

## Samenvatting

De laatste jaren is de aandacht voor wereldwijde klimaatsverandering sterk toegenomen. De voorspellingen van toekomstige klimaatsveranderingen ten gevolge van de menselijke invloed op het klimaat zijn alarmerend, maar ook zonder de invloed van de mensheid is het klimaat op aarde altijd dynamisch geweest. De processen die deze natuurlijke veranderingen veroorzaakten zijn nog steeds actief. Om de natuurlijke en de menselijke invloeden op het klimaatsysteem te kunnen onderscheiden moeten de processen die aan het aardoppervlak spelen goed begrepen worden.

Metingen van recente klimaatsveranderingen kunnen een beeld opleveren van deze processen. Helaas is de tijdsperiode waarop we metingen hebben van belangrijke klimaatsparameters (zoals bv. temperatuur) slechts kort (op geologische tijdschaal), vaak niet verder terugreikend dan de 19<sup>e</sup> eeuw. Om de natuurlijke processen die op langere tijdschaal spelen beter te kunnen begrijpen, moeten we daarom gebruik maken van indirecte metingen van verschillende parameters van het klimaatsysteem: de zogenaamde proxy-indicatoren.

Een recent ontwikkelde proxy is de analyse van fossiele resten van larven van chironomiden (veder- of dansmuggen). Deze resten kunnen worden aangetroffen in sedimenten die zijn achtergebleven op de bodem van poeltjes of meren, en door statistische bewerkingen kan een absolute schatting van juli-temperatuur afgeleid worden uit de verschillende chironomiden-resten die binnen 1 monster worden aangetroffen.

Chironomiden zijn een diverse groep insecten (Arthropoda: Insecta: Diptera: Chironomidae), wereldwijd bestaand uit meer dan 5000 soorten. De meeste mensen zullen chironomiden het beste kennen als de zwarte wolven insecten die op mooie dagen langs open water te vinden zijn. Chironomide-larven leven vaak in open water zoals meertjes of rivieren, en zijn vaak de meest voorkomende ongewervelden in deze omgevingen. Net zoals bij andere Diptera bestaat de levenscyclus van een chironomide uit 4 fasen: ei, larve, pop en imago (of volwassene).

Chironomiden zijn een bruikbare proxy omdat ze vaak in hoge aantallen aanwezig zijn in meertjes. Vaak zijn er vele verschillende soorten chironomiden aanwezig in 1 enkel meer, en omdat delen van de larve bewaard blijven (en ook geïdentificeerd kunnen worden) kan de fossiele chironomiden-fauna van een meertje goed gereconstrueerd worden. Veranderingen in deze samenstelling hangen samen met veranderingen in de leefomgeving van de muggen, zoals milieu- of klimaatsveranderingen. Veel chironomiden-soorten zijn sterk gekoppeld aan bepaalde milieu- of klimaats-omstandigheden, waardoor ze goed bruikbaar zijn als indicator. Omdat de volwassen chironomiden kunnen vliegen, en de levenscyclus van chironomiden slechts kort is (vaak 1 of 2 generaties per jaar), zijn chironomiden in staat snel te reageren op veranderingen in klimaat en milieu. Tot slot heeft temperatuur een dominante invloed op alle vier verschillende levensstadia, en al deze factoren samen betekenen dat chironomiden gebruikt kunnen worden als een middel om temperatuur te reconstrueren.

Gedurende de laatste 15 jaar is er een numerieke methode ontwikkeld waardoor absolute temperaturen afgeleid kunnen worden van fossiele chironomide-resten. Deze methode is vooral toegepast om de overgang tussen de laatste ijstijd en de huidige warme periode te analyseren. Dit proefschrift laat de eerste resultaten zien van de toepassing van deze methode op een iets oudere tijdschaal: verschillende periodes binnen de laatste ijstijd zijn geanalyseerd om de variabiliteit van het klimaat tijdens deze recente geologische periode te kwantificeren.

Het Kwartair is het geologische tijdvak dat de meest recente 2.6 miljoen jaar van de aardse geschiedenis beslaat. Het Kwartair wordt gekenmerkt door grootschalige afwisselingen tussen ijstijden (glacialen) en warme periodes (interglacialen). De overgangen tussen glacialen en interglacialen worden geïnterpreteerd als het gevolg van grootschalige veranderingen in de ontvangen instraling van de zon (dit fenomeen staat bekend onder de naam Milankovitch-cycliciteit).

De laatste ijstijd (het Weichselien) duurde grofweg van 110 tot 11 duizend jaar geleden. Behalve het grootschalige Milankovitch signaal, worden in zowel sedimentkernen van de Atlantische oceaانبodem als in ijskernen van Groenland vele abrupte klimaatschommelingen herkend, de zogenaamde Dansgaard/Oeschger (D/O)-oscillaties. Deze oscillaties worden gekenmerkt door een scherpe stijging van temperatuur in enkele decennia tijd, gevolgd door een periode van enkele honderden tot duizenden jaren waarin de temperatuur langzaam weer daalt, besloten met een scherpe overgang terug naar koude klimaatscondities. Op verschillende locaties in Europa zijn aanwijzingen gevonden dat D/O-klimaatsvariabiliteit ook invloed moet hebben gehad op het klimaat in Europa, maar er is een gebrek aan kwantitatieve informatie over veranderingen in bijvoorbeeld temperatuur en neerslag tijdens het Weichselien. Fossiele chironomide-resten aangetroffen in kernen (bestaande uit sediment dat zich verzamelde op de bodem van meertjes) bieden de mogelijkheid om absolute temperaturen te reconstrueren.

In deze thesis worden de resultaten van de toepassing van chironomide-analyse op 3 verschillende kernen gepresenteerd. Deze meertjes werden alle gevormd tijdens het vroege en middelste gedeelte van de laatste ijstijd, een tijdspanne waarin de invloed van de mens op het klimaat nog nihil was. De geregistreeerde veranderingen in de chironomide-fauna zijn daardoor dan ook een directe uiting van het natuurlijke klimaatsregime. Ook werd de invloed van overstromingen (door een rivier) op de chironomide-soorten die voorkomen in meertjes in noord Finland getest tijdens een veldwerk.

Hoofdstukken 2 en 3 van dit proefschrift laten de resultaten zien van klimaatsreconstructies (gebaseerd op chironomiden) voor noordoost Finland. De omgeving rond Sokli (noordoost Finland) wordt gekenmerkt door een atypische opbouw van de ondergrond. Het carbonaat-rijke gesteente nabij Sokli is relatief gemakkelijk verweerbaar, en hierdoor is er op deze locatie in de loop van de tijd een depressie ontstaan. In deze depressie heeft minimaal 3 keer een meertje gelegen gedurende de laatste ijstijd. Dit is zeer verrassend, aangezien er altijd van uitgegaan werd dat de Scandinavische ijskap tijdens het Weichelien over Sokli gelegen moest hebben.

De sedimenten van een meer, gedateerd tot het vroege deel van het Midden-Weichselien, zijn geanalyseerd voor chironomide-resten. Het resulterende diagram dat getoond wordt in Hoofdstuk 2 laat zien dat er een zeer diverse chironomide-fauna in het meer geleefd heeft, en dat dit meer relatief ondiep en voedselrijk moet zijn geweest. Verschillende klimaatsveranderingen hebben zich voorgedaan tijdens het bestaan van het meer, en deze hebben de chironomide-fauna sterk beïnvloed. Eén van de meest opvallende resultaten is dat de gemiddelde juli temperaturen, afgeleid van de fossiele chironomide-resten, net zo hoog waren tijdens een gedeelte van het Weichselien als dat ze heden ten dage zijn.

In Hoofdstuk 3 worden de op chironomiden gebaseerde temperatuursreconstructies vergeleken met andere proxy's voor klimaat en milieu, waarbij opvalt dat het beeld dat door de chironomiden geschetst werd ondersteund wordt door de aanwezigheid van verschillende andere indicatoren van hoge zomertemperaturen, zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van overblijfselen van mosdiertjes zoals *Fredericella indica*.

Ook worden in dit hoofdstuk simulaties gepresenteerd die gemaakt zijn met behulp van een klimaatmodel. Dit model simuleert (onder andere) de atmosferische circulatie tijdens een warm interval in het Midden Weichselien. Uit deze modelresultaten valt af te leiden dat de aanwezigheid van de Scandinavische ijskap het circulatiepatroon over noord Europa sterk beïnvloed moet hebben, resulterend in de aanvoer van zeer droge lucht naar noordoost Finland. Samen met de hoge zonneinstraling levert dit een mogelijke verklaring voor de hoge geïnterfereerde juli temperaturen voor Sokli.

Tijdens een veldwerk in 1999 werd een meerkerntje aangetroffen in de bruinkoolmijn nabij Reichwalde (oost Duitsland), en op basis van correlatie met een sedimentrecord

uit een nabije mijn werd aangenomen dat deze kern ontstaan moest zijn tijdens het vroege deel van het Midden Weichselien (Hoofdstuk 4). Verschillende proxy's werden gebruikt om de omgeving van het meertje te reconstrueren, en om ook iets te kunnen zeggen over het klimaat dat toen geheerst moet hebben. Gebruik makende van stuifmeelkorrels en fossiele resten van planten en dieren die zichtbaar zijn met het blote oog (zoals bv. zaden en bladeren) werd afgeleid dat het vroegere meertje op een overstromingsvlakte van een rivier gelegen moet hebben, en dat de vegetatie bestond uit een struiktoendra.

Vervormingen in de sedimenten die werden aangetroffen onder de parallel gelamineerde meersedimenten duiden op koude klimaatscondities voordat het meertje gevormd werd. Tijdens de invulling van het meerbekken waren de gemiddelde juli temperaturen waarschijnlijk hoog, waarbij plantenresten een minimum temperatuur van 12-14 °C suggereren. In het bovenste gedeelte van de kern is een scherpe afname van temperatuur te zien (gereconstrueerd met behulp van een semi-kwantitatieve methode gebaseerd op de chironomiden-resten die werden aangetroffen in deze kern). Deze afname in temperatuur valt samen met een sterke afname van het organische gehalte van het sediment, en met een terugkeer van permafrost condities. Dit alles samen suggereert een overgang naar koudere klimaatscondities tijdens het bovenste gedeelte van de kern.

Meertjes die gelegen zijn op een overstromingsvlakte van een rivier (zoals het voormalige meer dat gepresenteerd werd in Hoofdstuk 4) worden sterk beïnvloed door de regelmatige overstromingen die in een natuurlijke omgeving voorkomen. Deze overstromingen kunnen een sterke invloed hebben op de chironomide-fauna die in deze meertjes voorkomen, bijvoorbeeld als het gevolg van veranderingen in de aanwezigheid van voedsel of nutriënten, door beïnvloeding van de troebelheid van het water, of door de introductie van roofdieren. Hierdoor worden meertjes die gelegen zijn in een overstromingsvlakte niet gebruikt in de moderne training sets (dit zijn de groepen meertjes die gebruikt worden om de huidige relatie tussen chironomiden en hun omgeving te onderzoeken). Om te onderzoeken hoe goed onze fossiele chironomide-monsters (zoals bv. aangetroffen in oost Duitsland) en de moderne analogen (monsters genomen van de meertjes uit de training sets) met elkaar overeenkomen, hebben we 33 meertjes in noord Finland bemonsterd. Twintig van deze meertjes waren geïsoleerd van de invloed van een rivier, terwijl de andere 13 jaarlijks overstroomden.

Er werden slechts kleine verschillen aangetroffen in de fysische en chemische samenstelling van het meer en in de waterkwaliteit tussen de 2 verschillende groepen meertjes (jaarlijks overstroomde meertjes versus geïsoleerde meertjes), ondanks het grote verschil in de omgeving (bijvoorbeeld vegetatie) rond de verschillende meren. Wel werden er grote verschillen gevonden in de samenstelling van de chironomide-fauna tussen de verschillende groepen meren. Deze verschillen waren duidelijk in de concentratie van chironomiden-resten, het aantal soorten

chironomiden per meertje en ook in het relatieve voorkomen van de individuele chironomiden-soorten.

De verschillen in de samenstelling van de chironomide-fauna per meertje blijkt niet te leiden tot grote verschillen in gereconstrueerde temperatuur. Dit betekent dat voormalige meertjes, die op een overstromingsvlakte gelegen moeten hebben, toch gebruikt kunnen worden voor temperatuursreconstructie, ondanks dat de moderne meertjes die gebruikt worden in de training sets niet gelegen zijn op een overstromingsvlakte.

In Hoofdstuk 6 word de sedimentatiegeschiedenis in de bruinkoolmijnen nabij Reichwalde en Nochten (beide oost Duitsland) besproken. Gebruik makende van de zogenaamde "optically stimulated luminescence" (OSL) en koolstof-14 dateringsmethoden wordt een onafhankelijke tijdschaal gepresenteerd voor de afzetting van de zanden en grinden die in de mijnen zijn aangetroffen. Deze tijdschaal wordt vergeleken met al bekende resultaten, en een verschil tussen onze resultaten en die uit eerdere onderzoeken wordt besproken

Twee korte sedimentkerntjes, die gedateerd zijn tot het vroege en het midden van het Weichselien zijn onderzocht op chironomide-resten. De resulterende chironomide-diagrammen laten zien dat beide voormalige meertjes op een overstromingsvlakte gelegen moeten hebben, en dat ze waarschijnlijk redelijk to zeer voedselrijk waren. Kwantitatieve temperatuursreconstructies werden gemaakt met behulp van een training set uit de Zwitserse Alpen, en worden vergeleken met lokale en regionale klimaatsreconstructies.

Er zijn slechts enkele meerkernen bekend in Europa die over een langere periode (~10 duizend jaar of meer) bestaan hebben tijdens de laatste ijstijd. Eén van deze meerkernen is bekend uit de Eifel (Duitsland), en laat tenminste 4 abrupte klimaatschommelingen tussen koude periodes en warme periodes zien (Hoofdstuk 7). De chironomiden laten zien dat tijdens de koudere periodes, het meer diep en voedselarm was. Er waren veel soorten aanwezig die typisch zijn voor (extreem) koude klimaatsomstandigheden. Tijdens de warmere intervallen waren er verschillende soorten aanwezig die kunnen duiden op warmere klimaatsomstandigheden.

Deze thesis laat de resultaten zien van de eerste toepassing van chironomiden als een proxy voor temperatuur op een tijdschaal ouder dan 15 duizend jaar. Onze resultaten tonen aan dat ook op deze langere tijdschaal chironomiden een goede indicator zijn voor de omgeving van voormalige meertjes, en dat het afleiden van absolute juli temperaturen betrouwbare resultaten oplevert. Onze resultaten tonen aan dat het waarschijnlijk is dat verschillende abrupte klimaatschommelingen, zoals te zien in sedimentkernen van de oceaانبodem en in ijskernen uit Groenland, ook hun invloed hebben gehad op het Europese continent.