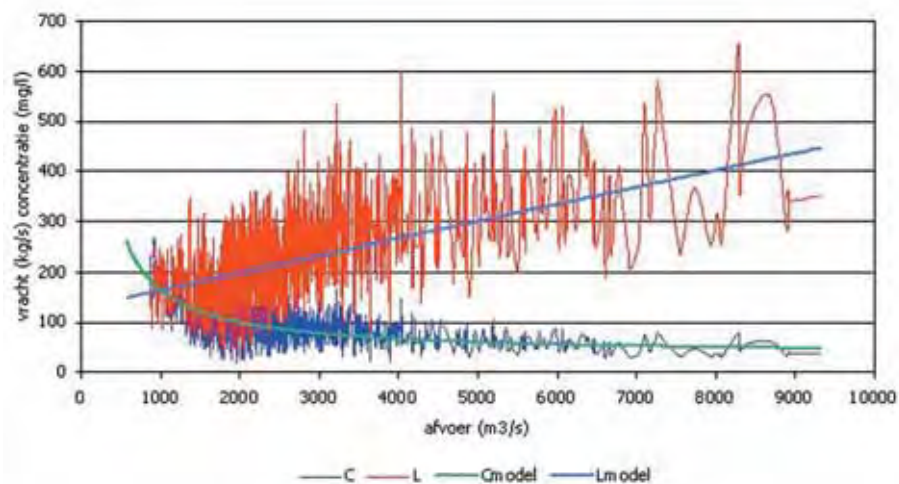
Figuur 16. Chloride in het IJsselmeer (Andijk) in 2001, 2002 en 2003 (Zwolsman en Doomen, 2005).

De Bruijn en van Mazijk (2003) hebben de afvoeren en chloridebelasting van de Rijn gemodelleerd bij verschillende KNMI klimaatscenario's (Korst et al., 2000; de oude klimaatscenario's). Figuur 17 geeft de relatie tussen afvoer, chlorideconcentratie en chloridevrachten bij Lobith.

Voor de figuur zijn meetgegevens uit de periode 1981-1985 gebruikt.

Waarin:

C	chlorideconcentratie bij Lobith	mg l ⁻¹
L	chloridevracht bij Lobith	kg s ⁻¹



Figuur 17. Modelling chloridebelasting van de Rijn na aftrek van de invloed van de kalimijnen bij verschillende debieten (de Bruijn en van Mazijk, 2003).

Extrapolatie van de chlorideconcentraties uit Figuur 17 geeft de waarden voor lage afvoeren zoals gepresenteerd in Tabel 6.

Tabel 6. Gemodelleerde chlorideconcentraties bij lage afvoeren van de Rijn (Lobith) (de Bruijn en van Mazijk, 2003).

Debiet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	chlorideconcentratie (mg l^{-1})
500	294
600	251
700	220
800	197
900	178
1000	164

De grenswaarde van de chlorideconcentratie van 200 mg l^{-1} wordt bereikt bij een afvoer van $783 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Deze afvoer komt volgens de modellering van De Bruijn en van Mazijk (2003) met een kans van 2,67 dagen per jaar voor bij het (oude) centrale KNMI klimaatscenario. Bij het (oude) hoge KNMI klimaatscenario is dit een kans van 9 dagen per jaar.

Naast de modellering van de Rijn hebben de Bruijn en van Mazijk (2003) ook een chloridebalans opgesteld voor het IJsselmeer en modelmatig de invloed van klimaatveranderingen (oude KNMI scenario's) op de chlorideconcentratie in het IJsselmeer berekend. Zij stellen dat de chlorideconcentratie van het IJsselmeer ook in de toekomst niet boven de 200 mg l^{-1} zal komen. Hier wordt wel meteen aan toegevoegd dat de resultaten indicatief zijn, omdat er gewerkt is met een sterk vereenvoudigd model. In het model worden andere zoutbronnen dan de Rijn, bijvoorbeeld kwel genegeerd, het volume en waterpeil van het IJsselmeer worden constant verondersteld en er is een instantane menging in het IJsselmeer, dat wil zeggen de chlorideconcentraties van het IJsselmeer zijn overal gelijk.

Jacobs (2005) (in MNP, 2005b) laat de gevolgen van zoutindringing bij drinkwaterinnamepunt Ridderkerk zien (Tabel 7) voor jaren die karakteristiek zijn voor zoutindringing. De jaargemiddelde chlorideconcentraties nemen in 2050 in de extremere zoutjaren aanzienlijk toe.

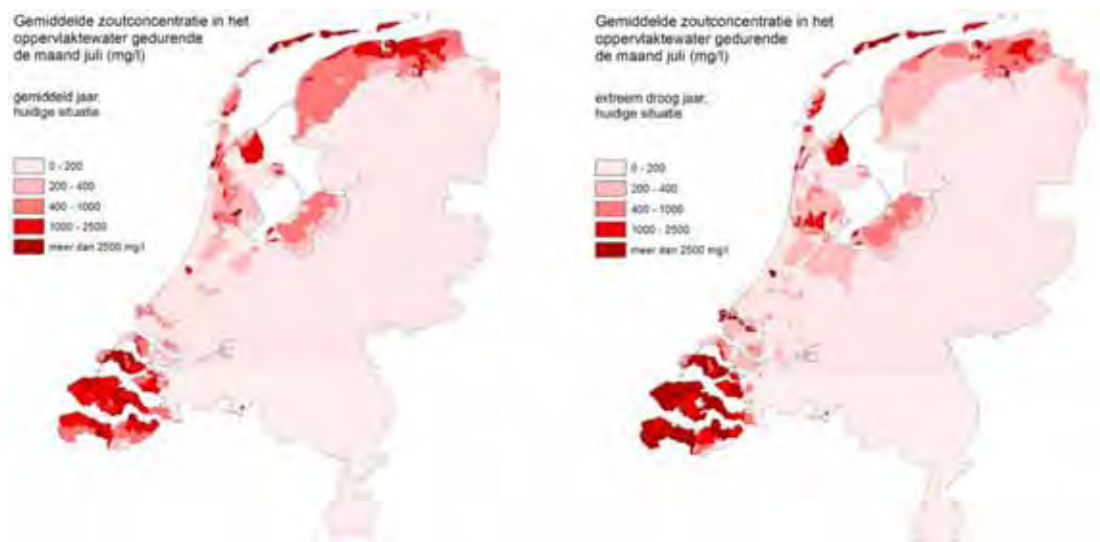
Tabel 7. De jaargemiddelde chlorideconcentraties bij het innamepunt voor drinkwater Ridderkerk (Jacobs, 2005).

Jaargemiddelde chlorideconcentratie (mg l^{-1})	huidig klimaat	2050 midden klimaatscenario
matig brak jaar	82	82
gemiddeld zout jaar	122	122
zout jaar	178	211
extreem zout jaar	344	400

In de droogtestudie Nederland (Riza, 2005) zijn ook overschrijdingskansen berekend voor karakteristieke verziltingsjaren in het benedenrivierengebied. Hieruit blijkt dat de overschrijdingskans voor een extreem zout jaar met 80% toeneemt. Bij een zout jaar en gemiddeld zout jaar is dit respectievelijk 60 procent en 35 procent. In de toekomst kunnen dus aanzienlijk vaker zoute omstandigheden worden verwacht.

Riza (2005) heeft voor de droogtestudie Nederland de gemiddelde zoutconcentratie over de maand juli in de lokale wateren (vaarten, sloten) berekend voor een gemiddeld jaar en een extreem droog jaar.

Voor de maand juli is gekozen, omdat rond die periode de hoogste zoutconcentraties optreden en schade aan natuur en gewassen kan veroorzaken. De zoutconcentraties in het oppervlaktewater nemen in een extreem droog jaar doorgaans toe ten opzichte van een gemiddeld jaar. Door de lagere afvoer uit de polders (groter neerslagtekort) wordt het zoute kwelwater in een extreem droog jaar nauwelijks verdund met regenwater. Daarnaast kan in enkele gebieden niet worden doorgespoeld omdat geen water beschikbaar is of inlaatcapaciteit afwezig of beperkt is. Hierdoor kunnen in een extreem droog jaar onacceptabel hoge zoutconcentraties optreden in onder andere delen van het westen en noorden van Friesland.



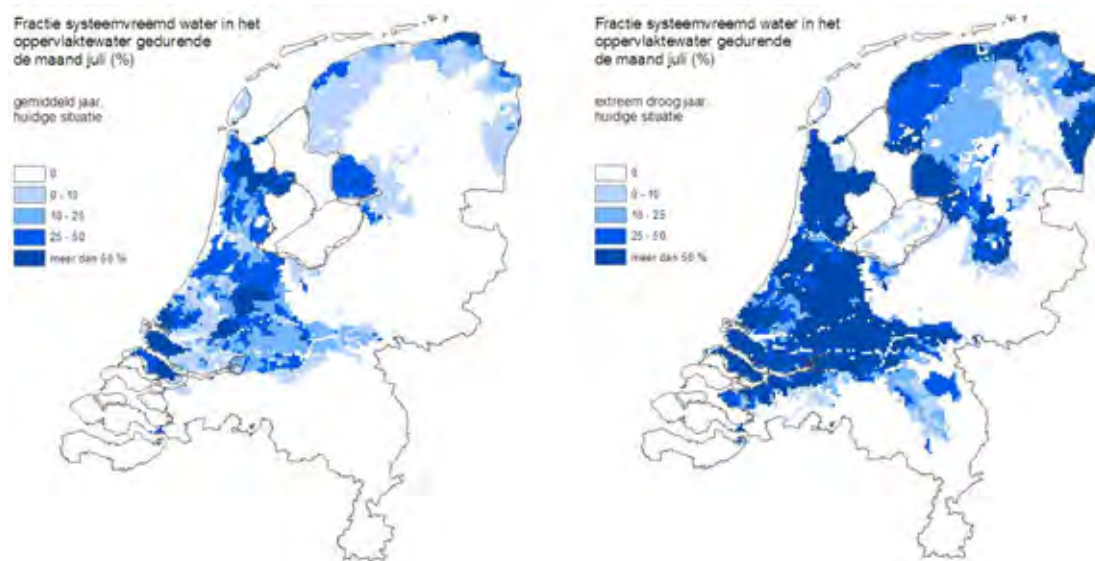
Figuur 18. Zoutconcentratie in het oppervlaktewater (gemiddeld over afwateringseenheden), in de huidige situatie voor het gemiddelde jaar (links) en het extreem droge jaar (rechts) (Riza, 2005).

Figuur 18 komt rechtstreeks uit het Riza rapport, echter hier lijkt de zoutconcentratie in een extreem droog jaar in Fryslân juist iets af te nemen. Dit is in tegenspraak met de tekst in het Riza rapport. In een eerdere rapportage voor de droogtestudie Nederland (RIZA, 2004) is een vergelijkbare figuur opgenomen, echter hier lijkt de figuur wel in lijn met de tekst uit het rapport en neemt de zoutconcentratie in een extreem jaar toe in Fryslân. Het Riza (Timmo Kroon) geeft aan dat de rapportage van 2005 recentere berekeningen zijn en in het algemeen als beter wordt beoordeeld dan de oudere berekeningen van 2004, echter berekende zoutconcentratie is een gevoelige parameter, die onder meer afhangt van zoute kwel, het ingelaten water, waaronder de doorspoeling en andere parameters, zoals verdamping. Het Riza is zich er van bewust dat de figuren in de rapportage uit 2005 er voor Fryslân en Noord-Nederland minder logisch uitziet dan de figuur uit 2004. Het Riza zal op korte termijn nagaan waar de afwijking in Fryslân (en Noord-Groningen) aan ligt.

Uit berekening van het toekomst scenario (controlist: IPCC centrale schatting) blijkt dat de gemiddelde zoutconcentratie in een gemiddeld jaar in veel gebieden nauwelijks toeneemt ten opzichte van de huidige situatie. In het extreem droge jaar neemt de zoutconcentratie in het westen van Nederland (met name het beheergebied van het Hoogheemraadschap van Rijnland) toe. Geconcludeerd kan worden dat de zoutconcentraties in gemiddelde jaren in de toekomst niet toenemen, maar dat de extreme situaties in de toekomst extremer worden. Dezelfde berekeningen zijn ook uitgevoerd voor extremere klimaatveranderingsscenario's (IPPC bovenschatting en het KNMI droge scenario, gebruikt

voor de droogtestudie Nederland). Bij deze klimaatscenario's wordt ook voor de gemiddelde jaren in de toekomstige situatie een verhoging van de zoutconcentratie gevonden. In paragraaf 3.6.1 wordt nog kort ingegaan op de invloed van de zeespiegelstijging op de chlorideconcentraties.

In de droogtestudie Nederland (Riza, 2005) zijn ook gegevens opgenomen over de fractie systeemvreemd water per gebied (Figuur 19). Systeemvreemd water wordt ingelaten ten behoeve van bijvoorbeeld doorspoeling, peilhandhaving en beregening. De betreffende gebieden zijn in de zomerperiode doorgaans in meer of mindere mate afhankelijk van water buiten het eigen watersysteem. Voor het vaste land van Fryslân is de bron van systeemvreemd water het IJsselmeer. In Figuur 19 wordt de fractie systeemvreemd water voor een gemiddeld en extreem droog jaar, in de maand juli weergegeven. Hoe hoger de fractie, des te hoger is het aandeel van aangevoerd water in een gebied en dus ook de afhankelijkheid van die aanvoer.



Figuur 19. Fractie systeemvreemd water in een gemiddeld jaar (1967, links) en een extreem droog jaar (1976, rechts) (Riza, 2005).

Ook in een gemiddeld jaar wordt er systeemvreemd water ingelaten in Fryslân, echter in een extreem droog jaar zal de fractie systeemvreemd water in Fryslân stijgen. Interessant is om dit in het perspectief van een hogere chlorideconcentratie in het IJsselmeer te beschouwen. Het voorkomen van deze extreem droge jaren zal in de toekomst toenemen, waardoor er in Fryslân vaker meer systeemvreemd water wordt ingelaten met een hogere concentratie chloride.

In deze studie is geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat het IJsselmeer in een extreem droog jaar niet voldoende water bevat voor peilhandhaving en het doorspoelen van de Friese watersystemen. In tijden van watertekorten treedt de nieuwe verdringingsreeks (zie tekstbox) in werking om te kunnen bepalen met welke prioriteit de verschillende watervragers water krijgen, bijvoorbeeld landbouw, natuur, scheepvaart en drinkwater (Min. V&W, 2004). De verdringingsreeks vormt dus de basis waarop besluiten over de verdeling van water in tijden van watertekorten worden gebaseerd. In Fryslân krijgt de veiligheid en stabiliteit van waterkeringen prioriteit. Echter ook de natuur staat vermeld in categorie 1 van de verdringingsreeks indien er onomkeerbare schade optreedt bij bijvoorbeeld minder doorspoelen van het watersysteem met IJsselmeerwater.

Tekstbox: Verdringingsreeks en natuur.



Nieuwe verdringingsreeks (www.droogtestudie.nl, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004).

Noot: Binnen de categorieën 1 en 2 is sprake van een prioriteitsvolgorde. Binnen de categorieën 3 en 4 vindt onderlinge prioritering plaats op basis van minimalisatie van de economische maatschappelijke schade.

Wat is onherstelbare natuurschade? Onherstelbare natuurschade kent twee dimensies:

1. Schade aan de habitat (abiotische schade)
2. Schade aan de flora en fauna (biotische schade).

1. Abiotische schade

Onherstelbare abiotische schade door watertekorten kan op een aantal manieren optreden. Twee belangrijke mechanismen zijn:

- Inklinking van veen. In Nederland zijn hierdoor in het verleden vrijwel alle hoogveengebieden verdwenen.
- Inlaat van systeemvreemd water, waardoor bijvoorbeeld zout of nutriënten worden ingelaten. In sommige gevallen zijn deze stoffen niet of nauwelijks meer uit het systeem te krijgen.

2. Biotische schade.

Biotische schade kan via een aantal mechanismen optreden, hoewel het vaak minder duidelijk is of de schade al dan niet herstelbaar is. Mede hierdoor is er een bepaalde interpretatievrijheid voor de waterbeheerder.

De belangrijkste mechanismen zijn:

- Droogvallen van watersystemen die zonder menselijke invloed niet droog kunnen vallen. Hierdoor kunnen soorten verdwijnen. Soms komen daar weer andere soorten voor in de plaats.
- Plotselinge verandering van de waterkwaliteit, waardoor ecosystemen min of meer geheel worden aangetast. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren met zout (opdringend zeewater), maar ook met toxische stoffen. Ook een plotselinge algenbloei valt onder deze categorie. Met name blauwalgen zijn daarbij gevaarlijk. In 2003 stierven hierdoor vele duizenden vogels in de Oostvaardersplassen. Het probleem kan (deels) worden voorkomen door doorspoeling, mits er voldoende water van de juiste kwaliteit beschikbaar is.

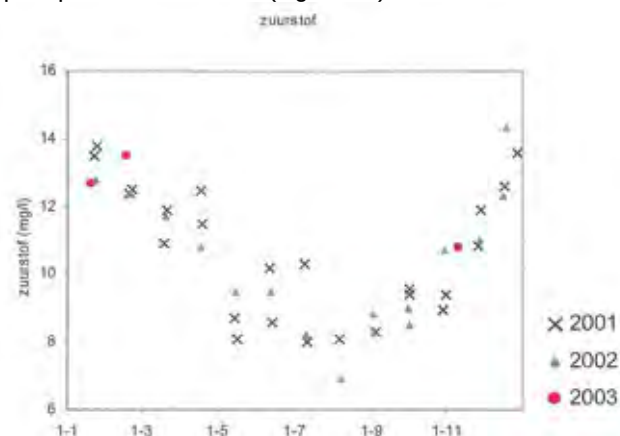
Runhaar (2006a,b) concludeert dat er maar weinig situaties zijn waarin onomkeerbare schade aan de natuur door droogte kan worden voorkomen door het aanvoeren van water. Sterker nog, vooral in laag Nederland zijn er veel situaties waarin onomkeerbare schade aan de natuur kan worden voorkomen door te zorgen dat water van de verkeerde kwaliteit gevoelige gebieden niet of pas in laatste instantie bereiken. Vooral de inlaat van (licht) brak en zout water in zoetwatergebieden kan leiden tot negatieve effecten op de natuur. Runhaar presenteert een afwegingsschema om onomkeerbare schade aan de natuur door droogte tegen te gaan.

3.3.3 Invloed op Elektrisch Geleidend Vermogen

In een studie in Nieuw Zeeland (Caruso, 2002) tijdens extreme lage afvoeren in een rivier steeg het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) sterk ten opzichte van de EGV bij normale afvoeren door een gebrek aan verdunning van het water, een stijging van de verdamping (door de hogere temperaturen) en (relatief) meer grondwater aanvoer ten opzichte van de totale aanvoer van water. Interlandi en Crockett (2003) in een studie in de Verenigde Staten constateren dat neerslag, rivierafvoer en landgebruik een vergelijkbaar effect hebben op het EGV, zuurgraad, stikstofvruchten en chlorideconcentraties.

3.3.4 Invloed op zuurstofgehalte

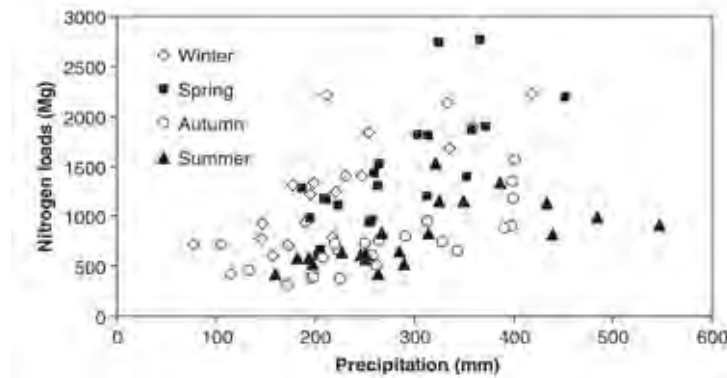
Het zuurstofgehalte in het oppervlaktewater dient minimaal 4 mg l⁻¹ te zijn. Beneden deze waarde dreigt verstikking van het waterleven en in het bijzonder vissterfte (beneden 3 mg l⁻¹). De zuurstofverzadiging is afhankelijk van de temperatuur: koud water kan meer zuurstof bevatten dan warm water (zie ook paragraaf 3.2.3). Het zuurstofgehalte in oppervlaktewateren wordt naast de temperatuur beïnvloed door beweging/stroming (reaeratie) en biologische processen (fotosynthese en dissimilatie). De droge zomer van 2003 heeft geleid tot lage afvoeren in de Rijn en Maas (www.waterbase.nl). Er is echter geen verslechtering van het zuurstofgehalte geconstateerd ondanks de hoge temperaturen en lagere afvoeren. Voor Wetterskip Fryslân is de waterkwaliteit van het IJsselmeer van groot belang. Het water van het IJsselmeer bestaat voor circa 70% uit Rijnwater (Breukel, 1993). Er zijn te weinig meetgegevens beschikbaar om een goede uitspraak te doen over de invloed van neerslag op de parameter zuurstof (Figuur 20).



Figuur 20. Zuurstof in het IJsselmeer (Andijk) in 2001, 2002 en 2003 (Zwolsman en Doomen, 2005).

3.3.5 Invloed op stikstofconcentraties

Caruso (2002) vindt in een studie in Nieuw Zeeland in een door landbouw gedomineerd stroomgebied tijdens extreme lage afvoeren in een rivier dat de concentratie van totaal stikstof daalt ten opzichte van een normaal jaar, door het gebrek aan regen en daardoor weinig oppervlakkige afstroming van het land. Ook in de Verenigde Staten wordt een significante correlatie gevonden tussen neerslag en stikstofvrachten in een rivier: stikstofvrachten stijgen substantieel bij meer neerslag (Chang, 2004). De vrachten hangen nauw samen met het bodemtype en de vorm van landgebruik in het stroomgebied en bijbehorende waterbeheer tot op perceelniveau. In deze studie is neerslag verantwoordelijk voor 75% van de jaarlijkse variatie in stikstofvrachten.



Figuur 21. Relatie tussen neerslag en stikstofvrachten per seizoen voor de Conestoga Rivier, Pennsylvania, V.S., 1977-1997 (Chang, 2004).

De relatie tussen stikstofvrachten en neerslag varieert per seizoen. De verschillende hellingen van de regressieformules (zie Figuur 21) suggereren een verschillende gevoeligheid van stikstofvrachten voor seizoensneerslag. Stikstofvrachten stijgen het snelst bij een toename van de lenteneerslag, dit is ook het seizoen met de meeste landbouwbemesting. In zomer nemen de stikstofvrachten het minst toe bij een toename van de neerslag. Deze bevindingen zijn belangrijk voor de mogelijke gevolgen van klimaatverandering. De verwachting is dat in de toekomst de winterneerslag in Nederland zal toenemen. Mocht de seizoensgevoeligheid van stikstofvrachten voor seizoensneerslag in Nederland vergelijkbaar zijn aan die van Conestoga Rivier, dan zullen ook de stikstofvrachten snel toenemen door de hogere seizoensgevoeligheid. Dit geldt nog sterker voor de lente waar de gevoeligheid van stikstofvrachten voor seizoensneerslag het hoogst is. Verhoogde grondwaterstanden in het voorjaar stimuleren ook het denitrificatie-proces in de natte zone van de bodem: het nitraat, wordt voor een groot deel omgezet in N_2 (luchtstikstof) dat ontsnapt naar de atmosfeer. Door deze functie draagt de bodem bij aan de regulatie en reductie van uitspoeling van nitraat naar grond- en oppervlaktewater. Dit *feedback-mechanisme* zal de effecten van de hypothese van Chang voor een deel temperen. De uitspoeling van stikstof neemt dus af bij hogere grondwaterstanden, dit in tegenstelling tot fosfaten.

3.3.6 Invloed op fosfaatconcentraties

In een studie in Nieuw Zeeland (Caruso, 2002) in een door landbouw gedomineerd stroomgebied daalt tijdens extreme lage afvoeren in een rivier de concentratie van fosfaten ten opzichte van een normaal jaar door het gebrek aan neerslag en daardoor oppervlakkige afstroming van het land. Vergelijkbare gegevens zijn bekend voor de Rijn. Fosfaat, gebonden aan sedimenten, wordt vooral tijdens zware

neerslag getransporteerd naar beken en rivieren (Chang, 2004). Een toename van zware neerslagperioden door klimaatverandering zal leiden tot een toename van de fosfaatvrachten naar watersystemen. Chang (2004) constateert in een modelstudie in de Verenigde Staten dat fosfaatvrachten meer toenamen dan stikstofvrachten onder klimaatverandering. Hieruit wordt geconcludeerd dat (de uitspoeling van) fosfaat gevoeliger is voor klimaatverandering dan (de uitspoeling van) stikstof.

Ook voor meren in Nederland worden vergelijkbare resultaten gevonden. Een toename van de netto neerslag in de winter zal leiden tot een toename in de fosfaatconcentraties van meren in Nederland (Mooij et al., 2005). De fosfaatconcentratie in kleine beken wordt voor een groot gedeelte bepaald door piekafvoeren na zware neerslag. In stroomgebieden met veel landbouw en een geschiedenis van bemesting is de fosfaatverzadiging hoger in de toplaag van de bodem. Hogere grondwaterstanden zullen dan leiden tot een hogere concentratie van fosfaten in het oppervlaktewater (van der Molen et al., 1998). Het fosfaatbindendvermogen van de bodem kan in het voorjaar afnemen door verhoging van de grondwaterstand (Boland et al., 2000), waardoor er uitspoeling van fosfaat naar grond- en oppervlaktewater kan optreden.

Een studie in Nederland (Plette et al., 2002) toont ook een duidelijke relatie tussen hydrologie en fosfaatconcentraties in het oppervlaktewater aan. Volgens modelberekeningen (Vermulst, 1995 in Plette et al., 2002) is het belangrijkste effect van de maatregelen tegen verdroging een toename van de uit- en afspoeling van fosfor in die regio's waar door vernatting de drainage toeneemt. Het effect is dubbelop: zowel de waterflux naar het oppervlaktewater als de gemiddelde fosforconcentratie in het uittredende water neemt toe. Gedetailleerde modelstudies voor het stroomgebied van de Schuitensbeek laten zien dat, afhankelijk van het type vernattingsmaatregelen, de fosforvrucht met 50-250% kan toenemen en de stikstofvrucht met 30-40 %. Wel moet worden opgemerkt dat in dit stroomgebied de regionale grondwaterbeweging nauwelijks door maatregelen wordt beïnvloed, waardoor extrapolatie naar andere gebieden niet zomaar mogelijk is.

3.3.7 Invloed op droogvallen

Een duidelijk onderscheid moet worden gemaakt tussen deels droogvallen en geheel droogvallen. Het deels droogvallen van bijvoorbeeld oevers heeft over het algemeen een positief effect op de ecologie, terwijl het geheel droogvallen van bijvoorbeeld vennen en sloten een negatief effect heeft op de soortenrijkdom.

Arcadis (2006) rapporteert een positief effect van flexibel, seizoensgebonden peilbeheer op de ecologie, daarnaast draagt de maatregel bij aan het vasthouden en bergen van water. Ecologisch is het belangrijkste effect dat delen van de oevers afwisselend droogvallen en inunderen. Dit is gunstig voor de ontwikkeling van de oevervegetatie. Sommige plantensoorten zijn bijvoorbeeld voor de kieming afhankelijk van tijdelijke droogval. Bovendien leidt een wisselend peil ertoe dat de golfslag op verschillende hoogten van de oever inwerkt, waardoor minder afkalving zal optreden. Het effect van flexibel peilbeheer is vooral groot bij een flauw talud, en dus in combinatie met natuurvriendelijke oevers. Van de rijkere oevervegetatie profiteren ook macrofauna en vis. Het effect van een flexibel peilbeheer op algen (fytoplankton en fyto-benthos) is zeer gering.

Kranenbarg, et al. (2002) beschrijven in hun rapportage over seizoensgebonden peilbeheer in het IJsselmeergebied dat één van de ecologische knelpunten in het huidige peilverloop van het IJsselmeergebied bestaat uit onvoldoende gelegenheid voor de ontwikkeling van een brede en gezonde oevervegetatie van riet en eventueel ook biezen. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat er in het groeiseizoen geen sprake is van een droogvallend areaal aan onbegroeide kale grond, waarover zich vegetatieve én generatieve voortplanting van oeverplanten als riet en lisdodde kan voltrekken. Het huidige peilbeheer met een winter- en een zomerstreefpeil, waarbij in de winter lagere waterpeilen worden nagestreefd dan in de zomer heeft tot gevolg dat oeverplanten als riet en biezen gedurende het groeiseizoen niet met de uitzakkende waterpeilen geconfronteerd worden die het hun mogelijk maken om in de richting van het water te verjongen. De aanwezige randen van oevervegetatie verouderen dan ook en met name het in het water staande riet heeft onvoldoende mogelijkheden zich te verjongen. Een meer natuurlijke waterpeildynamiek, waarin 's winters hogere meerpeilen optreden dan 's zomers en waarin gedurende het groeiseizoen oppervlakten droogvallen waarop verjonging van de oevervegetatie kan optreden, lijkt van fundamenteel belang te zijn voor het oplossen van dit ecologische knelpunt (Kranenbarg, et al., 2002).

Ook in Friesland is een uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden en effecten van flexibel peilbeheer op de Friese boezem (Witteveen en Bos, 2005). De belangrijkste conclusies zijn dat door het strakke peilbeheer in de afgelopen decennia wordt voldaan aan normen voor functies zoals veiligheid en wateroverlast, aan- en afvoer van polders en doorvoer. Ook sluit het huidige peilbeheer aan bij de wensen van de scheepvaart, die neerkomen op zo weinig mogelijk fluctuaties in waterstand. Als gevolg van het huidige peilbeheer treden echter knelpunten op bij het instandhouden van natuurlijke oevers. Het oppervlak aan riet en andere oeverplanten, zoals Mattenbies en kleine Lisdodde in de Friese boezem is sterk gereduceerd. Een belangrijk deel van deze achteruitgang is terug te voeren op het ontbreken van voldoende peilvariatie. Oevers met een natuurlijke oevervegetatie zijn van belang voor het ecologisch functioneren van het watersysteem en leveren een belangrijke bijdrage aan de stabiliteit van de achterliggende kaden (Witteveen en Bos, 2005).

Vogelsoorten die in de oeverzone foerageren, zoals steltlopers en enkele eendensoorten als wintertaling en bergeend, reageren op veranderingen in de oeverlengte en het oppervlak droogvallende of zeer ondiepe grond. Bij benthivore soorten (steltlopers, bergeend) is de waterstand zelf waarschijnlijk minder belangrijk dan de fluctuaties daarin, omdat verhoging van het voedselaanbod optreedt gedurende een beperkte periode na verlaging van de waterstand. Verbanden tussen moerasvogels en waterstanden verlopen zowel direct, via het al of niet beschikbaar komen van geschikt foerageergebied (zoals boven beschreven), als indirect via de door waterpeil beïnvloede ontwikkeling van de vegetatie. In de Oostvaardersplassen is aangetoond dat verjonging van riet vooral plaatsvindt in jaren waarin flinke arealen grond droogvallen gedurende het groeiseizoen (Jans & Drost 1995). Ook zijn langs de Friese kust grote arealen riet en biezen ontstaan na het droogvallen van gebieden in de jaren na voltooiing van de Afsluitdijk (Coops 1992). De aanwezigheid van jong riet is van belang voor diverse soorten moerasvogels (Beemster 1997).

Het is onduidelijk wat de kwantitatieve effecten zijn van een droogvallende/onderlopende bodem, met name wat betreft de opname en afgifte van nutriënten (Wienk et al., 2000 in Coops, 2002). Bovendien zijn de gevolgen voor organismen groot. Verschillende organismen hebben verschillende strategieën om perioden van droogte door te komen (Boulton en Brock, 1999), maar er is relatief weinig bekend over de duur en de mate van effecten.

Het droogvallen van vennen en sloten door langdurige droogte heeft een negatief effect op de aquatische ecologie. Het aantal soorten zal drastisch afnemen tot alleen soorten die zich hieraan hebben aangepast, zoals enkele soorten muggen, vliegen en kevers (MNP, 2005b). Van Dam en van Apeldoorn (1978) beschrijven de droge zomer van 1976. Veel vennen vielen toen geheel of gedeeltelijk droog. Het droogvallen had een groot effect op het voorkomen van plantensoorten in de weer met water gevulde vennen. Plantensoorten die als storingsindicator aangemerkt worden (Knolrus, Waternavel, Pitrus) breiden zich sterk uit. Op de drooggevallen oevers vestigden zich vaak nieuwe soorten (Waterpeper, Wolfspoot) uit voedselrijke milieus.

In veel beken die in de zomer van 1976 nog water voerden, werden meer dan in andere jaren soorten uit stilstaande wateren gevonden, terwijl stroomminnende soorten sterk in aantal verminderden (Van Dam en van Apeldoorn, 1978). In drooggevallen beektrajecten verdwenen sommige soorten in het geheel. De gewone stroomminnende soorten keerden in 1977 weer terug, echter een aantal zeer zeldzame en kwetsbare soorten werden niet meer gevonden.

3.4 *Klimaatverandering (wind)*

Weinig onderzoek is uitgevoerd naar de relatie tussen klimaatverandering, wind en verschillende waterkwaliteitsparameters. O'Reilly et al. (2003) en Verschuren (2003) presenteren de gevolgen van klimaatverandering, in het bijzonder wind en temperatuur op het ecosysteem van Lake Tanganyika, Afrika. Door een afname van de wind en een temperatuurstijging van de bovenste waterlaag van het meer neemt de stabiliteit van de waterkolom toe en het mengen van de verschillende waterlagen af. Dit heeft grote gevolgen voor de aanvoer van nutriënten uit de diepere lagen van het meer. Hier moet meteen aan worden toegevoegd dat Lake Tanganyika erg diep is en dat deze situatie niet van toepassing is op de Nederlandse context.

De windsnelheden in Nederland zijn hoog genoeg om het water in ondiepe meren te homogeniseren, zodat er geen stratificatie optreedt van temperatuur en zuurstofgehalte (Mooij et al., 2005). De verandering van wind en voorkomen van stormen als het gevolg van klimaatverandering is nog zeer onzeker. In de afgelopen vier decaden is de frequentie van stormen afgenomen (Klein Tank et al., 2002), echter het KNMI verwacht niet dat dit een trend is die zich door zal zetten en dat de wind en storm voorkomen in de toekomst veel zal veranderen. De verwachting is dan ook dat wind in de toekomst een gelijke rol blijft spelen als nu het geval is en dat er geen grote veranderingen zullen optreden.

Bij Wetterskip Fryslân leeft het gevoel dat het aantal dagen met lagere windsnelheden (windkracht 4, 5 en 6) juist toeneemt. Deze windsnelheden hebben ook al invloed op golfslag, opwerveling, troebeling en de oeverzone. Of deze lagere windsnelheden inderdaad op dit moment al vaker voorkomen dan in het verleden en of deze mogelijke trend zich ook in de toekomst zal voortzetten is onduidelijk. Deze vraag heeft Wetterskip Fryslân uitgezet bij het KNMI.

3.5 *Klimaatverandering (kooldioxide: CO₂)*

3.5.1 *Invloed op algen en macrofyten*

Het CO₂-gehalte in de atmosfeer zal in de toekomst toenemen. Dit heeft ook invloed op de koolstofhuishouding in aquatische ecosystemen. De grootte van het effect wordt bepaald door de overdracht van CO₂ vanuit de lucht naar het water. De snelheid van CO₂ overdracht wordt bepaald door de beweging van water, aangezien de diffusie van gassen in water traag verloopt. Logischerwijs zou het effect van een verhoogd CO₂-gehalte in de atmosfeer een groter effect hebben op het CO₂-gehalte in turbulente wateren en op de plantengroei.

Modelsimulaties tonen aan dat het effect op de groei van algen en waterplanten van een verhoogd CO₂-gehalte in de atmosfeer alleen optreedt in eutrofe systemen die koolstof-gelimiteerd zijn door een lage gemeenschapsrespiratie en lage lucht-water-uitwisseling (Schipper et al, 2004a). Schipper et al. (2004b) verwachten dat in eutrofe systemen waar N en P niet limiterend zijn, een toename van het CO₂-gehalte in de atmosfeer kan leiden tot een versterking van al optredende blauwalgenbloei.

Zie ook Figuur 10 in paragraaf 3.2.2 voor meer informatie over carbonaat evenwichten in het oppervlaktewater.

3.6 *Klimaatverandering (zeespiegelstijging)*

3.6.1 *Invloed op chlorideconcentraties*

Als gevolg van de zeespiegelstijging en afnemende rivierafvoeren zal het zoute zeewater verder de mondingsgebieden van de rivieren indringen (Jacobs et al., 2000; de Bruijn en van Mazijk, 2003).

Zoute kwel komt vooral voor in de wat dieper gelegen poldergebieden met lage oppervlaktewaterpeilen in een zone langs de Wadden- en IJsselmeerkust. Door het peilverschil tussen de polder en Waddenzee of IJsselmeer treedt het van nature aanwezige zoute water uit de diepere ondergrond in sloten aan de oppervlakte. De intensiteit van de kwelstroom (zoutbezwaar) is het grootst waar in die lagere gebieden geen of slechts een dunne deklaag aanwezig is of waar de deklaag is doorsneden door watergangen (Provincie Fryslân, 2000). Voor zover zout polderwater wordt uitgemalen naar de Friese boezem verhoogt dit ook het zoutgehalte van het boezemwater, wat de kwaliteit van het elders weer in te laten boezemwater niet ten goede komt (Provincie Fryslân, 2000).

Voor meer details over de invloed van klimaatverandering op de chlorideconcentraties zie paragraaf 3.3.2: Invloed neerslag en afvoeren op de chlorideconcentraties.

Voor de Waddeneilanden is het te verwachten dat de zeespiegelstijging een effect heeft op de verzilting; meer zoute kwel op de Waddeneilanden, terwijl er geen mogelijkheden bestaan om water van goede kwaliteit van elders aan te voeren om door te spoelen. Aan de andere kant zou extra neerslag door klimaatverandering de extra zoute kwel kunnen wegspoelen. Wetterskip Fryslân heeft een uitgebreid onderzoek uitgevoerd op Terschelling naar de GGOR (Royal Haskoning, 2006). In deze studie is ook klimaatverandering en zeespiegelstijging meegenomen. Gerekend wordt met het WB21 centrale klimaatscenario.

Uit de studie blijkt dat:

- Het grond- en oppervlaktewatersysteem op Terschelling zal in de toekomst significant worden beïnvloed door de mondiale klimaatsverandering en de ontwikkeling van het wad. De verwachte toename van de neerslaghoeveelheden heeft gevolgen voor de te verwerken hoeveelheden overtollig neerslag. De zeespiegelstijging en de stijging van de wadbodem zal de spui mogelijkheden beperken. Een consequentie van veranderende hydrologische omstandigheden is dat de huidige polderpeilen in de winter niet meer kunnen worden gehandhaafd.
- In de huidige situatie treedt nabij de waddendijk zoute kwel op. Dit levert problemen op voor veedrenking in de polder. Het grootste deel van de zoute kwel treedt op in de winterperiode, omdat in de winter het oppervlaktewaterpeil in de polder lager is. Ten gevolge van de zeespiegelstijging, klimaatsverandering en de peilontwikkeling in de polder zal de zoute kwel veranderen.
- In de toekomst (2030) stijgt de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) (het wordt natter) zowel in duinen als in de polder. Dit is het gevolg van de toename van de neerslag (klimaatverandering) en het feit dat de winterpeilen niet meer kunnen worden gehandhaafd. Daarnaast stijgt de GHG vlak langs de waddenkust als gevolg van de zeespiegel- en wadbodemstijging). De gemiddelde kwelsituatie verandert niet wezenlijk. Dit komt onder andere doordat het winterpeil in de polder stijgt.
- Indien de winterpeilen worden verhoogd, neemt de zoute kwel in de winter nauwelijks toe. In de zomer zal er ten opzichte van de huidige situatie wel sprake zijn van een toename van de zoute kwel (20%), omdat de zomerpeilen gelijk blijven en de zeespiegel en de wadbodem stijgen.

3.7 Exoten

Exoten zijn te benoemen als soorten die een ecosysteem binnendringen die voorheen niet waargenomen werden. Dit binnendringen kan op natuurlijke wijze of door antropogene oorzaken gebeuren (Mooij, 2005). Het succes van een invasie door exoten zal afhangen van hun adaptieve capaciteit aan de milieuomstandigheden in de tijd en plaats. De watertemperatuur, waterbeschikbaarheid en verschillende waterkwaliteitsparameters (o.a. zoutgehalte) zijn seizoensgebonden en de dynamiek ervan wordt mede bepaald door het klimaat. Huidige exoten, die nabij de grenzen van hun overlevingssucces zitten, zouden bij een klimaatverandering kunnen verdwijnen. Aan de andere kant zullen voor nieuwe, nog niet geïntroduceerde soorten in Nederland, de overlevingskansen kunnen stijgen.

In het Nederlandse waterbeheer worden de volgende soorten als problematisch ervaren:

- Macro-invertebraten (ongewervelden die met blote oog zichtbaar zijn) uit Oost-Europa, die via toegenomen interconnecties tussen de grote rivieren steeds vaker in Nederland waargenomen worden in het Rijnstroomgebied (Bij de Vaatte et al., 2002). Het succes van deze soorten in stilstaande wateren die door de Rijn mede gevoed worden zal afhangen van hun overlevingskansen in de winter. In een klimaat met zachtere winters zal een aantal van deze soorten meer kans hebben om een levensvatbare populatie in Nederlandse wateren te ontwikkelen.
- *Dreissena polymorpha* (driehoeksmossel) is een voorbeeld van een exoot die 200 jaar geleden in Nederland zich vestigde. In de sterk antropogeen beïnvloede wateren van Nederland wordt deze soort echter niet als een plaag gezien, maar als een verwelkoming omdat deze “filter feeder” een

belangrijke bijdrage kan leveren aan het helder houden van het water (Dionisio Pires et al., 2005). Botenbezitters en vissers klagen over de aangroei van driehoeksmossels op boten en netten. (pers.med. R. Veeningen, 2006)

- Exotische watervogels zoals de zwarte zwaan (*Cygnus atratus*) en zoogdieren zoals de beverrat (*Myocastor coypus*). Ontsnappingen uit dierentuinen of privé verzamelingen leiden vaak tot waarnemingen van deze exoten in natuurgebieden (zie tekstbox). Grote aantallen overleven echter koude winters niet. Wanneer de kans op strenge winters afneemt (conform de nieuwe klimaatscenario's) zal de kans toenemen dat exotische vogels en zoogdieren zich in Nederland met succes kunnen vestigen.

Tekstbox: Exoten: Indische Gans (Anser Indicus).

De Indische gans (*Anser Indicus*) is van oorsprong een bewoner van de Mongoolse en Chinese hoogvlakten. Tijdens de barre winters daar trekken de vogels weg naar onder andere India, waaraan de gans haar naam dankt. In Nederland broedende vogels zijn nazaten van ooit ontsnapte of uitgezette vogels. Het eerste broedgeval van de Indische gans in Nederland werd gerapporteerd in 1977. Het zou nog tot 1986 duren voordat een tweede broedgeval volgde. Inmiddels zijn de aantallen toegenomen tot ongeveer 70 à 100 broedparen die zich in het wild kunnen handhaven. De toename verloopt snel, met ongeveer 10% per jaar. (bron: www.vogelbescherming.nl).



Indische Gans (*Anser Indicus*), Naardermeer 2005
(foto: Jeroen Veraart)

- *Cylindrospermopsis raciborskii* (fytoplankton). Dit is een subtropische soort die goed gedijt in eutrofe wateren met een stabiele waterkolom en hoge temperaturen. De soort is in Nederland voor het eerst waargenomen in 2001 door een medewerker van een waterschap (Mooij, 2005). De soort produceert toxines die gevaarlijk zijn voor de volksgezondheid en is dus een ongewenste exoot in het bijzonder in water dat een drinkwater- of recreatiefunctie heeft.
- Exotische waterplanten die als probleem ervaren worden zijn o.a. de Grote Waternavel (*Hydrocotyle ranunculoides*), Waterteunisbloem (*Ludwigia Grandiflora*) en Parelvederkruid (*Myriophyllum aquaticum*). Deze drie waterplantsoorten gaan woekeren en vormen grote matten in voedselrijke wateren. De Grote Waternavel is in zijn natuurlijke habitat geen plaag, maar de Nederlandse wateren zijn voedselrijk, waardoor de plant in de zomer gaat woekeren. Het is interessant om de invasie van de Grote Waternavel te vergelijken met eerdere invasies. In 1976 werd Watersla (*Pistia stratiotes*) een plaag in West-Nederland, echter één nacht met temperaturen onder 0°C doodde alle planten (17 km²; bron: website Aquatische Ecologie, Wageningen Universiteit). Grote Waternavel kan echter redelijk koude temperaturen weerstaan, niet bekend is

of de soort strenge vorst kan overleven. De Waterteunisbloem is in potentie een groter gevaar dan de Grote Waternavel omdat deze soort winterhard is en strenge vorst kan weerstaan. In Frankrijk en België heeft de soort zich al met succes gevestigd. Parelvederkruid is niet bestand tegen vorst en lijkt in het huidige klimaat niet in staat zich definitief te kunnen vestigen in Nederland.

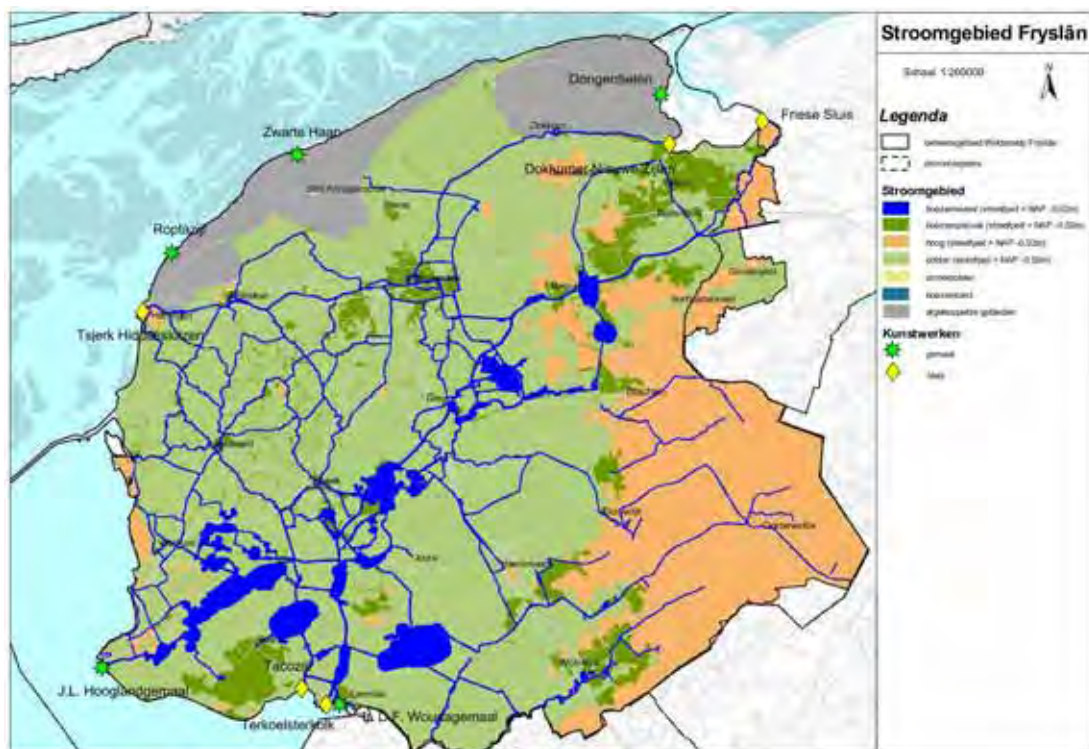
- Vissen; bijvoorbeeld Graskarper. Sinds 1977 is de Graskarper in Nederland uitgezet voor schoonhouden van wateren. Ook de Zonnebaars (*Lepomis gibbosus*) vormt een probleem. Recentelijk (4 augustus 2006) sloeg Waterschap Zuiderzeeland alarm in een persbericht waarin werd gemeld dat dit jaar (2006) opvallend veel Zonnebaarzen in het oppervlaktewater van Flevoland voorkomen. De vissen worden nu overal in het oppervlaktewater van Flevoland waargenomen. De Zonnebaars is een mooi gekleurde vis die voornamelijk worden uitgezet in particuliere vijvers. De herkomst van de vissen kan worden verklaard doordat ze vanuit de vijvers in sloten en tochten zijn terechtgekomen. De Zonnebaars is eigenlijk een roofdier dat andere visjes eet. De vis tast daardoor het overige waterleven aan. De Zonnebaars werd 115 jaar geleden geïntroduceerd in Nederland vanuit Noord-Amerika (Meer informatie www.vijver-en-tuinplezier.nl/vijver/zonnebaars.html). Ook in Friesland (o.a. in Schapedobbe ven) is de Zonnebaars een problematische exoot.

De laatste jaren vallen in Friesland vooral twee exoten op: de Chinese Wolhandkrab (*Eriocheir sinensis*) en de Grote Waternavel (*Hydrocotyle ranunculoides*) (Huiver en Smit, 2005). De Chinese Wolhandkrab is voornamelijk in het westen en midden van Friesland aangetroffen, maar aangenomen wordt dat het verspreidingsgebied veel groter is. Vooral beroeps- en sportvisserij ondervinden hinder van de krab. In de Verenigde Staten zijn meldingen van schade aan dijken en oevers veroorzaakt door de krab, dit is nog niet gemeld in Friesland (Huiver en Smit, 2005). In het beheergebied van Wetterskip Fryslân is de verspreiding van de Grote Waternavel gering, grote problemen zijn tot nu toe uitgebleven (Huiver en Smit, 2005). Voor een uitgebreide rapportage over het voorkomen van de Chinese Wolhandkrab en de Grote Waternavel wordt verwezen naar de studie van Wetterskip Fryslân: *Beheersbare exoten? Een beschrijving van verspreiding, problemen en beheer van de Chinese Wolhandkrab en de Grote Waternavel* (Huiver en Smit, 2005). In deze studie worden ook meerdere andere voorbeelden aangedragen van de introductie van exoten in Nederland.

De Werkgroep Ecologisch Waterbeheer heeft een subgroep Exoten. Meer informatie over actuele thema's, actuele exotenlijsten kunnen worden gevonden op www.wew.nu.

4 Watersystemen in Fryslân

Het is niet de bedoeling van deze studie om een uitgebreide analyse en beschrijving uit te voeren van de Friese watersystemen. Deze gegevens zijn bekend bij Wetterskip Fryslân. Voor de volledigheid worden hier een korte beschrijving en enkele kentallen gepresenteerd. Figuur 22 geeft het stroomgebied van Fryslân weer.



Figuur 22. Stroomgebied Fryslân.

Het stroomgebied Fryslân bestaat uit het totaal van de Friese boezem en de gebieden in Fryslân die voor de aan- en afvoer van water afhankelijk zijn van de boezem, inclusief kleine delen van de provincie Groningen die tot het beheergebied van Wetterskip Fryslân worden gerekend. Ook de drie afgekoppelde gebieden Ropta, Swarte Harne en Dongerdielen behoren tot het stroomgebied Fryslân. Het Lauwersmeer behoort strikt genomen niet tot het stroomgebied Fryslân, maar wordt vanwege het belang voor de afwatering van de Friese boezem (60% van het overtollige water is anno 2000 via het Lauwersmeer afgevoerd) toch in beschouwing genomen (Provincie Fryslân, 2003).

Een belangrijke drieverdeling van het stroomgebied Fryslân is de indeling in de Friese boezem, de Friese polders en de hoge gebieden.

Friese boezem

De Friese boezem is het stelsel van met elkaar in open verbinding staande meren, vaarten en kanalen plus de vrij voor de boezem liggende gebieden, inclusief boezemlanden en zomerpolders. De oppervlakte van het water bedraagt bij streefpeil circa 15.000 hectare waarvan de meren en grotere

vaarten circa 13.500 hectare beslaan en de kleinere wateren circa 1.500 hectare. De meren en grotere vaarten zijn in waterhuishoudkundig beheer bij Wetterskip Fryslân. Naast water bestaat de boezem uit ruim 27.000 hectare vrij voor de boezem liggende gebieden. Deze gebieden voeren hun overtollig water zonder tussenkomst van een gemaal of stuw af naar het water van de Friese boezem. Veelal hebben deze gebieden een maaiveldhoogte variërend van 50 centimeter onder tot één à twee meter boven NAP. Een uitzondering hierop vormt Gaasterland, dat voor een gedeelte een aanzienlijk hogere ligging heeft.

Polders

De polders zijn afgebakende eenheden die elk individueel bemalen worden door één of meerdere gemalen. De totale oppervlakte aan polders die hun water afvoeren naar de Friese boezem bedraagt circa 196.000 hectare. De bemalen eenheden van Ropta, Swarte Harne en Dongerdielen voeren hun overtollig water direct af op de Waddenzee of het Lauwersmeer. De gezamenlijke oppervlakte van deze eenheden bedraagt circa 32.000 hectare. In totaal zijn in Fryslân ongeveer 940 poldergemalen aanwezig. De polders worden allen beschermd door kaden en/of hoge gronden.

Hoge gebieden

De hoge gebieden zijn die gebieden waarvan het overtollige regenwater op zwaartekracht naar de boezem stroomt. Het water komt op de boezem via een stuw bij het laagste afvoerpunt. De hoge gebieden bevinden zich aan de oostkant van Fryslân. De totale oppervlakte bedraagt circa 64.000 hectare.

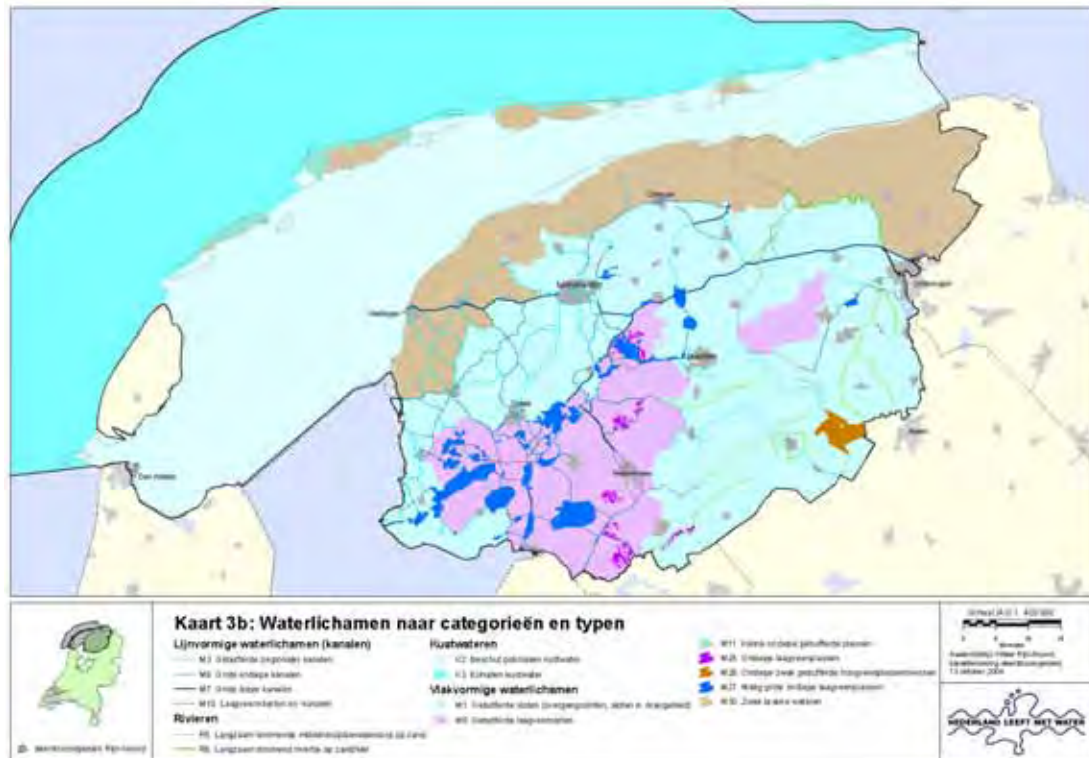
Tabel 8 geeft enkele kentallen van het beheergebied van Wetterskip Fryslân.

Tabel 8. Kentallen beheergebied Wetterskip Fryslân (www.wetterskipfryslan.nl).

Oppervlakte stroomgebied Fryslân	333.980 ha
Oppervlakte stroomgebied Friese boezem	302.220 ha
Oppervlakte afgekoppelde gebieden	31.760 ha
Oppervlakte Friese boezem	15.000 ha
Gemiddelde waterafvoer per jaar	1.200 mln. m ³
Gemiddelde wateraanvoer per jaar	250 mln. m ³
Poldergemalen	ca. 940
Zeegemalen	3
IJsselmeergemalen	2
Stuwen	ca. 3.850
Peilgebieden	ca. 7.000
Boezemwaterkeringen	3.156 km
Hoofdwatgangen (in onderhoud bij Wetterskip Fryslân)	ca. 6.059 km
Diverse waterlopen in beheergebied Wetterskip Fryslân	globaal 33.000 km

Voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn voor het stroomgebied Rijn-Noord meerdere kaarten gemaakt. Het beheergebied van Wetterskip Fryslân valt volledig in het KRW stroomgebied Rijn-Noord. Figuur 23 geeft voor het stroomgebied Rijn-Noord de indeling van de waterlichamen naar categorieën en typen. Uit de kaart blijkt in een oogopslag dat in het beheergebied van Wetterskip Fryslân voor vlakvormige waterlichamen de watertypen Gebufferde sloten (M1) en Gebufferde laagveensloten (M8) het meeste voorkomen. Langs de Waddenzee, voornamelijk in de afgekoppelde gebieden, komen Zwak brakke

wateren (M30) voor. De meren in het beheergebied van Wetterskip Fryslân worden voornamelijk geclassificeerd als Ondiepe gebufferde plassen (M14) en als Ondiepe laagveenplassen (M25). De lijnvormige waterlichamen (kanalen) zijn geclassificeerd als Gebufferde (regionale) kanalen (M3) en Grote diepe kanalen (M7). De rivieren in het beheersgebied van Wetterskip Fryslân zijn geclassificeerd als Langzaam stromende rivieren met de midden/benedenloop op zand (R5).



Figuur 23. Waterlichamen naar categorieën en typen, stroomgebied Rijn Noord (www.kaderrichtlijnwater.nl)

Vier Friese waddeneilanden behoren eveneens tot het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Voor de waterhuishouding zijn deze eilanden selfsupporting, dat wil zeggen, afhankelijk van neerslag. Er is geen inlaatmogelijkheid van zoet (IJsselmeer) water. Alle vier de eilanden lozen hun overtollige water onder vrij verval via sluisjes op de Waddenzee.

5 Effecten van klimaatverandering op de Friese watersystemen

5.1 Inleiding

Naast het literatuuronderzoek gepresenteerd in hoofdstuk 3, waarin de effecten van klimaatverandering op verschillende waterkwaliteitsparameters worden beschreven, wordt in dit hoofdstuk een meer kwantitatieve analyse uitgevoerd met waterkwaliteitsgegevens van Wetterskip Fryslân. Twee typen analyses zijn uitgevoerd: er is een vergelijking gemaakt tussen drie verschillende jaren, waarna de kans op voorkomen in de toekomst is beschreven. Daarnaast is er een multi-lineaire regressie uitgevoerd om te onderzoeken of er verbanden bestaan tussen neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid en een aantal waterkwaliteitsparameters. De gevonden relaties kunnen worden geëxtrapoleerd naar de toekomst.

In samenspraak met Wetterskip Fryslân is gekozen om de jaren 2000, 2003 en 2004 te analyseren. Het doel is om een korte vergelijking te maken tussen de verschillende jaren en te analyseren of er een verschil in de waarden van de waterkwaliteitsparameters te ontdekken valt tussen de verschillende jaren. Gezamenlijk is gekozen om de volgende chemische waterkwaliteitsparameters te analyseren:

- Watertemperatuur
- Chloride
- pH
- O₂
- Fosfaat
- Stikstof
- EGV

Biologische waterkwaliteitsparameters, zoals fytoplankton en E-coli, zijn niet geanalyseerd in deze studie. Deze parameters zouden in de toekomst nader kunnen worden bekeken.

5.2 Gegevens

5.2.1 Meteorologie

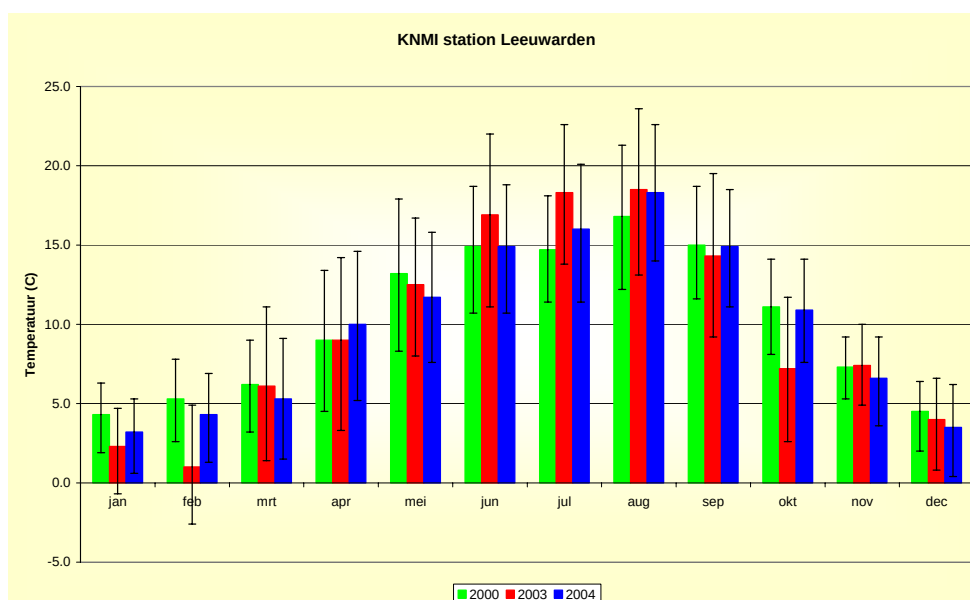
De jaren 2000, 2003 en 2004 zijn gekozen voor verdere analyse. Deze keuze was allereerst gebaseerd op de hoeveelheid neerslag in de betreffende jaren; het jaar 2000 is een gemiddeld jaar, 2003 een droog jaar en 2004 een nat jaar. Echter na het uitgebreide literatuuronderzoek en de multi-lineaire regressie analyse bleek al snel dat temperatuur een belangrijkere factor is die invloed heeft op de waterkwaliteit dan neerslag. Tabel 9 geeft de seizoen- en jaartemperatuur en neerslag voor 2000, 2003 en 2004 voor het KNMI station in Leeuwarden. De tabel laat zien dat er relatief weinig verschil zit in de gemiddelde jaartemperaturen, het jaar 2003 is zelfs niet het warmste. Dit heeft vooral te maken met de relatief koele herfst en koude winter in 2003. De zomer van 2003 is de warmste zomer van de drie geanalyseerde jaren. De zomer van 2000 komt goed overeen met het langjarig gemiddelde (1951-2005) voor station Leeuwarden. De zomer van 2004 is warmer dan de langjarig gemiddelde

zomertemperatuur. In een vervolgstudie zouden mogelijk anders jaren gekozen kunnen worden voor een analyse: de keuze zou dan gebaseerd kunnen worden op temperatuur.

Tabel 9. Seizoen- en jaartemperatuur en neerslag, 2000, 2003, 2004 KNMI station Leeuwarden.

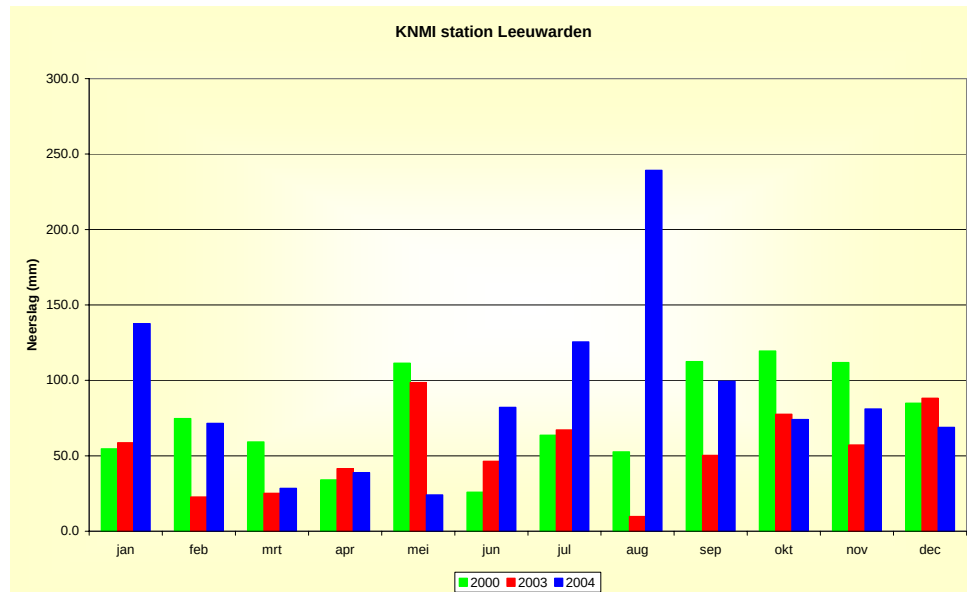
	Temperatuur (gemiddeld) (°C)			Neerslagsom (mm)		
	2000	2003	2004	2000	2003	2004
Lente (mrt, apr, mei)	9.5	9.2	9.0	205	165	91
Zomer (jun, jul, aug)	15.5	17.9	16.4	142	123	447
Herfst (sep, okt, nov)	11.1	9.6	10.8	344	185	254
Winter (dec, jan, feb)	4.7	2.4	3.7	214	170	278
Jaar	10.2	9.8	10.0	905	643	1070

Voor de volledigheid zijn naast de seizoen- en jaartemperatuur en neerslag in Tabel 9 ook de meteorologische maandgegevens voor station Leeuwarden opgenomen in Figuur 24 (temperatuur) en Figuur 25 (neerslag).



Figuur 24. Minimum, gemiddelde en maximum maandtemperatuur in 2000, 2003 en 2004 voor KNMI station Leeuwarden.

Naast gemiddelde waarden zijn ook extremen van belang. Juist ook deze extreme waarden zullen in de toekomst bij klimaatverandering veranderen. Tabel 10 geeft voor KNMI station Leeuwarden het aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur voor de drie beschouwde jaren. In de tabel is niet alleen het voorkomen van hogere temperaturen meegenomen, maar ook ijsdagen en vorstdagen. Het voorkomen koude temperaturen hebben ook invloed op de waterkwaliteit en de aquatische ecologie.



Figuur 25. Maandneerslag in 2000, 2003 en 2004 voor KNMI station Leeuwarden.

Tabel 10. Aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in 2000, 2003 en 2004 voor station Leeuwarden.

Aantal dagen met	2000	2003	2004
IJsdagen (max. temperatuur $\leq 0^{\circ}\text{C}$)	3	8	2
Vorstdagen (min. temperatuur $\leq 0^{\circ}\text{C}$)	34	74	60
Warme dagen (max. temperatuur $\geq 20^{\circ}\text{C}$)	57	94	55
Zomerse dagen (max. temperatuur $\geq 25^{\circ}\text{C}$)	9	23	11
Tropische dagen (max. temperatuur $\geq 30^{\circ}\text{C}$)	2	6	3

5.2.2 Waterkwaliteit

Om kwantitatieve uitspraken te kunnen doen over de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit van de Friese watersystemen is gebruik gemaakt van historische waterkwaliteitsgegevens van de Friese watersystemen in de periode januari 1999 – juni 2006.

Tabel 11 geeft de verschillende KRW watertypen en een keuze van meetpunten voor chemische waterkwaliteitsparameters in deze watersystemen. In totaal zijn er acht KRW watertypen en 19 meetpunten (zie Figuur 26 voor locaties van de meetpunten) in deze studie meegenomen. Tabel 11 geeft ook het maximaal aantal metingen per meetpunt in de periode januari 1999 – juni 2006, echter voor sommige waterkwaliteitsparameters zijn minder metingen uitgevoerd. Er zijn geen meetpunten van de Waddeneilanden meegenomen.

Tabel 11. KRW watersystemen en meetpunten chemische waterkwaliteitsparameters.

KRW watertype	Meetpunt ID	metingen
M1 Gebufferde sloten	11	97
	37	96
	147	88
	Totaal	281
M14 Ondiepe gebufferde plassen	34	100
	105	100
	75	94
	Totaal	294
M25 Ondiepe laagveenplassen	261	95
	227	89
	128	92
	Totaal	276
M3 Gebufferde (regionale) kanalen	627	73
	39	96
	Totaal	169
M30 Zwak brakke wateren	15	96
	136	95
	3	98
	Totaal	289
M7 Grote diepe kanalen	106	96
	33	103
	Totaal	199
M8 Gebufferde laagveensloten	92	97
	67	96
	Totaal	193
R5 Langzaam stromende midden/ benedenloop op zand	264	92
Totaal generaal		1793



Figuur 26. Locaties van geselecteerde chemische waterkwaliteitsmeetpunten.

5.3 Analyse waterkwaliteitsparameters in 2000, 2003 en 2004

Allereerst zijn de verschillende meetpunten per KRW watertype gegroepeerd. De waterkwaliteitsparameterwaarden per meetpunt en het gemiddelde per KRW watertype zijn op een maandelijkse basis voor de drie verschillende jaren (2000, 2003, en 2004) uitgezet (zie bijlage 1). Ondanks dat de meetpunten specifiek zijn gekozen als zijnde representatief voor het bepaalde KRW watertype kunnen we uit de figuren in bijlage 1 constateren dat er een aanzienlijke spreiding van de waterkwaliteitsparameters binnen een KRW watertype aanwezig is. Toch is er voor een aantal parameters een duidelijke trend aanwezig.

5.3.1 Gebufferde sloten (M1)

Figuur 29 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa 1,4 °C hoger dan in 2000 en 2004.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. Voor 2003 en 2004 tonen de meetpunten een grote spreiding. Uit de figuur blijkt dat in de droge en warme zomer van 2003 het EGV hoger wordt dan in 2004 en dat deze hogere waarden blijven voortduren tot in de herfst en winter. Dit is ook volledig in lijn met de gemeten chlorideconcentraties op deze meetpunten die ook in de zomer van 2003 stijgen boven de waarden in de jaren 2000 en 2004 en constant hoger blijven gedurende de rest van het jaar.

De zuurgraad (pH) vertoont geen duidelijk onderscheidende trend in de drie verschillende jaren. In 2003 was de gemiddelde zuurgraad in de maanden juli, augustus en september iets hoger (0,4) dan in 2000 en 2004, terwijl in de maand mei de gemiddelde zuurgraad in 2004 hoger was dan in de andere jaren.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) toont de verwachte trend die ook in de literatuur wordt gevonden: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgeloste zuurstof. In de zomer is de zuurstofconcentratie lager dan in de winter. Echter bij de vergelijking tussen de verschillende analyse jaren is dit niet eenduidig. Ondanks dat de watertemperatuur in de zomer van 2003 hoger is dan in de andere jaren is de hoeveelheid opgeloste zuurstof juist hoger (21%) in de zomer van 2003. Mogelijk komt dit door verhoogde fotosynthese door waterplanten. Om het effect van een hogere temperatuur en het effect van biologische processen te onderscheiden zouden dag- en nachtritmes moeten worden gemeten.

De metingen totaal stikstof tonen in mei 2003 een extreem hoge waarde voor één meetpunt die de gemiddelde waarden fors beïnvloeden. Mogelijkerwijs is dit een outlier. 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 sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. Er is geen verschil in waarden gemeten in de zomer tussen de verschillende jaren. Wel valt op dat de waarden in de herfst van 2000 hoger zijn dan in 2003 en 2004. Mogelijkerwijs is dit te verklaren door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004. Dit is ook in lijn met de literatuur waarin wordt gesteld, dat bij hogere neerslag de stikstofvruchten

kunnen toenemen door uitspoeling. Ook was de herfst van 2000 warmer dan de herfst van 2003 en 2004 resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie.

Een vergelijkbare trend wordt ook gevonden voor de totale fosfaatconcentratie. De hogere zomerneerslag in 2004 leidt tot gemiddeld 40% hogere totale fosfaatconcentratie. Terwijl de hogere herfst en winterneerslag in 2000 hier tot hogere totale fosfaatconcentraties leiden.

5.3.2 Ondiepe gebufferde plassen (M14)

Figuur 30 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa 1,6 °C hoger dan in 2000 en 2004.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. Uit de figuur blijkt dat in de droge en warme zomer van 2003 het EGV hoger wordt dan in 2004 en dat deze hogere waarden blijven voortduren tot in de herfst en winter. Dit is in lijn met de gemeten chlorideconcentraties op deze meetpunten die ook in de zomer van 2003 stijgen boven de waarden in de jaren 2000 en 2004 en constant hoger blijven de rest van het jaar. In de zomer van 2003 is de gemiddelde chlorideconcentratie slechts 8% hoger dan het gemiddelde van 2000 en 2004, echter de extreme stijging van de concentratie vindt pas plaats in augustus. De gemiddelde chlorideconcentraties in de herfst en winter in 2003 zijn anderhalf keer zo hoog als in 2000 en 2004.

De zuurgraad (pH) vertoont geen duidelijk onderscheidende trend in de drie verschillende jaren. Wat vooral opvalt, is de grote spreiding in meetwaarde tussen de verschillende representatieve meetpunten in de lente en zomer.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) toont de verwachte trend die ook in de literatuur wordt gevonden: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgeloste 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 10 % lager dan in de zomers van 2000 en 2004.

De metingen totaal stikstof 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 sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. Ook speelt de uitlag van overtollig polderwater op de boezem een belangrijke rol. Door de hoge N-gehalten van het uitgemalen polderwater vertoont het boezemwater een piek in de winter. Stikstof spoelt gemakkelijker en meer uit dan fosfaat. Er is geen verschil in waarden gemeten in de zomer tussen de verschillende jaren. Ook hier valt op dat de waarden in de herfst van 2000 hoger zijn dan in 2003 en 2004. Mogelijkerwijs is dit te verklaren door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004. Dit is ook in lijn met de literatuur waarin wordt gesteld dat bij hogere neerslag de stikstofvrachten kunnen toenemen door uitspoeling. Ook was de herfst van 2000 warmer dan de herfst van 2003 en 2004 resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie.

De gemiddelde totale fosfaatconcentratie vertoont geen duidelijke trend door het jaar heen en tussen de verschillende jaren. De hoge waarden in november 2003 haalt het gemiddelde fors omhoog in deze

maand, terwijl voor oktober en december 2003 geldt dat de gemiddelde waarden juist lager zijn dan in de andere jaren. Mogelijkerwijs als gevolg van de lagere neerslag in de herfst en winter van 2003. De hogere zomerneerslag in 2004 leidt in de ondiepe gebufferde plassen niet een hogere totale fosfaatconcentratie in tegenstelling tot bijvoorbeeld de situatie in de gebufferde sloten (M1).

5.3.3 Ondiepe laagveenplassen (M25)

Figuur 31 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa 1,6 °C hoger dan in 2000 en 2004, maar blijft gemiddeld onder de 20 °C in alle analyse jaren. De gemiddelde maximum temperatuur is lager dan in de overige KRW watersystemen met uitzondering van de langzaam stromende rivieren (R5) .

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. In de droge en warme zomer van 2003 stijgt het EGV vanaf augustus boven de waarden van 2004 en deze hogere waarden blijven voortduren tot in de herfst en winter. Een vergelijkbare trend zien we bij de gemeten chlorideconcentraties. De chlorideconcentraties zijn in de nazomer en herfst van 2003 bijna twee keer zo hoog als in 2000 en 2004.

De zuurgraad (pH) vertoont geen duidelijk onderscheidende trend in de drie verschillende jaren. Er is sprake van een grote spreiding tussen de verschillende meetpunten, waardoor het moeilijk is een uitspraak te doen.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) toont de verwachte trend die ook in de literatuur wordt gevonden: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgeloste zuurstof. In de zomer is de zuurstofconcentratie lager dan in de winter. Er is geen duidelijk onderscheid tussen de drie analyse jaren. Er is sprake van een grote spreiding tussen de verschillende meetpunten.

In tegenstelling tot de andere KRW watersystemen geeft de gemeten totale stikstof in ondiepe laagveenplassen (M25) geen duidelijke trend van hogere winterconcentraties, omdat ze worden beïnvloed door uitgemalen voedselrijk polderwater. Voor 2003 geldt zelfs dat de waarden na de zomer verder dalen. Wel valt op dat de waarden in de herfst van 2000 hoger zijn dan in 2003 en 2004. Mogelijkerwijs is dit te verklaren door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004. Dit is ook in lijn met de literatuur waarin wordt gesteld dat bij hogere neerslag de stikstofvrachten kunnen toenemen door uitspoeling. Ook was de herfst van 2000 warmer dan de herfst van 2003 en 2004 resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie.

De spreiding tussen de meetpunten voor de totale fosfaatconcentratie is te groot om een uitspraak te doen over trends.

5.3.4 Gebufferde (regionale) kanalen (M3)

Figuur 32 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa 3 °C hoger dan in 2000 en 2004. Deze stijging is aanzienlijk meer dan voor de andere watersystemen.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. De spreiding tussen de twee meetpunten is groot. Voor één meetpunt worden extreem hoge waarden gemeten in maart en juli 2004 die het gemiddelde enorm omhoog halen en de trendlijn verstoren. De oorzaak van deze verhoging is onbekend. Een meetfout is onwaarschijnlijk, aangezien in dezelfde periode ook extreem hoge waarden voor de chlorideconcentraties wordt gemeten. Voor de gemeten chlorideconcentraties geldt een vergelijkbaar verhaal: grote spreiding tussen meetpunten, slechts een meetpunt bemeten in 2000. Er zijn te weinig (consistente) metingen om goede uitspraken te doen over trends voor zowel EGV als chlorideconcentraties. Het lijkt erop dat de EGV en chlorideconcentraties niet hoger zijn in de zomer en herfst van 2003 in tegenstelling tot de algemene trend in de overige geanalyseerde KRW watersystemen.

De zuurgraad (pH) vertoont geen duidelijk onderscheidende trend in de drie verschillende jaren.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) toont de verwachte trend die ook in de literatuur wordt gevonden: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgeloste zuurstof. In de zomer is de hoeveelheid opgelost zuurstof lager dan in de winter. Echter bij de vergelijking tussen de verschillende analyse jaren is dit niet eenduidig. Ondanks dat de watertemperatuur in de zomer van 2003 hoger is dan in de andere jaren is de hoeveelheid opgeloste zuurstof juist hoger (20%) in de zomer van 2003. Hiervoor is geen verklaring. Als kanttekening bij de metingen moet worden opgemerkt dat het om een moment opname gaat, het is zeer wel mogelijk dat de verwachte trend in hoeveelheid opgelost zuurstof niet wordt gemeten met een monitoringsfrequentie van één keer in de maand of één keer in de vier weken.

De metingen van totaal stikstof tonen een zeer 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 sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. De totaal stikstofconcentratie is in de zomer van 2003 circa 5% lager dan in de jaren 2000 en 2004. Ook hier valt op dat de waarden in de herfst van 2000 hoger zijn dan in 2003 en 2004 en dat de waarden in de herfst van 2004 hoger zijn dan in 2003. Mogelijkerwijs is dit te verklaren door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004 en de hogere neerslag in de herfst van 2004 ten opzichte van 2003. Dit is ook in lijn met de literatuur waarin wordt gesteld dat bij hogere neerslag de stikstofvrachten kunnen toenemen door uitspoeling. Ook was de herfst van 2000 en van 2004 warmer dan de herfst van 2003 resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie.

De gemiddelde totale fosfaatconcentratie vertoont geen eenduidige trend door het jaar heen en tussen de verschillende jaren. Terwijl in 2003 de totale fosfaatconcentratie een dalende trend vertoont gaan de waarden in 2000 en 2004 op en neer. De waarden voor november en december 2000 zijn zeer hoog en mogelijkerwijs te verklaren door de hogere neerslag in deze periode en uitgemalen fosfaatrijk polderwater naar de Friese boezem.

5.3.5 Zwak brakke wateren (M30)

Figuur 33 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa 2 °C hoger dan in 2000 en 2004.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. De spreiding tussen de meetpunten is groot. Dit laatste geldt ook voor de gemeten chlorideconcentraties. De EGV en chlorideconcentraties zijn zoals verwacht in zak brakke wateren enkele malen hoger dan in de overige KRW watersystemen. Er is geen duidelijke trend tussen de verschillende analyse jaren. De EGV en chlorideconcentraties zijn al zo hoog dat bijvoorbeeld aanvoer van water in 2003 met een hogere chlorideconcentratie geen invloed heeft op het watersysteem.

De zuurgraad (pH) vertoont geen duidelijk onderscheidende trend in de drie verschillende jaren.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) heeft voor twee meetpunten in februari 2003 zeer hoge waarden. De oorzaak is onbekend. Het exacte tijdstip van de meting is onbekend. Overdag is er vaak sprake van oververzadiging door waterplanten (hoge primaire productie), terwijl 's nachts en vroeg in de ochtend er sprake is van een (zeer) laag zuurstofgehalte. De verwachte dalende trend in de zomer met hogere temperaturen wordt slechts marginaal waargenomen. De hoeveelheid opgelost zuurstof is circa 8% lager in de warme zomer van 2003 ten opzichte van 2000 en 2004.

De metingen totaal stikstof tonen in minder duidelijke trend dan verwacht: echter voor alle jaren geldt nog steeds dat de gemeten waarden in de zomer lager zijn dan in de winter. Het effect van de hogere temperaturen resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. De totaal stikstofconcentratie in de zomer van 2003 met extreem lage neerslag zijn circa 12% lager dan in de jaren 2000 en 2004. Ook hier valt op dat de waarden in de herfst van 2000 hoger zijn dan in 2003 en 2004. Mogelijkerwijs is dit te verklaren door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004. Waarom de gemiddelde totaal stikstofconcentratie in december 2003 stijgt boven de gemiddelde van 2000 en 2004 is niet duidelijk.

De spreiding tussen de meetpunten is groot erg groot voor de totale fosfaatconcentratie. Enkele zeer hoge en lage waarden in de verschillende jaren verstoren het beeld dusdanig dat een duidelijke trend niet kan worden vastgesteld. Wel duidelijk is dat de hoeveelheid totale fosfaat aanzienlijk hoger ligt dan in de andere KRW watersystemen (zie schaal van grafiek).

5.3.6 Grote diepe kanalen (M7)

Figuur 34 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hoger dan in 2000 en 2004.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. In de droge en warme zomer van 2003 wordt de EGV hoger dan in 2004 en dat deze hogere waarden blijven voortduren tot in de herfst en winter. Dit is ook conform de gemeten chlorideconcentraties op deze meetpunten die ook in de zomer van 2003 stijgen boven de waarden in de jaren 2000 en 2004 en constant hoger blijven de rest van het jaar. De gemiddelde chlorideconcentratie is in de herfst van 2003 zelfs anderhalf keer zo hoog dan in 2000 en 2004.

De zuurgraad (pH) vertoont geen duidelijk onderscheidende trend in de drie verschillende jaren. De gemiddelde zomerwaarden voor de drie analyse jaren zijn hetzelfde.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) toont de verwachte trend die ook in de literatuur wordt gevonden: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgeloste zuurstof. In de zomer is de hoeveelheid opgelost zuurstof lager dan in de winter. Ook is de gemiddelde zuurstofconcentratie in de zomer van 2003 is circa 5% lager dan in 2000 en 2004.

De metingen totaal stikstof tonen een duidelijke trend: voor alle jaren geldt dat de gemeten waarden in de zomer lager zijn dan in de winter. De invloed van voedselrijk uitgemalen polderwater in de winter leidt tot hogere concentraties stikstof. Het effect van de hogere temperaturen resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. Ondanks de hogere neerslag in de zomer van 2004 is de hoeveelheid totaal stikstof juist lager in dit jaar ten opzichte van 2000 en 2003. In de herfst zijn de waarden voor 2000 het hoogste, gevolgd door 2004 en 2003. Hier is een duidelijke correlatie te vinden met de seizoensneerslag. Zoals ook in de literatuur wordt beschreven: bij hogere neerslag kunnen de stikstofvrachten toenemen door uitspoeling.

De gemiddelde totale fosfaatconcentratie vertoont geen duidelijke trend door het jaar heen en tussen de verschillende jaren.

5.3.7 Gebufferde laagveensloten (M8)

Figuur 35 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hoger dan in 2000 en 2004.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. In de droge en warme zomer van 2003 wordt het EGV hoger dan in 2004 en dat deze hogere waarden blijven voortduren tot in de herfst en winter. Dit is ook conform de gemeten chlorideconcentraties op deze meetpunten die ook in de zomer van 2003 stijgen boven de waarden in de jaren 2000 en 2004 en constant hoger blijven de rest van het jaar. De spreiding tussen de meetpunten is voor zowel EGV als chloride aanzienlijk voor de verschillende jaren.

De zuurgraad (pH) metingen hebben een grote spreiding tussen de verschillende meetpunten. Wat opvalt, is dat de pH in 2000 over het hele jaar lager is dan de analyse jaren 2003 en 2004. De redenen voor deze lagere waarden door het hele jaar zijn onduidelijk.

Ook de metingen opgelost zuurstof (mg l^{-1}) hebben een grote spreiding tussen de verschillende meetpunten. In alle jaren is er sprake van een daling van de hoeveelheid opgelost zuurstof in de zomer, conform de correlatie met de watertemperatuur, echter erg sterk is de correlatie niet. In de warme en droge zomer van 2003 is de hoeveelheid opgelost zuurstof lager dan in 2004, echter hoger dan in 2000, terwijl de gemiddelde zomertemperatuur van 2000 lager was dan 2003.

De metingen totaal stikstof 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 sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. In de warme en droge zomer van 2003 was de gemiddelde totaal stikstofconcentratie al 50% lager dan het gemiddelde van de zomer van 2000 en 2004. Wederom zijn de waarden voor de herfst van 2000 hoger

dan 2003 en 2004 mogelijk veroorzaakt door de hogere seizoensneerslag in 2000. Zoals ook in de literatuur wordt beschreven: bij hogere neerslag kunnen de stikstofvrachten toenemen door uitspoeling.

De gemiddelde totale fosfaatconcentraties vertonen een vergelijkbaar beeld als de totaal stikstofmetingen.

5.3.8 Langzaam stromende rivier midden/benedenloop op zand (R5)

Voor dit watertype is maar een representatief meetpunt uitkozen door Wetterskip Fryslân. Figuur 36 geeft de waterkwaliteitstrend voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor de verschillende parameters. De gemiddelde watertemperatuur in de zomer (juni - augustus) is in 2003 circa 1,8 °C hoger dan in 2000 en 2004.

Het Elektrisch Geleidend Vermogen (EGV) is niet gemeten in 2000. In de droge en warme zomer van 2003 wordt de EGV hoger dan in 2004 en dat deze hogere waarden blijven voortduren tot in de herfst en winter. Dit is ook conform de gemeten chlorideconcentraties die ook in de zomer van 2003 stijgen boven de waarden in de jaren 2000 en 2004 en constant hoger blijven de rest van het jaar. De chlorideconcentraties in dit KRW watertype zijn echter wel lager dan in de andere KRW watertype die hiervoor zijn besproken.

De zuurgraad (pH) is in de zomer, herfst en winter van 2003 het hoogst en in 2000 het laagst. Mogelijkerwijs wordt dit veroorzaakt door een toename van depositie van base kationen bij een hogere temperatuur zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Echter er is maar één meetpunt meegenomen in dit KRW watertype en het is gevaarlijk om hier zulke sterke conclusies aan te verbinden.

De hoeveelheid opgelost zuurstof (mg l^{-1}) toont slechts in zeer beperkte mate de verwachte trend die ook in de literatuur wordt gevonden: bij een hogere watertemperatuur daalt de hoeveelheid opgeloste zuurstof. Dit geldt binnen een jaar voor zomer- en winterwaarden, maar voor het jaar 2003 ten opzicht van de andere analyse jaren: in de zomer van 2003 was de hoeveelheid opgelost zuurstof vergelijkbaar of iets hoger dan in 2000 en 2004.

De metingen totaal stikstof tonen voor alle jaren de verwachte seizoensperiodiciteit: lagere waarden in de zomer. Net als bij de overige KRW watersystemen zijn in de herfst van 2000 de waarden hoger dan in 2003 en 2004. Dit wordt verklaard door een aanzienlijk hogere neerslag in de herfst van 2000 ten opzichte van 2003 en 2004.

De gemiddelde totale fosfaatconcentratie vertoont geen duidelijke trend door het jaar heen en tussen de verschillende jaren.

5.3.9 Synthese

Uit voorgaande paragrafen blijkt dat:

- De watertemperatuur stijgt in alle KRW watertypen als de luchttemperatuur stijgt.

- EGV en chlorideconcentraties stijgen in de warme en droge zomer van 2003 en blijven hoog in de herfst van 2003.
- De zuurgraad vertoont geen eenduidige trend binnen de verschillende jaren van analyse en tussen de analyse jaren.
- De zuurstofconcentratie daalt zoals verwacht bij hogere watertemperaturen in de zomer in alle KRW watertypen. Over het algemeen is de zuurstofconcentratie ook lager in de warme zomer van 2003 ten opzichte van de andere analyse jaren, echter voor een aantal watertype is hier geen eenduidige trend gevonden en soms stijgt de zuurstofconcentraties zelfs terwijl de watertemperatuur hoger is dan in andere jaren. Andere factoren, zoals biologische processen, spelen hier ook een rol. In een zomer met veel licht, maar niet noodzakelijkerwijs een hogere temperatuur, zal door verhoogde fotosynthese door waterplanten een hoger zuurstofgehalte kunnen ontstaan. Om het effect van een hogere temperatuur en het effect van biologische processen te onderscheiden zouden dag- en nachtritmes moeten worden gemeten.
- De totaal stikstofconcentratie daalt in de zomer. Het effect van de hogere temperaturen resulterend in een sterkere denitrificatie dan nitrificatie leidt in de zomer tot lagere totaal stikstofconcentraties. Ook is er een correlatie tussen hogere seizoensneerslag en een hogere totaal stikstofconcentratie bijvoorbeeld in de herfst van 2000.
- De totale fosfaatconcentratie vertoont over het algemeen geen eenduidige trend binnen de verschillende jaren van analyse en tussen de analyse jaren. In een aantal KRW watertype is er sprake van iets lagere concentraties in de zomer.

Er is gebruik gemaakt van een zeer beperkt aantal metingen per KRW watertype en de meetfrequentie van eens per maand of eens per vier weken is mogelijk te laag om voor bepaalde waterkwaliteitsparameters goede uitspraken te doen.

5.4 Multi-lineaire regressie

5.4.1 Methode

Om te onderzoeken of er verbanden bestaan tussen neerslag (P), luchttemperatuur (T) en windsnelheid (u) en een aantal waterkwaliteitsparameters (q) is een multi-lineaire regressie uitgevoerd met behulp van het statistische software pakket R¹. Gekozen is voor een multi-lineaire regressie omdat meerdere variabelen invloed hebben op de waterkwaliteitsparameters en aangenomen is dat er een lineaire relatie tussen de verschillende meteorologische variabelen en de verschillende waterkwaliteitsparameters bestaat. Er is gebruik gemaakt van de meteorologische gegevens van het station Leeuwarden. Hierbij is aangenomen dat deze gegevens representatief zijn voor het hele beheergebied van Wetterskip Fryslân. Regionale verschillen in neerslag, windsnelheid en luchttemperatuur zijn echter wel aanwezig en kunnen de waterkwaliteitsparameters lokaal beïnvloeden. Figuur 27 geeft voor de temperatuur een indicatie van regionale verschillen.

De beschikbare waterkwaliteitsgegevens voor deze studie beslaan de periode januari 1999 tot juni 2006 en hebben een opname frequentie van een keer in de maand of vierwekelijks. Voor de multi-lineaire regressie is gekozen om de hele meetreeks te betrekken in de analyses. Zou er gekozen

¹www.r-project.org

worden om alleen de jaren 2000, 2003 en 2004 mee te nemen in de analyses dan zijn er te weinig metingen om een regressie analyse uit te voeren. De meervoudige regressie analyse is uitgevoerd per waterkwaliteitsparameter en per meetpunt. Er is onderzocht of lineaire combinaties van P, T en u (een deel van) de variatie q significant kunnen verklaren. Hierbij is gebruik gemaakt van alle beschikbare meetgegevens en de instantane waarde van P, T en u op de dag dat de waterkwaliteitsmeting is verricht. Per meetpunt en per parameter is vervolgens een lineair model bepaald van de vorm:

$$q = \beta_0 \cdot P + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot u + \varepsilon$$

Waarbij β de coëfficiënten zijn, ε het intercept en P de neerslag, T de temperatuur en u de windsnelheid. Met behulp van een t-toets is vervolgens bepaald of de coëfficiënten en het intercept van het lineaire model significant van 0 afwijken. Ook is de gecombineerde R^2 bepaald, welke de fractie van de totale variatie in waterkwaliteit dat wordt verklaard door het model weergeeft.

5.4.2 Resultaten

De resultaten van de multi-lineaire regressie worden gepresenteerd in Tabel 12 (temperatuurcoëfficiënt), Tabel 13 (neerslagcoëfficiënt) en in Tabel 14 (windcoëfficiënt). Voor de duidelijkheid is er voor gekozen om deze resultaten in drie aparte tabellen te presenteren, één tabel per correlatiecoëfficiënt, het is echter goed om te realiseren dat de coëfficiënten niet apart zijn uitgerekend, maar in een multi-lineaire regressie waarin luchttemperatuur, neerslag en windsnelheid zijn meegenomen. Zou besloten worden om windsnelheid gezien de lage significantie (zie Tabel 14) niet meer mee te nemen in de analyse, dan zouden ook de correlatiecoëfficiënten voor luchttemperatuur en neerslag veranderen.

Een eerste blik op de drie tabellen (Tabel 12, Tabel 13 en Tabel 14) laat zien dat vooral de correlatiecoëfficiënt voor luchttemperatuur (Tabel 12) vaak statistisch significant is voor de verschillende waterkwaliteitsparameters. Vooral de coëfficiënten voor de waterkwaliteitsparameters watertemperatuur, opgelost zuurstof en totaal stikstof zijn significant en consistent. Zuurgraad en totaal fosfaat 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 anderszins er nog andere variabelen die niet zijn meegenomen in deze multi-lineaire regressie die deze waterkwaliteitsparameters beïnvloeden. 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 totaal fosfaat zien we zeer lage coëfficiënten: een verandering in luchttemperatuur heeft nauwelijks effect op deze waterkwaliteitsparameters.

Tabel 12. Temperatuurcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid.

KRW watertypen	Meetpunt	Temperatuur water (in situ)	EGV (in situ) [ref.T=25C]	Zuurgraad (in situ)	Chloride	Opgelost zuurstof (in situ)	Zuurstof verzadiging	Totaal stikstof (als N)(UV)	Totaal fosfaat (als P)(UV)
		°C	uS cm ⁻¹	pH	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹
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
	128	1.08	5.51	0.01	0.68	-0.30	-0.94	-0.03	0.00
M30	15	1.04	-93.62	0.00	-19.08	-0.40	-1.77	-0.10	0.03
	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
R5	264	0.97	5.37	0.02	0.30	-0.19	-0.44	-0.10	0.00

Noot: groen: significant $p < 0,05$. rood: niet significant $p > 0,05$.

Wat ook opvalt, is het geringe verschil in correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende KRW watertypen voor een aantal waterkwaliteitsparameters. Zo lijkt de watertemperatuur, zuurgraad en totaal fosfaat in alle KRW watertype ongeveer hetzelfde te reageren op de luchttemperatuur. Voor totaal stikstof zijn er wel verschillen te ontdekken tussen de verschillende watertypen: Ondiepe laagveenplassen (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. Een uitgebreide analyse met meer meetpunten en meer metingen per KRW watertype is aan te bevelen om betere correlaties te berekenen en de verschillen tussen de KRW watertypen duidelijk vast te stellen.

Tabel 13. Neerslagcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid.

KRW watertypen	Meetpunt	Temperatuur water (in situ)	EGV (in situ) [ref. T=25C]	Zuurgraad (in situ)	Chloride	Opgelost zuurstof (in situ)	Zuurstof verzadiging	Totaal stikstof (als N)(UV)	Totaal fosfaat (als P)(UV)
		°C	uS cm ⁻¹	pH	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹
M1	11	0.00	-6.82	-0.01	-1.33	-0.02	-0.11	0.03	0.01
	37	0.01	-2.50	-0.01	-0.61	-0.07	-0.65	0.04	0.00
	147	-0.05	-0.67	-0.01	-0.11	-0.03	-0.27	0.01	0.00
M3	627	0.00	-3.19	-0.01	-0.60	-0.02	-0.33	0.03	0.01
	39	0.01	85.79	0.00	17.85	-0.05	-0.32	-0.02	0.00
M7	106	-0.01	-5.64	-0.01	-0.57	-0.02	-0.21	-0.02	0.00
	33	0.03	-0.02	0.01	0.07	-0.01	-0.03	-0.03	0.00
M8	92	0.00	-5.02	0.00	-0.14	-0.01	0.03	-0.03	0.00
	67	-0.02	-0.47	0.00	-0.13		-0.22	0.05	0.00
M14	34	0.01	1.12	0.00	0.18	-0.04	-0.36	-0.02	0.00
	105	0.01	1.52	0.00	0.35	-0.06	-0.62	-0.01	0.00
	75	0.00	1.32	-0.01	0.33	-0.04	-0.38	-0.02	0.00
M25	261	-0.06	-2.42	-0.01	-0.65	0.04	0.23	0.03	0.01
	227	-0.07	-5.33	-0.01	-0.49	-0.07	-0.45	-0.01	0.00
	128	-0.05	-1.93	0.00	-0.45	-0.07	-0.47	0.02	0.00
M30	15	0.00	-12.19	-0.01	-4.07	-0.14	-1.26	-0.01	0.01
	136	0.06	11.39	0.00	-0.29	-0.06	-1.07	0.06	0.01
	3	0.02	9.78	0.00	0.94	-0.10	-0.71	0.03	0.00
R5	264	-0.04	-2.32	0.00	-0.44	-0.04	-0.46	0.03	0.00

Noot: groen: significant $p < 0,05$. rood: niet significant $p > 0,05$.

De correlatiecoëfficiënten voor neerslag (Tabel 13) zijn bijna allemaal niet statistisch significant. Dit is niet onverwacht. Er is gebruik gemaakt van de instantane meteorologische gegevens op de dag dat de waterkwaliteitsmeting is verricht. In dit geval dus neerslag op de dag van de meting. Echter neerslag in de dagen voorafgaan aan de meting heeft invloed op de verschillende geanalyseerde waterkwaliteitsparameters. Het gebruik van bijvoorbeeld de 10-daagse neerslagsom voorafgaande aan de waterkwaliteitsmeting zou mogelijk tot betere resultaten leiden. Het voert te ver voor deze verkennende studie om te analyseren welke neerslagvariabele tot de meest verantwoorde resultaten zal leiden.

De correlatiecoëfficiënt voor windsnelheid (Tabel 14) is voornamelijk significant voor de waterkwaliteitsparameter watertemperatuur. Het is echter zeer onwaarschijnlijk dat hier sprake is van een causaliteit (oorzaak - gevolg), waarschijnlijker is dat er correlatie is tussen luchttemperatuur en windsnelheid: een hogere luchttemperatuur gaat vaak gepaard met een lagere windsnelheid. Voor de overige waterkwaliteitsparameters is de correlatiecoëfficiënt voor windsnelheid zelden statistisch significant.

Tabel 14. Windcoëfficiënt β uit multi-lineaire regressie neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid.

KRW watertypen	Meetpunt	Temperatuur water (in situ)	EGV (in situ) [ref. T=25C]	Zuurgraad (in situ)	Chloride	Opgelost zuurstof (in situ)	Zuurstof verzadiging	Totaal stikstof (als N)(UV)	Totaal fosfaat (als P)(UV)
		°C	uS cm ⁻¹	pH	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹	%	mg l ⁻¹	mg l ⁻¹
M1	11	-0.38	-26.36	-0.01	-5.99	0.14	0.86	0.13	0.01
	37	-0.37	-17.32	0.01	-2.60	0.25	1.43	0.07	0.01
	147	-0.36	-11.79	0.00	-1.41	0.29	1.97	0.10	0.01
M3	627	-0.45	1.10	0.00	0.35	0.15	0.73	0.11	0.01
	39	-0.38	71.59	0.05	16.43	0.14	0.65	-0.01	0.00
M7	106	-0.48	-18.34	-0.03	-6.10	0.00	-0.70	0.27	0.01
	33	-0.74	0.75	-0.01	-0.69	0.21	0.71	0.13	0.01
M8	92	-0.43	-8.49	-0.03	-3.54	-0.01	-0.42	0.07	0.00
	67	-0.47	4.96	0.00	0.68		-0.52	0.23	0.00
M14	34	-0.74	-0.36	-0.06	-0.54	0.03	-1.42	0.14	0.01
	105	-0.81	-5.51	-0.07	-1.93	0.04	-1.44	0.08	0.01
	75	-0.78	-11.64	-0.03	-3.49	0.12	-0.58	0.15	0.01
M25	261	-0.34	0.88	0.02	-0.57	0.20	1.52	0.10	0.00
	227	-0.37	2.44	0.02	-1.19	0.28	1.92	0.02	0.00
	128	-0.46	-8.92	0.00	-1.55	0.25	1.50	0.09	0.01
M30	15	-0.40	47.08	0.01	8.08	-0.06	-1.07	0.10	-0.01
	136	-0.27	-18.67	0.03	-7.44	-0.08	-0.08	-0.11	0.01
	3	-0.32	-61.15	0.00	-13.21	-0.07	-1.10	0.02	0.02
R5	264	-0.44	-0.91	-0.01	-0.19	0.22	1.50	0.02	0.00

Noot: groen: significant $p < 0,05$. rood: niet significant $p > 0,05$.

5.4.3 Discussie

Multi-lineaire regressie gaat uit van een set van onafhankelijke variabelen die elk normaal verdeeld zijn. In deze verkennende studie is ervan uitgegaan dat de meteorologische variabelen hier aan voldoen, terwijl er in werkelijkheid mogelijke autocorrelatie in de tijdseries aanwezig is veroorzaakt door de seizoentrends. Daarnaast bestaat de mogelijkheid dat er ook tussen de variabelen verbanden kunnen bestaan.

Voor alle lineaire modellen geldt dat er een combinatie van P, T en u wordt gebruikt, ook als één van de drie variabelen geen significante bijdrage levert aan het model. Deze variabele zou dan eigenlijk moeten worden verwijderd uit het model en de meervoudige regressie analyse zou opnieuw moeten worden uitgevoerd. Dit leidt tot een beperkte verbetering van de performance van het model. Gezien de geringe verschillen en het verkennende karakter van de studie is hier op dit moment niet voor gekozen.

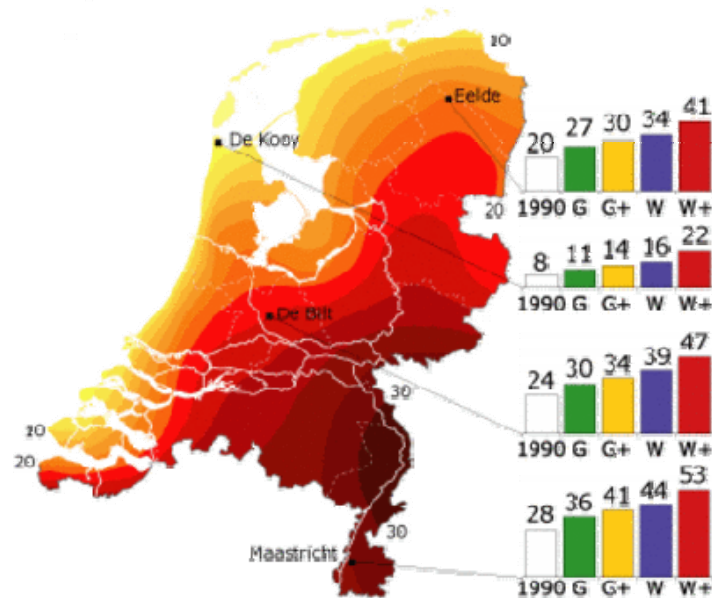
Er is gebruik gemaakt van de instantane meteorologische gegevens op de dag dat de waterkwaliteitsmeting is verricht. Het is echter mogelijk dat bijvoorbeeld een middeling over de periode tussen twee metingen een beter resultaat oplevert.

5.5 *Invloed van klimaatverandering*

In de voorgaande paragrafen is gebruik gemaakt van bestaande historische meetreeksen van Wetterskip Fryslân. De gegevens van het heden kunnen op verschillende manieren worden vertaald naar een veranderend klimaat.

1. De effecten van de warme zomer van 2003 zijn in detail geanalyseerd voor de verschillende watersystemen in paragraaf 5.3. Met behulp 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. Deze methode zal meer beschrijvend zijn en minder kwantitatief.
2. In paragraaf 5.4 zijn met behulp van multi-lineaire regressie correlatiecoëfficiënten berekend voor luchttemperatuur, neerslag en wind en de verschillende waterkwaliteitsparameters. Met behulp van de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's die een verwachting geven van bijvoorbeeld temperatuurstijging is het eenvoudig de verwachte verandering in de verschillende waterkwaliteitsparameters te berekenen. Deze methode is zeer kwantitatief en geeft getalsmatig de verwachte waarden van waterkwaliteitsparameters weer voor elk klimaatscenario en elke KRW watertype. Deze waarden moeten echter wel met enige voorzichtigheid worden benaderd; (i) er is slechts een beperkte hoeveelheid meetpunten en metingen meegenomen in deze studie, en (ii) de onzekerheid in de verschillende klimaatscenario's. De getallen kunnen mogelijkwerwijs een schijnnaauwkeurigheid oproepen.

In deze studie wordt de eerste methode verder uitgewerkt. In paragraaf 5.2.1 zijn de meteorologische gegevens van KNMI station Leeuwarden besproken. In Tabel 9 wordt de seizoen- en jaartemperatuur voor de jaren 2000, 2003 en 2004 voor het KNMI station Leeuwarden weergegeven. Het KNMI geeft geen getransformeerde tijdreeksen voor Leeuwarden, maar wel voor onder andere Eelde en De Kooy. Station Leeuwarden ligt hier geografisch en ook op het gebied van temperatuur tussen in (zie Figuur 27).



Figuur 27. Waargenomen gemiddeld aantal zomerse dagen (maximum temperatuur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) per jaar voor 1971-2000, en voor vier plaatsen in Nederland de klimaatscenario's voor 2050. De verschillen in het aantal zomerse dagen tussen de vier plaatsen worden veroorzaakt door verschillen in het huidige klimaat (KNMI, 2006b).

In Tabel 15 wordt een indicatie van de gemiddelde temperaturen in de vier klimaatscenario's in 2050 en 2100 gegeven. Het KNMI geeft tot op heden alleen gegevens voor winter en zomer. Vergelijken we Tabel 9 met Tabel 15 dan zien we dat:

- In 2050 zijn de winters in scenario's G en G+ vergelijkbaar 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 standaard zomer 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 ($0,9^{\circ}\text{C}$) is dan de gemiddelde zomertemperatuur van 2003.
- In 2100 wordt de gemiddelde wintertemperatuur zelfs in het minst extreme KNMI'06 klimaatscenario G net zo warm als de zachte winter van 2000, terwijl in alle andere KNMI'06 klimaatscenario's (G+, W en W+) de gemiddelde wintertemperatuur hoger ligt.

Voor de zomers in 2100 geldt een vergelijkbaar verhaal. De gemiddelde zomertemperatuur is alleen in het minst extreme KNMI'06 klimaatscenario G vergelijkbaar met de warme zomer van 2003, in alle andere KNMI'06 klimaatscenario's (G+, W en W+) ligt de gemiddelde zomertemperatuur aanzienlijk hoger.

Tabel 15. Overzicht van gemiddelde temperaturen in de referentieperiode 1976-2001 en een indicatie van de temperaturen in de vier klimaatscenario's in 2050 en 2100, gebaseerd op getransformeerde tijdreeksen.

KNMI'06 scenario	Seizoen	De Kooy			Eelde		
		1976-2005	2050	2100	1976-2005	2050	2100
	Jaargemiddelde	9,8			9,1		
	Winter	3,6			2,4		
	Zomer	16,1			16,0		
G	Winter		4,4	5,3		3,2	4,1
	Zomer		17,0	17,9		16,9	17,8
G+	Winter		4,7	5,9		3,5	4,7
	Zomer		17,6	19,0		17,4	18,9
W	Winter		5,4	7,2		4,2	6,0
	Zomer		17,9	19,7		17,8	19,6
W+	Winter		5,8	8,1		4,6	6,9
	Zomer		19,0	21,9		18,9	21,7

In Tabel 10 staat het aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in 2000, 2003 en 2004 voor station Leeuwarden weergegeven. Het KNMI geeft voor de verschillende KNMI'06 klimaatscenario's op basis van getransformeerde tijdreeksen ook het gemiddeld aantal dagen met bepaalde temperatuur in 2050 (Tabel 16) en ook in 2100 (Tabel 17).

Tabel 16. Gemiddeld aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in de referentieperiode 1976-2005 en een indicatie van het aantal dagen in de vier klimaatscenario's rond 2050, op basis van getransformeerde tijdreeksen (KNMI).

Aantal dagen met	Waarnemingen				
	1976-2005	G	G+	W	W+
IJsdagen (max. temperatuur $\leq 0^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	9	6	5	3	2
Eelde	14	9	8	6	4
Vorst dagen (min. temperatuur $\leq 0^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	43	30	28	22	19
Eelde	70	53	51	41	37
Warme dagen (max. temperatuur $\geq 20^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	44	59	65	79	90
Eelde	70	87	91	105	109
Zomerse dagen (max. temperatuur $\geq 25^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	8	11	14	16	22
Eelde	20	27	30	34	41
Tropische dagen (max. temperatuur $\geq 30^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	1	1	2	2	5
Eelde	4	6	7	8	12

Het KNMI geeft geen getransformeerde tijdreeksen voor Leeuwarden, maar wel voor onder andere Eelde en De Kooy. Station Leeuwarden ligt hier geografisch en ook op het gebied van temperatuur tussen in (zie Figuur 27). Vergelijken we deze Tabel 10 met Tabel 16 (KNMI'06 scenario 2050) dan blijkt dat in 2050 het jaar 2003 bijna een standaard jaar wordt in de KNMI'06 scenario's G+, W en W+ als gekeken wordt naar het aantal warme, zomerse en tropische dagen. Het KNMI'06 scenario G is iets koeler.

Vergelijken we Tabel 10 met Tabel 17 (KNMI'06 scenario 2100) dan blijkt dat in 2100 het jaar 2003 een standaard jaar wordt in KNMI'06 scenario's G en G+ als wordt gekeken naar het aantal warme, zomerse en tropische dagen. In de KNMI'06 scenario's W en W+ komen warme, zomerse en tropische dagen nog veel vaker voor dan in het jaar 2003.

Tabel 17. Aantal dagen per jaar met een bepaalde temperatuur in de referentieperiode 1976-2005 en een indicatie van het aantal dagen in de vier klimaatscenario's rond 2100, op basis van getransformeerde tijdreeksen (KNMI).

Aantal dagen met	Waarnemingen				
	1976-2005	G	G+	W	W+
IJsdagen (max. temperatuur $\leq 0^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	9	3	2	1	0
Eelde	14	6	4	2	1
Vorstdagen (min. temperatuur $\leq 0^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	43	22	18	11	6
Eelde	70	41	37	23	17
Warme dagen (max. temperatuur $\geq 20^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	44	78	90	125	133
Eelde	70	104	109	142	146
Zomerse dagen (max. temperatuur $\geq 25^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	8	16	31	22	50
Eelde	20	34	42	53	70
Tropische dagen (max. temperatuur $\geq 30^{\circ}\text{C}$)					
De Kooy	1	2	5	6	14
Eelde	4	8	12	15	26

De waterkwaliteitseffecten van de warme zomer van 2003, zoals beschreven voor de verschillende watersystemen in paragraaf 5.3 komen in een toekomst met klimaatverandering veelvuldig voor en zullen zelfs zeer gebruikelijk zijn in een toekomstige *normale* zomer.

In hoofdstuk 2 is een aanzet gegeven hoe de KNMI'06 klimaatscenario basisgegevens kunnen worden gebruikt voor de transformatie van neerslagreeksen (Tabel 2) en overschrijdingskansen voor een bepaalde temperatuur (Tabel 3) voor het station Leeuwarden. Deze methode en gegevens zouden in een vervolgstudie verder kunnen worden uitgewerkt en worden gebruikt om de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit nauwkeuriger te bepalen.

De multi-lineaire regressie correlatiecoëfficiënten (paragraaf 5.4) vermenigvuldigd met de verwachte gemiddelde temperatuurstijging in de KNMI'06 klimaatscenario's (Tabel 1) geeft de verwachte waarden van waterkwaliteitsparameters. Deze methode is niet verder uitgewerkt in deze studie. Tabel 18 geeft een voorbeeld voor de stijging van de watertemperatuur per KRW watertype bij verschillende KNMI'06 klimaatscenario's (zomer 2050). Het effect van klimaatverandering (temperatuurstijging) op de verschillende KRW watertypen is bijna gelijk.

Tabel 18. Stijging watertemperatuur per KRW watertype bij verschillende KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050 (zomer).

KRW watertype	KRW code	Gemiddelde correlatiecoëfficiënt $T_{\text{lucht}} - T_{\text{water}}$	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

6 Consequenties waterbeleid en onderzoek

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de mogelijke consequenties voor het waterbeleid en een set van relevante vragen voor vervolgonderzoek worden besproken. De consequenties en onderzoeksvragen zijn samengevat in de omkaderde teksten.

Het onderwerp van deze studie “effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit” heeft tot nu toe nog niet veel aandacht gekregen. Er is nog weinig specifiek onderzoek verricht naar de effecten van klimaatverandering en ook op beleidsniveau is er nog weinig aandacht voor de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Wetterskip Fryslân is hier een uitzondering op. De effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit is beter onderzocht en in Nederland ingekaderd in beleid: WB21 en NBW. Bewustwording onder de bevolking spits zich ook voornamelijk toe op de waterkwaliteit en dan met name op de grote rivieren en de zee. De kreet “*Ruimte voor de rivieren*” is welbekend bij de Nederlanders. Het nog onontgonnen terrein van de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit speelt op alle niveaus:

- Op Europees niveau in het rapport van de European Environment Agency (EEA, 2004) “*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 EU Kaderrichtlijn water (KRW) lijkt klimaatverandering geen rol te spelen. Op den duur zou de definitie van ‘goede ecologische toestand’ kunnen gaan verschuiven als gevolg van klimaatverandering (Eisenreich, 2005).
- Op nationaal niveau worden in het hoofdrapport aan de tweede kamer *Klimaatverandering en Klimaatbeleid: Inzicht in keuzes voor de Tweede Kamer* (Rooijers et al., 2004) waterkwaliteit en aquatische ecologie niet betrokken bij het overzicht van klimaatseffecten. Echter recentelijk heeft de ministerraad ingestemd met het “*Nationaal Programma Adaptatie Ruimte en Klimaat (ARK)*”. Het uiteindelijke doel van het ARK is het klimaatbestendig maken van de ruimtelijke inrichting van Nederland. In het plan van aanpak van 9 maart 2006 worden waterkwaliteit en ecologie helaas weer genegeerd. Echter er is hoop: in een recente brief (26 juli 2006) van het ministerie van VROM aan de deelnemende waterschappen over het ARK programma wordt duidelijk gesteld dat de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit tot nu toe onderbelicht zijn gebleven. Het blijft weliswaar bij deze constatering, maar een eerste stap naar actie lijkt gezet.
- De regionale waterbeheerders in Nederland hebben de afgelopen jaren enorm veel energie gestopt in de analyse van de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit en dan met name op het gebied van wateroverlast (NBW normering wateroverlast) en minder toegespitst op mogelijke toekomstige droogte. Veel energie is ook gegaan naar waterkwaliteitsaspecten: onder andere de Kaderrichtlijn Water en monitoring, echter de link tussen klimaatverandering en waterkwaliteit is vaak nog niet gelegd. Wetterskip Fryslân is een pionier op dit terrein.

Uit de literatuur en ook de analyse van de effecten van klimaatverandering op de verschillende waterkwaliteitsparameters 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 zijn voor stroomgebiedkarakteristieken zoals hydro-klimatologie, geohydrologie en landgebruik (Chang, 2004; Eisenreich, 2005; Lahmer et al., 2001). Biologische veranderingen door klimaatverandering zijn door de complexe interacties inherent onvoorspelbaar. Kleine veranderingen in het klimaat kunnen dramatische effecten hebben. Als gevolg hiervan zijn de in de literatuur gevonden effecten van klimaatverandering op de biologische waterkwaliteitsparameters zoals beschreven in hoofdstuk 3 van algemene aard. Uitgebreide analyses van de waterkwaliteitsmetingen in de Friese watersystemen zijn noodzakelijk om een specifiek beeld te krijgen dat volledig toepasbaar op de situatie in het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Deze verkennende studie geeft een eerste aanzet hiertoe.

6.2 Consequenties voor waterbeleid

Klimaatverandering en in het bijzonder een stijging van de temperatuur zal de waterkwaliteit van ondiepe meren in de toekomst sterk beïnvloeden (Carvalho en Kirika, 2003). Hierdoor zal het bereiken van een “goede” status van al het oppervlakte water in het kader van de Kaderrichtlijn Water nog moeilijker realiseerbaar worden.

- De definitie van ‘goede ecologische toestand’ in de Kaderrichtlijn Water (KRW) speelt klimaatverandering geen rol.
 - Klimaatverandering zal de waterkwaliteit in de toekomst sterk beïnvloeden.
 - Het bereiken van een ‘goede ecologische toestand’ van het oppervlakte water zal nog moeilijker realiseerbaar worden
 - Op den duur zou de definitie van ‘goede ecologische toestand’ kunnen gaan verschuiven als gevolg van klimaatverandering.
-
- De verantwoordelijkheid voor waterbeheer vergt heldere en vastgelegde besluitvorming over de grenzen van de garantie voor een bepaalde waterkwaliteit gedurende bijvoorbeeld periodes van droogte (Min. V&W, 2004).

Om de effecten van klimaatverandering op te kunnen vangen zal de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) over een goede veerkracht moeten beschikken. Grote eenheden zijn de peilers van deze veerkracht (Opdam en Pouwels, 2006). Het risico op verlies van ecologische veerkracht bij klimaatverandering is relatief hoog bij die typen natuur die nu onder druk staan van verdroging en versnippering (Opdam en Pouwels, 2006). Sterk waterafhankelijke ecosystemen lopen een extra risico, omdat het vaak gaat om te veel en te weinig water. Oplossingsrichtingen om de effecten van klimaatverandering te verminderen kunnen gevonden worden in het vergroten van ruimtelijke samenhang van ecosystemen en het verkleinen van de hoeveelheid teveel en te weinig water (Opdam en Pouwels, 2006). Er liggen kansen daar waar de landbouw door veranderingen op de wereldmarkt en door het afschaffen van EU subsidies zich terugtrekt en daar waar land zal worden ingezet voor het opvangen van wateroverlast.

- Vergroten ruimtelijke samenhang van ecosystemen.
- Verkleinen van de hoeveelheid teveel en te weinig water.
- Combineren met waterkwantiteitsmaatregelen zoals waterbergingsgebieden.

Om verantwoord beheer of herstel van oppervlaktewateren in de toekomst te waarborgen zal in ieder geval rekening moeten worden gehouden met de in de toekomst veranderende temperatuur.

Het huidige beheer dat gericht is op heldere, waterplanten gedomineerde watersystemen biedt waarschijnlijk een beschermend effect tegen klimaatverandering (zie ook paragraaf 3.2.6).

- Huidig waterbeheer gericht op heldere, waterplanten gedomineerde watersystemen voortzetten.

De zuurgraad van watersystemen kan dalen als gevolg van klimaatverandering (zie paragraaf 3.2.2). De effecten zijn het groots in watersystemen met een klein stroomgebied ten opzichte van het wateroppervlakte, een lage zuurgraad en een kort groeiseizoen. Echter de effecten van klimaatverandering op de zuurgraad zijn niet eenduidig. Het CO₂ bemestingseffect kan weer leiden tot zuurdere wateren.

- Mogelijkerwijs heeft klimaatverandering een gunstig effect op de verzurings bestrijding.

Vanwege de aanvoer van ongewenste stoffen (chloride, nutriënten) is de schade bij de inlaat van gebiedsvreemd water vaak groter dan de schade door droogte. In ieder geval dient te worden voorkomen dat zoutwater wordt ingelaten in zoetwater ecosystemen en dat voedselrijk water wordt ingelaten in voedselarme gebieden.

- Inlaten van gebiedsvreemd water met de verkeerde kwaliteit kan leiden tot grotere schade dan de schade veroorzaakt door droogte.

Door een klimaat met in de toekomst meer perioden met extreme neerslag zal de wateroverlast in steden toenemen en door overstortingen vanuit het rioolstelsel zal meer afvalwater rechtsreeks op het oppervlaktewater komen. De ontwerpafvoer van rioleringen zal omhoog moeten om neerslagpieken in stedelijke gebieden te kunnen opvangen (Roelijers et al., 2004). Het effect van meer rioolwateroverstorten op het oppervlaktewater is niet eenduidig (zie paragraaf 3.3.1). De gevolgen van een temperatuursstijging zijn het grootst in (ondiepe) wateren met veel effluentlozingen (Jenkins et al. 1993). Een studie in Heeg (Boogaard et al., 2006) laat zien dat slechts een deel van de riooloverstorten een negatief effect had op de zuurstofconcentratie van het oppervlaktewater.

De behandeling van afvalwaterlozingen en het minimaliseren van watervervuilingen zorgt niet alleen voor een betere kwaliteit water, maar ook voor een lagere gevoeligheid voor klimaatverandering.

Wetterskip Fryslân verwijdert sinds 2000 circa 75% van de binnenkomende fosfaat en stikstof op RWZI's. Kleine kernen zonder riolering zullen bij het schrijven van deze studie allen aangesloten zijn op een rioolwaterzuiveringsinstallatie. De risicovolle riooloverstorten in Fryslân zijn gesaneerd (Provincie Fryslân, 2004). Mogelijkerwijs is het in de toekomst door nieuwe technologieën mogelijk dit percentage verder op te voeren. Echter de kosten om de laatste procenten stikstof en fosfaat te verwijderen zullen exponentieel stijgen.

- De ontwerpafvoer van rioleringen zal omhoog moeten om neerslagpieken in stedelijke gebieden te kunnen opvangen.
- Het effect van rioolwateroverstorten op de zuurstofconcentratie in het oppervlaktewater is niet eenduidig. Echter de zuurstofconcentraties zullen in de toekomst bij hogere watertemperaturen lager worden.
- Verder verlagen van stikstof- en fosfaatconcentraties in RWZI effluent.
- De behandeling van afvalwaterlozingen het minimaliseren van watervervuilingen zorgt voor een lagere gevoeligheid voor klimaatverandering.

Landbouw is een van de grootste bronnen van stikstof (onder ander Abler et al., 2002). Echter niet alleen klimaatverandering heeft een effect op de toekomstige stikstofvrachten. De invloed van klimaatverandering op landbouwprijzen en op de economische reacties van agrariërs zijn van wezenlijk belang. De meeste literatuur legt een toekomstscenario op aan de huidige landbouweconomie, terwijl de economische reactie van agrariërs op klimaatverandering niet kan worden genegeerd.

- Landbouw is een van de grootste bronnen van stikstof. In toekomstscenario's dient niet alleen het effect van klimaatverandering te worden meegenomen, maar ook de veranderingen in landgebruik door de klimaatverandering.

De invloed van temperatuurstijging op de groei van chlorofyl-a biomassa laat zien dat bij slechts een kleine temperatuurstijging de chlorofyl-a biomassa bijna vijf keer zo hoog wordt in de zomer (Jayaweera en Asaeda, 1995). De invloed van temperatuurstijging op de groei van chlorofyl-a biomassa is vooral groot in eutrofe meren, terwijl in een deel van het meer waar bio-manipulatie had plaatsgevonden de effecten nihil waren (zie paragraaf 3.2.5). Het eutrofe meer kan zelfs een oligotroof meer worden waar de primaire productie minimaal is en de verandering in temperatuur geen effect heeft op algenbiomassa of soortencompositie.

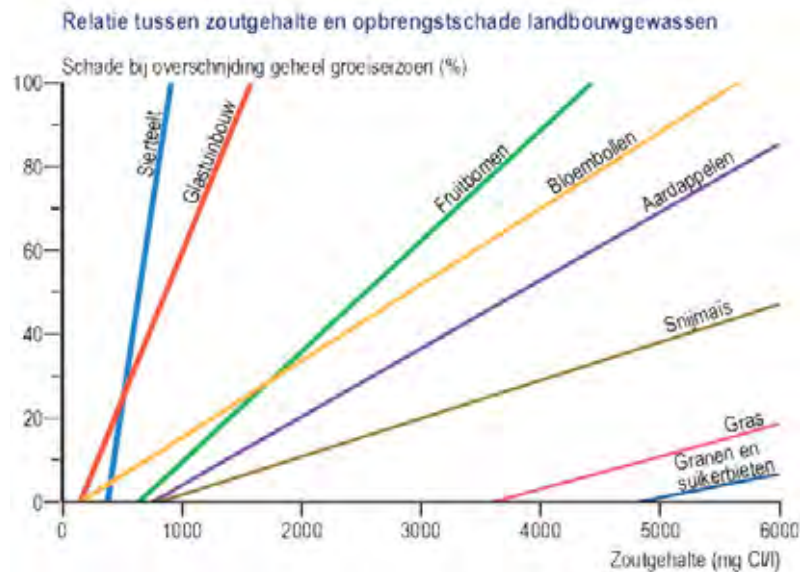
De klassieke wijze voor het herstellen van een gezonde waterkwaliteit in eutrofe meren is de verlaging van externe nutriëntenaanvoer. Echter het kunstmatig mengen van het water in gestratificeerde diepe meren, waardoor het voordeel van de blauwlagen met een hoog drijfvermogen teniet wordt gedaan ten opzichte van algen met een lager drijfvermogen, kan leiden tot een verbetering van de waterkwaliteit op korte termijn (zie paragraaf 3.2.5).

- De invloed van temperatuurstijging op de groei van chlorofyl-a biomassa is vooral groot in eutrofe meren. Bio-manipulatie kan de effecten reduceren of zelfs tot nul reduceren.
- Verbeteringen van de waterkwaliteit in eutrofe meren op korte termijn is te bereiken door het kunstmatig mengen van het water in gestratificeerde meren. Het voordeel van de blauwlagen met een hoog drijfvermogen wordt teniet gedaan ten opzichte van algen met een lager drijfvermogen.
- Verbeteringen van de waterkwaliteit in eutrofe meren op lange termijn wordt bereikt door verlaging van externe nutriëntenaanvoer.

6.3 Consequenties voor toekomstig onderzoek

In deze studie wordt alleen naar de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit gekeken. De gevolgen van een veranderende waterkwaliteit voor verschillende functies (landbouw, natuur, recreatie, visserij etc.) zijn niet onderzocht. Figuur 28 geeft een opzet voor de effecten van chlorideconcentraties op verschillende landbouwgewassen.

- In een vervolgstudie zou gekeken kunnen worden naar de effecten van de veranderende waterkwaliteit als gevolg van klimaatverandering op verschillende functies zoals landbouw, recreatie en visserij.



Figuur 28. Relatie tussen zoutgehalte en opbrengstschade landbouwgewassen (MNP, 2005b).

- De effecten van klimaatverandering op biologische waterkwaliteitsparameters, zoals blauwalgen, fytoplankton, en E-coli, zijn in deze studie uitsluitend beschreven vanuit de beschikbare literatuur. In een vervolgstudie zouden deze waterkwaliteitsparameters met behulp van gegevens van Wetterskip Fryslân kunnen worden geanalyseerd.

Het KNMI verwacht geen veranderingen in windsnelheden in een toekomstig klimaat. Er is weinig onderzoek gedaan naar relatie klimaatverandering, wind en de effecten op waterkwaliteit. Wetterskip Fryslân heeft het gevoel dat het aantal dagen met lagere windsnelheden (windkracht 4, 5 en 6) toeneemt. Deze lagere windsnelheden hebben invloed op golfslag, opwerveling, troebeling en de oeverzone. Of deze lagere windsnelheden inderdaad op dit moment al vaker voorkomen dan in het verleden en of deze mogelijke trend zich ook in de toekomst zal voortzetten is onduidelijk.

- Onderzoek of lagere windsnelheden (windkracht 4, 5 en 6) nu al vaker voorkomen dan in het verleden.

In samenspraak met Wetterskip Fryslân is gekozen om in deze studie de jaren 2000, 2003 en 2004 te analyseren. Deze keuze was 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. Echter na het uitgebreide literatuuronderzoek en de multi-lineaire regressie analyse bleek al snel dat temperatuur een belangrijker factor is die invloed heeft op de waterkwaliteit dan neerslag.

- In deze studie is de keuze van analyse jaren gebaseerd op neerslag. Echter temperatuur blijkt ook een zeer belangrijke factor voor de effecten op de waterkwaliteit. In een vervolgstudie zouden andere analyse jaren gekozen kunnen worden, gebaseerd op temperatuur (koud, gemiddeld en warm jaar).

In deze studie zijn acht KRW watertypen onderscheiden met een beperkt aantal (19) meetpunten. Na analyse van de gegevens bleek er een grote spreiding in de meetwaarden binnen een KRW watertype aanwezig te zijn, ondanks dat de meetpunten als representatief werden aangemerkt door Wetterskip

Fryslân voor het betreffende KRW watertype. Op dit moment worden de metingen eens per maand of eens per vier weken door Wetterskip Fryslân uitgevoerd. Het is wenselijk om een analyse uit te voeren of de bestaande waterkwaliteitsgegevens voldoende van kwaliteit en kwantiteit zijn om de effecten van klimaatverandering goed te beschrijven. De analyse moet resulteren in aanbevelingen voor mogelijke aanpassingen aan het meetnet of frequenties om effecten van klimaatverandering in de toekomst te kunnen analyseren.

In de multi-lineaire regressie analyse (zie paragraaf 5.4) naar de verbanden tussen neerslag, luchttemperatuur en windsnelheid en waterkwaliteitsparameters is gebruik gemaakt van meteorologische gegevens van het station Leeuwarden en de beschikbare waterkwaliteitsgegevens over de periode januari 1999 tot juni 2006. Het gebruik van meer meetpunten en langere meetreeksen zou kunnen leiden tot betere correlatiecoëfficiënten en mogelijk een groter onderscheid tussen de verschillende KRW watertypen.

- In een vervolgstudie dienen meer meetpunten per KRW watertype meegenomen te worden, zodat een betere gemiddelde waarde kan worden bepaald en de grote spreiding van meetwaarde minder effect heeft op de analyse resultaten.
- In een vervolgstudie is het aan te bevelen langere meetreeksen voor de multi-lineaire regressie analyse te gebruiken.
- Onderzoek of de kwantiteit en kwaliteit van het huidige meetnet wenselijkheid voldoende zijn om de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit goed te beschrijven.

In de multi-lineaire regressie analyse zijn de correlatiecoëfficiënten voor neerslag bijna allemaal niet statistisch significant. Dit wordt veroorzaakt door het gebruik van de instantane meteorologische gegevens op de dag dat de waterkwaliteitsmeting is verricht; neerslag op de dag van de waterkwaliteitsmeting. Echter neerslag in de dagen voorafgaan aan de meting hebben invloed op de verschillende geanalyseerde waterkwaliteitsparameters.

- In een vervolgstudie zou in een multi-lineaire regressie analyse in plaats van instantane meteorologische gegevens op de dag van de waterkwaliteitsmeting beter gebruik gemaakt kunnen worden van bijvoorbeeld de 10-daagse neerslagsom voorafgaan aan de waterkwaliteitsmeting.

Uit de multi-lineaire regressie analyse blijkt dat de correlatiecoëfficiënt voor windsnelheid slechts beperkt significant is voor de waterkwaliteitsparameters. Voor de watertemperatuur is er wel een significante correlatie aangetoond: hogere watertemperatuur bij minder wind. Het is echter onwaarschijnlijk dat hier sprake is van een causaliteit (oorzaak - gevolg), waarschijnlijker is dat er correlatie is tussen luchttemperatuur en windsnelheid: een hogere luchttemperatuur gaat vaak gepaard met een lagere windsnelheid.

Als in een multi-lineaire regressie analyse één van de meteorologische variabele geen significante bijdrage levert aan het model, dan zou deze variabele eigenlijk moeten worden verwijderd en de multi-lineaire regressie analyse opnieuw moeten worden uitgevoerd. Dit leidt tot betere correlatiecoëfficiënten voor de resterende variabelen.

- In een vervolgstudie zou in een multi-lineaire regressie analyse wind niet meegenomen hoeven te worden als meteorologische variabele.

Om de invloed van klimaatverandering te kwantificeren is het noodzakelijk om toekomstige tijdreeksen voor temperatuur en neerslag te hebben. Deze tijdreeksen zijn niet alleen noodzakelijk om de invloed van klimaatverandering op de waterkwaliteit te kwantificeren, maar ook voor waterkwantiteitseffecten, zoals droogte, wateroverlast en veiligheid.

Het KNMI levert geen getransformeerde tijdreeksen voor KNMI station Leeuwarden. Daarnaast levert het KNMI alleen tijdreeksen voor het winter- en zomerseizoen, terwijl zeker ook het klimaat in de lente en herfst invloed hebben op verschillende waterkwaliteitsparameters. In paragraaf 2.4 is een aanzet gegeven hoe getransformeerde tijdreeksen voor Leeuwarden kunnen worden gegenereerd.

- Het is noodzakelijk om toekomstige meteorologische tijdreeksen voor Leeuwarden te generen. Niet alleen voor het zomer- en winterseizoen, maar voor het hele jaar inclusief lente en herfst.

Ondanks de constatering van deze studie dat de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit nog niet hoog op de nationale agenda staat, zijn er eerste stappen gezet met het "*Nationaal Programma Adaptatie Ruimte en Klimaat (ARK)*". Ook het programma Klimaat voor Ruimte (zie ook www.klimaatvoorruimte.nl) geeft mogelijkheden voor waterschappen om te participeren en samen met wetenschappers vanuit verschillende disciplines de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit te onderzoeken. Onder de regionale waterbeheerders is Wetterskip Fryslân op dit moment nog een pionier is op het gebied van klimaatverandering en waterkwaliteit. Deze studie had niet tot doel om te analyseren of de aanbevelingen voor verder onderzoek alleen moeten worden uitgevoerd door Wetterskip Fryslân. Afhankelijk van de mogelijkheden en prioriteiten zou participatie in bovengenoemde programma's en samenwerkingsverbanden met andere waterschappen en Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) tot de mogelijkheden behoren.

7 Conclusies

De invloed van klimaatverandering op waterkwantiteit staat vol in de aandacht in Nederland. Waterkwaliteitseffecten van klimaatverandering zijn tot op de dag van vandaag in de discussies over klimaatverandering in Nederland onderbelicht gebleven. Dit is deels te wijten aan het feit dat er nog weinig bekend is over de effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit. Echter er zijn wel indicaties te ontleen aan effecten van extreme weersomstandigheid op de waterkwaliteit in het verleden.

Uit de literatuur en ook de analyse van de effecten van klimaatverandering op de verschillende waterkwaliteitsparameters in Fryslân 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 zijn voor stroomgebiedkarakteristieken zoals hydro-klimatologie, geohydrologie en landgebruik. Om kwantitatieve uitspraken te doen voor het beheergebied van Wetterskip Fryslân is een gedetailleerde analyse van waterkwaliteitsparameters noodzakelijk, waartoe deze studie een eerste aanzet heeft gegeven. Biologische veranderingen door klimaatverandering zijn door de complexe interacties inherent onvoorspelbaar. 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.

De definitie van 'goede ecologische toestand' in de Kaderrichtlijn Water (KRW) speelt klimaatverandering geen rol, echter klimaatverandering zal de waterkwaliteit in de toekomst sterk beïnvloeden. Het bereiken van een 'goede ecologische toestand' van het oppervlakte water zal nog moeilijker realiseerbaar worden. Op den duur zou de definitie van 'goede ecologische toestand' kunnen gaan verschuiven als gevolg van klimaatverandering.

Van de drie in deze studie onderzochte *drivers* voor veranderingen in waterkwaliteit; luchttemperatuur, neerslag en wind, blijkt temperatuur het meeste effect te hebben op de waterkwaliteit gevolgd door neerslag. Dit geldt voor de gevonden literatuur, maar ook voor de analyse van de waterkwaliteitsparameters in Fryslân. Over wind als *driver* voor veranderingen in waterkwaliteit is weinig literatuur gevonden en ook de analyse in Fryslân toont weinig correlaties. Het KNMI verwacht ook geen grote veranderingen in de windsnelheden in de toekomst.

De watertemperatuur heeft een eenduidig positieve correlatie met de luchttemperatuur, dit wil zeggen dat de watertemperatuur stijgt bij een hogere luchttemperatuur en daalt bij een lagere luchttemperatuur. Dit wordt in alle literatuurbronnen gemeld en ook de gegevens uit Fryslân tonen dit aan. De watertemperatuur van het IJsselmeer in de zomer van 2003 was warmer dan in 2001 en 2002. Voor de verschillende KRW watersystemen geldt dat overal de watertemperatuur in de zomer van 2003 warmer was dan in 2000 en 2004 tot maximaal 3°C warmer in de gebufferde regionale kanalen.

De literatuur beschrijft de mogelijkheid van een stijging van de alkaliniteit door klimaatverandering. Echter bij de analyse van de waterkwaliteitsparameters in Fryslân is geen eenduidige relatie gevonden tussen temperatuur en zuurgraad, behalve voor één meetpunt. De zuurgraadmetingen vertoonde juist

een enorme spreiding tussen meetpunten, zelfs binnen een KRW watertype, dat er geen conclusies getrokken kunnen worden met de huidige dataset.

Het zuurstofgehalte wordt duidelijk beïnvloed door een hogere watertemperatuur; bij een hogere watertemperatuur kan er minder zuurstof oplossen in het water. Dit werd gevonden in de literatuur en ook in de resultaten van de waterkwaliteitsgegevens uit Fryslân. De zuurstofconcentratie daalt bij hogere watertemperaturen in de zomer in alle KRW watertypen. Over het algemeen is de zuurstofconcentratie ook lager in de warme zomer van 2003 ten opzichte van de andere analyse jaren. Voor een aantal meetreeksen is geen eenduidige trend gevonden. Mogelijkerwijs spelen andere factoren hier ook een rol.

Een hogere temperatuur resulteert over het algemeen in snellere (chemische) processen, echter verschillende processen hebben hun eigen gevoeligheid voor een bepaalde temperatuurstijging. Denitrificatie reageert sterker op een temperatuurstijging dan nitrificatie, resulterend in lagere totaal stikstofconcentraties. Deze relatie is ook gevonden in de metingen in Fryslân. De totaal stikstofconcentratie daalt in de zomer. Voor een aantal KRW watertypen is totaal stikstofconcentratie in de droge en warme zomer van 2003 lager dan in de overige analyse jaren 2000 en 2004. In de literatuur wordt ook een correlatie gevonden tussen neerslag en stikstofvrachten; bij meer neerslag stijgen de totaal stikstofconcentraties in het water door uitspoeling en oppervlakkige afstroming vanuit landbouwgebieden. Ondanks de beperkte hoeveelheid metingen is deze relatie ook in Fryslân gevonden. De totaal stikstofconcentratie stijgt bijvoorbeeld meer in de natte herfst van 2000 dan in de drogere herfst van 2003 en 2004.

De fosfaatconcentratie in het oppervlaktewater wordt vooral beïnvloed door neerslag. Een toename van de netto neerslag zal leiden tot een toename in de fosfaatconcentratie. Fosfaat, gebonden aan sedimenten, wordt vooral tijdens zware neerslag getransporteerd naar beken en rivieren. In stroomgebieden met veel landbouw en een geschiedenis van bemesting is de fosfaatverzadiging hoger in de toplaag van de bodem. Hogere grondwaterstanden zullen dan leiden tot een hogere concentratie van fosfaten in het oppervlaktewater. De totale fosfaatconcentratiemetingen in het beheergebied van Wetterskip Fryslân vertonen over het algemeen geen eenduidige trend binnen de verschillende jaren van analyse en tussen de analyse jaren. In een aantal KRW watertype is er sprake van iets lagere concentraties in de zomer.

De chlorideconcentratie wordt vooral beïnvloed door neerslag of beter, de afwezigheid hiervan. In de droge zomer van 2003, met extreem lage afvoeren in de grote rivieren steeg het chloridegehalte van de Rijn aanzienlijk. Ook de chlorideconcentratie het IJsselmeer (waterbron voor Wetterskip Fryslân) steeg aanzienlijk. In alle KRW watertypen in het beheergebied van Wetterskip Fryslân steeg de EGV en chlorideconcentraties in de warme en droge zomer van 2003 en bleven hoog in de herfst van 2003. Een stijgende zeespiegel zal in de toekomst ook zorgen voor indringing van zout water en meer zoute kwel. De exacte invloed is nog niet bekend.

In multi-lineaire regressie analyse die is uitgevoerd om te onderzoeken of er verbanden bestaan tussen luchttemperatuur, neerslag en windsnelheid en een aantal waterkwaliteitsparameters valt op dat er een gering verschil in correlatiecoëfficiënten is tussen de verschillende KRW watertypen voor een aantal waterkwaliteitsparameters. Zo lijkt de watertemperatuur, zuurgraad en totaal fosfaat in alle KRW watertypen ongeveer hetzelfde te reageren op de luchttemperatuur. Voor totaal stikstof zijn er

wel verschillen te ontdekken tussen de verschillende watertypen: Ondiepe laagveenplassen (M25) reageren het minst sterk, terwijl Grote diepe kanalen (M7) het sterkste reageren. Hierbij moet worden opgetekend dat voor alle KRW watertypen slechts een beperkt aantal meetpunten zijn gebruikt.

Voor de biologische waterkwaliteitsparameters is in deze studie alleen een literatuuronderzoek uitgevoerd. Beschikbare metingen van Wetterskip Fryslân zouden in de toekomst geanalyseerd kunnen worden op de effecten van een temperatuurstijging.

Over het algemeen kan gesteld worden dat algengroei wordt gestimuleerd door hogere temperaturen. Daarnaast resulteert de hogere temperatuur in de dominantie van blauwalgen. Klimaatverandering met hogere temperaturen kan dus leiden tot het vaker voorkomen van door blauwalgen gedomineerde watersystemen.

Botulisme bacteriën vermenigvuldigen zich snel bij gunstige omstandigheden als vuil, warm en ondiep stilstaand water. Hogere zomertemperaturen zijn een belangrijke *driver* voor het voorkomen van botulisme en de gegevens tonen aan dat botulisme vaker wordt geconstateerd bij hogere zomertemperaturen. Echter het wegnemen van andere gunstige omstandigheden voor de snelle vermenigvuldiging van de bacterie kan leiden tot het minder voorkomen van botulisme, ook bij hogere temperaturen. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld het saneren (baggeren) van (vervulde) watergangen.

De toekomstige temperatuurstijging leiden tot een areaalverschuiving van soorten naar het noorden. Deze verschuiving is nu al zichtbaar. Voor meer informatie wordt verwezen naar de Natuurkalender (www.natuurkalender.nl) en de nieuwe uitgaven van de Flora van Nederland. De laatste jaren vallen in Friesland vooral twee exoten op: de Chinese Wolhandkrab en de Grote Waternavel. De Chinese Wolhandkrab is voornamelijk in het westen en midden van Friesland aangetroffen, maar aangenomen wordt dat het verspreidingsgebied veel groter is. Vooral beroeps- en sportvissers ondervinden hinder van de krab. De verspreiding van de Grote Waternavel in het beheergebied van Wetterskip Fryslân is gering, grote problemen zijn tot nu toe uitgebleven. Andere exoten zoals de Zonnebaars vormen ook in Friesland (lokaal) een probleem.

De effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op de vier Friese waddeneilanden die behoren tot het beheergebied van Wetterskip Fryslân zijn niet specifiek per eiland onderzocht. In deze studie zijn geen waterkwaliteitsmeetpunten op de Waddeneilanden meegenomen. Over het algemeen is het te verwachten dat voor de Waddeneilanden de zeespiegelstijging een effect heeft op de verzilting; meer zoute kwel, terwijl er geen mogelijkheden bestaan om water van goede kwaliteit van elders aan te voeren om door te spoelen. Aan de andere kant zou extra neerslag door klimaatverandering de extra zoute kwel kunnen wegspoelen. Wetterskip Fryslân heeft een uitgebreid onderzoek uitgevoerd op Terschelling naar de GGOR. In deze studie is ook klimaatverandering (WB21 centrale klimaatscenario) en zeespiegelstijging meegenomen. Het grond- en oppervlaktewatersysteem op Terschelling zal in de toekomst significant worden beïnvloed door de mondiale klimaatsverandering en de ontwikkeling van het wad. De verwachte toename van de neerslaghoeveelheden heeft gevolgen voor de te verwerken hoeveelheden overtollig neerslag. De zeespiegelstijging en de stijging van de wadbodem zal de spuiomogelijkheden beperken. De verwachting is dat vergelijkbare resultaten voor de andere Waddeneilanden gevonden zullen worden.

De effecten van de warme en droge zomer van 2003 zoals hierboven beschreven komen in de toekomst veel vaker voor. De zomer van 2003, nu nog een extreem, zal volgens verschillende KNMI'06

scenario's in 2050 een standaard zomer worden. In 2100 is het de verwachting dat de zomers nog warmer zullen zijn. Ook minder koude winters, met invloed op de aquatische ecologie, zullen in de toekomst vaker voorkomen.

Voor wat betreft een van de doelstellingen van deze studie: het formuleren van consequenties voor beleid en onderzoeksvragen, geeft hoofdstuk 6 puntsgewijs de belangrijkste aanbevelingen.

8 Literatuur

- Abler, D., Shortle, J., Carmichael, C., en Horan, R. 2002. Climate Change, Agriculture, and Water Quality in the Chesapeake Bay Region. *Climatic Change* 55(3): 339-359.
- Arcadis. 2006. Ecologische doelstellingen voor de Kaderrichtlijnwater: Rijn-Noord en Nedereems (concept). Versie 18 juni 2006, 179p.
- Arnell, Nigel W. 1998. Climate Change and Water Resources in Britain. *Climatic Change* 39(1): 83-110.
- Beemster, N. 1997. Dynamisch waterpeil in de Oostvaardersplassen, effecten op broedvogels in relatie tot vegetatieontwikkeling. Flevovericht 400. Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Lelystad.
- Coops, H. 1992. Historische veranderingen in buitendijkse moerassen in Noordelijk Deltabekken en het IJsselmeergebied. RIZA nota 92.030.
- Beersma, Jules J., Buishand, T.A. en H. Buitenveld, 2004. Droog, droger, droogst. KNMI publicatie 199-II, De Bilt, Nederland.
- Bense, V.F. en Kooi, H. 2004. Temporal and spatial variations of shallow subsurface temperature as a record of lateral variations in groundwater flow. *J. Geophys. Res.*, 109, B04103.
- Beukema J.J. en Honkoop P.J.C. 1995. Winter temperatures and reproductive succes in bivalves living on tidal flats of the Wadden Sea, NRP rapprt, nr. 410100074.
- Bloemendaal F.H.J.L. en Roelofs J.G.M., 1988. Waterplanten en waterkwaliteit. Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, Vakgroep Aquatische Oecologie en Biogeologie Katholieke Universiteit Nijmegen, Utrecht.
- Boland D., Bleumink J.A., Vellinga Th., Kroes, J.G. 2000. Omgaan met Vernatting. Eind rapportage project Omgaan met Vernatting, CLM, CLM 451-2000.
- Boogaard, F., Sollie, P., Koops, K. en Grondsma, R. 2006. Vuiluitworp rioolstelsel heeft weinig effect op zuurstofhuishouding opprelvaktewater. *H₂O* nr. 14/15, 39^{ste} jaargang, 14 juli 2006, p.42-44
- Boulton, A.J. en Brock, M.A. 1999. *Australian Freshwater Ecology – Processes and Management*. Gleneagles Publishing.
- Breukel, R.M.A. 1993. De Rijn en Rijntakken: Verleden, heden en toekomst. RIZA nota 93.004, Lelystad.
- Bruijn, F.A de, en Mazijk, A. van. 2003. Klimaatinvloeden op de kwaliteit van het Rijnwater. RIWA rapport, oktober 2003, 44p
- Caruso, B.S. 2002. Temporal and spatial patterns of extreme low flows and effects on stream ecosystems in Otago, New Zealand, *Journal of Hydrology* 257(1-4): 115-133.
- Carvalho L. en Kirika A. 2003. Changes in shallow lake functioning: response to climate change and nutrient reduction. *Hydrobiologia* 506(1): 789-796(8)
- Chang, Heejun. 2004. Water Quality Impacts of Climate and Land Use Changes in Southeastern Pennsylvania. *The Professional Geographer* 56(2): 240-257.

- Claassen, T. 2006. Projectplan klimaatverandering en waterkwaliteit: inventarisatie van de mogelijke effecten voor het waterkwaliteitsbeheer in Fryslân en de beleidsvragen die deze oproepen. Wetterskip Fryslân. 8p.
- Coops, H. (red.), 2002. Ecologische effecten van peilbeheer - een kennisoverzicht. RIZA rapport 2002.040, Rapport RIKZ/2002.041, DWW rapport nr. DWW-2002-053, ISBN 9036954681
- De Wit, M.J.M. 2001. Effect of climate change on the hydrology of the river Meuse, report 104, Subdepartment Water Resources, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Dionisio Pires L.M., Brehm M., Ibelings, B.W. en Van Donk E. 2005. Comparing grazing on lake seston by Dreissena and Daphnia: lessons for biomanipulation. Microb. Ecol. In press.
- Droogers, P., Loeve, R., en Hurk, B. van den. 2004. De (on)zekerheid van klimaatverandering. H₂O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer 19: 85-88.
- Droogers, P. en Hurk, B. van den. 2006. Waterbeheer en de nieuwe KNMI klimaatscenario's. H₂O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer 12: 25-28.
- EEA. 2004. Impacts of Europe's changing climate: An indicator-based assessment, Report. No 2/2004.
- Eisenreich S.J. (Eds), 2005. Climate Change and the European Water dimension. A report to the European Water directors. EU Report No. 21553.
- Fang, X. en Stefan, H.G. 1999. Projections of climate change effects on water temperature characteristics of small lakes in the contiguous U.S. Climate Change, 42: 377-412.
- Goosssef, M.N., Strzepek, K. en Chapra, S.C. 2005. Modeling the potential effects of climate change on the water temperature downstream of a shallow reservoir, Lower Madison River, MT. Climate Change, 68: 331-353.
- Heerwaarden, C.C. van, Droogers, P. en Loeve, R. 2005. Kwel en wegzijging langs de grote rivieren. Een nieuwe modelmatige aanpak. BSIK project Klimaat voor Ruimte. FutureWater rapport, Wageningen, 55p.
- Hoek, Tj.H. van den, en Verdonschot, P.F.M. 2001. Invloed van veranderingen in temperatuur op gemeenschappen van beek-macrofauna. Alterra-rapport 228. Alterra, Wageningen.
- Huiver, J. en Smit, L. 2005. Beheersbare exoten? Een beschrijving van verspreiding, problemen en beheer van de Chinese Wolhandkrab en de Grote Watervan. Wetterskip Fryslân rapport, 88p+bijlagen.
- ICIS, 2003. Scenario's voor de droogtestudie Nederland. International Centre for Integrative Studies.
- Ierland E.C. van, Groot R.S. de, Kuikman P.J., Martens P., Amelung B., Daan N., Huynen M., Kramer K., Szonyi J., Veraart J.A., Verhagen A., Vliet A.J.H. van, Walsum P.E.V. van, Westein E. 2001. Integrated assessment of vulnerability to climate change and adaptation options in the Netherlands. NRP report no 410 200 088, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change.
- Illies, J. 1978. Limnifauna europaea. Eine Zusammenstellung aller die europäischen Binnengewässer bewohnenden merzhelligen Tierarten mit Angaben über ihre Verbreitung und Ökologie. Gustav Fischer, Stuttgart.

- Interlandi S.J. en Crockett C.S. 2003. Recent water quality trends in the Schuylkill River, Pennsylvania, USA: a preliminary assessment of the relative influences of climate, river discharge and suburban development. *Water Research* 37(8): 1737-1748.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Jacobs, P. 2005. Zout vanuit zee: verzilting van de rijkswateren in Midden-West Nederland nu en in de toekomst. Publicatie van de Nederlandse Hydrologische Vereniging, naar aanleiding van een symposium over verzilting op 30 november 2004.
- Jacobs, P., Blom, G. en Linden, M. van der. 2000. Climatological changes in storm surges and river discharges: the impact on flood protection and salt intrusion in the Rhine-Meuse delta. Presentation at ECLAT-2 Blue Workshop (EW-3) Climate scenarios for waterrelated and coastal impact. May 10-12, 2000, The Netherlands.
- Jans, L. en Drost, H.J. 1995. De Oostvaardersplassen. 25 jaar vegetatie-onderzoek. *Flevobericht* 382.
- Jayaweera, M. en Asaeda, T. 1995. Impacts of environmental scenarios on chlorophyll-a in the management of shallow, eutrophic lakes following biomanipulation: An application of a numerical model. *Ecological Engineering* 5 (4): 445-468.
- Jenkins, A., McCartney, M., en Sefton, C.. 1993, Impacts of Climate Change on River WaterQuality in the United Kingdom, Institute of Hydrology, Wallingford, Report to Department of the Environment, p.39.
- Jeppesen E., Sondergaard M. and Jensen J.P. 2003. Climatic warming and regime shifts in lake food webs – some comments. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1346–1349.
- Kabat P. en Schaik H. van. 2003. Climate changes the water rules. How water managers can cope with today's climate variability and tomorrows climate change. Int. Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen, The Netherlands.
- Kersting, K. 1983. Bimodal diel dissolved oxygen curves and thermal stratification in polder ditches, *Hydrobiologia*, 107(2): 165 – 168.
- Klein Tank A., Wijngaard J. en Engelen A. van. 2002. Climate of Europe. Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. European Climate Assessment (ECA).
- KNMI, 2003. De toekomst van het klimaat in Nederland 2003.
- KNMI. 2006a. Klimaat in de 21e eeuw: vier scenario's voor Nederland. KNMI, De Bilt, 18p.
- KNMI, 2006b. Climate Change Scenarios 2006 for The Netherlands. Scientific report, WR 2006-01, 82p.
- Koinig, K.A., Schmidt, R., Sommaragu-Wograth, S. Tessadri, R. en Psenner, R. 1998. Climate change as the primary cause of pH shifts in a high alpine lake. *Water Air and Soil Pollution*, 104: 167-180.
- Kok, M.T.J., Heij, G.J., Verhagen, A., Rovers, C.A. 2001. Klimaatverandering, een aanhoudende zorg. Eindrapportage tweede fase Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP-II), 1995-2001. NOP, Bilthoven, 174p.

- Kolb, E. en Rehfuss, K.E., 1997. Auswirkungen einer Temperaturerhöhung in einem Freilandexperiment auf den Stickstoffaustrag aus Bodensäulen mit verschiedenartiger Humusform. (Effects of a temperature increase in a field experiment on the nitrogen release from soil cores with different humus forms). Zeitschrift pflanzenernahrung bodenkunde 160: 539-547
- Kors, A.G., Claessen, F.A.M., Wesseling, J.W. en Können, G.P. 2000. Scenario's externe krachten t.b.v. WB21. RIZA, Lelystad.
- Kranenbarg, J., H. Coops & M. Platteeuw, 2002. Ecologische effecten van seizoensgebonden peilbeheer in het IJsselmeergebied. Kennis, lacunes en prioritering van uit te voeren onderzoek. RIZA werkdokument 2002.055x.
- Kruik, H.J de. 1983. Overzicht van hydrologisch koelwateronderzoek in Nederland. Stand van zaken 30 juni 1983. Commissie Koelwater Normen, Den Haag.
- Lahmer W., Pftzner B. en Becker A. 2001. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. Phys Chem Earth Part B—Hydrol Oceans Atmos. 26 :565–575.
- Langford, T.E. 1971. The distribution, abundance and life-histories of Stoneflies (Plecoptera) and Mayflies (Ephemeroptera) in a British River, warmed by cooling-water from a power station. Hydrobiologica 38:339-377.
- Livingstone, D.M. 2003. Impact of secular climatic change on the thermal structure of a large temperate central European lake. Climate Change, 57: 205-225.
- Lukewille, A. en Wright, R.F., 1997. Experimentally increased soil temperature causes release of nitrogen at a boreal forest catchment in southern Norway. Global Change Biology 3: 13-21.
- Magnuson, J.J., Webster, K.E., Assel, R.A., Bowser, C.J., Dillon, P.J., Eaton, J.G., Evans, H.E., Fee, E.J. Hall, R.I., Mortsch, L.R., Schindler, D.W., Quinn, F.H. 1997. Potential effects of climate change on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region. Hydrological Processes 11:825-871
- Mann, K.H. 1965. Heated effluents and their effects on the invertebrate fauna of rivers. Proceedings of the Society of Water Treatment Examination 14: 45-55.
- McKee, D., Hatton, K., Eaton, J.W., Atkinson, D., Atherton, A., Harvey, I. en Moss, B., 2002. Effects of simulated climate warming on macrophytes in freshwater microcosm communities. Aquatic Botany, 74 (1): 71-83.
- Meisner, J.D., Rosenfeld, J.S. en Regier, H.A. 1988. The role of groundwater in the impact of climate warming on stream salmonines. Fisheries, 13: 2-8.
- Middelkoop, H. 2000. The impact of climate change on the river Rhine and the implications for water management in The Netherlands, report, 2000.010, RIZA, Lelystad, The Netherlands.
- Milieu en Natuurplanbureau, 2005a. Hoeveel warmer mag het worden? 35p.
- Milieu en Natuurplanbureau, 2005b. Effecten van klimaatverandering in Nederland. 111p.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Water. 2004. Evaluatienota Waterbeheer Aanhoudende droogte 2003, 26p.

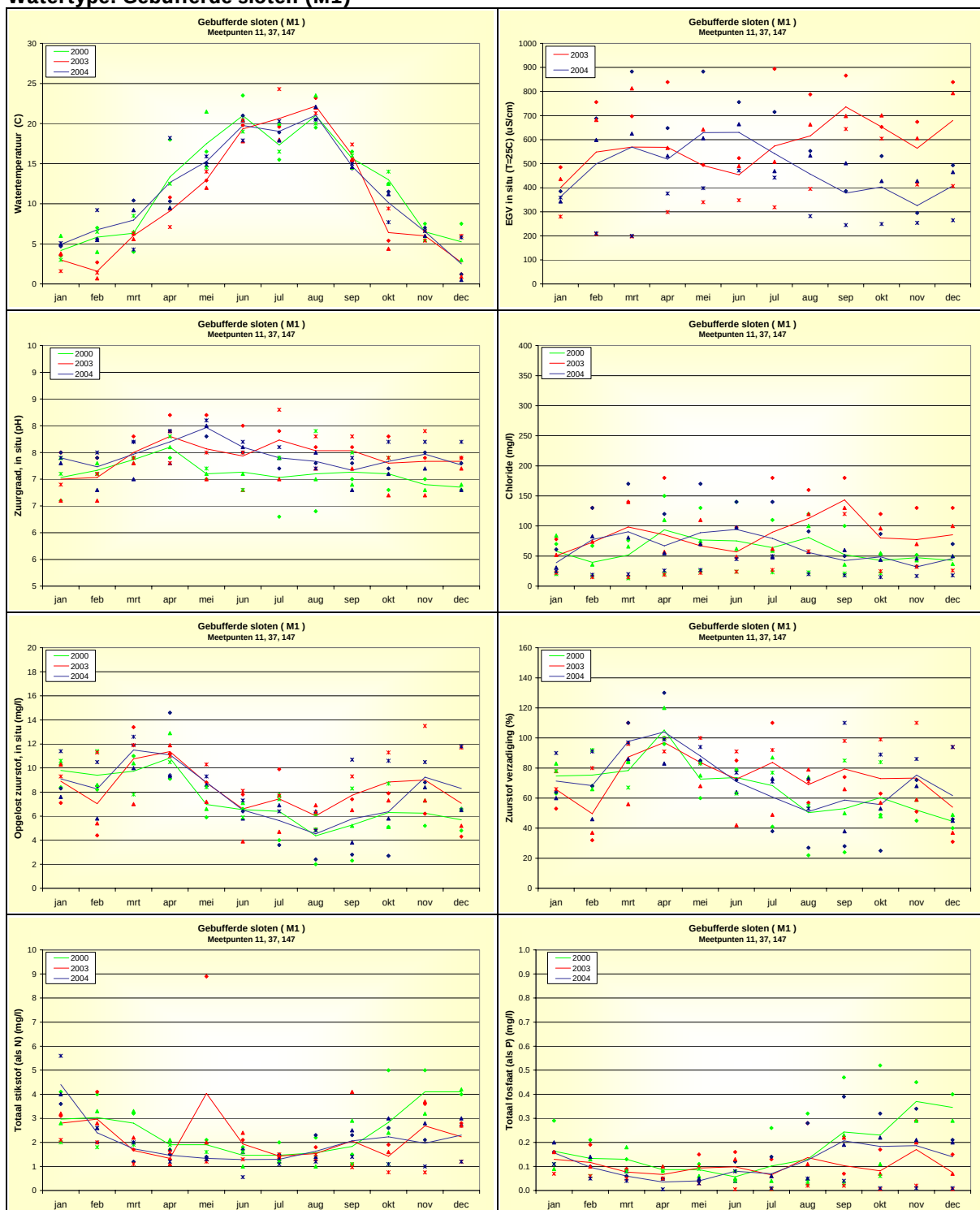
- Mooij, W.M., Hülsmann, S., De Senerpont Domis, L.N., Nolet, B.A., Bodelier, P.L.E., Boers, C.M., Pires, L.M.D., Gons, H.J., Ibelings, B.W., Noordhuis, R., Portielje, R., Wolfstein, K. en Lammens, E.H.R.R. 2005. The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquatic Ecology* 39: 381–400.
- Moss, B., McKee, D., Atkinson, D., Collings, S.E., Eaton, J.W., Gill, A.B. Harvey, I. Hatton, K., Heyes, T., Wilson, D. 2003. How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. *Journal of Applied Ecology* 40(5): 782-792.
- Opdam, P. en Pouwels, R. 2006. De Ecologische Hoofdstructuur en klimaatverandering: waar kunnen we het beste investeren in meer ecologische veerkracht?; Alterra-rapport 1311, Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, 46p
- O'Reilly, C.M., Alin, S.R., Plisnier, P.D., Cohen, A.S., en McKee, B.A. 2003. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature* 424: 766-768.
- Oreskes, N. 2004. The Scientific Consensus on Climate Change. *Science*, Vol 306, Issue 5702, Page 1686.
- Parry, M.L. 2000. Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project. Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pp.
- Patrick, R. 1974. Effects of abnormal temperatures on algal communities. P.335-349. In: Gibbons, J.W., Sharitz, R.R. (Eds.) 1976. *Thermal Ecology*. Technical Information Centre, Energy Research and Development Administration, Springfield, Virginia.
- Plette, A.C.C., Verstappen, G.G.C. en Boers, P.G.M. 2002. Mest en oppervlaktewater: Een terugblik 1985-2000: Rapportage van de cluster diagnose oppervlaktewaterkwaliteit, ten behoeve van de evaluatie meststoffenwet 2002. Riza rapport 2002.019, 88p.
- ProCensus. 2006. Ontwerp Notitie Stedelijk Water: Een leidraad voor water in dorp en stad. In opdracht van Waterschap Noorderzijlvest, 1 juni 2006, 26p
- Provincie Fryslân, 2000. Tweede waterhuishoudingsplan Fryslân 2000-2008, Provinciale verordening waterhuishouding, Dreaun troch it wetter.
- Provincie Fryslân. 2003. Deelstroomgebiedsvisie Fryslân 2050. Provincie Fryslân, Sector Ruimte, Infrastructuur en Water, Team Water, 17 juni 2003, 24p+bijlagen.
- Provincie Fryslân. 2004. Toestand Leefmilieu Fryslân 2004.
- Riza. 2004. Aard, ernst en omvang van de droogte in Nederland. Resultaten fase 2a: Informatiespoor Droogtestudie Nederland. Riza rapport 2004.31, 75p.
- Riza. 2005. Aard, ernst en omvang van watertekorten in Nederland. Eindrapport in het kader van de Droogtestudie Nederland. Riza rapport 2005.016, 104p.
- Rooijers F.J., Verbeek, J., Hutjes, R.W.A., Keizer I. de, Slingerland, S., Faber, J., Wit, R.C.N., Dorland R. van, Ulden, A. van, Kabat P. en Ierland E.C. van. 2004. Klimaatverandering Klimaatbeleid. Achtergrondrapport Inzicht in keuzes voor de Tweede Kamer. CE-Rapport i.s.m. KNMI en Wageningen UR.
- Royal Haskoning. 2006. GGOR Terschelling. In opdracht van Wetterskip Fryslân, 16 mei 2006, Projectnummer 9P9459, 30p+bijlagen

- Runhaar, L. 2006a. Natuur in de verdringingsreeks; Alterra rapport 1302. 104p.
- Runhaar, J. 2006b. Natuur in de verdringingsreeks. H₂O 39^{ste} jaargang, nr. 14/15, 14 juli 2006, p37-39.
- Santamaría, L. en Vierssen W. van. 1997. Photosynthetic Temperature Responses of Fresh- and Brackish-Water Macrophytes: A Review. *Aquatic Botany* 58: 135-150.
- Schär, C. en Jendritzky, G. 2004. Hot news from summer 2003. *Nature* 432: 559 – 560.
- Scheffer M., Straile D., Van Nes E.H. en Hosper H. 2001. Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnol. Oceanogr.* 46: 1780–1783.
- Scheffer M., Straile D., Nes E.H. van, en Hosper, H. 2003 Climatic effects on regime shifts in lakes: A reply. *Limnol. Oceanogr.*, 48(3): 1353–1356.
- Scheffer M., Hosper S.H., Meijer M.L., Moss B. en Jeppesen, E. 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends Ecol. Evol.* 8: 275–279.
- Schelske C.L., Carrick H.J. en Aldridge F.J. 1995. Can windinduced resuspension of meroplankton affect phytoplankton dynamics?. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 14: 616–630.
- Schindler, D.W., Bayley, S.E., Parker, B.R. Beaty, K.G., Cruikshank, D.R., Fee, E.J., Schindler, E.U., Stainton, M.P. 1996. The effects of climate warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario. *Limnology and Oceanography*, 41: 1004-1017.
- Schippers, P., Vermaat, J.E., De Klein, J. en Mooij, W.M. 2004a. The effect of atmospheric CO₂ elevation on plant growth in freshwater ecosystems. *Ecosystems* 7: 63-74.
- Schippers, P., Lürling, M. en Scheffer, M. 2004b. Increase of atmospheric CO₂ promotes phytoplankton productivity. *Ecology Letters* 7: 446-451.
- Senhorst, H.A.J. en Zwolsman, J.J.G. 2005. Climate change and effects on water quality: a first impression. *Water Science & Technology*, 51(5):53–59.
- Shuter, B.J. en Meisner J.D. 1992. Tools for Assessing the Impact of Climate Change on Freshwater Fish Populations. *Geojournal*, 28(1): 7-20.
- Soppe, R.W.O., Roelsma, J., Bergersen, E. en Bolt, F.J.E. van der. 2005. Systeemverkenning Quarles van Ufford; Alterra rapport 970, 64p
- Van Dam, H. en R.C. van Apeldoorn. 1978. De droogte van 1976 en de natuur in Nederland. *H₂O* 11(13): 278-281.
- Van den Hurk, B., Klein Tank, A. en Bessembinder, J. 2006. Nieuw3e klimaatscenario's beter onderbouwd door het KNMI. *H₂O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer* 12:8-9.
- Van der Molen D.T., Breeuwsma A. en Boers P.C.M. 1998. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands. *J. Environ. Qual.* 27: 4–11.
- Van Donk E., Mooij W.M. en Santamaria L. 2003. Climate warming causes regime shifts in lake food webs: a reassessment. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1350–1353.
- Vannote, R.L. en Sweeney, B.W. 1980. Geographic ananlysis of thermal equilibira: a conceptual model for evaluating the effect of naturl and modified thermal regime on aquatic insects. *American Naturalist* 115: 667-695.

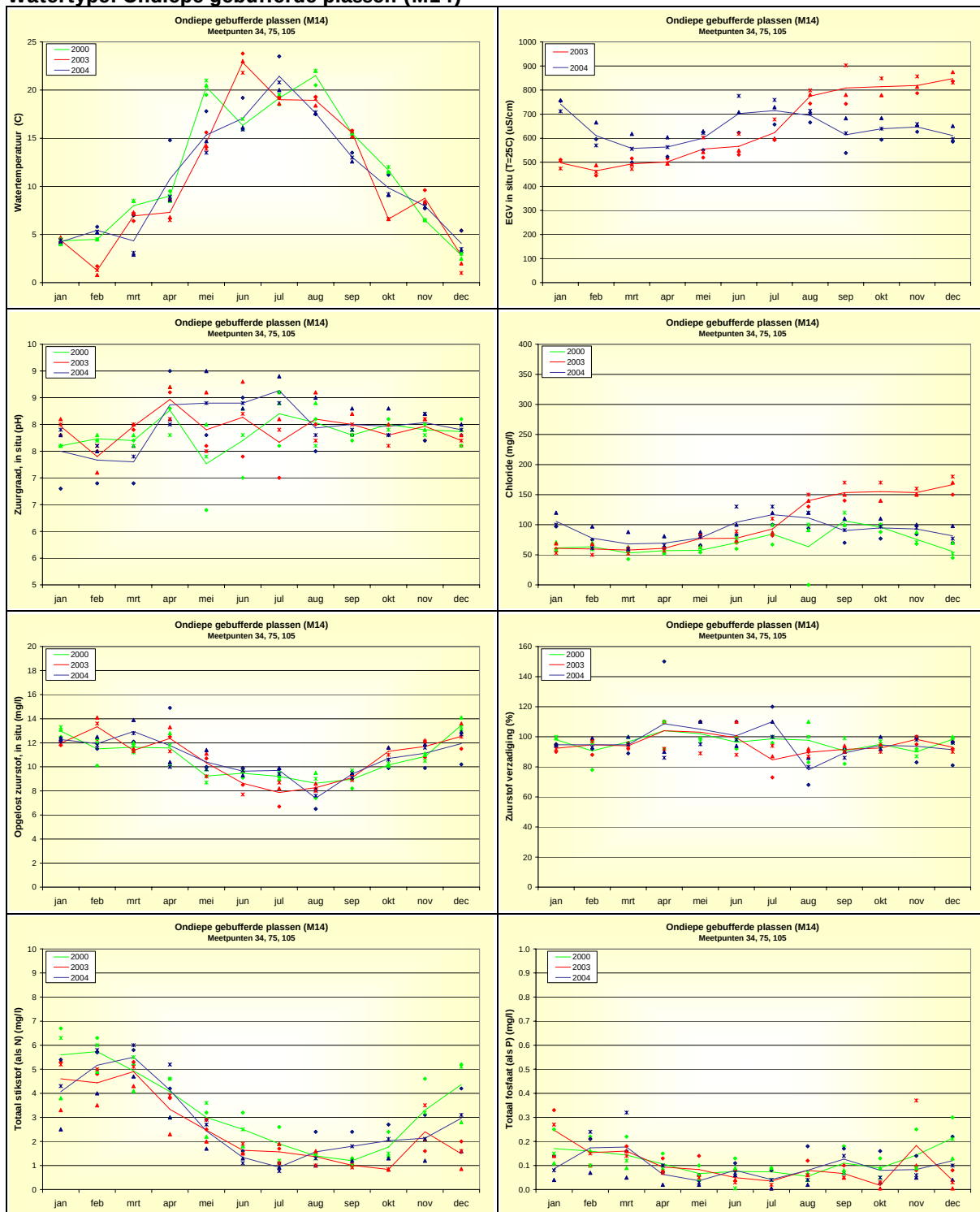
- Veer, B, van der, Koedood, J. en Visser, P.M. 1995. Artificial mixing: a therapy measure combating cyanobacteria in Lake Nieuwe Meer. *Wat. Sci. Tech.* 31 (8): 245-248.
- Verschuren, D. 2003. The heat on Lake Tanganyika. *Nature* (424): 731-732.
- Vierssen W. van, en Wijk, R.J., 1982. The ecology of communities dominated by *Zannichellia* taxa in western Europe. I. Characterization and autecology of the *Zannichellia* taxa. *Aquatic Botany*, 12: 103-105
- Vliet, A.J.H van. 2001. Klimaatverandering en Nederlandse ecosystemen: gevolgen, aanpassingsmogelijkheden en interacties. Discussiesheet gepubliceerd in het kader van het NOP Impact Project.
- Walsum, P.E.V. van, Verdonschot, P.F.M., Runhaar, J. 2002. Effects of climate and landuse change on lowland stream ecosystems. Alterra-report 523, Wageningen.
- Ward, J.V. 1985. Thermal characteristics of running water. *Hydrobiologia*, 125(1): 31-45.
- WB21. 2000. Waterbeleid voor de 21e eeuw. Advies van de Commissie Waterbeheer 21e eeuw.
- Webb, B.W., Clack, P.D. en Walling, D.E. 2003. Water-air temperature relationships in a Davon River system and the role of flow. *Hydrological Processes*, 17: 3069-3084.
- Wienk, L.D., Verhoeven, J.T.A., Coops, H. en Portielje, R. 2000. Peilbeheer en nutriënten - Literatuurstudie naar de effecten van peildynamiek op de nutriëntenhuishouding van watersystemen. RIZA-rapport 2000.012.
- Winder, M. en Schindler, D.E. 2004. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology*, 85 (8): 2100-2106.
- Witteveen en Bos, 2005. Eindrapport Onderzoek gewenst peilbeheer Friese boezem. In opdracht van Wetterskip Fryslân en Provincie Fryslân. December 2005. 110p.+bijlagen.
- Wolff W.J. 1995. Impact of climate change on the Wadden Sea. Uit: Zwerver S. van Rompaey, Kok M.T.J. en Berk M.M. (eds.) *Climate change research: evaluation and policy implications. Studies in Environmental Science 65B*. Elsevier, Amsterdam: 781-818.
- Wright, J.F. Winder, J.M., Gunn, R.J.M., Blackburn J.H., Symes K.L. en Clarke R.T. 2000. Minor local effects of a River Thames power station on the macroinvertebrate fauna. *Regulated Rivers: Research and Management* 16: 159-174.
- Zwolsman, G. en Doomen, A. 2005. Waterkwaliteit van de Rijn en de Maas bij (extreme) lage afvoeren. Kiwa rapport KWR05.061, p43.

Bijlage 1

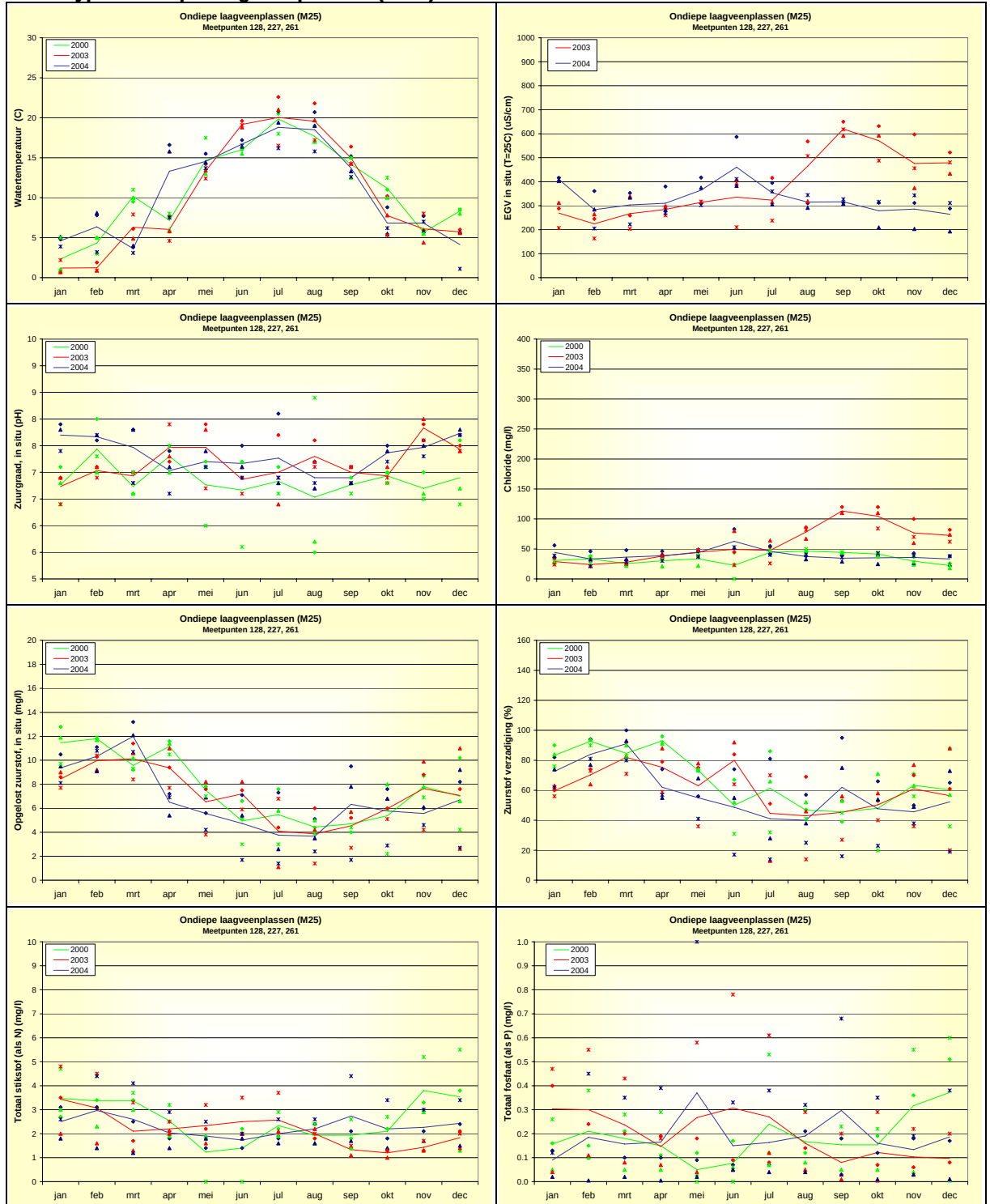
Watertype: Gebufferde sloten (M1)



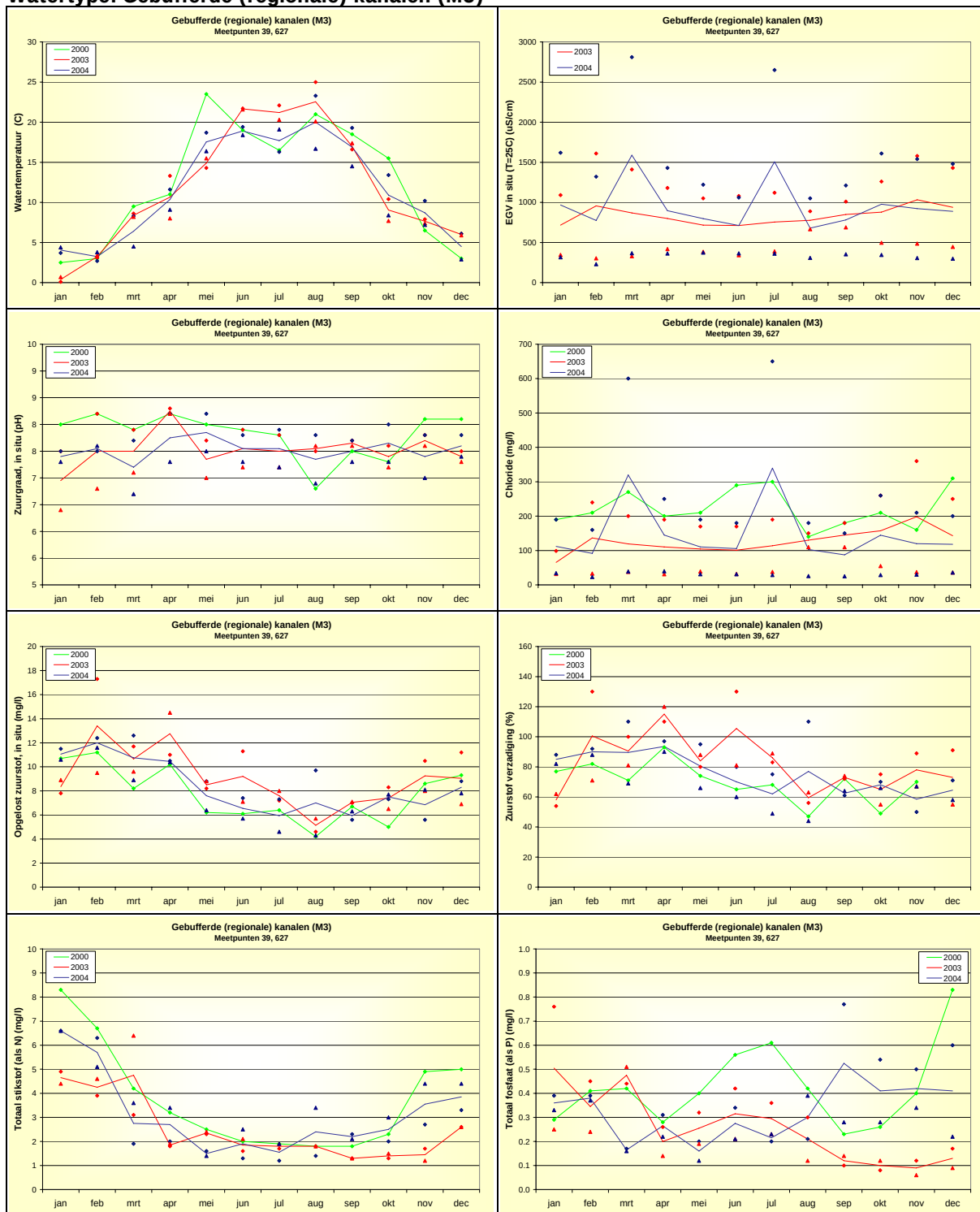
Figuur 29. Chemische waterkwaliteitsparameters in gebufferde sloten (M1) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Ondiepe gebufferde plassen (M14)

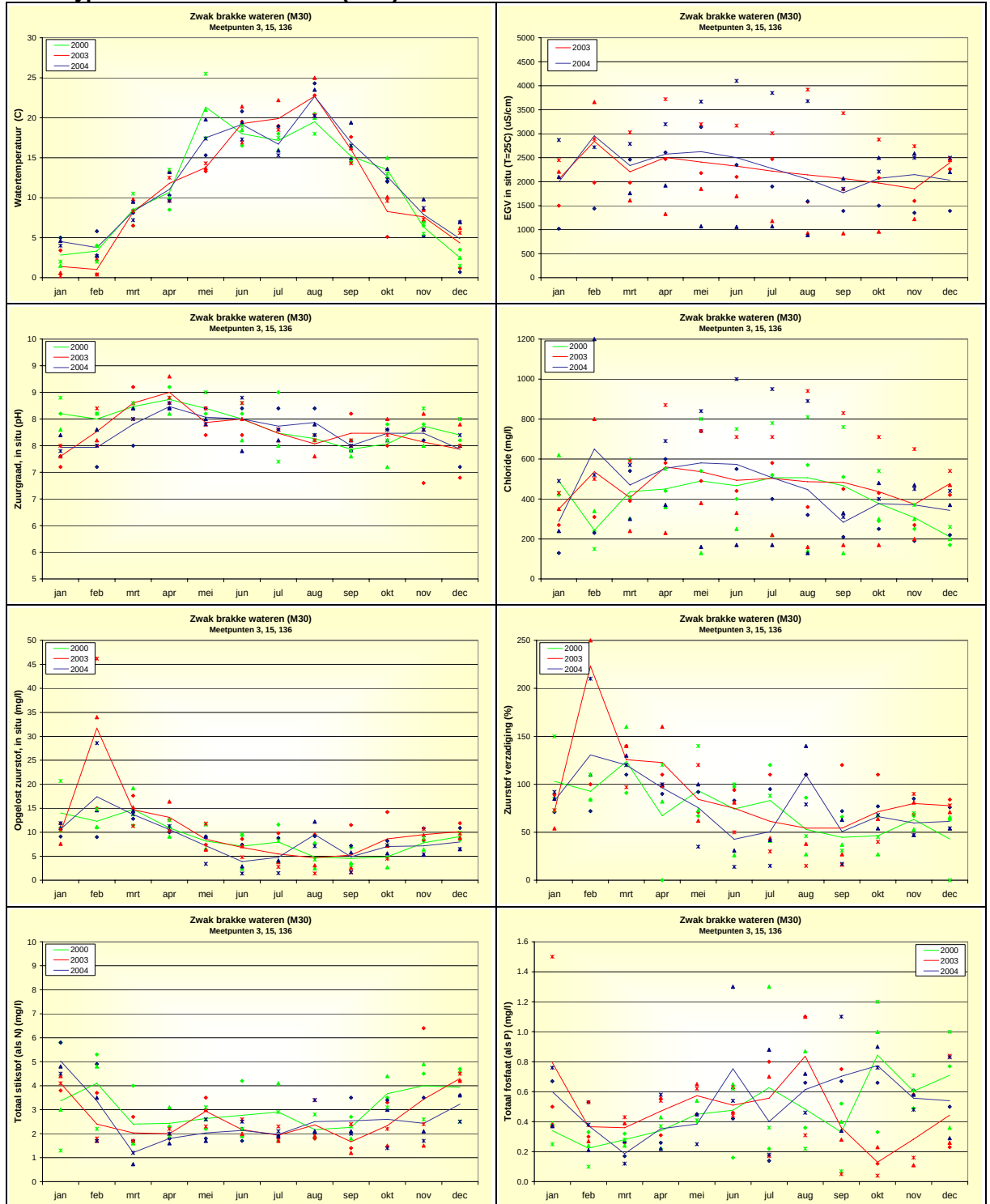
Figuur 30. Chemische waterkwaliteitsparameters in ondiepe gebufferde plassen (M14) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Ondiepe laagveenplassen (M25)

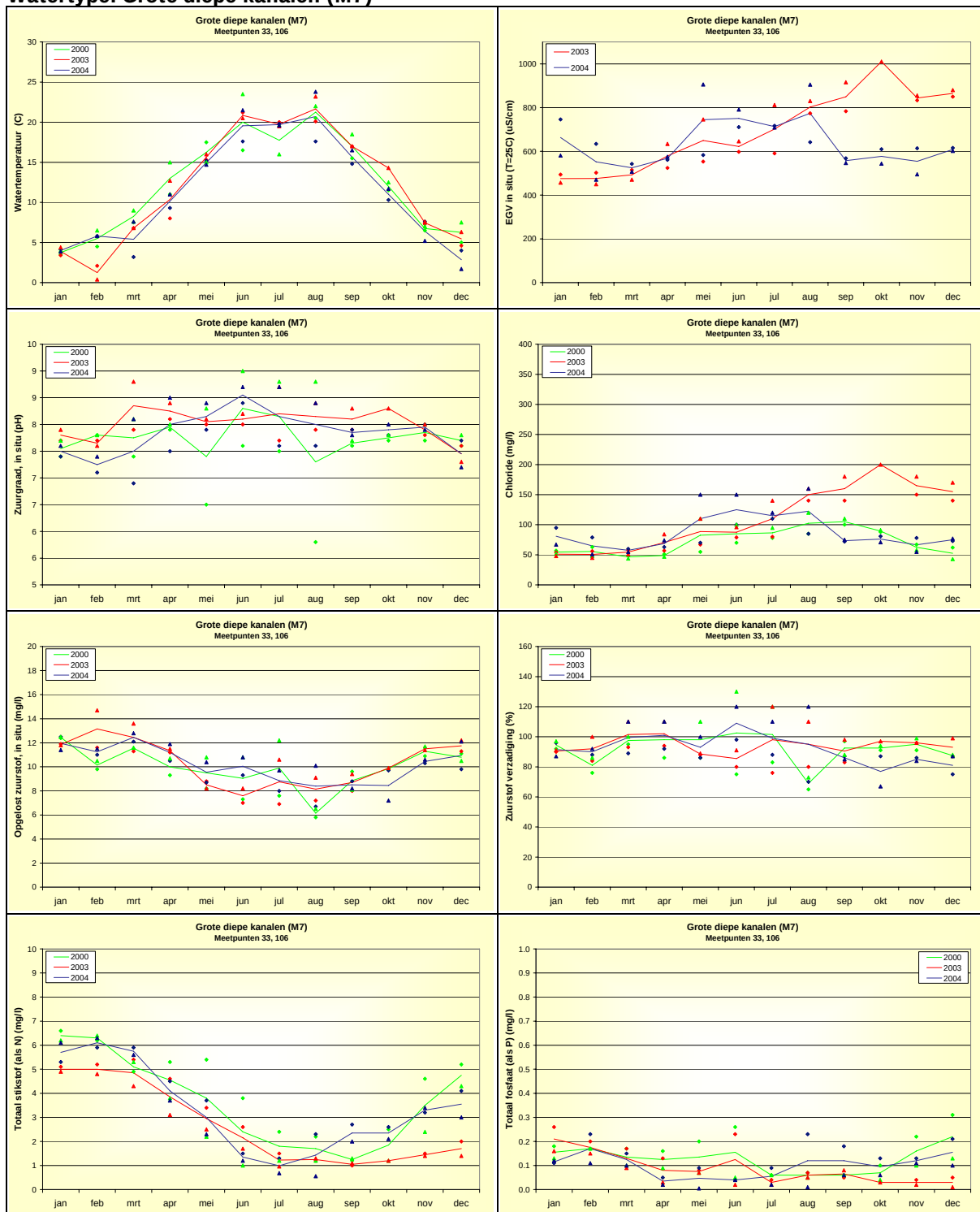
Figuur 31. Chemische waterkwaliteitsparameters in ondiepe laagveenplassen (M25) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Gebufferde (regionale) kanalen (M3)

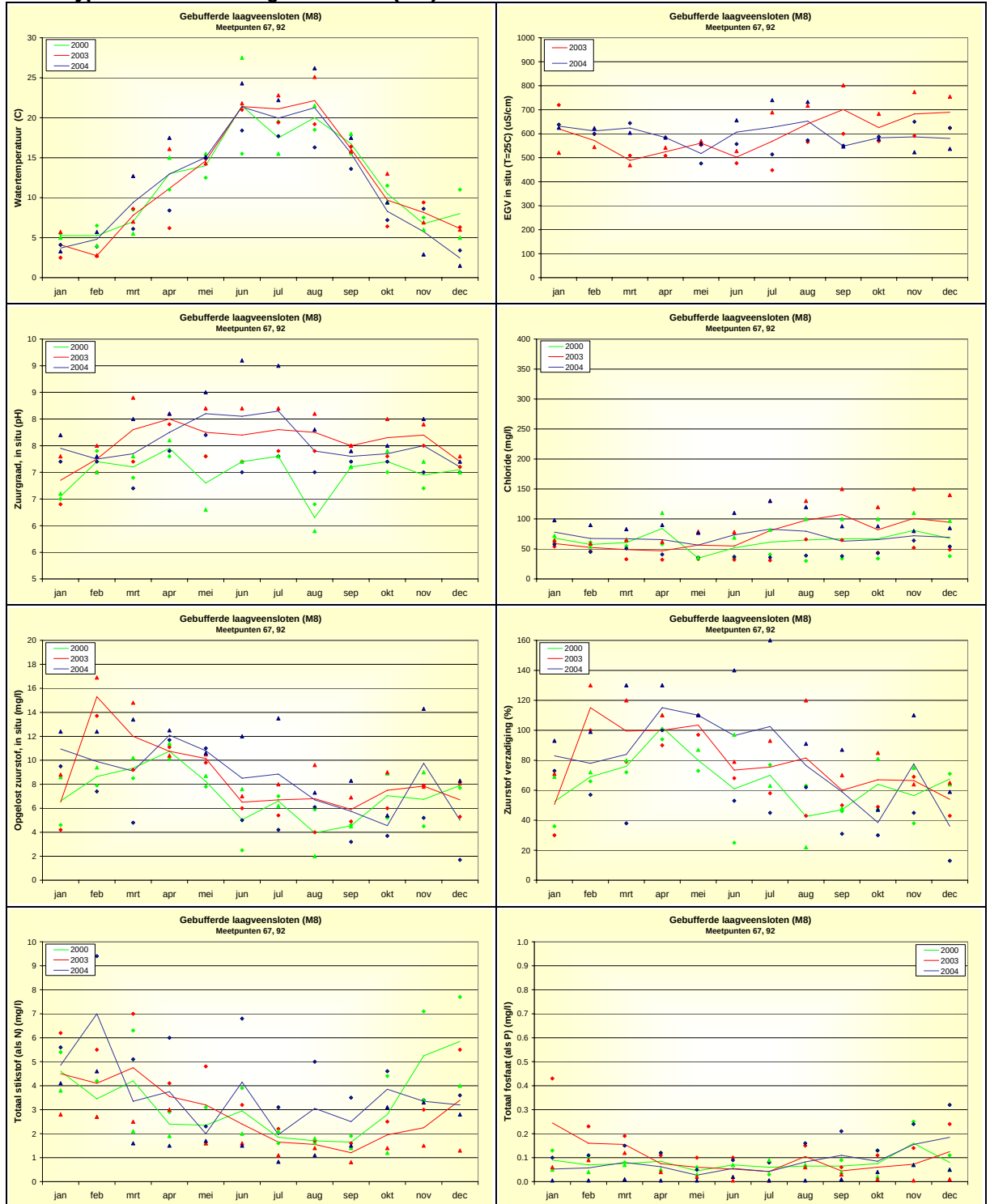
Figuur 32. Chemische waterkwaliteitsparameters in gebufferde (regionale) kanalen (M3) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Zwak brakke wateren (M30)

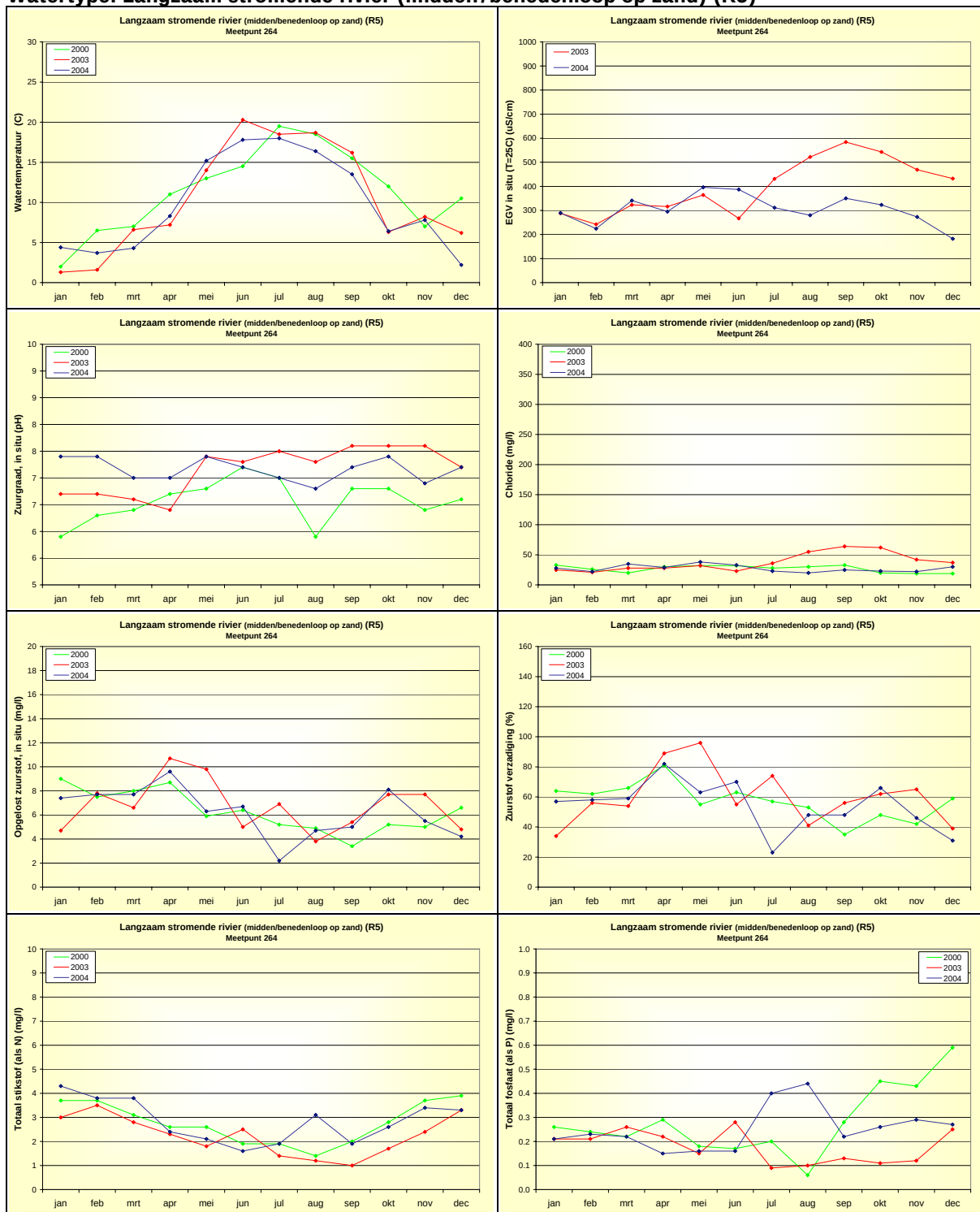
Figuur 33. Chemische waterkwaliteitsparameters in zwak brakke wateren (M30) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Grote diepe kanalen (M7)

Figuur 34. Chemische waterkwaliteitsparameters in grote diepe kanalen (M7) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Gebufferde laagveensloten (M8)

Figuur 35. Chemische waterkwaliteitsparameters in gebufferde laagveensloten (M8) in 2000, 2003 en 2004.

Watertype: Langzaam stromende rivier (midden/benedenloop op zand) (R5)

Figuur 36. Chemische waterkwaliteitsparameters in langzaam stromende rivier (R5) in 2000, 2003 en 2004.