

VU Research Portal

Silent witnesses

Versteegh, E.A.A.

2009

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Versteegh, E. A. A. (2009). *Silent witnesses: Freshwater bivalves as archives of environmental variability in the Rhine-Meuse delta*. Ipskamp Drukkers.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Samenvatting

Achtergrond

Hoewel het geologisch verleden toont dat het klimaat van nature kan veranderen, concludeert het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dat het grootste deel van de opwarming van de afgelopen 50 jaar veroorzaakt is door menselijke activiteiten, zoals grootschalige ontbossing en het verbruik van fossiele brandstoffen. Het IPCC verwacht ook dat het effect van de klimaatopwarming de komende eeuw regionaal zal verschillen, met in West-Europa nattere zomers en drogere winters.

Nederland heeft een kwetsbare positie in de Rijn-Maasdelta, en het is dan ook van groot belang om onze kennis over extreme neerslag en gerelateerde overstromingen en droogtes te verbeteren. In het recente verleden, in 1993 en 1995, hebben er in ons land omvangrijke overstromingen plaatsgevonden (Figuur 1.1). Deze veroorzaakten grote schade, en leidden in 1995 zelfs tot de evacuatie van meer dan 200.000 mensen uit het Nederlandse riviereengebied. Ernstige droogtes kwamen bijvoorbeeld voor in 1976 en 2003 (Figuur 1.2). Als gevolg van die droogtes ontstond er een watertekort in de landbouw, en hadden elektriciteitscentrales een gebrek aan koelwater. Droogte kan ook zorgen voor verslechterde waterkwaliteit, hetgeen een directe impact heeft op de drinkwatervoorziening, en ook de rivierecologie in gevaar brengt. Men verwacht dat als gevolg van klimaatverandering, de ernst en frequentie van overstromingen en droogtes zullen toenemen in de loop van de 21^{ste} eeuw.

Voorspellingen over het toekomstige klimaat worden gedaan door middel van modellen. Om natuurlijke fluctuaties en de invloed van menselijk handelen te kunnen kwantificeren en vervolgens betrouwbare extrapolaties naar de toekomst te doen zijn realistische data, gemeten op verschillende tijdschalen, onontbeerlijk. Instrumentele datareeksen zijn op zijn best enkele honderden jaren oud. Voor kennis over het klimaat vóór die tijd zijn we afhankelijk van zogenaamde proxy's. Een proxy is een meetbare grootte die gebruikt kan worden om andere, niet direct meetbare, grootheden uit het geologische verleden te reconstrueren. Voorbeelden van proxy's zijn zuurstofisotopen in ijskernen (proxy voor temperatuur en ijsvolume gedurende ijstijden en interglacialen) of de breedte van jaarringen in bomen (proxy voor temperatuur of neerslag gedurende de laatste millennia).

Dit project onderzoekt het gebruik van de scheikundige samenstelling van groeilijnen in de schelpen van zoetwatermossels als proxy voor veranderingen in rivieromstandigheden gedurende de laatste 5000 jaar. Daarbij ligt de nadruk op veranderingen in waterafvoer (debiet) tijdens overstromingen en droogtes.

Sclerochronologie

Veel aquatische organismen, zoals koralen, slakken en bivalven (tweekleppigen), vormen periodieke groeilijnen in hun skelet, analoog aan de jaarringen in bomen. Omgevingskenmerken van het betreffende organisme worden vastgelegd in deze groeilijnen. Zo dienen deze skeletten als archief voor veranderingen in het groeimilieu. De studie van periodieke groeikenmerken in skeletonderdelen van aquatische organismen wordt sclerochronologie genoemd.

Veel sclerochronologisch onderzoek is gedaan aan mariene bivalven, waarbij de zuurstofisotopensamenstelling ($\delta^{18}\text{O}$) gebruikt wordt als proxy voor temperatuur of zoutgehalte van het water. In zoetwatermossels kan $\delta^{18}\text{O}$ dienen als proxy voor paleohydrologie, dus veranderingen in waterbron, debiet of neerslagpatronen. Deze studie onderzoekt de toepasbaarheid van zowel de stabiele zuurstof- als koolstofisotopensamenstelling ($\delta^{13}\text{C}$) van zoetwatermossels als omgevingsproxy en paleohydrologische proxy in de rivieren Maas en Rijn.

Nederlandse zoetwatermossels

Zoetwaterweekdieren komen veel voor in de Nederlandse rivieren en meeren. De meerderheid behoort tot de gastropoden (slakken), maar er komen ook verschillende soorten tweekleppigen voor. De zoetwaterweekdieren die in deze studie gebruikt worden behoren tot de familie Unionidae (rivierparelmossels of Najaden). Unionidae kunnen slecht tegen zout water (max. $\sim 3\text{‰}$ zoutgehalte) en komen dus alleen voor in zoet water. Wereldwijd zijn ruim 900 soorten beschreven. De grootste diversiteit komt voor in Noord-Amerika. Veel soorten zijn bedreigd door overbevissing, vervuiling, verlies van habitat en invasieve exoten. In Nederland wordt deze familie van Unionidae vertegenwoordigd door zes soorten. Ze vormen grote schelpen, leven half begraven in het sediment en kunnen een leeftijd tot 15 jaar bereiken.

In deze studie worden vier soorten Unionidae gebruikt (Figuur 1.7):

- *Unio crassus nanus* Lamarck, 1819 (Bataafse stroommossel). De schelp is elliptisch tot ovaal, bereikt maximale afmetingen van 40 x 70 mm en wordt gevonden in stromend water, meestal in rivieren. In vergelijking met de andere Nederlandse unioniden geeft deze soort de voorkeur aan het grofste, zandige sediment en is het meest gevoelig voor vervuiling en lage zuurstofgehaltes. *U. crassus* is door vervuiling in Nederland uitgestorven sinds 1968.
- *Unio pictorum* (Linnaeus, 1758) (Schildersmossel). Deze soort heeft

een dikke schelp en een langwerpige elliptische vorm met een maximale afmeting van 44 x 110 mm, komt voor in zowel stilstaand als stromend water en verdraagt enige vervuiling.

- *Unio tumidus* Philipsson, 1788 (Bolle stroommossel). De schelp heeft een eivorm met een gebogen rand. De maximale grootte bedraagt 62 x 125 mm. Deze soort prefereert stromend water, maar komt ook voor in stilstaand water. Van de Nederlandse unioniden heeft *U. tumidus* de hoogste tolerantie voor vervuiling.
- *Anodonta anatina* (Linnaeus, 1758) (Vijvermossel). *Anodontasoorten* hebben dunnere schelpen dan de bovengenoemde *Unio*soorten. *A. anatina* heeft een ovale vorm met een prominente hoekige vleugel aan de bovenkant, bereikt een maximale grootte van 80 x 132 mm, en komt voor in zowel stromend als stilstaand water.

Zoetwatermossels worden vaak gevonden in archeologische opgravingen, omdat ze door prehistorische mensen gebruikt werden als voedsel, gereedschap en versiering. Zogenaamde schelpenmiddens (afvalhopen van consumptie van schelpen) zijn gevonden in Australië, Indonesië, Noord-Amerika en Afrika. In Noord-Amerika vormden zoetwatermossels ooit een belangrijke bron voor de commerciële visserij, waarbij de schelpen werden gebruikt voor het maken van knopen. Tegenwoordig worden zoetwatermossels bevestigd voor de productie van parelmoerkorreltjes die worden gebruikt in de parelweek. De Europese soorten worden beschouwd als oneetbaar en werden alleen gegeten ten tijde van ernstige hongersnood. Ze werden gebruikt als veevoeder, voor prehistorisch gereedschap en voor sieraden. *U. pictorum* (de schildersmossel) dankt zijn naam aan het feit dat de schelpen door schilders werden gebruikt als verfbakjes.

De Rijn-Maasdelta

De rivieren Maas en Rijn vertegenwoordigen twee verschillende riviertypes, respectievelijk een regenrivier en een gecombineerde smeltwater/regenrivier. Het stroomgebied van de Maas ligt in het noordoosten van Frankrijk, Oost-België en Zuid-Nederland. Het gemiddelde debiet in Borgharen is 274 m³/s. Na zware regenval in het afvoerbekken kan het debiet oplopen tot meer dan 3000 m³/s. De Rijn is met een stroomgebied van 185.300 km² een van de grootste riviersystemen in West-Europa, en voert smeltwater af uit de Alpen en neerslag uit Zuid-Duitsland. Het gemiddelde debiet bij Lobith is 2200 m³/s, maar piekafvoeren kunnen wel 13.000 m³/s bedragen.

Zuurstofisotopen in de hydrologische cyclus

De chemische eigenschappen van de schelpen die in dit onderzoek gebruikt worden zijn ratio's van stabiele isotopen van zuurstof (O) en koolstof (C). Van beide elementen komen van nature atomen voor met een verschillende massa (stabiele isotopen). Zuurstof komt voor als drie verschillende stabiele isotopen: ^{16}O (99.76 %), ^{17}O (0.035 %) en ^{18}O (0.20 %). Het meten van ^{17}O levert weinig meer informatie op dan gehaald kan worden uit de hoeveelheid ^{18}O , die nauwkeuriger gemeten kan worden doordat dit isotoop in hogere concentraties voorkomt. In verschillende stadia in de hydrologische cyclus vindt zogenaamde fractionering plaats tussen de verschillende isotopen. Zeewater heeft een min of meer constante zuurstofisotopenverhouding ($\delta^{18}\text{O}$) die gedefinieerd is als 0 ‰. Als door verdamping wolken vormen boven de oceaan, zullen de watermoleculen die lichtere isotopen bevatten makkelijker verdampen. Wolken bevatten dus minder ^{18}O en hebben een negatieve $\delta^{18}\text{O}$ waarde. Als de wolken vervolgens landinwaarts bewegen zullen watermoleculen met ^{18}O ook nog eens eerder uitregenen (Figuur 1.8). Door deze processen is de $\delta^{18}\text{O}$ waarde van het regenwater steeds negatiever naarmate men verder landinwaarts komt. Neerslag die valt op grote hoogte of in een koud klimaat bevat extra weinig ^{18}O . Voor Europa resulteert dit in een karakteristieke water $\delta^{18}\text{O}$ kaart met lagere waarden landinwaarts en richting hogere breedtegraden en hoogten (Figuur 1.9).

De Maas is een regenrivier met het stroomgebied in Noordoost-Frankrijk, Oost-België en Zuid-Nederland. De gemiddelde $\delta^{18}\text{O}$ waarde bedraagt daarom ~ -7.1 ‰. Het Rijnstroomgebied ligt verder landinwaarts in de Zwitserse Alpen en Zuid-Duitsland. Deze rivier wordt niet alleen gevoed door regen, maar ook door smeltwater uit de Alpen. Dit resulteert in veel lagere gemiddelde $\delta^{18}\text{O}$ waarden van ~ -9.2 ‰. Naast deze gemiddelden vertonen beide rivieren seizoensmatige $\delta^{18}\text{O}$ patronen. In de Maas reflecteert $\delta^{18}\text{O}$ die van het grondwater tijdens de winter, wanneer de invloed van verdamping klein is. Tijdens de zomer zijn de $\delta^{18}\text{O}$ waarden hoger door verdamping en neerslag met hogere $\delta^{18}\text{O}$ waarden. Deze processen resulteren in zomermaxima van -6.0 tot -6.5 ‰ en minimale waarden van -7.7 tot -8.4 ‰ gedurende de winter. In de Rijn zorgt de extra input van smeltwater met hele lage $\delta^{18}\text{O}$ waarden gedurende de zomer voor een karakteristiek patroon met maximale waarden tijdens de winter van ~ -8.2 ‰ en zomerminima van ~ -10.0 ‰ (Figuur 1.10).

Stabiele koolstofisotopen

Het chemisch element koolstof heeft twee stabiele isotopen: ^{12}C (98.9 %) and ^{13}C (1.1 %) (en een radioactieve: ^{14}C , die hier verder buiten beschouwing gelaten wordt). De relatieve samenstelling van verschillende materialen kan sterk verschillen door fractioneringprocessen. Fractionering van stabiele koolstofisotopen vindt bijvoorbeeld plaats als koolstofdioxide (CO_2) oplost in water tot de verschillende componenten van opgelost anorganisch koolstof: waterstofcarbonaat (H_2CO_3), bicarbonaat (HCO_3^-) en carbonaat (CO_3^{2-}). Ook tijdens allerlei biologische processen vindt fractionering plaats. Fotosynthese bijvoorbeeld, selecteert sterk tegen ^{13}C . Dit resulteert in lage koolstofisotopenratio's ($\delta^{13}\text{C}$ waarden) voor plantenmateriaal.

Stabiele koolstofisotopenratio's van opgelost anorganisch koolstof in rivieren vertonen meestal een seizoensmatige cycliciteit. Achtergrondwaarden reflecteren normaal gesproken die van grondwater. In de winter zijn de waarden lager door de bijdrage van CO_2 afkomstig van de afbraak van landplanten die weinig ^{13}C bevatten. Tijdens de zomer zijn de waarden hoog, omdat de bijdrage van organisch materiaal van het land beperkt is, door isotopenuitwisseling met CO_2 in de atmosfeer en doordat fotosynthese van algen en waterplanten ^{12}C uit het opgelost anorganisch koolstof verwijderd. In de Maas en de Rijn liggen de waarden normaal gesproken tussen -8 ‰ in de zomer en -15 ‰ in de winter.

Doel en onderzoeksvragen

Het doel van deze studie is de mogelijkheden te onderzoeken de scheikundige samenstelling van zoetwatermossels toe te passen als proxy voor rivieromstandigheden in het verleden, om uiteindelijk laat Holocene rivieromstandigheden te kunnen reconstrueren. Binnen deze context worden de volgende onderzoeksvragen gesteld:

1. Worden seizoensmatig veranderende stabiele zuurstof- en koolstofisotopenratio's van het water vastgelegd in de groeibanden van zoetwatermossels? Welke ecologische parameters beïnvloeden de nauwkeurigheid van $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^{13}\text{C}$ waarden van de schelp als proxysysteem in de Maas en de Rijn? Worden verschillen in rivieromstandigheden tussen de Maas en de Rijn, zoals zichtbaar in zuurstofisotopenratio's van het water, vastgelegd in de schelpen?
2. Kunnen we modellen construeren voor groei binnen een seizoen en tussen meerdere jaren, gebaseerd op stabiele zuurstof- en koolstofisotopenchemie van rivierwater en gelijktijdige sclerochronologische

schelpendatareeksen?

3. Wat is de empirische relatie tussen gemeten water $\delta^{18}\text{O}$ waarden en debiet van de rivieren? Kunnen we water $\delta^{18}\text{O}$ waarden uit het verleden reconstrueren en vervolgens in verband brengen met gemeten debietwaarden? Kunnen seizoenen met extreem hoge en lage debieten herkend worden in gereconstrueerde water $\delta^{18}\text{O}$ waarden en debiet datareeksen?
4. Wat kunnen $\delta^{18}\text{O}$ datareeksen van zoetwatermossels ons vertellen over rivierontwikkelingen en klimaat gedurende het laat Holoceen? Kunnen we de effecten van laat Holocene klimaatschommelingen op honderd- tot duizendjaarlijkse schaal herkennen in de seizoensmatige signalen in zoetwatermossels? Wat waren de effecten van laat Holocene klimaatveranderingen op seizoensmatige water $\delta^{18}\text{O}$ waarden en gerelateerde rivieromstandigheden (de bijdrage van smeltwater uit de Alpen en zomerdroogtes in de Maas)?

Benadering

Voor het beantwoorden van deze vragen hebben we voor de volgende benadering gekozen:

1. De installatie van monitorstations in zowel de Rijn als de Maas. Locaties werden geselecteerd in vistrappen bij stuwen in de rivieren; een in Lith (Maas) en een in Hagestein (Lek, aftakking van de Rijn). Een vistrap is een klein kanaal dat vismigratie stroomopwaarts mogelijk maakt. Vistrappen zijn ideaal voor ons experiment, omdat het waterniveau hier relatief constant is en ze door hekken beschermd zijn tegen vandalisme. Er is een kooi ontworpen die sediment kan bevatten, zodat de mossels zichzelf in kunnen graven, maar zó, dat er ook water over de mossels kan stromen. Levende zoetwatermossels werden verzameld in het riviertje de Linge (een kleine aftakking van de Rijn), dat bekend staat om zijn hoge populatiedichtheid van deze dieren. De verzamelde mossels werden gemeten, gemerkt en in de kooien gezet. Gedurende 1,5 jaar werden iedere twee weken watermonsters genomen bij de monitorplaatsen en de watertemperatuur werd continu gemeten. Een gedetailleerde beschrijving van het monitorexperiment en de resultaten wordt gegeven in de hoofdstukken 2 en 3 van dit proefschrift.
2. De vergelijking van zuurstof- en koolstofisotopendatareeksen van schelpen uit geselecteerde twintigste-eeuwse tijdsintervallen met gemeten tijdseries van fysische en chemische rivierwaterdata. Deze data-

reeksen geven de mogelijkheid om de monitorresultaten te vergelijken met meerjarige schelpendatareeksen. Resultaten van de 20^{ste} eeuwse schelpen worden gepresenteerd in hoofdstuk 4, 5 en 6.

3. Toepassing van de ontwikkelde proxy op laat Holocene mollusken uit archeologische vondsten en paleogeografische boringen. Resultaten staan in hoofdstuk 7 van dit proefschrift en gaan voornamelijk over de Rijn, omdat archeologisch Maasmateriaal erg zeldzaam bleek te zijn.

Techieken

Om veranderingen in stabiele isotopenratio's in schelpen in de tijd waar te nemen, moeten interne groeibanden op hoge resolutie bemonsterd worden. Hiertoe werden de schelpen eerst ingegoten in epoxyhars, zodat ze niet zouden breken wanneer doorsneden van 300 μm dikte werden gemaakt. Deze doorsneden werden vervolgens op een glasplaatje gelijmd. Het glasplaatje werd vastgemaakt op een Micromill. Een Micromill is een tandartsboor verbonden aan een microscoop en een computer. De boor en de schelpsectie kunnen langs X, Y en Z-assen nauwkeurig ten opzichte van elkaar bewegen. Met de Micromill kunnen met grote precisie monsters genomen worden langs de groeilijnen in de parelmoerlaag van de schelp tot op een ruimtelijke resolutie van 30 μm (Figuur 1.12, 1.13 en 1.14). Hierna werden de $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^{13}\text{C}$ waarden van schelpmonsters op een van twee isotopenratio massaspectrometers gemeten (Figuur 1.15).

Vastlegging van water $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^{13}\text{C}$ waarden door zoetwatermossels

Zoetwatermossels in de Maas en de Rijn bouwen hun schelp op in zuurstofisotopisch evenwicht met het water. Seizoensmatige patronen in schelp $\delta^{18}\text{O}$ waarden zijn het resultaat van variatie in zowel water $\delta^{18}\text{O}$ waarden als temperatuur. Zoetwatermossel $\delta^{18}\text{O}$ datareeksen kunnen daardoor dienen als proxy voor $\delta^{18}\text{O}$ waarden van rivierwater in het verleden, waarvan dan vervolgens seizoensmatige variatie in debiet en rivierdynamiek kan worden afgeleid.

Schelpen uit de rivieren Maas en Rijn verschillen aanzienlijk van elkaar in gemiddelde $\delta^{18}\text{O}$ waarden. Dit verschil reflecteert het verschil in water $\delta^{18}\text{O}$ waarden tussen de twee rivieren (regenrivier en smeltwater-/regenrivier). Deze gemiddelde $\delta^{18}\text{O}$ waarden kunnen gebruikt worden om via fossiele mosselen uit een oud rivierkanaal te bepalen of die stroom werd gevoed door de Maas, de Rijn of beide rivieren.

De $\delta^{13}\text{C}$ waarde van opgelost anorganisch koolstof in de rivier heeft een

seizoensmatige cyclus met lage waarden in de winter en lente. Aan het begin van de zomer nemen de waarden abrupt toe als gevolg van verwijdering van ^{12}C door fotosynthese van fytoplankton. Deze seizoensmatige $\delta^{13}\text{C}$ cyclus wordt nauwkeurig vastgelegd in de $\delta^{13}\text{C}$ waarden van groeibanden van zoetwatermossels. $\delta^{13}\text{C}$ datareeksen van zoetwatermossels kunnen potentieel dienen als proxy voor primaire productiviteit in het verleden, hoewel andere parameters (bijvoorbeeld de bijdrage van metabolisch koolstof of CO_2 -uitwisseling met de atmosfeer) waarschijnlijk ook invloed hebben op $\delta^{13}\text{C}$ waarden van de schelp.

Groei van de schelpen

Nu bekend is dat zoetwatermossels zowel water $\delta^{18}\text{O}$ als $\delta^{13}\text{C}$ getrouw vastleggen in de schelp, kunnen we groei reconstrueren, zowel binnen een seizoen als over meerdere jaren. De seizoensmatige schelp $\delta^{18}\text{O}$ datareeksen hebben het patroon van een afgeknotte sinusoïde met smalle pieken en brede dalen. Dit patroon wordt veroorzaakt door een combinatie van de invloed van temperatuur op $\delta^{18}\text{O}$ en groeionderbrekingen tijdens de wintermaanden. Deze datareeksen kunnen gebruikt worden voor de nauwkeurige reconstructie van groei over meerdere jaren. In de eerste 2 tot 3 jaar van hun leven groeien zowel *Unio pictorum* als *U. tumidus* relatief snel. Daarna vertraagt de groei aanzienlijk. Een dergelijke afname van groeisnelheid gedurende het leven komt veel voor bij zoetwatermossels.

Inzicht in de groei binnen een seizoen, wordt verkregen door de constructie van een niet-lineair model, gebaseerd op de correlatie van $\delta^{18}\text{O}$ en $\delta^{13}\text{C}$ variatie in water en schelpen. De start van de groei in de lente en groeistop in de herfst worden geïnduceerd door watertemperatuur, terwijl groeisnelheid binnen het seizoen het resultaat is van primaire productiviteit (voedselbeschikbaarheid).

Het verband tussen water $\delta^{18}\text{O}$ waarden en debiet

Voor de beoogde toepassing van schelp $\delta^{18}\text{O}$ waarden als proxy voor debiet moeten we eerst de relatie tussen debiet en schelp $\delta^{18}\text{O}$ waarden karakteriseren. Voor de Maas is die relatie logaritmisch. Dit biedt de mogelijkheid debiet uit het verleden te reconstrueren via gereconstrueerde water $\delta^{18}\text{O}$ waarden.

Periodes van laag debiet ($\leq 6 \text{ m}^3/\text{s}$) tijdens de zomer worden meestal vastgelegd in de schelpen. Uit deze studie blijkt dat periodes van hoog debiet niet kunnen worden gereconstrueerd uit schelpen $\delta^{18}\text{O}$ datareeksen. Dit komt doordat de voorspellende kracht van water $\delta^{18}\text{O}$ waarden voor debiet

bepikt is in de normaal tot hoog debiet situatie, vanwege de logaritmische relatie tussen deze twee variabelen.

Voor de Rijn werd geen significante relatie gevonden tussen debiet en water $\delta^{18}\text{O}$ waarden, omdat het een gecombineerde regen-/smeltwaterriever is en de relatie tussen $\delta^{18}\text{O}$ waarden en debiet daardoor complexer dan in de Maas. Kwantitatieve reconstructie van water $\delta^{18}\text{O}$ waarden en debiet uit het verleden door middel van zoetwatermossel $\delta^{18}\text{O}$ waarden is daarom niet mogelijk. Extreem grote smeltwaterbijdrages uit de Alpen kunnen waarschijnlijk wel worden gedetecteerd door hun zeer lage water $\delta^{18}\text{O}$ waarden.

Het Holoceen

De laatste stap naar reconstructie van rivierdynamiek in het verleden, is de analyse van laat Holocene schelpen.

Er is al veel onderzoek gedaan naar de variaties in het klimaat van Europa gedurende het laat Holoceen. Hoewel in deze recente geologische periode de fluctuaties in temperatuur en neerslaghoeveelheden meestal klein zijn in vergelijking met de grote glaciaal-interglaciaal oscillaties van het Pleistoceen, zijn er ook enkele grotere klimaattrends en oscillaties beschreven. Rond 5000 jaar geleden had West-Europa een warm en droog klimaat. Dit duurde tot ongeveer 2800 jaar geleden. Toen veranderde het klimaat vrij abrupt naar koelere en nattere omstandigheden. In de Romeinse tijd beschrijven enkele auteurs een warmere periode, gevolgd door een koudere periode tussen 400 en 700 n. Chr. De Middeleeuwse Warme Periode duurde ongeveer van 950 tot 1200 en wordt gekarakteriseerd door opvallend warme, droge zomers en natte winters. De temperatuur was vergelijkbaar met die van de eerste helft van de twintigste eeuw. De koudste fase van het laat Holoceen, de periode tussen 1550 en 1700, wordt de Kleine IJstijd genoemd. De Kleine IJstijd wordt gekenmerkt door zeer strenge winters en natte zomers, die maar weinig kouder waren dan tegenwoordig.

Alle bestudeerde schelpen uit het verleden hebben gemiddelde, minimale en maximale $\delta^{18}\text{O}$ waarden die vallen binnen de bandbreedte van de recente exemplaren. Dat wijst erop dat de smeltwaterhoeveelheden en de ernst van droogtes toen hetzelfde waren als tegenwoordig. Waarschijnlijk zijn de klimaatvariaties op de schaal van honderden tot duizenden jaren te subtiel om makkelijk herkend te worden in deze datareeksen. De grote variatie in milieuomstandigheden tussen de jaren en binnen een groeiseizoen zorgt voor een aanzienlijke hoeveelheid ruis in de schelp $\delta^{18}\text{O}$ datareeksen. Hieruit kunnen we concluderen dat deze schelpen beter geschikt zijn voor

het bestuderen van omgevingsvariabiliteit op een schaal van seizoenen tot maximaal tientallen jaren.

Twee middeleeuwse schelpen vertonen variatie in gereconstrueerde water $\delta^{18}\text{O}$ waarden, met een periode van ~ 7 tot 10 jaar. Mogelijk is dit het gevolg van variabiliteit in de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO), die sterk gerelateerd is aan weerspatronen in Europa gedurende de lente en de zomer, en bijbehorende rivierafvoer.

Om sterkere conclusies te kunnen trekken over variabiliteit in rivierdynamiek tijdens het laat Holoceen, zou een grotere hoeveelheid schelpen, met daarin een veelvoud aan groeiseizoenen, geanalyseerd moeten worden. De schijnbare detectie van NAO-variabiliteit prikkelt de nieuwsgierigheid en roept om meer onderzoek aan zoetwatermossels uit de Middeleeuwen, vooral aan langlevende soorten.

Conclusies

Deze studie onderzoekt schelpchemie van zoetwatermossels als proxy voor rivierdynamiek in het verleden. Het is een van de eerste studies waarbij een monitorexperiment gecombineerd wordt met de analyse van een verzameling recente monsters uit het wild, en met de toepassing van de proxy op laat Holoceen materiaal. We hebben laten zien dat drie soorten *Unio* hun omgeving getrouw vastleggen met betrekking tot zowel stabiele isotopen van zuurstof als van koolstof. Dit maakt *Unio*'s nuttig voor toepassing in paleoklimatologisch onderzoek.

Door verschillende hoge-resolutie chemische datareeksen te combineren, konden we modellen construeren voor groei van de schelp, zowel tussen de jaren als binnen één seizoen.

De grote variatie in omstandigheden tussen verschillende plaatsen in de rivier en tussen verschillende tijdstippen zorgt voor een aanzienlijke hoeveelheid ruis in het klimaatsignaal. Dit betekent dat zowel lokale omstandigheden als omgevingsvariatie tussen de seizoenen het laag-frequente klimaatgerelateerde signaal in deze schelpen kunnen verhullen. In vergelijking met de meeste zoetwatersystemen zijn de omstandigheden in zeeën en oceanen meestal stabiel met betrekking tot temperatuur en water $\delta^{18}\text{O}$. Daarom zijn de datareeksen van zoetwaterschelpen moeilijker te interpreteren dan hun mariene equivalenten.

Deze problemen kunnen geminimaliseerd worden door voldoende schelpen per tijdsinterval te analyseren, en zo het volle bereik aan variabiliteit te meten. Ook zijn nauwkeurige groei modellen nodig om inzicht te krijgen in de groei tussen de jaren en binnen één seizoen. Zo kunnen

beschikbare klimaatdata nauwkeuriger gekoppeld worden aan schelpmonsters. Verder is het wenselijk meerdere proxy's binnen een organisme te gebruiken, zoals bijvoorbeeld de combinatie van stabiele isotopenratio's met diverse sporenelementen. Daarmee worden de foutmarges op klimaatreconstructies kleiner. Rivierdebiet kan ook op een andere manier gereconstrueerd worden, namelijk door het zoutgehalte in de monding van een rivier te bepalen op basis van $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ en bariumdatareeksen in zoutwaterschelpen. De combinatie van deze methodes met zoetwatermossel $\delta^{18}\text{O}$ datareeksen kan de reconstructie van het debiet betrouwbaarder maken. Als aan bovenstaande suggesties voldoende tegemoetgekomen wordt, kunnen stabiele isotopenratio's in archeologische schelpen dienen als proxy voor het reconstrueren van rivierdynamiek, eventuele droogtes en smeltwaterbijdrage. Zulke reconstructies zijn belangrijk voor het valideren van modellen die de invloed van toekomstige klimaatveranderingen in de Rijn-Maasdelta voorspellen.