



Holger Cremer, TNO Bouw en Ondergrond

Emiliya Kirilova, Universiteit Utrecht

Heleen Koolmees, TNO Bouw en Ondergrond

# Waterkwaliteit van de meren langs de Diefdijk vanaf 1500

**Paleo-ecologische methoden worden in Nederland nog steeds niet voldoende benut om de waterkwaliteits- en landschapsgeschiedenis van de laatste eeuwen in kaart te brengen. Terwijl dit soort onderzoek van boringen in sediment juist de unieke kans biedt ecologische referentiesituaties van oppervlaktewateren te beschrijven en in het kader van de Kaderrichtlijn Water (KRW) als streefwaarden te gebruiken. Dit artikel laat de resultaten zien van onderzoek aan boringen in twee diepe meren (Wiel van Bassa en De Waai) langs de Diefdijk. Deze meren vormen een belangrijke waterkering op de grens tussen Holland en Gelderland. De focus ligt op de beschrijving van de diatomeeënassemblages in de boringen en hiervan afgeleide fosforconcentraties, die een goed beeld geven van de ontwikkeling van de ecologische toestand van beide meren. De reconstructie weerspiegelt de mondiaal waarneembare eutrofiëring van oppervlaktewateren sinds het begin van de 20e eeuw.**

De kwaliteit en toegankelijkheid van water is een mondiale kwestie. Eutrofiëring veroorzaakt door menselijke activiteiten (ontbossing, landbouw, industrie) behoort tegenwoordig tot één van de grootste stressfactoren voor oppervlaktewateren<sup>1),2)</sup>. Eén van de uitdagingen van de komende decennia is het creëren en onderhouden van een biosfeer met 'schone' ecosystemen. Het zorgen voor schoon oppervlaktewater is hierbij één van de grootste uitdagingen. De ecologische en sociaal-economische gevolgen van eutrofiëring zijn al relatief lang bekend. Als gevolg hiervan zijn tal van wettelijke en beheermaatregelen genomen om de negatieve effecten van eutrofiëring terug te dringen.

In Europa is sinds 2000 de KRW van kracht, die voorschrijft dat oppervlaktewateren uiterlijk in 2015 in alle lidstaten van de Europese Unie een goede ecologische toestand moeten hebben. Wat een 'goede ecologische toestand' inhoudt, is echter slecht gedefinieerd. De vereiste referentietoestand verwijst naar de streefwaarden van nutriëntconcentraties in de onverstoorde natuurlijke situatie zonder of met slechts beperkte invloed van de mens. Paleo-ecologisch onderzoek kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren door het definiëren van referentietoestanden in een tijd dat de mens beperkt invloed had op de waterkwaliteit<sup>3)</sup>. De effecten van menselijke invloed, eutrofiëring en klimaatveranderingen op opper-

vlaktewateren in Nederland zijn relatief goed bestudeerd<sup>4),5)</sup>. Paleo-ecologische methoden worden echter in Nederland nauwelijks toegepast. Ook zijn tot nu toe relatief weinig Nederlandse waterstudies vanuit een paleo-ecologisch perspectief gepubliceerd.

De laatste jaren is een aantal paleowaterkwaliteitsstudies uitgevoerd door TNO en de Universiteit Utrecht<sup>7),8),9),10)</sup>. Twee van deze studies worden in dit artikel besproken: de ontwikkeling van de ecologische toestand in twee diepe meren langs de Diefdijk. Met behulp van associaties van fossiele diatomeeën werd de ontwikkeling van de fosforconcentratie in het oppervlaktewater gedurende de afgelopen vijf eeuwen gereconstrueerd. Diatomeeën, oftewel kiezelalgen, zijn eencellige algen die in vrijwel alle aquatische milieus voorkomen. Zij vormen minuscule en uitstekend fossiliseerbare skeletjes van kiezel en reageren zeer gevoelig op veranderingen van de trofische toestand. Kiezelalgen zijn erkend als ecologische indicatoralgen binnen de KRW<sup>11)</sup> en zijn, mede daardoor, uitermate geschikt om toegepast te worden voor de reconstructie van referentietoestanden van in Nederland aanwezige watertypes.

## De Diefdijk

De Diefdijk werd in 1277 als binnendijk aangelegd om de Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden tegen wateroverlast uit de Betuwe te beschermen (zie afbeelding

1). Sinds 1820 is de Diefdijk bovendien de wettelijk vastgestelde grens tussen Holland en Gelderland. De Diefdijk is in het verleden enkele keren doorgebroken met als gevolg het ontstaan van deels zeer grote en diepe kolkgraven of wielen, onder andere De Waai en het Wiel van Bassa. De Waai werd in de winter van 1496-1497 na een dijkbreuk

## De onderzochte locaties.



Wiel van Bassa



De Waai

gevormd. Bij het herstel van het dijkgat kwam het aan de Gelderse kant van de Diefdijk te liggen<sup>12</sup>. Als gevolg hiervan werd De Waai ook in de daaropvolgende jaren tientallen keren overstroomd na doorbraken van rivierdijken in de Betuwe. De Waai is tegenwoordig circa 1,3 hectare groot. De maximale diepte is ongeveer 15 meter. Het Wiel van Bassa, ofwel Schoonrewoerdse Wiel, ontstond in 1571-1573 als gevolg van dijkdoorbraken. Het Wiel van Bassa kwam tijdens herstel van het dijkgat aan de Hollandse kant van de Diefdijk te liggen. Het is tegenwoordig het grootste wiel van Nederland (circa 15 hectare) en is maximaal tien meter diep. Het is niet bekend hoe vaak het Wiel van Bassa na 1573 is overstroomd, maar door zijn positie aan de Hollandse kant van de Diefdijk waarschijnlijk veel minder vaak dan De Waai. De laatste bekende overstroming was in 1809 toen de Betuwe door een grote watersnood getroffen werd.

### Diepe boringen

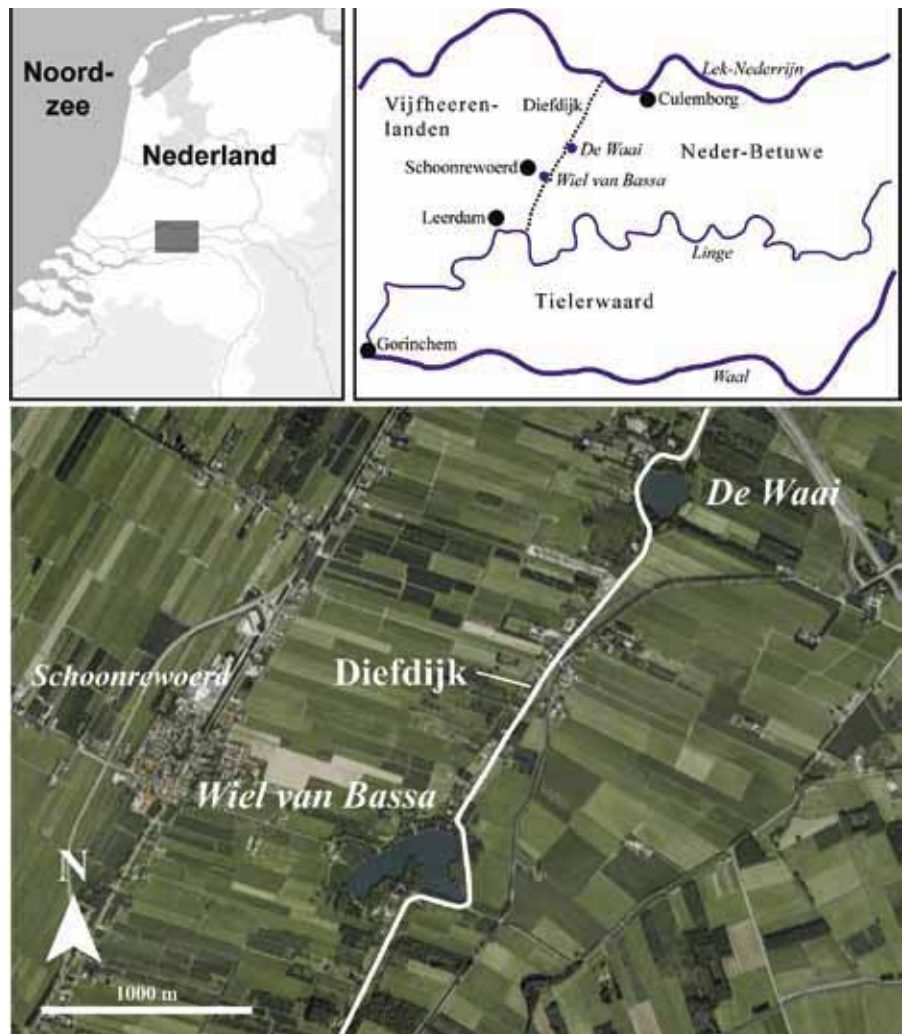
In 2005 (De Waai) en 2008 (Wiel van Bassa) werden in beide meren vanuit een vlot diepe sedimentboringen uitgevoerd. In het Wiel van Bassa werd drie meter sediment geboord, waarvan de bovenste 2,10 meter uit gyttja (organische, fijnkorrelige afzettingen) en het daaronder liggende gedeelte uit zand bestaat<sup>13</sup>. In De Waai werd een sediment-profiel van 11,52 meter geboord<sup>9</sup>, dat geheel uit gyttja bestaat. De tegenwoordige waterdieptes van 10 (Wiel van Bassa) en 15 meter (De Waai) in aanmerking nemend, betekent dit dat de oorspronkelijke diepte van beide kolkgenen als gevolg van de doorbraken van de Diefdijk respectievelijk circa 13 en 27 meter bedroeg. Van het sedimentmateriaal zijn verschillende lithologische, fysische, chemische en biologische parameters bestudeerd om de ecologische ontwikkeling van beide meren zo goed mogelijk in kaart te kunnen brengen. Door ouderdomsbepalingen werd duidelijk dat de geboorde sedimentaire 'archieven' de gehele geschiedenis van beide wielen sinds hun ontstaan in 1496-97 (De Waai) en 1571-73 (Wiel van Bassa) documenteren<sup>9, 13</sup>.

### Diatomeeënassociaties en ecologische geschiedenis

Belangrijk onderdeel van ons wielenonderzoek is de bestudering van de sedimentaire diatomeeënassociaties. Afbeelding 2 toont de meest aangetroffen diatomeeënsoorten in de afzettingen van beide wielen. Op beide locaties zijn vooral planktonische soorten afgezet, wat typerend is voor relatief grote en diepe meren. Vervolgens werden de sedimentaire diatomeeënassociaties met behulp van een zogeheten transferfunctie vertaald naar totale fosforgehaltes in het water<sup>9,13</sup> (zie afbeelding 3).

### Wiel van Bassa

In de eerste decennia na het ontstaan, in de jaren zeventig van de 16de eeuw, verkeerde het Wiel van Bassa in een hypertrofe toestand met fosforconcentraties boven 150 µg/l<sup>13</sup>. Oorzaken voor deze voedselrijke toestand kunnen zijn: regelmatige overstromingen van de Vijfheerenlanden in de decennia na het ontstaan van het wiel of mobilisatie en



Afb. 1: Geografische kaart van het Diefdijk gebied met de onderzochte wielen.

het inspoelen van nutriënten uit de vroege afzettingen in het wiel en het omliggende akkerland. Overstromingen van de Vijfheerenlanden zijn gedocumenteerd voor de jaren 1577, 1587 en 1595<sup>12</sup>. Deze eerste eutrofe fase in het Wiel van Bassa, die gekenmerkt wordt door hoge aantallen van de soort *Cyclostephanos dubius*, eindigde in de eerste helft van de 17de eeuw. De volgende fase (110-170 cm boringdiepte, ~1650-1710) werd gekenmerkt door het voorkomen van vooral *Cyclotella ocellata* en *Puncticulata radiosa*. Beide soorten zijn meso-eutroof. Het gereconstrueerde fosforgehalte ligt dan ook rond 50 µg/l in deze periode. Het organisch koolstofgehalte stijgt geleidelijk tot waarden boven de vier procent, wijzend op een duidelijke toename van de biologische productie in het wiel.

Opmerkelijk zijn de twee ruim tien centimeter dikke lagen die opvallend lage hoeveelheden diatomeeën-schaaltjes bevatten. Het is twijfelachtig of deze intervallen eventueel met lokale watersnoden en overstromingen in verband gebracht kunnen worden, omdat dit ook in sedimentaire parameters zichtbaar zal moeten worden. Het diepte-interval 80-25 cm (~1760-1900) wordt gekenmerkt door hoge aantallen van *C. ocellata* en *P. radiosa* en in het bovenste gedeelte (35-25 cm, ~1860-1900) door de oligo-mesotrofe indicatorsoort *Cyclotella cyclopuncta*. Het fosforge-

halte lag in dit interval stabiel onder 50 µg/l (zie afbeelding 3). In deze periode komen historisch gedocumenteerde overstromingen in de Vijfheerenlanden voor in de jaren 1784, 1799 en 1809<sup>12</sup>, die echter niet duidelijk in de sedimentaire afzettingen van het Wiel van Bassa terug te vinden zijn. Dit kan erop wijzen dat het Wiel van Bassa door deze watersnoden niet of niet ingrijpend getroffen werd. Opvallend is verder dat het organische koolstofgehalte in dezelfde periode geleidelijk iets afneemt. Dit komt zeer waarschijnlijk door een verminderde depositie in verband met het veranderde landgebruik. Het veroorzaakt afbraak van organisch koolstof in het meer. Duidelijk is dat de periode 1860-1900 (25-35 cm diepte) de schoonste fase van het wiel was met fosforgehaltes in het mesotrofe bereik.

Vanaf het begin van de 20e eeuw nam het fosforgehalte echter weer toe, eerst geleidelijk tot waarden van rond de 50 µg/l, vanaf ongeveer 1930 zelfs tot waarden boven de 100 µg/l. Hier is dus duidelijk sprake van een eutrofiëringstrend, die vanaf de jaren tachtig van de vorige eeuw nog werd versterkt. Volgens de diatomeeënassociaties en hiervan afgeleide fosforconcentraties verkeerde het Wiel van Bassa in de laatste decennia van de 20e eeuw in een hypertrofe toestand. De eutrofiëringstrend is toe te schrijven aan de toegenomen bemesting in de landbouw, bevolkingsdruk

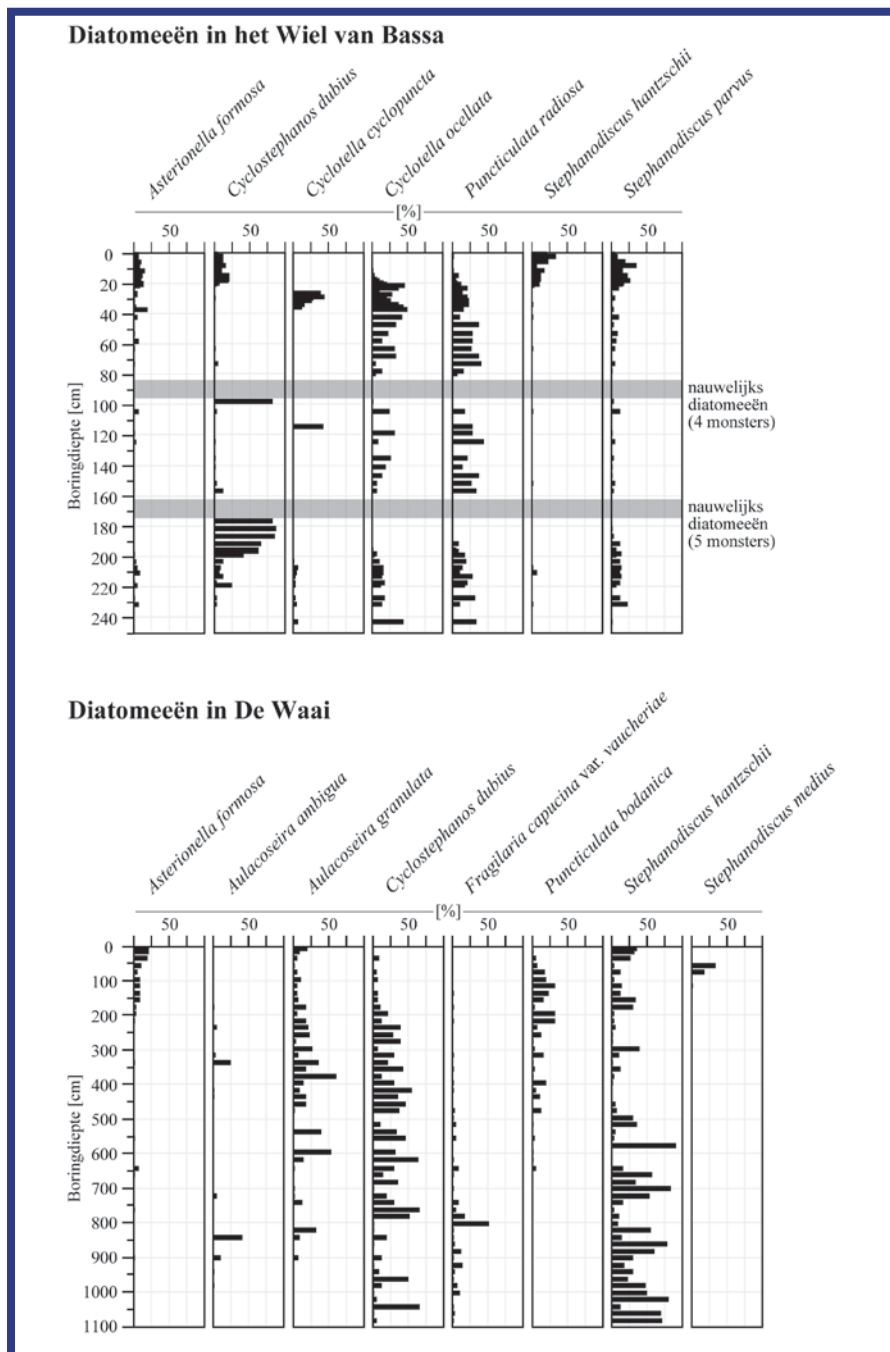
en industrialisering. Dat leidde uiteindelijk tot een toestroom van nutriënten in het Wiel en vervolgens tot een hogere depositie van organisch koolstof op de meerbodem. Bovendien steeg de zwavelconcentratie in het sediment in dezelfde tijd behoorlijk, wat toe te schrijven is aan (althans tijdelijke) anoxische condities in de waterbodem als gevolg van overmatig zuurstofverbruik. Dit leidde tot anaerobe afbraakprocessen van het organische materiaal, wat gepaard ging met de productie van gereduceerde zwavelverbindingen zoals ijzersulfide.

Sinds de jaren tachtig wordt geen rioolwater meer in het Wiel van Bassa geloosd, wat tot lagere nutriëntenbelasting moet hebben geleid. Hoewel het fosforgehalte in de zomermaanden tegenwoordig tussen 50 en 90 µg/l ligt<sup>13</sup>, is dit niet af te zien aan de soortensamenstelling van de diatomeeflora. De oorzaak hiervan is dat dezelfde soorten die kenmerkend zijn voor hypertrofe wateren, dat vaak ook zijn voor eutroof water. Een merkbare verandering van de diatomeeflora zal zeer waarschijnlijk pas optreden als een duidelijk mesotrofe toestand (fosfor < 35 µg/l) in het Wiel van Bassa is bereikt.

### De Waai

Het wiel De Waai verkeerde van de 15e tot 18e eeuw in een hypertrofe toestand met fosforconcentraties ruim boven 100 µg/l (zie afbeelding 3)<sup>9</sup>. De meest voorkomende diatomeeën van deze periode zijn *Cyclostephanos dubius* en *Stephanodiscus hantzschii*, beide indicatieve soorten voor zeer nutriëntenrijk water. In de eerste drie eeuwen van zijn ontstaan overstromde De Waai regelmatig vanuit de uiterwaarden, toen de regionale rivieren buiten hun oevers traden. Dit is onder andere aangetoond door hoge hoeveelheden van het element titanium, een indicator voor erosie, en stijgende accumulatie van organisch koolstof. Ook maakte De Waai in deze tijd deel uit van een groot drainagesysteem<sup>12</sup>, dat voor een continue toestroom van nutriëntenrijk water zorgde.

In de 19e eeuw was de nutriëntenrijkdom in De Waai afgenomen tot waarden tussen 40 en 150 µg/l. Ook de titaniumconcentratie was duidelijk lager (zie afbeelding 3). De diatomeeënflora werd gedomineerd door eutrofe soorten (*Cyclostephanos dubius* en *Aulacoseira granulata*) en tegen het einde van de 19e eeuw kwam *Puncticulata bodanica*, een oligomesotrofe soort, geregeld in het meer voor. De oorzaak van de kennelijk afgenomen fosforconcentraties in De Waai was het in de loop van de 18e en 19e eeuw aangepaste systeem van kanalen, sloten en dijken<sup>12</sup>, waardoor het meer minder vaak overstromde en ook duidelijk minder drainagewater in het meer werd geloosd<sup>9</sup>. In de eerste fase van de 20e eeuw had De Waai volgens de reconstructie de laagste fosforconcentraties (~40 µg/l) sinds zijn bestaan. Oligomesotrofe soorten als *Puncticulata bodanica* werden vaak aangetroffen. Terwijl de koolstofconcentratie in het sediment ook relatief laag was, zijn vergelijkbaar hoge concentraties van titanium aangetroffen.



Afb. 2: Meest voorkomende diatomeeënsoorten in sedimentaire afzettingen van het Wiel van Bassa en De Waai.

Het laatste houdt verband met intensieve versterking- en reparatieactiviteiten van de dijken<sup>9</sup>. In de tweede fase van de 20e eeuw viel vervolgens een duidelijke eutrofiëringstrend te constateren. De fosforconcentraties in De Waai namen toe tot waarden van rond 100 µg/l (zie afbeelding 3). Ook de samenstelling van de diatomeeënflora veranderde naar meer eutrofe en hypertrofe soorten. De toename van nutriënten in de laatste decennia is te wijten aan een gestegen gebruik van meststoffen in de landbouw. Ook was de titaniumconcentratie in deze fase het laagst, wat erop wijst dat inspoeling van minerogene sedimenten in De Waai nauwelijks meer voorkomt.

### Paleolimnologie als inzetbare applicatie

De hier voorgestelde paleo-ecologische studie aan sedimentboringen leidt tot de volgende conclusies. Allereerst springt het

verschil in ecologische ontwikkeling tussen beide wielen in het oog. Door de ligging aan de buitendijkse, Gelderse zijde van de Diefdijk werd De Waai vaker overstromd en bevatte vervolgens continu zeer hoge nutriëntenconcentraties, zodat het meer het grootste deel van de tijd in een hypertrofe toestand verkeerde. Daarentegen raakte het binnendijkse Wiel van Bassa duidelijk minder vaak overstromd en kende meestal een relatief rustig afzettingssmilieu. Het verschil is duidelijk te zien aan de dikte van de sedimentpakketten (2,10 versus 11,50 meter) die sinds het ontstaan van beide meren werden afgezet.

Ten tweede trekt dit onderzoek deels het concept van de KRW in twijfel, waarin de ecologische kwaliteit in de context van een natuurlijke toestand bekeken moet worden. Het Wiel van Bassa en De Waai zijn uiteindelijk allebei als gevolg van dijkbouw en

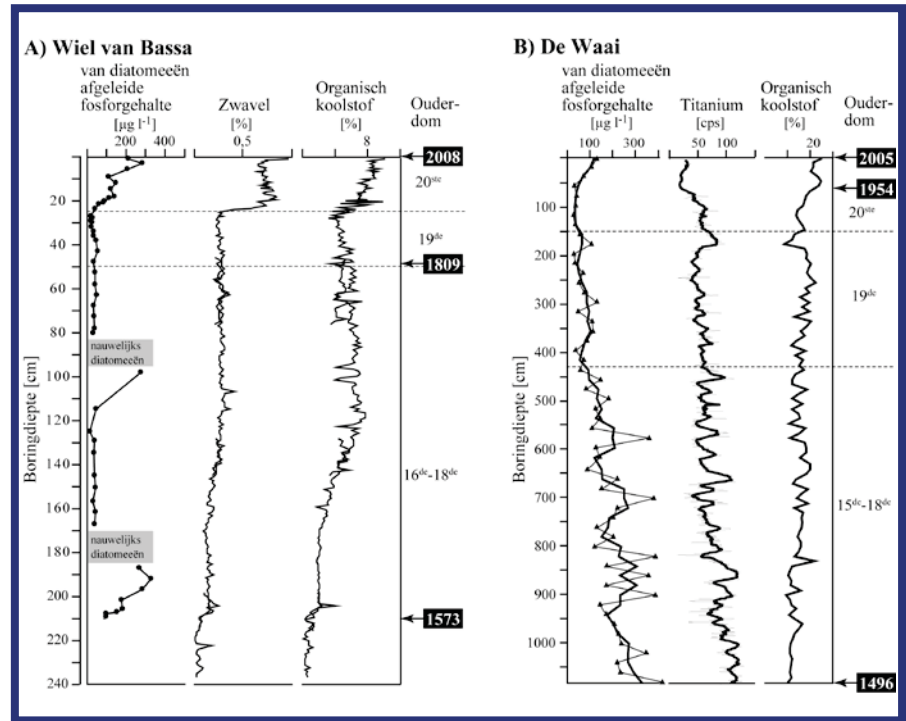
dijkbreuken ontstaan en hebben zich de facto nooit in een natuurlijke toestand bevonden. De Waai is bijvoorbeeld, afhankelijk van het perspectief, te beschouwen als nutriëntenrijk, kijkend naar de laatste 100 jaar, of als nutriëntenarm als naar de laatste 500 jaar gekeken wordt. De conclusie hiervan is dat in het kader van het vastleggen van referentietoestanden gedifferentieerder gekeken moet worden naar de landschappelijke geschiedenis van meren.

De derde constatering is dat paleo-ecologische methoden uitgelezen mogelijkheden bieden voor het in kaart brengen van de ecologische kwaliteit van veel meren in de laatste eeuwen. In het Wiel van Bassa lag het afgeleide fosforgehalte van het oppervlaktewater tijdens twee lange fasen (~1650-1730 en ~1770-1930) tussen 35 en 50  $\mu\text{g/l}$ . Een fosforgehalte van ongeveer 40  $\mu\text{g/l}$  is dan ook te beschouwen als de relevante referentietoestand van het wiel. Ook De Waai was nog in het begin van de 20e eeuw een mesotroofzwak eutroof meer en eutrofiëerde vervolgens tot een hypertroof water.

Onze resultaten bevestigen uitkomsten van ander onderzoek<sup>6)</sup>, waaruit blijkt dat de vroegste impact van eutrofiëring in de midden en late 19e eeuw plaatsvond. Daardoor is de tijdsinterval vóór 1850-1900 als geschikte periode voor de quasi-natuurlijke referentietoestand van een meer te beschouwen. Zodoende zijn ecologische referenties op betrouwbare wijze in kaart te brengen, ook van waterlichamen die nooit in natuurlijke staat hebben verkeerd en geen natuurlijke analogen hebben die als referentietoestand zijn te gebruiken.

#### LITERATUUR

- Zimmerman J., J. Mihelcic en J. Smith (2008). Global stressors on water quality and quantity. *Environmental Science & Technology* nr. 42, pag. 4247-4254.
- Smith V. en D. Schindler (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution* nr. 24, pag. 201-207.
- Bennion H. en R. Battarbee (2007). The European Union water framework directive: opportunities for paleolimnology. *Journal of Paleolimnology* nr. 38, pag. 285-295.



Afb. 3: Eutrofiëringparameters van het Wiel van Bassa en De Waai in de laatste eeuwen.

- Mooij W. *et al.* (2005). The impact of climate change on lakes in the Netherlands. *Aquatic Ecology* nr. 39, pag. 381-400.
- Gulati R. en E. van Donk (2002). Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state of the art review. *Hydrobiologia* nr. 478, pag. 73-106.
- Battarbee R. *et al.* (2010). A palaeolimnological meta-database for assessing the ecological state of lakes. *Journal of Paleolimnology*.
- Kirilova E., H. Cremer, O. Heiri en A. Lotter (2010). Eutrophication of moderately deep Dutch lakes during the past century: flaws in the expectations of water management? *Hydrobiologia* nr. 637, pag. 157-171.
- Cremer *et al.* (2010). River flooding and landscape changes impact ecological conditions of a scour hole lake in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands. *Journal of Paleolimnology*.
- Kirilova E., M. van Hardenbroek, O. Heiri, H. Cremer en A. Lotter (2010). 500 years of trophic state history of a hypertrophic Dutch dike-breach lake. *Journal of Paleolimnology* nr. 43, pag. 829-842.
- Cremer H., F. Bunnik, T. Donders en H. Koolmees (2009). Kiezelalgen documenteren historische waterkwaliteit van diepe meren. *H<sub>2</sub>O* nr. 1, pag. 27-30.
- Van der Molen D. en R. Pot (2007). Referenties en maatlaten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water. *STOWA. Rapport 32*.
- Van Hemmen F., D. Bekius en E. Heunks (2007). Schone slaper - Hollands hoop in bange dagen: cultuurhistorisch advies voor de verbetering van de 'Diefdijklinie'. *RAAP Archeologisch Advisbureau. Rapport 1531*.
- Cremer H. en H. Koolmees (2009). Paleo-waterkwaliteit van Nederlandse wateren: milieuveranderingen in het Schoonrewoerdse Wiel sinds 1571 op basis van paleo-ecologisch onderzoek. *TNO. Rapport 034-UT-2009-01914-A*.