

## Samenvatting

Klimaatverandering is hot. Vooral omdat onze economie er aanzienlijk door beïnvloed kan worden. Meer inzicht in hoe het klimaat functioneert en in de snelheid van bijbehorende processen is van wezenlijk belang om in te kunnen spelen op de gevolgen van klimaatverandering. Om een beeld te krijgen van die processen kunnen we naar klimaatfluctuaties in het verleden kijken. Informatie over klimaatveranderingen op eeuw- tot millenniumschaal in het verleden zijn echter alleen te vinden als deze in het verleden ook ergens opgeslagen zijn. Skeletjes van algen, of foraminiferen, op de oceaanbodem en luchtbelletjes in het ijs van bijvoorbeeld Groenland of Antarctica hebben zich al bewezen. Omdat het zinken van skeletjes naar de bodem en het vastvriezen van sneeuw op de ijskappen een vrijwel continu proces is, is er in het begin van de jaren negentig al zeer gedetailleerde informatie over het Holoceen en de laatste ijstijd verzameld. Zo ontdekte men dat het klimaat van de laatste ijstijd sterk wisselend is geweest op millenniumschaal.

Deze nieuwe inzichten hebben veel vragen opgeroepen naar de aard en verspreiding van deze abrupte klimaatveranderingen. Om die aard en verspreiding in beeld te krijgen moet uitgezocht worden hoe deze veranderingen zich op verschillende plaatsen op aarde hebben gemanifesteerd. Hoge-resolutie informatie van de landmassa's is echter erg moeilijk, omdat de afzettingsprocessen waarmee signalen afkomstig van klimaatveranderingen opgeslagen worden, discontinu zijn. Bovendien zijn ze onderhevig aan erosie. Echter, dikke pakketten door de wind afgezet stof, of löss, in China lijken gedetailleerde informatie te bevatten over deze abrupte klimaatveranderingen. Om een brug te kunnen slaan tussen de informatie die in het Noordatlantisch gebied is gevonden en die in China is gevonden, richt het in dit proefschrift beschreven onderzoek zich op de löss van Europa.

Löss is in het landschap aanwezig als alles bedekkende afzettingen op lage hoogte ten opzichte van het zeeniveau. Afzettingen uit de laatste ijstijd bereiken in China diktes tot dertig meter. De löss is vaak ontsloten door eroderende rivieren of in (voormalige) baksteengroeves. Voor dit onderzoek zijn acht ontsluitingen van löss uit de laatste ijstijd in oost en centraal Europa gemonsterd in 5-cm resolutie. Drie secties liggen ten westen van de Karpaten, in het Pannonisch of Karpatisch Bekken, waarvan één in het zuiden van Hongarije en twee in het noorden van Servië. De overige vijf secties liggen ten oosten en noorden van de Karpaten, waarvan drie in Oekraïne en twee in zuidoost Polen. In Servië, Polen en noordelijk Oekraïne zijn steeds twee secties bij elkaar in de buurt gemonsterd, om onderling vergelijkbaar mogelijk te maken. De dikste sectie, welke daarmee de hoogste gemiddelde tijdsresolutie heeft, werd gevonden in Servië, waar de löss uit de laatste ijstijd ongeveer 20 m dik is.

Verskillende signalen die gevoelig zijn voor klimaatverandering, meestal aangeduid als proxy's, zijn aan de lössmonsters gemeten. Deze signalen vormen verticaal een bepaalde variabiliteit, waaruit informatie over het klimaat uit de periode van afzetting af te leiden is. Echter, om deze informatie te koppelen aan klimaatinformatie uit een ander gebied zijn ook precieze gegevens nodig over de ouderdom van de löss. Gedurende het onderzoek is duidelijk geworden dat de precisie van bestaande (luminescentie) dateringstechnieken onvoldoende is om oscillaties op millenniumschaal met een ouderdom van 75 tot 12 duizend jaar met elkaar op afstand te kunnen correleren.

Hoofdstuk 1 beschrijft een eerste proefstudie naar mogelijkheden om toch betrouwbaar te correleren, zonder nauwkeuriger dateringsmethoden. Hiertoe is uitgegaan van drie min of meer onafhankelijke proxy's (korrelgrootte  $<5.5 \mu\text{m}$ , magnetische susceptibiliteit (MS) en de Ba/Sr-ratio, zie ook hoofdstuk 2), welke zijn gemeten aan twee löss secties in Servië die slechts 6 km uit elkaar liggen. Eerst zijn matches gemaakt met één proxy per sectie, zowel twee verschillende als twee dezelfde. In de meeste gevallen kunnen maximaal vijf matches worden gemaakt op deze manier. Echter, meestal zijn er meerdere correlatiemogelijkheden. Slechts maximaal twee matches zijn uniek en dus relatief betrouwbaar.

Tot slot wordt per sectie alle informatie eerst gecombineerd, waardoor van iedere klimaatoscillatie meer informatie bekend is. Daarmee kan makkelijker onderscheid gemaakt worden tussen de oscillaties onderling, waardoor ze makkelijker uniek te correleren zijn op afstand. Deze benadering gaf een structureel beter resultaat: er kunnen nu acht matches gemaakt worden, die alle uniek zijn. Wanneer dus voldoende informatie per klimaatoscillatie bekend is, kan er op kleine afstand vrij betrouwbaar gecorreleerd worden. Met nog meer informatie per oscillatie kunnen in de toekomst mogelijk grotere afstanden worden overbrugd.

Hoofdstuk 2 beschrijft een onderzoek naar een nieuwe manier om extra klimaatinformatie af te leiden uit löss, met een relatief eenvoudige meetmethode. Korrelgrootte van löss is geaccepteerd als proxy voor wind intensiteit, meestal geassocieerd met koude periodes. Proxy's die gevoelig zijn voor temperatuur en neerslag, en dus voor warmere periodes, zijn moeilijker interpreteerbaar. Bijvoorbeeld MS wordt vaak gebruikt als neerslagproxy, maar is in sommige milieus onbetrouwbaar omdat bepaalde processen het opgeslagen klimaatsignaal juist weer afbreken. Daarom zijn nieuwe proxy's die neerslag en/of temperatuur indiceren nodig. Het hoofdstuk beschrijft hoe ratios van chemische elementen in de löss, die in meer of mindere mate vrij kunnen bewegen door het profiel, getest worden op hun betrouwbaarheid als neerslagproxy. De keuze van de geteste ratios is gebaseerd op het verschil in mobiliteit van de elementen en de processen waarmee ze vrij verwerken uit de minerale structuur van de lösskorrels. Iedere ratio bestaat uit een relatief immobiel element, gedeeld door een relatief mobiel element, welke onder invloed van neerslag en zuur in de bodem uit het profiel kan spoelen. Bij veel neerslag zorgt water dat door het löss profiel sijpelt, voor een uitslag van de ratio-waarde. De ratios zijn gekozen in de reeks Ca-Sr-Ba en toegepast op vier secties

met uiteenlopende actuele klimaatsituaties: van een sectie in een relatief nat milieu in Servië, via twee secties dicht bij elkaar in noord Oekraïne naar een sectie in een relatief droog milieu in het zuiden van Oekraïne. De dubbele sectie is gekozen om onderling vergelijkbaar mogelijk te maken. Uit de tests komt naar voren dat ratios van Ba/Sr en Sr/Ca grote overeenkomsten laten zien met het MS-sigitaal. De Ba/Sr-ratio doet dat zelfs in alle secties en lijkt daarom een veelbelovend proxy te kunnen zijn als indicator voor verweringsintensiteit in het verleden, in het bijzonder neerlag. Toekomstig onderzoek kan uitwijzen of dit proxy ook in andere milieus toepasbaar is.

Hoofdstuk 3 beschrijft een onderzoek naar twee andere neerslaggevoelige proxy's. De klimaatafhankelijke  $\delta^{13}\text{C}$ -waarde van  $\text{CO}_2$  in de lucht is via planten vastgelegd in organische stof en vervolgens via de  $\text{CO}_2$  in de bodem in calciumcarbonaat. Water speelt een bepalende rol bij het type planten ( $\text{C}_3$  of  $\text{C}_4$ ) dat samen de vegetatie vormt en het  $\delta^{13}\text{C}$ -sigitaal vastlegt in de bodem. Om die reden kan dit sigitaal als neerslagproxy worden beschouwd. In de relatief continue löss-afzettingen in de Titel-sectie in Servië werd het  $\delta^{13}\text{C}$ -sigitaal zowel in organische stof als in de calciumcarbonaten gemeten. Vervolgens werden deze signalen vergeleken met elkaar en met het MS- en korrelgrootte (<5.5  $\mu\text{m}$ )-sigitaal. Daarnaast werd gekeken naar de totale hoeveelheid organische stof, calciumcarbonaat en de C/N-ratio. De resultaten zijn opmerkelijk. Het  $\delta^{13}\text{C}$ -sigitaal in het calciumcarbonaat laat een zeer goede correlatie zien met het korrelgrootte- en MS-sigitaal, terwijl het geen enkele correlatie laat zien met het  $\delta^{13}\text{C}$ -sigitaal in de organische stof. Dit is vreemd, gezien het sigitaal in het calciumcarbonaat via de organische stof is vastgelegd. De betrouwbaarheid van het  $\delta^{13}\text{C}$ -sigitaal in het carbonaat is gecheckt met het  $\delta^{18}\text{O}$ -sigitaal, en bevestigd. Deze studie laat zien dat er waarschijnlijk processen spelen die het  $\delta^{13}\text{C}$ -sigitaal in organische stof na verloop van tijd afbreken en dat daarom voorzichtigheid is geboden met het gebruik van  $\delta^{13}\text{C}$  in organische stof als neerslagproxy.  $\delta^{13}\text{C}$  in calciumcarbonaat lijkt echter goed toepasbaar als zodanig.

Hoofdstuk 4 beschrijft een totaalbeeld van klimatologische informatie uit het laatste glaciaal uit korrelgrootteonderzoek aan alle voor dit promotieonderzoek gemonsterde secties. Atmosferische circulatiepatronen in oost en centraal Europa zijn per deel van het laatste glaciaal bediscussieerd op basis van deze gegevens. Hiertoe is uitgegaan van de aanname dat de löss afzettingen zoals ze nu aangetroffen worden het resultaat zijn van verschillende transportmechanismen van löss die afkomstig kan zijn uit verschillende brongebieden. De fijnste löss kan door de hoge atmosfeer continenten en oceanen oversteken (zie de omslag van dit boek). De middelste löss verplaatst zich in grote suspensiewolken tot enige honderden meters hoogte en kan geen hoge bergruggen of grote wateroppervlakken oversteken. De grofste löss, gedeeltelijk bestaande uit zand, verplaatst zich middels saltatie, een soort springende beweging waarbij de korrels iedere paar meter de grond raken.

Een endmember-model scheidt de gemeten korrelgrootteverdelingen van de lössmonsters in coherente groepen, of endmembers. Op basis van deze endmembers

is de massa accumulatiesnelheid (MAR) berekend. De verschillende endmember proporties en MARs zijn per deel van het laatste glaciaal in relatie gebracht met de aanwezige topografie. Een groot verschil in MAR is aangetroffen tussen de west- en oostzijde van de Karpaten en tussen het Vroeg-Midden en het Laat Pleniglaciaal van de laatste ijstijd. Dit verschil, lage MAR's in het Vroeg en Midden en hoge MAR's in het Laat Pleniglaciaal werd echter niet gevonden aan de westzijde van de Karpaten, waar de MAR constanter is geweest over de gehele periode. Deze opmerkelijke verdeling van de löss over het onderzoeksgebied kan niet alleen verklaard worden vanuit de afstand tot het voor de hand liggende brongebied voor de Skandinavische ijskap. Een verandering van de dominante windrichting van westelijk in het Vroeg en Midden Pleniglaciaal naar noordwestelijk in het Laat Pleniglaciaal is de voor de hand liggende manier om de verdeling de löss over het gebied en door de tijd heen te verklaren.

Wanneer aangenomen wordt dat grove endmembers kleiner worden in verhouding tot fijne endmembers, naarmate de afzetting verder van de bron verwijderd is, bevestigt de verdeling van de endmembers de hypothese van een veranderende dominante windrichting tussen het Midden en Laat Pleniglaciaal.

In de synthese wordt geconcludeerd dat het waarschijnlijk is dat er klimaatoscillaties op millenniumschaal geregistreerd zijn in de oost en centraal Europese löss. Het is ook waarschijnlijk dat deze oscillaties verband houden met de klimaatveranderingen welke de variaties in de eigenschappen van het Groenlandse ijs en de oceaانبodemafzettingen in de noord Atlantische regio hebben veroorzaakt. Echter, er blijven fundamentele problemen met betrekking tot het onderling correleren van deze informatie. Nieuwe studies die langeafstandscorrelaties steeds verder opschalen, gebruik makend van veel verschillende proxy's en dateringen, zullen nieuw inzicht kunnen verschaffen in de ruimtelijke stabiliteit van een klimaatsignaal.

Nieuwe proxy-informatie op de acht locaties in oost en centraal Europa die bestudeerd zijn voor dit onderzoek, hebben bijgedragen aan de kennis over het klimaat van de laatste ijstijd in deze regio. In het bijzonder grote verschillen in de MAR's door de tijd heen hebben uitgewezen dat de totale hoeveelheid verplaatst stof veel variabeler was dan verwacht, naast het feit dat modelreconstructies van de windrichting gedurende het laatste glaciaal bevestigd zijn. De teststudies naar nieuwe proxy's die gevoelig zijn voor warmere en nattere klimaatcondities hebben nieuwe inzichten verschaft. In de toekomst kunnen zij tevens bijdragen aan betrouwbare teleconnecties van klimaatgerelateerde data op millenniumschaal. Op die manier kan nieuwe proxy-informatie nieuwe mogelijkheden creëren voor de ontwikkeling van een beter inzicht in de ruimtelijke verbreding van de invloed van klimaatfluctuaties op korte tijdschaal.