

Gijs De Cort

Postdoctoraal onderzoeker
Universiteit Gent
Vakgroep Biologie, Onderzoeksgroep Limnologie
K.L. Ledeganckstraat 35
9000 Gent
gijs.decort@ugent.be

Zoutmeren als archieven van de geschiedenis van klimaat en omgeving: illustraties uit de Keniaanse Riftvallei

Oost-Afrika's waterbalans is onderhevig aan natuurlijke schommelingen die zich afspelen op verschillende tijdsschalen. Deze variatie heeft een grote impact op zowel natuurlijke ecosystemen als op de draagkracht voor duurzame landbouw, en vormt tevens de achtergrond op dewelke antropogene klimaatverandering zich afspeelt. De alkaliene zoutmeren ('sodameren') van de Keniaanse Riftvallei zijn niet alleen unieke milieus vanuit huidig biologisch en geochemisch standpunt, ze vormen ook natuurlijke archieven om klimaat- en ecosysteemdynamiek te bestuderen over grote delen van het verleden waarvoor er geen rechtstreekse observaties beschikbaar zijn. Dit wordt geïllustreerd voor de meren van het Magadi-Natron bekken en het Bogoriameer, waarvan de sedimenten de complexe interactie tussen klimaat, omgeving en menselijke activiteiten tijdens de voorbije decaden, eeuwen en millennia blootleggen.

Trefwoorden: paleolimnologie, paleoklimatologie, paleoecologie, zoutmeren, Oost-Afrika

Lacs salés comme archives de l'histoire du climat et environnement: illustrations de la Vallée du Grand Rift du Kenya.

La balance hydrique de l'Afrique de l'Est est caractérisée par une forte variabilité naturelle à de nombreuses échelles de temps. Cette variabilité a une influence importante sur les écosystèmes naturels et le potentiel pour l'agriculture durable, tout en formant la base sur laquelle le changement climatique anthropique s'exprime. Les lacs salés alcalins (lacs de soude) de la Vallée du Grand Rift du Kenya ne sont pas seulement des environnements biologiquement et géochimiquement uniques, ils contiennent aussi des archives naturelles qui nous informent sur des dynamiques climatiques et écologiques durant des périodes pour lesquelles des observations directes ne sont pas disponibles. Ceci est illustré pour les bassins versants de Magadi-Natron et Bogoria dont les sédiments montrent des interactions complexes entre climat, environnement et activités humaines au cours des dernières décennies, siècles et millénaires.

Mots clés: paléolimnologie, paléoclimatologie, paléoécologie, lacs salés, Afrique de l'Est

Salt lakes as archives of the history of climate and environment: case studies from the Kenya Rift Valley

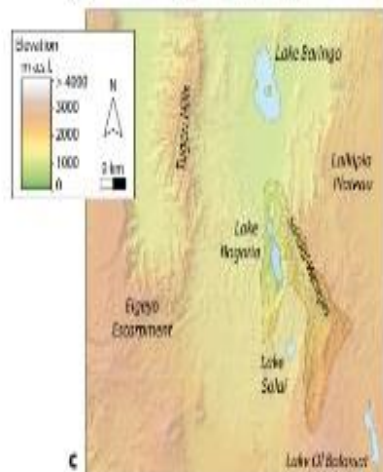
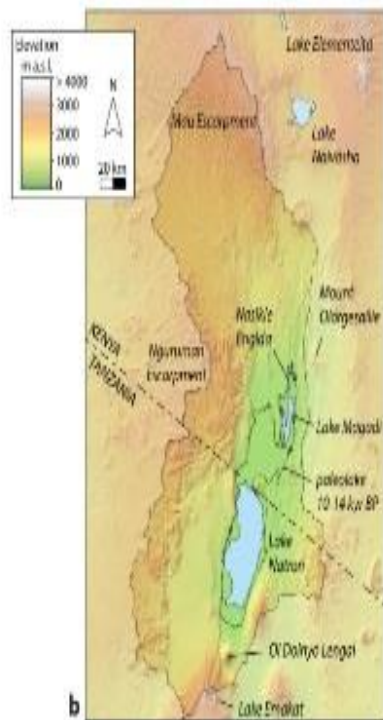
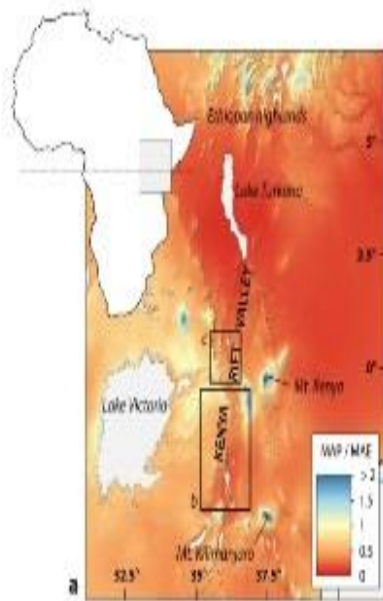
The water balance of East Africa displays marked natural variability on a plethora of time scales. This exerts significant impact on natural ecosystems and their capability to support sustainable agriculture, while also forming the baseline on which anthropogenic climate change is expressed. The saline alkaline ('soda') lakes of the Kenya Rift Valley not only are unique ecosystems from a current biological and geochemical point of view, they also provide natural archives that allow us to study the dynamics of climate and environment over long periods for which no direct human observations are available. This is illustrated for the Magadi-Natron Basin and for Lake Bogoria, whose sediments reveal the complex interaction between climate, environment and human activity over the past decades, centuries and millennia.

Key words: paleolimnology, paleoclimatology, paleoecology, salt lakes, East Africa

Het klimaat van Oost-Afrika is, in vergelijking met andere equatoriale gebieden, opvallend droog (Trewartha 1961). Verschillende factoren liggen aan de basis hiervan (Nicholson 2017), maar algemeen wordt een belangrijke rol toegedicht aan de regenschaduw van de Oost-Afrikaanse hooglanden die verhindert dat regen komende van de Atlantische Oceaan doordringt tot voorbij de oostelijke grens van het Congobekken (Sepulchre et al. 2006). Maar naast de uitgestrekte halfwoestijnen die een groot deel van de regio innemen, zorgen de invloed van topografie en grote meren op lokale luchtcirculatie voor een complexe puzzel van erg heterogene klimaatregimes (Fig. 1a). Neerslagpatronen variëren niet alleen doorheen de ruimte; Oost-Afrika wordt ook gekenmerkt door een uitgesproken variatie in neerslag en droogte doorheen de tijd. Terwijl een groot deel van de regio kwetsbaar is voor droogte met zware sociale en economische gevolgen, bevinden vijf van de zeven meest overstromingsgevoelige landen van het continent zich in Oost-Afrika (Li et al. 2016). Landbouw- en levensonderhoudstrategieën weerspiegelen deze complexiteit, gaande van pastoralisme in de droogste gebieden over gewasteelt via (soms niet-duurzame) irrigatie tot regenlandbouw in de vochtige hooglanden. Recent voert bevolkingsgroei de druk op de van nature schaarse en variabele natuurlijke watervoorraden op, bovenop de geobserveerde geleidelijke trend van verdroging van de periode maart tot juni (in een groot deel van de regio het 'lange' regenseizoen en belangrijk voor de landbouw) sinds de jaren '80 van de 20^e eeuw (Williams en Funk 2011; Funk et al. 2015). Een beter begrip van de natuurlijke variatie in neerslag en droogte in equatoriaal Oost-Afrika dringt zich op, eens te meer omdat de klimaatprojecties voor de komende decennia allesbehalve eenduidig zijn (Rowell et al. 2015).

Weerkundige meetgegevens zijn een belangrijke aanzet tot het in kaart brengen van klimaatpatronen maar gaan in het beste geval maximaal enkele eeuwen terug in de tijd, en in het geval van het overgrote deel van Afrika zelfs veel minder dan dat (Nicholson et al. 2012). Bovendien is de densiteit van operationele weerstations in Oost-Afrika een stuk lager dan in Europa. Daarom maken onderzoekers gebruik van zogenaamde natuurlijke archieven om klimaat- en ecosysteemverandering uit het verleden te bestuderen. Wereldwijd zijn de sedimenten op de bodem van meren uitermate geschikt voor dit doel, aangezien een breed gamma aan omgevingsignalen vanuit de waterkolom en het omliggende landschap doorheen de tijd worden afgezet. Paleolimnologie is de wetenschappelijke discipline die de interpretatie van vroegere condities en processen in meren en hun stroomgebieden omvat. Zeker in Oost-Afrika vormen meren de belangrijkste bron van natuurlijke klimaat- en omgevingsarchieven (Verschuren 2003), en hun uitgesproken aanwezigheid hangt nauw samen met de geologische activiteit in Oost-Afrika.

Centraal in de geologische geschiedenis van Oost-Afrika staat de divergentie van de Somali en de Nubische tektonische platen. Na een riftingsproces dat naar schatting 25 miljoen jaar geleden startte en doorgaat tot op de dag van vandaag, domineert het Oost-Afrikaanse Riftsysteem het oostelijke gedeelte van het Afrikaanse continent over een lengte van meer dan 4000 km, van Eritrea en noordelijk Ethiopië tot Mozambique (Ebinger et al. 2000). Door extensie van de aardkorst worden afschuivingsbreuken gevormd, wat leidt tot de vorming van een zogenaamde riftvallei. Het Oost-Afrikaanse Riftsysteem is in feite een opeenvolging van depressies, of afzettingsbekkens, die meren kunnen bevatten indien de klimatologische condities dit toelaten (Tiercelin and Lezzar 2002). Onder voldoende natte omstandigheden bereikt het water in deze bekkens het overstromingspunt, vanwaar het uitstroomt naar een lager gelegen bekken of de oceaan. Zulke bekkens zijn 'open' of 'exoreïsch'. Onder drogere condities echter, wanneer verdamping meer water verwijdert dan aangevoerd wordt door neerslag, rivieren en grondwater, wordt het overstromingspunt niet bereikt en vormt het meer het eindpunt van alle vloeibare water uit het stroomgebied. Dergelijke bekkens zijn 'gesloten' of 'endoreïsch'. In dit geval is verdamping de enige manier waarop water ontsnapt uit het bekken, waardoor opgeloste ionen (voornamelijk afkomstig van erosie van omliggende bodems en gesteenten)



achterblijven en het meer na verloop van tijd evolueert naar een saliene toestand. De meeste zoutmeren van het Oost-Afrikaanse Riftsysteem worden gekenmerkt door een waterchemie met hoog natrium- en carbonaatgehalte en een hoge alkaliniteit, waardoor ze als sodameren gecategoriseerd worden (Deocampo en Renaut 2016). Sodameren van uiteenlopende grootte en saliniteit zijn in grote getale terug te vinden in onder andere de Gregory Rift van het Oost-Afrikaanse Riftsysteem, waarvan het gedeelte dat binnen de landsgrenzen van Kenia valt bekend staat als de Keniaanse Riftvallei (Schagerl en Renaut 2016).

Meren in endoreïsche bekkens zijn typisch erg dynamisch en in staat om zelfs subtiele veranderingen in klimaat te weerspiegelen door veranderingen in waterniveau, die op hun beurt waterchemie, sedimentatiepatronen en biologische processen in het meer beïnvloeden. Sommige meren die uitzonderlijk reactief zijn, voornamelijk doordat hun stroomgebied aanzienlijk groter is dan het meeroppervlak zelf en naast de droge bodem van de riftvallei ook relatief natte hooglanden omvat, staan om die reden ook bekend als 'amplifier lakes' (Street 1980; Olaka et al. 2010). Dit maakt hen tot geschikte studieobjecten voor het reconstrueren van historische klimaatverandering. Naast klimaat zijn er ook andere processen die een grote invloed hebben op de Oost-Afrikaanse zoutmeer-ecosystemen. Zo zijn de getuigen van magmatisme, dat nauw samenhangt met de dynamiek van het riftingsproces, alomtegenwoordig in het Oost-Afrikaanse landschap. Trachiet, basalt, fonoliet en aanverwante vulkanische gesteenten zijn algemeen in en rondom de Keniaanse Riftvallei, en het is de erosie van deze gesteenten die de uiteindelijke hydrochemie van de terminale meren op de bodem van de sedimentaire bekkens bepaalt (Schagerl en Renaut 2016). De geomorfologie van de bekkens wordt ook in belangrijke mate beïnvloed door vulkanische complexen op de bodem van de riftvallei (Williams en Macdonald 1984). Vulkanisme voedt ook geothermale activiteit langsheen de rift. Kenia behoort tot de wereldleiders in geothermale energiewinning (Johnson en Ogeya 2018), waarbij hete stoom opgepompt wordt vanuit dieptes tot enkele kilometers om elektriciteitsturbines aan te drijven. Geothermaal water (inclusief opgeloste stoffen), dat aan het oppervlak komt als warmwaterbronnen of in enkele gevallen als geysers, vormt voor veel Keniaanse Riftmeren een belangrijk aandeel van de watertoevoer (Allen et al. 1981 BGS; Renaut et al. 2017 JEAES).

In wat volgt, wordt aan de hand van twee sites geïllustreerd hoe deze bijzondere meren ons een venster kunnen bieden op een complex verleden van ecosysteemverandering op uiteenlopende tijdschalen. De centrale informatiebron voor het besproken onderzoek is de analyse van boorkernen verzameld op de bodem van sedimentologische bekkens. Daar worden oudere afzettingen steeds weer begraven onder nieuw aangeleverd materiaal waardoor het verticale sedimentprofiel, vervat in dergelijke boorkernen, een chronologische sequentie vormt. Voor details omtrent staalname en mineralogische, geochemische, biologische en geochronologische analysetechnieken wordt de lezer doorverwezen naar de artikels die worden geciteerd in de tekst.

Magadi-Natron, zuidelijke Keniaanse Riftvallei

Het Magadi-Natronbekken omvat de Keniaans-Tanzaniaanse grens en is daarmee het zuidelijkste riftbekken van Kenia (Fig. 1b). De bodem van het bekken wordt ingenomen door de meren Magadi (100 km²) en Natron (760 km²), beide ondiepe sodameren onderhevig aan intense evaporatieve concentratie van opgeloste zouten. Verdamping is zo intens dat een groot deel van het Magadimeer seizoenal opdroogt (Fig. 1d). Op die manier heeft zich doorheen de tijd een zoutpan gevormd die bestaat uit het natriumcarbonaatmineraal trona [Na₃(HCO₃)(CO₃).2H₂O], op sommige plaatsen meerdere tientallen meters dik. De Magadi Soda Company, opgericht in 1911 en heden deel van het Indische Tata Chemicals, ontgint deze trona-afzettingen commercieel (Hughes 2008). Lacustriene afzettingen in het Magadi-Natronbekken zijn reeds decennia het onderwerp van wetenschappelijk onderzoek en tonen aan dat het bekken meerdere 'paleomeren' of 'precursormeren' heeft gekend,

voorlopers van de huidige meren Magadi en Natron (Eugster, 1980). Geomorfologische overblijfselen van oude oevers en sedimentpakketten boven het huidige waterniveau tonen aan dat tijdens de meest recente van zulke geïdentificeerde fases, die plaatsvond tussen ca. 14000 en 10000 jaar geleden, Magadi en Natron verenigd waren tot één enkel paleomeer zo'n 50 m hoger en 63 % groter dan vandaag (Hillaire-Marcel et al. 1986; Roberts et al. 1993; Fig. 1b).

De zuidelijke Keniaanse Rift is ook een belangrijke locatie voor paleoantropologisch onderzoek, met Olorgesailie (Fig. 1b) als een van de rijkste vindplaatsen van Pleistocene werktuigen en fossielen in Afrika (Isaac 1977; Potts et al. 2018). Deze zeldzame combinatie van paleoantropologisch en archeologisch materiaal en diepe lacustriene afzettingen leent zich ertoe om de rol van klimaat en omgeving in de geschiedenis van de menselijke evolutie te bestuderen. Twee internationale onderzoeksprojecten, het Olorgesailie Drilling Project en het Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project, verzamelden onlangs boorkernen uit het Magadimeer (Fig. 1e) en het naburige (en heden droge) Olorgesailiebekken. De boorkern uit Magadi is zo'n 200 m lang en vertegenwoordigt ongeveer het laatste miljoen jaar uit de geschiedenis van het bekken (Cohen et al. 2016; Owen et al. 2018; Owen et al. 2019). Verschillende indicatoren in deze boorkern wijzen op een geleidelijk verdrogende omgeving doorheen het laatste miljoen jaar (Owen et al. 2018). Zo neemt de natrium-over-calcium ratio van het sediment stelselmatig toe, wat wijst op Magadi's evolutie van zoet over brak water tot de hypersaliene condities van vandaag. Vegetatiereconstructie op basis van pollen reflecteert een gelijklopende verdroging van het omliggende landschap. Terzelfdertijd geeft die vegetatie, en ook veranderingen in de gemeenschap van diatomeeën (eencellige algen met een goed bewaard silicaskeliet die het zoutgehalte van het meer weerspiegelen), aan dat die verdroging niet lineair gebeurde maar overschreven werd door uitgesproken cycli waarbij relatief natte periodes afgewisseld werden met erg droge condities waarbij het meer sterk inkromp. Een uitgesproken periode van droogte vond plaats tussen 525000 en 400000 jaar geleden en valt daarmee samen met het Mid-Brunhes Event of MBE, een belangrijke klimatologische reorganisatie beschreven op basis van Antarctische ijskernen (EPICA 2004; Jouzel et al. 2007). Dit lijkt een sleutelperiode te zijn in de evolutie van het Oost-Afrikaanse ecosysteem en de evolutie van de mens. Enerzijds valt de droogte in Magadi samen met de lokale verdwijning van meerdere soorten grote grazers (Faith et al. 2012; Potts et al. 2018), anderzijds valt de timing van deze droogte ook samen met de vervanging van het Acheuleaanse type van stenen werktuigen door verfijndere en meer gediversifieerde Middle Stone Age (MSA) artefacten (Deino et al. 2018). Een link tussen klimaat- en landschapsverandering en de evolutie van de mens in Oost-Afrika wordt reeds lang verondersteld (Potts 1996). Het klimaatarchief van Magadi toont aan dat belangrijke evolutionaire en technologische veranderingen zich hebben afgespeeld tegen een achtergrond van uitgesproken en toenemende klimaatvariabiliteit bovenop een geleidelijke verdroging. Beide van deze processen hebben waarschijnlijk een rol gespeeld in de selectie voor hogere cognitieve eigenschappen en aanpassingsvermogen, en de uiteindelijke evolutie van moderne *Homo sapiens* (Owen et al. 2018).

Problematisch is echter dat de lange boorkern van het Magadimeer geen sedimenten van de laatste 10,000 jaar bevat, kenmerkend voor de zuidelijke Keniaanse Riftvallei waar droogtes tijdens de laatste millennia erosie van oudere afzettingen en massieve zoutvorming (In Magadi en Natron) tot gevolg hebben gehad. Dit is problematisch omdat i) zeer weinig informatie beschikbaar is over klimaat- en ecosysteemdynamiek op kortere tijdsschalen in deze belangrijke regio, en ii) recente afzettingen in het Magadibekken een bruikbaar hulpmiddel zouden zijn voor betrouwbare interpretatie van oudere sedimenten. Om deze redenen werd in de zomer van 2015 voor de eerste keer een boorkern verzameld van Nasikie Engida, een relatief klein (10 km²) meer onmiddellijk ten noordwesten van het grotere Magadimeer (Fig. 1b,f,g). Nasikie Engida heeft een maximale diepte van slechts 1.55 m, een pH van 9.5-10 en een zoutgehalte tot 270 g/l (meer dan zeven maal hoger dan zeewater). Ongeveer

80-90 % van Nasikie Engida's watervoorziening komt van heetwaterbronnen aan de noordelijke oever van het meer (R.W. Renaut, pers. comm.). Deze constante geothermale instroom zorgt ervoor dat dit meer veel minder dan Magadi (en andere Keniaanse sodameren; De Cort et al. 2013) vatbaar is voor uitdroging en de daarmee samenhangende verstoring of vernietiging van het sedimentarchief. Tegelijk toonden metingen in het veld aan dat de waterkolom anoxisch is als gevolg van het zoute en warme water, wat optimale condities voor ongestoorde sedimentatie creëert (De Cort et al. 2019). Dit wordt weerspiegeld in de 4,6-m lange boorkern die voornamelijk bestaat uit onverstoorde gelamineerde sedimenten en die, volgens datering van houtskoolresten in de modder met de koolstof-14 methode, de laatste 3 millennia vertegenwoordigt. Doorheen deze periode vertoont het sediment opvallende fluctuaties in het gehalte aan organisch materiaal, waarschijnlijk veroorzaakt door variatie in de activiteit van de seizoensale stromen in het afwateringsgebied van het meer. Hoe hoger de regenval, hoe meer deze kleine waterlopen los materiaal vanuit het droge landschap meevoeren naar het meer en op die manier sedimentierend organisch materiaal, geproduceerd door zoutminnende algen in de waterkolom, verdund wordt. Deze patronen wijzen op een significante hydroklimaatvariabiliteit op tijdschalen van decaden tot enkele eeuwen; veel korter dan de eerder besproken gebeurtenissen uit de lange boorkern van Magadi.

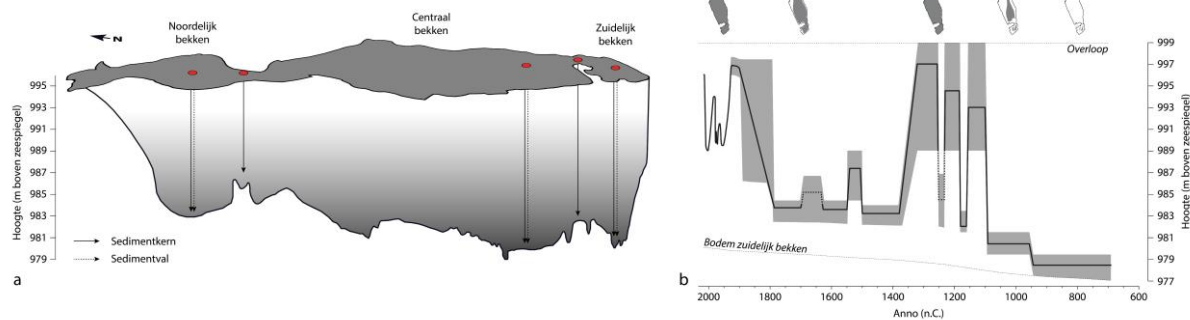
Een tweede belangrijk element in het sedimentarchief van Nasikie Engida is de plotse verschijning van het natriumcarbonaatmineraal nahcoliet [$\text{NaH}(\text{CO}_3)$] rond 2300 jaar geleden, dat sindsdien episodisch is neergeslagen als pure laagjes van enkele millimeters tot centimeters dik (De Cort et al. 2019). Dit is bijzonder, aangezien dit het enige gekende voorbeeld van modern lacustrien nahcoliet ter wereld is. De vorming van nahcoliet vereist naast een hoog zoutgehalte ook CO_2 concentraties die minstens enkele malen hoger liggen dan de huidige atmosferische CO_2 concentratie (Eugster 1966). Om die reden werden oudere nahcolietafzettingen in het westen van de Verenigde Staten in het verleden geïnterpreteerd als indicatoren van hoge atmosferische CO_2 concentraties (Lowenstein and Demicco 2006; Jagniecki et al. 2015). Nasikie Engida toont echter aan dat atmosferisch CO_2 niet aan de basis hoeft te liggen van lacustrien nahcoliet. In het Magadi-Natronbekken vindt op grote schaal vrijstelling van CO_2 uit de aardmantel langsheen tectonische breuklijnen plaats wat, indien extrapoleerbaar naar het gehele Oost-Afrikaanse Riftsysteem, significant bijdraagt aan het atmosferisch CO_2 reservoir (Lee et al. 2016). Het is vermoedelijk de injectie van dergelijk geothermaal CO_2 , in combinatie met het dense zoute water dat uitwisseling met en vrijstelling naar de atmosfeer bemoeilijkt, dat nahcolietvorming mogelijk maakt (De Cort et al. 2019).

Deze bevindingen vormen het kader waarin het sediment van Nasikie Engida moet geïnterpreteerd worden als paleoecologisch archief. De hydrothermale activiteit zorgt enerzijds voor de continuïteit van het archief maar kan anderzijds ook onderhevig zijn aan variatie (hoewel het grondwater uiteindelijk wel gevoed wordt door percolatie van regen op hoger gelegen gebieden). Studies van de isotopensamenstelling van koolstof in geothermaal CO_2 (Lee et al. 2017) en nahcoliet (De Cort et al. 2019) suggereren bovendien een mogelijk variabele oorsprong en flux van CO_2 waardoor verdere complicatie tussen klimaat en het aquatische milieu niet valt uit te sluiten. Verder onderzoek naar bijkomende paleoecologische indicatoren, onder andere ook afkomstig uit het terrestrisch milieu zoals fossiel pollen (dat de rondomliggende vegetatie weerspiegelt) en houtskool (als indicator van branden in het lokale landschap), moet toelaten om de interactie tussen klimaat, geothermie en lacustriene sedimentatie verder te verduidelijken. Daardoor wordt Nasikie Engida niet alleen tot paleoecologisch archief voor de laatste 3000 jaar ontwikkeld, maar ook tot een waardevol modern analoog dat de interpretatie van oude afzettingen van zoutmeren elders in Oost-Afrika (zie ook verder) en de wereld kan onderbouwen.

Bogoria, centrale Keniaanse Riftvallei

Een 200-tal km ten noorden van Nasikie Engida ligt het Bogoriameer, een sodameer met een oppervlakte van ongeveer 40 km² en een diepte van 15 m (in 2014, Fig. 1c,j). Het meer, inclusief onmiddellijke omgeving, is beschermd als het Lake Bogoria National Reserve en vooral bekend om zijn warmwaterbronnen, geisers (Fig. 1h) en de grote aantallen kleine flamingo's (*Phoeniconaias minor*) die het als pleisterplaats gebruiken op zoek naar optimale voedselcondities (Fig. 1i). Het meer bestaat uit drie bekkens die van elkaar verschillen in grootte en diepte en die van elkaar gescheiden worden door ondiepe zadels (Fig. 2a). Met behulp van een 'gravity corer' en een 'single-drive piston corer', ingezet vanop een vlot gesteund door twee opblaasbare boten, werden boorkernen met een lengte van 1,2 tot 3 m verzameld op vijf verschillende locaties in het meer (het diepste punt van elk bekken en op de twee zadels; De Cort et al. 2018). Houtskoolfragmenten uit deze boorkernen werden gedateerd via de koolstof-14 methode wat, in combinatie met bijkomende lood-210 en cesium-137 datering van sedimenten afgezet tijdens de voorbije ca. 100 jaar, resulteerde in een goed begrip van de relatie tussen diepte en ouderdom. De langste kernen vertegenwoordigen de voorbije 1300 jaar en illustreren duidelijk een dynamisch sedimentatieregime dat in verband gebracht kan worden met veranderingen in het waterniveau van het meer (De Cort et al. 2013; De Cort et al. 2018). Opeenvolgende periodes van trona- en nahcolietafzetting, tijdens dewelke Bogoria vermoedelijke sterke gelijkenissen vertoonde met respectievelijk het huidige Magadimeer en Nasikie Engida, werden gevolgd door periodes waarin sedimentatie gedomineerd werd door klei of silt van terrestrische oorsprong. Sedimentatie op de zadels vond enkel plaats wanneer het meer genoeg water bevatte om ze onder water te zetten. Interpretatie van de gegevens uit de sedimentkernen werd ondersteund door sedimentvallen die geïnstalleerd werden in de waterkolom in elk van de drie bekkens (Fig. 2a). Deze vangen zinkend materiaal en werden gedurende één jaar seizoenaal geledigd, meerbepaald aan het einde van de twee regenseizoenen (maart-mei en oktober-november), het dominante droog seizoen (december-februari) en de periode juni-september die voor Bogoria, in tegenstelling tot de meer zuidelijke Keniaanse riftbekkens, geen volwaardig droogseizoen is. Deze vallen lieten toe om het sedimentatieproces op verschillende locaties in het meer in kaart te brengen, niet alleen wat betreft overeenkomsten en verschillen tussen de drie bekkens, maar ook in functie van de seizoenen (en dus veranderende weersomstandigheden). De resulterende reconstructie toont een variabel waterniveau gedreven door hydroklimatologische veranderingen, met een amplitude die de gekende variatie van de 20^e en 21^e eeuw sterk overstijgt (Fig. 2b). Tijdens droge periodes anno 700-1100 n.C. en 1350-1800 n.C. stond het meer zo goed als droog of was het opgesplitst in afzonderlijke meren van maximaal enkele meters diep. Enkel van 1100 tot 1350 n.C. en tijdens de recentste twee eeuwen bestond het meer onder de huidige configuratie van drie met elkaar verbonden bekkens. Vegetatiereconstructie op basis van pollen toont dat er op momenten van hoog waterniveau een uitbreiding van afromontane vegetatie en bosrijke savanne plaatsvond, terwijl tijdens periodes van laagstand grasland aan terrein won (van der Plas et al. 2019). Dit is hoogst relevant aangezien landbouw zelfs onder huidige omstandigheden, die relatief vochtig lijken te zijn in vergelijking met het grootste deel van de laatste 1300 jaar, steunt op niet-duurzame irrigatiepraktijken (bv. Terer et al. 2012) en dus sterk te lijden zou hebben onder een terugkeer naar drogere condities.

Bovendien reflecteren de sedimenten ondubbelzinnig een toenemende menselijke impact op het landschap in het afwateringsgebied van het Bogoriameer. In eerste instantie vertoont de vegetatie sinds het midden van de 15^e eeuw n.C. de aanwezigheid van graangewassen in combinatie met een achteruitgang van bomen (van der Plas et al. 2019). Deze evolutie kan niet uitsluitend door klimaatverandering verklaard worden en is minstens voor een deel te wijten aan houtwinning en het vrijmaken van land voor landbouw. Daarnaast wijst een toename in de sporen van schimmels die voorkomen op de uitwerpselen van grote herbivoren aan dat veehouderij een significante praktijk



werd vanaf het midden van de 17^e eeuw n.C. Doorheen de 19^e en 20^e eeuw leidde een toename in landbouw en graasdruk tot bodemerosie, die vooral sinds 1970 voor een drastische toename heeft geleid van de hoeveelheid sediment die via de rivier Sandai-Waseges in het Bogoriameer terechtkomt (De Cort et al. 2018). Dit afgespoelde bodemmateriaal, geheel afkomstig van buiten de grenzen van het Lake Bogoria National Reserve, zorgt voor een snelle opvulling van het noordelijk bekken van het meer en betekent mogelijk een bedreiging voor dit unieke aquatische ecosysteem. Zo bedroeg de gemiddelde geschatte sedimentatiesnelheid in het noordelijk bekken 0,54 g per cm² per jaar tijdens de periode 1970-2014, wat neerkomt op meer dan een verzesvoudiging ten opzichte van het gemiddelde tussen 1850 en 1950, en zich vertaalde in de afzetting van een meter sediment. Het is cruciaal om met deze evolutie rekening te houden in komende beheersplannen voor het reservaat en landbouwontwikkeling in omliggende gebieden.

Samenvatting

Oost-Afrika's zoutmeren weerspiegelen de klimatologische condities en geologische activiteit van de regio. Naast hun waarde als unieke ecosystemen en centra van biodiversiteit, vormen ze natuurlijke archieven voor historische klimaat- en omgevingsverandering in een deel van de wereld waar andere bronnen van dergelijke informatie zeldzaam zijn. Hun sedimenten tonen aan dat het Oost-Afrikaanse klimaat varieert op een veelheid aan tijdschalen. Hiervan licht het besproken onderzoek in de Magadi-Natron en Bogoria bekkens, enerzijds omtrent geleidelijke verandering over honderdduizenden jaren en anderzijds omtrent variatie over decaden tot eeuwen tijdens de laatste paar millennia, slechts een tipje van de sluier op. Alleen door deze natuurlijke dynamiek te beschrijven, kunnen we op termijn de achterliggende processen begrijpen. In die zin vormen de nieuw ontwikkelde archieven van Nasikie Engida en het Bogoriameer belangrijke bijdragen aan de ruimtelijke spreiding van paleoecologische data doorheen Oost-Afrika, die voldoende hoog moet zijn om de regionale heterogeniteit van klimaat- en ecosysteemverandering in kaart te brengen. Oost-Afrikaanse paleolimnologie biedt een ruime historische context van landschapsevolutie en laat toe de interactie van de mens met zijn leefomgeving te onderzoeken, van het ontstaan van onze soort tot en met de meest recente impact op het milieu.

Dankwoord

Bijdragen van de auteur aan dit werk werden gesteund door BELSPO Brain-be project BR/121/A2/PAMEXEA, Fonds Wetenschappelijk Onderzoek (FWO) Vlaanderen en de Belgian American Educational Foundation (BAEF).

Figuren

Fig. 1 a) Kaart van Oost-Afrika ingekleurd volgens de CGIAR-CSI Globale Ariditeitsindex, gedefinieerd als verhouding tussen de gemiddelde jaarlijkse neerslag en de gemiddelde jaarlijkse evapotranspiratie (MAP/MAE; Trabucco en Zomer, 2009). De grijze rechthoek in de inzetkaart van het Afrikaanse continent toont het gebied weergegeven in (a), de twee zwarte rechthoeken in (a) vertegenwoordigen de gebieden weergegeven in (b) en (c). **b)** Reliëf en belangrijke componenten van het Magadi-Natronbekken (zwart omlijnd) en omliggend gebied van de zuidelijke Keniaanse Riftvallei en noordelijk Tanzania. **c)** Reliëf en belangrijke componenten van het Bogoriabekken (zwart omlijnd) en omliggend gebied van de centrale Keniaanse Riftvallei. **d)** Het Magadimeer, een seizoenaal overstromende zoutpan. Foto: R.W. Renaut. **e)** De boorsite van het Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project op het Magadimeer. Foto: <https://hspdp.asu.edu>. **f)** Nasikie Engida, gezien vanaf de zuidelijke oever waar de hoge saliniteit sporadisch een drijvende zoutkorst vormt aan het wateroppervlak. Foto: R.W. Renaut. **g)** Nasikie Engida, gezien vanaf de noordoostelijke oever. Foto: G. De Cort. **h)** Geiser op de Loburu geothermale site op de westelijke oever van het Bogoriameer. Foto: R.W. Renaut. **i)** Flamingo's aan het Bogoriameer. Foto: R.W. Renaut. **j)** Het Bogoriameer, gezien vanuit het zuidwesten. Foto: G. De Cort.

Fig. 2 a) Bathymetrie van het Bogoriameer in 2014 langsheen een noord-zuid transect, met aanduiding van de drie meerbekkens en locaties waar sedimentkernen verzameld en sedimentvallen geïnstalleerd werden. Figuur aangepast van Hickley et al. (2003). **b)** Reconstructie van het waterniveau van het Bogoriameer sinds 700 n.C. De zwarte lijn stelt de beste schatting voor, het grijze vlak de zone waarbinnen variatie mogelijk is. Bovenaan wordt voor belangrijke fases de configuratie van het meerniveau weergegeven, in vergelijking met de omtrek van het meer zoals tijdens het grootste gedeelte van de 20^e eeuw. Figuur aangepast van De Cort et al. (2018).

Referenties

- Allen, D.J., Darling, W.G., Burgess, W.G. 1981. Geothermics and hydrogeology of the southern part of the Kenya Rift Valley with emphasis on the Magadi-Nakuru area. British Geological Survey Research Report SD/89/1.
- Cohen, A., Campisano, C., Arrowsmith, R., Asrat, A., Behrensmeyer, A.K., Deino, A., Feibel, C., Hill, A., Johnson, R., Kingston, J., Lamb, H., Lowenstein, T., Noren, A., Olago, D., Owen, R.B., Potts, R., Reed, K., Renaut, R.W., Schäbitz, F., Tiercelin, J.-J., Trauth, M.H., Wynn, J., Ivory, S., Brady, K., O'Grady, R., Rodysill, J., Githiri, J., Russell, J., Foerster, V., Dommain, R., Rucina, S., Deocampo, D., Russell, J., Billingsley, A., Beck, C., Dorenbeck, G., Dullo, L., Feary, D., Garelo, D., Gromig, R., Johnson, T., Junginger, A., Karanja, M., Kimburi, E., Mbuthia, A., McCartney, T., McNulty, E., Muiruri, V., Nambiro, E., Negash, E. W., Njagi, D., Wilson, J.N., Rabideaux, N., Raub, T., Sier, M.J., Smith, P., Urban, J., Warren, M., Yadeta, M., Yost, C., Zinaye, B. 2016 The Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project: Inferring the environmental context of human evolution from eastern African rift lake deposits. *Scientific Drilling* 21: 1–16. doi: 10.5194/sd-21-1-2016
- De Cort, G., Bessems, I., Keppens, E., Mees, F., Cumming, B., Verschuren, D. 2013. Late-Holocene and recent hydroclimatic variability in the central Kenya Rift Valley: The sediment record of hypersaline lakes Bogoria, Nakuru and Elementeita. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 388: 69–80. doi: 10.1016/j.palaeo.2013.07.029
- De Cort, G., Verschuren, D., Ryken, E., Wolff, C., Renaut, R.W., Creutz, M., Van der Meeren, T., Haug, G., Olago, D.O., Mees, F. 2018. Multi-basin depositional framework for moisture-balance reconstruction during the last 1300 years at Lake Bogoria, central Kenya Rift Valley. *Sedimentology* 65: 1667-1696. doi: 10.1111/sed.12442
- De Cort, G., Mees, F., Renaut, R.W., Sinnesael, M., Van der Meeren, T., Goderis, S., Keppens, E., Mbuthia, A., Verschuren, D. 2019. Late-Holocene sedimentation and sodium-carbonate deposition in the hypersaline alkaline lake Nasikie Engida, southern Kenya Rift Valley. *Journal of Paleolimnology* 62: 279-300
- Deino, A.L., Behrensmeyer, A.K., Brooks, A.S., Yellen, J.E., Sharp, W.D., Potts, R. 2018. Chronology of the Acheulean to Middle Stone Age transition in eastern Africa. *Science* 360: 95-98
- Deocampo, D. M., Renaut, R.W. 2016. Geochemistry of African soda lakes. In: Schagerl, M. (ed.) *Soda lakes of East Africa*, p. 77-96. Springer International Publishing, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-28622-8_4
- Ebinger, C.J., Yemane, T., Hardling, D.J., Tesfaye, S., Kelley, S., Rex, D.C. 2000. Rift deflection, migration, and propagation: linkage of the Ethiopian and Eastern rifts. *Africa. Geol. Soc. Am. Bull.* 112(2): 163-176
- EPICA community members. 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice cores. *Nature* 429: 623-628
- Eugster, H.P. 1966. Sodium carbonate–bicarbonate minerals as indicators of PCO₂. *Journal of Geophysical Research* 71: 3369–3377
- Eugster, H.P. 1980. Lake Magadi, Kenya, and its precursors. *Developments in Sedimentology* 28: 195-232
- Faith J.T., Potts, R., Plummer, T.W., Bishop, L.C., Marean, C.W., Tryon, C.A. 2012. New perspectives on middle Pleistocene change in the large mammal faunas of East Africa: *Damaliscus hypsodon* sp. nov. (Mammalia, Artiodactyla) from Lainyamok, Kenya. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 361: 64–93

- Funk, C., Nicholson, S.E., Landsfeld, M., Klotter, D., Peterson, P., Harrison, L. 2015. The Centennial Trends Greater Horn of Africa precipitation dataset. *Scientific Data* 2: 150050. doi: 10.1038/sdata.2015.50
- Hickley, P., Boar, R.R., Mavuti, K.M. 2003. Bathymetry of Lake Bogoria, Kenya. *Journal of East African Natural History* 92(1): 107-117
- Hillaire-Marcel, C., Carro, O., Casanova, J. 1986. ¹⁴C and Th/U dating of Pleistocene and Holocene stromatolites from East African paleolakes. *Quaternary Research* 25: 312–329. doi: 10.1016/0033-5894(86)90004-9
- Hughes, L. 2008. Mining the Maasai Reserve: The Story of Magadi. *Journal of East African Studies* 2: 134–164. doi: 10.1080/17531050701847326
- Isaac, G.L. 1977. *Ologesailie: Archeological studies of a Middle Pleistocene lake basin in Kenya*. University of Chicago Press, Chicago, USA
- Jagniecki, E.A., Lowenstein, K., Jenkins, D.M., Demicco, R.V. 2015. Eocene atmospheric CO₂ from the nahcolite proxy. *Geology* 43:G36886.1. doi: 10.1130/G36886.1
- Johnson, O.W., Ogeya, M. 2018. Risky business: developing geothermal power in Kenya. Stockholm Environment Institute Discussion Brief. Stockholm, Sweden.
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J.C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D., Schilt, A., Schwander, J., Selmo, E., Souchez, R., Spahni, R., Stauffer, B., Steffensen, J.P., Stenni, B., Stocker, T.F., Tison, J.L., Werner, M., Wolff, E.W. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science* 317: 793-796
- Lee, H., Muirhead, J.D., Fischer, T.P., Ebinger, C.J., Kattenhorn, S.A., Sharp, Z.D., Kianji, G. 2016. Massive and prolonged deep carbon emissions associated with continental rifting. *Nature Geoscience* 9: 145–149. doi: 10.1038/ngeo2622
- Lee, H., Fischer, T.P., Muirhead, J.D., Ebinger, C.J., Kattenhorn, S.A., Sharp, Z.D., Kianji, G., Takahata, N., Sano, Y. 2017. Incipient rifting accompanied by the release of subcontinental lithospheric mantle volatiles in the Magadi and Natron basin, East Africa. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 346: 118-133.
- Li, C. J., Chai, Y. Q., Yang, L. S., Li, H. R. 2016. Spatio-temporal distribution of flood disasters and analysis of influencing factors in Africa,. *Natural Hazards* 82(1): 721–731. doi:10.1007/s11069-016-2181-8
- Lowenstein, T.K., Jagniecki, E.A., Carroll, A.R., Smith, M.E., Renaut, R.W., Owen, R.B. 2017. The Green River salt mystery: What was the source of the hyperalkaline lake waters? *Earth-Science Reviews* 173: 295–306. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.07.014
- Nicholson, S.E. 2017. Climate and climatic variability of rainfall over eastern Africa. *Reviews of Geophysics* 55: 590-635
- Nicholson, S.E., Dezfuli, A.K., Klotter, D. 2012. A two-century precipitation dataset for the continent of Africa. *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00212.1
- Olaka L., Odada, E.O., Trauth, M.H., Olago, D.O. 2010. The sensitivity of East African rift lakes to climate fluctuations. *Journal of Paleolimnology* 44: 629-644
- Owen, R.B., Muiruri, V.M., Lowenstein, T.K., Renaut, R.W., Rabideaux, N., Luo, S., Deino, A.L., Sier, M.J., Dupont-Nivet, G., McNulty, E.P., Leet, K., Cohen, A., Campisano, C., Deocampo, D., Shen, C., Billingsley, A., Mbutia, A. 2018. Progressive aridification in East Africa over the last half million years and implications for human evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115(44): 11174-11179
- Owen, R.B., Renaut, R.W., Muiruri, V.M., Rabideaux, N.M., Lowenstein, T.K., McNulty, E.P., Leet, K., Deocampo, D., Luo, S., Deino, A.L., Cohen, A., Sier, M.J., Campisano, C., Shen, C., Billingsley, A., Mbutia, A., Stockhecke, M. 2019. Quaternary history of the Lake Magadi Basin, southern Kenya

- Rift: tectonic and climatic controls. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 518: 97-118
- Potts, R. 1996. Evolution and climate variability. *Science* 273: 922-923
- Potts, R., Behrensmeier, A.K., Faith, J.T., Tryon, C.A., Brooks, A.S., Yellen, J.E., Deino, M.L., Kinyanjui, R., Clark, J.B., Haradon, C.M., Levin, N.E., Meijer, H.J.M., Veatch, E.G., Owen, R.B., Renaut, R.W. 2018. Environmental dynamics during the onset of the Middle Stone Age in eastern Africa. *Science* 360: 86-90
- Renaut R.W., Owen, R.B., Ego, J.K. 2017. Geothermal activity and hydrothermal mineral deposits at southern Lake Bogoria, Kenya Rift Valley: impact of lake level changes. *Journal of African Earth Sciences* 129: 623-646
- Roberts, N., Taieb, M., Barker, P., Damnati, B., Icole, M., Williamson, D. 1993. Timing of the Younger Dryas event in East Africa from lake level changes. *Nature* 366: 146–148. doi: 10.1038/366146a0
- Rowell, D.P., Booth, B.B.B., Nicholson, S.E., Good, P. 2015. Reconciling past and future rainfall trends over East Africa. *Journal of Climate* 28: 9768-9788
- Sepulchre, P., Ramstein, G., Fluteau, F., Schuster, M., Tiercelin, J.-J., Brunet, M. 2006. Tectonic uplift and eastern Africa aridification. *Science* 313: 1419-1423
- Schagerl, M., Renaut, R.W. 2016. Dipping into the soda lakes of East Africa. In: Schagerl, M. (ed.) *Soda lakes of East Africa*, p. 3-24. Springer International Publishing, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-28622-8_1
- Street, F.A. 1980. The relative importance of climate and local hydrogeological factors in influencing lake-level fluctuations. *Palaeoecology of Africa* 12: 137-158.
- Terer, T., Muasya, A.M., Dahdouh-Guebas, F., Ndiritu, G.G., Triest, L. 2012. Integrating local ecological knowledge and management practices of an isolated semi-arid papyrus swamp (Loboi, Kenya) into a wider conservation framework. *Journal of Environmental Management* 93: 71-84
- Tiercelin, J.-J., Lezzar, K.-E. 2002. A 300 million years history of rift lakes in Central and East Africa: and updated broad review. In: Odada EO, Olago DO (eds) *The East African great lakes: limnology, palaeolimnology and biodiversity*. *Advances in Global Change Research*, 12: 3-60. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Trabucco, A., Zomer, R. 2009. Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET) geospatial database. CGIAR Consortium for Spatial Information. <http://www.csi.cgiar.org>
- Trewartha, G. T. 1961. Africa, in *The Earth's Problem Climates*, 334 pp., Univ. of Wisconsin, Madison.
- van der Plas, G., De Cort, G., Petek, N., Wuytack, T., Colombaroli, D., Lane, P.J., Verschuren, D. 2019. Distinct phases of natural landscape dynamics and intensifying human activity in the central Kenya Rift Valley during the past 1300 years. *Quaternary Science Reviews* 218: 91-106.
- Verschuren, D. 2003. Lake-based climate reconstruction in Africa: progress and challenges. *Hydrobiologia* 500: 315-330
- Williams, A.P., Funk, C. 2011. A westward extension of the warm pool leads to a westward extension of the Walker circulation, drying eastern Africa. *Climate Dynamics* 37: 2417-2435
- Williams, L.A.J., Macdonald, R. 1984. Late Quaternary caldera volcanoes of the Kenya Rift Valley. *Journal of Geophysical Research* 89(B10): 8553-8570