



WAGENINGEN  
UNIVERSITY & RESEARCH

## Gezond bodemleven als sleutel voor een robuust Markermeer

Landschap : tijdschrift voor landschapsecologie en milieukunde

Verdonschot, P.F.M.; Riel, M.C.; Verdonschot, R.C.M.

[https://www.landschap.nl/wp-content/uploads/2021\\_1\\_14-23Verdonschot.pdf](https://www.landschap.nl/wp-content/uploads/2021_1_14-23Verdonschot.pdf)

This publication is made publicly available in the institutional repository of Wageningen University and Research, under the terms of article 25fa of the Dutch Copyright Act, also known as the Amendment Taverne. This has been done with explicit consent by the author.

Article 25fa states that the author of a short scientific work funded either wholly or partially by Dutch public funds is entitled to make that work publicly available for no consideration following a reasonable period of time after the work was first published, provided that clear reference is made to the source of the first publication of the work.

This publication is distributed under The Association of Universities in the Netherlands (VSNU) 'Article 25fa implementation' project. In this project research outputs of researchers employed by Dutch Universities that comply with the legal requirements of Article 25fa of the Dutch Copyright Act are distributed online and free of cost or other barriers in institutional repositories. Research outputs are distributed six months after their first online publication in the original published version and with proper attribution to the source of the original publication.

You are permitted to download and use the publication for personal purposes. All rights remain with the author(s) and / or copyright owner(s) of this work. Any use of the publication or parts of it other than authorised under article 25fa of the Dutch Copyright act is prohibited. Wageningen University & Research and the author(s) of this publication shall not be held responsible or liable for any damages resulting from your (re)use of this publication.

For questions regarding the public availability of this publication please contact [openscience.library@wur.nl](mailto:openscience.library@wur.nl)



# Gezond bodemleven als sleutel voor een robuust Markermeer

Gaan we met de huidige maatregelen in het Markermeer het doel van de Rijksnatuurambitie, het bereiken van een robuust, dynamisch en veerkrachtig watersysteem, wel realiseren? Meer inzicht in het functioneren van het Markermeer roept gerede twijfel op. De meeste aandacht gaat naar de waterkolom, terwijl een belangrijk deel van de oplossing voor de problemen in het Markermeer juist te vinden is in de bodem. Een analyse van voedsel- en niet-voedselrelaties van bodembewonende macrofauna laat zien waarom.

Het Markermeer staat al sinds zijn ontstaan in 1976 onder grote menselijke druk, door lozingen van onder andere nutriënten, organisch materiaal en gifstoffen en door een intensieve binnenvisserij. Tegelijkertijd ontwikkelde het meer zich tot een belangrijke internationale broed-, rust- en overwinteringsplaats voor grote aantallen (migrerende) vogels, waarbij een hoge voedselrijkdom parallel liep aan de hoge vogeldichtheid. Sinds de jaren negentig van de vorige eeuw verarmt de vogelsamenstelling en -dichtheid, onder andere voor diverse vogelsoorten waarvoor volgens de Natura 2000 (N2000)-wetgeving een instandhoudingsdoelstelling geldt. Ook voldoet het meer niet aan de waterkwaliteitseisen gesteld door de Kaderrichtlijn Water (KRW).

Om de achteruitgang van vogels te keren en de kwaliteit van het oppervlaktewater te verbeteren is in 2014 de Natuurambitie Grote Wateren (NAGW) gepresenteerd, een uitwerking van de Rijksnatuurvisie. Hierin staat het streven naar robuuste, dynamische en veerkrachtige natuur centraal. De uitgangspunten zijn: aansluiten bij natuurlijke processen, synergie met andere gebruiksfuncties, natuur midden in de samenleving en aansluiten bij autonome ontwikkelingen. Kerndoel is het bereiken van een situatie waarin voldoende natuurlijke dynamiek zorgt voor het behalen van KRW- en N2000-doelen, terwijl tegelijkertijd economische gebruiksfuncties kunnen floreren.

Om deze ambitie te bereiken zijn recent in en om het Markermeer verschillende maatregelen genomen, zoals

de aanleg van vooroevers, oeverontwikkelingen langs de Houtribdijk, de aanleg van de Markerwadden en het instellen van visserijbepalingen. Maar leiden deze maatregelen wel tot het gewenste robuuste Markermeer? Om deze vraag naar het ecologisch functioneren te beantwoorden is op basis van de principes uit het 5S-Model (aangepast aan de omstandigheden van het Markermeer; Verdonschot, 2020; figuur 1) gekeken naar de belangrijkste sleutelprocessen en -soorten. Eén van de belangrijkste groepen van organismen in meren is de macrofauna die op de bodem leeft. Om de rol van het benthos (de verzameling van alle bodemorganismen) in het Markermeer in beeld te brengen is een intensieve meetcampagne uitgevoerd en zijn voedsel- en niet-voedselrelaties geanalyseerd, met name bodemomwoeling (bioturbatie), bodem-wateruitwisseling (bio-irrigatie) en filtratie.

## De ecologische relevantie van het benthos

Het belang van biobouwers is reeds lange tijd bekend. Een biobouwer is een plant of dier die zijn leefgebied creëert, wijzigt, onderhoudt of vernietigt, zoals bijvoorbeeld de bever die zijn leefgebied sterk verandert door het bouwen van een dam en zo effect heeft op de gehele gemeenschap stroomop- en stroomafwaarts van de dam. Over biobouwers in meren is minder bekend, met uitzondering van de driehoeks- en quaggamosselen die steeds vaker worden ingezet om het water van meren helder te krijgen. De rol van het benthos als biobouwer van de zachte meerbodem is lange tijd over het hoofd ge-

macrofauna  
benthos  
voedselrelaties  
bioturbatie  
bio-irrigatie  
nutriëntenstromen

**P.F.M. (Piet)**

**Verdonschot**

Wageningen Environmental Research (WUR), Kennisgroep Zoetwaterecosystemen, Postbus 47, 6700 AA Wageningen, piet.verdonschot@wur.nl

**M.C. (Mariëlle) van Riel**

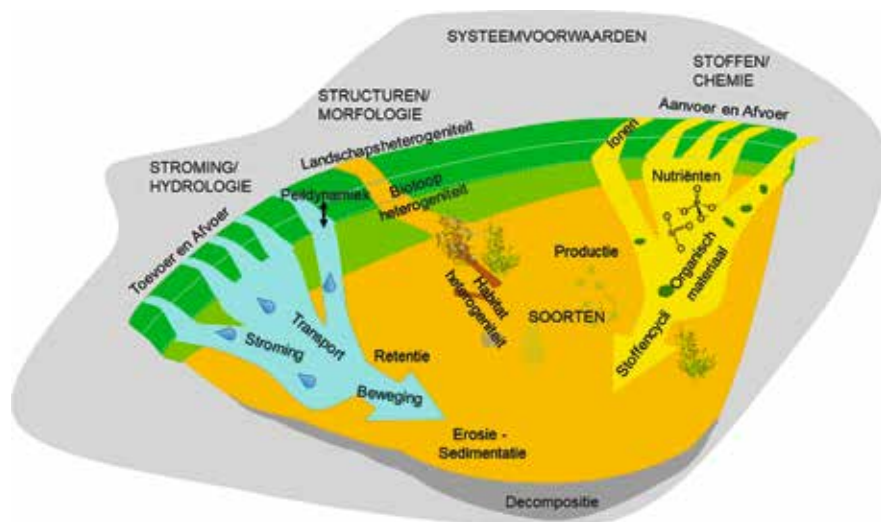
Wageningen Environmental Research (WUR)

**R.C.M. (Ralf)**

**Verdonschot**

Wageningen Environmental Research (WUR)

Foto **Piet Verdonschot**, Markermeer.



**Figuur 1** De vijf hoofdcomponenten in het Markermeer, ingedeeld op basis van het 5S-model: Systeemvoorwaarden, Stroming, Structuren, Stoffen en Soorten (Verdonschot, 2020).

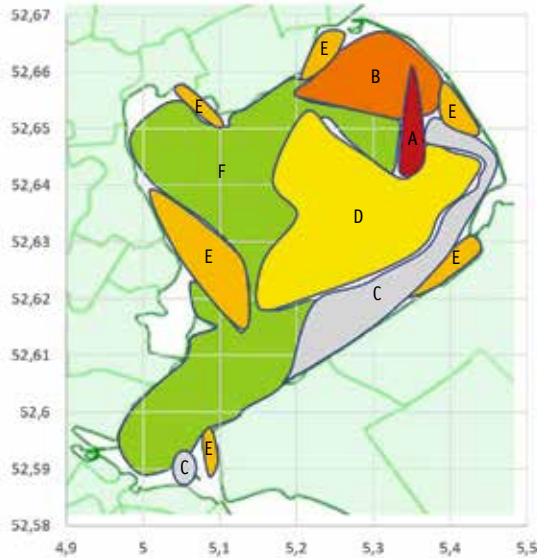
**Figure 1** The five key components in the lake Markermeer according to the 5S-Model: System conditions, Flow, Structures, Substances and Species (Verdonschot, 2020).

zien, maar blijkt cruciaal. Zoetwaterborstelwormen en dansmuglarven blijken uiterst belangrijke biobouwers. Borstelwormen en andere bodembewoners woelen de bodem om, graven gangen en irrigeren daarmee de bovenste bodemlaag, waardoor een dynamisch, driedimensionaal mozaïek van zuurstofrijke en zuurstofloze omstandigheden ontstaat. Dit mozaïek bepaalt de samenstelling en ruimtelijke verdeling van de microbiële gemeenschap in de meerbodem en stuurt de biochemische bodem- en bodem-wateruitwisselingsprocessen, vooral op het grensvlak tussen de zuurstofrijke en de zuurstofloze zone. Hier wordt het organische materiaal dat naar de bodem zinkt, zoals afgestorven algen en resten van moeras- en waterplanten, afgebroken en omgezet naar voedingsstoffen die terugkeren naar de waterkolom. Wormen en dansmuglarven kunnen grote watervolumes met bijbehorende zwevende en opgeloste stoffen door het sediment pompen en daarmee concurreren met de pelagische filtreerders van fijn organisch materiaal.

Hierdoor kunnen de ongewervelden een hoge begravingdruk uitoefenen op fytoplankton, micro-organismen en mogelijk klein zoöplankton. Het benthos versterkt de verbinding tussen meerbodem en waterkolom. Het benthos is wereldwijd in ondiepe meren waarschijnlijk de belangrijkste factor die, via het veranderen van niet-voedselrelaties (omwoeling, irrigatie en filtratie) in de meerbodem, het verloop van de biogeochemische processen bepaalt en daarmee de belangrijkste factor voor de overgang tussen troebel en helder water (Hölker et al., 2015; Puche et al., 2020). Verrassend genoeg wordt nog steeds weinig rekening gehouden met dit mechanisme, terwijl deze rol van het benthos bepalend is voor het functioneren van meren (Hölker et al., 2015). Studies naar het belang van voedsel- en niet-voedselrelaties concluderen dat de niet-voedselrelaties bepalend zijn voor het functioneren van ondiepe meren en niet mogen ontbreken in bijvoorbeeld modelstudies (Puche et al., 2020). Het benthos vormt daarnaast veruit het grootste deel van het voedsel van vissen en vogels (60-75%) en speelt zo een sleutelrol in de voedselbeschikbaarheid voor de hogere trofische niveaus. Gezien deze belangrijke rol is de hypothese dat het huidig en toekomstig functioneren van het Markermeer in belangrijke mate gestuurd wordt door de voedsel- en niet-voedselrelaties van het benthos.

### Monstername

Om een volledig beeld van het benthos te krijgen zijn 88 locaties, gelijkmatig verspreid over het Markermeer, bemonsterd met een Van Veen-bodemhapper (bemonsterd oppervlak 460 cm<sup>2</sup>). Het verzamelde benthos is zo veel mogelijk tot op soort gedetermineerd. Tegelijk met de monsternamen zijn de waterdiepte en (op een diepte van 1 m) watertemperatuur, geleidbaarheid, zuurstofgehalte en doorzicht gemeten. Op basis van de inhoud van de bodemhapper is de substraatsamenstelling vastgelegd.



## Benthosgemeenschappen

In totaal zijn in de 264 monsters 94.500 individuen aangetroffen, verdeeld over 76 taxa. Per monster werden tussen de 2 en 25 taxa verzameld. 56% van het totale aantal individuen bestond uit zoetwaterborstelwormen (*Tubificidae*), gevolgd door de uitheemse mariene borstelworm (*Hypania invalida*: *Polychaeta*) (17%) en de driehoeksmosselen (*Dreissena* spp.) (8%). Op basis van biomassa nemen de driehoeksmosselen echter de tweede plaats in na de zoetwaterborstelwormen (zie tabel 1). Op basis van een niet-hiërarchische clusteranalyse (van Tongeren, 1986) zijn zes voor het Markermeer specifieke benthosgemeenschappen onderscheiden, die een duidelijk ruimtelijk patroon over het Markermeer laten zien (figuur 2, tabel 2). De gemeenschappen zijn getypeerd op basis van de abundantie en biomassa van de meest dominante taxa.

De zoetwaterborstelwormengemeenschap (A) is zeer arm aan soorten, heeft een erg lage biomassa en vertoont nauwelijks overeenkomsten met andere gemeenschappen (tabel 2). De rijkste gemeenschap van driehoeksmosselen, borstelwormen en vlokreeften (F) bevat veel soorten in hogere aantallen, een zeer hoge biomassa en komt sterk overeen met de gemeenschap van borstelwormen, driehoeksmosselen en lijnpissebedden (E). Er zijn zo wie so grote overeenkomsten tussen de vier op veel locaties gevonden gemeenschappen C, D, E en F (tabel 2).

TAXONOMISCHE GROEP	GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN (#/M <sup>2</sup> )	GEMIDDELDE BIOMASSA (G/M <sup>2</sup> )
Amphipoda	296	0.51997
Arachnida	51	0.00431
Bivalvia	649	3.43754
Diptera: Ceratopogonidae	0.1	0.00002
Diptera: Chironomidae	519	0.04552
Diptera: overige families	0.2	0.00005
Ephemeroptera	0.1	0.00001
Gastropoda	111	0.06787
Hirudinea	0.1	0.00056
Hydrozoa	2.0	0.00030
Isopoda	73	0.35052
Lepidoptera	0.3	0.00046
Mysida	1.1	0.00050
Oligochaeta	4790	11.44193
Polychaeta	1285	1.44793
Trichoptera	0.7	0.00103
Turbellaria	2.7	0.00099

**Figuur 2** De verspreiding van de zes benthosgemeenschappen in het Markermeer.

**Figure 2** The distribution of the six benthic communities in lake Markermeer.

- A arme zoetwaterborstelwormen
- B driehoeksmosselen
- C zoetwaterborstelwormen
- D borstelwormen
- E borstelwormen + driehoeksmosselen + lijnpissebedden
- F driehoeksmosselen + borstelwormen + vlokreeften

**Tabel 1** Het gemiddeld aantal individuen en de gemiddelde biomassa (g) per hoger taxon per m<sup>2</sup> in het Markermeer.

**Table 1** The mean number of individuals and the mean biomass (g) per higher taxon per m<sup>2</sup> in lake Markermeer.

**Tabel 2** Karakterisering van de zes benthogemeenschappen.

**Table 2** Characterization of the six benthic communities.

GEMEENSCHAP	AANTAL MONSTERS	TOTAAL AANTAL TAXA	GELIJKEND OP	SIMILARITEIT GELIJKEND CLUSTER (%)	GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN (M <sup>2</sup> )	GEMIDDELDE BIOMASSA (G/M <sup>2</sup> )
A zoetwaterborstelwormen (arm)	7	12	Geen	43	314	32
B driehoeksmosselen	14	26	F	47	1357	165
C zoetwaterborstelwormen	45	42	D	71	6068	660
D borstelwormen	68	40	E	82	7507	686
E borstelwormen + driehoeksmosselen + lijnpissebedden	56	60	D	82	9206	731
F driehoeksmosselen + borstelwormen + vlokreeften	69	65	E	70	10593	992

\* borstelwormen= zoetwater- en mariene borstelwormen

### Voedselvoorkeur van benthogemeenschappen

De aantallen individuen zijn omgerekend naar biomassa per m<sup>2</sup> op basis van uit de literatuur verkregen gemiddelde verhouding lengte:biomassa (mg drooggewicht) voor de verschillende taxa. De voedselvoorkeur is gebaseerd op taxonspecifieke informatie verkregen uit de Europese database [www.freshwaterecology.info](http://www.freshwaterecology.info) en aangevuld met diverse literatuurgegevens. Op basis van de biomassa is het aandeel van de verschillende voedselvoorkeuren per gemeenschap berekend.

De gemeenschap van driehoeksmosselen (B) heeft vooral een voorkeur voor microfyten (algen), terwijl de zoetwaterborstelwormengemeenschap (C) zich vooral voedt met fijne detritus (figuur 3). De overige gemeenschappen vertonen meer variatie in voedselvoorkeur, met de grootste spreiding in de soortenrijke gemeenschap van driehoeksmosselen, borstelwormen en vlokreeften (F). Opvallend is dat de arme zoetwaterborstelwormengemeenschap (A) toch een grote variatie in voedselvoor-

keuren laat zien, omdat de twaalf aanwezige taxa verspreid zijn over veel verschillende taxonomische ordes en sterk verschillen in voedselvoorkeur (figuur 3, A).

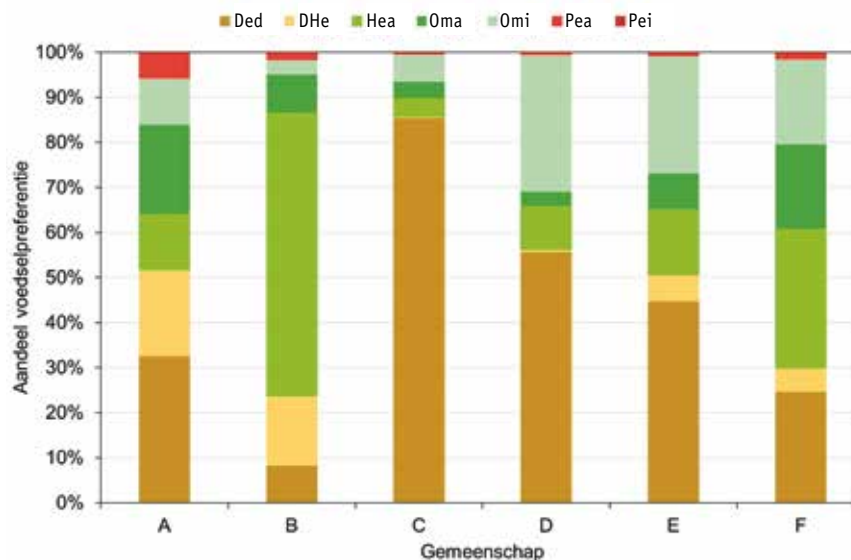
De bodem van het Markermeer wordt vooral bewoond door detritivore (detrituseters) en detriti-herbivore (eters van fijn dood organisch materiaal en levende micro-organismen) vergaarders en verzamelaars-filteraars behorend tot de groep van ringwormen (*Annelida*), en door herbivore (microfytenetende) filteraars behorend tot de groep van tweekleppigen (*Bivalvia*). Beide groepen vormen samen voor 69% de basis van het volledige voedselweb van het Markermeer.

### Bodemomwoeling (bioturbatie)

Een sterke bodemomwoeling is belangrijk voor een robuust, veerkrachtig watersysteem. De mate van bodemomwoeling (het bioturbatiepotentieel) en de biogene mengdiepte zijn per gemeenschap berekend op basis van drie kenmerken per taxon (Solan *et al.*, 2004): biomassa, mobiliteit en mate van sedimentverplaatsing (zie

o.a. François *et al.*, 1997; Caliman *et al.*, 200; figuur 4). Het bioturbatiepotentieel is een dimensieloze maat om de bioturbatie-activiteit van gemeenschappen te vergelijken. Het bioturbatiepotentieel voor de gemeenschap van zoetwaterborstelwormen (arm; A) en de driehoeksmosselen (B) is laag ( $< 210$ ; figuur 4). Dit is niet verrassend; de eerste gemeenschap telt weinig individuen en komt voor in organisch arm, zandig substraat, terwijl de tweede gemeenschap vooral leeft en filtreert op harde substraten. De vier andere gemeenschappen hebben een vergelijkbaar bioturbatiepotentieel, maar de spreiding tussen de locaties waar de gemeenschappen voorkomen is groot.

Het bioturbatiepotentieel geeft een indicatie van de mate van omwoeling van het sediment en correleert met onder andere het organisch koolstofgehalte, de zuurstofdoordringing, het zuurstofverbruik en de denitrificatie in het sediment (Solan *et al.*, 2004; Birchenough *et al.*, 2012; Braeckman *et al.*, 2014; Wrede, 2020). De absolute betekenis van het potentieel is nog onduidelijk, omdat er nog geen vergelijkingsmateriaal is van zoete wateren. De gepubliceerde waarden hebben alle betrekking op mariene systemen; zo vonden Gogina *et al.* (2017) waarden tot 1500 voor modder- en tot 8000 voor zandbodems. Wrede (2020) vond waarden van 1 tot 15.000. Daarmee vergeleken is het bioturbatiepotentieel in het Markermeer laag. Als in het Markermeer grote tweekleppigen (*Bivalvia*) voor zouden komen, zoals de zwanenmossel en vijvermossel (*Anodonta cygnea*; *A. anatina*) en de schildersmossel en bolle stroommossel (*Unio pictorum*; *U. tumides*), dan zou de bioturbatie veel groter zijn. Deze taxa komen wel voor in het Peipsimeer, een meer op de grens van Estland en Rusland dat vaak als referentie wordt gebruikt voor het Markermeer. Herstel van dergelijke populaties is mogelijk met de toevoer van geschikt



**Figuur 3** Het gemiddelde aandeel voedselvoorkeuren van de zes benthogemeenschappen. Ded=fijne detritus ( $\leq 1\text{mm}$ ), DHe=kleine deeltjes (detritus, microfyten), Hea=microfyten, Oma=grote levende en dode deeltjes, Omi=kleine levende en dode deeltjes, Pea=levende macrofauna, Pei=levende microfauna.

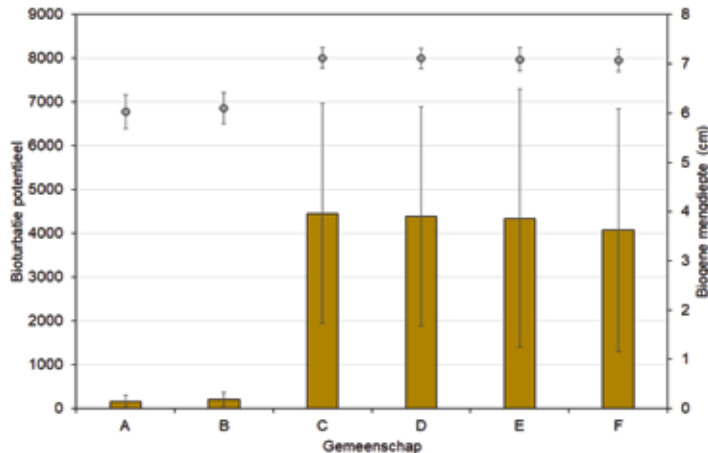
**Figure 3** The mean proportion of food preferences for the six benthic communities. Ded=fine detritus ( $\leq 1\text{mm}$ ), DHe=small particles (detritus, microphytes), Hea=microphytes, Oma=large living and dead particles, Omi=small living and dead particles, Pea=living macroinvertebrates, Pei=living microfauna.

organisch materiaal, waarbij de verbinding met de Oostvaardersplassen mogelijkheden biedt om deze verbetering in de praktijk te toetsen.

De bioturbatie leidt, op basis van aannames uit een marien systeem, tot een gemiddelde biogene mengdiepte van circa 7 cm. Experimenten met de bioturbatie door zoetwaterborstelwormen liet een omwoeling van 5 cm (Saaltink *et al.*, 2019) tot 14 cm diepte zien, met een hoogste intensiteit tot 3 cm diepte (Bos, 2016). Waarschijnlijk benadert deze berekende gemiddelde biogene mengdiepte de werkelijke mengdiepte, maar nadere metingen in de bodem zullen dit moeten bevestigen.

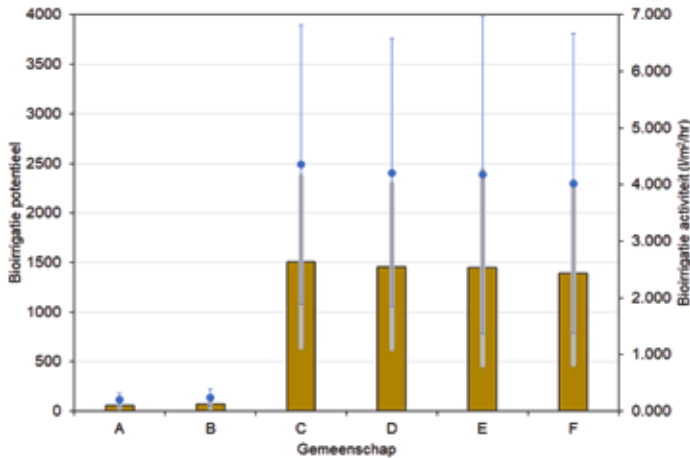
### Bodem-water uitwisseling (bio-irrigatie)

De mate van wateruitwisseling tussen bodem en waterkolom wordt uitgedrukt in het bio-irrigatiepotentieel en de bio-irrigatieactiviteit, waarbij geldt: hoe sterker de irrigatie, hoe beter de nutriëntenstromen. Ook deze parameters zijn per gemeenschap berekend met vier rele-



**Figuur 4** Het gemiddelde bioturbatie-potentieel ( $\pm$ sd) en de gemiddelde biogene mengdiepte ( $\pm$ sd) voor de zes benthosgemeenschappen.

**Figure 4** The mean bioturbation potential ( $\pm$ sd) and the mean biogenic mixing depth ( $\pm$ sd) for the six benthic communities.



**Figuur 5** Het gemiddelde bio-irrigatie-potentieel ( $\pm$ sd) en uw de gemiddelde bio-irrigatie activiteit (l/m<sup>2</sup>/hr) ( $\pm$ sd) voor de zes benthosgemeenschappen.

**Figure 5** The mean bioirrigation potential ( $\pm$ sd) and the mean bioirrigation activity (l/m<sup>2</sup>/hr) ( $\pm$ sd) for the six benthic communities.

vante soortkenmerken per taxon (Renz et al., 2018): biomassa, graafwijze, voedingswijze en indringingsdiepte. De bio-irrigatie is laag in de gemeenschappen A en B, om dezelfde redenen als het bioturbatiepotentieel, en opnieuw hoog en onderling vergelijkbaar in de overige gemeenschappen (figuur 5). In de gebieden waar deze gemeenschappen voorkomen wordt per m<sup>2</sup> gemiddeld 4 (1.5-7.0) liter poriewater per uur geïrrigeerd, waarschijnlijk in de bovenste 7 cm sediment. Tweekleppigen, chironomiden en gravende eendagsvliegen zouden de bio-irrigatie in het Markermeer aanzienlijk kunnen vergroten. In het Eriemeer zorgen eendagsvliegen voor een orthofosfaatflux vanuit de bodem naar de waterkolom van 1.4 mg/m<sup>2</sup>/dag (Chaffin & Kane, 2010) en vedermuggen in het Mendotameer veroorzaakten een flux van 9.4 mg/m<sup>2</sup>/dag (Gallepp, 1979).

## Waterfiltratie

In het Markermeer spelen de driehoeksmossel en quagga-mossel (*Dreissena bugensis*) een belangrijke rol in de nutriëntenstromen. Het zijn geen bodemomwoelers maar filtreerders, die als het ware de waterkolom zuiveren. Deze dieren vormen hele mosselbanken en filteren het water, waarbij algen worden opgenomen en slijbdeeltjes en niet-eetbare algen worden afgevoerd in pellets als pseudofaeces. Reeders et al. (1989) concludeerden dat het Markermeer in 11-18 dagen volledig werd gefiltreerd (dichtheid 170-190 individuen/m<sup>2</sup>). De gemiddelde dichtheid van mosselen bedraagt momenteel circa 640 individuen/m<sup>2</sup>. De filtratiesnelheid van de mosselpopulatie in 2016 wisselde tussen de 0.08 en de 33 (l/m<sup>2</sup>/hr). De in 2016 verzamelde mosselen waren gemiddeld relatief klein. De meeste filtratie vond plaats in de gebieden waar de gemeenschappen van driehoeksmosselen (B) en van driehoeksmosselen, borstelwormen en vlokreeften (F) voorkomen.



## Het benthos als biobouwer, de sleutel voor herstel?

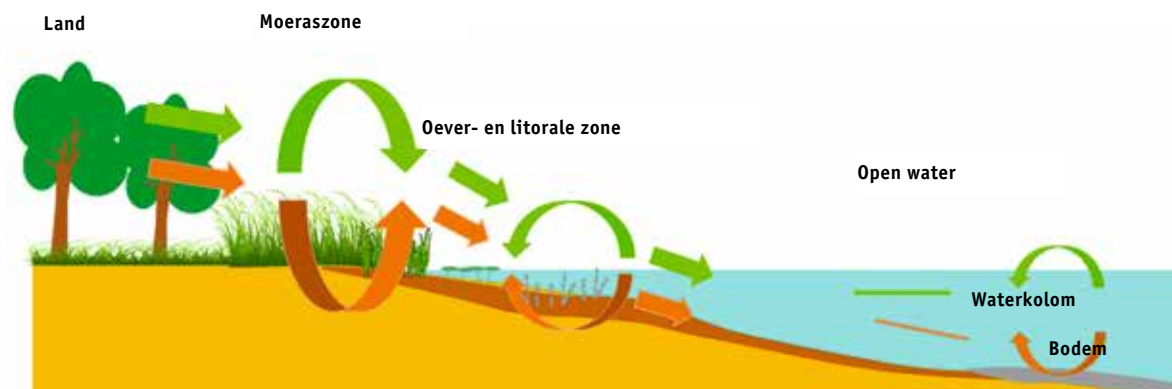
Dit onderzoek laat zien dat het Markermeer een benthosgemeenschap heeft, maar met een relatief lage dichtheid aan organismen, een beperkte biomassa en een arme en vooral eenzijdige taxonomische samenstelling. Sommige groepen die in andere meersystemen een belangrijke rol spelen, zoals zwanenmosselen en eendagsvliegen, zijn ondervertegenwoordigd of afwezig. Ook blijven individuen, zoals de mosselen, achter in hun groei. Er kan dan ook gesteld worden dat het matig ontwikkelde benthos één van de belangrijke oorzaken is achter de zwakke benthisch-pelagische koppeling in het Markermeer.

Een gebrek aan beschikbaar organisch materiaal De concentraties opgelost anorganisch fosfor in het Markermeer zijn gedurende de afgelopen decennia jaar rond laag (Noordhuis, 2010). Daarnaast is het water continu troebel (mediane Secchi-diepte 20 cm) als gevolg van winderosie en -resuspensie van fijn sediment van de bodem. Door de voedselverarming (oligotrofiëring) is pelagisch de competitie om voedingsstoffen verschoven naar competitie om licht, met een verschuiving naar

kleine algen tot gevolg (Burson *et al.*, 2018). Deze kleine algen gaan een tijdelijke aggregatie (vlokvorming) aan met bacteriën en gesuspendeerd slib in de waterkolom, waarbij de bacteriën fosfaten vrijmaken uit het slib die weer door de algen benut worden (Brinkman *et al.*, 2019). Deze aggregaten of vlokken zijn door hun hoge slibgehalte (circa 77%) minder geschikt als voedsel voor de filtreerders. De aggregaten zakken uit naar de bodem en vallen daar uiteen. Het bodemslib bevat echter voldoende fosfaat (0.5 g/kg) voor een voedselrijkere toestand van het meer, bijna tweemaal zo veel als de mariene klei (0.3 g/kg) daaronder. Het in circulatie komen van dit fosfaat zou de voedselketen in het meer in belangrijke mate kunnen versterken. De beschikbare fractie organisch materiaal in de bodem is echter ook laag en de kleine algen voegen daar onvoldoende aan toe. Dit betekent dat het bodemleven van het Markermeer een tekort heeft aan beschikbaar organisch materiaal met voldoende voedingswaarde voor het bodemomwoelende deel van het benthos. Met andere woorden: Als er meer fosfaat uit de bodem beschikbaar komt voor de voedselketen wordt er meer organisch materiaal gevormd en gaat het bodemleven beter functioneren.

**Figuur 6** Voedingsstoffen (groene pijlen) en organisch materiaal (bruine pijlen) 'stromen' via onderling gekoppelde nutriëntencycli (de groen-bruine cirkels) van land naar water; volgens het concept van de nutriëntenspiraal. Het omringende land en de grote moerasgebieden en grote oppervlakken litorale zones rondom het Markermeer dienen als motor voor een goed functioneren.

**Figure 6** Nutrients (green arrows) and organic material (brown arrows) 'flow' via linked nutrient cycles (green-brown circles) from land towards water; conform the nutrient spiraling concept. Surrounding land and large areas of swamps and extended littoral zones act as engines to fuel up the functioning of Lake Markermeer.



---

### Meer toevoer door verbinding: het stimuleren van de nutriëntenstroom

Het verbeteren van de koppeling tussen het pelagisch (vlokvormingscyclus) en bentisch systeem (de huidige wormengedomineerde bodemfauna) vraagt om het versterken van het benthos en dus het verhogen van de aanvoer van makkelijk afbreekbaar organisch materiaal. Dit zou een doorbraak kunnen betekenen voor het verbeteren van de ecologie in het Markermeer. Om een gezond benthos te bewerkstelligen zijn maatregelen nodig die het voedselaanbod van deze dieren verbeteren. Deze maatregelen zullen zichzelf versterken door een toename van niet-voedselrelaties waarbij meer fosfaat beschikbaar komt, want dat is iets waar deze bio-bouwers (waaronder grote tweekleppigen) prima zelf toe in staat zijn.

De toevoer van voedsaam organisch materiaal kan alleen tot stand worden gebracht door een betere verbinding met de omgeving en een natuurlijk peil (figuur 6).

Door bestaande, nu nog geïsoleerde, moerassen met elkaar en het Markermeer te verbinden, door zowel binnen- als buitendijks nieuwe moerassen te ontwikkelen en door verondiepte oeverzones te creëren wordt een cyclus van organisch materiaal en voedingsstoffen geïnitieerd die het meer weer kan laten functioneren en die de heterogeniteit van landschap, biotoop en habitat sterk verbetert. Naast het inrichten van omliggende moerassen worden door het instellen van een meer natuurlijk waterpeil de verjongingsprocessen van de vegetatie in gang gezet. De omvang van de genomen en geplande maatregelen zijn onvoldoende om de bovenstaande processen in voldoende mate in gang te zetten en zullen dus niet leiden tot het gewenste robuuste Markermeer.

---

### Summary

Healthy benthos as the key to a robust lake Markermeer

**Piet Verdonshot, Mariëlle van Riel & Ralf Verdonshot**

macrofauna, benthos, food relationships, bioturbation, bio-irrigation, nutrient flows

Central in the policies for lake Markermeer, including the EU Water Framework Directive and N2000, is the pursuit of a robust and resilient nature in synergy with other uses. Recently, various measures have been taken to fulfill these policy goals. The question arises whether these measures will provide successes. Therefore, we studied the benthos that plays a key role in lake functioning and determines 55-75% of the food relationships for the recently strongly declined fish and bird species.

A decline may be due to the poorly developed benthos. Worms currently dominate lake Markermeer, at a distance followed by quagga mussels. Compared to natural reference lakes, macroinvertebrate numbers are low (meaning a low food availability), and bioturbation and bio-irrigation levels are limited. The poorly developed benthos indicates that the current stock of particular organic material is insufficient. Therefore, the benthos is hindered to connect lakebed and the water column. Strengthening the natural flux of organic material and nutrients is the missing link in restoring lake Markermeer functioning. By connecting impounded and new marshlands as well as by creating shallow littoral zones, organic material cycling will be initiated and enforced, and landscape, biotope and habitat heterogeneity will be strongly improved.

---

## Literatuur

- Birchenough, S. N., R.E. Parker, E. McManus *et al.*, 2012.** Combining bioturbation and redox metrics: potential tools for assessing seabed function. *Ecological Indicators* 12(1): 8-16.
- Bos, E., 2016.** The extent of bioturbation activity by oligotrophic macroinvertebrates in the Lake Marken, The Netherlands. Universiteit van Amsterdam/ Alterra, BSc thesis.
- Braeckman, U., M.Y. Foshtomi, D. Van Gansbeke *et al.*, 2014.** Variable importance of macrofaunal functional biodiversity for biogeochemical cycling in temperate coastal sediments. *Ecosystems* 17(4): 720-737.
- Brinkmann, B. W., J.A. Vonk, S.A. van Beusekom *et al.*, 2019.** Benthic hotspots in the pelagic zone: Light and phosphate availability alter aggregates of microalgae and suspended particles in a shallow turbid lake. *Limnology and Oceanography* 64(2): 585-596.
- Burson, A., M. Stomp, E. Greenwell *et al.*, 2018.** Competition for nutrients and light: testing advances in resource competition with a natural phytoplankton community. *Ecology* 99(5): 1108-1118.
- Caliman, A., J.J. Leal, F.A. Esteves *et al.*, 2007.** Functional bioturbator diversity enhances benthic-pelagic processes and properties in experimental microcosms. *Journal of the North American Benthological Society* 26(3): 450-459.
- Chaffin, J.D. & D.D. Kane, 2010.** Burrowing mayfly (Ephemeroptera: Ephemeridae: Hexagenia spp.) bioturbation and bioirrigation: A source of internal phosphorus loading in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research* 36(1): 57-63.
- François, F., J.C. Poggiale, J.P. Durbec *et al.*, 1997.** A new approach for the modelling of sediment reworking induced by a macrobenthic community. *Acta Biotheoretica* 45(3-4): 295-319.
- Gallepp G.W., 1979.** Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms. *Ecology* 60: 547-556.
- Gogina, M., C. Morys, S. ForsterGräwe *et al.*, 2017.** Towards benthic ecosystem functioning maps: Quantifying bioturbation potential in the German part of the Baltic Sea. *Ecological indicators* 73: 574-588.
- Hölker, F., M.J. Vanni, J.J. Kuiper *et al.*, 2015.** Tube-dwelling invertebrates: tiny ecosystem engineers have large effects in lake ecosystems. *Ecological Monographs* 85(3): 333-351.
- Noordhuis, R., 2010.** Ecosysteem IJsselmeergebied: nog altijd in ontwikkeling. Trends en ontwikkelingen in water en natuur van het Natte Hart van Nederland. Lelystad. Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Puche, E., F. Jordán, M.A. Rodrigo *et al.*, 2020.** Non-trophic key players in aquatic ecosystems: a mesocosm experiment. *Oikos* (in press).
- Reeders, H.H., A. Bij de Vaate & F.J. Slim, 1989.** The filtration rate of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia) in three Dutch lakes with reference to biological water quality management. *Freshwater Biology* 22(1): 133-141.
- Renz, J. R., M. Powilleit, M. Gogina *et al.*, 2018.** Community bioirrigation potential (BIPc), an index to quantify the potential for solute exchange at the sediment-water interface. *Marine environmental research* 141: 214-224.
- Saaltink, R. M., E. Honingh, S.C. Dekker *et al.*, 2019.** Respiration and aeration by bioturbating Tubificidae alter biogeochemical processes in aquatic sediment. *Aquatic Sciences* 81(13).
- Solan, M., B.J. Cardinale, A.L. Downing *et al.*, 2004.** Extinction and ecosystem function in the marine benthos. *Science* 306(5699): 1177-1180.
- Van Tongeren, O., 1986.** FLEXCLUS, an interactive program for classification and tabulation of ecological data. *Acta Botanica Neerlandica* 35(3): 137-142.
- Verdonschot, P.F.M., 2020.** Een robuust Markermeer. *Vakblad Natuur, Bos en Landschap* 166: 13-15.
- Wrede, A., 2020.** Macrofaunal impact on biogeochemical turnover in German Bight sediments (Doctoral dissertation, University Bremen).