

**Geological Survey of the
Netherlands**

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75
infodesk@tno.nl

TNO-rapport

TNO-060-UT-2011-02116

**Impact van de Brouwersdam op
zuurstofcondities in de Grevelingen;
reconstructies uit natuurlijke sediment
archieven**

Datum 9 december 2011

Auteur(s) T.H. Donders
E. Guasti
F.P.M. Bunnik
H. van Aken (Universiteit Utrecht)

Exemplaarnummer
Oplage
Aantal pagina's 26 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen
Opdrachtgever Natuur- en recreatieschap de Grevelingen
Projectnaam Onderzoek Grevelingenmeer
Projectnummer 056.01340

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2011 TNO

Inhoudsopgave

1	Achtergrond	3
1.1	Problematiek van de Grevelingen	3
1.2	MIRT Verkenning: Integrale aanpak.....	3
1.3	Onderzoeksdoel en scope	3
2	Achtergrondkennis foraminiferen.....	5
2.1	Pilotstudie foraminiferen	5
2.2	Foraminiferen indiceren zuurstofgehalte: resultaten van de pilotstudie	5
2.3	Betrokken partijen en expertise	6
3	Materialen en Methoden.....	8
3.1	Veldwerk	8
3.2	Analyses	9
4	Resultaten	11
4.1	Foraminiferen onderzoek.....	11
4.2	Cesium en looddatering.....	13
4.3	Pollenonderzoek	16
5	Interpretatie en discussie	18
5.1	ouderdomsbepaling	18
5.2	vegetatieveranderingen	18
5.3	reconstructie van de bodemcondities	19
6	Conclusies en aanbevelingen	23
7	Referenties	24
8	Ondertekening	26

1 Achtergrond

1.1 Problematiek van de Grevelingen

De kwaliteit van de Grevelingen staat onder druk. Door de afsluiting van het Grevelingenmeer in 1964 en 1971 zijn ernstige problemen met de water- en natuurkwaliteit ontstaan. Door het ontbreken van getij is de dynamiek uit het water verdwenen. Ook de toeristisch-recreatieve aantrekkelijkheid van het gebied vermindert. Als gevolg hiervan stagneert de ruimtelijk-economische ontwikkeling van de regio wat weer tot leegstand en werkloosheid kan leiden. Er zit steeds minder zuurstof in het water en de bodem van het Grevelingenmeer. Het lage zuurstofgehalte is dodelijk voor een groot deel van het dierenleven in diepere delen van het meer. Het probleem wordt geleidelijk ernstiger. In de periode juli - augustus 2010 is grote sterfte van het bodemleven waargenomen (Persbericht over MIRT-verkenning Grevelingen, 4 oktober 2010). In de MIRT verkenning wordt de chemische waterkwaliteit, het voorkomen van anoxische bacteriële matten en de macrofauna onderzocht (Lengkeek et al., 2010).

1.2 MIRT Verkenning: Integrale aanpak

Het herintroduceren van getij in het Grevelingenmeer is de enige realistische mogelijkheid om deze vicieuze cirkel te doorbreken. Onderzoek van Rijkswaterstaat (Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport MIRT verkenning) heeft aangetoond dat er grote kansen liggen om door een integrale aanpak de kwaliteit van de Grevelingen te verbeteren, zowel in natuur, duurzame energie, waterbeheer, economie, recreatie, visserij als toerisme. Mogelijk kan het Grevelingenmeer een bijdrage leveren aan de waterveiligheid van Nederland door in tijden van nood water te bergen. Hierdoor wordt extra bergingscapaciteit gecreëerd die met het oog op de verdere stijging van de zeespiegel en toename van de rivierafvoeren in de toekomst nodig kan zijn. Specifiek probleem is dat niet precies bekend is wat het effect zal zijn van de herintroductie van getij. Wat de precieze referentieconditie van voorafgaand aan de afsluiting is, met name voor wat betreft de zuurstofcondities en het benthische leven, is door het ontbreken van een continue monitoringsreeks vrijwel onbekend.

1.3 Onderzoeksdoel en scope

De doelstelling van dit onderzoeksproject is substantieel bij te dragen aan de kennis over de herstelcapaciteit van het Grevelingenmeer na ventilatie, door middel van een historische reconstructie van de Grevelingen op basis van natuurlijke archieven (sedimentkernen). Doel is uitspraken te doen over het **te verwachten effect van herintroductie van getij** d.m.v. het vergelijken van de omstandigheden voorafgaand aan de constructie van de Grevelingendam dam (1965, tussen Goeree-Overflakkee en Schouwen-Duiveland), en Brouwersdam en –sluis (1971) en het aanbrengen van een sluis in de Brouwersdam (1978) en de situatie na deze ingrepen. Dit wordt bereikt door het natuurlijke sedimentarchief van de Grevelingen te bestuderen en de foraminiferenpopulatie gedurende de afgelopen ~50 jaar te reconstrueren. Daarmee kan het effect van het verdwijnen van getij worden bepaald. Dit geeft inzicht in het te verwachten effect van meer getij, en geeft

scenario's (natuurlijke experimenten) waarmee computermodellen, die worden gebruikt voor het bepalen van het gewenste effect, te ijken en testen. In de huidige studie zijn sedimentkernen verzameld op 2 lokaties langs profielen waar regelmatig waterkwaliteit (o.a. zuurstofgehalte) wordt bemonsterd door Rijkswaterstaat. Deze zijn bemonsterd en de foraminiferenpopulatie is geanalyseerd. Door middel van isotopenonderzoek en vegetatiereconstructie (mbv pollenanalyses) is de ouderdom van de sedimenten bepaald zijn de omringende landschapveranderingen gereconstrueerd. Ook geven de pollenanalyses een indicatie van de veranderingen in fytoplankton (diatomeeën en dinoflagellatencysten) doordat deze (deels) zijn bewaard in de pollenextracten. Op basis van de ecologische interpretaties van de aangetroffen foraminiferen populaties is een mileureconstructie in de tijd beschikbaar gekomen voor de Grevelingen.

Concept

2 Achtergrondkennis foraminiferen

2.1 Pilotstudie foraminiferen

Voorafgaand aan het huidige onderzoek is in de zomer van 2010 ook een pilot-onderzoek uitgevoerd naar het voorkomen van benthische foraminiferen in het sediment van het Grevelingenmeer. Benthische foraminiferen zijn eencellige, heterotrofe organismen die een kalkskeletje (of schelpje) vormen. Zij zitten qua grootte tussen de bacteriën en schelpdieren en zijn daarom een belangrijke schakel in het benthische ecosysteem. Door hun relatief korte levenscyclus reageren foraminiferen sneller op veranderingen (negatief of positief) dan macrofauna en zijn daardoor een krachtige indicatoren voor veranderingen in de benthische milieukwaliteit. Aangezien sommige soorten foraminiferen ook zonder zuurstof kunnen overleven (Risgaard-Petersen et al., 2006) zijn zij ook voor de condities in de Grevelingen krachtige indicatoren voor de milieufacties en bieden zij een integraal inzicht in de ontwikkeling van de problematiek. De verwachting is dat de foraminiferen in de Grevelingen een seizoenale cyclus doormaken waarbij ze in de zomer door de zuurstofloosheid massaal afsterven. Hierbij worden sporen gevormd die mogelijk de zuurstofloze periode kunnen overleven. Doordat ze in grote aantallen en verspreid over de Grevelingen aanwezig zijn kunnen zij een gedetailleerde informatie geven over de gevolgen van de afsluiting. Foraminiferen zijn een voedselbron voor grazende macrofauna en dragen bij aan de bioturbatie in het sediment. Met dit laatste dragen ze dus ook bij aan de ventilatie van het sediment waar grotere organismen van kunnen profiteren.

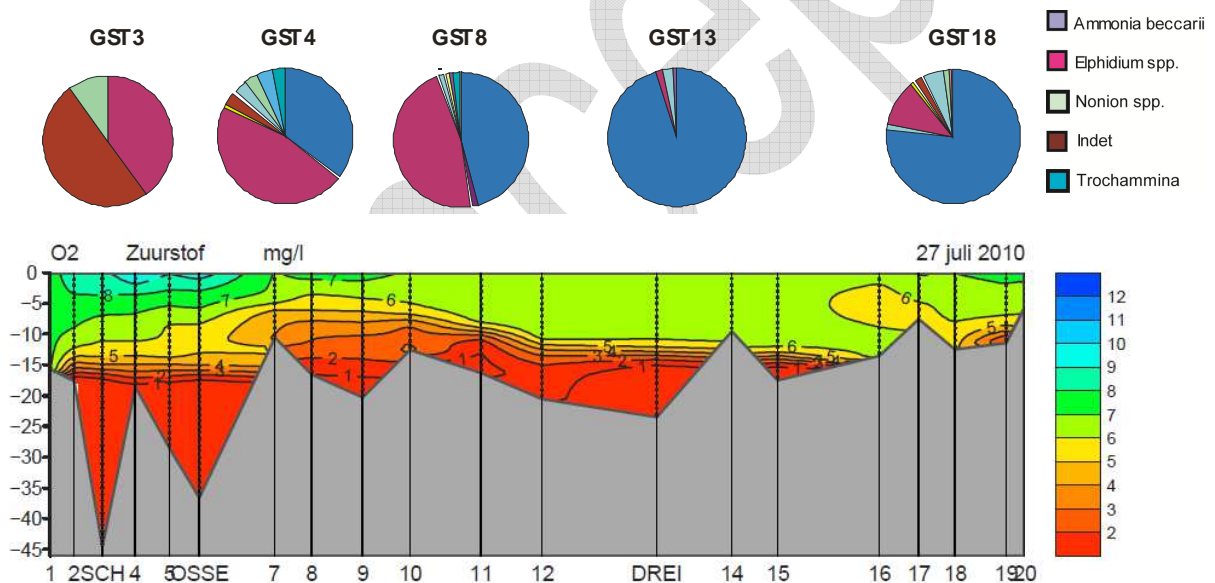
In de pilot- studie werden een aantal oppervlaktesedimenten bestudeerd en werd gekeken of de verspreiding van foraminiferen in het Grevelingenmeer lokale verschillen toont en of de aangetroffen verspreiding afhankelijk is van het zuurstofgehalte in bodem en water. Ook is de samenhang met het voorkomen van anoxische bacteriële matten geëvalueerd. In de Grevelingen is het voorkomen van de bacteriële matten van bacteriën uit het genus *Beggiatoa* een grote zorg. De vraag is of deze matten na ventilatie zullen verdwijnen. Wellicht kunnen foraminiferen bijdragen aan de beperking van het voorkomen van deze *Beggiatoa* matten. De gedachte hierachter is dat foraminiferen bioturberen en ook tot de infauna behoren, dus in het sediment leven. Ze leveren dus, samen met andere infauna soorten, een bijdrage aan de re-oxydatie van het sediment.

2.2 Foraminiferen indiceren zuurstofgehalte: resultaten van de pilotstudie

De resultaten van de pilotstudie zijn samengevat in Guasti et al. (2011). In het Grevelingenmeer zijn veel benthische foraminiferen gevonden die stresstolerant zijn of goed tegen zuurstofloosheid kunnen. Op elke onderzochte locatie is een, weliswaar dode, maar recente populatie van foraminiferen aangetroffen. De foraminiferen zijn naar verwachting in de zomer van 2010 massaal gestorven door zuurstofgebrek. Een aantal van de populaties weerspiegelen een gezonde gemeenschap die afhankelijk is van zuurstof, vergelijkbaar met de situatie in de Waddenzee (de Nooijer, 2006). Deze variatie in soorten geeft het seizoensgebonden karakter aan, maar ook de ruimtelijke variatie in zuurstofgehalte in de Grevelingen (zie Fig. 1). Dit geeft ook aan dat verdergaande anoxia zeker zal

leiden tot een vermindering van de diversiteit in de foraminiferen populatie. Er zijn ook veel gedeformeerde schelpen aangetroffen, wat ook een teken van stress is. Als deze populatie zich niet herstelt dan zal het ook voor macrofauna lastiger zijn om zich opnieuw in de Grevelingen te vestigen aangezien foraminiferen een belangrijke schakel zijn in het ecosysteem.

Het kan zijn dat door de toegenomen zuurstofstress in de zomer de volwassen exemplaren zijn overgegaan tot vegetatieve reproductie. Daarbij delen ze zich zelf op in honderden sporen die kunnen uitgroeien tot individuele foraminiferen. Op basis van de pilot studie is de verwachting dat weinig infaunale foraminiferen (foraminiferen die dieper in het sediment leven) voorkomen. Dit zou wel te verwachten zijn vanwege de lage zuurstofconcentraties. Het zou wel gerelateerd kunnen zijn aan de voedselarme condities van het Grevelingenmeer. Algemeen weerspiegelen de benthische foraminiferen duidelijk het gestreste milieu van de Grevelingen, en zijn daarmee van grote indicatorwaarde. De populatie heeft zich op sommige locaties aangepast aan de zuurstofloosheid, maar op andere, ondiepere locaties, (nog) niet. Reden hiervoor is waarschijnlijk het verschil in de duur van de zuurstofloosheid op de verschillende locaties. Verder blijkt dat lage diversiteit samenhangt met het voorkomen van anoxische bacteriële matten (*Beggiatoa*) op basis van de inventarisatie in Lengkeek et al. (2010).



Figuur 1. Verdeling van assemblages van benthische foraminiferen op een oost-west transect in het Grevelingenmeer vergeleken met de zuurstofconcentratie van het water in de zomer 2010. Legenda toont de dominante taxa. Data uit Guasti (2011).

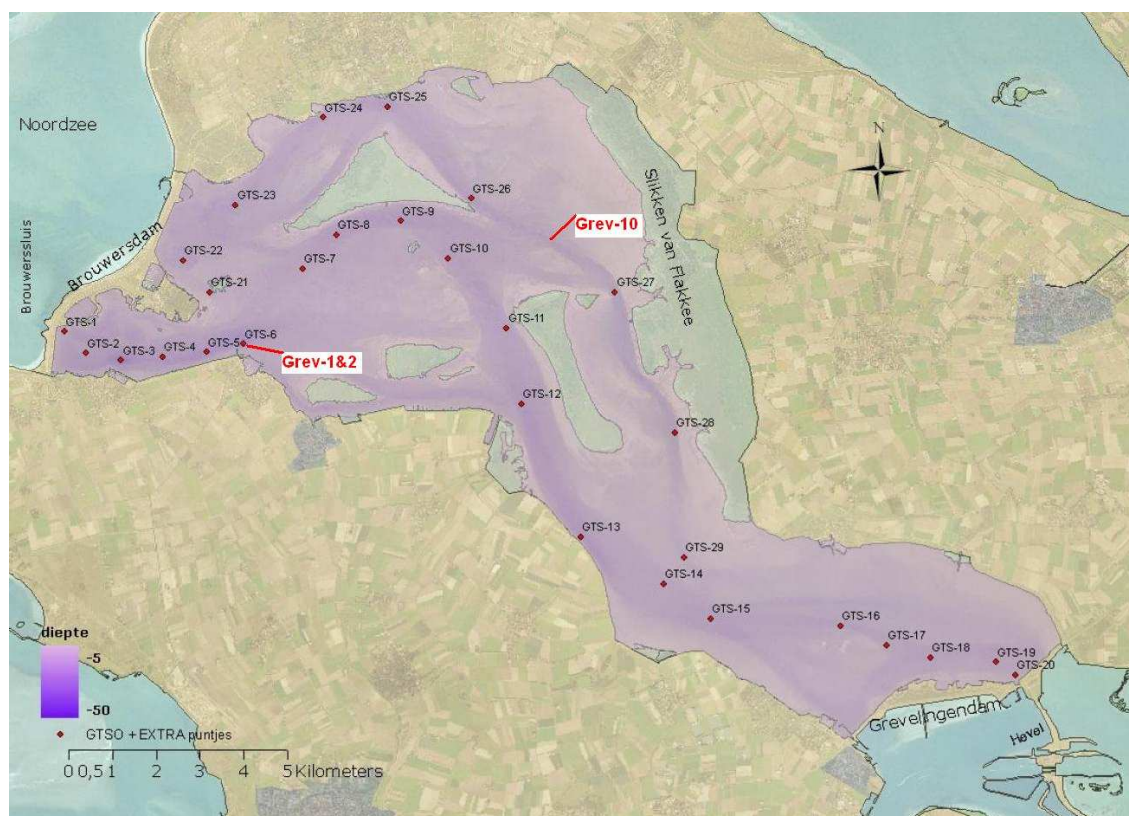
2.3 Betrokken partijen en expertise

Het project is uitgevoerd door TNO Geologische Dienst van Nederland en Rijkswaterstaat (Dienst Zeeland van Rijkswaterstaat). Beide instellingen hebben de

expertise om dit project succesvol uit te voeren. De cesiumdateringen van de sedimenten zijn uitgevoerd door de Universiteit Utrecht, departement Biologie, leerstoelgroep Paleoecologie. Verder word in consortium aanvullend onderzoek gedaan door de Universiteit Utrecht, faculteit Aardwetenschappen, naar seizoensafhankelijke veranderingen in de poriewater- en bodemchemie, en experimenteel onderzoek naar de herstelpotentie van gestreste foraminiferenpopulaties. Door de Université de Angers (Frankrijk) wordt de seizoensafhankelijke variatie van de foraminiferenpopulaties bestudeerd. De resultaten van deze onderzoeken staan *niet* in dit rapport.

Concept

3 Materialen en Methoden



Figuur 2: positie van de sedimentkernen welke zijn geanalyseerd in relatie tot de monitoringslocaties (GTS punten van Rijkswaterstaat) en waterdiepten.

3.1 Veldwerk

Op 18 mei 2011 is een viertal locaties in de Grevelingen bemonsterd (zie Tabel 1, Figuur 2) mbv een *gravity corer*. Hiermee kunnen onverstoord sedimentprofielen (max. lengte 1.20 m, diameter 6 cm) worden verzameld en direct rechtopstaand worden bemonsterd zodat geen verstoring optreedt. Maximale opbrengst was op monsterpunt 1 (GTS-6) waar een sedimentprofiel van 90 cm is verzameld. Op de andere locaties was de opbrengst beperkt door invloed van oesterbanken. Dit probleem kon deels worden opgelost door eerst een boxcore te nemen en daaruit aan dek een kern te steken.

Bemonsterde locaties	Referentie locatie	x coördinaat	y coördinaat	water diepte (m)
1	GTS-6 ("Osse")	51572	418570	30
2	Dreischor (dichtbij GTS-13)	59090	414900	16
3	GTS-"26.5"	58329	420888	13.3
4	GTS-25	54890	424000	24

Tabel 1: monsterpunten waar sedimentkernen zijn verzameld

3.2 Analyses

Tabel 2 geeft een overzicht van de sedimentprofielen welke zijn bemonsterd en onderzocht. Kernen Grev-1 en -2 zijn op basis van de diepte gecorreleerd en worden in de resultaten als één profiel weergegeven.

Datum	Lokatie	RD coördinaten	Kern	Corer	Water diepte [m]	Kern lengte [cm]	Korte beschrijving	Gehanteerde onderzoeks methoden	Opmerkingen
18-5- 2011	GTS-6	x51572 y418570	GREV- 1	GC	30	0-90	Zwarte ongeconsolideerde gyttja, sterke H ₂ S geur. Onderste monsters (80-90 cm) sterk venig met klei.	Foraminiferen (50-90 cm), pollen (0-90 cm) en 137Cs (0-90 cm)	bemonsterd met 1-cm intervallen bij TNO
18-5- 2011	GTS-6	x51572 y418570	GREV- 2	GC	30	0-45	Zwarte ongeconsolideerde gyttja, sterke H ₂ S geur	Foraminiferen (0-45 cm)	aan boord gemonsterd met 1-cm intervallen
18-5- 2011	GTS- 26.5	x58329 y420888	GREV- 10	BC	13	0-34	Zwarte ongeconsolideerde gyttja, sterke H ₂ S geur.	Foraminiferen (0-34 cm)	bemonsterd met 1-cm intervallen bij TNO

GC= gravity corer, BC= box corer

Tabel 2: sedimentkernen gebruikt voor de reconstructie.

3.2.1 Foraminiferen

Foraminiferen analyses zijn op basis van volumetrische (~28 cm³) monsters uitgevoerd. De monsters zijn gedroogd, gewogen, gewassen, gezeefd en gedroogd waarbij de fractie >125µm microscopisch is geanalyseerd. De monsters werden kwantitatief geanalyseerd en bij monsters met grote opbrengst eerst gesplitst. Per analyse zijn ten minste 200 exemplaren geïdentificeerd en geteld.

Om verder te onderzoeken of er een toenemende omgevingsdruk op de foraminiferengroei sinds de afsluiting van de Grevelingen is ontstaan werden van een aantal monsters van GST 6 twee grootte fracties geanalyseerd: 125-250 µm en >250 µm. Dit betreft een drietal monsters onderin (82, 86 en 90 cm) en bovenin (1, 5, en 40 cm) kern Grev 1. Een afwijking van bepaalde soorten tussen de beide fracties wijst mogelijk op toenemende groeistress.

In totaal zijn 26 monsters geanalyseerd van twee locaties (GTS 6 en GTS 26.5), waarbij de GTS 6 als voornaamste onderzoekslocatie wordt gebruikt en GTS 26.5 een controlelocatie is. Resultaten worden weergegeven als percentage van het totaal aantal foraminiferen, naast een indicatie van de totale opbrengst en de diversiteit (Shannon diversiteits index) per monster.

3.2.2 Cesium-137 en Lood-210 activiteit

Voor bepaling van de ouderdom van de sedimenten wordt gebruikt gemaakt van radiocesium en –lood dateringen. Radioactief cesium-137 is vrijgekomen tijdens atmosferische atoombomtesten (maximum in 1963) en het kernreactorongeluk in Tsjernobyl in 1986. De aan het sediment gemeten maxima in gamma straling afkomstig van ^{137}Cs zijn indicatief voor deze beide pieken. De concentratie radioactief lood ^{210}Pb is een directe maat voor de ouderdom van sediment aangezien er een constante flux wordt geproduceerd vanuit vervalproducten van Uranium. De halfwaardetijd van ^{210}Pb is 22.3 jaar waarmee de concentratie ^{210}Pb achtergrondwaarden bereikt na >150 jaar. Sediment is gevriesdroogd en gewogen waarna de radioactiviteit lang is gemeten als maat voor de concentratie ^{210}Pb en ^{137}Cs . Van 19 monsters (elke 5 cm) uit kern Grev-1 is de activiteit gemeten genormaliseerd voor de meettijd (3.5 tot 48 uur afhankelijk van signaal en monsterhoeveelheid, 3-7 uur voor het ^{137}Cs signaal en 14-48 uur voor het ^{210}Pb signaal) en sedimentdichtheid. Er is gebruik gemaakt van een BE3830 Canberra BeGe gamma spectrometer, gekoppeld aan een DSA-1000 digitale spectrum analyzer met een range van 3-1663 keV. Monsters zijn 4 dagen gevriesdroogd, vervolgens gehomogeniseerd en gewogen.

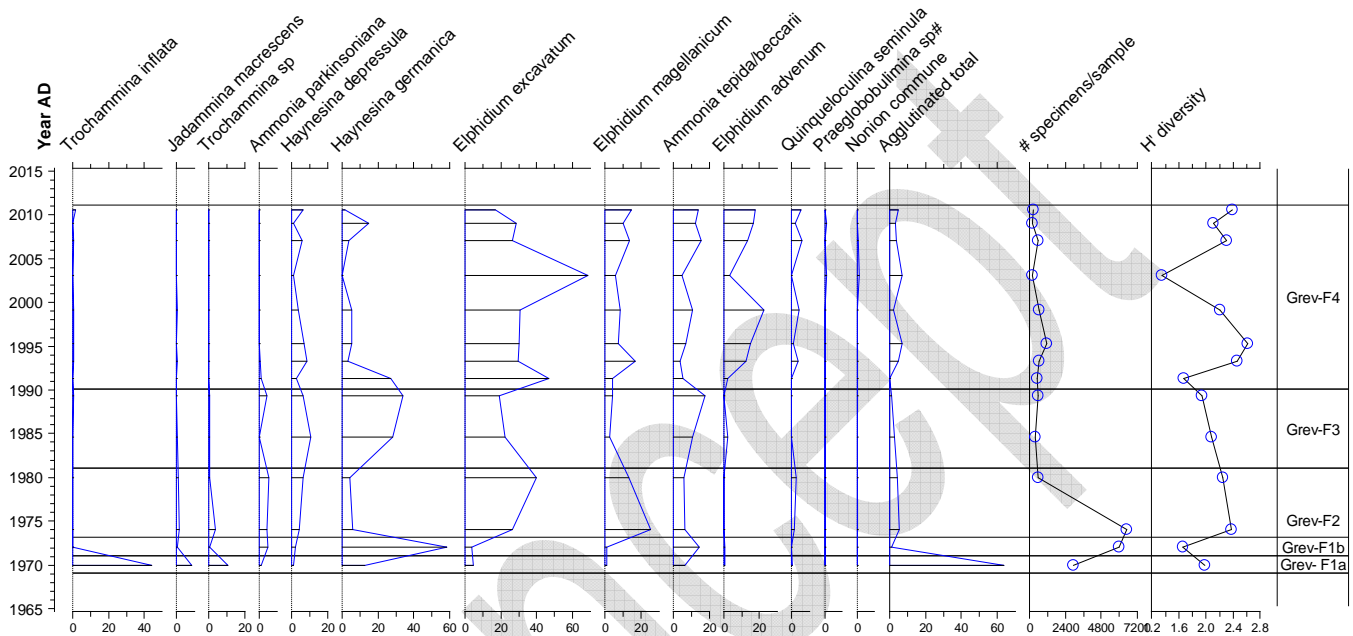
3.2.3 Pollen

Pollenanalyse mbv lichtmicroscopie levert de vegetatiesamenstelling op het moment van sedimentdepositie. Deze is gebruikt om bekende veranderingen in landgebruik (o.a. start van grootschalige maïscultivatie) te herkennen en daarmee het sediment te dateren en tevens belangrijke landschappelijke veranderingen in de omgeving te identificeren die aanleiding kunnen zijn voor veranderingen in de bodemecologie en fytoplanktensamenstellingen van de Grevelingen. Voor het palynologisch onderzoek zijn 12 deelmonsters genomen van $\sim 1\text{cm}^3$ uit kern Grev-1. De opwerking is volgens het TNO standaard protocol uitgevoerd en omvat behandeling met Natriumpyrofosfaat (15 g l-1), HCl (30%), acetolyse (9:1 ratio van $[\text{CH}_3\text{CO}]_2\text{O} : \text{H}_2\text{SO}_4$) en zware vloeistofscheiding (natriumpolywolframaat, SG 2.1 kg dm^{-3}) waarna het residu gezeefd wordt op $7\mu\text{m}$. Pollen worden geïdentificeerd en geteld en de resultaten worden uitgedrukt in procenten.

4 Resultaten

4.1 Foraminiferen onderzoek

De foraminiferen analyses leveren in alle onderzochte profielen voldoende en goed gepreserveerde associaties op. De resultaten en interpretaties van locatie GTS 6 zijn geïntegreerd weergegeven in Figuur 3. als een enkel profiel op basis van diepte correlatie tussen kernen Grev-1 en -2. Er zijn duidelijk vier zones zichtbaar in deze gecombineerde sequentie Grev-1/2.



Figuur 3: percentages van de belangrijkste foraminiferen soorten in kern Grev-1/2 afgezet tegen ouderdom en onderverdeeld in foraminiferen zones F1-F4. De afgeleide aantallen per monster en diversiteit zijn berekend op basis van de getelde split en geëxtrapoleerd voor het totale monster.

Zone Grev-F1a/b

Deze zone varieert sterk en is duidelijk anders dan de overige zones F2-F4. Het onderste monster (90cm, subzone F1a) bevat een duidelijk afwijkende samenstelling, met hoge percentages van agglutinant *Trochammina inflata* (tot 40%), *Jadammina macrescens*, *Trochammina sp.* and benthisch calcareous *Haynesina germanica* en *Ammonia tepida/beccarii*. Monster 86 (zone F1b) is een overgangssituatie met een maximum van *Haynesina germanica* (tot 58%), sterk afnemende *Trochammina* soorten en een hoge waarde van *Ammonia tepida/beccarii*. *Ammonia parkinsoniana* komt in lage frequenties voor vanaf zone F1B. In F1B, is er het verhoging van het aantal exemplaren per volume van het sediment en afname van de diversiteit. Vanaf zone F1B ontstaat een duidelijke ondiep mariene associatie.

Zone Grev-F2

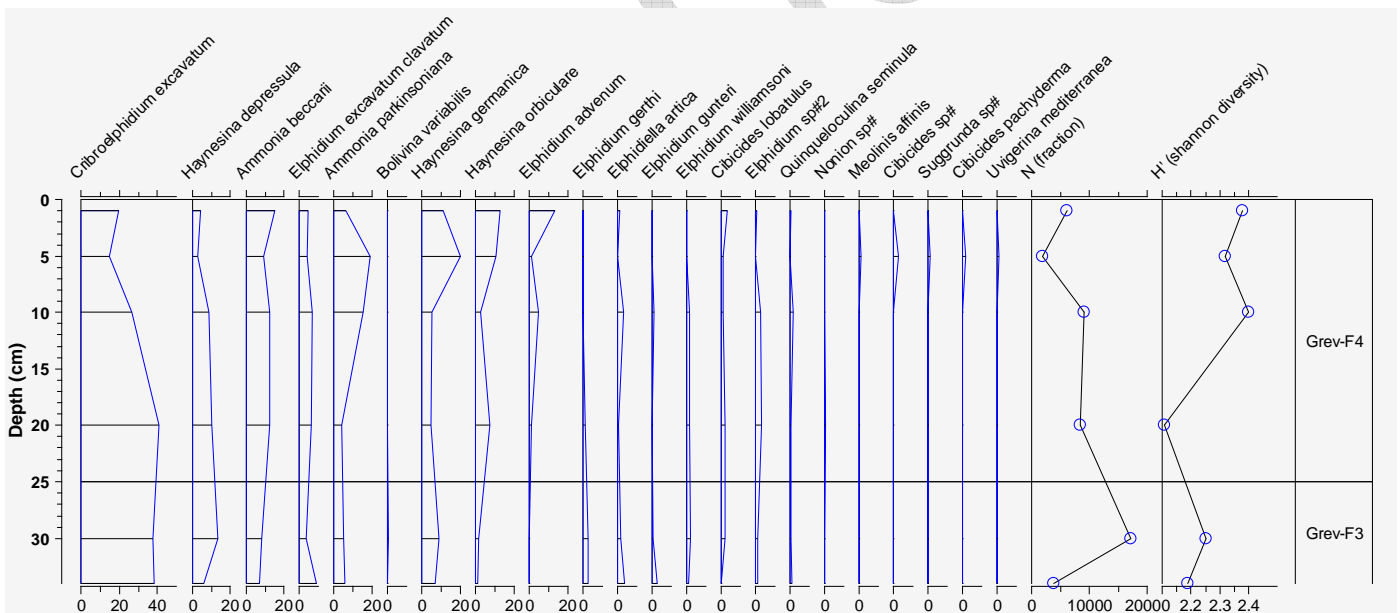
Elphidium excavatum en *E. magellanicum* bereiken hier hoge waarden van 20-30%, *Ammonia tepida/beccarii* en *A. parkinsoniana* zijn aanwezig maar niet dominant rond 5%. Geagglutineerde foraminiferen en *Haynesina germanica* zijn sterk gedaald tot ongeveer 5%. De som van *Elphidium* spp. soorten bereikt waarden tot 63%. Ook de Miliolid-groep laat een significante stijging zien. Opvallend is verder de grote daling in het aantal foraminiferen per monster (vast volume van ~28 cm³) van een maximum rond 6500 op 82 cm naar ~550 individuen rond 70 cm. De aantallen herstellen zich niet meer na deze daling. De diversiteit stijgt aan de basis van zone Grev-F2.

Zone Grev-F3

Deze zone wordt gekenmerkt door hernieuwde toename van *Haynesina germanica* en *Ammonia tepida/beccarii* vergelijkbaar met zone Grev-F1b. Het aantal individuen in de sedimenten blijven erg laag, bovendien neemt de diversiteit sterk af in het bovenste deel van deze zone.

Zone Grev-F4

De samenstelling van de associaties verandert hier duidelijk voor wat betreft de dominante taxa met hernieuwde dominantie van veel soorten van *Elphidium* (*E. excavatum*, *E. magellanicum*, *E. advenum*), *Ammonia tepida/beccarii* en *Haynesina germanica*. Verder zijn er veel taxa met een lage frequentie maar een duidelijk geclusterd consistent voorkomen in voornamelijk deze zone. Met name, in de richting van het bovenste deel van deze zone (rond 5 cm), wordt de omgeving gekenmerkt door de eerste voorkomens (in lage aantallen) van verschillende lage zuurstof-tolerante taxa zoals *Nonion commune*, *Furskenkoina* sp. en een aantal buliminiden.



Figuur 4: percentages van de belangrijkste foraminiferen soorten in kern Grev-10 afgezet tegen diepte. De afgeleide aantallen per monster en diversiteit zijn berekend op basis van de getelde split en geëxtrapoleerd voor het totale monster.

De resultaten van Grev-10 zijn weergegeven in Figuur 4 en worden, voor zover afwijkend van Grev- 1/2 bediscussieerd in §5.3. Figuur 5a en b bevatten de bovenste en onderste 3 monsters van Grev-1/2 uitgesplitst naar groottefractie.

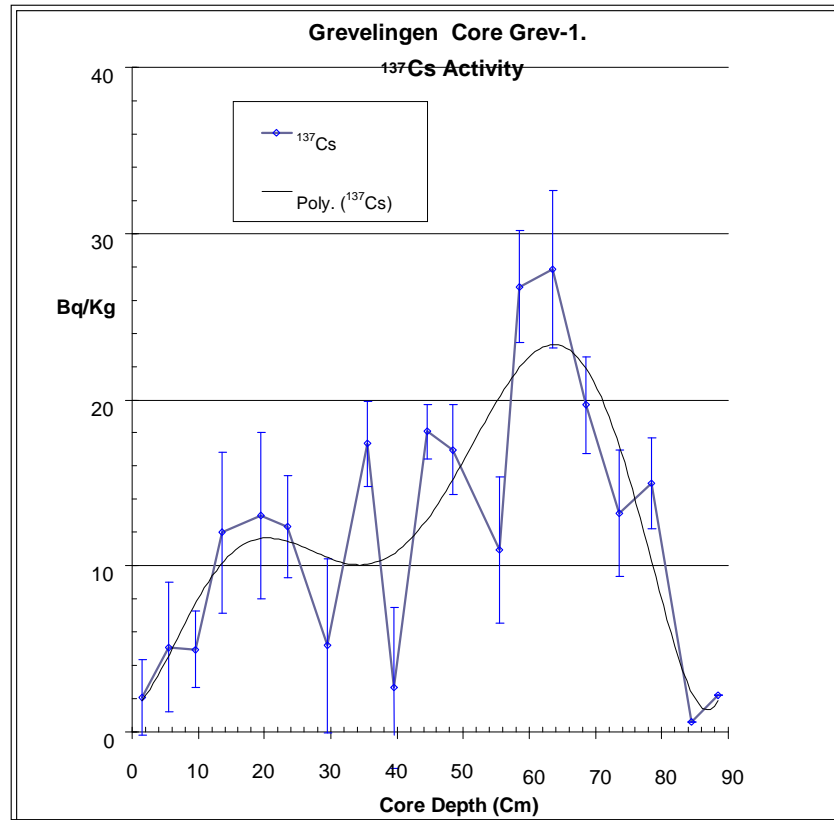


Figuur 5a (boven) en 5b (onder): Percentages van de voornaamste foraminiferen in de bovenste en onderste 3 monsters van Grev-1/2 uitgesplitst naar groottefractie. Bovenste balk per paar is steeds de fractie 125-250 μm , en het onderste de fractie >250 μm .

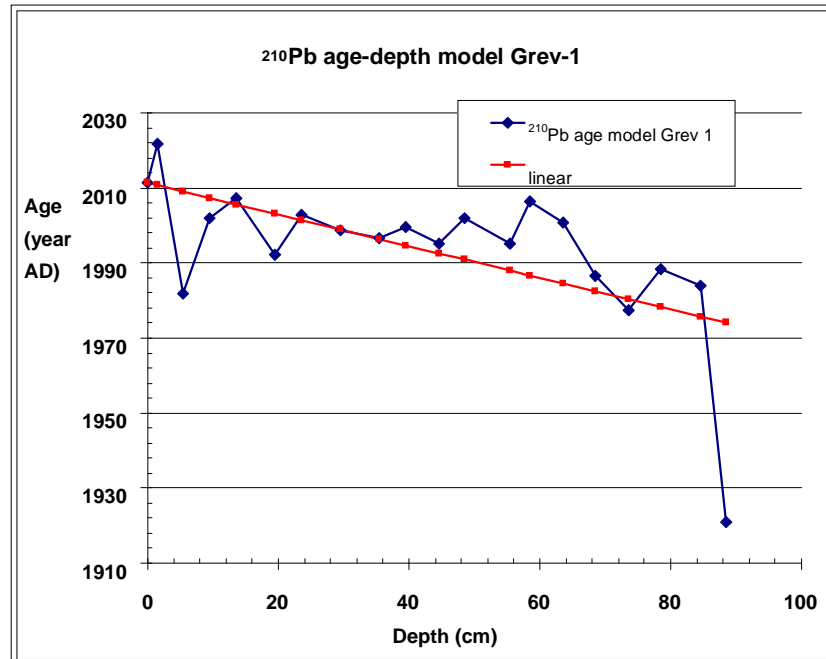
4.2 Cesium en looddateringen

Gemeten waarden voor ^{137}Cs en de concentratie ^{210}Pb uitgedrukt als sedimentouderdom staan afgebeeld in, respectievelijk, Figuur 6 en 7. Voor de berekening van de ^{210}Pb ouderdom is uitgegaan van het CRS model (*constant rate of supply*) (Appleby, 2001). ^{210}Pb komt via een gemiddeld constante influx vanuit de atmosfeer in het bekken binnen vanuit verval van ^{226}Ra ('unsupported') waarna de

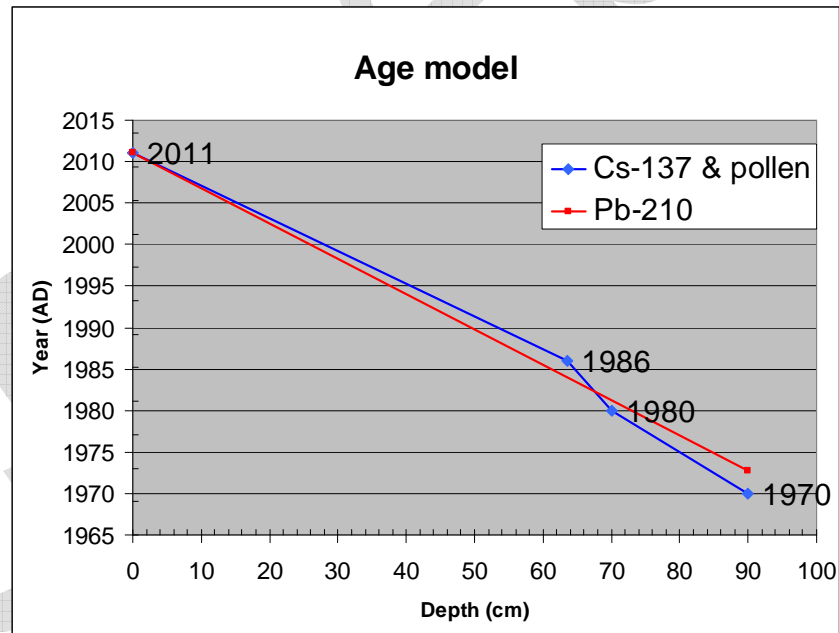
radioactiviteit met een halfwaardetijd van 22.3 jaar afneemt. De in situ geproduceerde ^{210}Pb in het sediment 'supported', evenredig aan de gemeten waarden van ^{226}Ra in het sediment, worden afgetrokken van de gemeten ^{210}Pb ('total') activiteit om zo de waarden voor de ouderdomsbepaling te verkrijgen. Op een logaritmische schaal tegen diepte zijn de 'unsupported' waarden van ^{210}Pb verondersteld lineair bij een CRS model.



Figuur 6: gemeten ^{137}Cs activiteit in kern Grev-1. Maximum zijn de aanzet tot piekwaarden van 1986 als gevolg van het kernreactor ongeluk in Tsjernobyl



Figuur 7: Sedimentouderdom op basis van ^{210}Pb verval in kern Grev-1. De lineaire interpolatie wordt gebruikt in het ouderdomsmodel.



Figuur 8: ouderdomsmodel op basis van de ^{210}Pb data (rode lijn) en ^{137}Cs (blauwe lijn) en pollendateringen. Bij de interpretatie van de monsteranalyses is gebruikgemaakt van de interpolatie van de tijd-diepte relatie volgens de blauwe lijn en de jaartallen voor, respectievelijk, de pre-afsluiting (1970), introductie maïs (1980), Tsjernobyl (1986) en top sediment (2011).

4.3 Pollenonderzoek

Tabel 3: De geanalyseerde pollenmonsters en afgeleide zones

Pollenmonsters			
Kern: Grev.1 (B42F1001)			
waterdiepte 30 m.			
top [cm]	basis	Lithologie	ZONE
2	3	zwarte gyttja	GREV 2c
10	11	zwarte gyttja	
21	22	zwarte gyttja	
30	31	zwarte gyttja	
40	40	zwarte gyttja	
47	48	zwarte gyttja	
57	58	zwarte gyttja	GREV 2b
70	71	zwarte gyttja	
79	80	zwarte gyttja	GREV 2a
83	84	kleiige gyttja	
89	90	klei met organische resten	GREV 1

Alle monsters bevatten ruim voldoende goed geconserveerde palynomorfen voor volledige analyses.

De resultaten van de pollenanalyses zijn weergegeven in de vorm van een pollendiagram (Figuur 9). In het overzichtsdigram zijn de volgende pollengroepen afgebeeld: *Trees and shrubs*, *Herbs*, *Heathland*, *Crop plants*, *Fresh water taxa* and *Salt marsh*. De som van de tot deze groepen behorende taxa is als pollensom de basis waarop de percentages van alle curven zijn berekend. Sporen van sporenplanten (varens en mossen) en mariene elementen (foramineren, dinoflagellaten) en de enige bij deze analyses getelde diatomee (*Diploneis interrupta*) maken geen deel uit van de pollensom. Hun percentages zijn eveneens berekend op grond van de pollensom.

In het pollendiagram zijn van onder naar boven twee pollenzones onderscheiden GREV 1 en GREV2 waarbij GREV 2 is verdeeld in drie subzones GREV 2a, GREV 2b en GREV 2c.

GREV 1, het spectrum op 89-90 cm

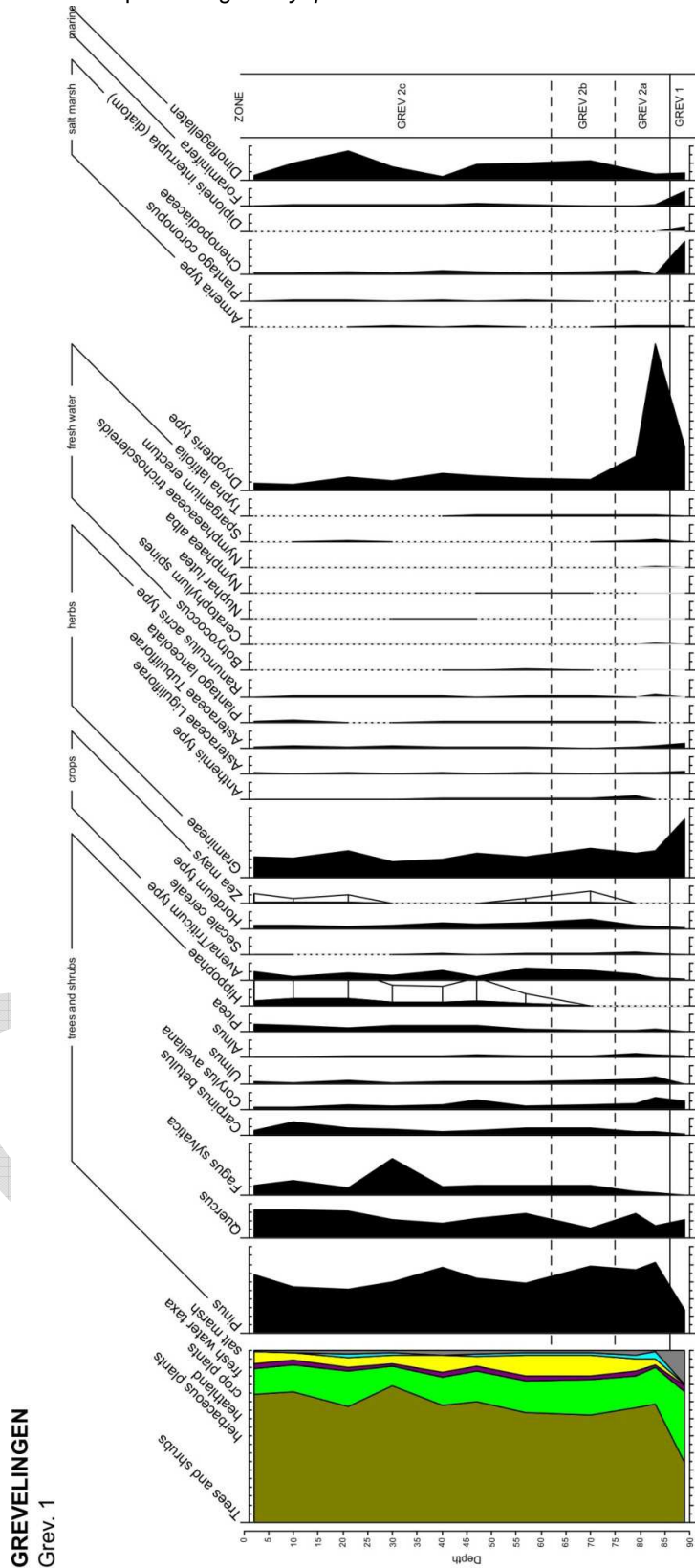
In dit spectrum zijn relatief hoge percentages aanwezig van CHENOPODIACEAE, GRAMINEAE, ASTERACEAE TUBULIFLORAE, *Dryopteris*, *Diploneis interrupta* en foraminiferen. De totale boompollensom en die van de akkerplanten is relatief laag.

De pollenassemblage van dit spectrum is sterk beïnvloed door pollen afkomstig van kweldervegetaties. De hoge percentages CHENOPODIACEAE zijn kenmerkend voor zoutminnende vegetaties (o.a. *Salicornia*, *Suaeda*, *Halimione*, *Atriplex*). De relatief hoge percentages TUBULIFLORAE zijn in deze context mogelijk afkomstig van *Aster tripolium*. De tamelijk geringe afmetingen (< 15 µ) van het grootste deel der CHENOPODIACEAE pollen wijst mogelijk op zeekraal (*Salicornia*). De in dit spectrum voorkomende diatomee *Diploneis interrupta* is eveneens een karakteristieke kweldersoort.

GREV 2a, de spectra op 83 en op 79 cm

De assemblage van deze subzone wordt gekenmerkt door extreem hoge percentages *Dryopteris* met een sterke afname van de kwelderindicatoren. De

assemblages van bomen, met toenemende percentages voor *Pinus* (den), *Fagus* (beuk), *Carpinus* (haagbeuk) en *Picea* (fijnspar) en die van akkers nemen toe in percentages t.o.v. de vorige zone.



GREV 2b, het spectrum op 70 cm

In deze zone zijn de eerste pollenkorrels van maïs aangetroffen. Dit wijst op een datering van rond 1975-1980. Vanaf dit moment is landelijk de aanplant van maïs sterk toegenomen (bron: Centraal Bureau van de Statistiek).

GREV 2c, de spectra van 57 tot en met 2 cm

In deze zone begint de curve van *Hippophaë* (duindoorn) die in de loop van deze zone voorkomt in toenemende percentages.

Figuur 9: Percentages organische microfossielen (voornamelijk pollen) uit kern Grev-1 afgezet tegen diepte en ingedeeld in 4 (sub)zones die de ontwikkeling van schorren naar een open marien systeem weergeven.

GREVELINGEN
Grev. 1

5 Interpretatie en discussie

5.1 ouderdomsbepaling

Resultaten van de ^{137}Cs bepaling in Figuur 6 laten zien dat de piekwaarden, verondersteld meer dan 100 Bq kg^{-1} (Appleby, 2001), niet bereikt zijn maar er wel een duidelijk aanzet tot een piek is gemeten tussen 60 en 65 cm. De combinatie met het eerste voorkomen van maïspollen rond 1980 wijst erop dat de 1986 piek tgv het Tsjernobyl reactorongeluk zeer waarschijnlijk rond 63 cm zit. De ^{210}Pb curve (Figuur 7) laat significante variatie zien en een lineaire regressie door de data levert dan ook slechts een benadering van de sedimentatiesnelheid op. Het onderste datapunt is duidelijk significant ouder en wordt verondersteld sediment van vóór de afsluiting te zijn met mogelijke bijmenging van oudere (veen) resten (zie §4.3). Ondanks de hoge variatie in de ^{210}Pb curve is de gereconstrueerde sedimentatiesnelheid van $2.35 \text{ cm jaar}^{-1}$ in zeer goede overeenstemming met de pollen en ^{137}Cs gegevens (zie Figuur 8). Met een veronderstelde basis van het sedimentprofiel van maximaal AD 1970 zijn de pollen en ^{137}Cs gegevens, afgezet tegen de diepte, lineair geïnterpoleerd en gebruikt om de ouderdom van de individuele monsters in kern Grev-1 te bepalen.

5.2 vegetatieveranderingen

De hoge percentages *Dryopteris* (voor het overgrote deel afkomstig van *Thelypteris palustris* de moerasvaren) in pollenzone Grev 1 wijst, in combinatie met de hoge GRAMINEAE percentages, op de aanwezigheid van moerasvarenrietlanden (THELYPTERIDO-PHRAGMITETUM) langs zoetwaterplassen in de aangrenzende gebieden. Dit is mogelijk een signaal dat afkomstig is van ingespoeld veenmateriaal aangezien lokale voorkomens van *Thelypteris palustris* niet bekend zijn in Zeeland (pers. med. Drs. Wim van Wijngaarden, botanicus Provincie Zeeland). Andere aanwijzingen voor ingespoeld veen zijn er echter niet, dus de definitieve herkomst van dit materiaal is niet volledig duidelijk.

De aanwezigheid van relatief grote hoeveelheden strengen van organisch materiaal aan de basis van de opvulling kan samenhangen met de explosie van zeegras (*Zostera*) die optrad na de afsluiting van de Grevelingen (Weeda 1985a). Deze soort is palynologisch niet aantoonbaar aangezien het pollen van zeegras geen fossiliseerbare pollenwand bezit. Het is wel waarschijnlijk dat zaden van deze soort in de basale monsters aanwezig zijn. De kweldervegetaties kwamen grootschalig (honderden hectares) voor op de slikken van Flakkee en die van Bommeneede (mondelijke communicatie Drs. Wim van Wijngaarden, Bioloog Provincie Zeeland) en op de in de Grevelingen gelegen platen zoals de hompelvoet en de vlak bij Grev-1/2 gelegen platen 'Dwars in de weg' en de 'Stampersplaat'. De vegetatie in deze zone komt goed overeen met het beeld uit het foraminiferenonderzoek en wijst op een regelmatig overstromend kweldergebied met duidelijke dynamiek zoals te verwachten is in een situatie waarbij de Grevelingen in open verbinding stond met de zee.

De samenstelling van de spectra van 87 cm (begin zone 2) is duidelijk veel regionaler van karakter en wijst, met de voorkomens van mariene dinoflagellaten,

op een hoger waterspiegel in een relatief groot bekken. De relatief hoge *Pinus* percentages vanaf pollenzone 2 zijn een weerspiegeling van de grootschalige dennenplantages op de hogere zandgronden in het westen van Noord-Brabant. Dennen worden gekenmerkt door een grote pollenproductie en zeer goede verspreidingscapaciteiten. Dit betekent dat pollen van dennen op grote afstanden in grote hoeveelheden zijn terug te vinden.

Ook in pollenzone Grev 2a is het aangetroffen *Dryopteris* type voor het grootste deel afkomstig van moerasvarens (*Thelypteris palustris*). De sterke toename van deze soort vlak na afsluiting is niet eenduidig te interpreteren. Mogelijk geven waarnemingen van vegetatieveranderingen in deze periode hierover aanvullende verklaringen. Moerasvaren komt buiten de veengebieden ook voor in natte duinvalleien. (Weeda et al. 1985b). Inspoeling uit veenlagen uit de ondiepe ondergrond kan ook hier zeker niet worden uitgesloten. De sterke piek in de foraminiferenpopulatie op dit niveau van *Heynesina germanica*, karakteristiek voor overgangsmilieu nabij zoutmoerassen/kwelders, past goed in dit beeld.

De toename van *Hippohaë* in pollenzone Grev 2c is te relateren aan het wegvallen van de eb en vloed dynamiek in de Grevelingen. Na de afsluiting zijn grote delen van de aangrenzende landschappen (platen en slikken) verruigt waarbij duindoornstruwelen zich sterk konden uitbreiden.

5.3 reconstructie van de bodemcondities

De ecologische interpretatie van deze verandering is gebaseerd op informatie uit Murray (2006), de Nooijer (2006), Langezaal (2003) en Barmawidjaja et al. (1995) en is samengevat in Tabel 4:

Zone	Interpretatie belangrijkste taxa	Afgeleide condities in de Grevelingen
Grev-F1a (max. 1970)	<i>Trochammia inflata</i> , <i>Jadammina macrescens</i> : kwelder soorten, hoge dynamiek.	Schorren, dynamisch getijdenmilieu van vóór de afsluiting van de Brouwersdam
Grev-F1b (~1972)	<i>Haynesina germanica</i> : transitie getijden gebied, extreem euryhaline soort, reageert op hoge input van organische stoffen, zoals fytoplankton bloei, tolerant voor brede milieufacties. <i>Ammonia tepida</i> : stress tolerante soort, generalist. Opportunistische soort en bloeit vooral in ondiepe, zoute tot brakke omgevingen. Beide taxa typisch voor hoge organische C input.	Meest waarschijnlijk vlak na de afsluiting van de Brouwersdam. Transitie situatie met stijgende waterstand, deels ingespoeld materiaal (veen) en sterk veranderende omstandigheden. Populatie (aantallen) van bodemleven is nog hoog en zelfs toenemend.
Grev-F2 1972-	<i>Elphidium excavatum</i> : hoge dynamiek & hoge C _{org} input.	De ondiep mariene condities blijven bestaan. De assemblage wordt

1982)	een opportunistisch soort tolerant voor antropogene milieuverstoreningen, hier mogelijk indicatief voor verontreiniging. Ook indicatief voor meer brakwater condities. Miliolid-groep: hoge zout tolerantie	gekenmerkt door de toename van kalkhoudende foraminiferen (<i>Elphidium</i> spp. en <i>Ammonia</i> spp.). Indicaties voor grotere variatie in saliniteit (euryhalien). Hoge diversiteit en aantallen foraminiferen onderin de zone gaat scherp dalen naar boven toe vanwege toenemende zuurstofstress (vermindering draagkracht).
Grev-F3 (1982-1990)	<i>Haynesina germanica</i> : transitie getijden gebied, extreem euryhaline soort reageert op hoge input van organische stoffen, zoals fytoplankton bloei, tolerant voor brede milieucondities	Enigszins meer dynamische condities, waarschijnlijk gerelateerd aan herintroductie van beperkt getij in 1978, maar geen verbetering van aantallen en diversiteit. Mogelijk ook relatie met verdwijnen van zeegras uit het gebied
Grev-F4 (1990-2011)	Stijging <i>Elphidium advenum</i> . Eerste voorkomens van <i>Furskenkoina</i> sp, <i>Nonion commune</i> , Buliminiden: soorten levend in het sediment welke periodes van volledig zuurstofloze condities kunnen overleven, tolerantie tegen lage zuurstof condities gedurende het hele jaar.	Onderin de zone een kortdurende stijging van de aantallen foraminiferen. Rond 2004 hernieuwde daling van aantallen en diversiteit en duidelijke verslechtering van de bodem-water condities in de richting van hypoxie.

Tabel 4: samenvatting van de resultaten en interpretatie van de bodemcondities in Grev-1/2 op basis van het foraminiferenonderzoek.

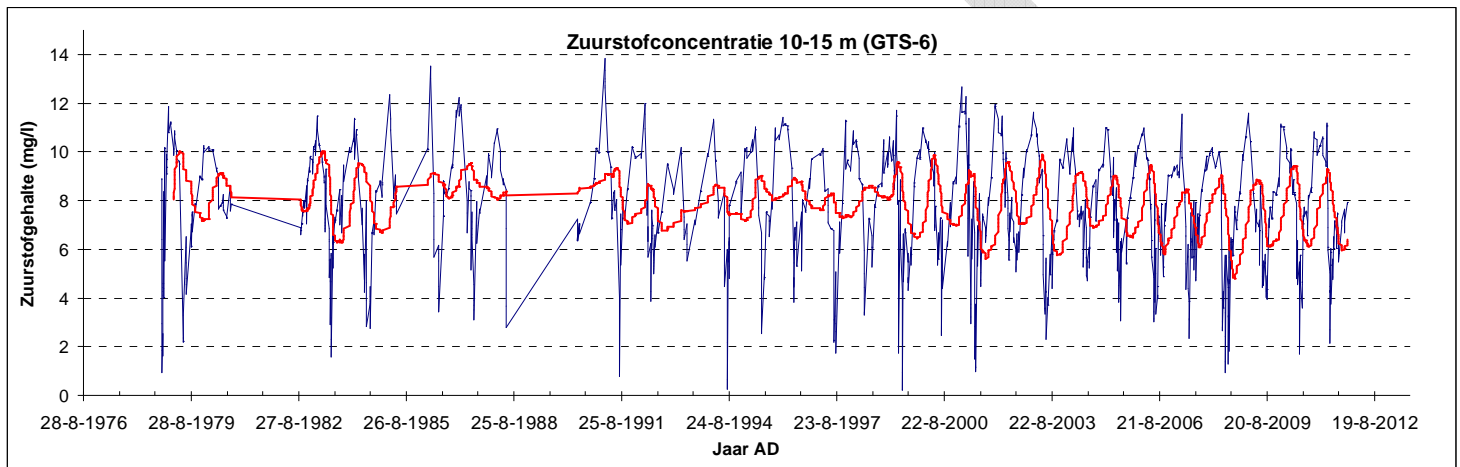
Inventarisatie van de soortenverdeling binnen verschillende groottefracties (125-250µm en >250 µm) in de bovenste en onderste 3 monsters van het profiel (Figuur 5ab) laat geen bijzondere afwijkingen zien, wat aangeeft dat de populatie evenwichtig verdeeld is over de beide fracties en er geen verschuiving is naar de kleinere fracties binnen bepaalde soorten die kunnen wijzen op bijzondere groeistress in de meest recente monsters. Ook geeft berekening van de verschillende grootte fracties op te totale samenstelling geen afwijkende verhouding tussen de monsters. Er is dus geen groter aandeel van kleinere individuen in verschillende delen van de kern. Opvallend is ook dat tekenen van groeistress door afwijkende morfologie die waargenomen waren in de pilotstudie van oppervlakesedimenten (Guasti, 2011) niet voorkomen in de kernmonsters, wat wijst op een heel recent effect of een zeer recente verslechtering van de zuurstofcondities.

Vergelijking met Grev-10: regionale beeld van de veranderingen

De beperkte lengte van profiel Grev-1 (34 cm) houdt in dat niet de volledige sequentie vanaf de afsluiting van de Brouwersdam is gerepresenteerd. Op basis van de sedimentatiesnelheid bij locatie GTS 6 bevat het minimaal de afgelopen 15 jaar, hetgeen overeenkomt met zone F4 in Grev-1/2. Dus alleen het bovenste

deel is vertegenwoordigd. De analyse van kern Grev-10 levert een beeld op dat vergelijkbaar is met Grev-1/2 qua soortensamenstelling.

Ammonia spp., *Elphidium* spp. en *Haynesina* spp. zijn dominant samen met een aantal soorten die voorkomen in lagere percentages. Op basis van de stijgende curve van *Elphidium advenum* is het zeer waarschijnlijk dat Grev-10 de top van zone Grev-F3 en zone Grev-F4 bevat. Het aantal soorten in het sediment is vrij hoog en de aantallen individuen per monster zijn een factor 10 hoger, alhoewel ook hier een dalende trend zichtbaar is. Heel opvallend is het optreden van *Nonion* en buliminiden in het bovenste deel, hetgeen lagere zuurstofgehalte in de richting van de top suggereert. De veranderingen en indicaties voor zuurstofloosheid zijn duidelijk minder sterk dan in Grev-1/2, wat overeenkomt met de ondiepere positie. De dalende trend en eerste indicaties voor periodes van volledige anoxia op basis van voorkomen van *Nonion* sp. en buliminiden zijn echter wel aanwezig en zijn indicatief voor de recente uitbreiding van de problemen.



Figuur 10: metingen van zuurstofgehalten op GTS-6 tussen 10-15 meter vanaf 1978 op 2 wekelijkse tot maandelijks resolutie. De rode curve is een 50 punts gemiddelde die de seizoensgebonden cyclus laat zien. Data is afkomstig van de meetinformatiedienst van Directie Zeeland.

Vergelijking van de gegevens uit de sedimenten met de historische reeks van waterkwaliteitsmetingen in Figuur 10 bevestigt het beeld van oplopende zuurstofloosheid in het bekken gedurende de afgelopen >30 jaar. Metingen van direct na de afsluiting zijn niet beschikbaar, maar een grotendeels continue meetreeks loopt vanaf 1978 tot heden. Hierin is zichtbaar dat vooral in het gevoelige bereik tussen 10 en 15 m een dalende trend is te zien in de zuurstofconcentraties. Ook de minima worden langduriger en dieper. Deze trend heeft in de ondiepe locatie Grev-10 (waterdiepte 13 m) geleid tot de eerste tekenen van hypoxia en wijst erop dat een significante uitbreiding van het probleem, de zuurstofloosheid in de geulen, zich verspreidt richting de ondiepe delen van de Grevelingen. Aan de ineenstorting van de populatie in zone Grev-F2 in de reconstructie is te zien dat dit proces snel kan gaan (binnen ~5 jaar) zodra een drempelwaarde is overschreden. Negatieve extremen in de waterkolom tussen 10-15 m zitten rond 2 mg/l wat dichtbij anoxische condities is.

Naast het zeer beperkte getij is ook de significante sedimentaccumulatie sinds de afsluiting een oorzaak voor de zuurstof depletie. Onder zuurstofloze condities komt fosfor vrij uit het organisch rijk sediment (Slomp en van Raaphorst, 1993) hetgeen de primaire productie en daarmee het zuurstofgebruik in de waterkolom stimuleert en de anoxia in stand houdt. Voortgaande sediment accumulatie verergert daarmee het gebrek aan zuurstof ook in de ondiepere delen van het bekken ook bij gelijkblijvende getijdynamiek. Herintroductie van significant getij in het systeem is naar verwachting een effectief middel om het organische sedimentatiepakket te oxideren en af te voeren (C. Slomp, Universiteit Utrecht pers. med.). Een kwantitatieve uitspraak over de mate van getij in relatie tot het opgebouwde sedimentpakket moet echter gebeuren op basis van een geochemische modelstudie.

Concept

6 Conclusies en aanbevelingen

- Foraminiferen zijn goede indicatoren van de recente ecologische veranderingen in het bodemmilieu van de Grevelingen: de soortensamenstelling en populatie reageert snel en gevoelig op veranderingen in het bekken.
- Pollenanalyses geven goede aanwijzingen voor de ouderdom en het lokale afzettingsmilieu van de recente sedimenten in de Grevelingen.
- De sedimentatiesnelheid in de onderzochte locaties van de Grevelingen is ongeveer 2 cm/jaar sinds de plaatsing van de Brouwersdam. De basis van de aangeboorde sequentie dateert van voor de afsluiting van de Grevelingen en de analyses wijzen op een sterk dynamisch schorrenmilieu op de aangrenzende kwelders.
- Vanaf het moment van de afsluiting van de Grevelingen hebben er snelle veranderingen in het milieu plaatsgevonden:
 - Stijging van het waterniveau door plaatsing van de dam heeft lokaal de condities doen veranderen van een schorren gebied naar een ondiepe marien milieu.
 - Verminderde dynamiek heeft de kustvegetatie en de samenstelling van de benthische foraminiferen sterk beïnvloed.
- De veranderingen in het bodemmilieu zijn duidelijk verslechterd sinds de afsluiting van de Grevelingen en de negatieve trend duurt voort *tot op heden*. De veranderingen kunnen worden gerelateerd aan de menselijke impact (sluiting van het systeem in 1971, en beperkte herintroductie van getij in 1978).
- Verminderde zuurstof condities hebben geleid tot verminderde draagkracht in de Grevelingen van het bodemleven, wat zich uit in sterk verminderde aantallen en lagere diversiteit van de foraminiferenpopulaties vanaf ongeveer 1975.
- De milieuverslechtering is op basis van vergelijking van de signalen op beide boorlocaties zeer waarschijnlijk over het gehele bekken aanwezig. Alhoewel de trend vergelijkbaar is zijn de condities in de ondiepe locaties buiten de geulen nog redelijk goed.
- Misvormde foraminiferen komen vrijwel alleen voor in de oppervlakesedimenten wat, naast de anoxia-tolerante soorten in de top van de kern, wijst op groeistress en een zeer recente verslechtering van de bodemcondities.
- De onderste mariene zone (Grev-F2) is met hoge diversiteit en aantallen foraminiferen een goede referentie- en streefwaarde in verband met herintroductie van getij.
- De organische rijke sedimenten houden zeer waarschijnlijk voor een belangrijk deel de anoxische condities in stand, en vooral in de ondiepere delen kan dit het probleem op korte termijn verergeren doordat de accumulatie toeneemt en meer zuurstof wordt opgebruikt, hetgeen tot uiting komt in de eerste gedocumenteerde aanwezigheid gedurende de laatste ~5 jaar van anoxia-tolerante foraminiferen in kern Grev-10 (tussen GTS 26 en 27).
- Een geochemische modelstudie gericht op het kwantificeren van de anoxia door de sedimentaccumulatie is aan te bevelen om de juiste mate van getij die wenselijk is in dit systeem te bepalen.
- Foraminiferen kunnen verder een rol spelen in het monitoren van (veranderingen in) het bodemleven na eventuele veranderingen in het getijregime, en voor het waken over verdere snelle verslechtingen in de ondiepere delen van de Grevelingen.

7 Referenties

- Appleby, 2001 Chronostratigraphic techniques in recent sediments, p. 171-204. *In*: tracking environmental change using lake sediments, volume 1: basin analysis, coring and chronological techniques. Editors: Last, W.M, en Smol, J.P., 548 pp.
- Barmawidjaja, D.M., van der Zwaan, G.J., Jorissen, F.J. & Puškaric S. 1995. 150 years eutrophication in the northern Adriatic Sea: Evidence from a benthic foraminiferal record. *Marine Geology*, 122, 367-384.
- De Nooijer, L.J. 2006. Shallow water benthic foraminifera as proxy for natural versus human-induced environmental change. *Geologica Ultrajectina*, 137, 152pp (PhD thesis).
- Guasti, E. Langezaal, S. en Koolen-Eekhout, (2011). Foraminiferen in de Grevelingenmeer: potentiële indicatoren voor herstel van de bodemecologie. TNO – 060 – UT 2011-00204/A.
- Langezaal, A. M. 2003. The foraminiferal - bacterial connection: an interdisciplinary study of meiofaunal behaviour in the deeper marine redox zone *Geologica Ultrajectina*. (PhD thesis).
- Lengkeek, W., Bouma, S. en van den Boogaard, B. 2010. De verspreiding van witte bacteriematten en schade van het bodemleven in het Grevelingenmeer: onderzoek van de effecten van zuurstoofloosheid. Rapport Bureau Waardenburg bv., 54 pp.
- Murray, J.W. *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press, 440 pp.
- Risgaard-Petersen, N., Langezaal, A.M. and 11 co-authors (2006) Evidence for complete denitrification in a benthic foraminifer. *Nature* 443: 93-96.
- Slomp, C.P., W. van Raaphorst. 1993. Phosphate adsorption in oxidized marine sediments. *Chemical Geology* 107, 477-480

Concept

8 Ondertekening

Utrecht, december 2011

Placeholder

Aukje Hassoldt
Afdelingshoofd

Timme Donders
Auteur

Concept