

Kennis ten behoeve van zandwinbeleid IJsselmeergebied 2025-2050

Ondergrond, Waterkwaliteit en Ecologie



Kennis ten behoeve van zandwinbeleid IJsselmeergebied 2025-2050
Ondergrond, Waterkwaliteit en Ecologie

Auteur(s)

Ruurd Noordhuis
Menno Genseberger
Ane Wiersma

Kennis ten behoeve van zandwinbeleid IJsselmeergebied 2025-2050

Ondergrond, Waterkwaliteit en Ecologie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Contactpersoon	Ruud van Boom
Referenties	
Trefwoorden	Zandwinning, IJsselmeergebied, Zandwinputten, stratificatie, fosfaat, ecologische effecten, ondergrond, Kreftenheye,

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	29-03-2023
Projectnummer	11209250-003
Document ID	11209250-003-ZWS-0001
Pagina's	84
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ruud Noordhuis Menno Genseberger Ane Wiersma	Deltares

Samenvatting

Dit rapport geeft een overzicht van kennis die relevant is van het door RWS op te stellen zandwinbeleid voor het IJsselmeergebied in de periode 2025-2050. Deze kennis heeft enerzijds betrekking op mogelijke effecten op waterkwaliteit en ecologie, verdeeld in informatie op basis van onderzoek uit de periode 1970-1990 (m.n. Onderzoekcommissie Diepe Putten IJsselmeer en Randmeren; hoofdstuk 2) en meer recente kennisontwikkeling met betrekking tot ecologie (hoofdstuk 3) en fysische aspecten, inclusief nieuwe modellering van temperatuurstratificatie in het Markermeer (hoofdstuk 4). Anderzijds wordt informatie over de opbouw van de ondergrond gepresenteerd (hoofdstuk 5).

Het onderzoek van de Commissie Diepe Putten (hoofdstuk 2) richtte zich vooral op stratificatie, nalevering van fosfaat en effecten op het voedselaanbod voor vis. Stratificatie en daaraan verbonden lage zuurstofconcentraties kwam in uiteenlopende mate voor in samenhang met de dimensies en locaties van de putten. Nalevering van fosfaat treedt op bij zeer lage zuurstofconcentraties, maar had gezien het volume van de putten in verhouding van dat van de meren nauwelijks effect op de totale fosfaatbalans. Bodemfauna als voedsel voor vis bleek in de putten sterk in dichtheid af te nemen met de diepte, maar was soms verhoogd aan de bovenkant van het talud. Los van de voedselsituatie was de dichtheid van vis in de putten vaak hoog als geen sprake was van stratificatie. Een meer uitgebreide samenvatting van de resultaten van het onderzoek in opdracht van de commissie is te vinden in paragraaf 2.2.

In hoofdstuk 3 wordt meer gedetailleerde informatie over ecologische aspecten van het onderzoek in opdracht van de commissie aangevuld met recentere informatie, voor een deel indirect (onderzoek aan luwtegebieden, karteringen van waterplanten, mosselen etc.) of indicatief (recente satellietbeelden). Uit het gepresenteerde materiaal komt naar voren dat sedimentatie van zwevend stof in de putten kan plaatsvinden, waardoor nieuwe gradiënten in helderheid ontstaan ten gunste van onder meer de ontwikkeling van fytoplankton. Afhankelijk van de oorspronkelijke diepte kunnen door de ontgrondingen verliezen optreden van bodemflora en -fauna en daarmee op de voedselbeschikbaarheid van (duikende) watervogels die zich hiermee voeden. Gebruik van putten door vis (bij afwezigheid van stratificatie) en visetende vogels wordt door recente(re) gegevens opnieuw aangetoond.

- Er zijn dus positieve ecologische effecten van diepe putten door de grotere ruimtelijke variatie in helderheid, voor productie van plankton en kwaliteit van zwevend stof, via voedsel en koelte voor vis en via vis voor visetende vogels.
- Er zijn negatieve ecologische effecten van verdieping van ondiepten met waterplanten (tot ca 3 meter) en bodemfauna (tot ca 5 meter) die als voedsel dienen voor watervogels.

Hoofdstuk 4 geeft informatie over fysische processen. In diepere delen van de meren, waaronder de zandwinputten, vindt accumulatie van sediment plaats, dat via erosie, resuspensie en lateraal transport van omliggende ondieptes afkomstig is. In dit proces worden de ondiepten in de meren langzaam dieper, terwijl de diepe delen zich opvullen. Met accumulatie van sediment in putten kunnen ook voedingsstoffen (fosfaat, koolstof) worden opgeslagen en aan het productieproces worden onttrokken. Hiervan lijkt op basis van balansberekeningen sprake te zijn in het slibrijke Markermeer, maar in de andere meren is dit nog niet onderzocht. Stratificatie over kortere perioden (uren tot enkele dagen) komt buiten de putten veel voor in het IJsselmeergebied op dagen met weinig wind en hoge instraling. Door klimaatverandering is de kans daarop toegenomen.

Modelonderzoek in putten en geulen in het Markermeer wijst op het voorkomen van stratificatie over langere perioden in de meeste putten, waarbij duur en intensiteit vooral toenemen met de diepte. Het verticale verloop van de temperatuur (positie spronglaag / thermoclyne) varieert eveneens naar omstandigheden.

- Er zijn dus mogelijk negatieve effecten van diepe putten op de productiviteit van de meren via de accumulatie van een deel van de overgebleven voedingsstoffen (waarschijnlijk met name in het slibrijke Markermeer).
- Er is vooral in de diepste putten sprake van weken tot maandenlang aanhoudende stratificatie in het zomerhalfjaar, die gepaard kan gaan met afname van de zuurstofconcentraties in de onderlaag. In putten waar zuurstoftekort optreedt ontbreekt de bodemfauna en kan vis tijdelijk niet verblijven onder de spronglaag.

In hoofdstuk 5 worden karakteristieken van de ondergrond van de meren in het IJsselmeergebied gepresenteerd. Daarbij is de nadruk gelegd op de Formatie van Kreftenheye, een voornamelijk Pleistocene zandformatie met relatief hoge commerciële waarde. Deze laag is het dikst onder het zuidelijke Markermeer en rond Marken en ontbreekt onder het noordelijke IJsselmeer en de randmeren. Onder het westelijke deel van het Markermeer wordt hij afgedekt door een dikke Holocene laag.

Het huidige beoordelingskader voor het toestaan van zandwinning in de Natura 2000 beheerplannen is grotendeels gebaseerd op onderzoek uit de periode 1975-1995. Sindsdien is de uitgangssituatie in het IJsselmeergebied echter nogal veranderd. Door erosie van de ondiepten is het voor waterplanten begroeibare areaal afgenomen. Op het overgebleven areaal zijn de dichtheden van de planten hun doel (optimale dichtheid voor de KRW) echter dichter genaderd, zodat ontgrondingen in deze diepterange meer effect hebben. Door de sterke afname van de voedselrijkdom van de meren is accumulatie van voedingsstoffen in putten m.n. in het Markermeer een groeiend probleem. Vooral in het Markermeer, maar ook in het IJsselmeer is de kwaliteit van de mosselen (groei, vleesgewicht) als voedsel voor vogels afgenomen, waardoor enkele soorten (kuifeend, topper) hun instandhoudingsdoelen niet meer halen. Voor ontgrondingen op voor deze vogels bereikbare diepten is er dus geen marge. Als gevolg van klimaatverandering (toename van instraling en afname van windsnelheid) treedt stratificatie in putten waarschijnlijk vaker en langduriger op dan voor de eeuwwisseling, zodat de beschikbaarheid van de onderste delen van die putten voor vis in de zomer meer beperkt is geworden.

Aanbevelingen:

- Nadere onderbouwing van de aanwijzingen van permanente accumulatie van voedingsstoffen in de putten van het Markermeer en verkenning van de rol van dit soort accumulatie in de andere, minder slibrijke meren.
- Analyse van mitigatiemogelijkheden via bijv. locatiekeuze en vormgeving van putten in relatie tot wind en stroming.
- Opzetten van een Delfstoffen Informatie Systeem IJsselmeergebied, naar voorbeeld van het Noordzee "DIS", ten behoeve van verbetering van de ruimtelijke afweging van de verschillende belangen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
2	Historisch onderzoek putten IJsselmeergebied	9
2.1	Overzicht historisch onderzoek en rapportages 1970-1990	9
2.2	Samenvatting resultaten historisch onderzoek IJsselmeergebied	10
2.2.1	Fysisch onderzoek: Stratificatie	10
2.2.2	Chemisch onderzoek: Nalevering en/of accumulatie	11
2.2.3	Biologisch onderzoek	12
3	Relevante (recentere) ecologische informatie	14
3.1	Plankton en helderheid	14
3.2	Waterplanten	21
3.2.1	Habitatrichtlijngebieden	24
3.3	Macrofauna	24
3.3.1	Muggenlarven en wormen	24
3.3.2	Mosselen	26
3.3.3	Mosselen als voedsel voor vogels	29
3.3.4	Filtratie en waterkwaliteit:	35
3.3.5	Overige macrofauna	37
3.4	Vis	38
3.5	Vogels	39
4	Aanvullende kennis fysische aspecten	40
4.1	Transport van sediment en zandwinning in het IJsselmeergebied	40
4.2	Diepteverdeling en veranderingen daarin	41
4.3	Accumulatie	45
4.4	Stratificatie	46
4.4.1	Dagstratificatie	46
4.4.2	Seizoensstratificatie	49
4.4.3	Modellering temperatuurstratificatie Markermeer-IJmeer en Gooimeer	49
4.4.4	Invloed van locatie, diepte en omvang	53
4.4.5	Invloed van hellingshoek, vorm en orientatie	54
4.4.6	Spronglaag	54
4.4.7	Effect op zuurstof	56
5	Opbouw van de ondergrond	58
5.1	Dwarsprofielen	58
5.2	Kaartbeelden	59
5.3	Mogelijke effecten via grondwater	62

6	Conclusies en discussie	64
6.1	Conclusies hydrologische en fysische effecten	64
6.2	Conclusies ecologische effecten:	65
6.3	Het huidige beoordelingskader	65
6.4	Veranderingen sinds 1990	66
6.4.1	Areaal ondiepten sinds 1990	66
6.4.2	Waarde van ondiepten: toename van planten, afname van driehoeksmosselen	67
6.4.3	Filtratie door mosselen op iets grotere diepte: invasie door quaggamosselen	67
6.4.4	Afname van watervogels in relatie tot instandhoudingsdoelen	68
6.4.5	Voortschrijdend inzicht: de rol van diepe putten voor de ecologie	69
6.4.6	Klimaatverandering	70
6.5	Gevolgen voor beoordelingskader	70
6.5.1	Mitigatie	70
7	Aanbevelingen voor vervolg	71
7.1	Aanvullend onderzoek	71
7.2	Tijdelijke effecten van Zandwinning	71
7.3	Delfstoffen informatiesysteem IJsselmeergebied	71
7.4	Afstemming op andere vormen van ruimtegebruik	71
8	Referenties	73
A	Bijlage Aanvullende kennis accumulatie	76
A.1	Wind en resuspensie	76
A.2	Stormseizoen	76
A.3	Transportafstand en brongebied voor accumulatie	77
A.4	Stromingspatronen	79
B	Bijlage Staat van Instandhouding watervogels	82

1 Inleiding

Al sinds de jaren '30 vindt in het IJsselmeergebied zandwinning en andersoortige ontgronding plaats. Oudere, grote zandwinputten zijn onder meer de Gooimeerputten, IJmeerputten en de Flevopot in het zuidelijk IJsselmeer, recent zijn slibvangputten gegraven voor het verzamelen van elders gesuspenseerd holoceen slib om de eilanden van Marker Wadden mee aan te leggen.

Het huidige zandwinbeleid wordt momenteel herzien ter ondersteuning van de opstelling van nieuw beleid voor de periode 2025-2050. Sinds de start van de huidige beleidsperiode zijn er grote veranderingen in het IJsselmeergebied opgetreden. Natuurwaarden zijn gekoppeld aan instandhoudingsdoelen van Natura 2000 en de beoordelingssystemen van de Kaderrichtlijn Water. De waardering van ondieptes en geleidelijke dieptegradiënten is toegenomen en onder meer vertaald in opgaven onder de Programmatische Aanpak Grote Wateren.

Ook diepe putten hebben ecologische waarde, met name voor vis. Recente inzichten in de rol van het optreden van accumulatie van voedingsstoffen (fosfaat, organisch stof) in diepe putten in het Markermeer hebben de afweging tussen voor- en nadelen echter enigszins gecompliceerd. Dankzij de aanpak van de overmatige voedselrijkdom in onze wateren is de toevoer van voedingsstoffen naar de meren sterk verminderd. Daardoor zijn negatieve effecten van eutrofiering zoals overmatige algenbloei in de meren grotendeels verleden tijd. Als echter een belangrijk deel van de resterende aanvoer door accumulatie in diepe putten (ook) niet meer wordt gecirculeerd kan dit proces echter doorschieten en resulteren in voedselarmoede en lage biologische productie.

In dit document worden oudere bevindingen rond ecologische effecten gecombineerd met recente analyses van slibtransport, accumulatie en stratificatie. Ook wordt ruimtelijke informatie over de beschikbaarheid van winbare formaties in de ondergrond gecombineerd met ruimtelijke informatie over natuurwaarden.

2 Historisch onderzoek putten IJsselmeergebied

2.1 Overzicht historisch onderzoek en rapportages 1970-1990

Vanaf de jaren dertig van de vorige eeuw heeft in het IJsselmeergebied diepe zandwinning plaatsgevonden die resulteerde in de vorming van putten met een diepte tot ca 40 of zelfs 60 m -NAP. In reactie op bezwaren ten aanzien van negatieve ecologische effecten werd in 1970 onderzoek gestart aan deze putten door Rijkswaterstaat Directie Noord Holland. Op hun initiatief werd in 1973 bij de Directie Zuiderzeewerken de **“Begeleidingscommissie Onderzoek Diepe Putten in IJsselmeer en Randmeren”** opgericht. Naast de genoemde directies namen vanuit het Ministerie van Verkeer en Waterstaat ook de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders en Rijks Instituut voor Zuivering van Afvalwater deel, vanuit het Ministerie van Landbouw het Limnologisch Instituut, de hoofdafdeling Sportvisserij en Beroepsbinnenvisserij van de Directie Visserijen, Rijksinstituut voor Visserij Onderzoek en het Rijksinstituut voor Natuurbeheer. Dit onderzoek werd uiteindelijk afgerond in 1990 en betrof de volgend putten:

- Trintelput en Flevoput in het zuidelijk IJsselmeer (Houtribhoek – Trintelhaven);
- Twee proefputten in het Markermeer;
- Naarderput en Almereput in het Gooimeer;
- IJmeerput tussen Muiden en Pampus;
- Shellput bij Lelystad (niet meer zichtbaar, bij de Houtribsluizen).

Het onderzoek betrof fysische, chemische en biologische effecten van diepe putten. Het fysische onderzoek was sterk gericht op stratificatie, het chemische op nalevering van fosfaat. Het biologische onderzoek was primair gericht op effecten op vis en visvangst, en betrof enerzijds de vis zelf, anderzijds de bodemfauna als visvoedsel.

Periode 1974-1980

In 1977 kwam deze commissie met een interim rapport over het onderzoek in 1974-75 getiteld “Onderzoek diepe putten in IJsselmeer en Randmeren”. Dit onderzoek is dus uitgevoerd in de periode waarin de dijk Lelystad-Enkhuizen werd voltooid (sluiting 1975, wegverbinding 1976) en heeft dus deels betrekking op een periode met andere waterbewegingen dan nadien. Kort na de sluiting van deze dijk, ook in 1977, werd een kleinere **“Onderzoekcommissie Diepe Putten IJsselmeer en Randmeren”** geformeerd, voor het opstellen en uitvoeren onderzoekprogramma’s over de gevolgen van zandwinning voor het milieu. Deze gevolgen waren in de eerste paar jaar niet duidelijk genoeg in beeld gekomen.

De bevindingen werden gebruikt in de concept nota “Zandwinning IJsselmeer en Randmeren” van de Directie Zuiderzeewerken van Rijkswaterstaat in 1978 (nota 292, definitief aug 1980).

Ondertussen verschenen de jaarrapporten “Diepe putten onderzoek 1976, 1977, 1978 en 1979” van de Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, district Noord, en in 1980 kwam er weer een overzicht: “Rapport onderzoekresultaten tot en met 1980 van de Onderzoekcommissie Diepe putten IJsselmeer en Randmeren” (WWNO.N.80.0009).

Het onderzoek aan bodemfauna en vis werd uitgevoerd door het RIVO (Rijksinstituut voor Visserijonderzoek, thans WMR), en werd na 1980 nog enkele keren aangevuld (Cazemier 1977, 1979; Van der Heul & Cazemier 1983, 1986).

Proefputten Markermeer

In 1984 werden twee proefputten in het Markermeer opgeleverd voor onderzoek naar de invloed van de taludhelling op de stratificatieverschijnselen. Hier werden in de jaren 1984-86 metingen verricht, gerapporteerd in het rapport "Invloed van de grootte van de taludhelling van diepe putten op stratificatie" (Claessen 1987). Put A werd opgeleverd met een taludhelling van 1/10 en een diepte van 22m, put B met een helling van 1/3 en een diepte van 20m.

Samenvattende eindrapportage 1990

In 1990 bracht de begeleidingscommissie tenslotte een samenvattende eindrapportage uit: "Samenvatting onderzoek diepe putten IJsselmeer en Randmeren" (RWS Dir. Flevoland, Lelystad). Binnen deze studies werd zowel aandacht besteed aan stratificatie en zuurstof, als aan andere aspecten van waterkwaliteit en aan chemie en biologie. In de tweede periode waren de metingen meer gedetailleerd. In de volgende paragraaf zijn de conclusies uit het rapporten van 1980 en 1990 gecombineerd, aangevuld met enkele conclusies uit rapportages over fosfaatnalevering (Zemmelink 1993) en over de ecologische effecten van putten uit een iets recenter verleden (Van Rijn et al. 2004; Van Eerden et al. 2005).

2.2 Samenvatting resultaten historisch onderzoek IJsselmeergebied

2.2.1 Fysisch onderzoek: Stratificatie

In de diepere delen van de meren kan in het zomerhalfjaar onder invloed van temperatuur, instraling en stroming stratificatie ontstaan, met name als de diepte (put) in open water ligt, op enige afstand van de kust (grote strijklengte).

In de IJmeerput bleken in het zomerhalfjaar langdurige perioden van stratificatie voor te komen (3-4 maanden). In de Flevopot in het IJsselmeer, de Shellput in het Markermeer en de Almereputlocaties kwamen in de zomer 3-4 afzonderlijke perioden met stratificatie voor van elk maximaal 2-3 weken. De duur van de periodes nam toe met de diepte. De zuurstofconcentraties in de onderlaag waren op hun beurt gerelateerd aan de duur en frequentie van stratificatie, waarbij het aantal dagen met lage zuurstofconcentraties kleiner was dan het aantal dagen met stratificatie.

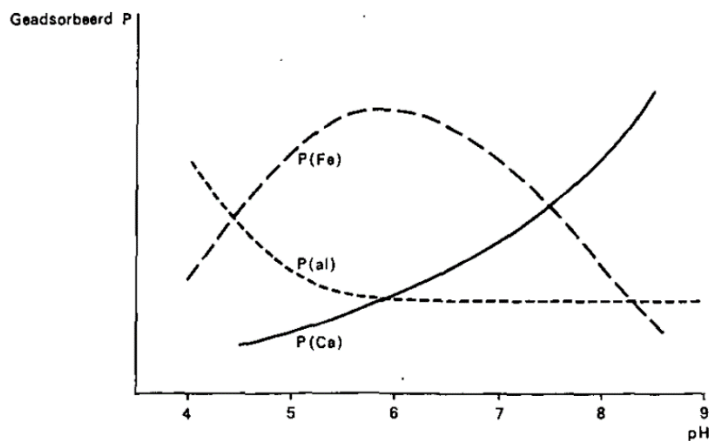
Binnen een put kunnen ruimtelijke verschillen bestaan in de duur en intensiteit van stratificatie bestaan, die werden gerelateerd aan verschillen in invloed van wind en stroming. Op theoretische gronden werd gesuggereerd dat een langgerekte vorm van een put in de stroom- of windrichting resulteert in een aan zienlijk lagere kans op stratificatie. De hellingshoek van het talud leek van minder belang, al was een put met een talud van 1/10 bij de bodem iets minder lang gestratificeerd dan een even diepe put met een talud van 1/3. Zuurstofconcentraties dalen zowel door verbruik in het water als in de bodem. Zuurstofloze omstandigheden (<10% verzadiging) traden afhankelijk van de put op vanaf 10-20 meter diepte. Door verticale uitwisseling kan de zuurstofconcentratie bij de bodem afwijken van de concentratie in de waterkolom van de onderlaag. De zuurstofcondities verschilden sterk met diepte en locatie; in de Flevopot was het aantal waarnemingen met lage zuurstofpercentages beperkt, in de Naarderput kwamen verzadigingspercentages van ca 5% veelvuldig voor. Bij "microstratificatie" buiten de putten die enkele dagen aanhoudt kan de concentratie in de onderlaag eveneens dalen. Deze vorm van stratificatie kan zich in water van enkele meters diepte op warme, rustige dagen in de loop van de ochtend ontwikkelen, maar wordt meestal 's avonds weer opgeheven (zie par. 4.4.1).

De diepte van de spronglaag was in de Flevopot (IJsselmeer) groter dan in de IJmeerput als gevolg van grotere menging in de bovenlaag door wind en stroming. Menging na een periode van stratificatie nam op basis van waterkwaliteitsparameters in de onderlaag minimaal 3-6 dagen in beslag.

Door de verhouding tussen het volume van het meer en het veel kleinere volume van het water in de onderlaag van gestratificeerde putten was het effect van menging na zo'n periode in de meren niet meetbaar.

2.2.2 Chemisch onderzoek: Nalevering en/of accumulatie

Bij lage zuurstofconcentraties wordt de nalevering van fosfaat uit het sediment in de putten versterkt. Onderzoek naar de rol van putten bij fosfaataflevering (Zemmelink 1993) kon onder aerobe omstandigheden geen verschil vinden tussen nalevering in putten en daarbuiten. De Jong (1982) stelt dat bij volledige menging meer fosfaat door de bodem wordt vastgelegd dan er wordt afgegeven. Uitwisseling van fosfaat tussen water en bodem kan langs meerdere routes plaatsvinden, door evenwichten met calcium (en magnesium), aluminium en ijzer. Alle drie de evenwichten worden beïnvloed door wijzigingen in de pH, waarbij bij hoge pH binding vooral aan calcium plaatsvindt, bij lage pH aan aluminium en bij tussenliggende waarden aan ijzer, met een optimum rond pH 6 (figuur 2.1; De Jong 1982). De pH van de meren in het IJsselmeergebied ligt hier boven; tegenwoordig in de regel tussen 8 en 9. Bij stratificatie in de IJmeerput werd in het hypolimnion afname van de pH geconstateerd tot minimaal 7,3, waarbij dus verschuiving zal zijn opgetreden van binding aan calcium naar binding aan ijzer.



Figuur 2.1. De binding van fosfaat aan calcium, ijzer en aluminium als functie van de pH (relatief). Uit De Jong 1982.

De binding aan ijzer wordt, in tegenstelling tot die aan calcium of aluminium, echter tevens beïnvloed door de redoxpotentiaal, en daarmee door de zuurstofconcentratie. Deze invloed lijkt sterker dan die van de pH; De Jong stelt dat het fosfaatbindend vermogen van het sediment door ijzer volledig wegvalt als zuurstofloosheid in combinatie met daling van de pH optreedt. Ook uit veldmetingen bleek dat de fosfaatafgifte van de bodem in putten aanzienlijk kan toenemen in zuurstofarme condities. Dit is waarschijnlijk een gevolg reductie van Fe^{3+} naar Fe^{2+} , waardoor de bindingscapaciteit voor P afneemt, mogelijk mede onder invloed van de afbraak van organisch materiaal.

Volgens het onderzoek in de jaren 80 was in zuurstofloze putten de fosfaatafgifte van de bodem meer gevarieerd dan daar buiten, met een aanzienlijk hoger maximum (0,15-0,4 g P per etmaal per m^2 , t.o.v. 0,2-0,25 buiten). Destijds vertegenwoordigde de extra belasting hierdoor in het Gooimeer en IJmeer naar schatting 5-10% van de totale P belasting.

Soms bleef de verhoging ook bij langdurige stratificatie uit. Volgens Zemmeling (1993) neemt de concentratie opgelost P sterk toe als het de zuurstof verzadiging in het hypolimnion daalt tot onder de 10%. Onder anaerobe omstandigheden kan de nalevering in putten tot een factor 10 hoger zijn.

De verhoogde afgifte van fosfaat vanuit putten werd gezien als een probleem voor het behalen van de doelstellingen in belasting, terwijl dat bij stikstof niet het geval was. Toch leek de invloed van plotselinge opmenging aan het eind van perioden met stratificatie op de korte termijn beperkt tot afwezig. Het effect op de totale nalevering werd uiteindelijk minimaal geacht.

Tegelijkertijd concluderen verschillende studies dat sommige putten aantoonbaar werken als fosfaatvang. Via de werking als slibvang wordt ondanks eventuele nalevering het sediment fosfaatrijker dan de bodem in de rest van het meer. "Er lijkt sprake te zijn van een geleidelijke verrijking van de bodem met fosfaat in de loop der jaren". Versterkte nalevering is daarvan niet onafhankelijk; de verhoogde fosfaat afgifte vanuit de bodems van putten werd niet alleen geweten aan anaerobe omstandigheden, maar ook aan de werking van de putten als fosfaatvang, waardoor de concentraties hoger worden dan in de omringende ondiepe delen van het meer (Zemmeling 1993).

De invloed van nalevering op de fosfaatbalans van het meer hangt dus vooral af van het optreden van zuurstofloosheid in perioden met stratificatie. Dat betekent dat die nalevering enerzijds sterk verschilt van put tot put en zelfs van jaar tot jaar. Anderzijds betekent het dat de periodes van versterkte nalevering worden afgewisseld door (langere) periodes van netto vastlegging. De duur van die periodes van netto fosfaat afgifte ten opzichte van de perioden met netto absorptie (en wellicht de sedimentatie snelheid) beïnvloedt dus het effect van putten op de fosfaatbalans op langere termijn. Omdat gegevens over stratificatie en zuurstofconcentraties in het hypolimnion nagenoeg ontbreken kan de balans op de lange termijn niet "bottom-up" worden bepaald. Het grote verschil tussen aan- en afvoer van fosfaat in het geval van het Markermeer suggereert dat accumulatie in het verleden heeft gedomineerd (zie Noordhuis et al. 2022).

2.2.3 Biologisch onderzoek

Vis en visvoedsel

Er zijn geen randeffecten van putten vastgesteld in de dichtheden van de bodemfauna (geen afwijkende dichtheden rond de putten t.o.v. locaties op grotere afstand. In de putten zelf waren de dichtheden op grotere diepte sterk verlaagd (zie verder paragraaf 3.3.1). Op grond daarvan werd een lagere visproductie verwacht bij verdieping tot meer dan 3-8 meter (Veluwemeer 3m, Gooimeer 5m, IJmeer en IJsselmeer 8m). Deze conclusie uit 1980 werd op basis van voortgezet onderzoek echter gewijzigd: op het talud kwamen maximale dichtheden van bodemorganismen voor tussen 5 en 10 m diepte, meestal hoger dan in de omgeving van de put. Pas beneden (8-)10 m diepte waren de dichtheden verlaagd t.o.v. de omgeving. Bij verdieping tot meer dan 8m -NAP werd daarom negatief effect op de visstand verwacht. De helling van het talud leek geen invloed te hebben op het voorkomen van vis en "visvoedsel".

Uit vergelijkend visonderzoek en sonarmetingen bleek dat gestratificeerde delen door vis werden gemeden, maar dat bij afwezigheid van stratificatie de vangsten in de putten vaak groter waren dan daar buiten. Baars, meerjarige snoek en aal hielden zich bij voorkeur op in de diepere delen.

Vogels

De zandwinning zou destijds geen effect hebben gehad op bodemfauna-etende vogels omdat in de zandwingebieden toen nauwelijks mosselen voorkwamen. Wel werd verwacht dat na sanering van de meren de mosselen “terug zouden komen”, waarna bij voortzetting van zandwinning effecten zouden kunnen optreden als gebieden van minder dan 5m (max. duikdiepte eenden) verdiept worden. Met name in de randmeren waren de mosselen als gevolg van verslechtering van de waterkwaliteit eind jaren '60 sterk afgenomen, in de Veluwerandmeren zelfs nagenoeg verdwenen (Noordhuis et al. 1992). Met het herstel van het systeem na defosfatering en doorspoeling van de Veluwerandmeren kwamen ze in de loop van de jaren '90 inderdaad terug (Noordhuis et al. 2016). Zandwinning op ondiepten (< 1m) zou tevens effect kunnen hebben op de beschikbaarheid van fonteinkruiden voor de kleine zwaan. Vanwege het positieve effect van waterplanten op de waterkwaliteit werd zandwinning alleen op diepten van 2m toelaatbaar geacht (later 3m op basis van KRW criteria). Het effect van zandwinning op viseters werd verondersteld gerelateerd te zijn aan de effecten op de visproductie, waarbij een maximale duikdiepte van 8m voor Aalscholvers werd aangegeven. Later werd echter aangevoerd dat de dieptezone van ca 8-15m in de diepere delen van de meren in de winter van aantoonbare betekenis zijn voor vis, en daarmee ook voor visetende vogels. Op basis van deze constatering werd heroverweging van het vullen van bestaande putten met baggerspecie wenselijk geacht (Van Rijn et al. 2004; Van Eerden et al. 2005).

Fytoplankton

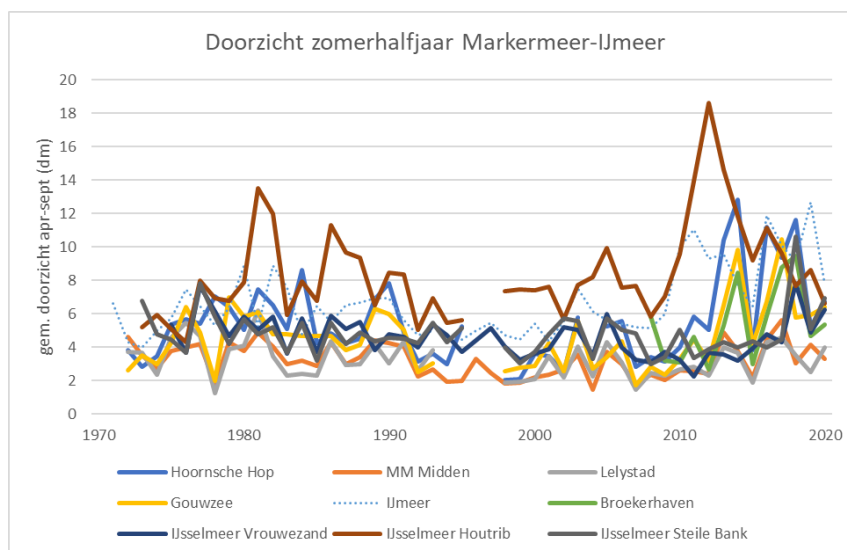
Onderzoek aan effecten op fytoplankton leverde geen duidelijke resultaten op in de zin van wijzigingen in soortensamenstelling gerelateerd aan het temperatuurverloop in de putten. Theoretisch kan algengroei in de putten toenemen door hogere beschikbaarheid van voedingsstoffen, maar ook afnemen door gebrek aan licht. De resultante is afhankelijk van de specifieke omstandigheden.

3 Relevante (recentere) ecologische informatie

Sinds het onderzoek uit de jaren 1970 en 1980 is er veel veranderd aan de waterkwaliteit en de ecologie in het IJsselmeergebied. In alle meren zijn de nutriëntenconcentraties sterk gedaald en nalevering van fosfaat speelt geen rol van betekenis meer. Bepaalde natuurwaarden zijn achteruit gegaan, terwijl andere zijn versterkt, waardoor de impact van ecologisch effecten van ontgrondingen in verschillende richtingen kan zijn verschoven. Door natuurwetgeving zijn ecologische effecten zwaarder gaan wegen. Meer complete monitoring en de toenemende lengte van tijdreeksen, maar ook nieuwe technieken zoals remote sensing en modellering, hebben de mogelijkheden om optredende effecten in beeld te brengen vergroot.

3.1 Plankton en helderheid

De concentratie fytoplankton is sinds 1990 in alle meren afgenomen, en daarmee ook het aandeel van algen in zwevend stof. Ook de soortensamenstelling van het fytoplankton is veranderd, en hoewel een effect op totaal zwevend stof onduidelijker is, zijn de veranderingen in samenstelling uiteindelijk (vanaf 2010) gevolgd door een toename van het doorzicht in de meer beschutte delen de meren. Dit is met name het geval geweest in gebieden waar filtratie door Quaggamosselen door kolonisatie rond 2010 sterk toenam, zoals de Randmeren, het IJmeer en het meest zuidelijke deel van het IJsselmeer. Dit zijn ook gebieden waar enkele van de grootste putten liggen.

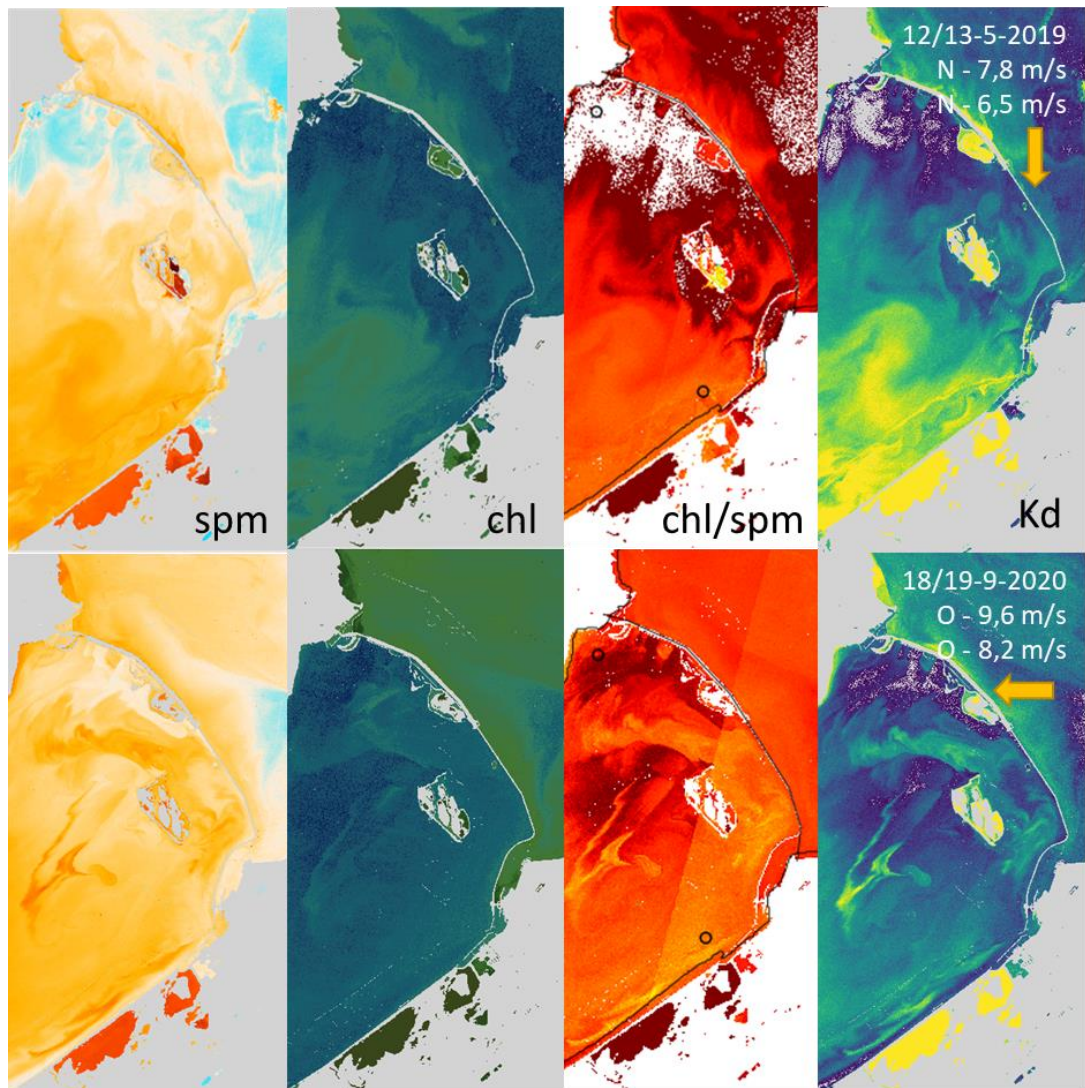


Figuur 3.1. Verloop van doorzichtwaarden op verschillende meetlocaties in het IJsselmeer en Markermeer, met toenames vanaf ongeveer 2010, volgend op kolonisatie door Quaggamosselen vanaf 2007. Gegevens RWS, gemiddelden per zomerhalfjaar (april t/m sept; vanaf 1992 vierwekelijks, voordien vaak tweewekelijks).

Effecten van putten op fytoplankton zijn in het historisch onderzoek niet duidelijk gevonden. Ze lijken alleen onder bepaalde weersomstandigheden op te treden en zijn slecht voorspelbaar. Chlorofylconcentraties kunnen t.o.v. de omgeving toenemen door mobilisatie van fosfaat, of afnemen door lichtgebrek in de diepere delen van de putten. Grotere putten zouden positief effect hebben op de helderheid van het water, vanwege verhoogde sedimentatie.

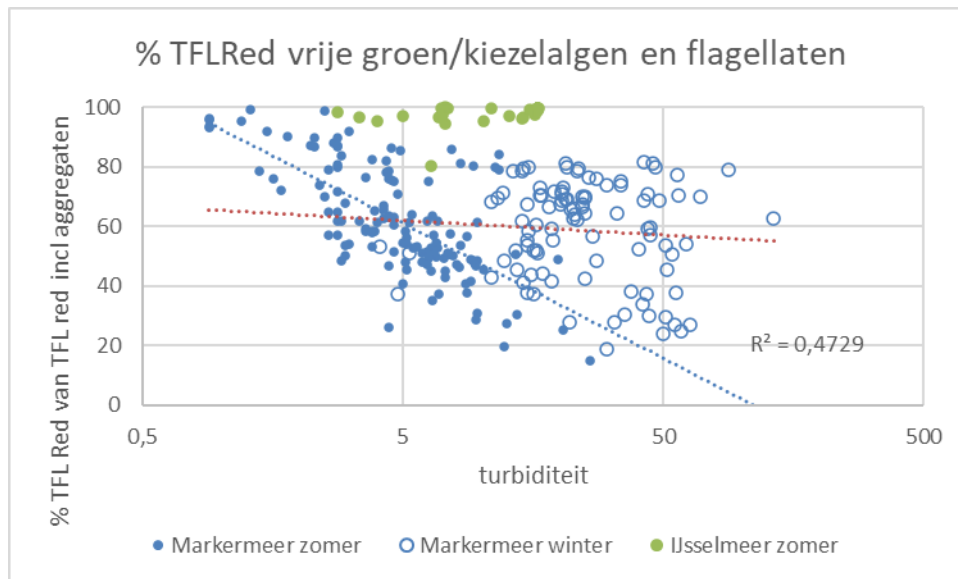
Het is de vraag of dat in het IJsselmeergebied in de praktijk overal zo is. Sedimentatie van gesuspendeerd materiaal zou moeten zorgen voor verlaagde concentraties en een andere samenstelling van zwevend stof boven de putten.

Een indruk van het effect van putten op sedimentatie en het effect daarvan op concentratie en samenstelling van zwevend stof en helderheid boven deze putten kan wellicht worden verkregen uit recente kennisontwikkeling met betrekking tot sedimentatie in luwtegebieden. In het kader van KIMA zijn enkele tientallen satellietbeelden uit de jaren 2015-2021 bewerkt voor lichtuitdoving (K_d), chlorofyl, zwevend stof en de chlorofyl / zwevend stof ratio. Daarnaast zijn door RWS-CIV gegevens verzameld over de ruimtelijke patronen van de fytoplankton samenstelling en de primaire productie. Deze laatste gegevens kunnen via de relatie met turbiditeit indirect worden gekoppeld aan “luwtewerking”. De eerstgenoemde studie geeft aan dat chlorofyl en zwevend stof beide afnemen in windluwe delen van het gebied, maar dat de chlorofyl / zwevend stof ratio toeneemt.



Figuur 3.2. Voorbeelden van luwtewerking bij Marker Wadden (uit De Rijk & Löffler 2022). Satellietbeelden met luwte-effect, bewerkt voor zwevend stof (spm), chlorofyl (chl), de ratio chlorofyl/ zwevend stof en lichtuitdoving (K_d). Windrichting en windsnelheid zijn aangegeven als daggemiddelde op de dag van de opname (onder) en de voorgaande dag (boven) op basis van KNMI-metingen op de Houtribdijk bij Trintelhaven.

De CIV gegevens laten zien dat in het Markermeer gemiddeld ruim de helft van de algen in aggregaten voorkomt, de andere helft bestaat uit “vrije” algen. In de zomerperiode bleek ook dat deze vrije algen bij rustig weer in luwe gebieden “overblijven”, hun aandeel is hier hoger en nadert bij de laagste turbiditeit naar 100% terwijl de aggregaten bezinken. In het IJsselmeer is echter nauwelijks sprake van aggregaten en bestaat het fytoplankton onder alle weersomstandigheden voor meer dan 90% uit vrije algen (Gegevens N. Dijkman en M. Rijkeboer, RWS-CIV; zie ook De Rijk & Löffler 2022).

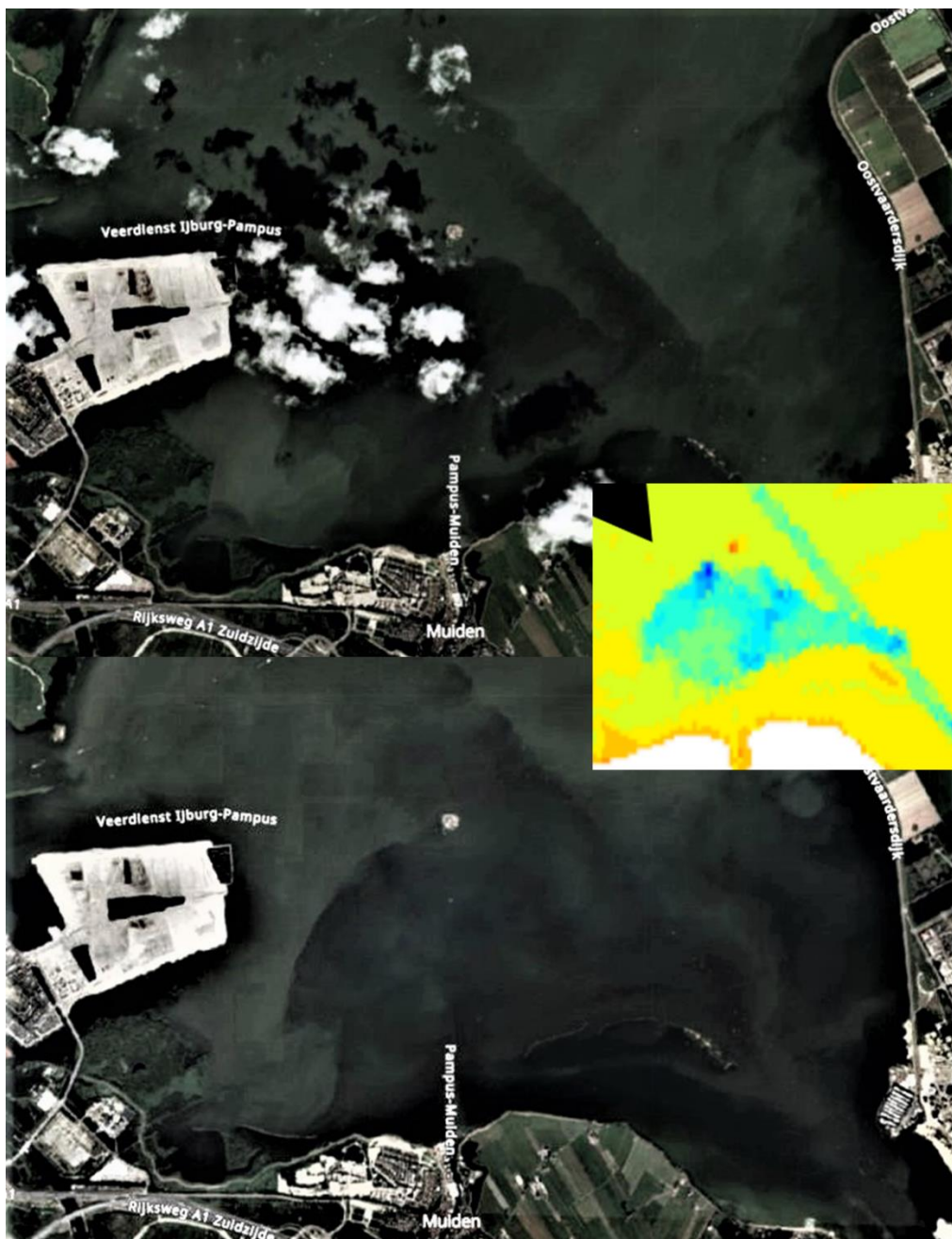


Figuur 3.3. Verband tussen turbiditeit (troebelheid) en een maat voor het percentage vrije algen ten opzichte van algen in aggregaten (vlokken met slibdeeltjes en algen) in het Markermeer in zomer en winter en in het IJsselmeer in de zomer. Gegevens N. Dijkman & M. Rijkeboer, RWS-CIV (zie ook De Rijk & Löffler 2022).

Bij rustig weer zou dit ook boven de putten zo kunnen werken, vooral als het bezonken materiaal bij stratificatie raakt “opgesloten” in het hypolimnion en voor de duur van de stratificatie niet meer in suspensie komt. De bewerkte satellietbeelden en de CIV studie geven geen uitsluitsel of dit inderdaad ook in de putten gebeurt. Iets meer inzicht ontstaat uit eenvoudige bewerkingen (contrast versterken) van speciaal daartoe geselecteerde, online beschikbare satellietbeelden (Sentinel 2, beelden gebruikt uit 2022). In het IJmeer ligt de grote zandwinput ingeklemd tussen het eiland Pampus en de drie kunstmatige dammen / eilanden Hooft, Drost en Warenar, die samen een boog vormen waarbinnen het water aan de zuidkant vaak relatief helder is. Ten noorden van Pampus loopt een vaargeul van het Gooimeer naar de vaargeul Amsterdam-Lemmer. In en rond beide geulen is het water vaak troebel. Het water boven en rond de IJmeerput is vaak relatief helder, maar lang niet altijd en de contouren van de put zelf zijn op de satellietbeelden zelden zichtbaar. Uitzonderingen kwamen voor in augustus 2022, bij matige noordoostenwind en hoge temperaturen.



Figuur 3.4. Turbulentie vanuit de geulen op 24 juli 2022, vectorgemiddelde windrichting 208° (ZZW), daggemiddelde windsnelheid 5,5 m/s (KNMI). Sentinel 2-beeld van Sentinel-hub met vergroot contrast.

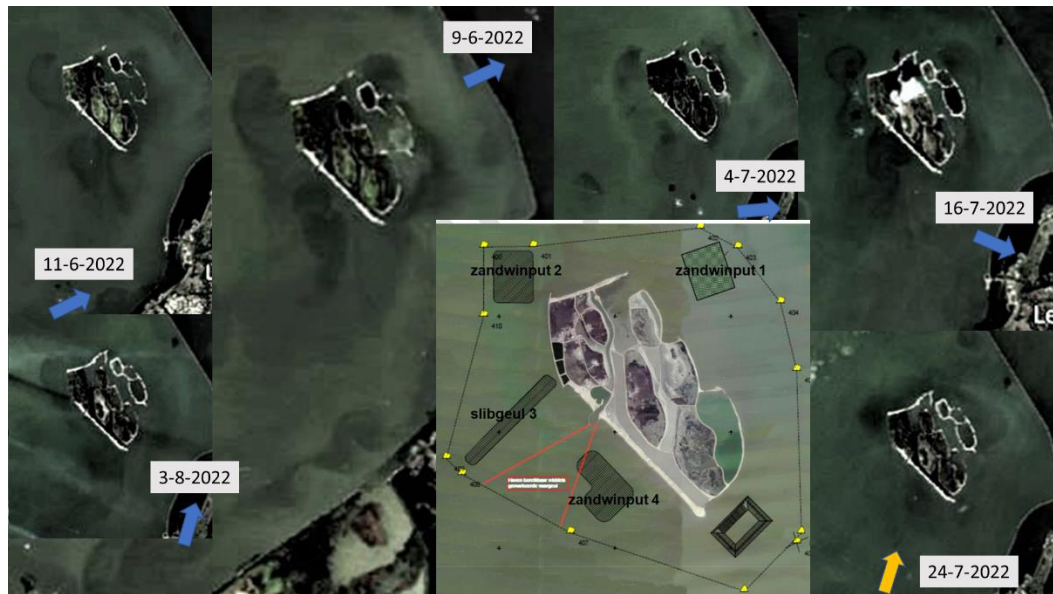


Figuur 3.5. Zichtbare contouren van de IJmeerput tussen Pampus en Muiden en de vaargeul van het Gooimeer naar de vaargeul Amsterdam-Lemmer, op 22 en 30 augustus 2022, bij matige (noord)oostenwind (daggemiddeld Houtrib resp. 79° , $4,8$ m/s en 53° , $8,8$ m/s). Sentinel 2-beelden van Sentinel-hub met vergroot contrast.

De bewerkte beelden laten scherpe overgangen zien ter plaatse van de randen van de IJmeerput en de vaargeul, die suggereren dat de satelliet hier de bodem van de ondiepere delen ziet in contrast met de diepe delen, niet zo zeer verschillend in zwevend stof concentraties.

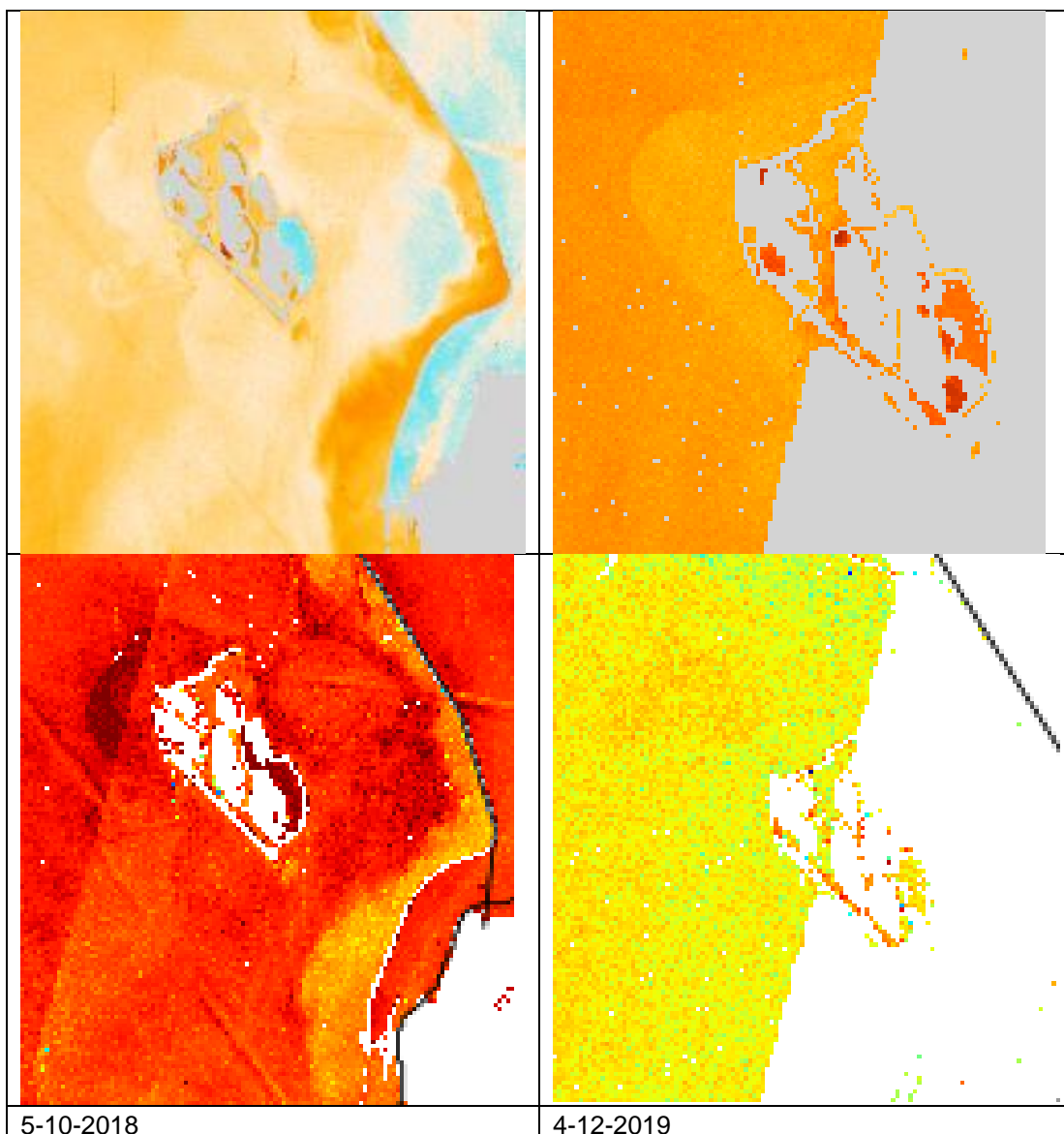
Anders is dat waarschijnlijk in het geval van de slibvangputten van Marker Wadden, in een omgeving met relatief hoge zwevend stof concentraties, waarbij de putten zeer diep zijn bij beperkte omvang. Op diverse recente satellietbeelden (2022) zijn deze putten duidelijk te zien in de patronen van zwevend stof (al of niet toevallig vooral bij wind van zuid tot noordwest, ook aan de geëxponeerde kant van Marker Wadden).

Donkere plekken indicierend dan lage zwevend stof concentraties. Daarbij zijn deze heldere gebieden vaak weliswaar scherp begrensd, maar vaak ook iets groter dan de afmetingen van de putten zelf en variabel van vorm (vergelijk beelden van verschillende data). De slibvanggeul is in die beelden bovendien niet zichtbaar. De geul is minder diep, vangt minder slib in per m2 en heeft een kleiner oppervlak, waardoor het effect veel geringer is dan dat van de putten (opm. T. van Kessel).



Figuur 3.6. Lage zwevend stof concentraties boven de Marker Wadden slibvangputten bij zuidwestenwind. Kaartje uit De Leeuw et al. 2022. Sentinel 2-beelden van Sentinel-hub, vergroot contrast.

Hier lijkt dus onder bepaalde weersomstandigheden sprake te zijn van afname van zwevend stof boven en rond de putten als gevolg van sedimentatie. Bewerking van deze beelden voor chlorofyl en zwevend stof, en van ratiokaarten die de ruimtelijke patronen in de ratio chlorofyl/zwevend stof laten zien, kunnen meer inzicht geven in het effect van diepe putten op de samenstelling van het zwevend stof boven de putten en de overgang naar open water. Duidelijk is dat zulke effecten lang niet altijd (onder alle weersomstandigheden) optreden; slechts twee van de voor KIMA bewerkte beelden vertonen mogelijk effecten als in figuur 3.7, in de vorm van verlaagde zwevend stof concentraties boven en rond de putten rond Marker Wadden. Bij het beeld uit oktober 2018 is ook een relatief hoge chlorofyl / zwevend stof ratio zichtbaar boven de noordwestelijke slibvangput (in combinatie met lage ratio's in gebieden met opgewerveld sediment langs de dijken). Bij het beeld uit december 2019 is dat niet zichtbaar, maar in dat geval is de ratio in open water ook relatief laag.



Figuur 3.7. Mogelijke effecten van de zandwinputten rond Marker Wadden op bewerkte satelliet beelden en ratiokaarten: boven zwevend stof (lichte kleuren = lage concentraties), onder de chlorofyl / zwevend stof ratio (donkere kleuren = hoge ratio's). De Rijk & Löffler 2022.

Boven of rond de Flevopotten in het zuidelijke IJsselmeer konden op recente satellietbeelden of op de voor KIMA bewerkte beelden geen lokale effecten op zwevend stof concentraties worden gevonden. Ruimtelijke patronen in zwevend stof op iets grotere schaal laten zien dat de situatie hier dynamisch en veranderlijk is. Filtratie door mosselen die hier in de nabijheid van de putten in hoge dichtheden voorkomen zorgen bovendien voor een relatief grote gemiddelde helderheid en zullen bovendien ook effect hebben op de samenstelling van het zwevend stof (lagere chlorofyl / zwevend stof ratio door selectie voor algen). Tenslotte kunnen drijfalggen van blauwalgen en spui via de Houtribsluizen hier effecten van de putten buiten beeld houden.

Samenvattend: Uit deze beelden is de sedimentatie in putten niet te kwantificeren, wel wordt hieruit duidelijk dat in sommige situaties meer sedimentatie optreedt, waardoor lokale effecten op zwevend stof en helderheid kunnen optreden.

Deze effecten zijn los van de accumulatie van stoffen die aan sedimentatie is verbonden te zien als bijdragen aan de ruimtelijke diversiteit in helderheid, aanvullend op de luwte effecten van natuurontwikkeling zoals Marker Wadden en de ruimtelijke verschillen in helderheid die recent zijn ontstaan door lokale toename van filterende mosselen met de komst van de quaggamossel (figuur 3.1). Gradiënten in helderheid worden in het algemeen gezien als positief voor de ecologische waarden.

3.2 Waterplanten

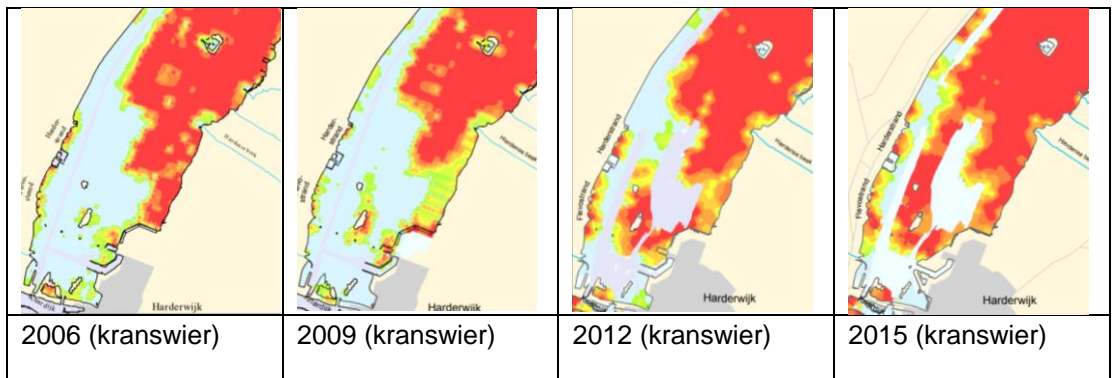
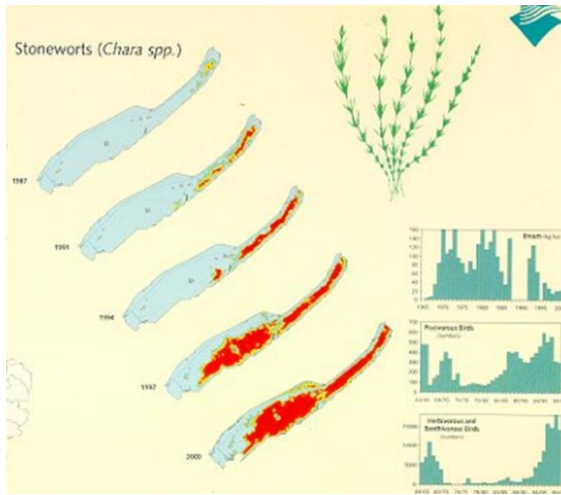
De abundantie van waterplanten is in de laatste paar decennia in het IJsselmeergebied fors toegenomen. In dit gebied groeien ze tot op diepten van ongeveer 3 meter (begroeibaar areaal volgens KRW), in de praktijk tegenwoordig soms nog iets dieper. Dit betekent dat ontgroningen op geringere diepte vaak verlies aan waterplanten oplevert. Daarbij zijn de beoordelingen op basis van de maatlaten voor waterplanten voor de zuidelijke Randmeren, het Markermeer en het IJsselmeer nog matig (tabel 3.1). In deze meren, maar ook in het Ketelmeer, is ook de abundantie in het begroeibare areaal nog (te) laag. Ontgroningen binnen dit dieptebereik hebben dus mogelijk een negatief effect op de KRW beoordeling.

Tabel 3.1. Meest recente beoordelingen voor waterplanten per deelmaatlat (gemiddelden van de laatste drie beschikbare waarden).

	abundantie	kwaliteit	soortsamens	Beoordeling
Randmeren Oost	0,51	0,70	0,90	Goed
Randmeren Zuid	0,37	0,54	0,71	Matig
Markermeer	0,33	0,53	0,74	Matig
IJsselmeer	0,26	0,39	0,53	Matig
Ketelmeer-Vossemeer	0,36	0,51	0,67	Goed
Zwarte Meer	0,47	0,64	0,82	Goed

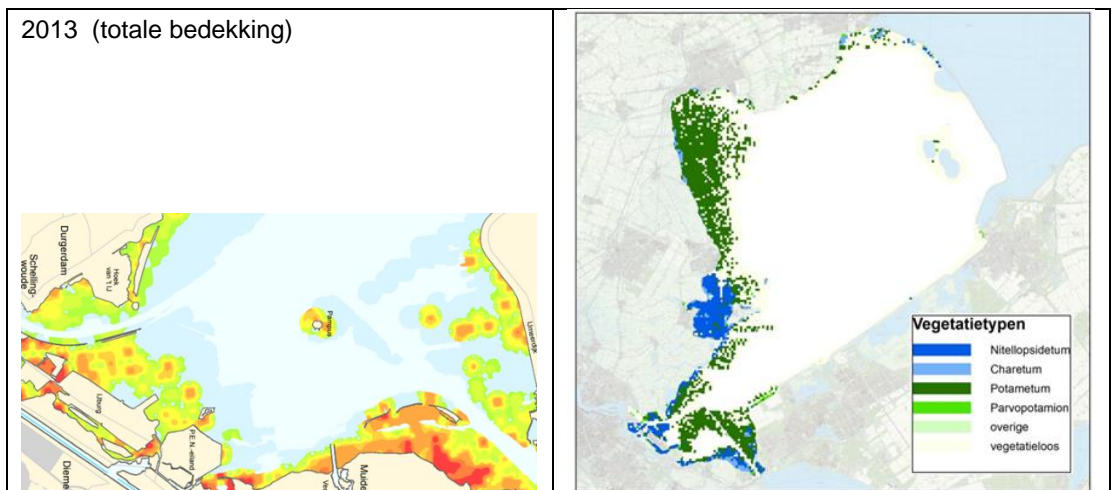
Het is echter ook niet uit te sluiten dat door sedimentatie van zwevend stof in combinatie met de huidige, beperkte productie van fytoplankton, de helderheid in de directe omgeving van de put doet toenemen. Afhankelijk van de verhouding tot vertroebeling door de werkzaamheden van zandwinning kan dit misschien ook kansen voor planten betekenen. Waarschijnlijk is dit effect echter van beperkte betekenis ten opzichte van toename van doorzicht door afname van voedselrijkdom, afname van Brasem en toename van filtratie door de invasie van Quaggamosselen.

In het Veluwemeer was als onderdeel van het ecologisch herstel vanaf de jaren '90 sprake van uitbreiding van de watervegetatie naar de zandwinlocatie in het zuiden toe. Als de uitbreiding van de (kranswier)vegetatie daar "aankomt" zijn randeffecten zichtbaar van wisselende bedekking en vitaliteit van de planten aan de oostzijde van het zandwingat. Toch breidde de vegetatie zich uiteindelijk uit totdat het zandgat volledig werd omhuld, zij het met blijvend beperkte, bovengenoemde randeffecten op de bedekking aan de oostzijde.



Figuur 3.8. Olievlek-uitbreiding van kranswier in het Veluwemeer vanaf 1987, met uiteindelijk omhulling van de zandwinlocatie in het zuiden. Gegevens RWS.

Ook rond de IJmeerput heeft zich in recente jaren steeds meer vegetatie gevestigd, in dit geval vooral Doorgroeid Fonteinkruid. Onderstaande kaartjes geven aan dat tussen 2013 (hoewel diepere delen niet werden gekarteerd) en 2019 de fonteinkruidvegetatie rond de IJmeerput zich heeft uitgebreid. Aangezien de put hier al veel langer ligt, is dit wellicht vooral verbonden aan de toename van de helderheid die volgde op de kolonisatie door Quaggamosselen in het IJmeer.



Figuur 3.9. Waterplanten in het zuidelijke IJmeer in 2013 (links) en in 2019 (rechts), met in de tussenliggende periode koloniasatie van het gebied rondom de IJmeerput. Gegevens RWS.

De toename van planten heeft dus plaatsgevonden ondanks de zandwinning, en is dicht rond de putten niet duidelijk sterker geweest. De autonome toename betekent dat een steeds groter deel van het begroeibare areaal van de referentiesituatie (de dieptezone van 0-3 meter) begroeid is geraakt. Daardoor is ook het potentiële negatieve effect van zandwinning in deze dieptezone toegenomen.

Uit verdiepingsproeven in het Veluwemeer (Noordhuis & Kolen 2003) bleek dat beperkte verdiepingen werden gevolgd door hergroei van vegetatie. Dit zal niet het geval zijn als de nieuwe diepte zo groot is dan onvoldoende licht op de bodem valt. Deze diepte is afhankelijk van de lichtuitdoving (doorzicht) en de lichtbehoefte van de plantensoort (1-10% licht op de bodem in het voorjaar). Eerste aanknopingspunt hiervoor is echter de dieptegrens van het beschikbare areaal voor planten voor dit watertype, dus 3 meter. Bij verdiepingen tot grotere diepte is de kans op terugkeer klein.

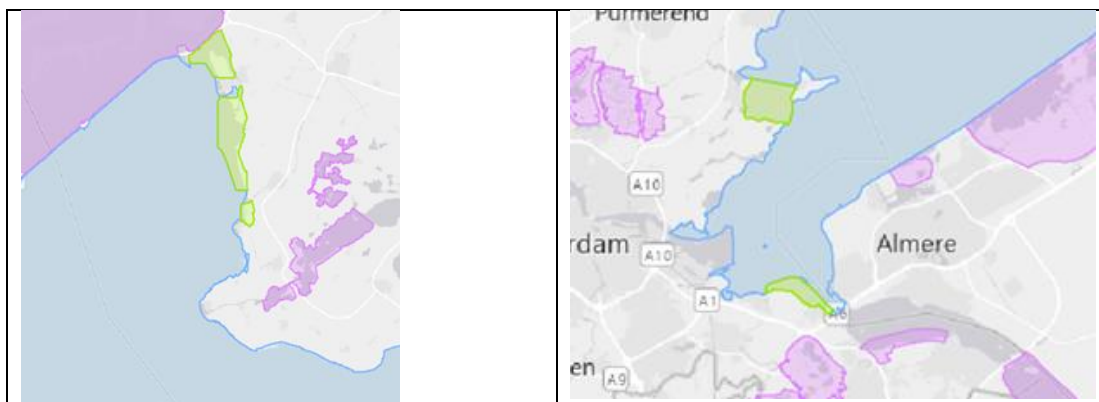


Figuur 3.10. De meest recente combinatie van karteringen van waterplanten (totale bedekking, oplopend van groen naar rood; GeoWeb RWS)

https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=Waterplantenbedekking_RWS_MN.Webviewer

3.2.1 Habitatrictlijngebieden

Een deel van de hierboven aangegeven vegetaties met water- en oeverplanten in het IJsselmeergebied is beschermd door de Europese Habitatrictlijn (Natura 2000). Dat is het geval langs de Friese westkust, in de zuidelijke helft van de Gouwzee en in het IJmeer voor de kust van Muiden (figuur 3.11). Van de Randmeren zijn de Veluwerandmeren en het Zwarte Meer integraal beschermd onder de Habitatrictlijn (en Vogelrichtlijn). Het Ketelmeer en Randmeren Zuid zijn geen Habitatrictlijngebieden.



Figuur 3.11. Habitatrictlijn gebieden in IJsselmeer en Markermeer-IJmeer.

3.3 Macrofauna

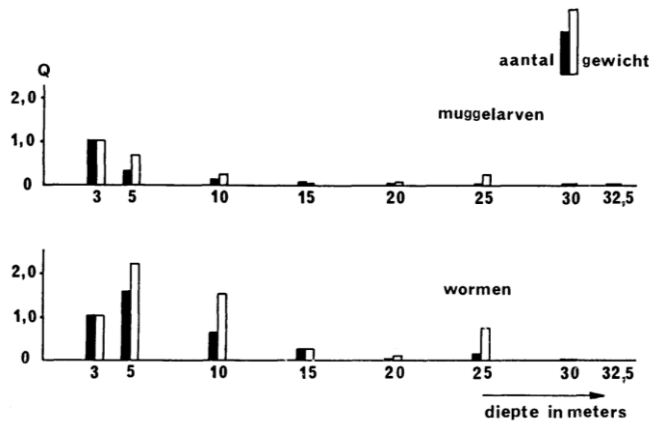
Macrofauna heeft hier vooral betrekking op de gemeenschap van ongewervelde bodemdierpjes van muggenlarven, wormen, kleine kreeftachtigen en schelpdieren ("benthos"). Veranderingen in de samenstelling en dichtheden van ongewervelden op de bodem zijn vooral voor mosselen goed in beeld gebracht. Twee soorten zoetwatermosselen, de driehoeksmossel en de quaggamossel, hebben een bijzondere rol in het ecosysteem. Omdat de verspreiding van mosselen als voedsel voor watervogels belangrijk zijn geweest in het opstellen van het beoordelingskader voor zandwinning in de Natura 2000 beheerplannen, worden ze in deze paragraaf in meer detail besproken.

3.3.1 Muggenlarven en wormen

In het onderzoek van de jaren 1970 en 1980 zijn vooral de wormen en muggenlarven in beeld geweest, als zijnde van belang als visvoedsel. Dichtheden van bodemfauna op de bodem van de putten waren in het algemeen laag, maar op het talud op 5-10 meter diepte kunnen ze verhoogd zijn t.o.v. de meerbodem in de omgeving.

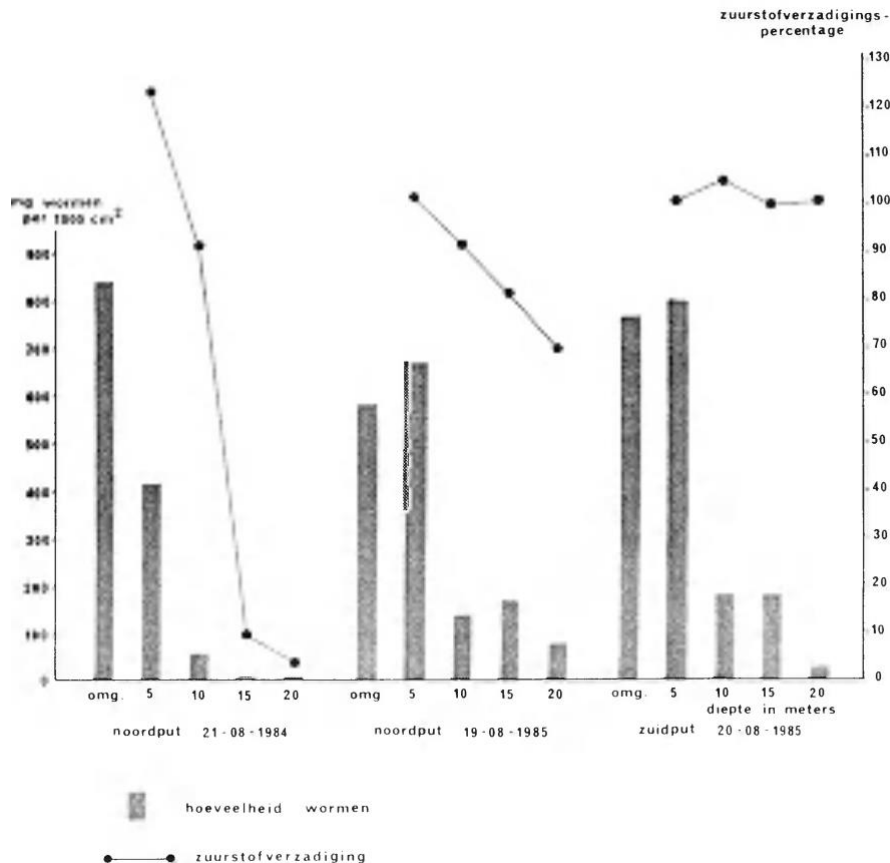
Onderzoek in het Gooimeer op 24 en 25 juni 1981 (door het RIVO, gericht op voedselaanbod voor vis; Van der Heul & Cazemier 1983; figuur 3.12) liet een sterke afname van de dichtheden van macrofauna (muggenlarven en wormen) zien met toenemende diepte van de putten. In deze studie was op het moment van onderzoek sprake van afnemende, maar niet zeer lage zuurstofconcentraties met toenemende diepte (minima van 4,5-6,5 mg/l bij de bodem).

Dit onderzoek was een herhaling van eerder onderzoek in 1974-75, waaruit bleek dat de dichtheden op diepten groter dan 5 meter sterk gereduceerd waren. De vraag bij het onderzoek in 1981 was of de reductie was verminderd naar mate de putten in grootte waren toegenomen zodat minder stratificatie optrad. Dit bleek niet uit het herhalingsonderzoek; het effect was dus gelijk gebleven.



Figuur 3.12. Afname van de dichtheden van bodemorganismen (muggenlarven en wormen) met de diepte in de Gooimeerputten in 1981 (Van der Heul & Cazemier 1983).

In een soortgelijk onderzoek in de twee proefputten in het Markermeer (Van der Heul & Cazemier 1986; figuur 3.13) kwam nauwelijks bodemfauna voor op diepten van meer dan 8 meter, nog minder als er sprake was van stratificatie. Met name de muggenlarven verdwenen ten opzichte van de wormen, het aandeel van 17% op deze locatie voor de aanleg van de putten (1984) bleef maar 1% over. Het verschil in hellingshoek tussen de twee putten had geen effect.



Figuur 3.13. Dichtheden van wormen in de proefputten in het Markermeer in relatie tot diepte en zuurstof, 1984 en 1985 (Van der Heul & Cazemier 1986).

In 2017 zijn macrofaunamonsters genomen in de noordwestelijke slibvangput (en in de slibvanggeul) en zijn de resultaten vergeleken met die van andere locaties rond Marker Wadden (Van Riel & Verdonschot 2021). In de put en de geul werden vooral wormen en muggenlarven gevonden, in een gemeenschap die ook buiten de putten in de diepere delen van het meer voorkomt. De diversiteit van deze gemeenschap is lager dan die van meer oevergebonden gemeenschappen. Onder de muggenlarven is *Chironomus plumosus* veel aangetroffen, die door het bezit van bloed met heaemoglobine relatief goed tegen lage zuurstofconcentraties kan.

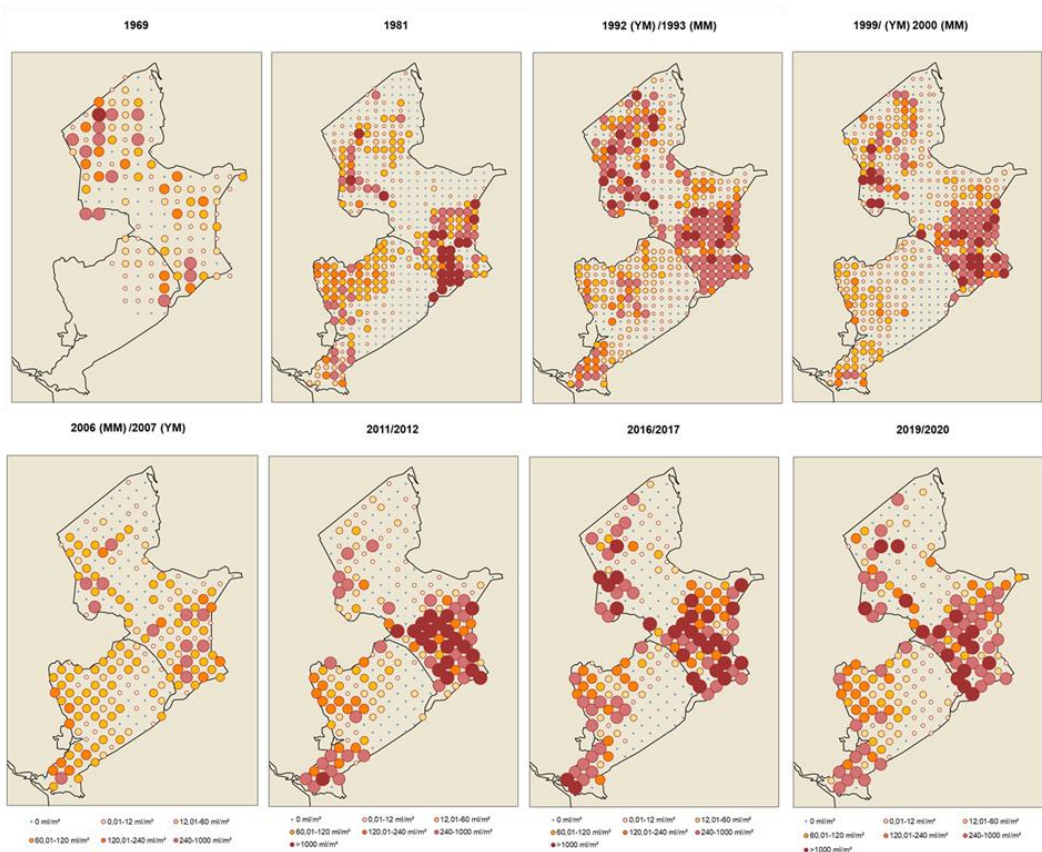
3.3.2 Mosselen

Binnen de gemeenschap van de benthische ongewervelden nemen mosselen een bijzondere positie in. Hun rol in het systeem heeft drie belangrijke aspecten:

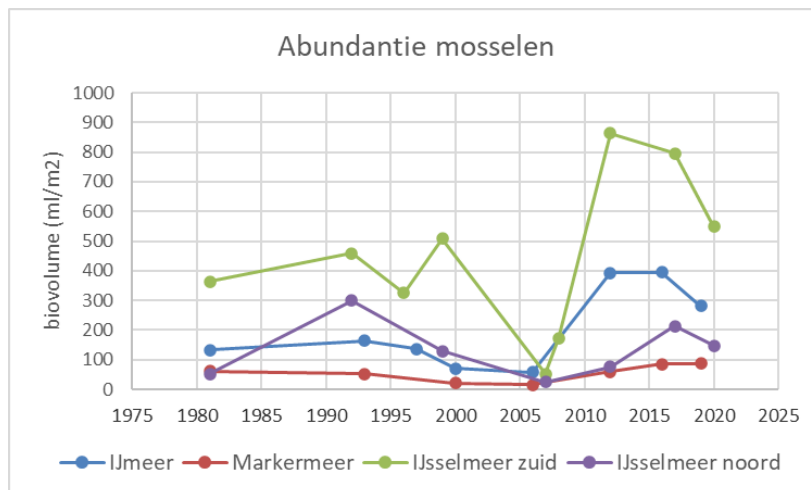
- Voedsel voor vis (m.n. blankvoorn en aal) en watervogels (toppereend, kuifeend, tafeleend, brilduiker en meerkoet).
- Vergroten van helderheid van het water door filtratie en bodemafdekking
- Vorming van habitat voor andere ongewervelden en vis (rivierdonderpad, grondels)

Tegenwoordig gaat het om twee nauw verwante soorten met een sterk vergelijkbare positie in het ecosysteem. Beide zijn van oorsprong afkomstig uit het Ponto-Kaspische gebied. De driehoeksmossel is sinds ongeveer 1825 in Nederland en koloniseerde kort na de voltooiing van de Afsluitdijk het IJsselmeergebied. Vanaf de jaren 1980 nam de dichtheid van de driehoeksmossel sterk af, vooral in het Markermeer.

De quaggamossel verscheen in 2006 in Nederland, trok het jaar daarna het IJsselmeergebied binnen en werd binnen een paar jaar de dominante soort. De beide mosselen worden in opdracht van RWS met tussenpozen van een wisselend aantal jaren gekarteerd (naar behoefte, de karteringen zijn geen onderdeel van MWTL). Figuur 3.14 laat resultaten van deze karteringen zien. Vooral vanaf de karteringen van 2011/12 gaat het vooral om quaggamosselen, die toen hogere dichtheden bereikten dan de driehoeksmosselen in de goede jaren. Bij de laatste karteringsronde (2019/20) waren de dichtheden weer iets lager (figuur 3.15).



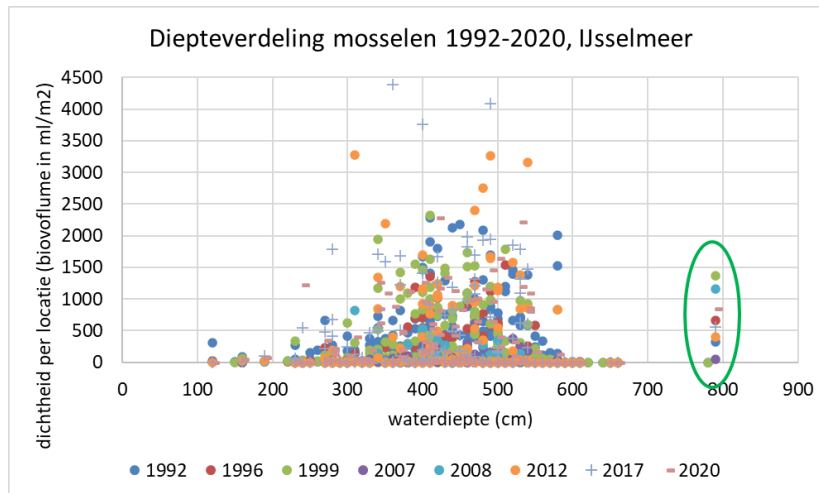
Figuur 3.14. Veranderingen van dichtheden (biovolume in ml/m²) van mosselen (t/m 2007 Driehoeksmossel, vanaf 2011 hoofdzakelijk Quaggamossel) op basis van karteringen door of in opdracht van RWS. Kleine oranje tot grote donkerrode stippen geven steeds hogere dichtheidscategorieën aan, lichtblauwe stippen locaties waar geen mosselen werden aangetroffen. Waar stippen ontbreken is niet gemonsterd.



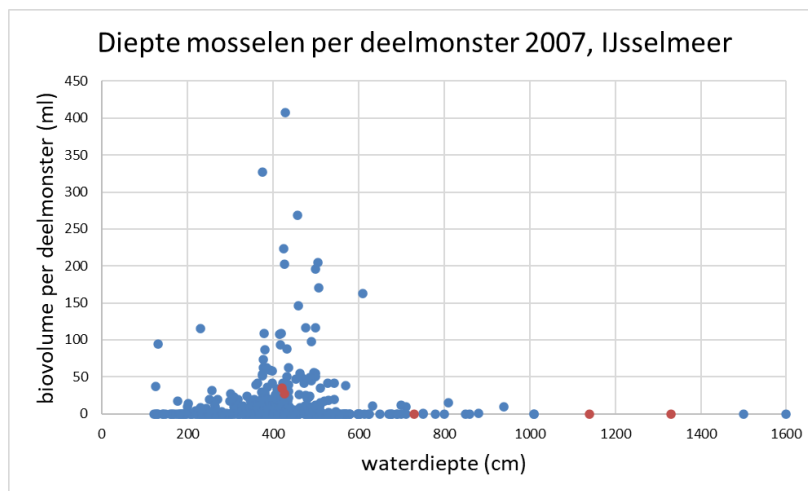
Figuur 3.15. Verloop van dichtheden van Driehoeksmosselen en Quaggamosselen (dominant na 2010). Op basis van diverse karteringen door of in opdracht van RWS.

Driehoeks- en Quaggamosselen hebben in het IJsselmeer hun optimale dichtheden op ca. 4-5 meter (waterdiepte; figuur 3.16). Op diepten van meer dan 5 meter nemen de dichtheden sterk af en beneden de 6 meter komen nauwelijks meer mosselen voor. Relatief hoge waarden op een locatie met een waterdiepte van 8 meter blijken het gevolg van middeling van deelmonsters met grote verschillen in diepte.

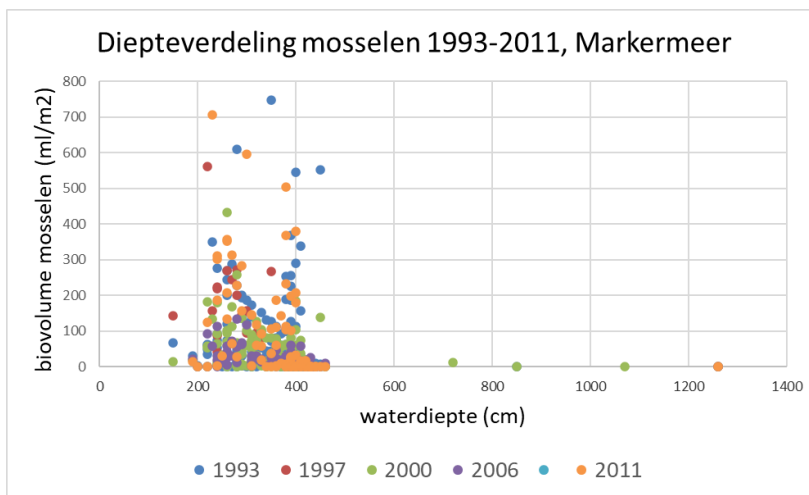
Afzonderlijke waarden uit 2007 laten bijvoorbeeld zien dat mosselen dieper dan 6 meter overall, dus ook op de bodem van putten en geulen, nagenoeg ontbreken (figuur 3.17). In het Markermeer, dat gemiddeld minder diep is, is vanaf 4 meter waterdiepte al een sterke afname van de dichtheden zichtbaar, terwijl ze op 5 m al nauwelijks meer voorkomen (figuur 3.18). De verspreidingskaartjes laten onder meer het ontbreken van mosselen in de IJmeerputten zien (figuur 3.14).



Figuur 3.16. Relatie tussen waterdiepte en de dichtheden (biovolumes) van driehoeksmosselen in het IJsselmeer op basis van karteringen in de jaren 1992 – 2020. Actuele waterdiepte tijdens de kartering in 1999. Tot en met de kartering van 2008 was de driehoeksmossel dominant, daarna de quaggamossel. De relatief hoge waarden rond 8 m diepte (ovaal) zijn een gevolg van middeling van deelmonsters met uiteenlopende dieptes, zie figuur 3.17. Op basis van diverse karteringen door of in opdracht van RWS.



Figuur 3.17. Relatie tussen waterdiepte en de dichtheden (biovolumes) van driehoeksmosselen in het IJsselmeer met bijbehorende waterdieptes per deelmonster op basis van de kartering in 2007. Oranje: deelmonsters van de in figuur 3.16 omcirkelde locatie (Houtribhoek). Gegevens RWS.



Figuur 3.18. Relatie tussen waterdiepte en de dichtheden (biovolumes) van driehoeksmosselen in het Markermeer op basis van karteringen in de jaren 1993 – 2011. Actuele waterdiepte tijdens de kartering in 2000. Op basis van diverse karteringen door of in opdracht van RWS.

Jaar	Gem. diepte IJsselmeer	Jaar	Gem. diepte Markermeer	Dominante soort
1981	439	1981	328	polymorpha
1992	447	1993	336	polymorpha
1999	442	2000	314	polymorpha
2007	453	2006	317	polymorpha
2012	449	2011	308	bugensis
2017	433	2016	301	bugensis
2020	440	019	315	bugensis

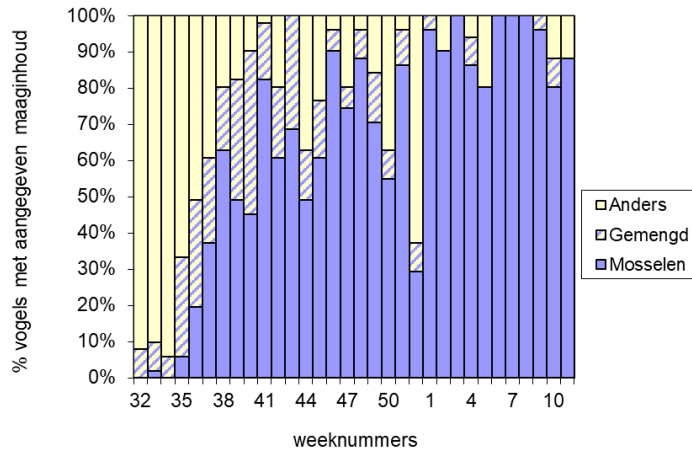
Tabel 3.2. Gemiddelde waterdiepte waarop mosselen voorkwamen in het IJsselmeer en Markermeer (cm waterdiepte, gemiddeld ca. 30 cm lager dan NAP diepte), en de dominante soort in de populatie (polymorpha = driehoeksmossel, bugensis = quaggamossel). Diverse karteringen in opdracht van RWS.

De diepteverdeling van de mosselen bleef door de jaren heen nagenoeg gelijk, ook na de overname van de populatie door de quaggamossel (tabel 3.2). Ook de ruimtelijke verdeling is sinds 1981 ongeveer gelijk gebleven (figuur 3.14).

Relatief hoge dichtheden komen voor in het westen van het Markermeer en het IJmeer, in het zuiden en noordwesten van het IJsselmeer en in de randmeren vooral in het Ketelmeer en het Eemmeer.

3.3.3 Mosselen als voedsel voor vogels

Driehoeks- en Quaggamosselen worden gegeten door watervogels. Soorten met een groter aandeel in hun dieet zijn Kuifeend, Tafeleend, Toppereend, Brilduiker en Meerkoet. Uit onderzoek in de jaren 1980 en begin jaren 1990 bleek dat deze vogels vooral in de wintermaanden sterk afhankelijk waren van deze voedselbron (figuur 3.19; De Leeuw & Van Eerden 1995). Later werden de maaginhouden van enkele eendensoorten diverser (Van Rijn 2012; zie verder).

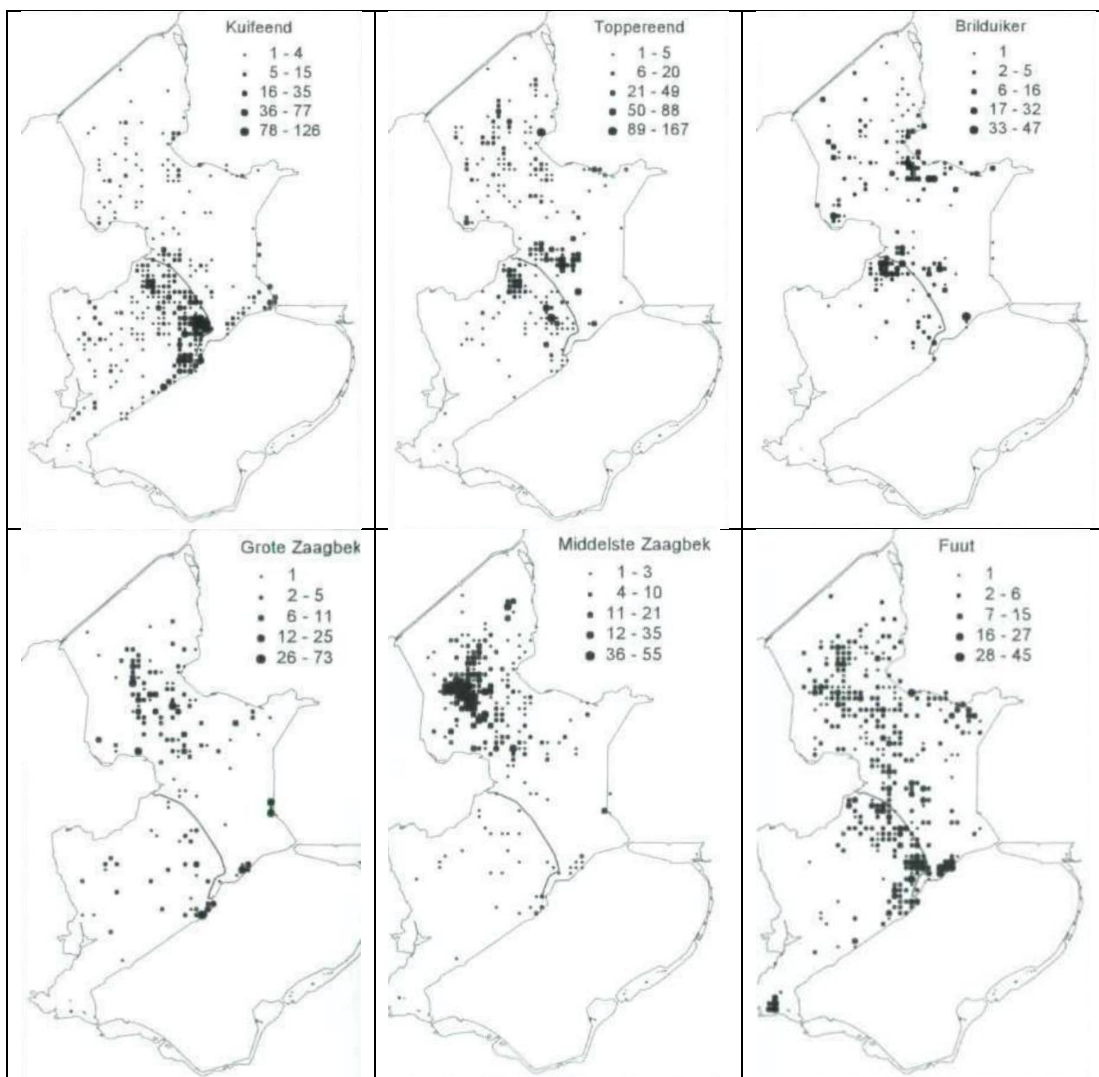


Figuur 3.19. Aandeel van Kuifeenden met (uitsluitend) mosselen in de maag in de loop van het winterseizoen (maaginhouden uit de Leeuw & van Eerden 1995).

De plaatsen waar deze vogels zich overdag ophouden geven indicaties over het foerageergebied. De drie eerstgenoemde vogelsoorten foerageren echter vooral 's nachts, en vliegen daartoe in de avond vanaf deze dagrustplaatsen naar de foerageergebieden, die tot op kilometers afstand kunnen liggen. Deze vliegbewegingen zijn in het verleden vastgelegd met behulp van zicht- en radarwaarnemingen door Bureau Waardenburg (o.a. Spaans et al. 1998; De Leeuw 1997). De verspreiding van nachtelijk foeragerende eenden bleek ook uit inventarisatie van vogels die waren verdronken in visnetten. Deze vogels werden verzameld in de periode 1978-1990, dus in de periode van de onderzoeken uit hoofdstuk 2, maar de gegevens werden pas later uitgewerkt in een rapport (Van Eerden et al. 1999; figuur 3.20). Hoewel de verspreiding van verdronken vogels natuurlijk is gerelateerd aan die van de netten (uitgewerkt in het genoemde rapport) laat dit onderzoek zien hoe foeragerende vogels zich over het hele IJsselmeer en Markermeer verspreiden, en dat afwezigheid (bijv. mosseletende eenden bij de Houtribhoek in het zuidelijk IJsselmeer) eerder door duikdiepte beperkt is dan door de afstand tot de dagrustplaatsen. Uit de dieptes ter plaatse van de netten waarin de vogels zijn gevangen blijkt dat deze beperking vooral geldt voor de mosseleters. De grotere viseters foerageren gemiddeld vaak op grotere dieptes (tabel 3.3). Uit de grote maximum dieptes blijkt dat ze daarbij ook de geulen en putten bezoeken. Dat geldt vooral voor de Aalscholver, maar ook voor de Fuut, die de meest gevangen watervogel in de IJmeerput was (figuur 3.20).

Experimenteel onderzoek naar de dieptes die mosseletende eenden (Kuif- Tafel- en Toppereend) bij het foerageren konden bereiken is begin jaren 1990 uitgevoerd door De Leeuw (1997). De vogels foerageren op mosselen tot op een diepte waarbij de opbrengst niet langer opweegt tegen de duikkosten.

Wat die diepte is hangt ook af van factoren als watertemperatuur, maar ook van de dichtheid, vleesinhoud, grootteverdeling en bevestiging van de mosselen. Uit het onderzoek bleek dat, terwijl de dichtheid aanvankelijk toeneemt met de diepte, enerzijds de relatieve vleesinhoud afneemt, terwijl anderzijds met de afnemende reserves door de mosselen minder wordt geïnvesteerd in de bevestiging ("byssusdraden"), waardoor ze op grotere diepte minder goed vast zitten. Ook bleek dat in het Markermeer, behalve de geringere diepte waarop de mosselen voorkomen, de relatieve vleesinhoud kleiner is dan in het IJsselmeer.

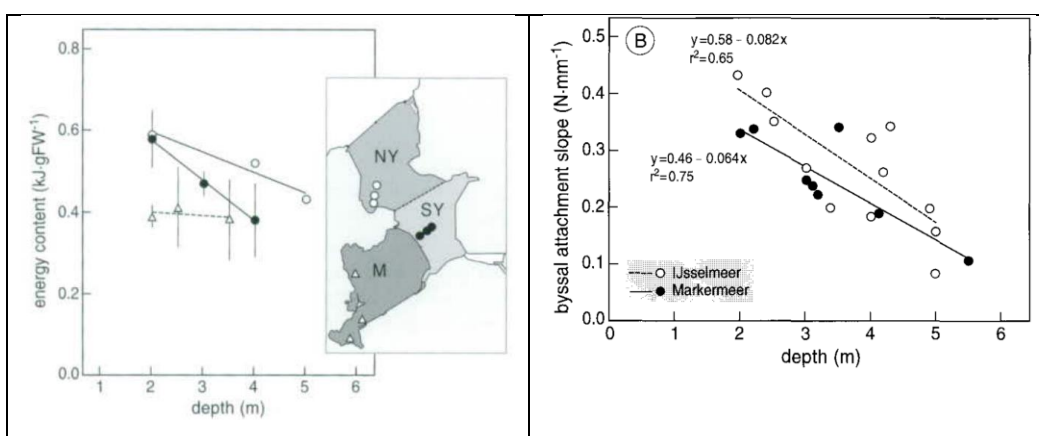


Figuur 3.20. Voorbeelden van indicaties voor de verspreiding van foeragerende vogels over het IJsselmeer en Markermeer op basis van vogels die verdronken zijn in visnetten (periode 1978-1990; uit Van Eerden et al. 1999). Boven drie mosseletende eenden, onder drie viseters.

Tabel 3.3. Dieptes waarop de netten stonden waarin watervogels zijn gevangen. Uit Van Eerden et al. 1999.

VOEDSEL	SOORT	DIEPTE (m)			SD	N
		gem	max	min		
Mossel	Brielduiker	3,2	7,0	1,5	0,9	760
	Eidereend	3,8	4,3	3,0	0,7	3
	Grote zee-eend	3,2	4,0	2,5	0,8	3
	Ijseend	3,0	3,0	3,0		1
	Kuifeend	3,7	8,5	1,5	0,7	2424
	Meerkoet	2,7	8,0	1,2	1,3	77
	Tafeleend	3,5	6,5	1,5	0,9	325
	Toppereend	3,8	8,0	2,0	0,7	2261
Zwarte zee-eend	3,9	5,5	2,5	0,8	18	
Vis	Aalscholver	10,7	24,0	3,0	6,4	52
	Fuut	5,3	22,0	0,1	3,2	1410
	Geoorde fuut	2,8	4,0	1,5	1,8	2
	Grote zaagbek	5,2	9,9	2,5	1,4	461
	Kuifduiker	3,8	4,5	3,5	0,5	4
	Middelste zaagbek	5,6	9,9	2,0	1,0	1695
	Nonnetje	4,0	6,5	2,0	0,6	212
	Roodhalsfuut	5,2	12,5	2,5	2,1	20
	Roodkeelduiker	4,4	5,5	3,0	1,1	4

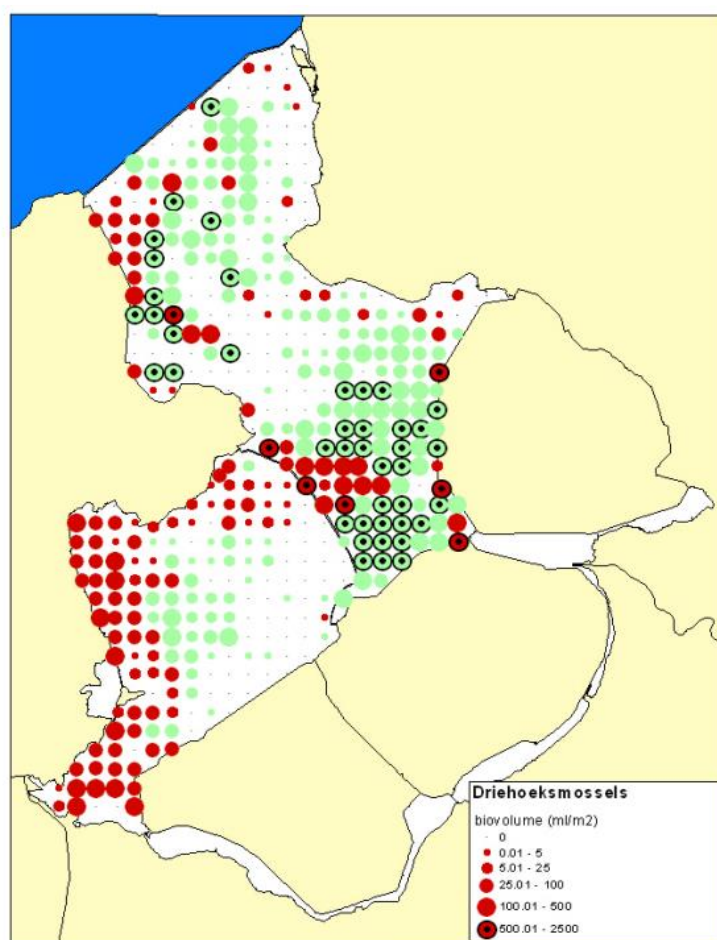
Grotere vogels, zoals onder de mosseleers de toppereend, kunnen iets dieper duiken. Met afnemende mosseldichtheden gaan ze in de loop van de winter iets dieper duiken, de toppereenden tot ca. 5 meter, totdat dat niet meer rendabel is. Op grond hiervan werd de maximum diepte voor rendabel foerageren in het IJsselmeer gesteld op ongeveer 5 m waterdiepte en in het Markermeer op 4 m.



Figuur 3.21. Eigenschappen van mosselen in relatie tot de waterdiepte. Links de conditie (energie inhoud) van de mosselen in het IJsselmeer en het Markermeer (De Leeuw 1997), rechts de sterkte van de byssusdraden (De Leeuw 1999).

Verlies van mosselen op bereikbare dieptes voor deze soorten betekent dus effect op de voedselbeschikbaarheid voor deze soorten. In het verleden is de afhankelijkheid van mosselen voor enkele van deze soorten zo groot geweest is dat veranderingen in dichtheid en verspreiding grote gevolgen had voor aantallen en verspreiding van de vogels. Er zijn aanwijzingen dat met de toename van waterplanten en daarmee geassocieerde macrofauna de afhankelijkheid van mosselen is afgenomen (Van Rijn et al. 2012).

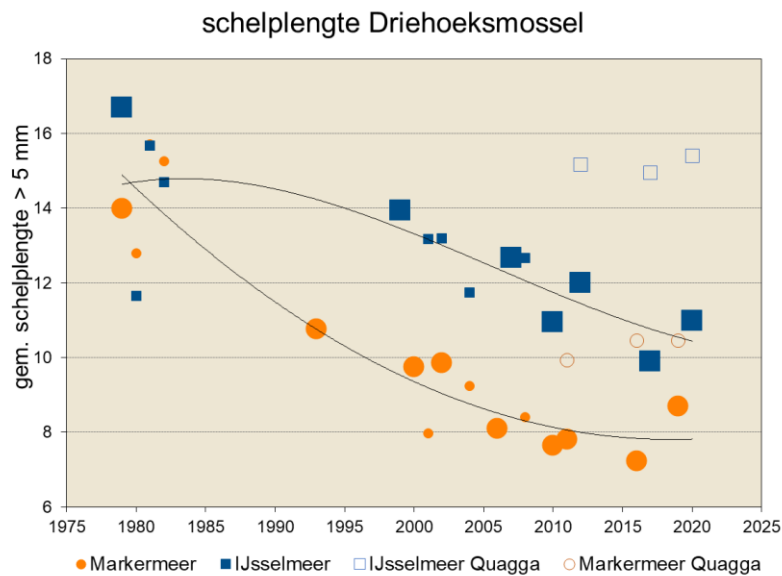
Dat geldt waarschijnlijk in mindere mate voor de Toppereend, die pas vanaf november in het gebied arriveert, als de waterplanten grotendeels zijn verdwenen (net als de Brilduiker, maar die had al een wat diverser dieet). Toppereenden kunnen als zwaarste van de genoemde vogelsoorten de grootste diepte bereiken. In de loop van de winter neemt de duikdiepte toe naar 5 meter, naar mate het aanbod op geringere diepe afneemt. Mogelijk is het foerageren op 5 meter echter niet meer “profijtelijk” (duikkosten zijn hoger dan opbrengst) (De Leeuw 1997). Uit het onderzoek van De Leeuw bleek ook een verschil in voedingswaarde tussen de mosselen in het IJsselmeer en die in het Markermeer, terwijl uit monitoringsdata bleek dat de mosselen uit het Markermeer bij dezelfde schelpenlengte minder vlees bevatten dan mosselen uit het IJsselmeer (Noordhuis 2010; Noordhuis & Houwing 2003). Dit was aanleiding om voor de kanskaarten voor zandwinning in de Natura 2000 beheerplannen een grens van 5 meter aan te houden voor het IJsselmeer en van 4 meter voor het Markermeer (zie hoofdstuk 6). Van Eerden et al. (2005; figuur 3.22) gaven een kaart op basis van de mosselkarteringen van 1999/2000, met daarin aangegeven het voor Toppereenden bereikbare deel. De gebruikte dieptegrens wordt niet genoemd, maar komt op basis van vergelijking met de karteringsgegevens neer op 4 meter -NAP voor beide meren. Vooral omdat De Leeuw uitgaat van duikdiepte in plaats van NAP diepte is dat voor het IJsselmeer aan de ondiepe kant.



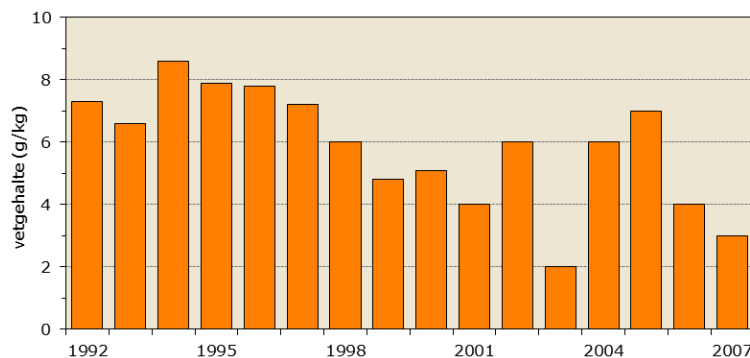
Figuur 3.22. Dichtheden van Driehoeksmosselen in 1999/2000 (biovolume in ml per m²) met in rood het aandeel dat voor Toppereenden bereikbaar was, in groen de dieper gelegen mosselen. Uit Van Eerden et al. 2005

Sinds het onderzoek van De Leeuw zijn de nutriëntconcentraties zowel als de gemiddelde grootte van de Driehoeksmosselen verder afgenomen (figuur 3.23). Terwijl die afname toen in het Markermeer al gaande was, heeft een afname na die periode ook in het IJsselmeer plaatsgevonden. De huidige gemiddelde lengte van Driehoeksmossel in het IJsselmeer is vergelijkbaar met de gemiddelde lengte in het Markermeer tijdens dat onderzoek (begin jaren 1990). Uit het IJsselmeer is ook een afname bekend van het gemiddelde vetgehalte in Driehoeksmosselen die zich na dit onderzoek heeft voorgedaan (gegevens 1992-2007; figuur 3.24).

De quaggamosselen, die sinds ongeveer 2010 dominant zijn, worden gemiddeld iets groter (figuur 3.24). Beide soorten worden door vogels gegeten (Van Rijn et al. 2012), maar details over veranderingen en verschillen in voedingswaarde van quaggamosselen zijn niet bekend, hoewel ook bij deze soort de gemiddelde lengte aanzienlijk lager is in het Markermeer dan in het IJsselmeer.



Figuur 3.23. Verloop van de gemiddelde schelplengte van Driehoeksmosselen en Quaggamosselen (schelpjes tot en met 6 mm niet meegenomen) van 1979 t/m 2020.



Figuur 3.24. Vetgehaltenes van Driehoeksmosselen in het IJsselmeer bij de Zeughoek (bepaald t.b.v. het onderdeel ecotoxicologie van MWTL).

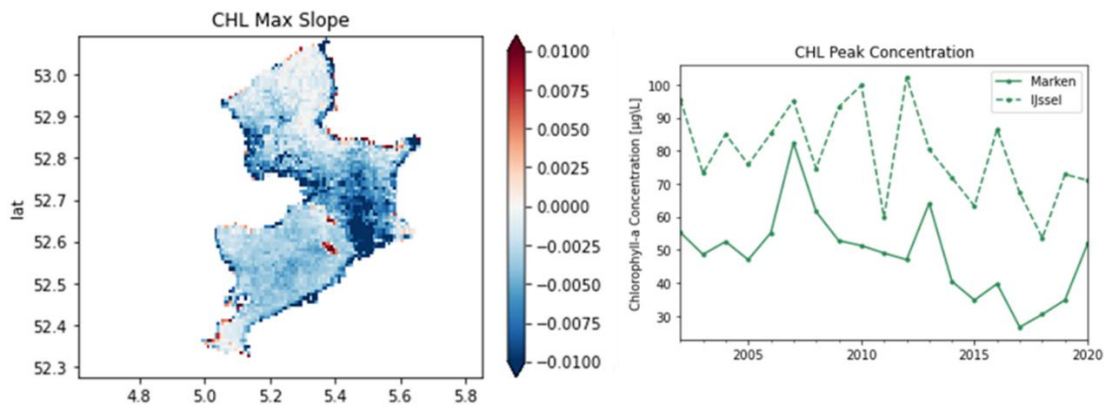
3.3.4 Filtratie en waterkwaliteit:

Gemiddeld ongeveer 70% van de mosselen in het IJsselmeer komen voor op een waterdiepte van meer dan 4 meter, bijna de helft op meer dan 4,5 meter en bijna 20% op meer dan 5 meter (tabel 3.4), waarschijnlijk ook in samenhang met de afnemende predatiedruk door de vogels. Dat kan betekenen dat zandwinning op een diepte groter dan de duikdiepte van de vogels een relatief groot effect op de mosselpopulatie kan hebben. Dit is relevant omdat mosselen in hoge dichtheden via bodemafdekking en filtratie een groot effect op de waterkwaliteit kunnen hebben.

Tabel 3.4. Percentage van de mosselpopulatie (in biovolume) van het IJsselmeer dat dieper dan 4, 4,5 en 5 meter waterdiepte voorkwam. Relatie tussen de bij de kartering gemeten waterdiepte en de abundantie van de mosselen (biovolume in ml waterverplaatsing per m²). Op basis van diverse karteringen door of in opdracht van RWS.

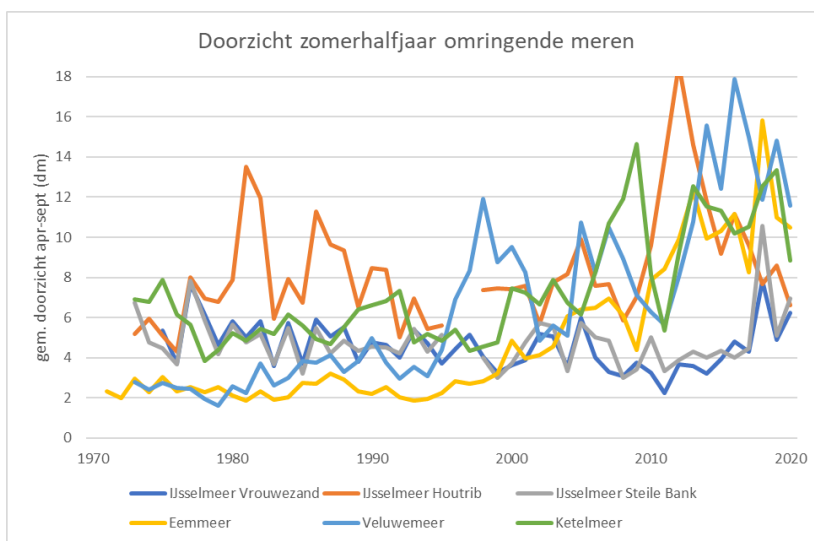
	>4	>4,5	>5
1981	65,2	41,1	13,5
1992	76,0	46,5	20,3
1999	70,8	43,4	13,9
2007	74,2	60,2	23,5
2012	70,7	56,1	19,0
2017	62,7	47,8	16,1
2020	69,4	43,2	18,2
gem.	69,8	48,3	17,8

Driehoeksmosselen en Quaggamosselen zijn filterfeeders die in hoge dichtheden het water aanzienlijk helderder kunnen maken, met gevolgen voor onder meer de kans op waterplanten, de diversiteit voor andere macrofauna en de vangbaarheid van vis voor visetende watervogels. Dit is vooral gebleken toen de invasie van Quaggamosselen tot hoge dichtheden leidde in het zuidelijke IJsselmeer, het IJmeer en het Eemmeer. De laatste jaren zijn de dichtheden weer iets afgenomen, net als het gemiddelde doorzicht in deze gebieden. Dit is te zien aan de monitoringsdata van mosselen en waterkwaliteit (figuur 3.1, figuur 3.15), maar ook aan ruimtelijke vergelijking van de mate van afname van chlorofyl in de periode 2002-2020 en de mosselverspreiding (figuur 3.25). Vanaf 2010, dus in de tweede helft van deze periode, waren de mosseldichtheden en de doorzichten in de mosselgebieden verhoogd en de chlorofylconcentraties verlaagd. De lineaire trends in chlorofyl concentratie waren vooral in het IJsselmeer negatief. In het IJsselmeer is de mate Figuur 3.25 geeft de hellingshoek van de lineaire afname per pixel. De ruimtelijke patronen in de sterkte van de afname komen sterk overeen met de patronen in mosseldichtheid. In het Markermeer is dit niet het geval. Mogelijk komt dit doordat de mosselgebieden hier ondieper zijn en de toename van de helderheid en afname van algen samen ging met de toename van waterplanten, waardoor de satelliet geen afname in chlorofyl zag. Maar het is ook mogelijk dat de productie van het fytoplankton de mosselfiltratie hier beter kan bijhouden dan in het zuidelijke IJsselmeer door hogere mosseldichtheden in een meer besloten gebied aldaar.

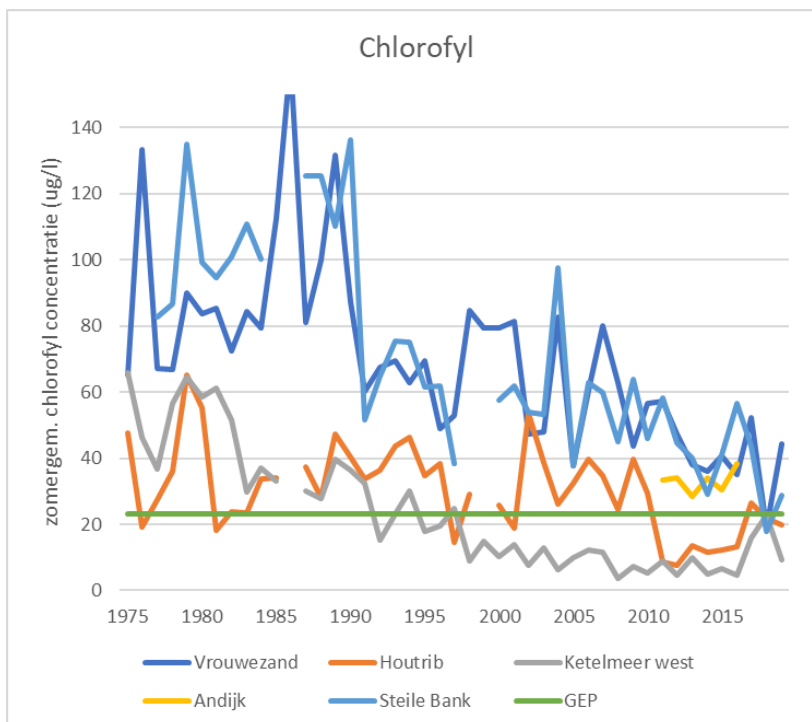


Figuur 3.25. Trend in chlorofyl op basis van bewerkte satellietbeelden in het kader van Europees project BIOMONDO. Rechts het verloop van de gemiddelde chlorofylconcentratie per jaar in IJsselmeer en Markermeer. Links de ruimtelijke verdeling van de hellingshoek van de lineaire trend per pixel.

Relevant in verband met zandwinning en ecologie is het effect van filtratie op de EKR scores voor doorzicht en chlorofyl. Beide parameters voldoen in het IJsselmeer alleen op locatie Houtribhoek aan de GEP (90 cm zomerdoorzicht, resp. 23 µg/l chlorofyl), de parameter doorzicht zelfs alleen ten tijde van de hoogste mosseldichtheden (figuur 3.26a). Verlies van areaal mosselen heeft dus effect op de EKR's van de KRW maatlat voor fytoplankton en het doelbereik van de parameter doorzicht (algemene fysische chemie). De GEP voor fytoplankton wordt in het IJsselmeer in de meeste jaren niet gehaald, in de overige meren wel (figuur 3.26b, tabel 3.5). De lage score in het IJsselmeer is gebaseerd op zowel abundantie als op kwaliteit en soortsamenstelling.



Figuur 3.26a. Zomergemiddelde doorzichtwaarden in het IJsselmeer. Gegevens (vierwekelijkse opnames op de aangegeven meetpunten) RWS, www.waterninfo.nl.



Figuur 3.26b. Zomergemiddelde chlorofylconcentraties in het IJsselmeer (Ketelmeer west als ingang), in vergelijking met de grenswaarde tussen KRW beoordeling matig en goed (Goed Ecologisch Potentieel = GEP; 23 µg/l). Gegevens (vierwekelijkse opnames op de aangegeven meetpunten) RWS, www.waterninfo.nl.

Tabel 3.5. Door rijkswaterstaat berekende EKR scores voor fytoplankton per jaar per waterlichaam (gemiddelde van deelmaatlaten abundantie, kwaliteit en soortsamenstelling). Gegeven <https://waterinfo-extra.rws.nl/>

	GEP	0,58	0,47	0,6	0,6	0,6	0,6
	Markerme	IJsselmeer	Ketelmeer	Zwarte Me	Randmere	Randmere	
2013	0,46	0,39	0,63	0,58	0,67	0,58	
2014	0,48	0,43	1	0,51	1	0,51	
2015	0,42	0,4	1	1	0,83	1	
2016	0,48	0,45	1	1	0,65	0,52	
2017	0,56	0,37	0,57	1	0,7	0,58	
2018	0,6	0,54	0,51		1	0,7	
2019	0,53	0,4	0,81		0,7	0,7	
2020	0,61	0,45	0,65		0,7	1	
2021	0,64	0,32	0,6	0,95	0,66	0,67	

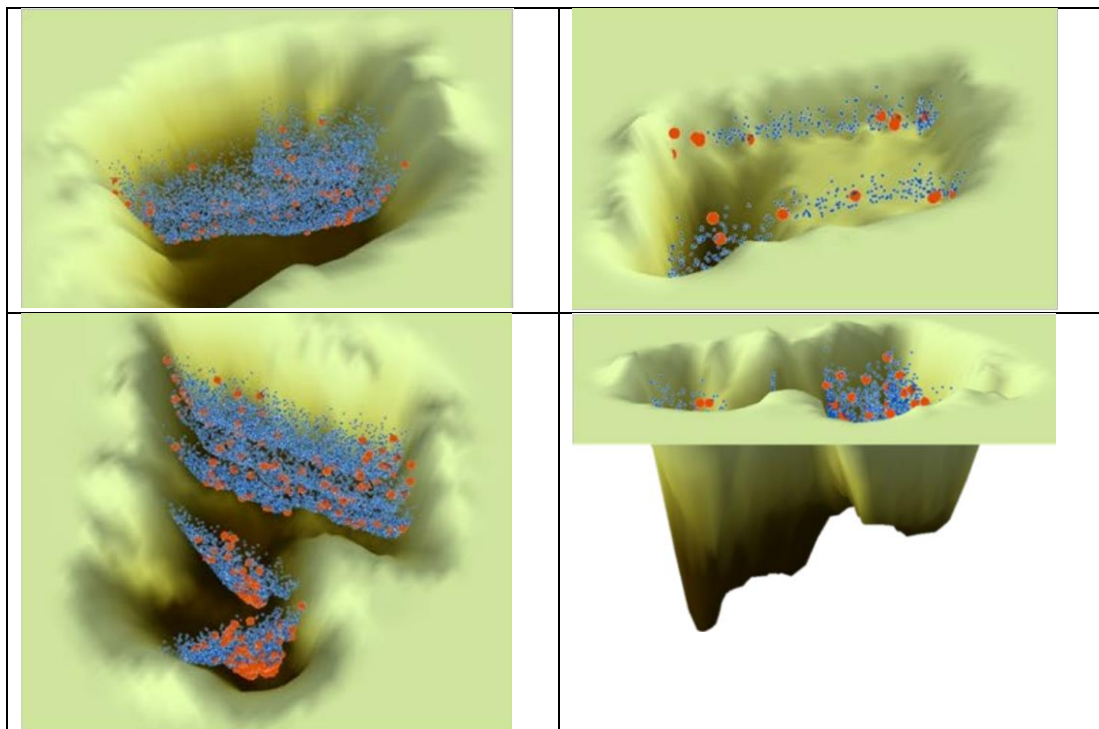
3.3.5 Overige macrofauna

Andere bodemfauna dan mosselen is alleen gekarteerd in het Markermeer-IJmeer in 2016 (WEnR). Ook organismen als muggenlarven, vlokreeftjes, slakjes en zelfs mosselkreeftjes (ostracoden) worden door duikende watervogels als voedsel gebruikt. Er is geen informatie beschikbaar over de maximale diepte waarop deze prooien worden gevangen, maar die zal vergelijkbaar zijn met de diepte tot waarop het foerageren op mosselen nog rendabel is.

3.4 Vis

Ook de visbiomassa is sinds de jaren 1980 fors afgenomen, met grote verschillen per soort. Wat dat betekent voor de functie van putten voor vis is slecht in te schatten. Wel is het gebruik van putten door vis door recent onderzoek bevestigd. Dichtheden van vis in de putten zijn verhoogd, met enig verschil in soorten (vooral snoekbaars, baars, aal, minder bij spiering en brasem).

In drie slibvangputten bij Marken Wadden werd op 20 augustus 2019 via echosounding vastgesteld hoeveel vis aanwezig was (De Leeuw et al. 2022). In totaal werden 46.000 signalen geregistreerd, het meest in put 2 en nog meer in put 5, waar de vis verspreid was tot op een diepte van ruim 30m. Vooral snoekbaars, pos en grondels werden verspreid over de gehele waterkolom aangetroffen, spiering en baars vooral in de bovenste 10 meter. De slibvanggeul (put 1) werd ook bemonsterd, hier werd geen vis aangetroffen.



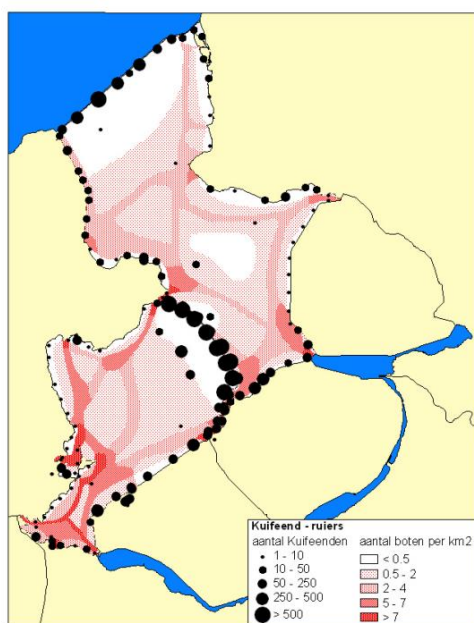
Figuur 3.21. Linksboven: put 2 (NW), rechtsboven: put 1 (NO), links en rechtsonder: put 4 (ZW; nummering zie figuur 3.6). Blauw = kleine vis (m.n. spiering, pos en baars), groen = middelgrote vis, rood = grote vis (m.n. snoekbaars). Uit De Leeuw et al. 2022.

De verspreiding van vis tot op de bodem van de putten suggereert dat de putten op 20 aug 2019 niet gestratificeerd waren, hoewel de beperking van spiering tot op een diepte van 10 m enige afname naar beneden toe zou kunnen indiceren (spiering is als zalmachtige gevoelig voor zuurstofconcentraties lager dan 8 mg/l). Het ontbreken van stratificatie op dit moment past in het beeld dat de modellering over het jaar ervoor oplevert, met een sterk verminderd optreden van stratificatie als de temperaturen vanaf begin augustus weer gaan dalen. Eerder in het seizoen zouden dus ook de andere soorten tot de hogere waterlagen in de putten beperkt kunnen zijn geweest. Put 5, met de meeste vis in augustus 2019, was in 2018 de put met de sterkste stratificatie, met een temperatuurverloop dat opliep tot meer dan 7°C verschil tussen boven- en onderlaag.

3.5 Vogels

Effecten van zandwinning op de voedselbeschikbaarheid voor benthivore vogels (soorten die bijv. mosselen eten) is besproken in paragraaf 3.3. Terwijl deze benthivoren en ook planteneters voedselgebied kunnen verliezen door ontgrondingen, kunnen viseters profiteren van de aantrekkingskracht van putten voor vis. Visetende vogels zoals Aalscholvers foerageren tot op ca 15 meter, en kunnen geconcentreerd foerageren op vis die in putten heeft overwinterd, op het moment dat ze in het voorjaar naar boven komen. Een van de vistechnieken van Aalscholver is solitair vissen door vissen van onderaf op het talud te bejagen (Van Eerden et al. 2005; Van Rijn et al. 2004).

Monitoring van vogels vindt maandelijks plaats. Voor het IJsselmeer en Markermeer wordt geteld vanuit een vliegtuig. Deze tellingen concentreren zich langs de randen van de meren (waar de meeste vogels overdag verblijven). Het open water wordt overdag gebruikt door een aantal visetende soorten en voornamelijk 's nachts door mosseletende duikeenden (kuif-, tafel- en toppereend). Zandwinning kan op verschillende manieren invloed hebben op de beschikbaarheid van vis voor watervogels:



Figuur 3.22. Verspreiding van ruiende duikeenden en futen in de nazomer (juli-augustus), en de gemiddelde bootdichtheid op een zomerse dag in het IJsselmeergebied, gebaseerd op gegevens van de Stichting Waterrecreatie Advies, IIVIJ en waarnemingen van de auteurs (Van Rijn et al. 2004).

4 Aanvullende kennis fysische aspecten

Uit het historische onderzoek kwam al naar voren dat putten en andere diepten kunnen werken als slibvang en fosfaatvang. De mate waarin dat gebeurt hangt sterk af van de locatie, en neemt toe met de diepte, (figuur 4.1), af met de expositie. Ook speelt de sedimentsamenstelling in de omgeving waarschijnlijk een rol, omdat die van invloed is op de mate van resuspensie en de transportmogelijkheden. Algehele nivellering van het bodemprofiel van het IJsselmeergebied komt duidelijk naar voren in de historische analyse van Sterk (2010; figuur 4.2; figuur 4.3). De werking als slibvang komt naar voren in een tweetal verschilkaarten in bodemhoogte over de periode 1990-2001, in het Markermeer-IJmeer (figuur 4.4) en in het Eem- en Gooimeer (figuur 4.5). Een recente analyse met betrekking tot het Markermeer (Noordhuis et al. 2022) suggereert dat onder de huidige, relatief voedselarme omstandigheden een zodanig groot deel van de totale aanvoer van fosfaat in diepe putten accumuleert dat de productie van het Markermeer wordt beperkt. Dit betekent dat de beoordeling van de ecologische effecten van de putten complexer wordt. Vanwege het grote aandeel van fijn sediment en de windgevoeligheid van het Markermeer zijn de bevindingen uit onderzoek aan dit systeem bovendien niet direct toepasbaar op andere meren.

4.1 Transport van sediment en zandwinning in het IJsselmeergebied

De meren van het IJsselmeergebied zijn van oorsprong gevormd in een estuariene omgeving met een hoge mate van dynamiek van getij, opstuwing en rivierafvoer. Na de afsluiting en compartimentering is die dynamiek grotendeels weggefallen, waardoor een herverdeling van sediment startte. Deze herverdeling is nog steeds gaande, en uit zich vooral in de opvulling van diepere delen van de meren en een tragere erosie van de ondiepe delen, waardoor een gestage vervlakking van de bodem plaatsvindt.

Deze erosie vindt plaats door activiteiten van bodemfauna (De Lucas Pardo 2014) en door windwerking. Daarnaast wordt sediment in de waterkolom gebracht bij ontgrondingen en andere werkzaamheden in de meren, zoals bij natuurontwikkelingsprojecten. Grotendeels wind-gedreven stroming zorgt voor lateraal transport van gesuspendeerd sediment. Een klein deel van het transport vindt plaats via dichtheidsstroming van sediment met een hoog vochtgehalte dat over de bodem schuift (Vijverberg 2008). Terwijl grof sediment in korte tijd weer sedimenteert, kan fijner sediment zich in een aantal dagen over grote afstanden verplaatsen. Door sedimentatie van verplaatst zwevend stof bij rustig weer of door dichtheidsstromingen bij onstuimig weer kan sediment accumuleren in diepere delen van de meren. Dat zijn niet alleen de zandwinputten, maar ook de oude geulen in het IJsselmeer, diepere delen van de vaargeulen en putten die om andere redenen dan zandwinning gegraven zijn, zoals de slibvangputten bij Marker Wadden.

Zandwinning is dus een van de mechanismen die enerzijds sediment in suspensie brengt, en anderzijds dieptes oplevert waarin sediment (uit een groter gebied) kan accumuleren. Hoe de effecten van zandwinning zich verhouden tot die van andere werkzaamheden en wind-gedreven transport is niet onderzocht.

Dit geldt in feite ook voor de watervolumes in de putten ten opzichte van de totale watermassa in de meren. Bij het hiervoor gerapporteerde onderzoek aan vis bleek dit volume van relatief grote betekenis te zijn.

Anderzijds werd geconcludeerd dat effecten van stratificatie op zuurstofconcentraties en nalevering van fosfaat op het totale watersysteem in elk geval in het Markermeer en IJsselmeer beperkt zijn door het relatief kleine oppervlak van de putten. Mogelijk is dit anders met betrekking tot accumulatie van sediment en de daaraan verbonden voedingsstoffen in putten, omdat zich door transport in met name de wintermaanden materiaal van veel grotere gebieden in de putten kan verzamelen.

De mate waarin dat gebeurt hangt waarschijnlijk sterk af van de sedimenttype in het meer, de locatie (strijk lengtes, dieptes) en wellicht ook de vormgeving van de putten. Locatiekeuze en vormgeving van putten kan dergelijke effecten dus in principe mitigeren.

In de volgende drie paragrafen worden aspecten van de herverdeling van sediment in het IJsselmeergebied verkend. Daarbij wordt stratificatie (paragraaf 4.4) ook gezien als schatter voor accumulatie van sediment. Temperatuurstratificatie kan vooralsnog beter worden gemodelleerd dan sedimentverplaatsing, maar vindt bij vergelijkbare diepteverdelingen plaats, aangezien er in perioden met stratificatie geen uitwisseling van water is over de spronglaag, zodat gesedimenteerd materiaal voor de duur van de stratificatie “gevangen” blijft. Dit idee wordt ondersteund door bevindingen uit het onderzoek aan de proefputten in het Markermeer, waarbij modellering aangeeft dat meer in het algemeen (hele jaar) sediment in een put niet meer suspendeert bij dieptes van meer dan 6 tot 10 meter, afhankelijk van de doorsnede (Boderie et al. 2010). Als de put zich door accumulatie van sediment gevuld heeft tot geringere dieptes dan die grenswaarden, krijgen wind en stroming weer vat op het materiaal en stopt de accumulatie uiteindelijk. Op lange termijn is het effect in die zin dus een geringe verdieping van het hele meer.

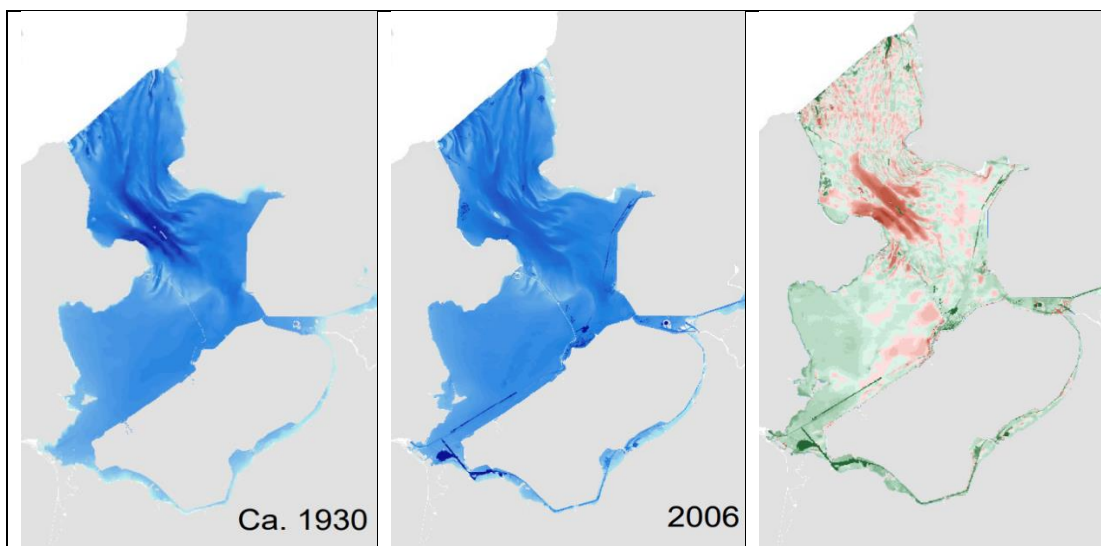
4.2 Diepteverdeling en veranderingen daarin

- KRW dieptezone waterplanten: zone tot 3 meter waterdiepte (watertype M21, grote diepe gebufferde meren; Van der Molen et al. 2018), dus bij zomerstreefpeil 3,2 meter -NAP.
- Diepteverdeling mosselen en maximum profijtelijke diepte voor duikeenden, met Topper als meest relevante door relatief grote afhankelijkheid mosselen en relatief hoog lichaamsgewicht (grootste profijtelijke diepte mosseleeters).



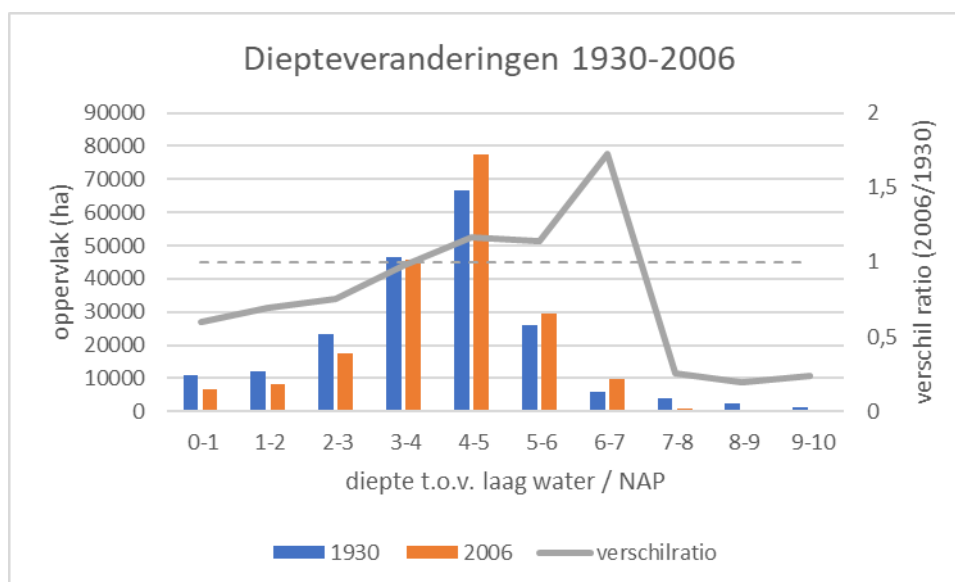
Figuur 4.1. Dieptekaart van het IJsselmeergebied.
<http://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/mapviewer2/>

Door de compartimentering van het oude Zuiderzeegebied is het oude bodemprofiel dat was verbonden aan de dynamiek van de IJssel en de getijdestromen in het noorden, steeds meer genivelleerd, net als dat in de Zeeuwse stromen is gebeurd (zandhonger Oosterschelde). Dit komt duidelijk naar voren op de verschilkaart van bodemhoogtes in vooral het IJsselmeer tussen 1930 en 2006. Ondieptes zijn dieper geworden, dieptes ondieper. De grootste veranderingen zijn daarbij opgetreden in de diepste delen van het IJsselmeer; oorspronkelijke diepten van meer dan 7 meter, zoals de centrale geulen, zijn nagenoeg verdwenen door opvulling.



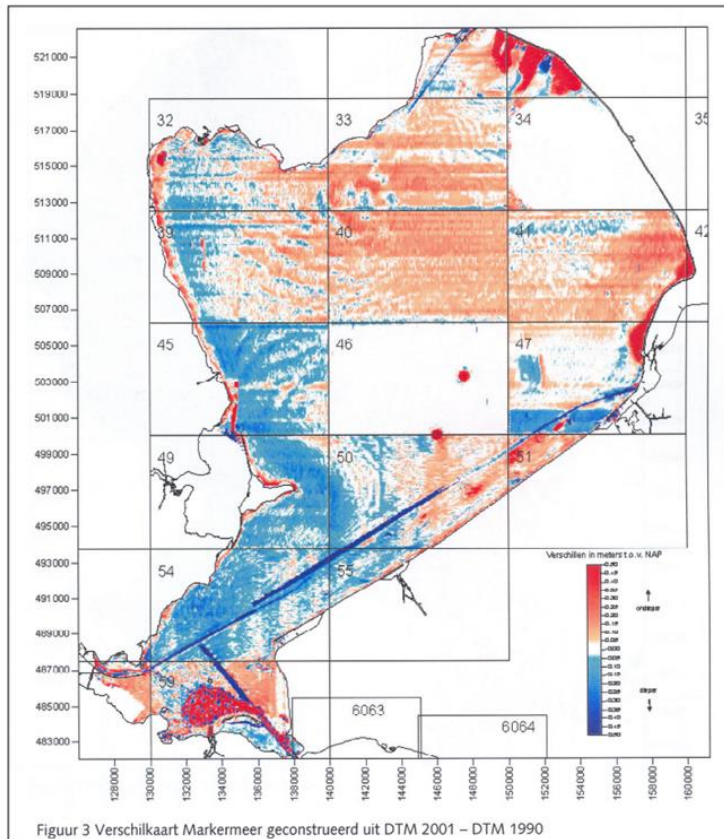
Figuur 4.2. Gedigitaliseerde bodemkaarten uit 1930 en 2006 en verschilkaart. Uit Sterk 2010. Dieptekaart tevens via

https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=Waterplantenbedekking_RWS_MN.Webviewer

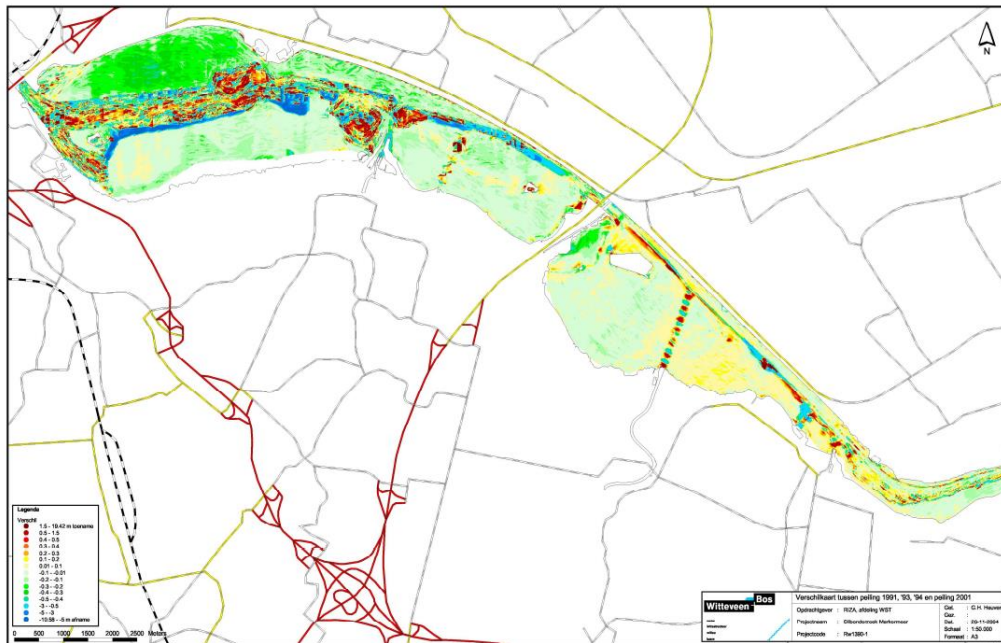


Figuur 4.3. Veranderingen in de diepteverdeling van het IJsselmeer, Markermeer en Randmeren tussen 1930 en 2006 (Sterk 2010). Betreft het wateroppervlak in 2006, inclusief randmeren, maar exclusief de huidige polders.

Ook op de verschilkaart van bodemhoogtes in het Markermeer tussen 1990 en 2001 is te zien hoe de sedimentatie en erosieprocessen resulteren in verplaatsing van sediment van ondiepere erosiegebieden in het westen van het Markermeer en het IJmeer naar dieper gelegen sedimentatiegebieden in het midden, oosten en noorden. Daarnaast is op deze kaart goed zichtbaar hoe versterkte ophoging plaatsvindt door accumulatie van sediment in de diepere delen, zowel in de zandwinputten als in oude geulen en in bepaalde luwtes (Houtribhoek). Ook daarbij lijkt sprake te zijn van beperkte verdieping in de omgeving. Op de verschilkaart van het Markermeer lijkt dat alleen lokaal plaats te vinden (verschil betreft ook slechts 11 jaar). In de zuidelijke randmeren lijkt dit tussen 1991 en 2001 duidelijker op te zijn getreden (figuur 4.5).



Figuur 4.4. Verschilkaart tussen 2001 en 1990 van de bodemhoogtes in het Markermeer-IJmeer. Uit van Leeuwen 2005 (gemaakt door RWS).



4.3 Accumulatie

Het erosie/resuspensie – sedimentatie evenwicht is in de grote, ondiepe meren van het IJsselmeergebied sterk wind-gestuurd. Met name als het sediment fijn is (Markermeer) blijft het na resuspensie lang in de waterkolom, waardoor het over grote afstanden kan worden verplaatst. Omdat ook de stroming grotendeels wind-gestuurd is, vindt dat transport het sterkst in de winter plaats, wanneer de windsnelheid het grootst is, dan wel wanneer het het vaakst stormt. Ondersteunde informatie hieromtrent is te vinden in Bijlage A. De verschillende meren zijn door verschillen in strijklengte, diepte en bodemsamenstelling in verschillende mate gevoelig voor wind-gestuurd transport van gesuspenseerd materiaal.

Uit bodemhoogte verschilkaarten over de periode 1990-2001 (figuur 4.4, figuur 4.5) kan een indruk worden verkregen van de omvang van accumulatie van gehersedimenteerd materiaal in putten, geulen en andere sedimentatiegebieden. Met behulp van Van Leeuwen 2005 en Boderie et al. 2010 kan een indruk worden verkregen van de snelheid waarmee slib accumuleert in de putten in het Markermeer-IJmeer en het Gooimeer. Volgens Van Leeuwen (2005) komen in het Gooimeer relatief hoge stroomsnelheden voor als gevolg van op- en afwaaiing in het IJmeer. Sediment dat bij storm wordt opgewerveld verplaatst zich over grote afstanden in zowel de zuidelijke randmeren als in het Markermeer, waardoor zich in de putten sediment kan afzetten vanuit een groot brongebied. Volgens Boderie et al. 2010 is er een sterke relatie tussen de diepte van putten en het erosie-sedimentatie evenwicht. Bij diepere putten neemt de erosie af, en beneden een drempelwaarde speelt die nauwelijks een rol meer. Wat daar sedimenteert, komt er niet meer uit. Bij kleine putten is die diepte ongeveer 7 m -NAP, bij grote putten zoals de IJmeer- en Eemmeerputten 10 m -NAP.

Door gegevens over sedimentatiesnelheden te combineren met concentraties gebonden stoffen, ontstaat ook een indruk van de opslag van die stoffen en de invloed daarvan op de stoffenbalansen van het meer. In Noordhuis et al. 2022 wordt een schatting gemaakt van de hoeveelheid fosfaat die permanent in de putten van het Markermeer, IJmeer en Zuidelijke Randmeren accumuleert. Die hoeveelheid lijkt tegenwoordig in dit systeem een fors deel van de externe belasting uit te maken.

Ook recente metingen in het sediment op de bodem van putten zijn schaars tot afwezig. Een uitzondering is de meetcampagne rond Marker Wadden in het kader van KIMA. Hier zijn metingen verricht van een aantal stoffen in sediment op verschillende locaties rond de eilanden in aanleg, in 2020 voor het eerst ook in de slibvanggeul ten westen van de eilanden (tabel 4.1; Roskam 2020). Daarbij blijkt op die locatie het aandeel fosfor in droge stof bijna twee keer zo hoog te zijn als gemiddeld op de locaties buiten de geul. Het aandeel organisch stof was ruim drie keer zo hoog.

Accumulatie van organisch stof zou ook kunnen worden geïndiceerd door de relatief hoge gehalten aan “humus” in de IJmeerput ten opzichte van de Almereput in 1977-1979, verklaard uit een functie van slibvang voor een relatief groot gebied, waaronder een deel van het Markermeer (Onderzoekcommissie Diepe Putten IJsselmeer en Randmeren 1980). De concentraties in de “Shellput” bij Lelystad en de Flevopot in het zuidelijke IJsselmeer waren nog hoger.

Tabel 4.1. Chemische samenstelling van de toplaag van het sediment rond Marker Wadden. Locatie 33 betreft de slibvanggeul, de overige locaties lagen buiten de putten. Alle parameters zijn weergegeven in percentages van de droge stof. D (0,5) is de mediane deeltjesgrootte. Uit Roskam 2020.

Locatie	OM	CaCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	D (0,5)
4	4,4	11,4	69,7	6,4	2,24	0,11	53
11	4,5	16,6	62,9	6,9	2,75	0,11	51
13	1,0	8,4	80,9	4,6	0,87	0,07	87
17	7,0	12,3	63,2	7,9	3,11	0,15	24
18	3,4	12,4	70,6	6,2	1,82	0,10	61
28	2,7	12,1	71,4	6,2	1,72	0,10	60
33*	13,4	11,1	53,6	9,8	4,48	0,19	17

4.4 Stratificatie

Diepe meren zijn vaak het gehele zomerhalfjaar gestratificeerd. Stratificatie is gelaagdheid van het water die ontstaat als de bovenlaag door instraling opwarmt in een situatie waarin wind en stroming niet voor voldoende menging kunnen zorgen over de gehele waterkolom. Het koudere water houdt een hogere dichtheid en blijft onderin. Het water van de bovenlaag, het epilimnion, blijft in beweging, maar mengt zich niet meer met het water uit de onderlaag, het hypolimnion. Er vormt zich dan een zone met een relatief steile temperatuurgradiënt, het metalimnion op ca 5-10 meter diepte, afhankelijk van het diepteprofiel en de invloed van wind en stroming. Het metalimnion kan abrupt zijn, en dan wordt gesproken van een spronglaag of thermocline. In het epilimnion boven de spronglaag wordt het water door windwerking gemengd, in het hypolimnion daar onder staat het stil. Hier kan onder bepaalde omstandigheden een groot deel van het zuurstof worden geconsumeerd waardoor de mogelijkheden voor flora en fauna beperkt worden en waardoor ook andere chemische processen gaan plaatsvinden.

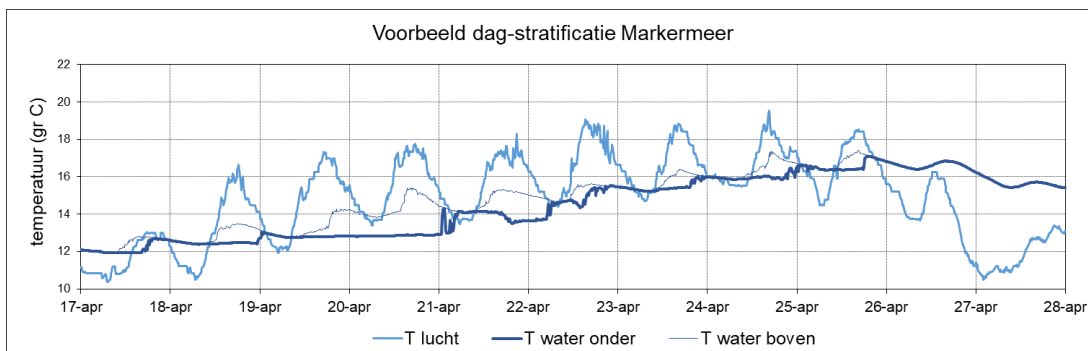
4.4.1 Dagstratificatie

In het IJsselmeergebied komt buiten de putten en geulen alleen dagstratificatie of “microstratificatie” voor. Deze vormt zich op warme, windarme dagen in relatief ondiep water en wordt meestal in de avond weer opgeheven. In de regel duurt dit type stratificatie dus niet langer dan een dag. Alleen tijdens hittegolven kan deze stratificatie langer (meestal 2 of 3 dagen) aanhouden.

Kenmerken van dergelijke dag-stratificatie worden in deze paragraaf geïntervieweerd aan de hand van meetpaaldata van RWS en KNMI gegevens van windstation Houtribdijk en meetstation Stavoren. De meetpalen waren uitgerust met meetapparatuur op twee dieptes, een halve meter onder het wateroppervlak en een halve meter boven de bodem. De metingen hebben dus geen betrekking op diepe putten, maar op boven- en onderkant van de waterkolom op gemiddelde diepte (4-5 m). In deze paragraaf zijn de verschillen in temperatuur en in zuurstofconcentraties tussen deze twee hoogtes gebruikt.

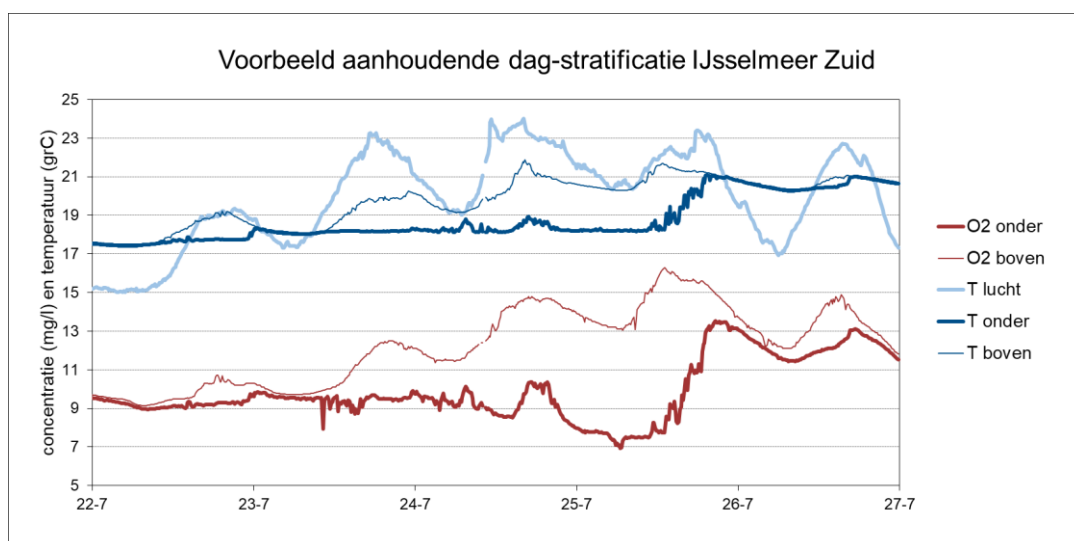
Al in april kan op basis van de meetpaaldata sprake zijn van dag-stratificatie, zoals figuur 4.6 aangeeft op basis van gegevens uit het Markermeer (FL42, bij Rijkswaterstaat meetpunt Markermeer Midden). Op dagen met weinig wind volgt de temperatuur in de bovenlaag van het water de dag-nacht ritmiek van de luchttemperatuur, terwijl de temperatuur van de onderlaag blijft hangen op de nachtwaarde. Meestal treedt in de avond weer menging op, als de boven-temperatuur weer daalt tot de nachtwaarde. Als de luchttemperatuur hoger blijft dan in de voorgaande nacht, kan het voorkomen dat dat ook geldt voor de watertemperatuur in de bovenlaag.

Dan kan de dag-stratificatie verlengd worden tot twee of drie dagen.



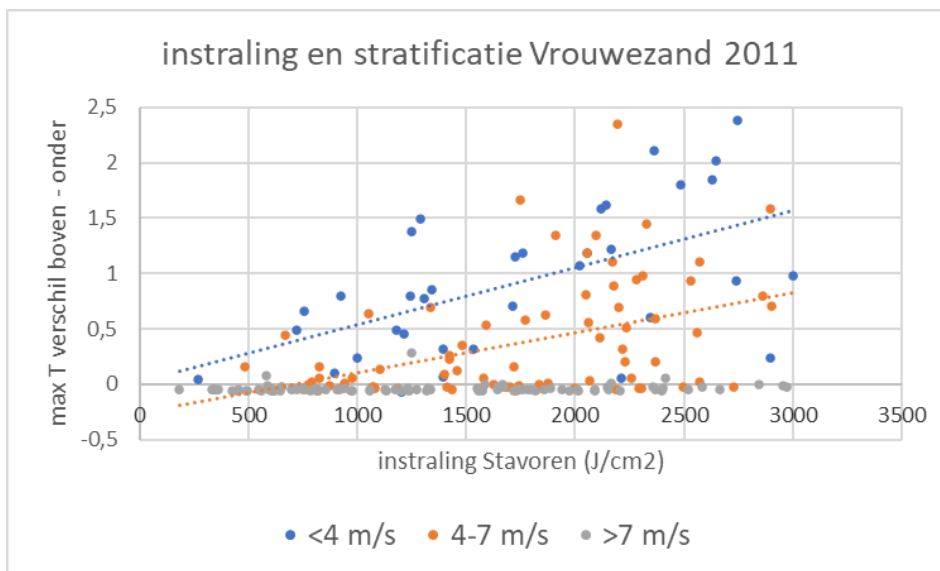
Figuur 4.6. Voorbeeld van het optreden van dag-stratificatie in het Markermeer; Continumetingen aan meetpaal FL42 van luchttemperatuur (blauw), watertemperatuur op een halve meter onder het wateroppervlak (geel) en een halve meter boven de bodem (rood). Continumetingen aan meetpaal FL42, Markermeer Midden, coördinaten 144.440/504.958, diepte ca -4,28 m NAP; gegevens RWS 17 t/m 28 april 2011.

Onder zulke omstandigheden blijft de watertemperatuur in de onderlaag constant, maar kan de zuurstofconcentratie dalen. Figuur 4.7 laat een voorbeeld zien uit juli 2012, waarbij in een periode van iets meer dan twee dagen de zuurstofconcentratie in de onderlaag daalt tot 7 mg/l (zuidelijke IJsselmeer, FL46). Onder uitzonderlijke omstandigheden (hevige, langdurige hittegolven) waarin deze situatie nog iets langer duurt, kan hierdoor faunasterfte optreden (mosselen, spiering). Incidenten met het optreden van massale spieringsterfte traden vaak op in (na) perioden met aanhoudend hoge temperaturen en weinig wind (Noordhuis 2010). Ook een crash van de mosselpopulatie van het IJsselmeer die in 2007 werd geconstateerd (90% afname, gevolgd door herstel), werd voorafgegaan door een uitzonderlijke hittegolf in juli 2006, toen ook spieringsterfte optrad (Noordhuis 2010).

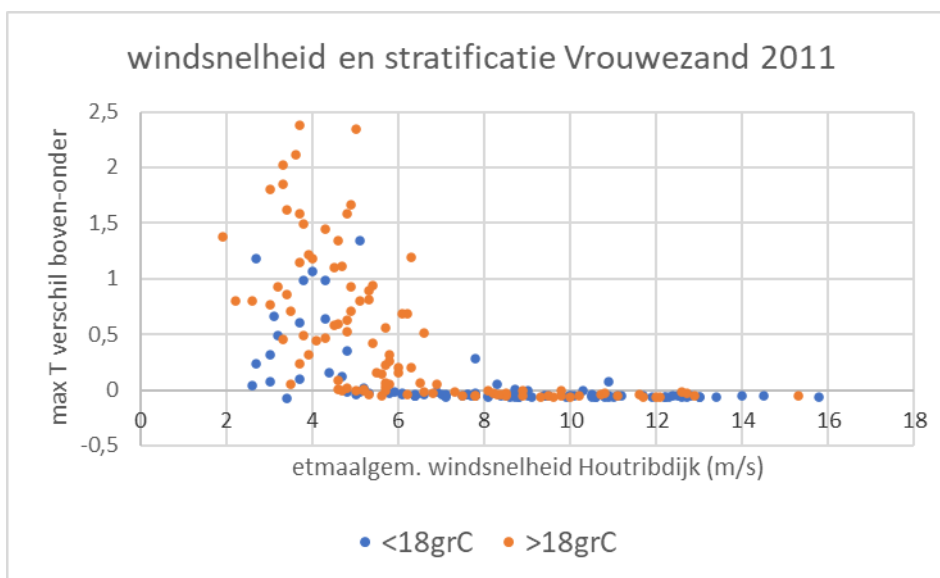


Figuur 4.7. Voorbeeld van dag-stratificatie die enkele dagen aanhoudt in het IJsselmeer; luchttemperatuur (lichtblauw), watertemperatuur in de bovenlaag (donkerblauw, dun) en in de onderlaag (donkerblauw, dik) en zuurstofconcentratie in de bovenlaag (rood, dun, in mg/l) en de onderlaag (rood, dik). Continumetingen aan meetpaal FL46, zuidelijk IJsselmeer, coördinaten 162.143/524.739, diepte -5,15 m NAP; Gegevens RWS, 22 t/m 27 juli 2012.

Het verschil in temperatuur tussen de boven en onderlaag (0,5 m onder het oppervlak en 0,5 m boven de bodem) neemt toe met de instraling (figuur 4.8) en af met de windsnelheid. Bij daggemiddelde windsnelheden van meer dan 5 m/s neemt het temperatuurverschil tussen epi- en hypolimnion af, bij windsnelheden van meer dan 7 m/s (Houtribdijk) ontwikkelt zich nauwelijks meer dag-stratificatie (figuur 4.9).



Figuur 4.8. Relatie tussen de hoeveelheid instraling per dag in Stavoren en het verschil tussen de dagmaxima van de watertemperatuur in de bovenlaag en de onderlaag in het IJsselmeer bij Vrouwezand, bij verschillende windsnelheden (kleuren: daggemiddelden Houtribdijk in m/s). Op basis van meetpaalgegevens RWS en weersgegevens KNMI; dagwaarden meetpaal FL09, coördinaten 161.828/535.887, diepte -4,19 m NAP, over de periode 30 maart – 21 oktober 2011.



Figuur 4.9. Relatie tussen de daggemiddelde windsnelheid op de Houtribdijk en het verschil tussen de dagmaxima van de watertemperatuur in de bovenlaag en de onderlaag in het IJsselmeer bij Vrouwezand, bij temperaturen boven en onder 18°C (Stavoren). Op basis van meetpaalgegevens RWS en weersgegevens KNMI; dagwaarden meetpaal FL09, coördinaten 161.828/535.887, diepte -4,19 m NAP, over de periode 30 maart – 21 oktober 2011.

4.4.2 Seizoensstratificatie

In de diepe putten kan langduriger stratificatie optreden die enkele weken of maanden kan aanhouden, in sommige gevallen het hele zomerseizoen. Hieraan is in de jaren 1970 en 1980 onderzoek gedaan; zie hoofdstuk 2.

Stratificatie van enkele dagen tot enkele maanden kwam in de jaren tachtig voor in alle vijf de onderzochte putten. In de putten in open water kwamen kortere perioden van stratificatie voor van 3-23 dagen, 3 à 4 keer per zomerhalfjaar. Wind gestuurde stroming kan stratificatie opheffen. De kans daarop is mede afhankelijk van de ligging en de vorm van de put. In putten bij de kust (IJmeer, Naarden) was sprake van langdurige stratificatie met een duur van 3 à 4 maanden. Volgens toenmalige berekeningen met het model STRAFI neemt de duur van stratificatie toe met de diepte, maar hebben overige variaties in afmetingen minder invloed; de variatie tussen jaren en het effect van de ligging zijn groter. Wind heeft een overheersende invloed op de duur van stratificatie.

Proefputten Markermeer

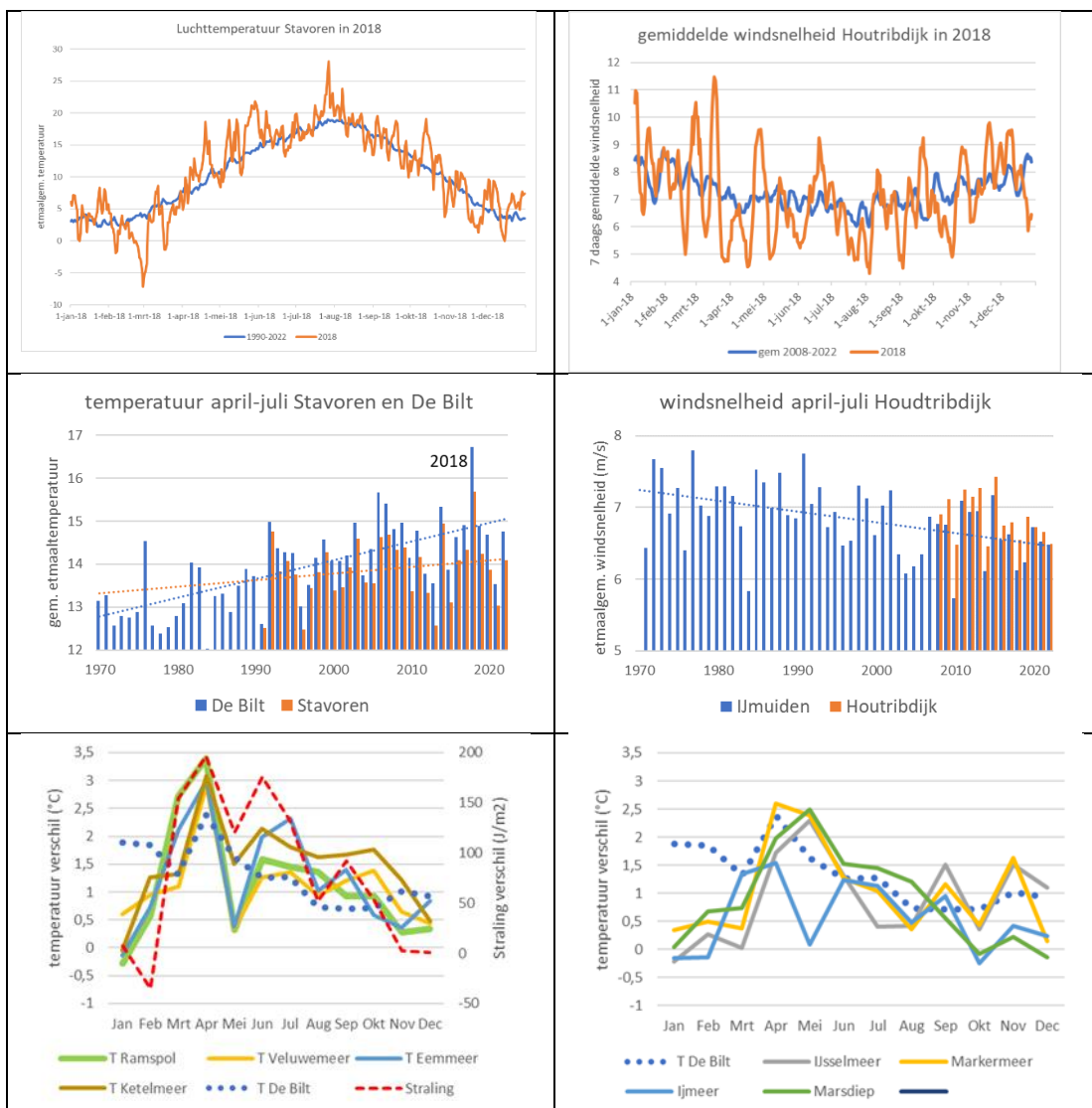
De twee proefputten die in 1984 in het Markermeer werden gegraven waren onder meer bedoeld voor onderzoek aan stratificatie (Claessen 1987). Deze putten hadden een doorsnede van 600 m (min of meer kegelvormig). Put A was bij oplevering 22 m diep en het talud had een helling van 1/10. Put B was 20 m diep en had een helling van 1/3. Het onderzoek werd uitgevoerd in 1984-86 en had te kampen met een snelle opvulling van meer dan een meter per jaar. In beide putten trad geregeld stratificatie op met een gesommeerde duur van ongeveer vier tot zeven weken. Ook in de Flevopot (zuidelijk IJsselmeer, 28 m diep) werd stratificatie gemeten, met een gesommeerde duur van 3 tot 4 weken.

4.4.3 Modelleringsstudie temperatuurstratificatie Markermeer-IJmeer en Goimeer

In aanvulling op het onderzoek in de jaren 1970 en 1980 is in 2022 een studie uitgevoerd met het D-HYDRO model Markermeer, naar het optreden van temperatuurstratificatie in diepe delen van het watersysteem Markermeer – Randmeren Zuid. De simulatie is uitgevoerd op basis van KNMI gegevens over het jaar 2018. Voor windgegevens is daarbij windstation Houtribdijk gebruikt, voor zoninstraling, wolkbedekking, relatieve vochtigheid en luchttemperatuur (niet gemeten op de Houtribdijk) is gekozen is voor Stavoren als meest representatieve locatie. De modelresultaten zijn gevalideerd met behulp van meetgegevens van de meetpaal FL42 in het midden van het Markermeer.

Het jaar 2018 startte relatief koud met een vorstperiode in maart, maar kende daarna achtereenvolgende drie relatief warme periodes in april en mei en nog een rond eind juli. In dezelfde perioden was de windsnelheid op de Houtribdijk laag in vergelijking met het langjarige gemiddelde. De weersomstandigheden hebben in deze perioden dus stratificatie in de hand gewerkt. Windrijke perioden en relatief lage temperaturen waren er rond eind april en in de tweede helft van juni, en daar tussenin een korte periode rond 18 mei. Relatief veel wind en lage temperaturen rond 10/11 augustus zetten de terugkeer naar de herfst in. Onder zulke omstandigheden kan menging optreden waardoor een periode van stratificatie wordt onderbroken of beëindigd. De invloed van al deze omstandigheden is duidelijk herkenbaar in de modelresultaten.

Over de gehele periode april t/m juli was 2018 in Stavoren de gemiddelde temperatuur ruimschoots de hoogste in de meetreeks, terwijl de windsnelheid op de Houtribdijk een van de drie laagste was. De modelstudie is dus in die zin te beschouwen als een “worst case” studie, al leidt klimaatverandering tot een toenemende kans op dergelijke omstandigheden.



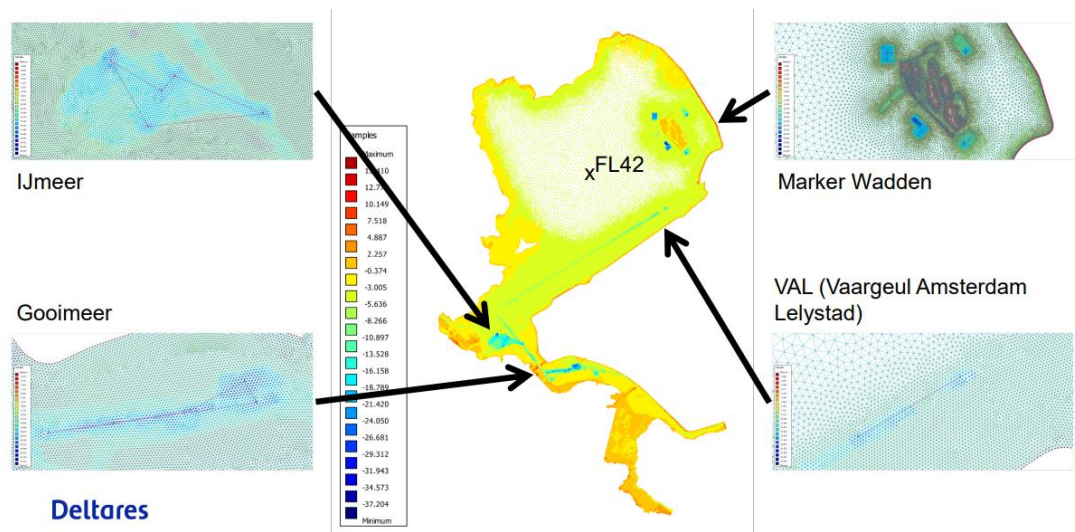
Figuur 4.10. Boven: Weersomstandigheden in de loop van het modeljaar 2018. Links: etmaalgemiddelde temperaturen op KNMI station Stavoren, 2018 in vergelijking met de daggemiddelden over de periode 1990-2022. Rechts: lopende gemiddelden over 7 dagen van de etmaalgemiddelde windsnelheid op KNMI windstation Houtribdijk, 2018 in vergelijking met de daggemiddelden over de periode 2008-2022 (oudere gegevens niet volledig of niet beschikbaar). Midden, links: Verloop van de gemiddelde temperatuur in de maanden april t/m juli in Stavoren en De Bilt, met lineaire trends en de positie van modeljaar 2018 in de reeks. Midden, rechts: Verloop van de gemiddelde windsnelheid in april t/m juli op de Houtribdijk en bij IJmuiden. Onder: Seizoensverloop van de toename van de maandgemiddelde watertemperatuur tussen de perioden 1975-1987 en 2003-2018 op basis van (meestal laagfrequente) MWTL-data van RWS (Noordhuis et al. 2021), vergeleken met de veranderingen van de luchttemperatuur in De Bilt over dezelfde perioden (blauwe stippellijn; KNMI). Linksonder: Randmeren, ook vergeleken met de toename van de hoeveelheid straling in De Bilt. Rechtsonder: IJsselmeer, Markermeer en IJmeer, en ter vergelijking het Marsdiep (Oost et al. 2017).

Dit is weergegeven in figuur 4.10, waarbij de vergelijking met De Bilt suggereert dat de toename van de temperatuur in Stavoren relatief langzaam verloopt (verschil met De Bilt neemt toe). De gemiddelde windsnelheid is afgenomen, zoals vergelijking van de reeks van de Houtribdijk met die van IJmuiden laat zien.

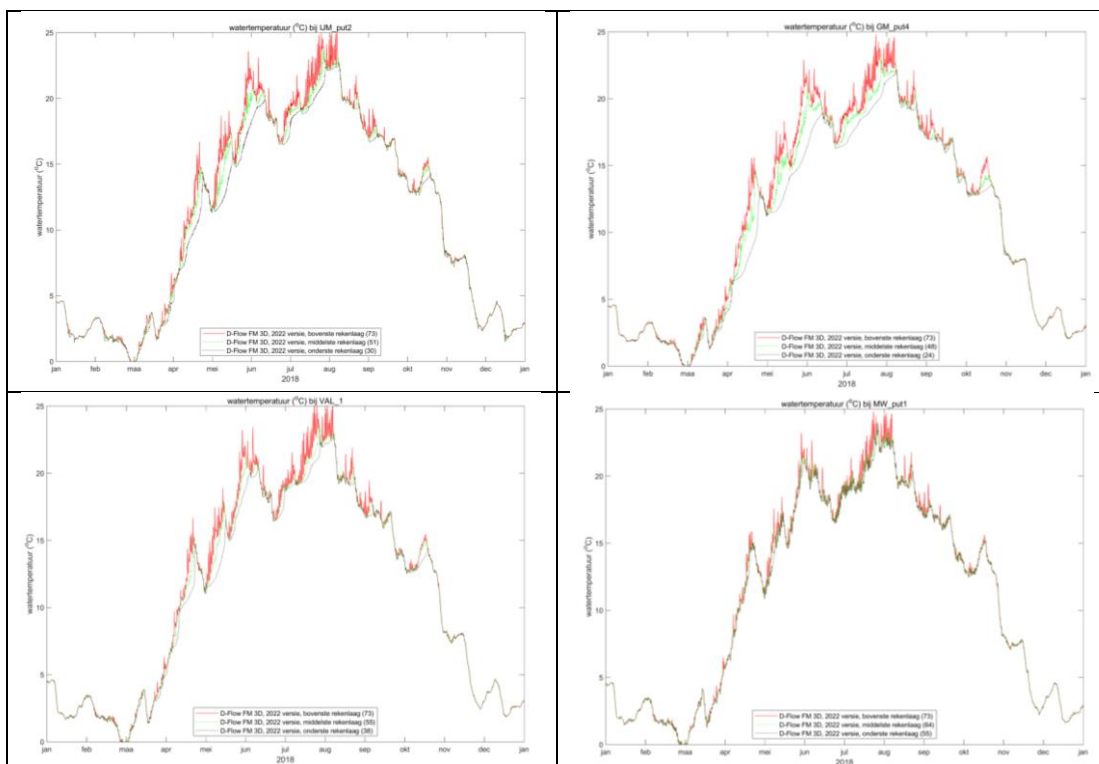
Dit betekent, samen met de toegenomen temperaturen (en instraling, ook in figuur 4.10), dat de kans op stratificatie in de diepere delen van de meren sinds de eeuwwisseling gemiddeld waarschijnlijk hoger is geweest dan ten tijde van de onderzoeken uit de jaren 1970 en 1980. Terwijl de kans aanwezig is dat de toename van de temperatuur zich zal voortzetten, is dat echter minder waarschijnlijk bij de afname van de windsnelheid.

Vier clusters van putlocaties in het Markermeer-IJmeer en de zuidelijke Randmeren zijn gebruikt voor modellering van temperatuurstratificatie; vijf locaties in de Gooimeerput, vijf in de IJmeerput, twee putten in de vaargeul Amsterdam-Lemmer en vijf slibvangputten rond Marker Wadden. In deze putten is de stratificatie over het gehele jaar 2018 gemodelleerd.

De resultaten laten zien dat alle locaties met dieptes van orde grootte 20 meter -NAP of meer (Gooimeerput, IJmeerput, diepe delen vaargeul Amsterdam-Lemmer en slibvangputten Marker Wadden) gestratificeerd kunnen raken (figuur 4.11 t/m 4.14). Het verticale temperatuurverschil neemt toe met de luchttemperatuur, de instraling en de diepte.



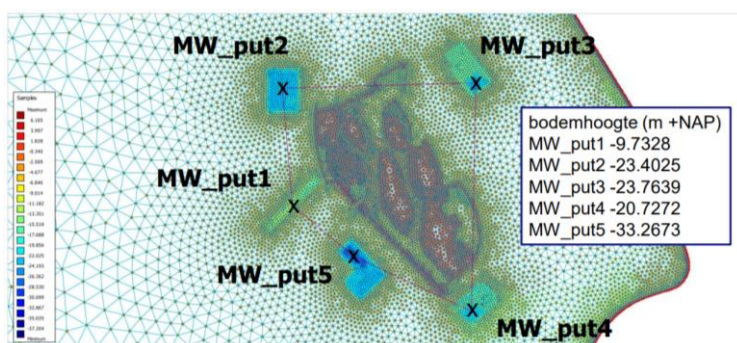
Figuur 4.11. Locaties gebruikt voor modellering van temperatuurstratificatie over 2018. Op het kaartje is ook de locatie van meetpaal FL42 weergegeven (zie tekst).



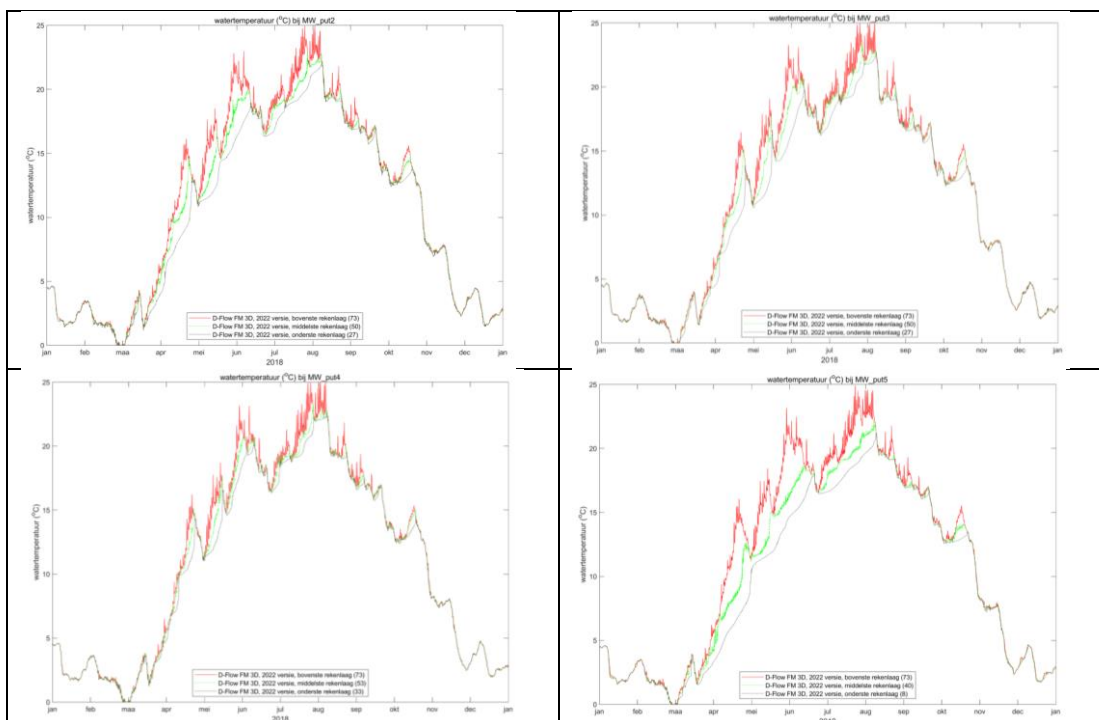
Figuur 4.12. Modelresultaten van temperatuurstratificatie; temperatuurverloop aan het oppervlak, bij de bodem en halverwege door het jaar 2018. Selectie van locaties uit de IJmeerput (linksboven; locatie 2, 22m diep) de Gooimeerput (rechtsboven; locatie 4, 25m diep), diepe delen van de vaargeul voor de Oostvaardersdijk (linksonder; locatie 1, 18m diep) en de slibvanggeul bij Marker Wadden (rechtsonder; 10m diep).

Op geen van de locaties was sprake van één lange periode van stratificatie. In het algemeen was er in de periode van toename van de temperatuur tussen maart en augustus sprake van perioden met stratificatie van enkele weken tot maanden, onderbroken door menging in perioden van tijdelijk afnemende temperaturen en hogere windsnelheden. Alleen in de diepste put, put 5 ten zuidwesten van Marker Wadden (33 m diep) gebeurde dat volgens het model maar één keer, en waren er mogelijk maar twee perioden met stratificatie; een lange van half maart tot half juni en een iets kortere van half juni tot begin augustus (figuur 4.14).

Vanaf begin augustus was er een doorgaande afname van de temperatuur en kwam stratificatie alleen nog in beperkte mate en in veel kortere perioden voor.



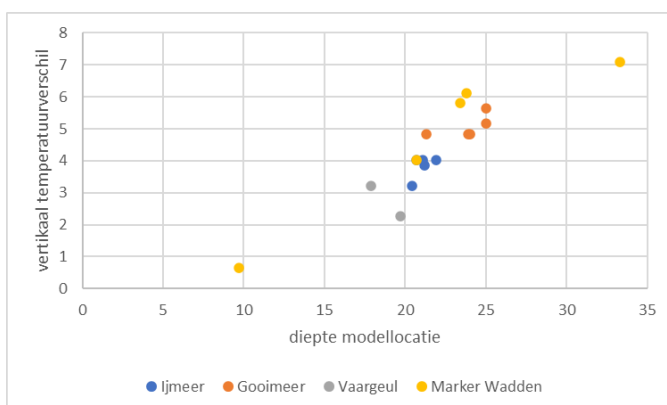
Figuur 4.13. Ligging en diepte van de vier slibvangputten en de slibvanggeul bij Marker Wadden.



Figuur 4.14. Modelresultaten van temperatuurstratificatie; temperatuurverloop aan het oppervlak, bij de bodem en halverwege door het jaar 2018 in de slibvangputten rond Marker Wadden. Linksboven put 2 (23,4m) rechtsboven put 3 (23,8m), linksonder put 4 (20,7m) en rechtsonder put 5 (33,3m).

4.4.4 Invloed van locatie, diepte en omvang

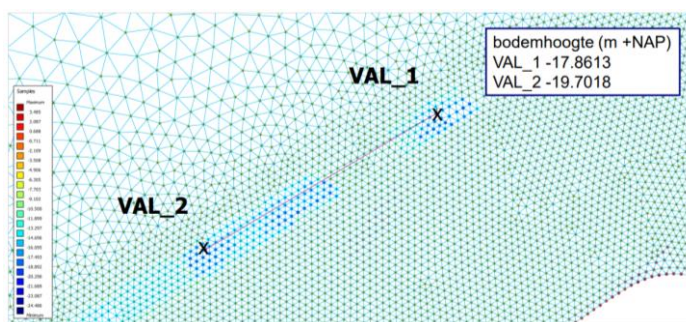
Diepte lijkt op basis van de recente modellering de belangrijkste stuurfactor voor de grootte van het verticale temperatuurverschil (figuur 4.15). Het verband tussen diepte en het gemodelleerde verticale temperatuurverschil is sterk, met tijdens de warme periode eind mei 2018 een verschil van 7°C in de diepste put (Marker Wadden 5) en minder dan 1°C in de meest ondiepe (Marker Wadden 1, de slibvanggeul).



Figuur 4.15. Relatie tussen diepte van de modellocatie het globale temperatuurverschil tussen boven- en onderlaag in een periode van relatief sterke stratificatie, eind mei 2022. Op basis van modelresultaten.

Er is voornamelijk geen duidelijke relatie met strijklengte op basis van vergelijking van de resultaten voor de verschillende locaties. Zo is er nauwelijks verschil in de grootte van het temperatuurverschil tussen Marker Wadden put 2 aan de NW zijde van de eilanden en meer in de beschut gelegen put 3.

Wel is opvallend dat de diepste van de twee locaties in de vaargeul (20m) een kleiner temperatuurverschil laat zien dan de ondiepere (18m; figuur 4.16). De ondiepere locatie ligt iets meer geïsoleerd dan de diepere, die meer geïntegreerd ligt in een dieper deel van de geul, die in de lengterichting van de overheersende windrichting loopt.



Figuur 4.16. Ligging van de twee gemodelleerde locaties in de vaargeul Amsterdam-Lemmer.

4.4.5 Invloed van hellingshoek, vorm en orientatie

Over dit aspect is nog geen nieuwe informatie. Rond 1980 werd aangenomen dat putten met een flauwe hellingshoek van minder dan 1/10 minder snel of lang zouden stratificeren, zodat de schade voor de bodemfauna (voedsel voor) eveneens geringer zou zijn. Daarvoor is onderzoek gedaan in de twee proefputten die in 1984 het Markermeer zijn gegraven, met een hellingshoek van resp. 1/3 en 1/10 (Claessen 1987).

De duur van de gestratificeerde perioden bleek maar zeer beperkt te verschillen (tabel 4.2). Toch werd geconcludeerd dat putten met een hellingshoek van minder dan 1/10 iets minder lang zouden stratificeren, dat de spronglaag iets dieper zou liggen en dat de zuurstofsituatie iets gunstiger zou zijn.

Tabel 4.2. Duur van de thermische gelaagdheid in dagen in de twee proefputten in het Markermeer en in de Flevopot in het zuiden van het IJsselmeer, 1984-1986. Proefput A had een talud van 1:10 en was in 1984 22 m diep, put B had een talud van 1:3 en een diepte van 20 m in 1984. In 1985 waren beide putten een halve tot een hele meter ondieper, in 1986 was de diepte van put A drastisch afgenomen tot 15 m, put B tot 17-18 m. Uit Claessen 1987.

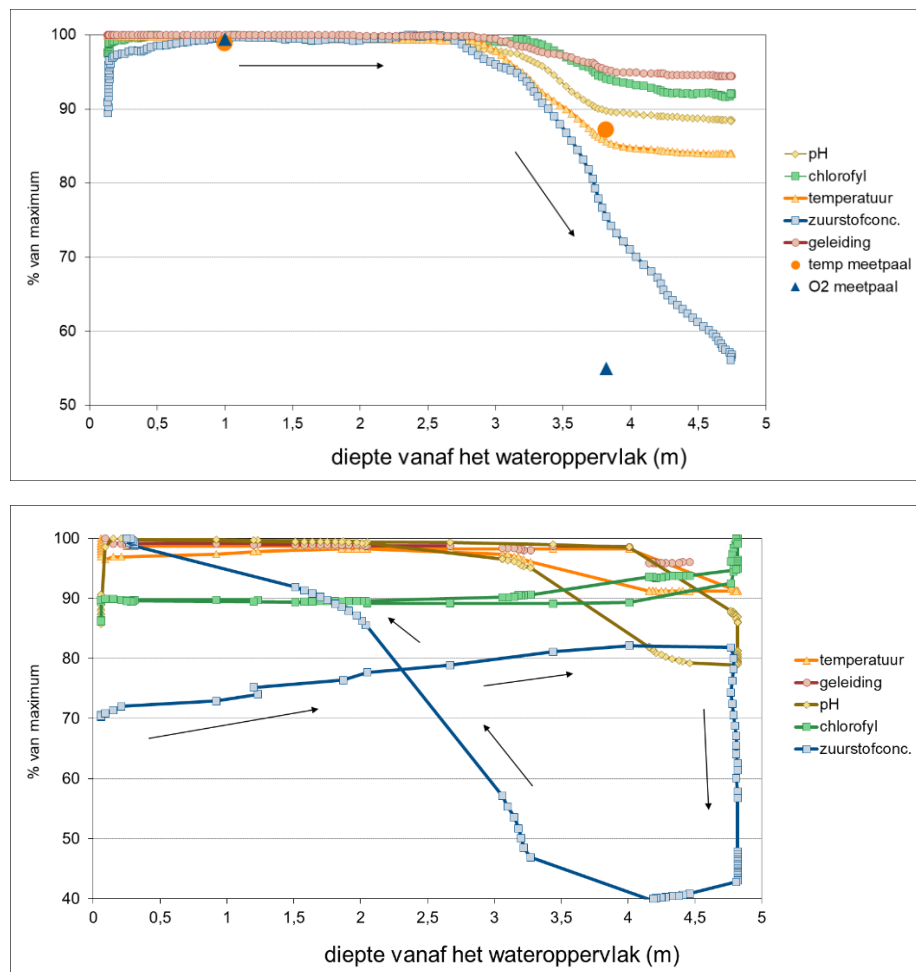
diepte x waarboven spronglaag voorkomt	gesommeerde tijdsduur (in dagen) met stratificatie (temperatuurverschil - 1m en diepte x 10° C)					
	1984		1985		1986	
	Flevopot	put A	put B	put A	put B	put A
- 8 m	7.8	7.4	8.2	8.2	7.7	10.3
-14 m	22.7	31.9	37.6	35.4	26.6	27.0
-17 m	23.3	36.8	51.4	40.3	36.5	31.3*
-20 m	27.0	39.3	-	-	-	-
lengte meetseizoenen	95	95	117	117	121	121

4.4.6 Spronglaag

Theoretisch ontstaat bij stratificatie een spronglaag. Het water daaronder mengt niet meer met de bovenlaag en is warmer. Zowel modelgegevens als veldmetingen laten echter zien dat de overgang naar lagere temperaturen naar beneden toe niet altijd even abrupt is.

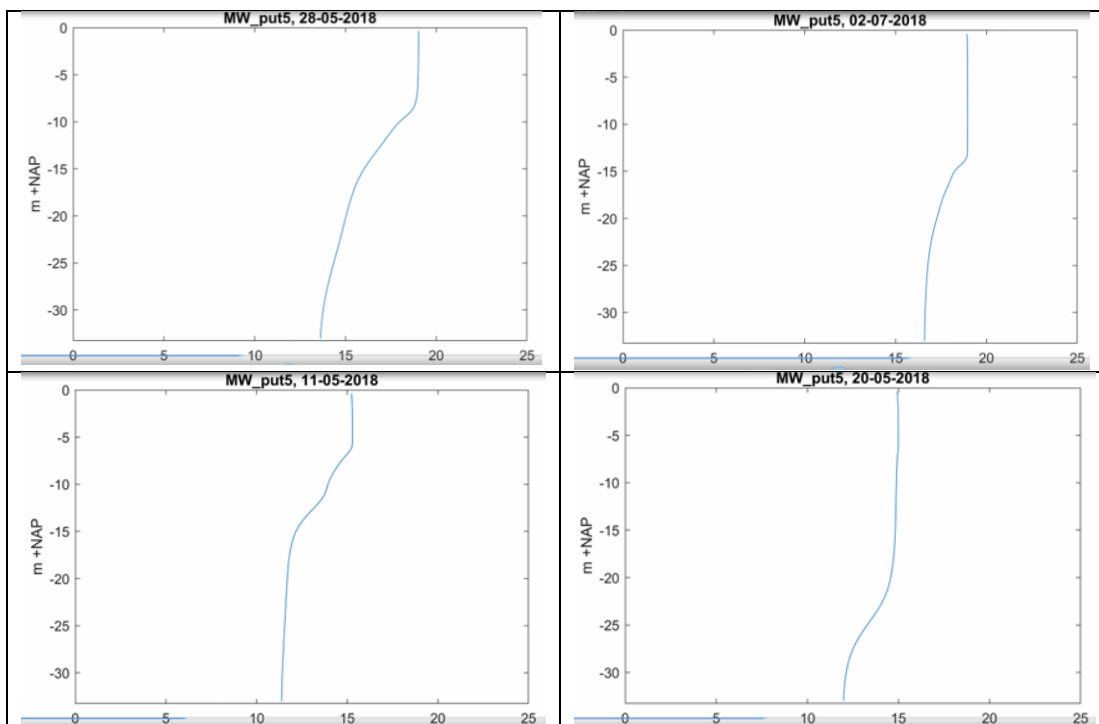
In 2012 werden, naar aanleiding van de analyses van meetpaalgegevens die zijn gepresenteerd in paragraaf 4.4.1, meer verticaal gedetailleerde metingen verricht bij de locatie van meetpaal FL46 in het IJsselmeer. Net als aangegeven in de genoemde paragraaf gaat het hierbij niet om metingen in een put, maar om een locatie met een diepte van ongeveer -5,15 m NAP.

In deze dataset is te zien dat de temperatuur in de bovenlaag naar beneden toe constant is tot op een bepaalde diepte. Het water daar onder is kouder en bevat minder zuurstof. Ook andere parameters wijken af. De overgang is echter niet heel abrupt, hoewel dit vanaf een boot moeilijk te meten is. De gemeten waarden laten vertragingen zien en zijn afhankelijk van de snelheid waarmee de meetapparatuur wordt neergelaten of opgehaald (figuur 4.17). In juli 2012 bevond zich de "spronglaag", behorend bij dag-stratificatie, in het zuidelijk IJsselmeer (FL46) op ongeveer 2,5 – 3 meter onder het oppervlak.



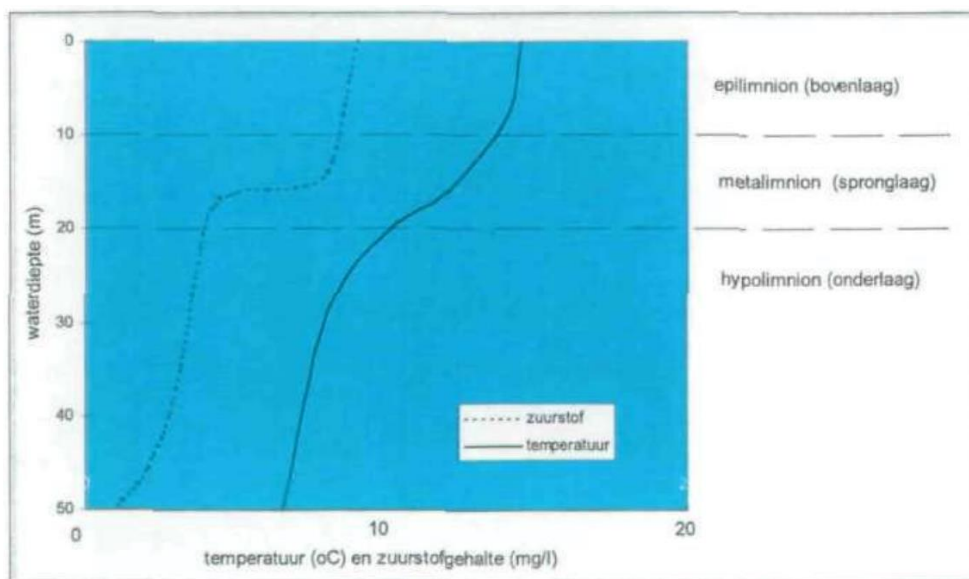
Figuur 4.17. Verticaal patroon van veranderingen bij enkele waterkwaliteitsparameters, in het zuiden van het IJsselmeer (Meetpaal FL46). Boven: 25-7-2012, 14.30h. Gem. windsnelheid Lelystad 2,5 m/s, 13,7 uur zonneshij (dichtbij max), max luchttemp 27,3°C. Losse symbolen waarden tegelijkertijd gemeten aan de meetpaal (gem. 13.30-15.30). Veldmetingen door H. Miedema, Rijkswaterstaat. Onder: 20-8-2012, 13.30h. Waterdiepte c. 4.9m (zomer, 5,13 -NAP). Pijlen indiceren de bewegingsrichting van de meter. Veldmetingen door J. Kampen, ATKB.

Toch komen de patronen van de hierboven weergegeven veldmetingen (d.w.z. de minder abrupte temperatuurafname naar beneden toe) overeen met de modellering van het verticale verloop van de watertemperatuur in de diepste van de Marker Wadden slibputten (figuur 4.18), behalve dat de spronglaag hier op minimaal 5 meter diepte ligt, oftewel onder het niveau van de omringende waterbodem. In sommige situaties aanzienlijk dieper.



Figuur 4.18. Selectie uit animatie op basis van modelresultaten van het verticale verloop van de watertemperatuur in Marker Wadden put 5.

Ook oudere studies laten een dergelijke verloop zien voor diepe plassen (figuur 4.19), waarbij zuurstof vergelijkbare profielen vertoont, met lage concentraties in het hypolimnion.



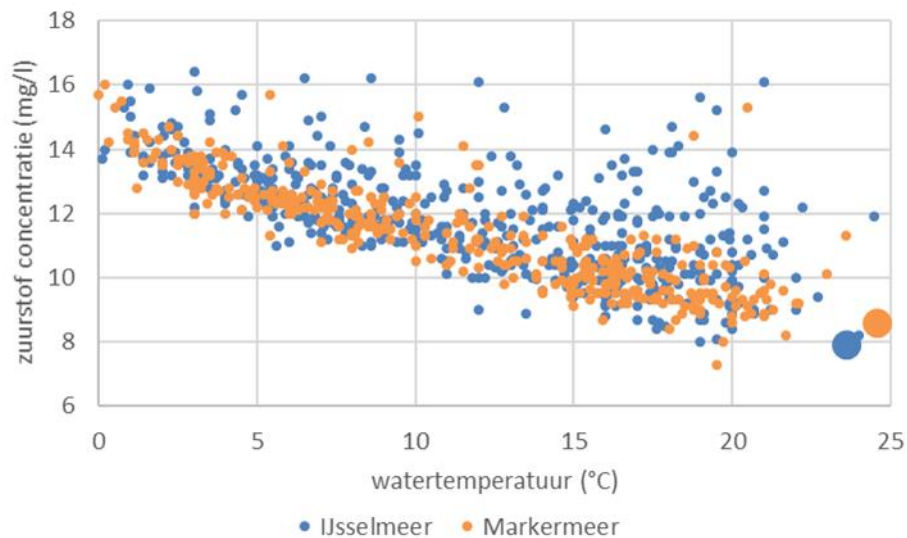
Figuur 4.19. Schematisch diepte verloop van temperatuur en zuurstof in diepe plassen tijdens stratificatie. Naar Anoniem 1996, gebruikt in Van Rijn et al 2004.

4.4.7 Effect op zuurstof

Het effect van temperatuurstratificatie op de zuurstofconcentraties is nog niet gemodelleerd. Er is echter ook een directe relatie, omdat de oplosbaarheid van zuurstof afneemt met toenemende watertemperatuur.

Dit betekent dat de zuurstofconcentraties in de bovenste laag van het water in de zomer gemiddeld door de jaren heen trendmatig afneemt door lagere oplosbaarheid als gevolg van klimaatverandering. De concentraties zijn echter ook afgenomen doordat vermindering van algenbloei als gevolg van de afname van de voedselrijkdom. In perioden van algenbloei is er overdag vaak sprake van oververzadiging met zuurstof in het water. 's Nachts is er juist meer verbruik van zuurstof, maar dat komt minder goed tot uiting in de metingen, omdat die overdag plaatsvinden. Omdat algenbloei in de loop der jaren minder sterk is gaan optreden, liggen de concentraties van zuurstof tegenwoordig gemiddeld dichter bij het verzadigingspunt (figuur 4.20). Bij toename van de watertemperatuur tot 25°C tijdens een hittegolf, daalt het zuurstofpercentage in de bovenlaag daardoor al tot ca. 8 mg/l op basis van oplosbaarheid.

Omdat de watertemperatuur onder de spronglaag vertraagd toeneemt met de temperatuur van de lucht en de bovenlaag van het water, moet ook de oplosbaarheid van zuurstof onderin de putten gemiddeld gesproken zijn gedaald in de loop der jaren. Behalve via wind en instraling en de kans op stratificatie, moet de kans op zuurstoftekorten dus ook op deze manier zijn vergroot.



Figuur 4.20. Relatie tussen watertemperatuur en zuurstofconcentratie in het IJsselmeer en Markermeer, afzonderlijke meetwaarden uit de jaren 1982-2018. Bij hogere watertemperaturen neemt de zuurstofconcentratie af. De hittegolf van 2006 is weergegeven met vergrootte symbolen: er trad toen massale sterfte van zowel Spiering als driehoeksmossel op. Gegevens RWS (uit Noordhuis et al. 2020; 2021).

5 Opbouw van de ondergrond

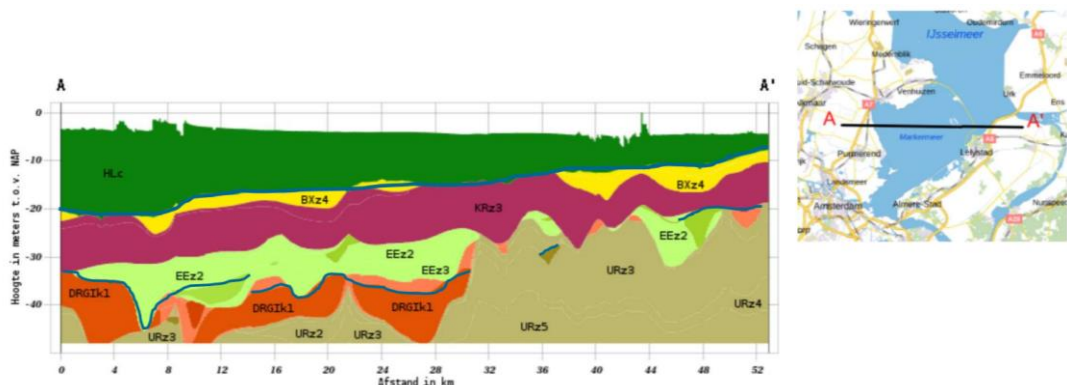
5.1 Dwarsprofielen

In figuur 5.1 zijn twee dwarsprofielen en een lengteprofiel van de samenstelling van de ondergrond weergegeven door het IJsselmeer en het Markermeer. Daarin is de zien dat de toplaag bestaat uit een Holocene afzetting die vooral uit fijn sediment (klei) bestaat. Deze afzetting wordt van west naar oost steeds dunner en is het dikst in het westelijke Markermeer (ca 15 meter). In het IJsselmeer is deze laag hooguit enkele meters dik.

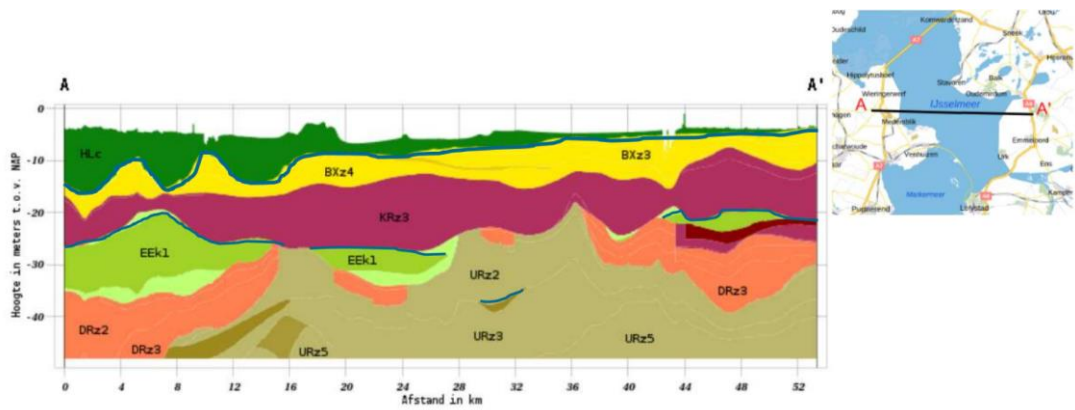
Onder deze Holocene afzetting ligt de Formatie van Boxtel. Deze laag bestaat vooral uit fijn zand (ophoogzand). Onder het IJsselmeer is deze laag enkele meters dik.

Daaronder volgt de commercieel meest interessante laag, de Formatie van Kreftenheye. Het is een formatie van fluviatiel zand en grind uit laat Saalien, Eemien, Weichselien en vroeg Holocene 150.000-10.000 jaar geleden). Dit zand leent zich voor meerdere doeleinden, maar de kwaliteit is binnen de formatie niet constant. Het ruimtelijke patroon van de dikte van deze laag onder het IJsselmeer en Markermeer is uitgewerkt in de volgende paragraaf.

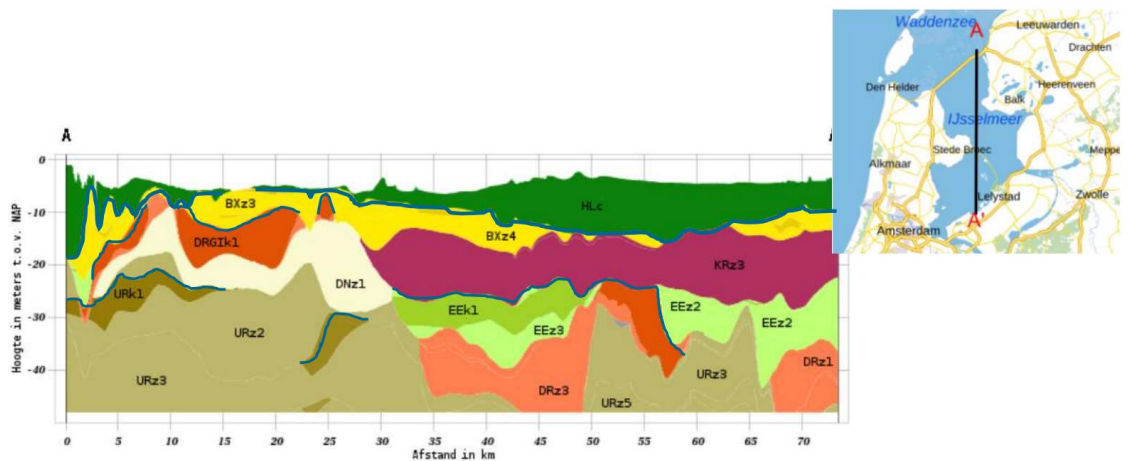
Onder de Formatie van Kreftenheye ligt de commercieel minder interessante Formatie van Urk (midden Pleistoceen zand, grind en klei, afgezet door de Rijn die toen een noordelijke route had), met daartussenin plaatselijk soms andere lagen met (nog) minder commerciële waarde. Figuur 5.2 geeft aan op welke diepte de eerste “storende” laag van minder waardevol sediment voorkomt. Waar de lijn ontbreekt is het vaak de Formatie van Urk zelf die aansluit op Kreftenheye.



Figuur 5.1a. Dwarsprofielen (west-oost) door het Markermeer. De bovenste blauwe lijn geeft de grens tussen Holocene en Pleistoceen aan. De onderste blauwe lijn de grens tussen winbare zandlagen en de eerste storende laag (meestal kleilagen binnen de aangegeven formatie). Formaties: HL = Holocene, BX = Boxtel, KR = Kreftenheye, EE = Eem, DR = Drente (DRGI = laag van Gieten, keileem), UR = Urk; k = klei, z = zand.



Figuur 5.1b. Dwarsprofielen (west-oost) door het IJsselmeer. De bovenste blauwe lijn geeft de grens tussen Holoceen en Pleistoceen aan. De onderste blauwe lijn de grens tussen winbare zandlagen en de eerste storende laag.



Figuur 5.2. Noord-zuid profiel door het IJsselmeer en het Markermeer. De bovenste blauwe lijn geeft de grens tussen Holoceen en Pleistoceen aan. De onderste blauwe lijn de grens tussen winbare zandlagen en de eerste storende laag.

5.2 Kaartbeelden

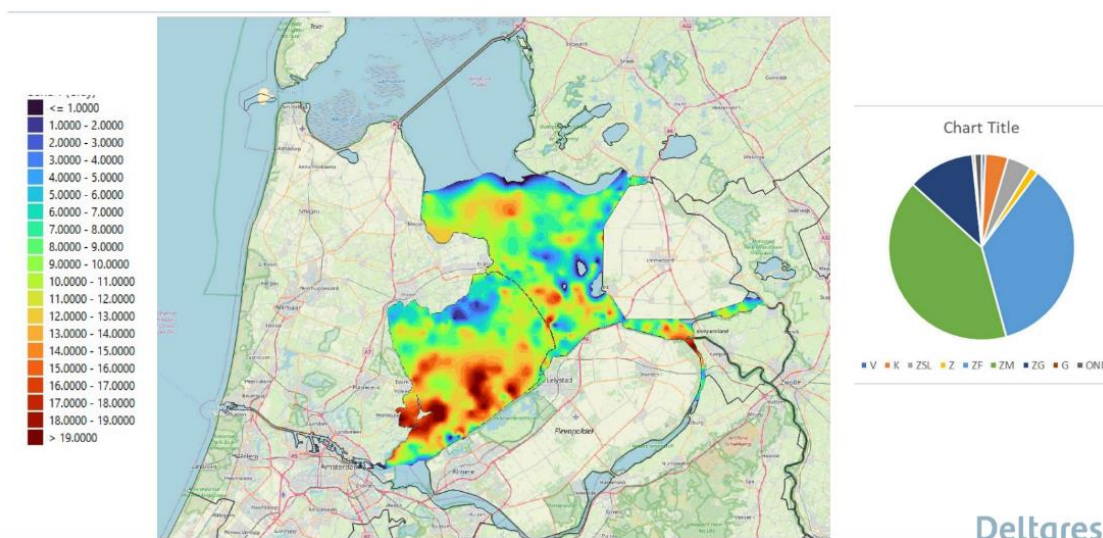
Figuur 5.3 geeft de dikte van commercieel meest interessante sedimentlaag, de Formatie van Kreftenheye. Deze formatie is aanwezig in het oude stroomgebied van de IJssel en de Oervecht en in het Rijnstroomgebied, en is in tweeën gesplitst door de stuwwallen van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug.



Figuur 5.3. Ligging van de Formatie van Kreftenheye (Wikipedia).

Onder het IJsselmeergebied is Kreftenheye aanwezig ten zuiden van de lijn Wieringerhoek-Lemmer en ten noorden van de lijn Amsterdam-Kampen. Onder het noordelijke deel van het IJsselmeer en onder de oostelijke en zuidelijk randmeren ontbreekt hij. De dikte van deze formatie bedraagt op veel plaatsen orde grootte 10 meter, maar is in de zuidelijke helft van het Markermeer groter, orde grootte 15 meter. Er zijn echter grote lokale verschillen.

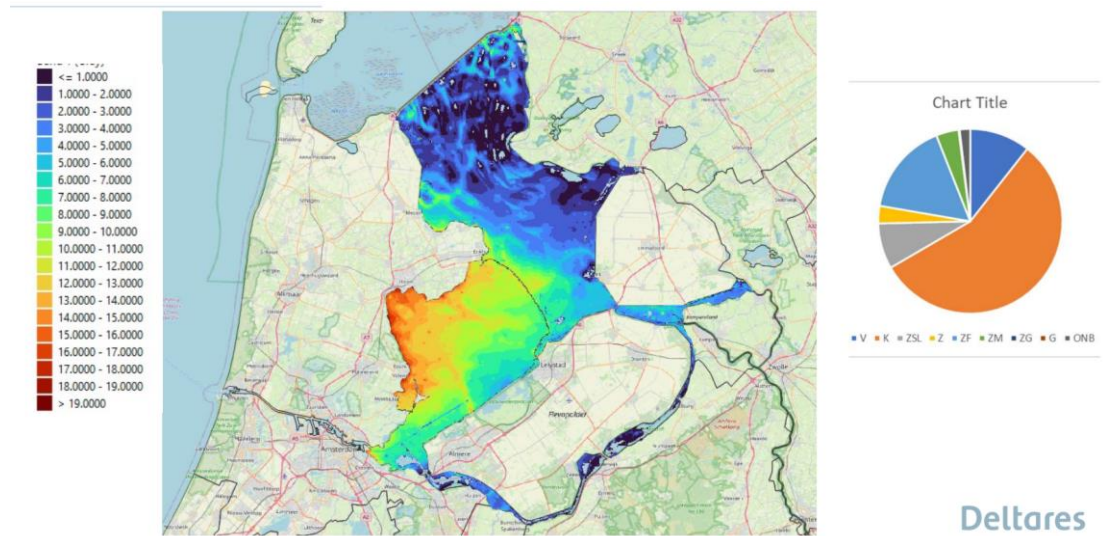
Figuur 5.4 geeft ook de gemiddelde samenstelling van het sediment in de formatie. Ongeveer de helft van het materiaal bestaat uit middelfijn en grof zand. Net als bij de dikte van de laag zijn er echter ook in de samenstelling grote ruimtelijke variaties.



Figuur 5.4. Dikte van de Formatie van Kreftenheye onder het IJsselmeergebied.

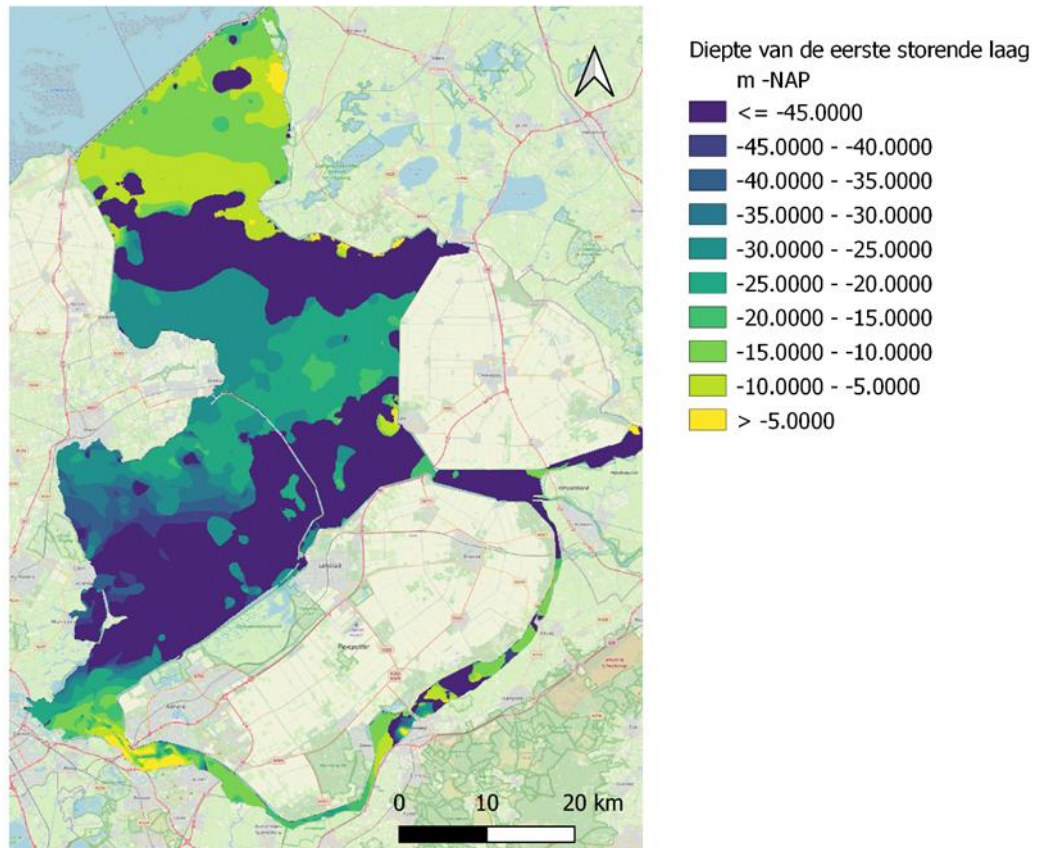
De Formatie van Kreftenheye is bedekt door een laag Holoceen sediment, die in het IJsselmeer relatief dun is, maar die in het Markermeer naar het westen toe steeds dikker wordt en in de Hoornsche Hop en omgeving ca 12-15 meter dik is (-20 m NAP). Deze laag bestaat voor meer dan de helft uit klei, met verder een aanzienlijk aandeel veen en ongeveer een kwart fijn zand.

Tussen Kreftenheye en Holoceen ligt nog de Formatie van Boxtel. Deze formatie bestaat vooral uit fijn zand dat is afgezet tussen het midden Pleistoceen en het vroege Holoceen. Dikte van de Holoceen toplaag in figuur 5.5 betreft alleen de Holoceen kleilaag. Om Kreftenheye te bereiken moet plaatselijke echter niet alleen de Holoceen klei worden gepasseerd, maar ook de Formatie van Boxtel.



Figuur 5.5. Dikte van de Holoceen toplaag.

In figuur 5.6 is de diepte tot de eerste storende laag weergegeven. Deze wordt vooral bepaald door de aanwezigheid van kleilagen in de Formaties van Eem of Drenthe, maar die soms binnen een formatie van hoofdzakelijk zand (Formatie van Urk) kunnen voorkomen. Waar het zand de Formatie van Urk rechtstreeks op Kreftenheye aansluit is in figuur 5.6 geen waarde weergegeven (>50m).



Figuur 5.6. Diepte van de eerste storende laag, ondieper dan 50 meter -NAP.

5.3 Mogelijke effecten via grondwater

Door zandwinning of anders-soortige graafactiviteit kan de kweldruk van grondwater veranderen. Dat kan op twee manieren:

- Toename van kweldruk na verwijderen van toplagen die weerstand bieden aan zoete kwel vanuit de Veluwe in de randmeren. Zoet kwel van grondwater met bepaalde eigenschappen (kalk) speelt mogelijk in de Veluwerandmeren een belangrijke rol als stuurfactor bij de ontwikkeling en samenstelling van de ondergedoken vegetatie.
- Ontstaan van instroom van brak grondwater na doorbreken van de grenslaag zoet-brak bij het graven van putten. Toestroom van brak grondwater in putten kan van invloed zijn op stratificatiekansen en zuurstofconcentraties, omdat zout water zwaarder is dan zoet water en minder zuurstof kan bevatten.

6 Conclusies en discussie

6.1 Conclusies hydrologische en fysische effecten

De grote, ondiepe meren van het IJsselmeergebied zijn bijzonder windgevoelig. Afhankelijk van onder meer diepte en sedimenttype is er een sterke interactie tussen weerspatronen, stroming en de effecten van zandwinning:

- Door wind, zandwinning en constructiewerk wordt sediment gesuspendeerd
- Dit materiaal kan zich met waterverplaatsingen over grote afstand verplaatsen (in het Markermeer tot ca 15 km, op basis van satellietbeelden in combinatie met slibmodellering)
- Wind-gedreven stromingspatronen beïnvloeden de ruimtelijke verdeling van depositie (modelstudie met behulp van tracers)
- Geulen kanaliseren het transport (en leiden het evt. naar putten; modelstudie met behulp van tracers)
- Putten verzamelen hersedimenterend materiaal en vullen zich (bodemhoogte verschilkaarten)
- Bij grotere diepte dan een zekere drempelwaarde (afhankelijk van de doorsnede) komt dit niet meer in suspensie (onderzoek Markermeerputten jaren 1980)
- Opvulsnelheid is afhankelijk van diepte, doorsnede, locatie en vorm van de put (onderzoek jaren 1980)
- Met accumulatie van sediment / zwevend stof worden ook daaraan gebonden stoffen permanent opgeslagen, zoals fosfaat en organisch stof. Dit kan een belangrijke verliespost zijn in de totaalbalans van deze stoffen (Markermeer) en negatieve invloed hebben op de productie en het voedselweb van het systeem (voorlopige berekeningen op basis van bodemhoogte verschilkaarten, metingen in Marker Wadden putten, balansgegevens en concentraties in sediment en zwevend stof; nader te onderbouwen met lopend onderzoek)
- Bij zeer lage zuurstofconcentraties wordt de nalevering van fosfaat vanuit het sediment (in de putten) versterkt (onderzoek jaren 1980). Hoe zich dit verhoudt tot de hiervoor genoemde accumulatie wordt nog onderzocht

In zandwinputten treedt vaak stratificatie op, die voor het Markermeer is gemodelleerd met behulp van KNMI gegevens over het jaar 2018:

- Op alle onderzochte locaties (10-33 m diep) vond volgens de modelanalyses in 2018 stratificatie plaats.
- De mate van stratificatie (verschil in temperatuur tussen boven en onderlaag) was sterk afhankelijk van de diepte (diepteverschil met omgeving), veel minder van de locatie (strijklengte).
- De periode van stratificatie liep vooral van maart tot begin augustus, het seizoen van toenemende temperaturen, en werd één tot enkele keren onderbroken door korte perioden van menging tijdens koudere perioden.
- Vanaf augustus, in het seizoen van afnemende temperaturen, was alleen nog sprake van zeer korte perioden van beperkte temperatuurgradiënten.
- Stratificatie was het sterkst in de meest zuidelijke Marker Wadden put, die met 33 m ook de diepste is, en het zwakst (nagenoeg afwezig) in de slibvanggeul ten oosten van Marker Wadden (10 m).

Stratificatie vindt op kleinere schaal ook buiten de putten plaats. Dit type stratificatie blijkt uit continumetingen aan meetpalen.

- Meestal wordt deze “microstratificatie” in de avond weer opgeheven.
- Tijdens hittegolven kan de gelaagdheid enkele dagen aanhouden en onder die omstandigheden kan de zuurstofconcentratie in de onderlaag dalen.
- Microstratificatie treedt het sterkst op (grootste temperatuurverschil boven en onderlaag) bij weinig wind en veel instraling.
- Deze omstandigheden komen sinds de eeuwwisseling vaker voor dan daarvoor, als gevolg van klimaatverandering.

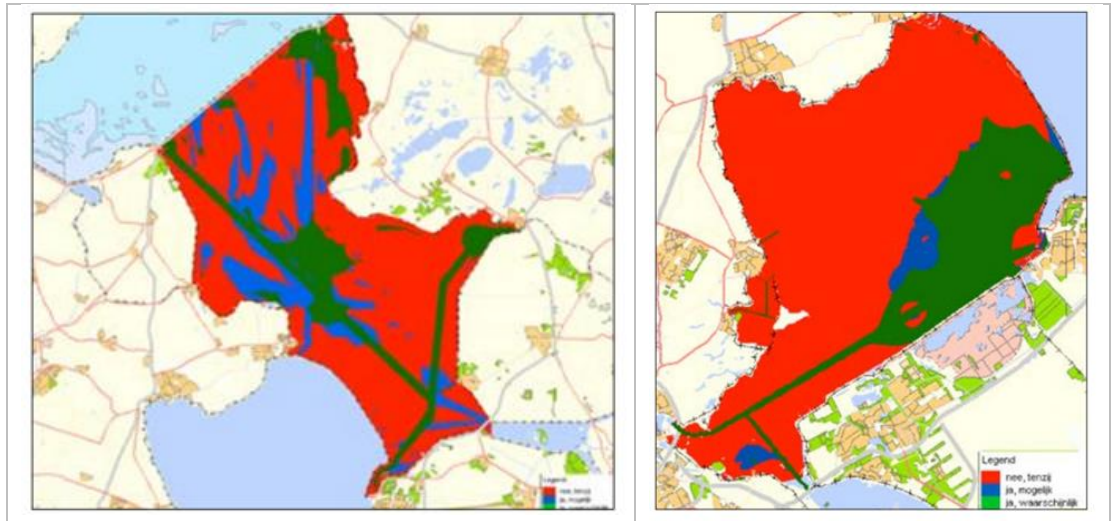
6.2 Conclusies ecologische effecten:

- Het effect op fytoplankton is complex, omdat enerzijds concentraties kunnen afnemen door sedimentatie, waarbij in de bovenlaag het aandeel blauwalgen met drijfvermogen kan toenemen. Anderzijds kan bij lage zuurstofspanning in de put fosfaat vrijkomen, dat de fytoplanktonproductie kan stimuleren.
- Bewerking van recente satellietbeelden laat bij sommige weersomstandigheden duidelijk effect van sedimentatie zien, in de vorm van lagere zwevend stof concentratie boven en in de directe omgeving van putten (m.n. Marker Wadden).
- Waterplanten kunnen, met de daaraan verbonden levensgemeenschappen, verloren gaan als in ondiep water nieuwe putten worden gegraven.
- In oudere literatuur wordt aangegeven dat macrofauna dichtheden op de bodem van diepe putten laag zijn, maar dat hoger op de taluds juiste verhoogde dichtheden voor kunnen komen.
- Recente monsters uit een slibvangput bij Marker Wadden lieten zien dat de gemeenschap op de bodem vergelijkbaar was met die in dieper water in de omgeving, met dominantie van wormen en muggenlarven en een lage diversiteit ten opzicht van oevergebonden habitats.
- Mosselen komen niet voor op diepten groter dan ongeveer 6 meter en ontbreken op de bodem van de putten.
- Oudere literatuur wijst op een belangrijke functie van putten voor vis, enerzijds voor overwintering, anderzijds als schuilgelegenheid voor predatoren en verkoeling tijdens hittegolven. De vissen houden zich dan boven de spronglaag op, waaronder de zuurstofconcentraties laag zijn.
- Echosounding in de putten rond Marker Wadden in augustus 2019 bevestigt dit beeld en liet grote aantallen vissen van verschillende soorten in de putten zien, de hoogste aantallen in de diepste put. Soorten als snoekbaars, pos en grondels kwamen tot bij de bodem (>30 m) voor, spiering (relatief gevoelig voor lage zuurstofconcentraties) en baars vooral in de bovenlaag (<10m).
- Het effect op vogels is tweeledig: het graven van putten kan, afhankelijk van de locatie en de diepte voor de ontgronding, de voedselbeschikbaarheid van benthivore watervogels (m.n. mosseleters) negatief beïnvloeden door areaalverlies van mosselbanken. Anderzijds is er voor viseters gelegenheid om te reageren op de concentraties vis, bijvoorbeeld de vis na overwintering in het voorjaar uit de putten komt.

6.3 Het huidige beoordelingskader

In de Natura 2000 beheerplannen voor IJsselmeer en Markermeer-IJmeer zijn kansencarten voor het toestaan van zandwinning opgenomen (figuur 6.1). Deze zijn vooral gebaseerd op mogelijkheden voor foeragerende, planten- of mosseletende watervogels, waarbij in het IJsselmeer een maximum duikdiepte van 5 meter is aangehouden, in het Markermeer 4 meter. Er is geen rekening gehouden met rustgebieden en geplande natuurontwikkeling zoals Marker Wadden.

Voor effecten via wegzijging en kwel, stratificatie, vertroebeling en verstoring is volgens de beheersplannen aanvullende toetsing nodig in het kader van de vergunningprocedure. De beheersplannen voor de randmeren geven geen toetsingskaders voor zandwinning.



Figuur 6.1. Kansenkaarten voor het toestaan van zandwinning in het IJsselmeer en Markermeer. Uit Natura 2000 beheersplannen 2017-2023 IJsselmeer en Markermeer & IJmeer, RWS 2017.

- *Rood: nee, tenzij; locaties waar zandwinning in principe niet is toegestaan, tenzij een Passende Beoordeling aantoont dat significant negatieve effecten van een specifiek voorgenomen activiteit kunnen worden uitgesloten, gemitigeerd of gecompenseerd na het succesvol doorlopen van de ADC-toets;*
- *Blauw: ja, mogelijk; locaties waar zandwinning mogelijk kan worden toegestaan, maar waar de effecten van deze zandwinning op Natura 2000 doelen nader dienen te worden getoetst omdat significant negatieve effecten niet bij voorbaat kunnen worden uitgesloten. In deze toets kan ook mitigatie van eventueel optredende effecten aan de orde komen;*
- *Groen: ja, waarschijnlijk; locaties waar zandwinning waarschijnlijk kan worden toegestaan, omdat significant negatieve effecten op voedselbeschikbaarheid voor kwalificerende watervogels bij voorbaat kunnen worden uitgesloten*

Dit beoordelingskader is in hoge mate gebaseerd op onderzoek uit de periode 1970-1995. In deze periode waren de meren aanzienlijk voedselrijker dan tegenwoordig, al waren de fosfaatconcentraties al vanaf 1985 begonnen af te nemen. De kansenkaarten zijn grotendeels gebaseerd op de diepteverdeling, vanuit de gedachte dat negatieve effecten op de ecologie grotendeels kunnen worden voorkomen als de dieptes waarop waterplanten groeien of waarop voor eenden bereikbare mosselpopulaties voorkomen, kunnen worden ontzien. Sinds de genoemde onderzoeksperiode hebben ecologie en waterkwaliteit in de meren echter voortgaande en uiteindelijk sterke veranderingen ondergaan. Daarnaast is ook de kennisontwikkeling doorgedaan en heeft de bescherming van ecologische waarden een steeds strakker juridisch kader gekregen.

6.4 Veranderingen sinds 1990

6.4.1 Areaal ondiepten sinds 1990

Terwijl de natuurwaarden die in ondiepe gebieden zijn te vinden zijn verbeterd, is het areaal van deze ondiepte verkleind. Zo is het “begroeibare areaal” voor waterplanten (0-3 meter NAP in Sterk 2010, zie figuur 4.3) tussen 1930 en 2006 met 30% afgenomen (totaal ruim 13.500 ha verlies, gemiddeld ruim 180 ha per jaar!). Als dit in een gelijkmatig tempo zou gebeuren, betekent dat nog eens ruim 6% na 2006, of 13% afname sinds 1990.

Het areaal bodems met een diepte groter dan 7 meter (buiten de ontgrondingen) is door opvulling tussen 1930 en 2006 met 75% afgenomen, als dat zich ook verder heeft voortgezet is het areaal natuurlijke diepten van meer dan 7 m NAP inmiddels (aanzienlijk) kleiner geworden dan het gezamenlijke oppervlak van kunstmatige ontgrondingen.

Tabel 6.1. Arealen in hectares per dieptezone (NAP) in 1930 en 2006 volgens Sterk 2010, met verschil in hectares en percentages. Zie ook figuur 4.2 en figuur 4.3. De getallen betreffen alle meren samen, IJsselmeer, Markermeer-IJmeer en Randmeren.

	1930	2006	verschil	% verschil	ha per jaar	% per jaar
0-1m	10612	6484	-4128	-38,9	-54,3	-0,5
1-2m	11937	8266	-3671	-30,8	-48,3	-0,4
2-3m	23373	17604	-5769	-24,7	-75,9	-0,3
3-4m	46560	45585	-975	-2,1	-12,8	0,0
4-5m	66523	77495	10972	16,5	144,4	0,2
5-6m	25974	29568	3594	13,8	47,3	0,2
6-7m	5701	9832	4131	72,5	54,4	1,0
7-8m	3877	982	-2895	-74,7	-38,1	-1,0
8-9m	2476	490	-1986	-80,2	-26,1	-1,1
9-10m	1147	272	-875	-76,3	-11,5	-1,0
>10m	2	1136	1134		14,9	

Deze bodemvervlakking zal primair een gevolg zijn herverdeling van sediment na afsluiting en compartimentering, ook al is de dynamiek aan banden gelegd (of juist daardoor; vergelijk zandhonger Oosterschelde). Toch is het een legitieme vraag in hoeverre het graven van putten de verdieping van ondieptes versterkt nu de natuurlijke diepten min of meer zijn opgevuld. De bodemhoogte verschilkaarten (par. 4.2) suggereren dat in enige mate van een versterkend effect sprake is. In welke mate is nog niet nader onderzocht.

6.4.2 Waarde van ondiepten: toename van planten, afname van driehoeksmosselen

Het resterende ondiepe water in het IJsselmeergebied is in toenemende mate begroeid geraakt door waterplanten. Terwijl voorheen de onderkant van het begroeibare areaal (tot 3 meter) vaak nog niet begroeid was, is dat nu op veel plaatsen wel het geval, zodat ontgrondingen in dit dieptebereik vaker tot directe effecten leiden.

De diepteverdeling van mosselen is niet veranderd. De kwaliteit van de mosselen als voedsel voor eenden is echter afgenomen, waardoor de diepte waarop de eenden rendabel op mosselen kunnen foerageren kleiner is geworden. De lagere voedselkwaliteit is echter waarschijnlijk een gevolg van slechte benutting van de overgebleven voedingsstoffen door gebrek aan natuurlijke (peil) dynamiek. Daardoor kan niet worden geconcludeerd dat ontgrondingen tot op geringere diepte kunnen worden toegelaten.

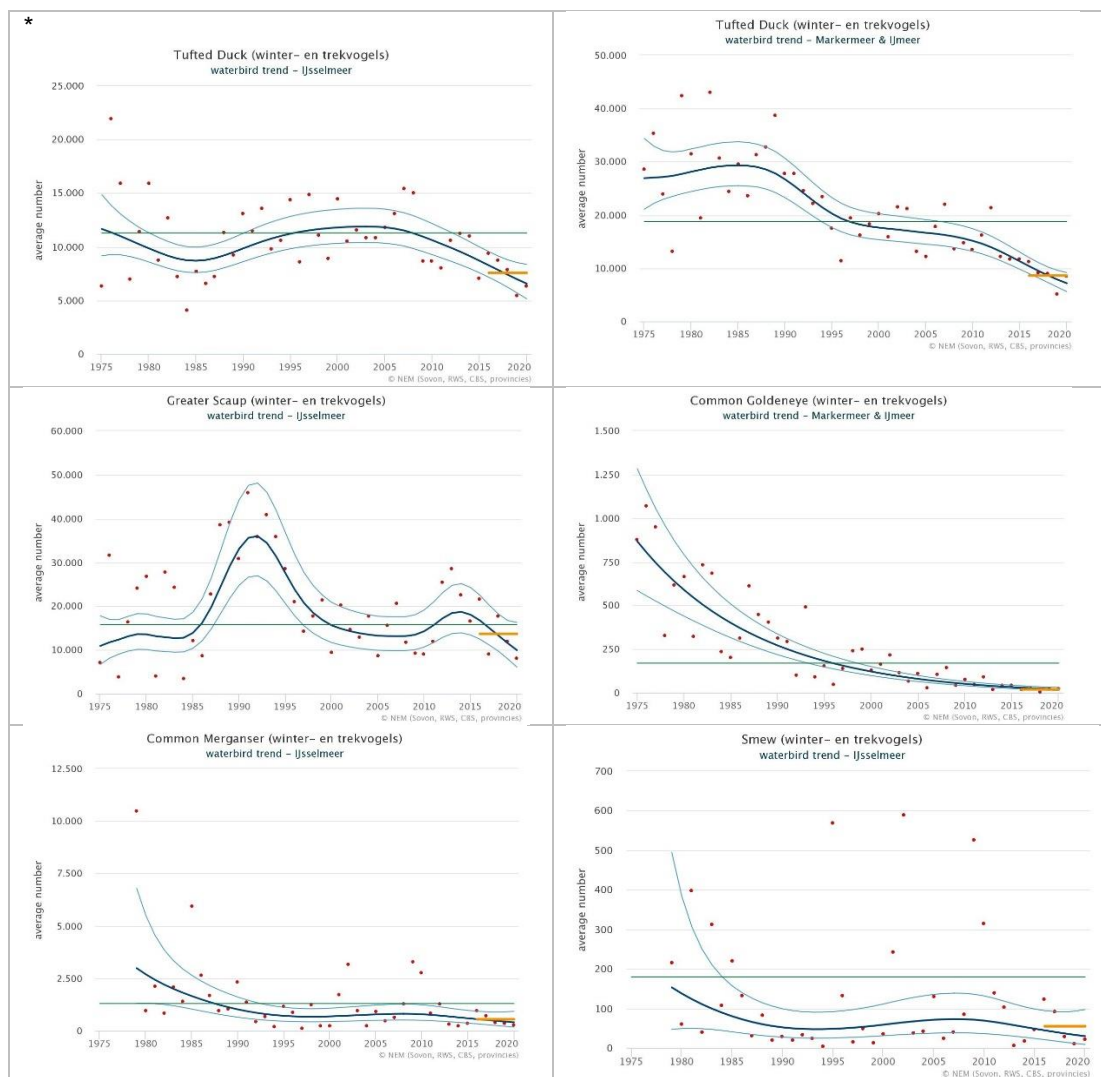
6.4.3 Filtratie door mosselen op iets grotere diepte: invasie door quaggamosselen

Ook mosselen die iets te diep voorkomen voor de eenden kunnen bij hoge dichtheden meetbare effecten hebben op de waterkwaliteit. Dat bleek in de randmeren, het IJmeer en het zuidelijke IJsselmeer toen de quaggamossel vanaf 2007 het gebied binnentrok, waarna vanaf ongeveer 2010 met hoge dichtheden ook het doorzicht in het voorjaar sterk toenam. Lokaal kunnen ontgrondingen dus ook invloed uitoefenen op deze processen.

6.4.4 **Afname van watervogels in relatie tot instandhoudingsdoelen**

Alle meren van het IJsselmeergebied zijn vogelrichtlijngebieden met instandhoudingsdoelen. Vaak zijn de doelen gebaseerd op de draagkracht die het gebied had in de periode 1999-2003. In het IJsselmeer en vooral het Markermeer zijn vis- en mossel-etende watervogelsoorten al voor die tijd afgenomen. Voor een deel, maar niet bij alle soorten, is dat gepaard gegaan met toename in de Randmeren. Bij enkele soorten heeft de afname zich na het vaststellen van de instandhoudingsdoelen zodanig voortgezet, dat nu sprake is van een hogere urgentie voor bescherming. Dit is bijvoorbeeld het geval bij enkele mosselelers, m.n. de kuifeend in IJsselmeer en Markermeer, topper in het IJsselmeer en brilduiker in het Markermeer. Trends van enkele van deze soorten zijn weergegeven in figuur 6.1, een uitgebreider overzicht van doelen en “staat van instandhouding” (situatie over de laatste 5 jaar in verhouding tot het instandhoudingsdoel) is te vinden in Bijlage B.

Niet bij alle soorten die hun doel niet halen is zandwinning per se negatief. Terwijl bij mosselelers sprake kan zijn van verlies van foerageergebied als ontgrondingen plaatsvinden in gebieden waar voor deze vogels bereikbare prooien voorkomen, is bij viseters mogelijk sprake van positieve effecten van zandwinputten.



Figuur 6.1. Trends van seizoensgemiddelde aantallen van enkele mossel- en visetende vogelsoorten die in de periode 2016-2020 (oranje lijnen) hun instandhoudingsdoelen (groene lijnen) niet halen. Boven: kuifeend (Tufted Duck) in IJsselmeer en Markermeer-IJmeer, midden: topper (Greater Scaup) in IJsselmeer en brilduiker (Common Goldeneye) in Markermeer-IJmeer, onder: grote zaagbek (Common Merganser) en nonnetje (Smew) in het IJsselmeer. Bron: www.sovon.nl.

6.4.5 Voortschrijdend inzicht: de rol van diepe putten voor de ecologie

Op basis van het onderzoek van het RIVO in de periode 1970-1990 en latere adviesrapporten over de functie voor visetende vogels werd geconcludeerd dat diepe putten van overwegend positieve betekenis zijn voor vis en visetende vogels. Vis overwintert in de putten en verblijft er ook in de zomerhalfjaar, zolang geen sprake is van lage zuurstofconcentraties door stratificatie. Ook bij Marker Wadden bleek dat vissen veelvuldig van de daar gegraven putten gebruik maken.

Uit modelberekeningen op basis van KNMI gegevens over 2018 kwam echter naar voren dat diepere putten in het Markermeer, IJmeer en Gooimeer van april t/m juli waarschijnlijk het merendeel van de tijd zijn gestratificeerd. Ook kan worden gesteld dat door toename van de watertemperaturen in de zomer en afname van de hoeveelheid wind de kans op en de duur van stratificatie waarschijnlijk is toegenomen. Op basis van de simulaties is diepte waarschijnlijk de dominante stuurfactor voor de grootte van het verticale temperatuurverschil in de putten. Wat dit betekent voor zuurstof en vis moet nog nader worden onderzocht.

Een andere kwestie is accumulatie van slib in de putten. Terwijl dit gunstig kan zijn voor de productie in het meer door toename van helderheid en verbetering van de voedingswaarde van het overblijvende zwevende stof, worden mogelijk ook grote hoeveelheden fosfaat en koolstof, dat aan sedimenterend slib is gebonden, permanent in de putten opgeslagen. Dit werkt in principe tijdelijk, totdat de put zich zover heeft gevuld dat de toplaag van de bodem weer door de wind kan worden beroerd. Ook is het met name aan de orde in het Markermeer, vanwege de hoge concentraties van gesuspendeerd sediment.

Terwijl in de jaren 1970 en 1980 nalevering van fosfaat vanuit de bodem bij lage zuurstofconcentraties een zorgpunt was, is, nu de aanvoer van fosfaat min of meer tot natuurlijke proporties is teruggekeerd, juist het onttrekken van fosfaat aan het voedselweb mogelijk een probleem. In het Markermeer is de productie laag, mede doordat mogelijk meer dan de helft van het aangevoerde fosfaat op deze manier wordt geïmmobiliseerd.

6.4.6 Klimaatverandering

Ook klimaatverandering kan van invloed zijn op de afwegingen die voor een beoordelingskader gebruikt kunnen worden. Veranderingen in instraling en wind hebben invloed op de kans op stratificatie en de duur van gestratificeerde perioden. Dit blijkt bijvoorbeeld uit meetpaalgegevens over het verticale temperatuurverloop in relatie tot deze factoren bij dag-stratificatie, die ook buiten de putten in de meren optreedt.

Door klimaatverandering is de luchttemperatuur, maar ook de instraling, inmiddels fors toegenomen. Ook is de gemiddelde windsnelheid in de jaren 1990 behoorlijk achteruit gegaan, ook al is dat waarschijnlijk geen doorgaande trend zoals de opwarming. Door deze combinatie moet de kans op en de duur van stratificatie in putten van gelijke diepte de laatste jaren aanzienlijk hoger zijn dan voor 1990. De kans dat dit leidt tot lage zuurstofconcentraties neemt verder toe doordat de oplosbaarheid van zuurstof bij hogere watertemperaturen afneemt.

Hoewel gebruik van de putten door grote aantallen vissen recent bij Marker Wadden is bevestigd in een situatie zonder stratificatie, is de beschikbare ruimte dus waarschijnlijk vaker beperkt tot het water boven de spronglaag.

6.5 Gevolgen voor beoordelingskader

De voorgaande conclusies en discussie betekenen dat de basis voor het nog geldende beoordelingskader in de Natura 2000 beheerplannen niet meer ruimte biedt dan destijds. Voor vogels geldt dat de hoeveelheid voedsel en de voedselkwaliteit zijn verminderd, en dat in relatie tot de instandhoudingsdoelen de urgentie voor bescherming bij een aantal soorten is toegenomen.

De bevindingen ten aanzien van accumulatie van voedingsstoffen in (zandwin)putten kunnen betekenen dat zandwinning via deze putten heeft bijgedragen aan de afname van de productie (en de voedselsituatie voor vogels) in het Markermeer. Of dit klopt en of het in de andere meren ook zo is, wordt in 2023 nader onderzocht.

6.5.1 Mitigatie

Een aantal negatieve gevolgen van ontgroningen kunnen wellicht ten dele worden gemitigeerd, bijvoorbeeld via de opleverdiepte of de vormgeving en locatiekeuze van putten. Overwegingen met betrekking tot de opleverdiepte zijn gebruikt bij het opstellen van het huidige beoordelingskader, effecten van vormgeving of strijklengte niet. Met uitzondering van het onderzoek van de proefputten in het Markermeer, die in hellingshoek verschilden, zijn de mogelijkheden van vormgeving, strijklengte of expositie nog nauwelijks verkend.

7 Aanbevelingen voor vervolg

7.1 Aanvullend onderzoek

Met name met betrekking tot de rol van putten is nader onderzoek zinvol. Enerzijds betreft dit de accumulatie van voedingsstoffen in relatie tot de productiviteit van de meren. Dit onderzoek wordt in 2023 verder ter hand genomen. Dat geldt ook voor het gebruik van de putten door vis, in relatie tot het optreden van stratificatie.

Via modellering kan het optreden van stratificatie verder worden onderzocht als schatter van accumulatie en de verschillen daarin tussen de meren, met als vervolgstap de mogelijkheden voor mitigatie van negatieve effecten door middel van locatiekeuze, vormgeving en opleverdiepte.

Daarnaast zou het effect van putten op de erosie van ondiepten kunnen worden onderzocht.

7.2 Tijdelijke effecten van Zandwinning

Tijdelijke effecten van zandwinning zijn in dit rapport maar beperkt aan bod gekomen. Wel werd duidelijk gemaakt dat gesuspendeerd sediment vanaf werklocaties door windgestuurde stroming in het Markermeer over zeer grote afstanden kan worden getransporteerd.

Ten opzichte van de problematiek van de accumulatie van voedingsstoffen in de putten zou dit ten dele positief kunnen worden opgevat, omdat het de beschikbaarheid van voedingsstoffen in een systeem als het Markermeer tijdelijk vergroot.

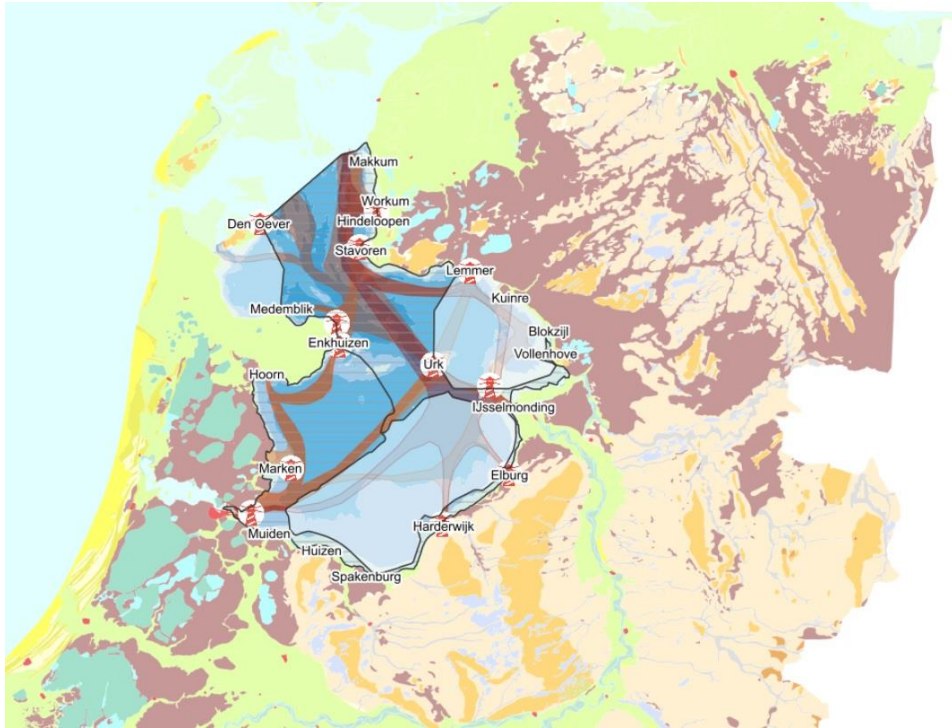
Ook zou de opvulsnelheid van een put kunnen worden ingezet door het kiezen van een locatie waar de duur van permanente accumulatie zo kort mogelijk is.

7.3 Delfstoffen informatiesysteem IJsselmeergebied

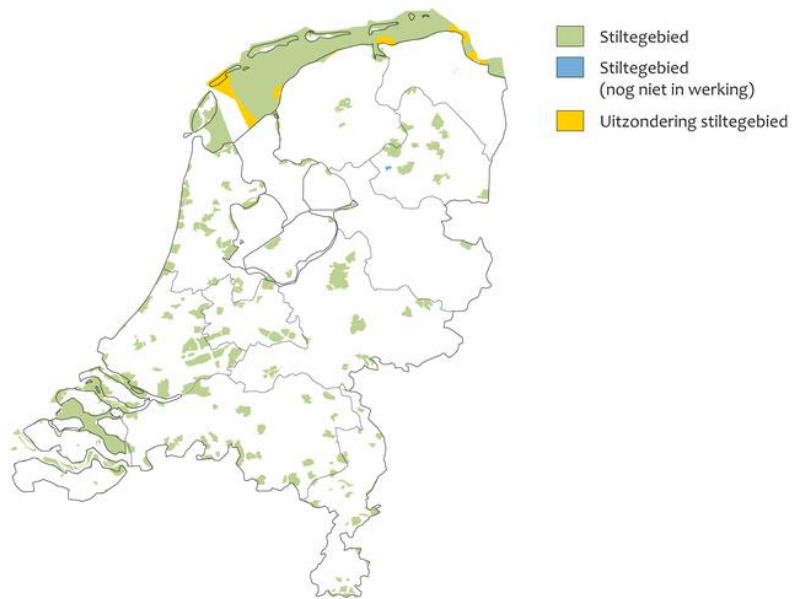
Voor beoordeling van aanvragen is het zinvol een Delfstoffen Informatie Systeem IJsselmeergebied op te zetten, naar voorbeeld van het systeem voor de Noordzee ("DIS", bereikbaar via DINO-loket), ook ten behoeve van de verschillende effecten op ecologie. Op die manier kan een afweging worden gemaakt tussen de hoeveelheid winbaar zand voor verschillende scenario's van diepe of ondiepe zandwinning en de effecten op ecologie. Zo kan het zand in het IJsselmeer optimaal benut worden om Nederland veerkrachtiger te maken tegen zeespiegelstijging met zo veel mogelijk behoud van ecologische functies.

7.4 Afstemming op andere vormen van ruimtegebruik

Ook de afstemming van zandwinning op andere vormen van ruimtegebruik dan ecologie is nog nauwelijks aan bod gekomen. Sommige daarvan hebben een eigen wettelijk kader, zoals het archeologisch bodemarchief (zie Geohydrologische Atlas IJsselmeergebied; figuur 7.1) of schootsvelden van defensie. Andere opties zijn de ligging van stiltegebieden (figuur 7.2) en de ruimtelijke spreiding van scheepvaart, recreatie en visserij.



Figuur 7.1. Archeologie: Geohydrologische Atlas IJsselmeergebied.



Figuur 7.2. Stiltegebieden. Bron www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

8 Referenties

- Anoniem 1996. Ontgrondingen Flevoland. Algemene randvoorwaarden diepe putten. Provincie Flevoland en Haskoning, Koninklijke Ingenieurs- en Architecten Bureau, Nijmegen.
- Boderie P.M.A., M. van der Wal, T. van Kessel & M. Genseberger 2010. Aanslibgedrag vaargeul Amsterdam - Lelystad. Deltares rapport 1202714, Delft
- Brongers I. 1999. Inventarisatie Driehoeksmosselen IJsselmeer. RDIJ rapport 99-9, Lelystad.
- Cazemier, W.G. 1977 - Zandwinning en bodemvoedselvoorziening voor vis op IJsselmeer en Gooimeer. *Visserij* _30 (3): 125-135-
- Cazemier, W.G. 1979 - Gevolgen van zandwinning in het IJsselmeer-randmerengebied voor de vis en de visserij aldaar. Rijksinstituut voor Visserijonderzoek, Intern rapport ZS 79-01.
- Claessen F.A.M. 1987. Invloed van de grootte van de taludhelling van diepe putten op stratificatie. RWS-DBW, rapport 87.036, Lelystad.
- De Jong J. 1982. De invloed van diepe putten op de fosfaatbelasting van een meer RWS Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Flevovericht Nr. 200, Lelystad.
- De Leeuw J.J. 1997. Demanding divers. Ecological energetics of food exploitation by diving ducks. Proefschrift RUG / Van Zee tot Land 61, Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Lelystad.
- De Leeuw J.J. 1999. Food intake rates and habitat segregation of Tufted Duik *Aythya fuligula* and Scaup *Aythya marila* exploiting Zebra Mussels *Dreissena polymorpha*. *Ardea* 87: 15-31.
- De Leeuw J.J. & M.R. van Eerden 1995. Duikeenden in het IJsselmeergebied. Herkomst, populatie-structuur, biometrie, rui, conditie en voedselkeuze. Flevovericht 373, RDIJ, Lelystad.
- De Leeuw J.J., J. Volwater, O.A. van Keeken, J. Elings & C.H.A. van Leeuwen 2022. Paai- en opgroeigebieden voor vis in en rond Marker Wadden. Wageningen Marine Research (WUR), rapport C058/21, IJmuiden.
- De Lucas Pardo M.A. 2014. Effect of biota on fine sediment transport processes. A study of Lake Markermeer. Proefschrift T.U. Delft.
- De Rijk S. & M. Löffler (red.) 2022. Syntheserapport KIMA. De eerste vijf jaar onderzoek op Marker Wadden. Deltares, Utrecht.
- Noordhuis R. (red.) 2010. Ecosysteem IJsselmeergebied: nog altijd in ontwikkeling. Trends en ontwikkelingen in water en natuur van het Natte Hart van Nederland. Rijkswaterstaat, Lelystad.
- Noordhuis R., L. van der Heijden & A. de Jong 2021. Effecten van temperatuurtoename op de grote wateren. Een literatuurstudie met data-overzicht. Deltares rapport 11205270-005-ZWS-0003, Utrecht.
- Noordhuis R. & E.J. Houwing 2003. Afname van de Driehoeksmossel in het Markermeer. RIZA rapport 2003.016. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Lelystad.

- Noordhuis R., M. Genseberger & V. Harezlak 2022. Fosfaat in het Markermeer-IJmeer. Een ruimtelijk gedifferentieerde balansstudie. Deltares, rapport 11206217-016-ZWS-0001, Utrecht.
- Noordhuis R. & M. Kolen 2003. Effecten van verdiepen op de watervegetatie in het Veluwemeer. Overzicht van resultaten zomer 2003. RIZA werkdocument 2003.162X, Lelystad.
- Noordhuis R., S. de Rijk, G. van Geest, M. Maarse, S. Vergouwen & A. Boon (2020). Klimaatscan. Deltares 11203733-000-ZWS-0006, Utrecht.
- Noordhuis R., B.G. van Zuidam, E. Peeters & G.V. van Geest 2016. Further improvements in water quality of the Borderlakes: two types of clear states at different nutrient levels. *Aquatic Ecology* 50: 521-539.
- Noordhuis R., H.H. Reeders & R. Scheffer 1992. Waarom kan de Driehoeksmossel zich in de Veluwerandmeren niet handhaven? *De Levende Natuur* 93: 188-192.
- Onderzoekcommissie Diepe Putten IJsselmeer en Randmeren 1980. Rapport onderzoekresultaten tot en met 1980 van de Onderzoekcommissie diepe putten IJsselmeer en Randmeren. Rijkswaterstaat directie Waterhuishouding en Waterbeweging - Rapport WWNO-N-80.0009.
- Oost, A.P., Hofstede, J., Weisse, R., Baart, F., Janssen, G. & Zijlstra, R. (2017). Climate change. In *Wadden Sea Quality Status Report 2017*. p. 597.
- Roskam G. 2020. Monitoring slibbodem rondom Marker Wadden – 2020. Memo 11203732-012-zWS-0002, Deltares, Utrecht.
- Spaans A.L., J. van der Winden, R. Lensink, L.M.J. van den Bergh & S. Dirksen 1998. Vogelhinder door windturbines. Landelijk Onderzoekprogramma, deel 4: nachtelijke vliegbewegingen en vlieghoogtes van vogels langs de Afsluitdijk. Bureau Waardenburg, rapport 98.015, Culemborg. DLO- Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Wageningen.
- Sterk H. 2010. Oude zeekaarten in GIS. Stagerapport RWS Dir. IJsselmeergebied, Lelystad.
- Van der Heul J.W. & W.G. Cazemier 1983. Bemonstering van het bodemvoedselaanbod voor vis in een zandwinput in de Gooimeer in het jaar 1981. RIVO, rapport ZS 83-01, IJmuiden.
- Van der Heul J.W. & W.G. Cazemier 1986. Bodemfauna en visstand in twee speciale zandwinputten in het Markermeer. RIVO, rapport BV 86-01, IJmuiden.
- Van Leeuwen B. 2005. Quick scan slibproblematiek Markermeer en Eem- en Gooimeer. Witteveen + Bos, rapport Rw1390-1, Deventer.
- Van der Molen et al. 2018. Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water 2021-2027. STOWA rapportnummer 2018-49.
- Van Eerden M.R., S.H.M. van Rijn & M. Roos 2005. Ecologie en Ruimte: gebruik door vogels en mensen in de SBZ's IJmeer, Markermeer en IJsselmeer. RIZA rapport 2005.014, Lelystad.
- Eerden M.R. van, W. Dubbeldam & J. Muller 1999. Sterfte van watervogels door visserij met staande netten in het IJsselmeer en Markermeer. RIZA-rapport 99.060. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Lelystad.
- Van Riel M. & P. Verdonschot 2021. De ontwikkeling van macroinvertebraten op en rond de Marker Wadden. Een eerste verkenning. Notitie WEnR Zoetwaterecosystemen, Wageningen.

Van Rijn S., M. Kolen, M. Roos & M.R. van Eerden 2004. Bergen van baggerspecie in Flevopot 12A. Gevolgen voor vogels? RIZA rapport 2004.076X, Lelystad.

Van Rijn S., M. Bovenberg, K. Hasenaar, M. Roos & M.R. van Eerden 2012. Voedsel van overwinterende duikeenden in het IJsselmeergebied. Delta Milieu, Culemborg.

Vijverberg T. 2008. Mud dynamics in the Markermeer, silt traps as a mitigation measure for turbidity, Msc thesis, May 2008 TU Delft.

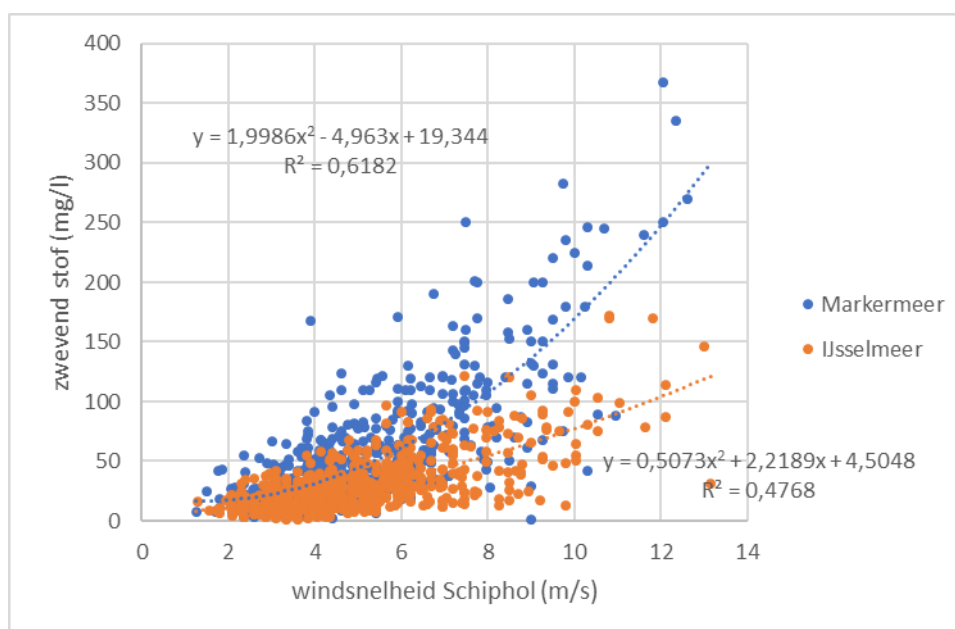
Zemmelink G.B. 1993. De invloed van diepe putten op de fosfaatnalevering in een meer. RIZA rapport 93.177X, Lelystad.

A Bijlage Aanvullende kennis accumulatie

In deze bijlage wordt informatie gepresenteerd die kan dienen ter ondersteuning van paragraaf 4.2 over accumulatie in putten. Relevant is met name de informatie over de afstanden die gesuspendeerd materiaal kan afleggen tussen een brongebied en een potentieel accumulatiegebied zoals een zandwinput, met name bij de gemiddeld hogere windsnelheden in het winterseizoen.

A.1 Wind en resuspensie

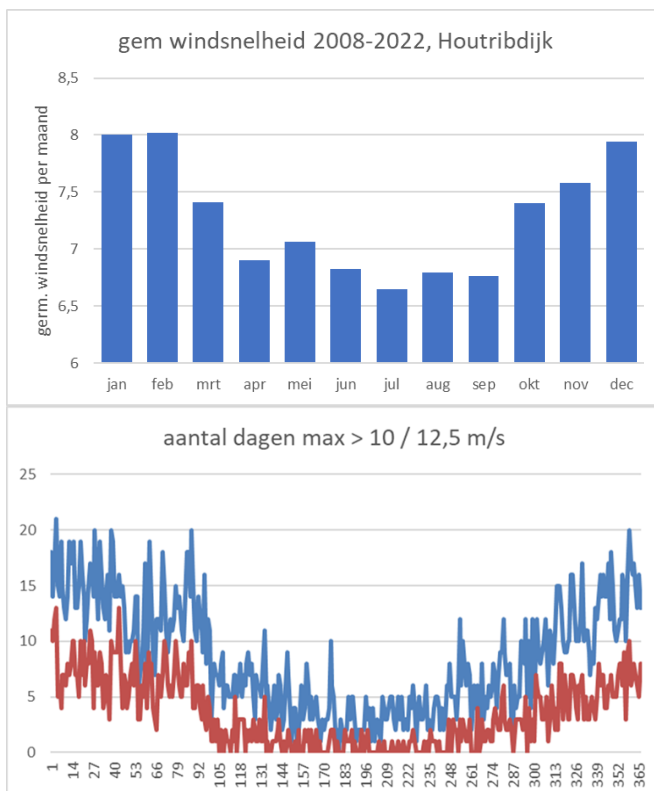
De meren van het IJsselmeergebied zijn matig diep tot ondiep, afgezien van de putten. Daardoor wordt bij toenemende windsnelheden een toenemende hoeveelheid sediment gesuspendeerd. Dit is met name het geval in het Markermeer, waar het sediment uit klei en slib bestaat. Hier wordt twee keer zoveel sediment opgewerveld bij een bepaalde windsnelheid dan in het IJsselmeer (figuur A1). Dit materiaal kan door laterale waterbewegingen worden verplaatst, waarna het elders bezinkt al de windsnelheid weer afneemt.



Figuur A1. Relatie tussen windsnelheid (Schiphol) en de concentratie zwevend stof in het Markermeer (Midden) en het IJsselmeer (Vrouwezand).

A.2 Stormseizoen

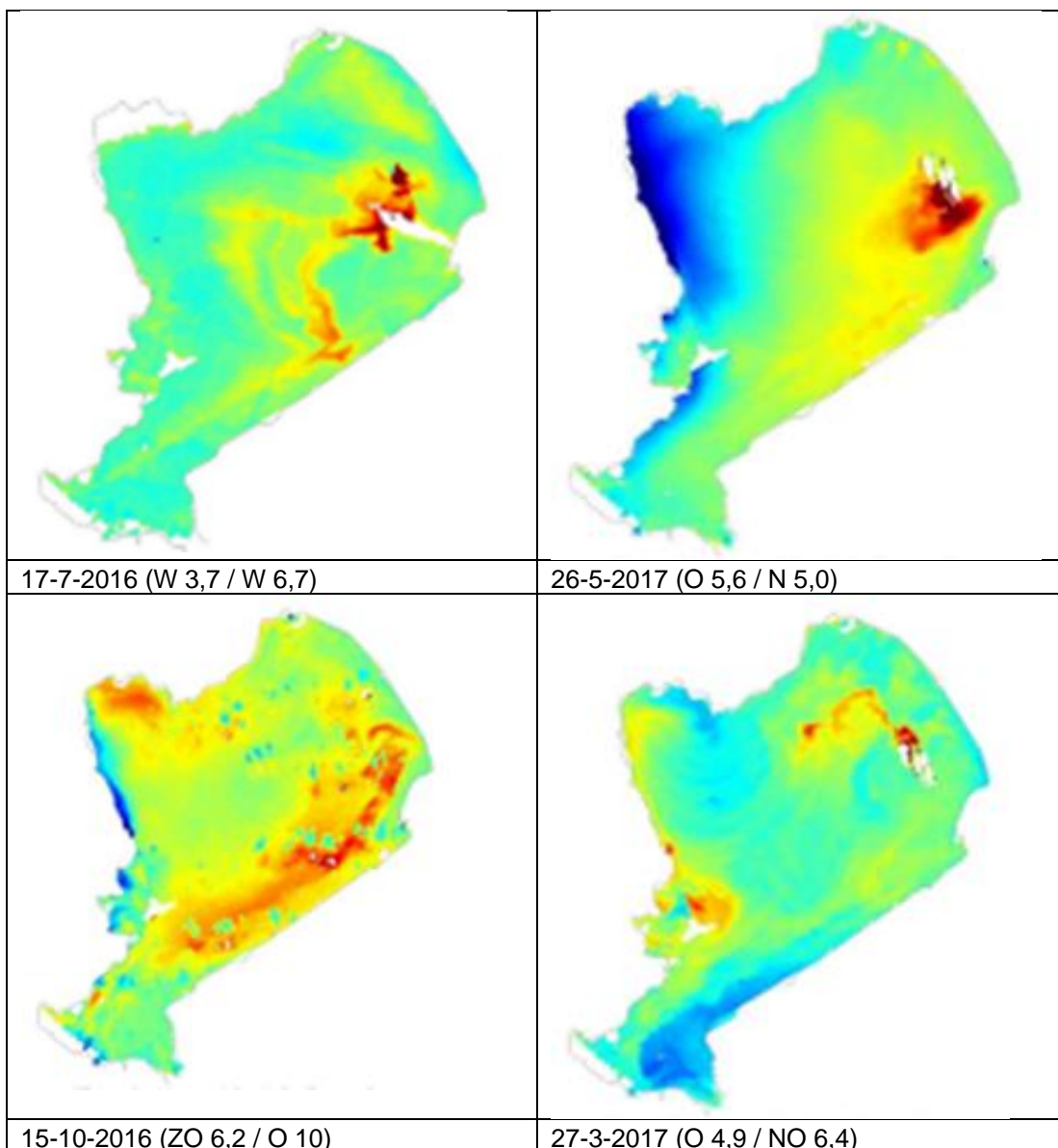
Terwijl de gemiddelde windsnelheid in Nederland in het voorjaar geleidelijk afneemt, eindigt het stormseizoen (frequentie van dagen met harde wind of storm) relatief abrupt rond eind maart / begin april (figuur A2).



Figuur A2. Seizoensverloop van de maandgemiddelde windsnelheid op de Houtribdijk (boven) en van de frequentie van dagen met harde of stormachtige wind op Schiphol (onder; reeksen Houtribdijk zijn niet lage genoeg voor deze bewerking, Lelystad is niet bruikbaar door toenemende bebouwing en begroeiing rond het meetpunt)

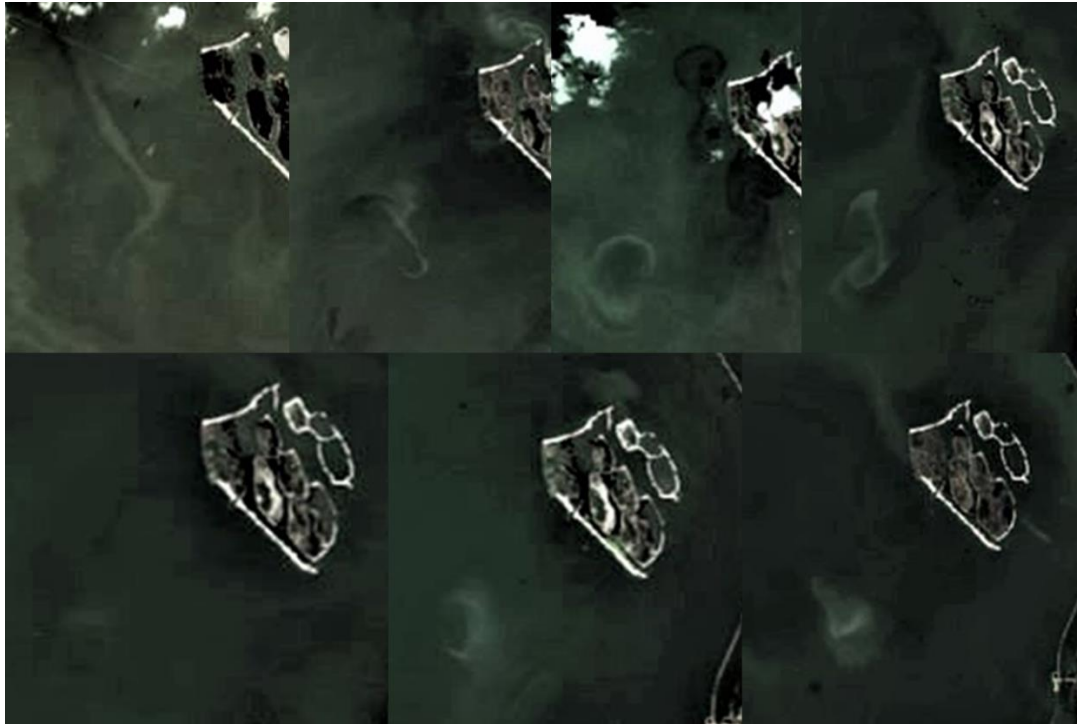
A.3 Transportafstand en brongebied voor accumulatie

Binnen KIMA zijn satellietbeelden van het Markermeer bewerkt voor zwevend stof en vergeleken met resultaten van het Markermeer slibmodel op basis van windgegevens van dezelfde dag. In dit model worden met deze input waterbeweging (Delft3D FLOW), strijklengte en golfwerking (MATLAB), slibtransport en sedimentatie (Delft3D WAQ) gebruikt voor een ruimtelijke weergave van patronen in zwevend stof concentraties. Omdat opwoeling door activiteiten als zandwinning en natuuraanleg niet in deze modellering zijn meegenomen, komen de effecten daarvan op de verschilkaarten prominent naar voren. Daaruit bleek dat zich pluimen van opgewerveld materiaal kunnen vormen die zich afhankelijk van de windsnelheid en -richting kunnen uitstrekken over meer dan 10 of 15 kilometer (figuur A3). Dit zijn dus de afstanden waarover gesuspendeerd materiaal getransporteerd kan worden voordat het volledig is gehersedimenteerd.



Figuur A3. Verschilkaarten van remote sensing beelden (Sentinel 2) bewerkt voor zwevend stof en modelresultaten voor zwevend stof. Opwerveling van sediment door werkzaamheden zoals zandwinning of de aanleg van Marker Wadden zijn niet in het model meegenomen en komen daardoor sterk naar voren op de verschilkaarten.

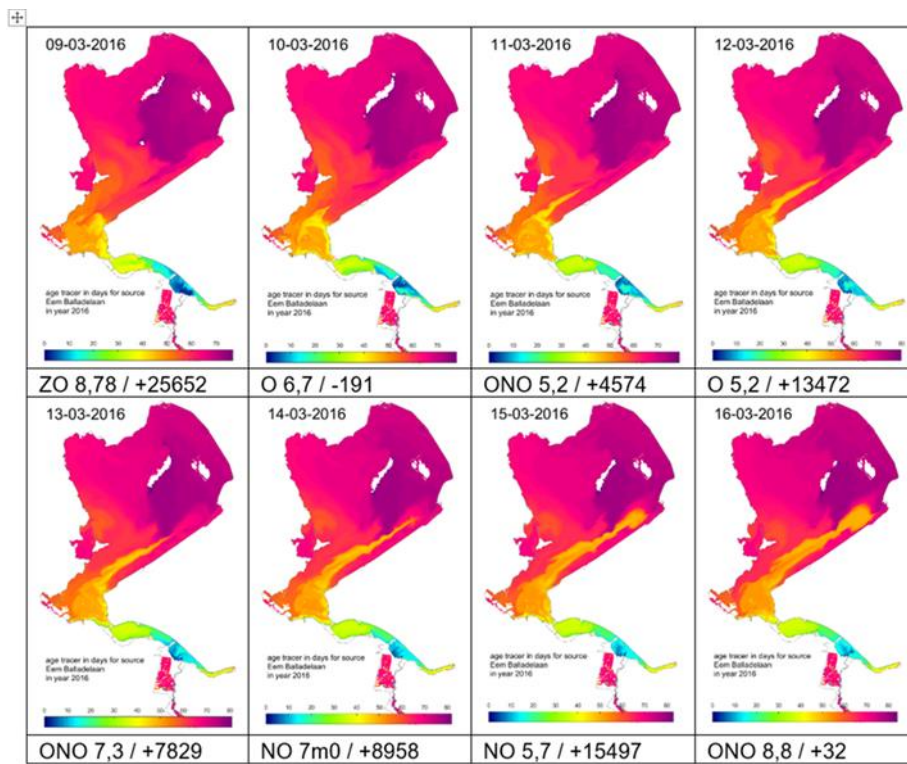
Door werkzaamheden, vaargeulonderhoud en zandwinning wordt sediment opgewerveld dat zich in pluimen over grote afstanden kan verplaatsen. De verspreiding lijkt op basis van de satellietbeelden en de modelsimulaties mede te worden beïnvloed door geconcentreerde waterbewegingen in de geulen. Als de waterbeweging beperkt is, kan het effect ook meer lokaal zijn (figuur A4). Nadere analyse van dergelijke beelden is zinvol voor het bepalen van de rol van de gebruikte winmethode en de duur daarvan op de omvang van de effecten.



Figuur A4. Directe effecten van zandwinning ten zuidwesten van Marker Wadden in het Markermeer, gecombineerd met levering van holoceen materiaal voor aanleg van de eilanden.

A.4 Stromingspatronen

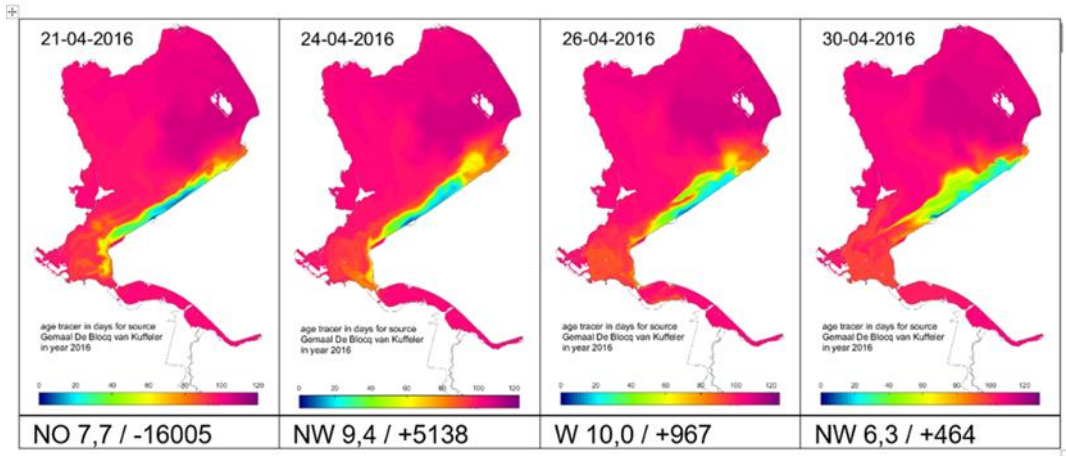
Onder invloed van vorm en diepteverdeling van de meren kunnen stromingspatronen ontstaan, waarvan de richting met name in de onderlaag kan afwijken van de windrichting. Deze patronen zijn onder meer in het kader van een project voor de Werkgemeenschap Levend Markermeer gemodelleerd met behulp van het model D-Flow FM (Flexible Mesh; opvolger van Delft3D FLOW en SOBEK FLOW), met gebruikmaking van tracers voor de ruimtelijke differentiatie (figuur A5 en A7; zie ook Noordhuis et al. 2022). In het Markermeer ontstaat vaak een circulaire stroming die bij westenwind rechtsom en bij oostenwind linksom draait. Daarbij lijkt de waterverplaatsing te worden gekanaliseerd door de geulen. Het water (met gesuspendeerde stoffen) in het gedeelte van de Vaargeul Amsterdam – Lemmer (VAL) dat voor de Oostvaardersdijk ligt, wordt door de circulatiestroming vaak tegen de wind in door de geul getrokken; naar het noordoosten bij noordoostenwind, naar het zuidwesten bij zuidwestenwind (figuur A5). Wervelingen van de stroming in deze geul zijn vaak duidelijke zichtbaar op luchtfoto's en satellietbeelden (figuur A6). Water uit de Flevopolders lijkt nauwelijks over deze geul heen te stromen en wordt meegetrokken naar het zuidwesten of noordoosten (figuur A7). Gemiddeld stroomt het in de winter naar het zuidwesten en passeert daar de IJmeerput, voordat het langs de westkust weer mee naar het noorden stroomt. Dergelijke patronen zijn dus mede bepalend voor de depositiepatronen van gesuspendeerd sediment. Ook in figuur A5 is zichtbaar hoe een deel van het door werkzaamheden opgewerkte sediment in de VAL wordt gekanaliseerd.



Figuur A5. Voorbeeld van modelresultaten met betrekking tot waterbewegingen. Water uit het zuiden wordt in maart 2016 bij noordoosten wind door de circulatiestroming tegen de wind in door de Vaargeul Amsterdam - Lemmer getrokken met een snelheid die op grond van deze beelden gemiddeld ongeveer 15 cm per seconde bedraagt. Modelresultaten met tracers, losgelaten in de Eem (Noordhuis et al. 2022). Weergegeven getallen zijn windrichting en daggemiddelde windsnelheid op KNMI windstation Houtribdijk (m/s), en de spuidebieten door de Houtribsluizen (in m³ per dag; + = noordwaarts, - = zuidwaarts).



Figuur A6. Voorbeelden van turbulentie rond de vaargeul Amsterdam-Lemmer, voor de Oostvaardersplassen. Bewerkte satellietbeelden van de Sentinel-hub.



Figuur A7. Voorbeeld van modelresultaten met betrekking tot waterbewegingen. Water uit de Flevopolders blijft geconcentreerd tussen de dijk en de Vaargeul Amsterdam - Lemmer en gaat uiteindelijk in de geul meestromen. Modelresultaten met tracers, losgelaten bij de Blocq van Kuffeler (Noordhuis et al. 2022). Onder windgegevens en spuigegegevens als in figuur A6.

Water uit Flevoland stroomt uiteindelijk mee met water uit het zuiden in een circulaire stroming die gemiddeld door het zuiden van het IJmeer en over de IJmeerput stroomt, en vervolgens langs de westkust naar het noorden.

B Bijlage Staat van Instandhouding watervogels

In de onderstaande twee tabellen is weergegeven wat de staat van instandhouding is van een selectie van Natura 2000 watervogels in de waterlichamen van het IJsselmeergebied. De getallen zijn afkomstig van www.sovon.nl en betreffen seizoensgemiddelden (gemiddelde aantallen over 12 maanden, van juli van het aangegeven jaar t/m juni van het daaropvolgende jaar). De “huidige” situatie betreft daarvan het gemiddelde over de laatst beschikbare vijf seizoenen op de sovon website; 2016 t/m 2020.

Tabel B1. Instandhoudingsdoelen m.b.t. foeragerende aantallen van de aangegeven soorten “niet-broedvogels” en huidige aantallen (seizoensgemiddelden 2016-2020). MM = Markermeer, YM = IJsselmeer, RZ = Randmeren Zuid. Aantallen van soorten die in deze periode hun doel niet haalden zijn in rood weergegeven. Voedsel: Ongew. = ongewervelden, waaronder mosselen. Diepte: Ondiep = tot ca 2m, Middel = tot ca 5m, Diep = tot ca 15m.

	voedsel	diepte	MM doel	Huidig	YM doel	Huidig	RZ doel	Huidig
Brilduiker	Ongew.	Middel	170	20	310	313	nvt	nvt
Tafeleend	Ongew.	Middel	3200	5168	310	528	790	143
Kuifeend	Ongew.	Middel	18800	8612	11300	7573	2700	2362
Topper	Ongew.	Middel	70	1329	15800	13669	nvt	nvt
Meerkoet	Ongew.	Ondiep	4500	11909	3600	3219	1700	2730
Grote Zaagbek	Vis	Diep	40	60	1300	553	nvt	nvt
Middelste Zaagbek	Vis	Diep	nvt	nvt	79	89	nvt	nvt
Nonnetje	Vis	Diep	80	34	180	55	10	6
Fuut	Vis	Diep	170	348	1300	1607	160	256
Aalscholver	Vis	Diep	2600	2022	8100	8389	160	116
Kleine Zwaan	Planten	Ondiep	nvt	18	20	39	2	1
Pijlstaart	Planten	Ondiep	nvt	nvt	60	156	nvt	nvt
Krooneend	Planten	Middel	nvt	21	nvt	nvt	nvt	nvt

Tabel B2. Als boven; RO = Randmeren Oost, KM = Ketelmeer-Vossemeer, ZM – Zwarte Meer.

	voedsel	diepte	VRM doel	Huidig	KM doel	Huidig	ZM doel	Huidig
Brilduiker	Ongew.	Middel	220	60	nvt	nvt	nvt	nvt
Tafeleend	Ongew.	Middel	6600	3079	350	97	240	50
Kuifeend	Ongew.	Middel	5700	7901	4500	2331	1700	1323
Topper	Ongew.	Middel	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt
Meerkoet	Ongew.	Ondiep	11000	13781	1700	1439	1800	1277
Grote Zaagbek	Vis	Diep	50	22	70	40	nvt	nvt
Middelste Zaagbek	Vis	Diep	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt
Nonnetje	Vis	Diep	60	21	30	5	nvt	nvt
Fuut	Vis	Diep	400	488	350	228	170	80
Aalscholver	Vis	Diep	420	359	870	540	330	287
Kleine Zwaan	Planten	Ondiep	120	431	5	0	2	0
Pijlstaart	Planten	Ondiep	140	178	50	55	10	1
Krooneend	Planten	Middel	30	43	nvt	nvt	nvt	nvt

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl