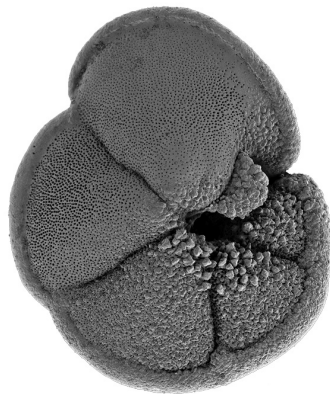


Samenvatting



Planktonische foraminiferen

Tijdens deze studie heb ik planktonische foraminiferen gebruikt als indicatoren, zogeheten proxies, van klimaats- en milieuveranderingen in de Zuidoost Atlantische Oceaan gedurende de laatste miljoen jaar. Maar wat zijn nu eigenlijk planktonische foraminiferen?

Planktonische foraminiferen zijn eencellige organismen die in het bovenste gedeelte van de oceanische wateren zweven. Ze hebben een uitwendig kalkskeletje (schaaltje) dat voor iedere soort anders is. Een dergelijk skeletje bestaat uit verschillende kamertjes en is ongeveer 0,1 tot 5 mm groot. Platen 1.1 en 1.2 laten de foto's van de belangrijkste soorten in dit proefschrift zien. De foraminiferen-skeletjes dragen in grote mate bij tot de vorming van diepzeesedimenten (Berger, 1970). Na hun dood zinken veel van de skeletjes naar de zeebodem. Zestig procent van de gesteenten wereldwijd, voor zover afgezet in een mariene omgeving, bevatten foraminiferen-skeletjes.

Vanouds is het soortconcept gebaseerd op de vorm, de morfologie, van de kalkskeletjes welke een grote verscheidenheid vertonen. Tegenwoordig kennen we ongeveer 40 soorten (Hemleben et al., 1989). Studies naar de genetische samenstelling tonen aan dat soorten met gelijkvormige skeletjes uit genetisch verschillende soorten, genotypes, kunnen bestaan. Deze genotypes hebben mogelijk ieder een eigen verspreiding en leefmilieu (Darling en Wade, 2008). Ofschoon het moeilijk is om onder de microscoop de verschillende verschijningsvormen gerelateerd aan een specifiek genotype te identificeren, is de kennis van hun bestaan van belang om de veranderingen in aantallen van planktonische foraminiferen in de (geologische) tijd en plaats te kunnen verklaren.

Geschiedenis van het foraminiferen onderzoek

Mensen worden al sinds het eind van de 18^e eeuw gefascineerd door de minuscule kleine foraminiferen. Linnaeus beschreef 15 soorten foraminiferen in zijn boek "Systema Naturae" (1766). D'Orbigny, ook wel de grondlegger van de micropaleontologie genoemd, publiceerde de eerste indeling, classificatie, van foraminiferen (1826): "Tableau methodique de la classe des Cephalopodes", welke vele malen gewijzigd is sindsdien. Dujardin (1835) toonde aan dat foraminiferen eencellige organismen zijn en geen cephalopoden, inktvisachtigen; hij deelde ze in in het phylum der Protozoa (oerdiertjes). In 1884, publiceerde Brady het meest belangrijke werk op het gebied van foraminiferen: "Report on the Foraminifera dredged by H.M.S. Challenger during the Years 1873-1876". Gedurende de jaren zestig van de vorige eeuw begonnen de oliemaatschappijen de mogelijkheden

van planktonische foraminiferen op het gebied van biostratigrafie (rangschikking van aardlagen met behulp van organismen) op te merken.

Ecologie

Planktonische foraminiferen vindt men in diverse mariene milieus; van ondiep tot diepzee en van de tropen tot in polaire streken. De diverse soorten foraminiferen komen onder specifieke milieumomstandigheden. Dit maakt hun skeletjes tot ideale indicatoren van milieumomstandigheden en verspreidingsgebieden in het verleden. Planktonische foraminiferen zijn de meeste gebruikte groep microfossielen om oppervlaktewater omstandigheden in de zee en daarmee de geschiedenis van zeestromingen in het verleden te reconstrueren. Iedere soort is aangepast aan zijn voorkeursmilieu zoals diepte, temperatuur en voedselaanbod. Gebaseerd op de temperatuursvoorkeuren kunnen soorten-samenstelling van foraminiferen onderverdeeld worden in 5 provincies: polair, subpolair, overgang, subtropisch en tropisch (Bé en Tolderlund, 1971). De geografische grenzen van deze provincies ziet men terug in de sedimenten op de zeebodem.

De classificatie van planktonische foraminiferen maakt een onderscheid tussen zogeheten spinose (met kalkstekels) en niet-spinose (zonder kalkstekels) soorten. Het spinose karakter van sommige foraminiferen is goed te zien in het genus *Globigerinoides* (Figuur 1.1). Niet-spinose soorten hebben een herbivoor dieet (plantaardig voedsel) of zijn detritus-eters. Spinose soorten kunnen ook grotere, bewegende prooien zoals copepoden (roei-pootkreeftjes) vangen (Spindler, 1984). De meeste spinose soorten herbergen symbionten (zoals kleine alges) temidden van hun kalkstekels. De meeste niet-spinose planktonische foraminiferen hebben geen symbionten. Door hun symbiontische levenswijze is het leefmilieu van bijna alle spinose planktonische foraminiferen beperkt tot de fotische zone van de waterkolom, de diepte waartot zonlicht in het oceaanwater nog doordringt.

Het verzamelen van hedendaagse levende foraminiferen 'gemeenschappen' in de waterkolom is van groot belang om ons begrip te verbeteren van oceanografische en biologische factoren, welke hun verspreiding bepalen, alsmede voor een nauwkeuriger reconstructie van milieumomstandigheden in het verleden zoals vastgelegd in oude zeebodemplagen. Hun wereldwijde verspreiding, evolutie en gevoeligheid voor milieumomstandigheden sinds de Jura-tijd (ongeveer 150 miljoen jaar geleden) zorgen ervoor dat planktonische foraminiferen-skeletjes een goed hulpmiddel zijn om de opeenvolging van aardlagen (biostratigrafie) vast te stellen en een belangrijke bron van gegevens in de paleoceanografie, de kennis van de oceanen uit het verleden.

Zuurstof isotopen en aansturing van het klimaat

Naast het gebruik van soorten verspreiding in milieureconstructies van het verleden, verschaft de chemische samenstelling van de kalkskeletjes ook informatie over de watercondities waarin ze groeiden. De stabiele zuurstof isotopen verhoudingen in de kalkskeletjes bijvoorbeeld zijn afhankelijk van een aantal milieufactoren zoals temperatuur en zoutgehalte. De zuurstof isotopen verhouding, $\delta^{18}\text{O}$, is gedefinieerd als de verhouding tussen het meest voorkomende isotoop ^{16}O en de zwaardere ^{18}O . Deze isotopen hebben iets verschillende fysische eigenschappen. Het lichtere isotoop, ^{16}O , verdampt als eerste uit het zeewater en regent uit op de continenten. Dit betekent dat de polaire ijskappen en het smeltwater daarvan relatief meer ^{16}O zullen bevatten. Zuurstof isotopen tijdseries worden veelal gebruikt om veranderingen in de omvang van ijskappen en zeewatertemperatuur in de tijd te reconstrueren. De afwisseling van warme en koude periodes in de klimaatsgeschiedenis van de Aarde zoals afgeleid kan worden uit de zuurstof isotopen gegevens worden aangeduid als mariene isotopen stadia ('marine isotope stage'; MIS). Ijstijden, glaciële perioden, worden aangeduid met even nummers en tussenijstijden, interglaciële perioden, met oneven nummers.

De cycliciteit in de zuurstofisotopen tijdseries en het klimaat wordt geacht aangestuurd te worden door variaties in zonne-instraling. Instraling (insolatie) is afhankelijk van de vorm van de baan van de Aarde om de zon (Figuur 1.2). Deze cycli hebben een periodiciteit van 400.000 en 100.000 jaar (excentriciteit), 41.000 jaar (obliquiteit of tilt), 23.000 en 19.000 jaar (precessie) (Berger, 1978). Excentriciteit beschrijft de ellipsvormigheid van de baan van de Aarde om de zon. Binnen deze ellipsbaan wordt het moment waarop de Aarde het verst van de zon af staat aphelion genoemd, het moment waarop de Aarde het dichtst bij de zon staat heet perihelion. Precessie is de verschuiving van de seizoenen ten opzichte van de baan van de Aarde; indien bijvoorbeeld het perihelion in Juni optreedt, een precessie minimum, dan is de zomer op het noordelijk halfrond warmer dan gemiddeld. Obliquiteit of tilt is de kanteling van de aardas ten opzichte van de baan van de Aarde. Periodes met maximale kanteling resulteren in grote verschillen tussen de seizoenen op beide halfronden.

Terwijl de variatie in insolatie niet enorm veranderde, verslechterde het lange termijn klimaat zich tijdens het laat Kenozoïcum; zo rond 650.000 jaar geleden verschijnen de 100.000 jaar cycli, de ijstijdencyclus, in de zuurstofisotopen tijdseries (Figuur 1.3). De Mid Pleistocene Overgang is de naam van de periode gedurende wanneer de belangrijkste periodiciteit van de glaciële-interglaciële cycli veranderen van symmetrische, lage amplitude, hoog frequente (41.000 jaar) ijsvolumeveranderingen naar asymmetrische, hoge amplitude, laag frequente

(100.000 jaar) ijsvolumeveranderingen gekenmerkt door een zaagtandpatroon (Durham et al., 2001). De verslechtering van het klimaat in de tijd resulteerde in de groei van ijskappen op het noordelijk halfrond sinds ongeveer 2,6 miljoen jaar geleden en werd gevolgd door een puls in ijsgroei tussen 1,2 en 0,9 miljoen jaar geleden (Berger en Jansen, 1994; Clark et al., 2006). Intussen is er geen overeenstemming over de tijdsduur en tijdstip van de Mid Pleistocene Overgang. Het begin van de Mid Pleistocene Overgang wordt geacht te zijn gestart omstreeks 1,25 miljoen jaar geleden (Clark et al., 2006) terwijl anderen deze omstreeks 900.000 jaar geleden laten beginnen ten gevolge van een puls in ijsgroei (Berger en Jansen, 1994, Mudelsee en Schulz, 1997; Raymo et al., 1997). De Mid Pleistocene Overgang eindigde zo rond 700.000 (Clark et al., 2006) tot 600.000 jaar geleden (Berger en Jansen, 1994, Mudelsee en Schulz, 1997; Raymo et al., 1997).

De vaartocht

De vaartocht naar het Angola Bekken in de Zuidoost Atlantische Oceaan (Jansen et al., 1990) werd uitgevoerd met het onderzoekschip Tyro (Figuur 1.4) gedurende de periode 30 september tot en met 19 november 1989. Als deel van een uitgebreid programma zijn sedimentkernen en watermonsters genomen. De watermonsters bestaan uit pompmonsters, om de bovenste paar meter van het zeewater te bemonsteren, en een planktonnet om de diepere waterlagen te bemonsteren. Figuur 1.5 laat de route van het vaarprogramma zien evenals de positie van de belangrijkste sedimentkern in deze studie, kern T89-40 (21°36'Z, 6°47'O) op de Walvis Rug, welke het Angola Bekken van het Kaap Bekken scheidt.

Tijdens het bemonsteren met behulp van de pomp werd continu de bovenste 5 meter van de waterkolom verzameld. Iedere 8 uur werd het plankton bemonsterd middels een net met een maaswijdte van 100 µm en een waterinlaatpunt op 5 meter diepte in de boeg van het schip. In de tropische wateren lag de maximale productiviteit dieper in de waterkolom. Een continue bemonstering op grotere diepte was helaas niet mogelijk. Wanneer de tijd het toeliet, is het plankton ook op aantal stations verzameld met behulp van een plankton net (met een maaswijdte van 50 µm plankton net en een doorsnede 45 cm). Gebruikmakend van een 150 meter lange kabel werd het planktonnet op- en neer door de waterkolom gehaald en daarmee de monsters verzameld in de fotische zone. Tezamen met de pompmonsters geeft deze planktonnet bemonstering informatie over de verticale verdeling van soorten. De monsters werden bewaard in een 4 % formaldehyde oplossing bij een temperatuur van 4°C.

Tijdens de vaartocht werd een 'piston corer', met binnenbuizen van 9 cm in doorsnede en een gewicht aan de top van 1366 kg, ingezet om sediment van de zeebodem te verzamelen. Zo snel mogelijk nadat de kernen aan boord waren

werden ze thermisch geïsoleerd om de kernen te beschermen tegen opwarming door de tropische zon alvorens ze op te delen in secties en te bewaren bij een temperatuur van 4°C.

Hydrografie

In de Zuidoost Atlantisch Oceaan komen een groot aantal watermassa's en oceaanstromingen voor waarin diverse soorten planktonische foraminiferen leven. De huidige hydrografie van de Zuidoost Atlantisch oceaan (Figuur 1.5) is beschreven in werk van diverse auteurs (van Bennekom en Berger, 1984; Shannon, 1985; Peterson en Stramma, 1991; Lutjeharms, 1996; Shannon en Nelson, 1996). De grootschalige circulatie wordt gecontroleerd door een semi-permanent atmosferisch hoge drukgebied in het centrale deel van de Zuid Atlantisch Oceaan (de 'South Atlantic Anticyclone', ter hoogte van 27°-32°Z, 5°-10° W) en een lage drukgebied boven het Afrikaanse continent. Deze drukgebieden wekken meer meridionaal (noord-zuid) georiënteerde passaatwinden op nabij het continent en meer zonale (oost-west) gerichte passaatwinden boven zee.

De doorgaans zuider- en zuidooster winden stuwten een van de Afrikaanse kust af gerichte oppervlaktestroming aan welke een intensieve opwelling van koud en voedselrijk water opwekt nabij de kust in het Benguela Opwelling Systeem (BUS). Het meest noordelijk opwellingsgebied met sterke zeewaartse verbreiding is ter hoogte van Walvis Baai, 22°Z (Lutjeharms en Meeuwis, 1987; Lutjeharms en Stockton, 1987; Lutjeharms et al., 1991). De Benguela Stroom (BC) heeft een belangrijke tak, de Benguela Oceanische Stroom (BOC), welke de Afrikaanse kust ter hoogte 20°Z verlaat in noordwestelijke richting. De kusttak van de Benguela Stroom, de Benguela Kust Stroom (BCC), stroomt tot aan 14-16°Z. Hier, bij het Angola-Benguela Front (ABF), eindigt de intensieve kust opwelling (Meeuwis en Lutjeharms, 1990).

Het complex aan oceaanstromingen aan de evenaar omvat de westwaarts stromende Zuid Equatoriale Stroom (SEC) en twee oostwaarts gaande stromingen, de Zuid Equatoriale Tegenstroom (SECC) en de Equatoriale Onderstroom (EUC). Ten zuiden van de evenaar, een verlengde van de Zuid Equatoriale Tegenstroom, stroomt de Angola Stroom (AC) richting het zuiden langs de Afrikaanse kust, waar het de koude Benguela Kust Stroom wateren ontmoet bij de Angola-Benguela Front.

In de oppervlaktewateren van het Angola Bekken veroorzaakt de uitstroom van de Kongo Rivier een dunne (in het begin 5 tot 15 m dik), silica-rijke pluim met een laag zoutgehalte. Deze pluim meandert en vormt lobben tengevolge van de windsterkte, de windrichting en de rivierafvoer (Eisma en van Bennekom, 1978).

In het verleden (1991-1997) werd de Kongo Rivier ook wel de Zaire Rivier genoemd.

Intermediaire en centrale watermassa's (Figuur 1.6) hebben tevens een effect op de leefomgeving van planktonische foraminiferen, middels een grotere calcificatiediepte van bepaalde soorten en/of door opwelling van diepere wateren naar het oppervlakte. Antarctisch Intermediair Water (AAIW), een massa oceaanwater met de kern op 800 m diepte, is minder zout, zuurstof- en nutriëntrijk water en drijft op het Bovenste Circumpolair Diep Water (UCPDW) (Talley, 1996). In deze regio worden beneden de oppervlaktemenglaag drie soorten 'centraal' water aangetroffen: Zuid Atlantisch Centraal Water (SACW), Oostelijk Zuid Atlantisch Centraal Water (ESACW) en Westelijk Zuid Atlantisch Centraal Water (WSACW). Deze centrale watermassa's verschillen maar weinig in karakter en worden op een diepte van ongeveer 100 tot 600 m aangetroffen. Het zeer zoute, zuurstofarme water vanuit het Angola Bekken, welke direct onder de oppervlaktemenglaag voorkomt, het Zuid Atlantisch Centraal Water, heeft tegenwoordig een zuidwaartse verspreiding tot 17°Z (Mohrholz et al., 2008).

Veranderingen in de diepwater circulatie kunnen een effect hebben op de oplossing van de kalkskeletjes van de fossiele planktonische foraminiferen gemeenschappen die op de zeebodem zijn bezonken. De diepwatermassa's kunnen onderverdeeld worden in diepe wateren met een noordelijke oorsprong, Noord Atlantisch Diep Water (NADW), en diepe wateren met een zuidelijke oorsprong, Circumpolair Diep Water (CPDW) en het Antarctisch Bodem Water (AABW) (Figuur 1.6). Het Antarctisch Bodem Water (AABW) komt voor in de diepste delen van het oostelijke Weddell Bekken beneden een diepte van 4000 m en bij een temperatuur van 0° – 7°C (o.a. Bickert en Wefer, 1996; Diekmann et al., 1996). Ten noorden van 45°Z splitst het iets warmere Circumpolair Diep Water (CPDW), een mengsel van wateren uit verschillende oceanen, zich op in een Onder Circumpolair Diep Water (LCPDW) en een Bovenste Circumpolair Diep Water (UCPDW). Het Noord Atlantisch Diep Water (NADW) nestelt zich tussen de Onder- en Bovenste Circumpolair Diep Water in op een diepte van 2000 – 3000 m en kenmerkt zich door relatief warm, zout, zuurstofrijk en voedselarm water. De Walvis Rug verdeelt de diepere watermassa's: kalkverzadigd Noord Atlantisch Diep Water (NADW) in het noordelijk gelegen Angola Bekken en het meer corrosieve (kalkoplossend) Onder Circumpolair Diep Water (LCPDW) in het zuidelijk gelegen Kaap Bekken (Bickert en Wefer, 1996).

Tegenwoordig ligt Kern T89-40 in een gebied met een lage oppervlaktewater productiviteit en waar Noord Atlantisch Diep Water (NADW) voorkomt op de zeebodem (Bickert en Wefer, 1996). De bestudeerde kern ligt op een kruispunt van drie verschillende hydrografische systemen in de Zuid Atlantische Oceaan:

(1) het Benguela Opwellingssysteem (BUS), (2) de Zuid Atlantische subtropische wervel en (3) de tropische waters uit het noordelijk gelegen Angola Bekken.

Doelstellingen

De belangrijkste doelstelling tijdens deze expeditie/vaartocht was het bestuderen van de invloed van oceanografische parameters (kenmerken) op de samenstelling van planktonische foraminiferen gemeenschappen. De informatie is vervolgens gebruikt om de klimaatsgeschiedenis van de Walvis Rug, Zuidoost Atlantische Oceaan, te ontrafelen met nadruk op de veranderingen binnen de oppervlakte- en centrale watermassa's door de tijd heen.

Op de zeebodem van Walvis Rug werd Kern T89-40 is genomen, op het kruispunt van belangrijke hydrografische systemen in de Zuidoost Atlantische Oceaan. Deze kern heb ik onderzocht. De soortensamenstelling van planktonische foraminiferen gemeenschappen is gebruikt om de veranderingen in oceaanstromingen en daarmee klimaatsveranderingen in de tijd te ontrafelen. In dit proefschrift zijn er twee belangrijke doelstellingen:

(1) De doelstelling in de hoofdstukken twee en drie is om de kennis te verbeteren van de ecologie van planktonische foraminiferen in het oostelijke deel van de Zuid Atlantische Oceaan, inclusief de Kongo Rivier pluim en het Benguela Opwellingssysteem (BUS). De verspreiding van hedendaagse planktonische foraminiferen in de oppervlaktewateren is bestudeerd tijdens het zuidelijke voorjaar. Het verzamelen van hedendaagse planktonische foraminiferen gemeenschappen in de waterkolom is een vereiste om onze kennis te verbeteren van de oceanografische en biologische factoren die hun verspreiding bepalen en ter verbetering van de reconstructies van milieuomstandigheden in het verleden in sedimentarchieven.

(2) De doelstellingen in hoofdstuk vier tot en met hoofdstuk zeven concentreren zich op de toepassing van deze vernieuwde kennis en de interpretatie van veranderingen in samenstelling van fossiele planktonische foraminiferen gemeenschappen in de sedimenten op de Walvis Rug gedurende de laatste miljoen jaar.

Resultaten

Hoofdstuk 2: Oorzaak van verschillen in windingsrichting in recente neogloboquadrinas in de Walvis Baai regio, voor de kust van Namibië, ZW Afrika

In hoofdstuk 2 richt ik mij op de invloed van zeewatertemperatuur op de lokale oppervlaktewater verspreiding van planktonische foraminiferen in de

Walvis Baai regio (23°Z) tijdens het voorjaar op het zuidelijke halfrond van (November) 1989. Tijdens deze periode vindt de maximale zeewaartse verbreiding van de Benguela Opwellingsstelsel plaats. In de kustnabije wateren, het gebied met de meeste intensieve opwelling, domineert de linksdraaiende *Neogloboquadrina pachyderma* de rechtsdraaiende *N. pachyderma*, welke verder van de kust af voorkomt. De verandering in windingsrichting treedt hier op bij een zeevatertemperatuur van 14,5°C, welke beduidend hoger is dan de 7°-9°C waarbij de windingsrichting van soortgelijke vormen (morfotypes) op hoge breedtegraden (op het noordelijke halfrond) verandert. Kennelijk is temperatuur hierin niet de meest bepalende factor. Deze morfotypes zijn aparte soorten, genotypes, met verschillende milieu- en voedselvoorkeuren. Het hoge aantal van linksdraaiende *N. pachyderma* kan verklaard worden als het gevolg van verhoogde reproductie van exemplaren van elders, afkomstig van hoge breedtegraden in het zuiden, onder gunstige opwelling omstandigheden.

Het antwoord op de vraag in dit hoofdstuk in welke mate de links- en rechtsdraaiende *Neogloboquadrina* populaties van twee verschillende soorten weerspiegelen kwam van DNA analyses, een aantal jaren later nadat ik de geografische distributie van deze morfotypes in het gebied van het Benguela Opwellingsstelsel (BUS) had gepubliceerd. Darling en anderen (2006; 2008) toonden aan dat de linksdraaiende *N. pachyderma* in het Benguela Opwellingsstelsel (BUS) een ander genotype betreft dan elders in de wereld. De rechtsdraaiende *N. pachyderma* vertoont minder genetische variabiliteit en behoort tot Atlantische genotype, Type I.

Hoofdstuk 3: Levende planktonische foraminiferen in het oostelijk deel van de Zuid Atlantische Oceaan gedurende het voorjaar: indicatoren van watermassa's, opwelling en de Kongo Rivierpluim.

In hoofdstuk 3 wil ik de aandacht vestigen op de regionale verspreidingspatronen van planktonische foraminiferen als indicatoren van watermassa's en fysisch-chemische parameters in het Angola Bekken en aangrenzende wateren tijdens het (zuidelijk) voorjaar van 1989. Zowel pomp- als planktonnetmonsters zijn hiervoor gebruikt.

In de pomp- en planktonnetmonsters zijn 6 foraminiferen gemeenschappen gevonden welke overeenkomen met belangrijke oppervlaktewatermassa's in de Zuidoost Atlantische Oceaan.

Twee gemeenschappen kenmerken de watermassa's nabij de evenaar. Gemeenschap A, de *Globigerinoides ruber* wit - *Globigerinoides sacculifer* assemblage, weerspiegelt de equatoriale oppervlaktewateren ten westen van

4°O. Het percentage *G. sacculifer* wordt groter naarmate de dikte van de oppervlakte-menglaag toeneemt. Gemeenschap B, *Globigerinoides ruber* rood – *Neogloboquadrina dutertrei* weerspiegelt de uitstroom van de Kongo Rivier, de Kongo rivierpluim, en de opwelling die de uitstroom veroorzaakt.

Een van de sterkste veranderingen in de soortensamenstelling van foraminiferen vindt plaats ter hoogte van het Angola-Benguela Front, welke de tropische wateren uit het noorden van de koude wateren in het Benguela Opwellingsysteem (BUS) in het zuiden scheidt. De warme tropische wateren van het Angola Bekken worden gekenmerkt door de overheersing van *Neogloboquadrina dutertrei* en *Globigerinella siphonifera*, gemeenschap C. Het Angola-Benguela Front zelf wordt gemarkeerd door gemeenschap D, welke een overheersing van de soorten *Globorotalia inflata* en *Globigerina bulloides* laat zien. De koude, voedselrijke fauna van het Benguela Opwellingsysteem (BUS) in het zuiden, gekarakteriseerd door gemeenschap E, wordt gekenmerkt door hoge aantallen van *N. pachyderma* en *G. bulloides*. Oppervlakte wateren ten westen van het Benguela Opwellingsysteem (BUS), op de grens met de subtropische wervel, herbergen hogere aantallen *G. bulloides* en *G. sacculifer*, gemeenschap F.

Tijdens het voorjaar in de Zuidoost Atlantische oceaan bepalen de fysisch-chemische eigenschappen van de oppervlaktewateren zoals temperatuur, voedsel en de diepte van de oppervlaktemenglaag de planktonische foraminiferen gemeenschappen. Het zoutgehalte speelt een minder grote rol in de biogeografische verspreiding van planktonische foraminiferen. De schijnbare relatie tussen de geografische verspreiding van specifieke soorten werd waarschijnlijk veroorzaakt door anderen eigenschappen welke met zoutgehalte mee variëren zoals verhoogde zeewatertemperaturen in de Kongo Rivierpluim en de daar opgewekte opwelling.

Hoofdstuk 4: Afwijkende voorkomens van Neogloboquadrina pachyderma (links) in een 420.000 jaar durend opwelling tijdserie van de Walvis Rug (Zuidoost Atlantische Oceaan)

In hoofdstuk 4 richt ik mij op veranderingen in de fossiele planktonische foraminiferen gemeenschappen in het sediment van Kern T89-40 gedurende de afgelopen 420.000 jaar.

Tijdens de bestudeerde periode worden duidelijke glaciale-interglaciale cycli in soortensamenstelling gevonden. Interglacialen worden gekenmerkt door warme soorten welke een sterke uitbreiding van de subtropische wervel weerspiegelen terwijl de glacialen gemarkeerd worden door perioden met versterkte opwelling van koud- en voedselrijk water. Echter, één

voedselminnende koud-water soort, linksdraaiende *N. pachyderma*, vertoont niet alleen grote pieken tijdens glaciële perioden.

Ik heb een onderverdeling gemaakt in de piek voorkomens van deze soort. Type A en B pieken, met percentages van minder dan 20 %, zijn toegeschreven aan perioden met verhoogde opwelling in het noordelijk deel van het Benguela Opwellingsstelsel (BUS). Type A pieken komen voornamelijk voor tijdens glaciëlen en koude perioden binnen interglaciëlen, terwijl type B pieken tijdens warme, interglaciële perioden optreden. Type B pieken komen tezamen voor met lage aantallen subtropische soorten, welke perioden met grote seizoensverschillen tussen opwelling in de winter (/ voorjaar) en subtropische zomer omstandigheden weergeven. De type C pieken, met percentages van 20 tot 38 %, komen echter voor tezamen met sterk gereduceerde percentages van andere voedselminnende soorten, maar te meer met hogere aantallen subtropische soorten gedurende de mariene isotopen stadia (MIS) 11.3 (401.000 jaar) en 9.3 (326.000 jaar).

In het Benguela Opwellingsstelsel (BUS) kunnen de zeer voedselrijke wateren in een monospecifieke *N. pachyderma* (links) fauna geresulteerd hebben ten tijde van de type C pieken. Meanderende 'shelf-edge jets', krachtige door onderwatertopografie gestuurde stromingen, zijn voorgesteld als transportmechanisme van deze zeer productieve wateren. Deze 'jets' zouden de opwellingsfauna 700 km van de kust af naar de kernlocatie getransporteerd hebben, zonder dat andere voedselminnende soorten vanuit de omringende wateren meegevoerd werden. In de Zuid Atlantische Oceaan gingen perioden met sterk poolwaartse verschuivingen van frontsystemen vooraf aan het sterke zonale transport door deze 'jets' met ongeveer 8.000 jaar aan het begin van MIS 9 en MIS 11.

Hoofdstuk 5: Respons van planktonische foraminiferen op Mid Pleistocene klimaatsveranderingen in de Zuidoost Atlantische Oceaan

In hoofdstuk 5 heb ik een tijdserie met veranderingen in concentratieprofielen van planktonische foraminiferen in Kern T89-40 gepresenteerd welke verder in de tijd gaat dan in hoofdstuk 4 met als doel deze veranderingen te koppelen aan Pleistocene klimaatsveranderingen ten tijde van de Mid Pleistocene Overgang. Statistische analyses tonen aan dat de meeste variabiliteit in het voorkomen van planktonische foraminiferen werd veroorzaakt door cycli in oligotrofe (voedselarme) versus eutrofe (voedselrijke) omstandigheden in de oppervlaktewateren welke aangestuurd worden door verschuivingen in de Zuidoost Atlantische subtropische wervel en/of de noordelijke tropisch wateren vanuit het Angola Bekken versus de wateren van het

Benguela Opwellingsysteem (BUS) ter hoogte van de onderzoekslocatie. Een toename van oligotrofe wateren wordt tijdens maxima in zonne-instraling op het noordelijke halfrond waargenomen, tijdens of net voorlopend op de interglaciale perioden. Eutrofe omstandigheden komen voornamelijk voor tijdens glaciële perioden. De grote oligotrofe-eutrofe cycli begonnen zo rond 600.000 jaar geleden aan het einde van de Mid Pleistocene Overgang, in overeenstemming met de laat Pleistocene versterking van de hoog amplitudinale glaciële-interglaciële cycli.

Zoals al werd aangetoond in hoofdstuk 4, vertoont *N. pachyderma* (links) afwijkend hoge percentages tijdens MIS 9 en 11, maar tijdens deze studie heb ik tevens een piek gevonden tijdens MIS 31 wat aantoont dat dit fenomeen niet beperkt is tot het laat Pleistoceen. Deze hoge pieken weerspiegelen een sterke opwelling tijdens deze interglacials, terwijl de aanwezigheid van tropisch soorten zoals *Globorotalia menardii* wijzen op de instroom van warme wateren uit de Indische Oceaan in de Zuidoost Atlantische Oceaan tijdens de dezelfde periodes.

In hoofdstuk 5 doe ik in het bijzonder verslag van de frequentiepatronen van links- en rechtsdraaiende *Globorotalia truncatulinoides*. De linksdraaiende *G. truncatulinoides* verdwijnt uit beeld zo rond 960.000 jaar aan het begin van de Mid Pleistocene Overgang wanneer de oceanische wateren afkoelen, zoals te zien is de zuurstofisotopentijdserie. Deze soort blijft afwezig gedurende de Mid Pleistocene Overgang tot ongeveer 600.000 jaar geleden.

Hoofdstuk 6: Kalkoplossing in de diepe wateren van de Zuidoost Atlantische Oceaan tijdens de afgelopen 1,1 miljoen jaar.

In hoofdstuk 6 beschrijf ik de geschiedenis van calciumcarbonaat (kalk) oplossing tijdens de laatste 1,1 miljoen jaar. Dit is een zijstap in dit proefschrift, maar is noodzakelijk om te bepalen in hoeverre de kalkskeletjes van de planktonische foraminiferen in goede of minder goede staat bewaard zijn gebleven. Dit is belangrijk om te bepalen of de samenstelling van de foraminiferen gemeenschappen aangetast zijn door oplossing waardoor betrouwbare paleoceanografische reconstructies onmogelijk zijn. In dit hoofdstuk staan dus de relaties tussen de verschillende carbonaat-oplossingsindicatoren en de soortensamenstelling van planktonische foraminiferen gemeenschappen alsmede de zuurstofisotopen (klimaat) centraal.

Het blijkt dat aan het begin van de Mid Pleistocene Overgang het kalkoplossingspatroon zich wijzigde; de variabiliteit veranderde van één met een lage amplitude naar één met een hoge amplitude tegelijk met een toename in preservatie tijdens interglacials en oplossing tijdens glaciëlen. Dit patroon van

interglaciale preservatie en glaciële oplossing wordt nog duidelijker tijdens de laatste 600.000 jaar. In het bijzonder, perioden met sterke glaciële oplossing vinden plaats tijdens MIS 4, 12, 20 en 26. Sterke interglaciale oplossing komt voor tijdens de interglaciale periode, MIS 13.11. Ik laat zien dat de cycliciteit in kalkoplossing synchroon loopt met de cyclus van obliquiteit, de kanteling van de aardrotatie. Dit suggereert dat unieke, maar onbekende oceanografische processen werden aangestuurd door obliquiteit, hoogstwaarschijnlijk door processen op hoge breedtegraden middels diepwatercirculatie en verbreiding van het zeeijs. Tevens heb ik een lange termijn trend in de geschiedenis van de kalkoplossing opgemerkt, welke het sterkst ontwikkeld is tijdens de zogeheten Mid Brunhes Oplossing Interval (Mid-Brunhes Dissolution Interval). Deze trend is zeer waarschijnlijk gekoppeld aan mondiale variaties in koolstofvoorraden.

Ik sluit dit hoofdstuk af met de conclusie dat de samenstelling van de planktonische foraminiferen gemeenschappen niet gewijzigd is door oplossing. Daarom geeft de samenstelling van de planktonische foraminiferen gemeenschappen de primaire oceanografische omstandigheden weer in het verleden. Echter zijn er twee uitzonderingen tijdens het Mid Brunhes Oplossing Interval gedurende MIS 12 en MIS 13.11 wanneer de foraminiferen kalkskeletjes aangetast zouden kunnen zijn door oplossing.

Hoofdstuk 7: Opmerkingen – Paleoceanografie van het zuidelijk halfrond tijdens de Mid Pleistocene Overgang in context van meer mondiale veranderingen

In het laatste hoofdstuk worden de lokale foraminiferen patronen van Kern T89-40 in een grotere context met meer mondiale klimaatsveranderingen in de Atlantische Oceaan gezet. Een van de meeste opvallende resultaten is dat gedurende de Mid Pleistocene Overgang er een duidelijke relatie is tussen de grotere invloed van de subtropische wervel op de onderzoekslocatie en maxima in zonne-instraling op het noordelijk halfrond. Zonne-instraling speelt een belangrijke rol in het aansturen van atmosferische circulatiepatronen en daarmee de oceaancirculatie. De obliquiteitscyclus blijkt een belangrijk element te zijn in de oceanografische veranderingen op de Walvis Rug. De variabiliteit in de passaatwinden en de Hadley cel circulatie stuurden de belangrijkste oceanografische veranderingen in de Zuidoost Atlantische Oceaan aan. IJskappen op de Noord- en Zuidpool groeiden aan wat de intensiteit van de passaatwinden veranderde. Dit verklaart het voorkomen van de 100.000 jaar cycliciteit in de laat Pleistocene patronen in planktonische foraminiferen sinds ongeveer 650.000 jaar. De Zuidoost Atlantische paleoceanografische veranderingen weerspiegelen zeer goed de versterkingen van klimaatscycli tijdens de Mid Pleistocene Overgang.