

Algemene inleiding en samenvatting

Inleiding en samenvatting

De atmosferische CO₂-concentraties die verwacht worden voor de komende eeuwen niet zo hoog zijn geweest sinds het vroege Paleogeen, een periode tussen ongeveer 65 en 35 miljoen jaar (Ma) geleden. De gemiddelde temperatuur tijdens het vroege Paleogeen was een stuk hoger dan in het huidige klimaat, hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt werd door hoge broeikasgasconcentraties. Grote ijskappen, zoals die nu op Antarctica en Groenland aanwezig zijn, waren er niet. Er liepen krokodillen rond in Alaska.

Begrip over de invloed van zulke broeikascondities op het klimaat gedurende het vroege Paleogeen is essentieel om het precieze effect van de stijgende broeikasgasconcentraties op het huidige aardse klimaat te kunnen voorspellen. Ik heb onderzoek gedaan naar verschillende tijdsperioden binnen het vroege Paleogeen, voornamelijk het Laat Paleoceen, Vroeg Eoceen, Midden Eoceen, Laat Eoceen en Vroeg Oligoceen (zie CV, pagina 226). Dit proefschrift beperkt zich tot de mondiale klimaatsveranderingen die zich voordeden gedurende een kortstondige periode van extreme mondiale opwarming ongeveer 55.5 Ma geleden die het Paleoceen-Eoceen temperatuur maximum (PETM) wordt genoemd.

Vanaf ongeveer de grens tussen het Selandien en het Thanetien (ongeveer 59 Ma geleden) begon een graduele opwarmingstrend die culmineerde in de zeer warme omstandigheden van het Vroeg Eoceen (tussen 52 en 50 Ma geleden). Gedurende het Midden en Laat Eoceen koelde het aardse klimaat af wat uiteindelijk leidde tot het ontstaan van grote ijskappen op Antarctica tijdens het begin van het Oligoceen. Waarom deze trends zich voordeden is nog onduidelijk, al is het waarschijnlijk dat veranderende broeikasgasconcentraties in de atmosfeer een belangrijke rol speelden. Het PETM karakteriseert de grens tussen het Paleoceen en Eoceen en werd vrijwel zeker veroorzaakt door een verhoging van de broeikasgas concentraties. Bewijs voor opwarming komt van grote verschuivingen in de verhouding van stabiele zuurstof isotopen ($\delta^{18}\text{O}$) in calciet, gevormd in mariene en terrestrische systemen en hogere Mg/Ca ratio's gemeten aan foraminiferen. Ook vonden migraties van (sub)tropische land- en zeeorganismen richting de polen plaats. Samenhangend met deze opwarming werd de verhouding stabiele koolstofatomen met 2.5-6‰ verlaagd. Dit wordt de carbon isotope excursion, afgekort CIE, genoemd. Deze duidt op een op geologische tijdschaal zeer snelle input van ¹²C-rijk koolstof in de vorm van CO₂ en/of CH₄ in het atmosfeer-oceaan systeem. De blijkbare samenhang tussen de opwarming en de koolstofinput heeft geleid tot de hypothese dat deze CO₂- en/of CH₄-toename, bovenop de al hoge broeikasgasconcentraties van het laatste Paleoceen, een versterkt broeikaseffect tot gevolg heeft gehad. De tijdsduur van de CIE en het PETM zijn in de orde van 170 kilojaar (kjr).

Ondanks het feit dat het PETM al goed bestudeerd is, is er nog een aantal basale vragen. 1. Waarom deed het PETM zich voor op dat specifieke moment? 2. Was

het een unieke gebeurtenis? 3. In hoeverre ligt de input van licht koolstof die de CIE veroorzaakte daadwerkelijk ten grondslag aan de mondiale klimaatsveranderingen? In de veel bestudeerde sedimenten uit de diepzee is de tijdsresolutie misschien niet hoog genoeg om te onderzoeken of opwarming en de koolstof input wel echt tegelijkertijd plaatsvonden. 4. Veel diepzee secties laten zien dat kalkskeletjes van algen en foraminiferen in de diepzee oplossen door het verzurende zeewater. Maar wat is het kwantitatieve effect van de hogere koolstofconcentraties op de chemie van de oceanen? 5. Wat was de grootte van de temperatuuroptocht op mondiale schaal? 6. Wat was het gevolg voor het niveau van de zeespiegel? Dit proefschrift gaat in op deze vragen door gedetailleerd proxy-onderzoek op mariene sedimenten, gevormd op plaatsen variërend van ondiepe gebieden dichtbij continenten (continentaal plat), tot de diepzee en van tropische tot poolgebieden.

Een van de belangrijkste hulpmiddelen die ik heb gebruikt om veranderingen in paleomilieu (het milieu van vroeger) te detecteren zijn organische fossielen van cysten van dinoflagellaten (dinocysten). Dinoflagellaten zijn protisten. De verschillende soorten hebben specifieke voorkeur voor bepaalde omstandigheden in hun directe omgeving, de oppervlakteoceanen. Bijvoorbeeld, sommigen zijn heterotroof en hebben voedselrijke omstandigheden nodig; anderen zijn autotroof en concurreren het best onder oligotrofe condities. Ook zijn er soorten die bij hogere temperaturen beter gedijen, terwijl anderen zich beter thuis voelen onder relatief koude omstandigheden. Gedurende de afgelopen tientallen jaren zijn de ecologie van bestaande soorten en de paleoecologie van uitgestorven soorten (al kennen we alleen hun fossiliseerbare cysten) steeds beter in kaart gebracht. De dinocystenassociaties die we uit mariene sedimenten kunnen concentreren, kunnen we gebruiken om de condities van het oppervlaktewater waarin zij leefden te reconstrueren. Dit type onderzoek is vooral de afgelopen 15 jaar in een stroomversnelling geraakt en **Appendix 1** biedt een overzicht van de paleoecologische reconstructies die met behulp van dinocysten zijn gemaakt gedurende het Paleogeen (tussen 65 en 25 Ma geleden). Omdat tijdens het Paleogeen opwarming en afkoeling plaatsvond op lange maar ook zeer korte tijdschalen, is het dé periode om de paleoecologie van dinocysten te begrijpen en om te onderzoeken hoe waardevol ze zijn om paleomilieu mee te reconstrueren. In Appendix 1 wordt behandeld hoe dinocysten kunnen worden gebruikt om productiviteit, temperatuur, zoutgehalte, stratificatie, zuurstofgehalte en oceanocirculatie te reconstrueren, evenals hun toepassingen op het gebied van sequentiestratigrafie.

Veel data in dit proefschrift zijn gegenereerd op sedimentkernen die werden opgeboord tijdens Ocean Drilling Program (ODP) Expeditie 208 op de Walvis Rug in de subtropische zuidoostelijke Atlantische Oceaan in 2003, en tijdens Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expeditie 302, of Arctic Coring

Inleiding en samenvatting

Expedition (ACEX), op de Lomonosov Rug in de Arctische Oceaan (2004). Deze expedities hebben zeer veel nieuwe informatie opgeleverd over vroege Paleogeen. Hoofdstukken 1 t/m 3 van dit proefschrift zijn hierop gebaseerd.

In theorie zou praktisch alle koolstof die aan het oceaan-atmosfeer systeem werd toegevoegd rond het begin van het PETM, snel moeten zijn opgelost in de oceaan in de vorm van CO_2 . Zoals aangegeven in **Hoofdstuk 1** moet dit hebben geleid tot hogere concentraties H^+ ionen in het oceaanwater waardoor kalkskeletjes, geproduceerd door algen en foraminiferen, oplosten. Het niveau in de oceaan waarop deze kalkpartikeltjes, geproduceerd in de bovenste laag van oceaan, beginnen op te lossen (de lysocline) en het niveau waaronder alle kalk is opgelost (de calciet compensatie diepte, of CCD) zou dus in theorie hoge moeten komen zijn te liggen. Verder zou de opslag van de koolstofinput, in de vorm van organisch koolstof en als gevolg van silicaatverwerking ook in de vorm van carbonaat, moeten leiden tot het herstel van de diepte van de lysocline en de CCD. ODP Expeditie 208 haalde zeer gave sedimenten omhoog die het PETM vertegenwoordigen van verschillende diepten in de oceaan. De ondiepste kern was 2 km boven de diepste kern gelocaliseerd. Op basis van de analyses op deze kernen beschreven in Hoofdstuk 1 konden alle bovenstaande aspecten worden aangetoond.

Gedurende ODP Leg 208 werd niet alleen het PETM omhoog gehaald, maar werd in aardlagen die ongeveer 2 Ma jonger zijn een kleilaag gevonden die net zo rood was als een pop van het Sesamstraat figuur *Elmo* die ons de hele reis vergezeld had op het schip de JOIDES *Resolution*. Aan boord werd deze kleilaag daarom naar *Elmo* vernoemd. Deze laag laat ook kalkoplossing zien en ook verlagingen in stabiele koolstof ($\delta^{13}\text{C}$) en zuurstof ($\delta^{18}\text{O}$) verhoudingen van het kalk dat nog wel gepreserveerd is. Dit impliceert dat de *Elmo* laag een tweede snelle opwarmingsperiode reflecteert die we het Eoceen temperatuur maximum 2 (ETM2) noemden. Deze resultaten staan beschreven in **Hoofdstuk 2**, waarin we ook de sedimenten afgezet tussen het PETM en ETM2 correleren naar de astronomische parameters, in dit geval eccentriciteit, die zijn uitgerekend door astronomen. Deze correlatie duidt erop dat het begin van het PETM en het ETM2 samenvallen met maxima in de eccentriciteit, hetgeen betekent dat het begin van beide perioden werd veroorzaakt door veranderingen in de wijze waarop de energie van de zon op aarde wordt gedistribueerd.

Een al eerder ontdekt fenomeen van het klimaat gedurende het vroege Paleogeen is het gereduceerde temperatuursverschil tussen de tropische en de poolgebieden. Goede schattingen van temperaturen ten noorden van 80°N waren echter niet voorhanden omdat er geen sedimentkernen waren uit (het centrale gedeelte van) de Arctische Oceaan. Tijdens de ACEX werd een gedeelte van de onder Paleogene sedimentopvolging van de Lomonosov Rug omhoog gehaald, die is afgezet

op 85°N. In **Hoofdstuk 3** identificeren we de PETM in deze kernen gebaseerd op dinocysten en de verlaging van de stabiele koolstofisotopenverhouding. In dit hoofdstuk laten we zien dat de dinoflagellaten taxon *Apectodinium*, die alleen veel voorkwam in de tropen en subtropen vóór het PETM maar tijdens het PETM zijn leefgebied richting de polen uitbreidde (zie omslag) en zelfs veel voorkwam in de Arctische Oceaan. De organisch geochemische TEX_{86} paleothermometer geeft aan tijdens het PETM de temperatuur van het oppervlaktewater in Arctische Oceaan steeg van zo'n 18°C tot 24°C en richting het einde weer daalde naar 18°C. De temperaturen voor, tijdens en na het PETM zijn veel hoger dan de moderne, volledig gekoppelde klimaatmodellen voorspellen voor deze tijdsperiode. Dit betekent dat deze modellen niet in staat zijn de zeer lage temperatuurgradiënt tussen de tropen en de polen, die zich voordeed gedurende deze periode, te simuleren. Blijkbaar waren er in het vroege Paleogeen klimaatmechanismen van belang die de tropen relatief koel hielden en/of de polen extra opwarmden, die nog niet in de klimaatmodellen zijn verwerkt. Verder laten we zien dat de temperatuuroename in de Arctische Oceaan kwantitatief hetzelfde is als gemeten in de tropen en gematigde gebieden, hetgeen betekent dat eventueel verwachte versterking van de Arctische opwarming zich niet voordeed gedurende het PETM.

Om de temperatuur en de temperatuuroename van het zeewater te reconstrueren in de gematigde gebieden wordt in **Hoofdstuk 4** zowel TEX_{86} als foraminiferen $\delta^{18}\text{O}$ -paleothermometrie toegepast op sedimentkernen omhoog gehaald uit het continentale plat van New Jersey, V.S.. Ook in deze monsters wordt een door *Apectodinium* gedomineerde dinocystenassociatie waargenomen (het zogenaamde *Apectodinium* acme) gedurende het PETM. Verder is de opwarming gemeten met TEX_{86} iets kleiner dan die gemeten met foraminiferen $\delta^{18}\text{O}$. Dit wordt verklaard door een afname van de $\delta^{18}\text{O}$ van het zeewater die samenhangt met een afname in het zoutgehalte van het oceanwater op deze plaats.

Ondanks de vele studies naar het PETM is de ultieme vraag “Wat veroorzaakte deze periode van extreem warm klimaat” niet beantwoord. Meerdere, elkaar niet uitsluitende, hypothesen zijn opgesteld om de CIE en de opwarming te verklaren. Vele auteurs hangen de hypothese aan dat de dissociatie van methaanhydraten in de zeebodem de CIE en een gedeelte van de opwarming veroorzaakte. Net als met alle andere, zijn er ook problemen met deze hypothesen. **Hoofdstuk 5** is een gedetailleerd overzicht van de literatuur die is gepubliceerd over de mogelijke oorzaken van het PETM. De beschikbare hoeveelheid goede proxy-data is zo groot dat we verschillende hypothesen kunnen uitsluiten. Verder vat dit hoofdstuk de mariene en terrestrische biotische respons samen en bevat het een discussie over de vraag hoe lang het PETM duurde.

Inleiding en samenvatting

Zoals eerder gezegd is op vele plaatsen in de wereld de temperatuuroename gedurende het PETM gemeten in de diepe en de bovenste lagen van de oceaan en deze lijkt mondiaal ongeveer 5°C te bedragen. Omdat het volume van oceaanwater groter is bij hogere temperaturen zou de oceaan in volume hebben moeten toenemen. Ook zouden de eventueel aan het eind van het Paleoceen bestaande kleine ijskappen in de bergen van Antarctica moeten smelten. Samen zouden deze mechanismen zeespiegelstijging moeten hebben veroorzaakt gedurende het PETM. Op basis van dinocystenassociaties schatten we in **Hoofdstuk 6** hoe ver de locaties waar mariene sedimentkernen, omhoog gehaald uit het continentale plat van verschillende continenten, van de kust af lagen gedurende het eind van het Paleoceen en begin van het Eoceen. De dinocystenassociaties laten zien dat de plaats waar deze kernen werden genomen gedurende het PETM verder van de kust af kwamen te liggen, hetgeen een stijging van de zeespiegel betekent. Deze transgressie begon tenminste 20 kjr voor de CIE en is consistent met trends in sedimentkorrelgrootte en met de relatieve hoeveelheid terrestrisch versus marien geproduceerd organisch materiaal. De grootte van de transgressie was waarschijnlijk niet meer dan 10 meter.

Het idee dat opwarming gedurende het PETM tegelijkertijd plaatsvond met de CIE komt van de vele diepzee $\delta^{13}\text{C}$ en $\delta^{18}\text{O}$ profielen gemeten op biogeen calciet. In deze profielen vinden de verlagingen in $\delta^{13}\text{C}$ en $\delta^{18}\text{O}$ plaats op hetzelfde stratigrafische niveau. Diepzeesedimenten hebben echter altijd zeer lage sedimentatiesnelheden, die ten tijde van de PETM nog verder afnamen door oplossing van (grote delen van) de kalkfractie (Hoofdstuk 1). Secties op het continentale plat hebben potentieel veel hogere sedimentatiesnelheden door de grotere toevoer van sediment door rivieren, zeker gedurende het PETM doordat de transgressie resulteerde in een grotere accommodatieruimte op het continentale plat. In **Hoofdstuk 7** staan profielen beschreven van dinocysten, stabiele isotopen en TEX_{86} die zijn gegenereerd op kernen van Bass River in New Jersey. Zij vertegenwoordigen profielen met de hoogste tijdsresolutie die tot nu toe van het PETM bekend zijn. De resultaten impliceren dat de *Apectodinium* acme ongeveer de 5 kjr begon voor de CIE. De opwarming gemeten met TEX_{86} begon ongeveer 3 kjr voor de CIE. Ook in de Arctische gegevens (Hoofdstuk 3) lijkt de opwarming te beginnen vóór de CIE. Op een ander plaats in New Jersey, in de Noordzee en waarschijnlijk ook in Nieuw Zeeland begint de *Apectodinium* acme ook voor de CIE. Gek genoeg lijken zich gedurende de verlaging in $\delta^{13}\text{C}$ geen grote klimatologische veranderingen voor te doen. Deze resultaten wekken de suggestie dat de opwarming op de een of ander manier de injectie van het lichte koolstof teweeg bracht, in plaats van andersom. In dit perspectief is het belangrijk dat de tijd die nodig is tussen het opwarmen van bodemwateren en het dissociëren van methaanhydraten uit de zeebodem ook enkele duizenden jaren bedraagt. Dit getal komt goed overeen met onze 3 kjr schatting tussen het begin van opwarming en de CIE, wat de hypothese dat de CIE veroorzaakt

werd door de dissociatie methaanhydraten onderschrijft. De oorzaak van de pre-CIE opwarming is niet bekend. Als het veroorzaakt werd door een toename in CO₂, dan is het waarschijnlijk dat deze CO₂ op de een of ander manier uit de oceaan in de atmosfeer gekomen is omdat de δ¹³C profielen geen duidelijke verschuiving vertonen.

De resultaten uit dit proefschrift geeft een aantal antwoorden op de vragen die aan het begin van deze inleiding werden gesteld. Hoewel het een regionaal signaal betreft, steeg de CCD met ongeveer 2 km in de zuidoostelijke Atlantische Oceaan. Mogelijk betekent dit dat een grotere hoeveelheid koolstof werd ingebracht dan kan worden verklaard met de methaanhydratenhypothese. De *Elm* laag laat zien dat het PETM geen unieke gebeurtenis was maar dat meerdere, vergelijkbare perioden zich voordeden in het vroeg Eoceen. De oorzaak van het PETM en het ETM2 is dus waarschijnlijk iets wat zich meerdere keren op aarde heeft voorgedaan. De resultaten van de sedimenten uit de Arctische Oceaan en New Jersey geven ons een beter beeld van de extreem hoge temperaturen gedurende het eind van het Paleoceen, het begin van het Eoceen, en het PETM. De huidige generatie klimaatmodellen kunnen de gereduceerde temperatuurgradiënten tussen de tropen en de pool niet simuleren. Mogelijk heeft dit directe implicaties voor de voorspellingen van toekomstige broeikasklimaten. Het PETM vindt plaats gedurende een transgressie, die waarschijnlijk veroorzaakt werd door een combinatie van smeltende ijskappen in de Antarctische bergen en uitzettend zeewater. Ten slotte weten we nu dat de *Apectodinium* acme evenals de opwarming, beiden intrinsiek gerelateerd aan het PETM, enkele duizenden jaren begonnen voor de CIE. Dit betekent dat de typische PETM condities niet veroorzaakt werden door de input van het isotopisch lichte koolstof dat de CIE veroorzaakte. Sterker nog, het wekt de indruk dat de input van dit koolstof plaatsvond als gevolg van de initiële opwarming. Deze veronderstelling genereert een nieuwe uitdaging: de vraag te beantwoorden hoe mondiale klimaatsveranderingen, inclusief opwarming, konden plaatsvinden tijdens het vroege Paleoceen zonder een verandering in de verhouding van stabiele koolstofisotopen van het oceaan-atmosfeer systeem.