



Ad van Bokhoven, Universiteit Utrecht, thans CSO Adviesbureau  
Gertjan Zwolsman, Kiwa Water Research

# Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Rijn

**Klimaatverandering zal leiden tot een versnelling van de hydrologische cyclus, op een wereldwijde, regionale en lokale schaal. Het vaker en langduriger optreden van hydrologische extremen, zoals droogte, heftige regenbuien en overstromingen, heeft niet alleen gevolgen voor de waterkwantiteit, maar ook voor de waterkwaliteit. In dit artikel wordt het effect van langdurige periodes van droogte op de waterkwaliteit van de Rijn besproken, aan de hand van metingen tijdens de droogte van 1976 en 2003. Aangetoond is dat de waterkwaliteit negatief wordt beïnvloed door (zomer)droogte. De toename van de watertemperatuur en van chloride tijdens droogte vormt een sluipende bedreiging voor de productie van drinkwater uit de Rijn. Om de effecten van droogte op de waterkwaliteit op te kunnen vangen, is reductie van de emissies die bij droogte tot problemen kunnen leiden (koelwater, chloride) noodzakelijk.**

In mei 2006 publiceerde het KNMI vier klimaatscenario's voor Nederland<sup>1)</sup>. Volgens deze scenario's worden de zomers gemiddeld warmer en zal de zomerneerslag, afhankelijk van het scenario, toenemen of afnemen. Het meest kritische scenario met betrekking tot waterkwaliteit en beschikbaarheid is W+, met een verwachte stijging van de gemiddelde zomertemperatuur van 3,8 graden en een gemiddelde daling van de neerslag van 19 procent in 2050 (ten opzichte van 1990). Wanneer dit scenario werkelijkheid wordt, zullen periodes van langdurige droogte en lage afvoeren zich vaker voordoen in Nederland. Met andere

woorden: het droge jaar 2003 kan in 2050 een gemiddeld jaar zijn. Dit heeft consequenties voor zowel waterkwantiteit als waterkwaliteit. Kennis over de effecten van langdurige droogte op de waterkwaliteit is op dit moment nog zeer beperkt. Dit betekent niet dat de effecten niet belangrijk zijn, maar dat deze effecten nog niet voldoende worden onderkend. Het is daarom belangrijk om de invloed van droogte op natuurlijke watersystemen te bestuderen. In het hier gerapporteerde onderzoek<sup>2)</sup> zijn de effecten van droogte op de waterkwaliteit van de Rijn onderzocht. Het doel van het

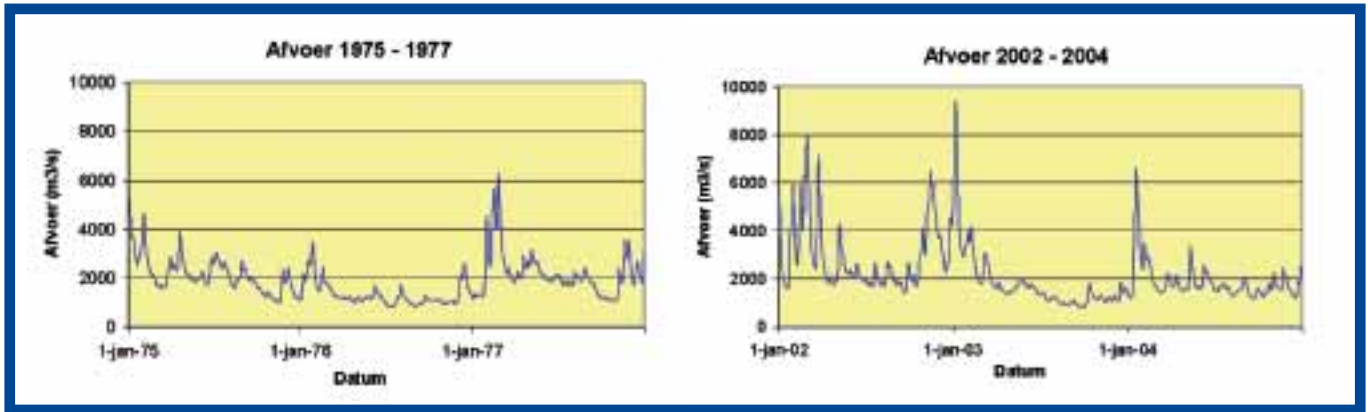
onderzoek was de invloed van historische droogte op de fysisch-chemische waterkwaliteit van de Rijn te bestuderen, de mogelijke consequenties van toekomstige droogte op de waterkwaliteit te voorspellen en de mogelijke consequenties voor de drinkwaterproductie te onderzoeken. Het onderzoek maakt deel uit van het onderzoeksprogramma 'Risicoanalyse van klimaatverandering voor de drinkwaterproductie', dat Kiwa Water Research uitvoert in opdracht van de Nederlandse drinkwaterbedrijven.

## Methoden

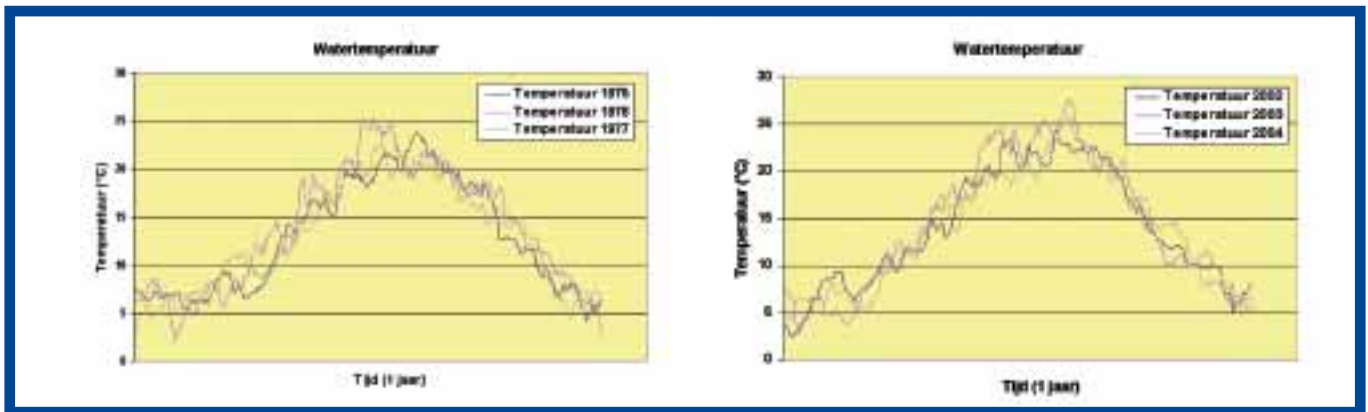
De rivierafvoer wordt op meetstation Lobith dagelijks gemeten sinds 1900. Het onderzoek is echter beperkt tot de periode 1970-2005, omdat betrouwbare waterkwaliteitsgegevens veelal pas beschikbaar zijn vanaf 1970 (voor sommige parameters, zoals chloride, zijn langere meetreeksen beschikbaar). Als criterium voor een droogtejaar is het aantal dagen gehanteerd dat de rivierafvoer in Lobith lager was dan de kritische drempel van 1.000 kubieke meter per seconde. Op basis van dit criterium zijn drie lange periodes van droogte onderscheiden in de genoemde periode: 1976, 1991 en 2003 (tabel 1). Hoewel we deze periodes aanduiden als zomerdroogte, dient opgemerkt te worden dat deze periodes doorliepen tot ver in de herfst (oktober-november). Om de invloed van droogte op de waterkwaliteit van de Rijn vast te kunnen stellen, is de waterkwaliteit bij Lobith tijdens een

**Tabel 1: Rivierafvoer in Lobith gedurende drie droge jaren (1976, 1991, 2003) en hun referentieperiodes. N = aantal dagen dat de afvoer beneden de aangegeven drempelwaarde lag.**

jaar	Q-min (m <sup>3</sup> /s)	Q-max (m <sup>3</sup> /s)	Q-gemiddeld (m <sup>3</sup> /s)	N < 1000 m <sup>3</sup> /s	N < 900 m <sup>3</sup> /s	N < 800 m <sup>3</sup> /s
1975	972	5.341	2.169	3	0	0
1976	782	3.459	1.333	76	28	3
1977	1.056	6.279	2.208	0	0	0
1990	900	7.093	1.851	16	0	0
1991	794	6.712	1.752	46	24	3
1992	869	4.887	2.017	28	5	0
2002	1.385	7.958	2.962	0	0	0
2003	784	9.372	1.821	48	16	5
2004	1.163	6.631	1.887	0	0	0



Afb. 1: Rivierafvoer in Lobith in de jaren 1975-1997 en 2002-2004.



Afb. 2: Wassertemperatuur in Lobith gedurende twee jaren van droogte (1976 en 2003) en hun referentiejaren.

droogtejaar vergeleken met die van de omliggende jaren. Door de korte tijdsperiode tussen de referentiejaren en het jaar van droogte, mag worden aangenomen dat andere veranderingen in het stroomgebied die de waterkwaliteit kunnen beïnvloeden (zoals veranderingen in landgebruik en emissiereductie) te verwaarlozen zijn. De droogte van 1991 is minder bruikbaar voor dit onderzoek, omdat de referentieperiodes (1990 en 1992) ook relatief droog waren en dus niet voldoende onderscheidend zijn (tabel 1). Daarom heeft dit onderzoek zich gericht op de droogte van 1976 en 2003. Betrouwbare waterkwaliteitsdata zijn verkregen via de website ([www.waterbase.nl](http://www.waterbase.nl)) en via RIWA-Rijn. De analyse was gericht op algemene waterkwaliteitsvariabelen, macro-ionen, nutriënten en zware metalen.

### Resultaten en discussie

Afbeelding 1 toont de rivierafvoer in Lobith gedurende de droogtejaren 1976 en 2003

en hun referentiejaren. Opgemerkt dient te worden dat het jaar 1976 droger was dan het jaar 2003, zoals blijkt uit het aantal dagen dat de afvoer minder was dan 1.000 kubieke meter per seconde (zie tabel 1). Bovendien werd de droogte van 2003 voorafgegaan door een sterk hoogwater, wat in het jaar 1976 niet het geval was (zie afbeelding 1).

De temperatuur van de Rijn vertoont een sterk seizoensgebonden patroon (afbeelding 2), overeenkomstig het verloop van de luchttemperatuur. Een vergelijking tussen de wassertemperatuur gedurende de zomer voor de jaren van droogte en hun referentiejaren wordt gemaakt in tabel 2. De wassertemperaturen gedurende de zomers van 1976 en 2003, waarin een lange hittegolf plaatsvond, zijn duidelijk hoger dan in de referentiejaren (gemiddeld 1,4-1,8°C in 1976 en 1,4-1,6°C in 2003). Daarnaast dient te worden opgemerkt dat de wassertemperatuur van de Rijn de laatste 30 jaar aanzienlijk is gestegen.

Uit een vergelijking tussen de perioden 1975-1977 en 2002-2004 kan worden geconcludeerd dat de gemiddelde wassertemperatuur in Lobith gedurende de zomer is gestegen met 1,7°C. Dit weerspiegelt mogelijk een toename van de koelwaterlozingen op de Rijn. De toename in wassertemperatuur is van groot belang, omdat het de veerkracht van het watersysteem vermindert, waardoor de effecten van klimaatverandering slechter kunnen worden opgevangen. Zo overschreed de wassertemperatuur in de zomer van 2003 vaak de ecologische drempel van 25°C, terwijl dit in de zomer van 1976 zelden het geval was (tabel 2). Bovendien was de maximumwassertemperatuur in 2003 (27,5°C) veel hoger dan in 1976 (25,2°C). Het is dus evident dat het vermogen van het riviersysteem om een stijgende luchttemperatuur op te vangen zonder (grote) ecologische schade de afgelopen 30 jaar sterk is gedaald.

In tabel 3 wordt het gehalte aan opgelost zuurstof in de Rijn gedurende de droogte en hun referentiejaren getoond. Men zou verwachten dat droogte een negatieve invloed hebben op de concentratie van opgelost zuurstof, vanwege de hoge wassertemperaturen (meer afbraak, lagere oplosbaarheid zuurstof). Zo'n negatieve invloed kon echter niet worden vastgesteld. In feite was de gemiddelde concentratie opgelost zuurstof gedurende de zomer van 2003 zelfs (iets) hoger dan in de referentieperiodes. De maximale opgeloste zuurstofconcentraties in 2003 (9,7 mg/l) weerspiegelen bovendien oververzadiging. Vermoedelijk zijn deze observaties gerelateerd aan een toename

Tabel 2: Wassertemperatuur te Lobith gedurende de zomerdroogtes van 1976 en 2003 en hun referentieperiodes.

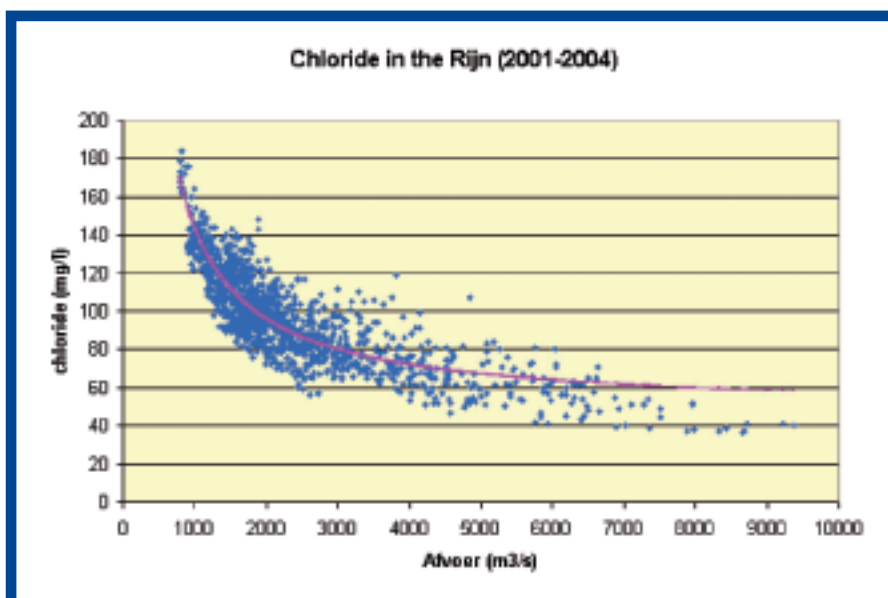
zomer juni-augustus	totaal aantal metingen	min. (°C)	max. (°C)	gemiddeld (°C)	N > 25°C
1975	92	14.9	23.8	20.1	0
1976	92	16.3	25.2	21.5	4
1977	92	16.4	22.8	19.7	0
2002	92	18.7	24.3	21.7	0
2003	92	18.9	27.5	23.1	18
2004	91	18.3	25.9	21.5	1

van primaire productie (algengroei) tijdens droogte, zoals later wordt besproken.

De concentratie van chlorophyl-a (een maat voor de hoeveelheid algen in het rivierwater) in het Rijnwater is over het algemeen hoog gedurende de lente en de zomer en laag in de herfst en de winter. Er dient te worden opgemerkt dat de huidige concentratie van chlorophyl-a in het rivierwater veel lager is dan 30 jaar geleden (tabel 4). Dit kan worden verklaard door een continue reductie van de belasting met nutriënten, als gevolg van de zuivering van industrieel en huishoudelijk afvalwater in de jaren 70 en 80 (tabel 5). Wanneer men kijkt naar de invloed van droogte, is het evident dat de concentratie chlorofyl-a veel hoger ligt gedurende een droogteperiode dan onder gemiddelde afvoercondities. De hoge watertemperatuur en de lagere stroomsnelheid van het water tijdens droogte zijn relevante factoren die een algenbloei kunnen veroorzaken of versterken.

In tabel 5 wordt een overzicht gegeven van de concentratie nutriënten in de Rijn in Lobith gedurende de zomerdroogte. Alleen de ammoniumconcentraties zijn verhoogd. Dit is vooral duidelijk voor de droogte van 1976, toen de ammoniumconcentraties een orde van grootte hoger waren dan ze nu zijn. De stijging van ammonium gedurende droogte kan worden verklaard door de beperkte verdunning van huishoudelijk afvalwater, een min of meer constante (punt)bron van ammonium. De toename van ammonium gedurende de zomerdroogte is echter van beperkt belang vergeleken met de seizoenscyclus van ammonium, met hoge concentraties gedurende de winter en lage concentraties gedurende de zomer. Deze seizoenscyclus is gerelateerd aan de invloed van de temperatuur op de omzetting van ammonium in nitraat (nitrificatie)<sup>3)</sup>.

Effecten van de zomerdroogte zijn niet gevonden voor nitraat, nitriet en fosfaat (tabel 5). Voor nitraat kan dit wellicht worden verklaard door een daling van de aanvoer via uitspoeling (van landbouwgronden). Bovendien kan denitrificatie in de rivierbedding de nitraatconcentratie in het rivierwater verlagen, vooral wanneer de watertemperaturen hoog zijn<sup>4)</sup>. Het is ook mogelijk dat een eventuele stijging van de nutriëntenconcentraties gedurende zomerdroogte wordt gecompenseerd door een



Afb. 3: Invloed van de afvoer op de concentratie chloride bij Lobith (data voor de jaren 2001 t/m 2005).

toename van de primaire productie, omdat droogte samenvalt met een toename van de hoeveelheid algen in het rivierwater (tabel 4).

Voor macro-ionen, zoals chloride, sulfaat en natrium, maar ook voor bromide en fluoride, is een duidelijk effect van droogte op de concentraties waar te nemen. Dit is niet zo verrassend, omdat deze stoffen doorgaans niet-reactief (conservatief) gedrag vertonen in oppervlaktewater. Voor conservatieve stoffen wordt de concentratie bepaald door de belasting en de afvoer, volgens de formule<sup>5)</sup>

$$C = \frac{a}{Q} + b$$

waarin C = de concentratie (mg/l), a = de menselijke belasting (g/s), b = de achtergrondconcentratie (mg/l) en Q = afvoer (m<sup>3</sup>/s).

Een voorbeeld van de relatie tussen chloride en de afvoer in de Rijn is weergegeven in afbeelding 3. Uit deze figuur kan worden afgeleid dat de huidige zoutbelasting van de Rijn (bij Lobith) 96 kg/s is en dat de achtergrondconcentratie 48 mg/l bedraagt. Verder blijkt dat de concentratie chloride bij lage afvoeren kan stijgen tot boven de 150 mg/l. Bij een afvoer van 800 kubieke meter per seconde bedraagt de chlorideconcentratie (bij de huidige belasting) circa 170 mg/l, een

niveau dat in 2003 ook werd gehaald (maximaal 184 mg/l). Ter vergelijking: bij 200 mg/l chloride wordt de inname van oppervlaktewater voor de bereiding van drinkwater gestaakt.

De verwachtingen voor de toekomst zijn niet gunstig. Regionale klimaatscenario's voorzien dat de Rijn langzamerhand zal veranderen van een gecombineerde smeltwater- en regenrivier in een bijna compleet door regenwater gevoede rivier<sup>6)</sup>. Dat betekent dat de toekomstige afvoer van de Rijn tijdens zomerdroogte nog aanzienlijk lager kan zijn dan het minimum van 2003 (784 kubieke meter per seconde), waarbij de grens van 200 mg/l chloride naar alle waarschijnlijkheid wordt overschreden. Dit zou de drinkwaterbedrijven langs de Rijn en het IJsselmeer in problemen kunnen brengen. Een verdere reductie van de chloridebronnen in het achterland (kalimijnen, bruinkoolmijnen en rwzi's) kan dit probleem voorkomen.

### Conclusies

Klimaatverandering zal leiden tot een versnelling van de hydrologische cyclus, op een wereldwijde, regionale en lokale schaal<sup>1),7),8)</sup>. Het vaker en langduriger optreden van hydrologische extremen, namelijk droogte, heftige regenbuien (overstorten) en overstromingen, heeft gevolgen voor de waterkwaliteit. Dit artikel heeft zich beperkt tot het effect van

Tabel 3: Opgelost zuurstof te Lobith gedurende de zomerdroogte van 1976 en 2003 en hun referentieperioden.

zomer juni-augustus	totaal aantal metingen	O <sub>2</sub> -min (mg/l)	O <sub>2</sub> -max (mg/l)	O <sub>2</sub> -gemiddeld (mg/l)
1975	13	4.5	7.5	5.83
1976	14	4.2	7.4	5.55
1977	13	4.2	7.8	5.85
2002	6	7.8	9.0	8.43
2003	6	7.1	9.7	8.63
2004	6	7.6	9.1	8.38

Tabel 4: Concentraties chlorophyl-a te Lobith gedurende de zomerdroogtes van 1976 en 2003 en hun referentieperioden.

zomer juni-augustus	totaal aantal metingen	chl. a-min (µg/l)	chl. a-max (µg/l)	chl. a-gemiddeld (µg/l)
1975	9	13	54	31
1976	13	26	151	88
1977	12	18	98	54
2002	6	2	30	15
2003	6	3	40	26
2004	6	5	18	11

droogte op de waterkwaliteit van de Rijn. Aangevoeld is dat de waterkwaliteit negatief wordt beïnvloed door (zomer)droogte. De afname in waterkwaliteit tijdens zomerdroogte is zowel gerelateerd aan de hoge watertemperaturen (bijvoorbeeld stijging van de primaire productie) als de lage afvoer (beperkte verdunning van puntbronnen). Aan de andere kant is de uitspoeling van stoffen uit het stroomgebied verminderd tijdens droogte, waardoor de belasting van de rivier met nutriënten (met name nitraat) en bestrijdingsmiddelen lager zal zijn.

Een vergelijking van de waterkwaliteit gedurende de zomerdroogte van 1976 en 2003 laat zien dat de invloed van droogte op waterkwaliteit groter zal zijn wanneer de waterkwaliteit al slecht is. Bijvoorbeeld, in de zomer van 1976, toen het rivierwater zeer eutroof was, was er sprake van een extreme algenbloei bij Lobith (maximumconcentratie chlorofyl-a van 151 µg/l, uitzonderlijk hoog voor een stromende rivier). Gedurende de zomer van 2003, toen de rivier mesotroof was, was de algenconcentratie veel lager (maximumconcentratie chlorofyl-a van 40 µg/l). Ook de mate waarin de rivier een hittegolf kan verwerken zonder aanzienlijke ecologische schade, zal afhangen van de feitelijke lozings situatie (door koelwater).

Zoals gesteld is de achtergrondtemperatuur van de Rijn in de afgelopen 30 jaar sterk gestegen, waardoor de kans op overschrijding van de 25°C grens tijdens een hittegolf sterk is toegenomen, evenals de potentiële gevolgen voor het ecosysteem. In die zin is reductie van lozingen, om ongewenste verslechtering van de waterkwaliteit tijdens droogte te voorkomen, op te vatten als adaptatie aan de gevolgen van klimaatverandering.

Verslechtering van de rivierwaterkwaliteit heeft effect op de ecologie en op de gebruiksfuncties, zoals recreatie, irrigatie en drinkwaterproductie. Wanneer men kijkt naar de drinkwaterproductie is het meest belangrijke aspect van een zomerdroogte waarschijnlijk de stijging van de watertemperatuur, omdat dit van invloed kan zijn op de microbiële activiteit in het distributienetwerk. Andere relevante consequenties van een zomerdroogte zijn de stijging van algen in het rivierwater (die tijdens het zuiveringsproces moeten worden verwijderd) en de toename van chloride en bromide. Voor de ecologie lijkt de verhoging van de watertemperatuur eveneens een probleem te worden. Het besef groeit dat realisatie van de goede ecologische toestand, zoals beoogd door de Kaderrichtlijn Water, mogelijk kan

worden gefrustreerd door klimaatverandering, waarbij de stijging van de watertemperatuur tijdens droogte een belangrijke factor is<sup>9),10)</sup>.

LITERATUUR

- 1) KNMI (2006). Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Rapport WR 2006-01.
- 2) Bokhoven A. van (2006). The impact of climate change on the water quality of the Rhine river. Rapport BTO 2006.056(s). Kiwa Water Research.
- 3) Admiraal W. en Y. Botermans (1989). Comparison of nitrification rates in three branches of the river Rhine. Biogeochemistry 8, pag. 135-151.
- 4) Admiraal W. en J. van der Vlugt (1988). High rates of denitrification in a storage reservoir fed with water of the river Rhine. Archiv für Hydrobiologie 113, pag. 593-605.
- 5) Weijden C. van der, en J. Middelburg (1989). Hydrogeochemistry of the river Rhine: long term and seasonal variability, elemental budgets and pollution. Water Research 23, pag. 1247-1266.
- 6) Pfister L., J. Kwadijk, A. Musy, A. Bronstert en L. Hoffman (2004). Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine-Meuse basins. River Research and Applications 20, pag. 229-241.
- 7) EEA (2004). Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment. Rapport 2.
- 8) IPCC (2007). 4th Assessment report.
- 9) Moren-Abat M., P. Quevauviller, L. Feyen, A. Heiskanen, P. Noges, A. Solheim en E. Lipiatou (red.) (2006). Proceedings international workshop 'Climate change impacts on the water cycle, resources and quality'. Rapport EUR 22422. Climate Change and Natural Hazards series nr. 8.
- 10) EEA (2007). Climate change and water adaptation issues. Technical report nr. 2.

**Tabel 5: Gemiddelde concentratie van nitraat, nitriet, ammonium, orthofosfaat en totaalfosfaat in Lobith gedurende de zomerdroogtes van 1976 en 2003 en hun referentieperioden.**

zomer jun-aug	totaal aantal metingen	NO <sub>3</sub> -N (mg N/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg N/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg N/l)	ortho-P (mg P/l)	totaal P (mg P/l)
1975	18	-	-	0.29	0.32	0.66
1976	18	-	-	0.47	0.37	0.93
1977	17	-	-	0.29	0.39	0.70
2002	8	2.06	0.04	0.05	0.07	0.24
2003	9	2.03	0.02	0.07	0.08	0.20
2004	9	1.98	0.01	0.03	0.12	0.31