

prof.dr. J.-B.W. Stuut

STOF TOT NADENKEN



prof.dr. J.-B.W. Stuut

STOF TOT NADENKEN

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van bijzonder hoogleraar Aeolische Sedimentologie, vanwege het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ), bij de Faculteit der Bètawetenschappen van de Vrije Universiteit op donderdag 21 oktober 2021.

Mevrouw de rector, beste collega's, familie en vrienden, jongens en meisjes, hier in de aula en aan de andere kant van het scherm,

Per 1 maart van dit jaar ben ik benoemd tot bijzonder hoogleraar aan de Vrije Universiteit Amsterdam, op de leerstoel "aeolische sedimentologie". Het *bijzondere* zit 'm erin dat het NIOZ mij uitleent aan de VU om deze leerstoel te bekleden en dat de VU mij de volledige vrijheid geeft om zelf deze leerstoel in te vullen in termen van onder *zoek* en onder *wijs*. Ik ben zowel de VU als het NIOZ daar zeer erkentelijk voor.

Ik kan me voorstellen dat u geen idee heeft wat aeolische sedimentologie is of wat je eraan hebt. Daarom hoop ik u in deze rede te laten zien wat het inhoudt, u te laten delen in mijn enthousiasme voor dit vakgebied en hoe ik denk dat het een belangrijke bijdrage kan leveren aan het vinden van antwoorden op actuele vragen.

Sedimentologie omvat de studie van sedimenten zoals grind, zand, silt en klei 'in natuurlijke beweging' door de zwaartekracht of door water, ijs en –inderdaad– wind, zowel als het resultaat van die verschillende transportmechanismen in de vorm van afzettingen daarvan.

Aeolisch komt van Aeolus, een figuur uit de Griekse en Romeinse mythologie. Hij was een zoon van Poseidon (god van de zeeën en oceanen) en werd door Zeus aangesteld als bewaarder van de winden: Boreas (noordenwind) – Notus (zuidenwind) – Eurus (oostenwind) en Zephyrus (westenwind). Aeolisch is daarvan afgeleid en heeft dus alles te maken met de wind.



Aeolische sedimentologie is dus de studie van wind-geblazen sedimenten. Dat wil zeggen: zowel deeltjes die daadwerkelijk in de lucht rond geblazen worden als een heel scala aan sedimentkorrels in afzettingen, waarbij het sediment oorspronkelijk door de wind werd aangevoerd. De meest recente schattingen laten zien dat 2 Miljard Ton stof jaarlijks wordt gemobiliseerd in woestijnen, waarvan $\sim\frac{3}{4}$ weer op land wordt afgezet en $\sim\frac{1}{4}$ in zee terecht komt¹.

Een redelijk bekend voorbeeld van een typische aeolische afzetting op land is löss maar we vinden ook woestijnstof terug op de bodems van meren en zeeën en natuurlijk ook op sneeuw en ijs.

Iedereen die wel eens naar het strand is geweest, is –misschien zonder zich daarvan bewust te zijn geweest—waarschijnlijk ook getuige geweest van aeolische sedimentologie, al ben ik mij ervan bewust dat ik misschien met andere intenties naar het strand ga dan de gemiddelde mens...

Het grote voordeel van woestijnstof dat wordt afgezet op ijs is dat je het makkelijk waarneemt. Hier ziet u voorbeelden van woestijnstof afgezet op sneeuw zoals afgelopen winter toen Saharastof de Alpen oranje kleurde. Het heeft echter ook grote consequenties in termen van klimaat doordat het bijvoorbeeld de albedo verandert.

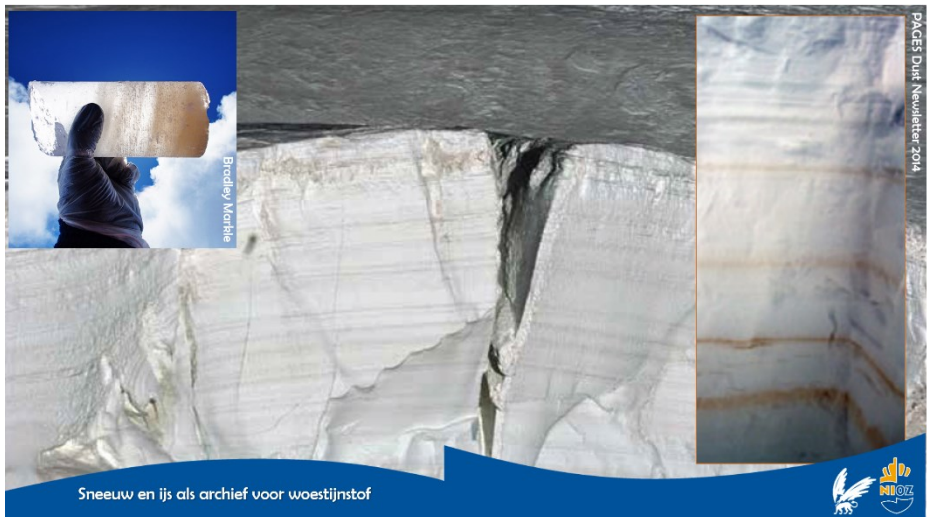


Iedereen die wel eens geschied heeft weet wat albedo is: weerkaatsing van zonlicht dat op lichte oppervlakken –zoals sneeuw—veel beter gaat dan op donkere oppervlakken, die warmte juist opnemen. Op een zonnige dag skiën gaat eigenlijk niet zonder zonnebril en elke ijsmeester weet dat het randje rond de ijsbaan niet zwart maar wit moet zijn want anders smelt het ijs als de zon erop schijnt. Het effect

op de albedo wordt duidelijk bij de vergelijking van de satellietfoto van de besneeuwde gletsjers in de Sierra Nevada vóór en ná een stofstorm.

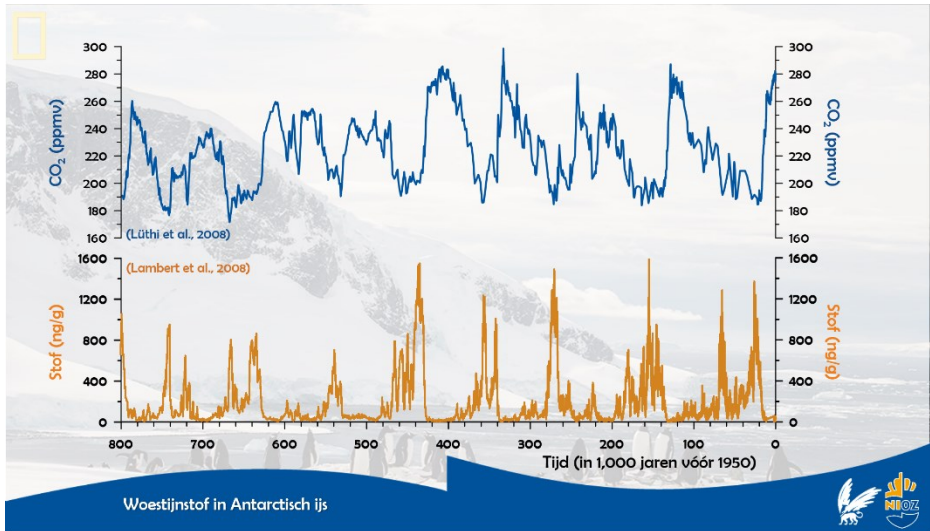
Omdat een gletsjer eigenlijk altijd wel weer aangevuld wordt met sneeuw, bouwt zich op zo'n gletsjer of bijvoorbeeld een ijskap op één van de polen langzaam maar zeker een archief op van stof en ijs door de tijd. Deze foto laat een prachtige horizontaal gelaagde afwisseling van sneeuw en woestijnstof zien in de bergen van de Kaukasus, Rusland.

Als je verticaal boort in zo'n sneeuwvlakte of gletsjer, krijg je een ijskern en kun je zien hoe 'stoffig' de atmosfeer was in het verleden.



Hier ziet u een voorbeeld van de stofmetingen in zo'n ijskern; de beroemde EPICA Dome C ijskern op Antarctica die de afgelopen 800,000 jaar beschrijft². Dit is een typisch voorbeeld van variaties op de geologische tijdsschaal. [Ik refereer als geoloog graag naar die tijdsschaal, vooral wanneer ik weer eens te laat ben....] 800,000 jaar is erg lang op de menselijke tijdsschaal en biedt dus de unieke kans het klimaat te bestuderen vóórdat de mens het begon te beïnvloeden. Doordat de jaarlijkse aangroei van de sneeuw goed te zien is in de ijskern, weten we heel goed hoe oud dit materiaal is en zo kunnen we dus een prachtige opname van stof-in-de-atmosfeer reconstrueren. Duidelijk te zien is dat er door het geologische verleden periodes waren waarin heel veel stof werd afgezet en periodes waarin maar weinig stof werd afgezet.

Het unieke van zulke ijskernen is dat ook de hoeveelheid atmosferisch CO₂ is vastgelegd in de luchtbellens in de sneeuw³, en ook daarin zien we gedurende de afgelopen 800,000 jaar sterke schommelingen:



er waren in deze periode grofweg acht periodes van relatief lage CO₂ concentraties; zogenaamde *ijstijden* met wereldwijd:

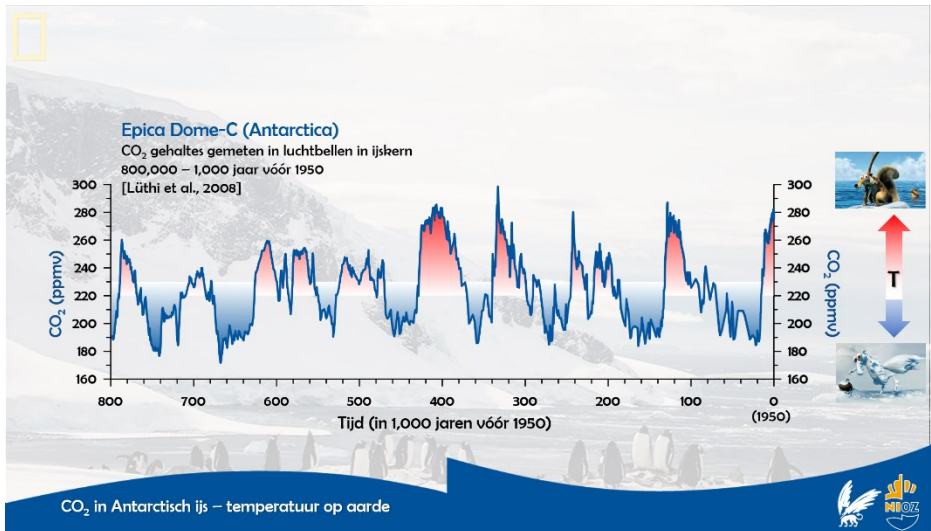
- lagere temperaturen (gemiddeld genomen 6° lager⁴),
- enorme ijskappen die grote delen van Europa en Noord-Amerika bedekten⁵,
- grote verschuivingen in klimaatgordels⁶,
- verbreiding van dieren en planten gespecialiseerd in koude⁷, en
- een daling van het gemiddelde zeeniveau van ~120m⁸.

Deze veranderingen en verschuivingen gingen –op de menselijke tijdschaal gerekend– relatief langzaam; natuurlijke systemen hadden tientallen tot honderden jaren nodig om zich aan te passen aan de veranderingen in de atmosfeer en versterkten elkaar waarschijnlijk.

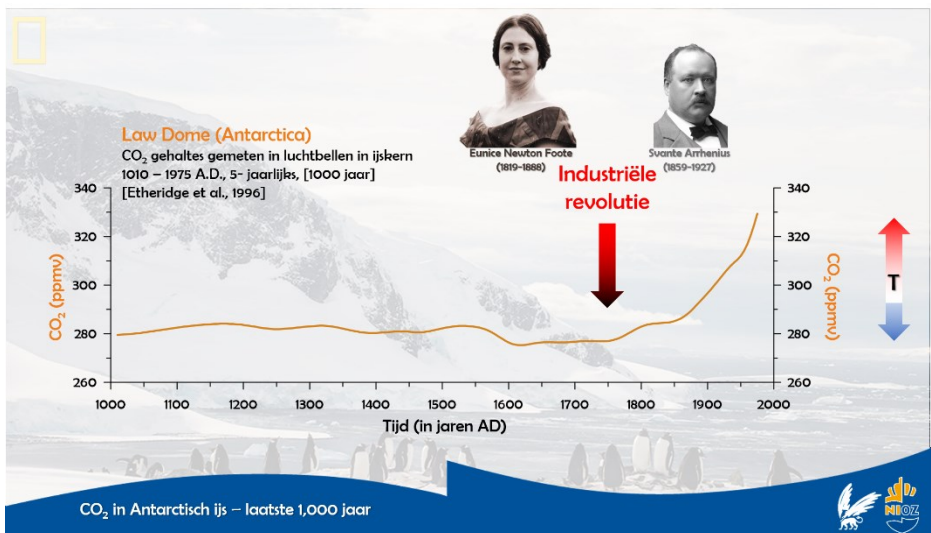
Afgewisseld met deze ijstijden waren er ook ongeveer acht inter-ijstijden;

- periodes met relatief hoge gehalten aan atmosferisch CO₂³,
- globaal hogere temperaturen, vergelijkbaar met vandaag de dag⁴,
- verspreiding van planten en dieren aangepast aan een warmer klimaat⁷,
- een zeeniveau vergelijkbaar met dat van nu⁹.

Doordat CO₂ een krachtig broeikasgas is, kun je deze opname ook lezen als een 800,000 jaar lange opname van temperatuur-variaties op aarde, die voornamelijk werden gestuurd door de stand van de aarde ten opzichte van de zon en veranderingen in de baan van de aarde rond de zon.



Deze reconstructie van CO₂ heeft een relatief grove resolutie in termen van tijd; ongeveer één meting per 500 jaar. Dat is al een redelijk hoge resolutie voor de geologische tijdsschaal. Maar er zijn ook ijskernen geboord in ijsvlaktes waarop de sneeuw sneller accumuleerde, waardoor je dus per tijdseenheid méér sneeuw hebt en daardoor makkelijker kunt inzoomen op het meer recente verleden.

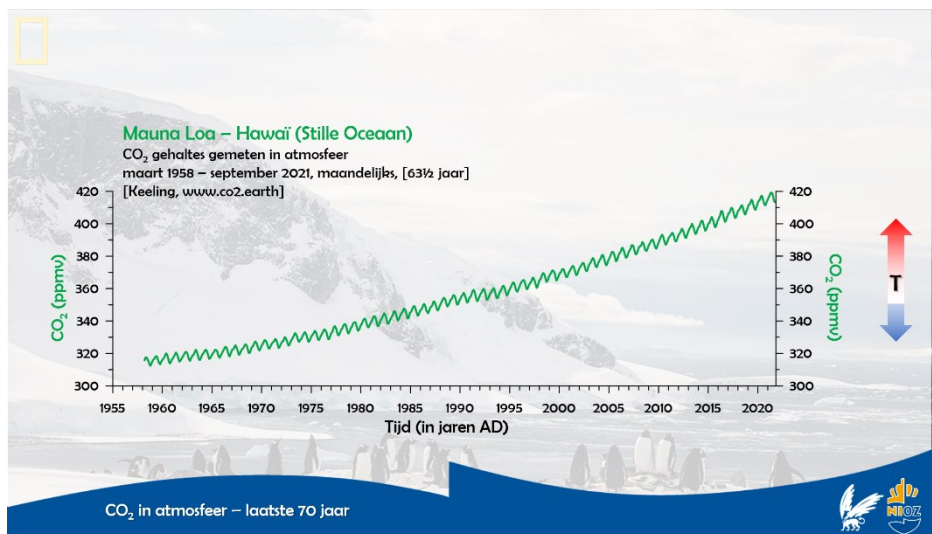


Hier ziet u zo'n opname van CO₂ in de Law-Dome ijskern¹⁰, ook op Antarctica. Deze grafiek van metingen beslaat ongeveer de laatste 1,000 jaar vóór vandaag (eigenlijk 1978) met gemiddeld elke vijf jaar een meting.

Wat meteen opvalt is de zeer sterke toename in atmosferisch CO₂ vanaf ongeveer het jaar 1750 AD; precies de tijd van de industriële revolutie, de uitvinding van de stoommachine en het moment waarop we begonnen met op grote schaal delven en verbranden van aardolie, aardgas en steenkool. Deze curve is vanwege de vorm ook wel bekend als de hockeystick-curve.

Dat het verbranden van koolwaterstoffen waarschijnlijk consequenties zou hebben voor de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer en daardoor dus ook de globale temperatuur werd al beschreven door Svante Arrhenius in 1896¹¹. Hij staat ook bekend als degene die de term "broeikasgas" lanceerde. Echter, de opname van warmte door datzelfde CO₂ was al zo'n 40 jaar eerder ontdekt en beschreven door Eunice Newton Foote¹².

Toch duurde het tot het midden van de 20^e eeuw dat het atmosferisch CO₂ zorgvuldig gemeten en gemonitord werd; de nu beroemde meteoroloog Carl Gustaf Rossby begon de eerste metingen in 1950 in Zweden en een paar jaar later zette Ralph Keeling een meetstation op in de Stille Oceaan, op Mauno Loa op Hawaï. Zover mogelijk weg van mogelijke vervuilingen door bijvoorbeeld industrie. Deze metingen laten een stabiele stijging zien sinds die tijd.



Wat meteen opvalt is de duidelijke jaarlijkse variatie die te maken heeft met de opname van CO₂ door vegetatie op land. Bij het proces fotosynthese worden in het

voorjaar CO₂ en water door planten onder invloed van licht en door het gebruik van pigmenten (vooral chlorofyl) omgezet in zuurstof en glucose waardoor de plant kan groeien. Simpel gezegd wordt dus eigenlijk CO₂ uit de lucht vastgelegd in friscgroene blaadjes.

In de herfst worden deze groene blaadjes bruin en sterven ze af, waarbij er weer CO₂ wordt afgestaan aan de atmosfeer.

Omdat de verdeling van land niet symmetrisch is verdeeld over de aarde –op het noordelijk halfrond is veel méér land dan op het zuidelijk halfrond—bepaalt het noordelijk halfrond dus de jaarlijkse slinger in deze curve, met een subtiele afname in het voorjaar (opslag van CO₂ in blaadjes) en een subtiele toename in het najaar (vrijkomen van CO₂ als bladeren sterven).

De algemene trend over de laatste 70 jaar van een graduele stijging is echter onmiskenbaar.

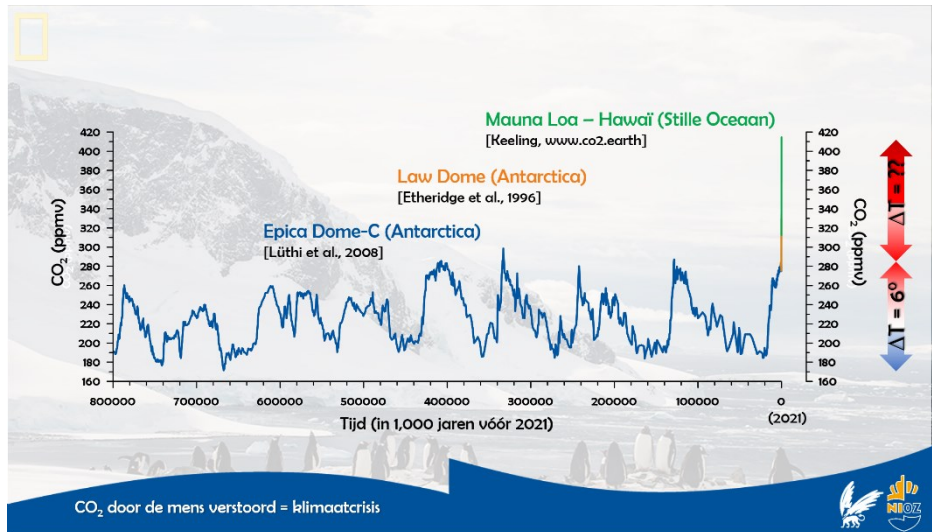
Dit zijn metingen, gekalibreerde data, niet “slechts de mening” van een wetenschapper!

De belangrijkste boodschap die ik graag wil overbrengen wordt duidelijk als we nu de drie opnames combineren in één grafiek. De hoeveelheid tijd die in deze drie curves zat was natuurlijk enorm verschillend; van 800,000 jaar in de eerste ijskern, naar 1,000 jaar in de tweede en vervolgens de tijdserie van atmosferische metingen over een periode van slechts 70 jaar. Wat nog veel belangrijker is, is dat ook de verticale as verschilt in de drie grafieken.

- Door ze op één lijn te zetten overheerst de geologische tijdsschaal met de natuurlijke variatie in CO₂ over de laatste 800,000 jaar;
- Vervolgens de opname over de laatste 1,000 jaar = natuurlijke variatie + begin van de menselijke invloed in de vorm van de hockeystick, en
- tenslotte de doorzettende stijging gedurende de afgelopen 70 jaar.

Duidelijk te zien is hoe de hedendaagse waarden van CO₂ in de atmosfeer allang niet meer op de natuurlijke schaal passen en dat de verticale as aangepast moest worden.

Nu wordt u hopelijk ook duidelijk waarover we ons druk moeten maken; we hebben in heel korte tijd –op geologische tijdsschaal in een flits— de CO₂-gehaltes in de atmosfeer meer dan verdubbeld ten opzichte van de natuurlijke variatie. Dat de aarde daarop zal reageren met een temperatuurstijging is onvermijdelijk en kan ook al onomstootbaar worden gemeten [ruim 1° globale temperatuurstijging sinds het einde van de 19^e eeuw, IPCC-rapport 2021¹³].



Nogmaals, dit zijn de feiten en data waaraan geen onafhankelijke klimaatwetenschapper meer twijfelt. Door ons eigen gedrag hebben we niet een *klimaatprobleem* maar zitten we in een *klimaatcrisis*.

De natuurlijke variatie in CO₂ over de afgelopen 800,000 jaar komt overeen met een globaal gemiddeld temperatuurverschil tussen glacialen en interglacialen van ongeveer 6°. In Parijs is in december 2015 afgesproken dat de temperatuur globaal niet meer mag oplopen dan 1.5° maar sindsdien is er nog veel te weinig concreets gebeurd. Sterker nog, de vraag naar koolwaterstoffen en de uitstoot van CO₂ is alleen maar toegenomen.

Let wel; ik heb het hier alleen over de temperatuurstijging met alle gevolgen van dien zoals bijvoorbeeld het smelten van ijskappen, het stijgen van het wereldwijde zeeniveau en extremer worden van het weer. Andere problemen die wij als mens veroorzaken zoals vervuiling en verzuring van zowel het land waarop wij wonen als de oceaan en het uitsterven van talloze plant- en diersoorten laat ik hier buiten beschouwing.

De klimaatcrisis gaat ons allemaal aan; of je politieke denkbeelden nou links of rechts zijn het is een *crisis van iedereen* maar het is vooral veroorzaakt door het welvarende deel van de mensheid. Daarom zullen wij in het rijke Westen dan ook de verantwoordelijkheid moeten oppakken en het voortouw moeten nemen bij het realiseren van oplossingen voor deze crisis.

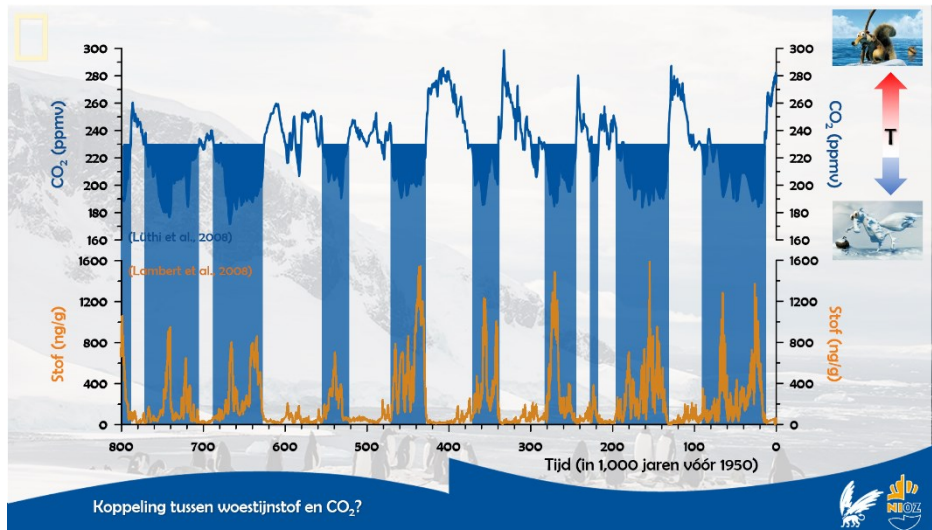
Het is écht “alle hens aan dek!!”.

Terug naar het stof in de ijskern van Antarctica.

Als je de reconstructies van stof en CO₂ met elkaar vergelijkt, valt op dat ze precies tegengesteld lopen. Tijdens de ijstijden/glacialen was er veel stof in de lucht en dus afgezet op het ijs en waren de atmosferische CO₂ gehaltes laag.

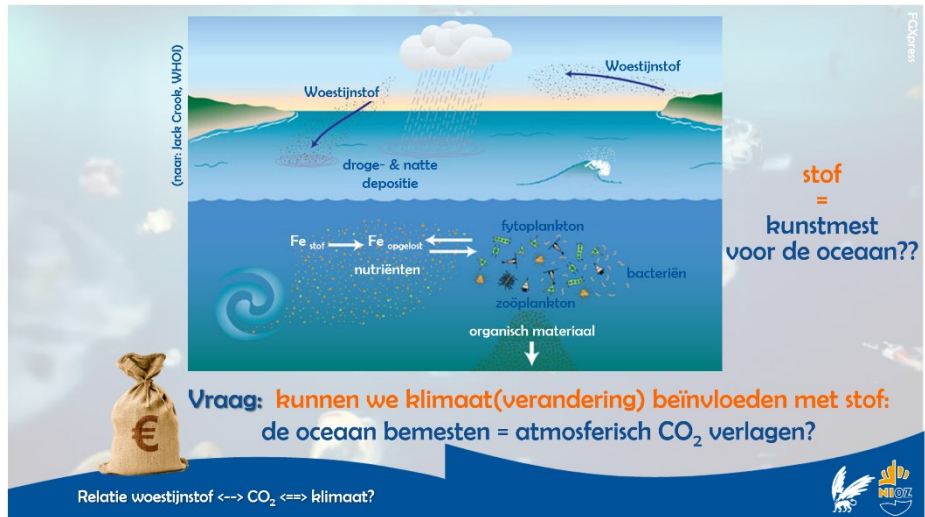
Tijdens interglacialen was dit precies andersom: hoge CO₂ waarden en maar weinig stof in de lucht.

Al snel werd daarom ook gedacht dat ze wel eens met elkaar te maken zouden kunnen hebben; hoe zouden woestijnstof in de atmosfeer en het klimaat op aarde aan elkaar gekoppeld kunnen zijn?



De oceaan lijkt daarbij een cruciale rol te spelen en dan vooral het leven in de oceaan. Naast vissen en zeezoogdieren bevat de oceaan ongekeende hoeveelheden fytoplankton: een verzamelnaam voor een breed scala aan mariene levensvormen zoals algen, cyanobacteria, diatomeeën, radiolariën, coccolithophoriden, en nog veel meer. Dit fytoplankton varieert in grootte van enkele micrometers tot meerdere centimeters, doet –net als de eerder genoemde planten aan land– ook aan fotosynthese, produceert dus ook zuurstof en neemt ook CO₂ op en legt dit vast in organisch materiaal. In eerste instantie nemen ze dat CO₂ op uit het water en via de uitwisseling van gassen tussen oceaan en atmosfeer uiteindelijk ook uit de lucht.

Om dit te kunnen doen heeft dat fytoplankton vooral zonlicht en voedsel nodig en in het overgrote deel van de oceaan is vooral het voedsel maar zeer beperkt aanwezig.



Het kleine beetje dát er aan voedsel binnenkomt, komt via de lucht, u raadt het al: woestijnstof. Elk jaar komt zo'n 500 miljoen Ton woestijnstof in zee terecht¹. Dit stof geraakt daar op meerdere manieren; het valt er 'gewoon' in als gevolg van de zwaartekracht en het spoelt erin met regen.

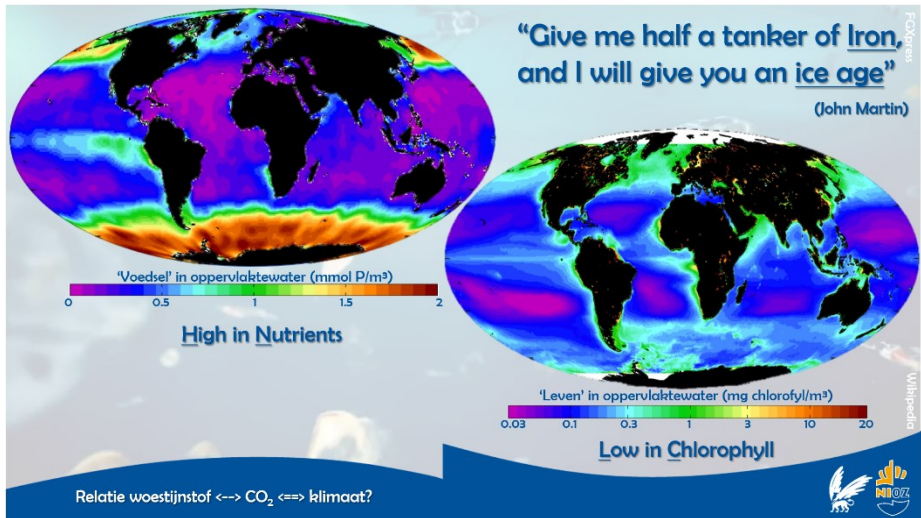
Met name het element ijzer –dat doorgaans ruim voorhanden is in woestijnstof, vandaar ook de orangerode kleur– blijkt van groot belang te zijn voor fotosynthese door fytoplankton. Maar ook andere metalen en nutriënten zoals fosfaat en nitraat spelen een grote maar nog relatief onbekende rol.

Daarbij moet opgemerkt worden dat ruim 95% van de actieve koolstof (zoals de C in CO₂) op aarde zich bevindt in de oceaan. Als je bedenkt dat de vegetatie op land (dus minder dan 5% van het totaal) al duidelijk meetbare schommelingen in atmosferisch CO₂ veroorzaakt, kun je je ook voorstellen dat veranderingen in de overige 95% – in de oceaan–een letterlijk 20x zo groot effect kunnen bewerkstelligen.

De vraag is dan ook; áls dit werkt, zouden we dan inderdaad de oceaan kunstmatig kunnen bemesten met woestijnstof, waardoor het atmosferisch CO₂ afneemt en we de globale opwarming wellicht kunnen afremmen?

Hoe zou dit proces in z'n werk moeten gaan? Grote delen van de oceaan blijken gekenmerkt te worden door eigenlijk best veel voedsel (hier weergegeven met de hoeveelheid fosfaat, gemeten vanuit satellieten) maar verhoudingsgewijs zeer weinig marien leven (hier weergegeven met de hoeveelheid chlorofyl); veel minder dan je zou verwachten op basis van de beschikbare hoeveelheid voedsel. Deze

gebieden worden ook wel de HNLC – High Nutrients, Low Chlorophyll zones genoemd en bevinden zich vooral in de Zuidelijke Oceaan rond Antarctica. De oorzaak voor deze mismatch tussen hoeveelheid voedsel maar weinig leven is het ontbreken van ijzer.



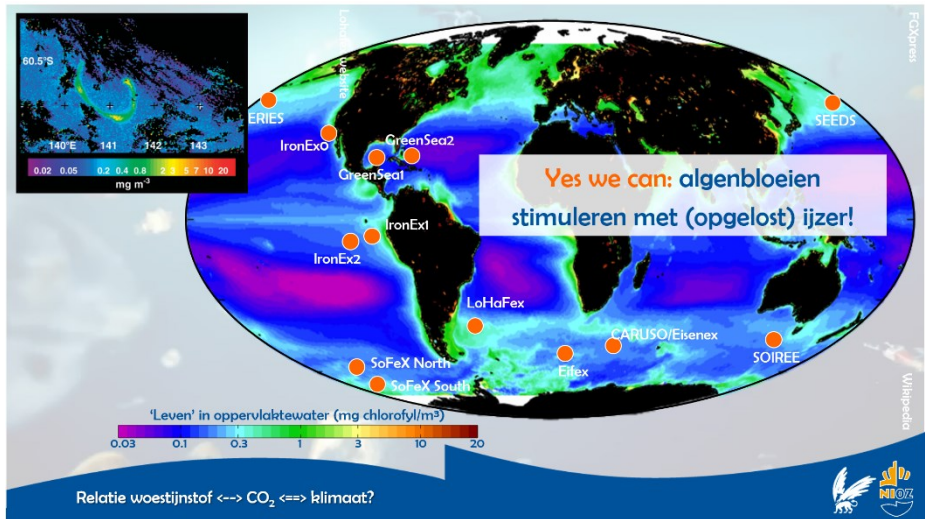
Doordat hij voor het eerst goede metingen kon doen aan nutriënten in zeewater kon oceanograaf John Martin als één van de eersten deze HNLC zones daadwerkelijk aantonen en vaststellen dat ijzer inderdaad een sleutelrol zou kunnen spelen in het stimuleren van algengroei in deze delen van de oceaan¹⁴.

Tijdens een congres in 1988 sprak hij daarom de inmiddels beroemde woorden: “*give me half a tanker of iron and I will give you the next ice age*”. Hij was zó overtuigd van het belang van ijzer dat hij dacht een ijstijd te kunnen starten door juist in deze HNLC-zones de oceaan te voorzien van opgelost ijzer en daardoor zoveel algenbloeien op gang te kunnen brengen dat het atmosferisch CO₂ genoeg zou dalen om wereldwijde temperatuurdaling te bewerkstelligen zodat er weer een ijstijd zou ontstaan.

Om de stelling van Martin te testen werd een flink aantal experimenten uitgevoerd waar in een aantal cruciale ijzer-gelimiteerde delen van de oceaan opgelost ijzer in zee werd gegoten om te kijken of algengroei hiermee gestimuleerd kon worden.

Dit bleek inderdaad het geval!

Hier ziet u bijvoorbeeld een wolk van chlorofyl, dat aangeeft dat er een algenbloeï plaatsvindt, in fytoplankton dat reageerde op het opgeloste ijzer van zo’n experiment en wel in zó’n hoge mate dat het vanuit een satelliet te zien was¹⁵.



Echter, het nettoresultaat was per experiment eigenlijk verschillend. In het geval van dit laatste experiment [LOHAFEX¹⁵] kwam inderdaad de algenbloei tot stand, vond er inderdaad fotosynthese plaats werd er dus CO₂ uit het zeewater opgenomen en vastgelegd in organisch materiaal, toch had het waarschijnlijk nauwelijks een effect op de atmosfeer omdat het organisch materiaal té langzaam uitzakte richting zeebodem, waardoor onderweg naar beneden ditzelfde organisch materiaal weer werd afgebroken, en weer terug werd omgezet in o.a. CO₂. Daarnaast bleken deze algen op die plek en op dat moment vooral krill aan te trekken, dat zich heerlijk tegoed deed aan de algen en het volledig weg-graasde, de wetenschappers teleurgesteld achterlatend.

De natuur laat zich duidelijk niet zo makkelijk sturen!

Gelukkig zijn er ook voorbeelden van experimenten waarbij er wel degelijk export van organisch materiaal plaatsvond van de oppervlakte-oceaan naar de diepzee en zo een CO₂-effect kon worden bereikt¹⁶.

Dankzij enorme protesten tegen dit soort vorm van experimenten, waarbij grote hoeveelheden ijzer-opgelost-in-zuur in zee worden gegooid, zijn er geen nieuwe pogingen ondernomen om John Martin's hypothese te testen. Toch is het laatste woord over de mogelijkheden om de oceaan kunstmatig te bemesten nog lang niet gesproken, vooral omdat woestijnstof, naast het aanleveren van de nutriënten, nóg een belangrijke rol kan spelen in dit proces.

De zandkorrels in het woestijnstof kunnen namelijk meehelpen om het vers gevormde organisch materiaal versneld te laten zinken doordat de korrels relatief groot en zwaar zijn en de bezinksnelheid enorm kunnen vergroten. Door deze

ankerwerking –ook wel ‘ballasting’ genoemd—krijgt het organisch materiaal onderweg naar beneden minder tijd om afgebroken te worden en terug omgezet te worden in CO₂, zoals het probleem was bij het LOHAFEX experiment.

Of deze versnelde export van organisch materiaal ook kan voorkomen dat krill alles opeet weet ik niet maar de rol van ballasting door woestijnstof is waarschijnlijk nooit eerder goed bekeken omdat men ervan uitging dat stofkorrels zeer klein zijn; maximaal 20µm = tweehonderdste van een millimeter.

Daarnaast bestaat veel woestijnstof uit silica, dat ook een belangrijke voedingsstof is voor –bijvoorbeeld—diatomeeën, een algensoort ie silica nodig heeft voor het bouwen van skeletjes.

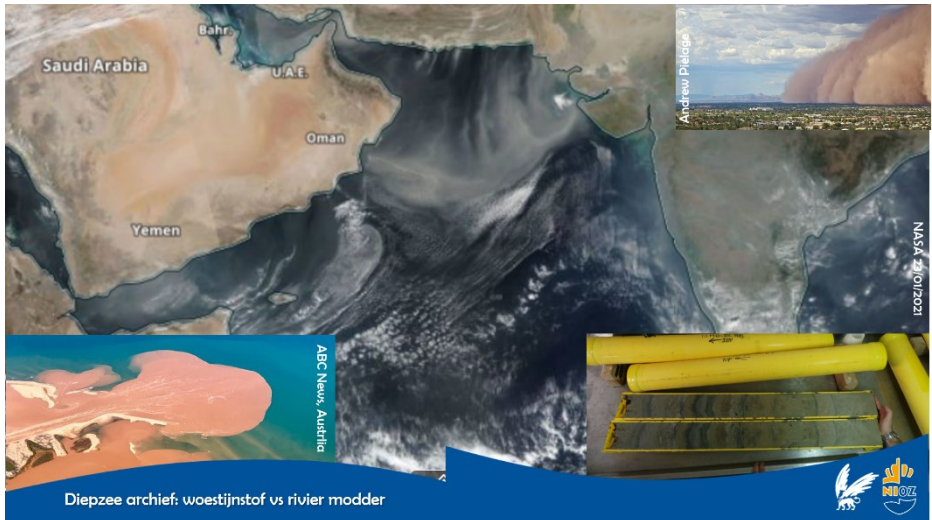
Woestijnstof in diepzeekernen

De eerste keer dat ik met “woestijnstof in zee” in aanraking kwam, was tijdens mijn afstudeerproject, dat ik heb uitgevoerd als onderdeel van het promotieonderzoek van Maarten Prins in de sedimentologiegroep van de faculteit Aardwetenschappen aan de Universiteit Utrecht.

Maarten wilde de hypothese testen dat woestijnstof dat vanuit verschillende kanten de Indische Oceaan in geblazen wordt en materiaal dat door rivieren in zee afgezet wordt van elkaar te onderscheiden is in diepzeesedimenten op basis van de korrelgrootte en chemische samenstelling.

Het archief van stof op de bodem van de zee is zeer vergelijkbaar met stof dat in laagjes wordt afgezet op een gletsjer. De resten organisch materiaal die afkomstig zijn van afstervend fytoplankton in de bovenste delen van de oceaan worden zelfs ‘mariene sneeuw’ genoemd en in de afgelegen delen van de open oceaan stapelt dit materiaal zich op met een snelheid van een paar cm per 1,000 jaar. Als je daar –net als in het stofarchief op een sneeuwvlakte of gletsjer—een verticale kern in boort, kun je deze opeenstapeling dus lezen als archief van materiaal dat daar in het geologisch verleden werd afgezet.

In periodes van aanhoudende droogte in de woestijn werd er daarbij meer stof afgezet op de zeebodem dan in natte periodes in de geologische geschiedenis, waarin bijvoorbeeld vooral riviersediment naar zee werd vervoerd en op de zeebodem afgezet. Samen met Gert-Jan Weltje ontwikkelde Maarten een methode op basis van een numeriek model waarmee inderdaad onderscheid kon worden gemaakt tussen wind-geblazen stof en rivier-getransporteerde modder, op basis van de korrelgrootte¹⁷.



Deze methode bleek uitstekend te werken en is daarna op veel verschillende plekken in zee zowel als op land toegepast om het klimaat van het verleden te reconstrueren in verschillende gebieden op aarde. Daaruit bleek dat er zowel in wind-geblazen stof als in rivier-gespoeld sediment grote gradiënten te zien zijn; afname van de korrelgrootte langs de afgelegde weg.

Op land kunt u zich zo'n gradiënt misschien makkelijker voorstellen bij een rivier die in de steile bergen met veel geweld grote rotsblokken kan meenemen, in lagergelegen gebieden wild stromend vooral grind transporteert en op het moment dat de rivier in zee uitkomt rustig kabbelend vooral nog fijnkorrelig silt en klei vervoert.

In diepzee kernen stelden we echter telkens weer vast dat wind-geblazen woestijnstof eigenlijk altijd grofkorreliger was dan de modder die door rivieren werd aangeleverd.

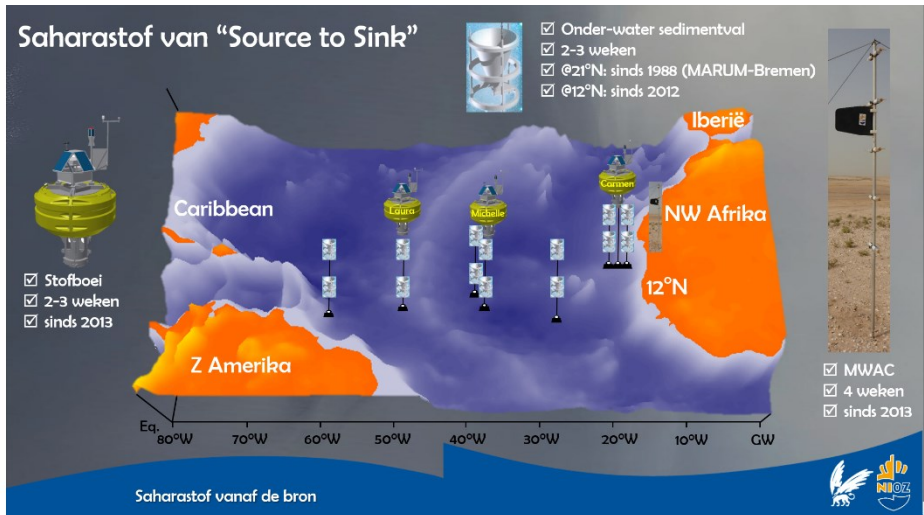
Bovendien bleek datzelfde woestijnstof tijdens ijstijden in het geologisch verleden nog eens een factor grofkorreliger dan tijdens interglacialen.

Vooral meteorologen en modelleurs waren hier aanvankelijk zeer sceptisch over; we kregen opmerkingen als “Iedereen weet toch dat woestijnstof niet zo grof is; je zult het wel verkeerd gemeten hebben”, en: “De fysische wetmatigheden in mijn model kunnen niet verklaren waarom dat stof van jou zover door de lucht kan blazen dus ik denk toch echt dat je een fout hebt gemaakt”.

Alle reden om dus om nog eens kritisch te kijken naar dat mysterieuze stof in zee.....

Modern Saharastof

In 2012 kreeg ik de kans om een serie instrumenten te installeren in de Atlantische Oceaan, tussen Afrika en het Caraïbisch gebied, direct onder de Sahara stofpluim. Het doel was om Saharastof te onderzoeken vanaf de bron tot daar waar het wordt afgezet in zee en de consequenties daarvan.



- Te beginnend op land in Mauritanië –werden twee masten met passieve stofvangsers geplaatst. Een Mauritaanse collega onderhoudt deze masten en zorgt ervoor dat we maandelijks stofmonsters ‘uit de bron’ kunnen verzamelen. NIOZ collega’s die daar regelmatig naartoe gaan om overwinterende trekvogels te bestuderen zijn zo aardig om deze monsters voor mij mee te brengen.
- Voor de kust van Mauritanië werd door Duitse collega’s al sinds 1988 materiaal in zee verzameld met zogenaamde sedimentvallen. Deze sedimentvallen vangen deeltjes op die van het oceaanooppervlak afzinken richting zeebodem; zowel het Saharastof zelf, als ook alle producten die ontstaan bij reproductie van fytoplankton in de bovenste delen van de waterkolom. Woestijnstof was voor hen een bijproduct dat wij wel mochten hebben om te bestuderen.
- Daarnaast hebben wij in 2012 een trans-Atlantisch transect van dergelijke sedimentvallen geplaatst.
- Tenslotte hebben NIOZ-technici, in nauwe samenwerking met MARUM collega’s in Bremen, Duitsland, drie zogenaamde stofboeien ontworpen en gebouwd, waarmee stof uit de lucht kan worden gevangen. Ik mocht onder andere drie promovendi aanstellen in gekoppelde projecten, die elk hun ‘eigen’ stofboei in beheer kregen: Carmen, Laura en Michèle.

Op deze manier konden we niet alleen

- de nu heersende sedimentaire processen goed in kaart brengen maar ook
- de mogelijke invloeden van woestijnstof op o.a. het leven in de oceaan

Deze sedimentvallen worden ingebouwd in zogenaamde diepzeeverankeringen; tussen een anker op de zeebodem, zo'n 4 à 5 kilometer onder het schip, en grote oranje drijflichamen met een drijfvermogen van honderden kilo's wordt een stalen kabel gespannen waaraan allerlei instrumenten vastgemaakt worden.

Een sedimentval is in feite een grote trechter die afzinkend materiaal invangt en dat uiteindelijk terecht komt in een flesje onderaan de trechter. In een carroussel zitten 24 van die flesjes die ongeveer om de twee weken één positie doorschuiven tot onder de trechter en op die manier kun je een tijdserie opbouwen. Dit doen we vaak in periodes van ongeveer één jaar. Nadat de verankering een jaar lang haar werk gedaan heeft, wordt via een akoestisch signaal het anker losgekoppeld van de lijn en zorgen de drijflichamen ervoor dat alle instrumenten naar het oceanoppervlak opstijgen.



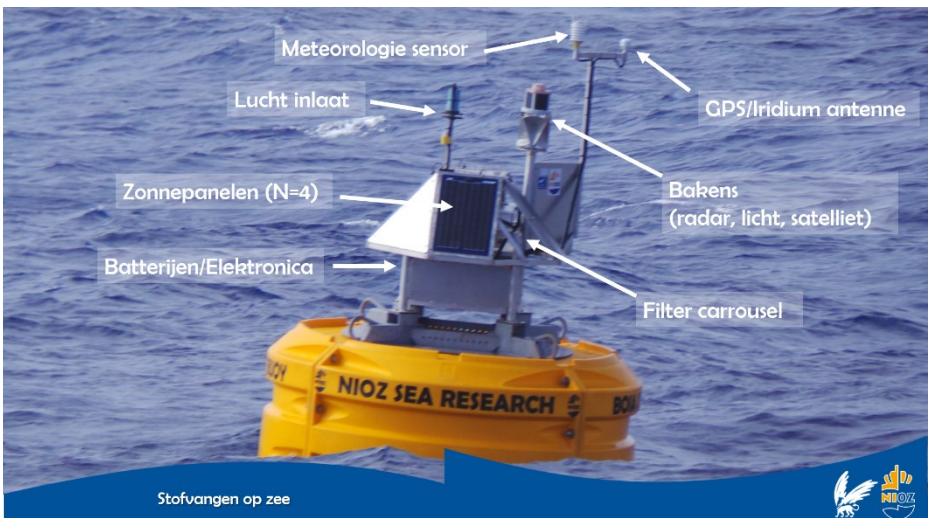
Hier ziet u hoe NIOZ-technici en de bemanning van ons vlaggenschip *RV Pelagia* een succesvolle sedimentval bergt. Alle flesjes in de carroussel bevatten materiaal dat gedurende een periode van iets meer dan twee weken is onderschept tijdens de sedimentatie richting zeebodem. Daar worden we blij van!

Eén van de unieke aspecten van werken bij het NIOZ is dat er verschillende werkplaatsen zijn met gespecialiseerde technici die zelf instrumenten kunnen

bedenken, ontwerpen en bouwen. De stofboeien zijn dan ook uniek in de wereld en het werk dat we ermee doen wordt met argusogen gevolgd door wetenschappers over de hele wereld.



In de boei wordt lucht door een filter gepompt. 24 van zulke filters op een carrousel vormen op die manier een vergelijkbare en synchrone opname van één jaar als de sedimentvallen onder water. De boei is daarnaast een platform voor allerlei andere instrumenten en metingen.

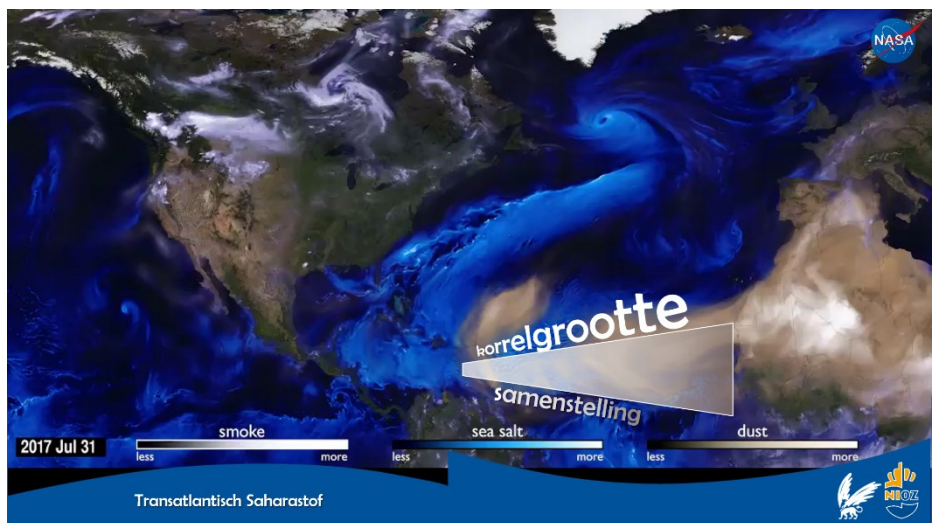


Dankzij vier trans-Atlantische vaartochten verzamelden we zo een compleet beeld van het Saharastof dat door de lucht getransporteerd wordt, in zee terecht komt en wat er daarna mee gebeurt in zowel ruimte (van Oost naar West) als doorheen de tijd (gedurende drie jaar, en het programma duurt nog voort).

In drie jaar hebben we een zeer grote hoeveelheid data verzameld maar uitgerekend de zomer van 2017 –nadat het trans-Atlantische transect was opgeruimd—was extreem stoffig zoals te zien is in deze [animatie van satellietbeelden](#). Deze animatie laat –net als de allereerste dia—ook verschillende aerosolen zien zowel als tropische stormen boven de Atlantische Oceaan waarvan sommige zich ontwikkelen tot orkanen.

Ook in deze animatie valt heel veel te zien maar we moeten dóór....

Met z'n allen hebben we een paar prachtige resultaten kunnen neerzetten zoals: grote verschillen tussen de korrelgrootte van Saharastof gedurende de seizoenen met grofkorrelig materiaal in de zomer en fijner-korrelig stof in de winter¹⁸.



Dit kunnen we verklaren door grotere temperatuurgradiënten in de zomer (sterkere opwarming van land in de brongebieden van het stof waardoor het stof hoger de atmosfeer in geblazen kan worden) maar het feit dat deze seizoenale verschillen over het gehele transect goed te meten zijn heeft ook consequenties voor bijvoorbeeld de albedo van de atmosfeer, wat weer gevolgen heeft voor de warmtehuishouding van onze planeet¹⁹.

Daarnaast blijken kleine korrels bovenin de atmosfeer vooral inkomende zonne-energie te weerkaatsen²⁰ maar grote stofkorrels onderin de atmosfeer vooral uitgaande warmte te absorberen als een broeikasgas²¹.

Oftewel; de korrelgrootte van dit woestijnstof blijkt ontzettend belangrijk maar nog grotendeels onbegrepen te zijn!

We konden zeer sterke veranderingen in de samenstelling van het Saharastof van Oost naar West aantonen; de ronde en zwaardere kwartskorrels sedimenteren vooral in het oostelijk deel van het transect waardoor platte en lichtere mineralen zoals mica's en veldspaten relatief méér voorkomen in het westelijk deel^{22,23}. Dit betekent ook een verandering van oost naar west in de hoeveelheid bio-beschikbare voedingsstoffen zoals het eerdergenoemde ijzer en fosfaten^{24,25}. Daarnaast vonden we een verrassend nieuw aspect; er bleek een groot verschil te zitten in hoe het materiaal in zee terecht komt; simpelweg in zee vallen met de zwaartekracht of in zee gespoeld worden met regen²⁶.

Met Laura's experimenten aan boord, midden op de oceaan, konden we vervolgens aantonen dat het fytoplankton eigenlijk helemaal niet zo goed overweg kan met 'droog stof' dat in zee valt. Het kost het fytoplankton kennelijk veel te veel energie om de voedingsstoffen los te weken van de stofkorrels, en vervolgens in te zetten bij fotosynthese.

Als het woestijnstof daarentegen met regen in zee spoelt, blijken voedingsstoffen zoals ijzer, fosfaat en silicaat juist wél beschikbaar te zijn voor het fytoplankton²⁷. Dit wordt veroorzaakt doordat in het proces van druppelvorming in regenbuien, waarvoor juist ook weer stofdeeltjes nodig zijn als zogenaamde condensatiekern, onder invloed van atmosferisch-chemische processen deze voedingsstoffen al losgeweekt worden, om vervolgens in half-opgeloste vorm in zee te spoelen. Dit proces is zeer vergelijkbaar met de eerdergenoemde experimenten met opgelost ijzer die immers ook succesvol waren in het op gang brengen van algenbloeien.

Voor een éénduidig antwoord op de vraag of Saharastof inderdaad de Atlantische Oceaan kan bemesten lijkt vooral het deel aan de Caraïbische kant het meest geschikt. In dit deel van de oceaan is namelijk

- door sortering van het woestijnstof het meeste ijzer voorhanden²³,
- vindt depositie voornamelijk plaats door regen²⁶, én
- lijkt er inderdaad een reactie van fytoplankton te zijn, al blijkt aan deze kant van de Atlantische Oceaan nóg een bron van voedingsstoffen te zijn: de Amazone Rivier die gigantische hoeveelheden water en sediment aanlevert²⁴.

We zijn nog op zoek naar een manier om de vergelijkbare invloeden van die twee goed van elkaar te kunnen onderscheiden...

Omdat de zogenaamde 'natte depositie' zo'n belangrijk aspect vormt voor het eventuele bemesten van de oceaan gaan we volgende maand de stofboeien, die nog in de buurt van de Kaapverdische eilanden hun werk liggen te doen, voorzien van een nieuw instrument dat NIOZ-technici nu aan het maken zijn en waarmee individuele regenbuien kunnen worden opgevangen in individuele flessen.



Deze regenvangers zijn nog in de testfase; dit was gisteren...

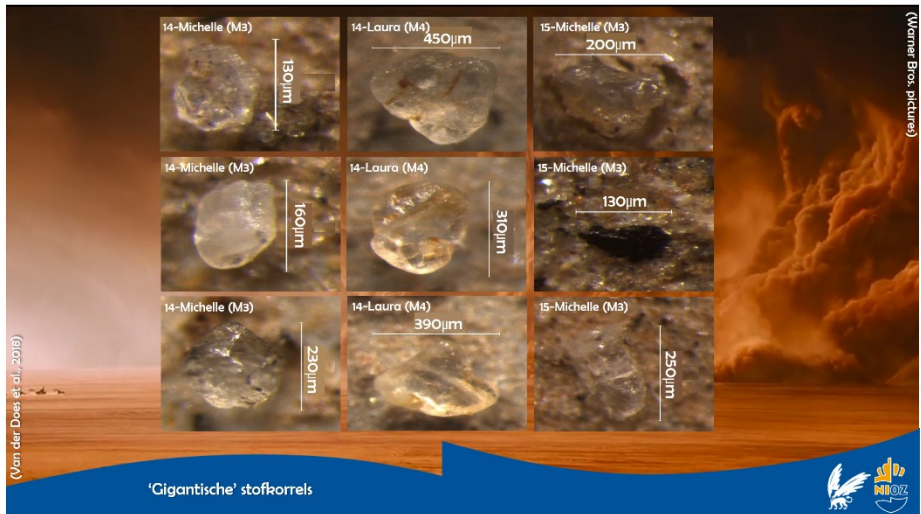
Wat misschien nog wel de spectaculairste ontdekking was, zijn de zogenaamde 'giant particles'; individuele stofkorrels van bijna een halve millimeter 'groot'¹²⁸, aangetroffen in zowel de sedimentvallen als op boeien Michelle en Laura die op dat moment respectievelijk ruim 2,000 en 3,500 km van de Afrikaanse westkust verwijderd lagen.

Juist in het oostelijke deel van de Atlantische Oceaan, relatief dichtbij de brongebieden van het stof komen hoofdzakelijk de grootste stofkorrels neer en daar zal dus ook de eerdergenoemde ballastwerking het grootst zijn met alle gevolgen voor de export van organisch materiaal naar de zeebodem.

Deze 'gigantische' korrels kunnen niet anders dan door de lucht gevlogen zijn en zijn dus ordegrottes groter dan de korrels waarvan meteorologen aanvankelijk uitgingen.

Bovendien zetten deze grote stofkorrels onze eerdere resultaten uit sedimentkernen in een volledig nieuw daglicht; als namelijk tijdens ijsstijden in het geologisch verleden de wind-geblazen korrels inderdaad een factor groter waren dan die onder de huidige condities door de lucht worden geblazen –en die eigenlijk al niet te verklaren zijn met de gebruikte combinatie van fysische wetmatigheden—dan

moeten de atmosferische condities en droogtes in woestijnen tijdens die ijsijden écht spectaculair zijn geweest.

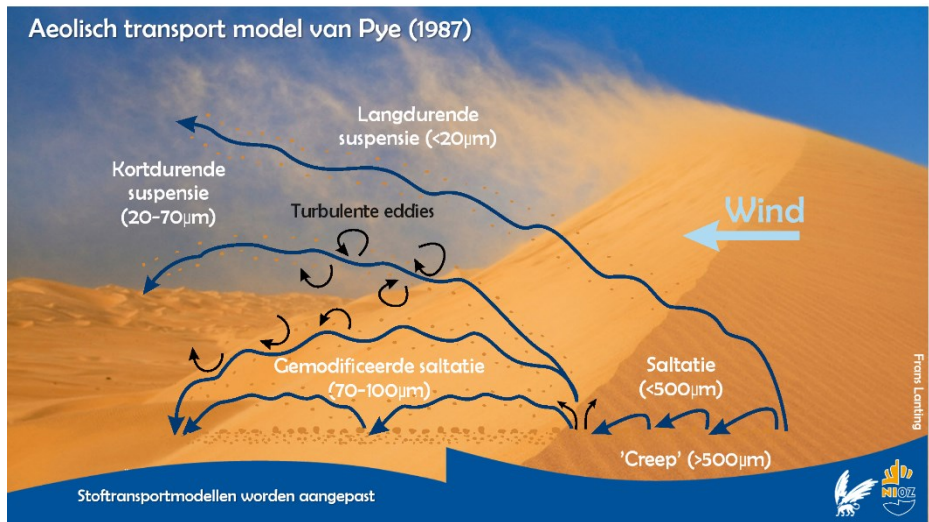


Op basis van het werk van Carmen, Laura en Michèlle worden de atmosferische modellen nu wereldwijd aangepast en ik kijk uit naar de verdere samenwerking met meteorologen en klimaatmodelleers om deze puzzels op te lossen. Als we namelijk deze natuurlijke variaties beter begrijpen, kunnen we ook veel preciezer projecteren hoe klimaatveranderingen in de toekomst zullen leiden tot veranderende atmosferische condities en verbreiding van woestijnen.

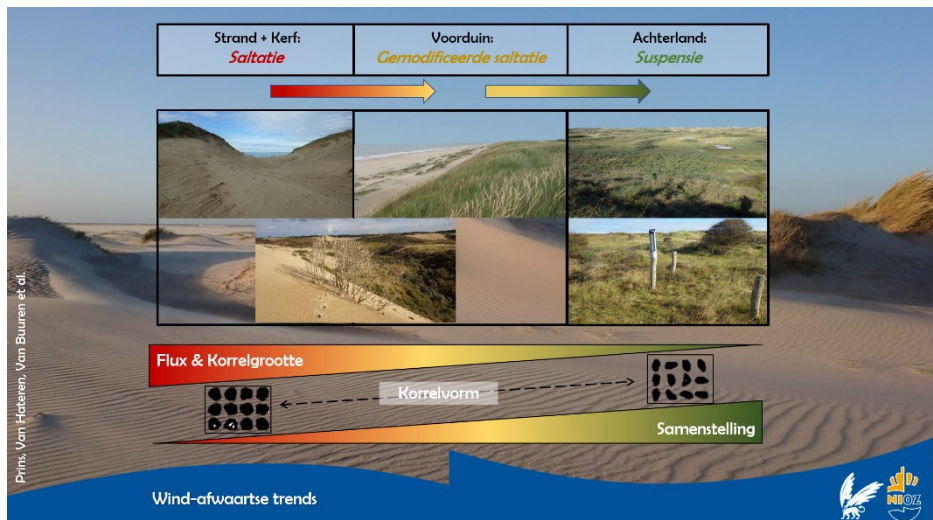
Met mijn aanstelling aan de VU rol ik wat dat betreft in een gespreid bedje; in de mariene groep worden de nieuwste klimaatmodellen gebruikt en ontwikkeld en het sediment lab is zeer goed uitgerust inclusief een nèt nieuw aangeschaft instrument waarmee we voor het eerst de mogelijkheid hebben om de *vorm* van wind-geblazen deeltjes in detail te meten. Deze nieuwe meettechniek biedt echt spannende nieuwe mogelijkheden want waarschijnlijk kunnen we nu voor het eerst deze korrelvorm in combinatie met de korrelgrootte en dichtheid van deze deeltjes langs gradiënten in wind-geblazen sedimenten uitdrukken in absolute windsnelheden.

De veranderingen in woestijnstof die we over honderden- tot duizenden kilometers waarnemen over de Atlantische Oceaan blijken namelijk op subtiele maar significante én reproduceerbare wijze ook te zien te zijn in metingen van korrelgrootte, -vorm en -samenstelling van wind-geblazen zand in Noord-Hollandse duingebieden. Deze metingen werden en worden gedaan door VU-collega's en promovendi Hans van Hateren en Unze van Buuren en een groot

aantal Bachelor- en Master-studenten onder leiding van Maarten Prins en mij en we hebben concrete plannen deze metingen verder uit te breiden langs de Nederlandse kust.



Zo'n kwantificering van de wind –dus écht kunnen zeggen hoe hard de wind waaide op zeker moment in het geologisch verleden– zou een grote stap voorwaarts betekenen voor klimaatmodelleers die daarmee veel betere scenario's kunnen berekenen voor het veranderende klimaat in de toekomst.



Hiermee ben ik aan het einde gekomen van mijn oratie. Ik zou nog uren kunnen doorvertellen over dit fascinerende vakgebied en de vele boeiende relaties tussen woestijnstof en het klimaat; ik heb er hier slechts een paar voorbeelden uitgelicht. Echter, na al dat stof wordt het nu tijd om de kelen te smeren.

Voordat het zover is, wil ik graag nog een paar woorden van dank uitspreken.

Bij een proefschrift is het dankwoord vaak het eerst-gelezen hoofdstuk omdat velen zich afvragen; sta ik erin? Welnu, in deze rede staat u er allemaal in! Ik wil u allemaal graag heel hartelijk bedanken, inclusief de mensen die deze presentatie via het scherm volgen; u heeft namelijk allemaal op één of andere manier bijgedragen en mij geholpen op de stoffige weg die tot deze leerstoel heeft geleid.

Een paar mensen wil ik daarnaast graag extra in het zonnetje zetten: Allereerst mijn ouders. Ik kom uit wat terecht heet een 'warm nest' en daar ben ik mijn ouders –broerlief inclusie– ontzettend dankbaar voor. "Er zijn voor de ander", staat hoog in het vaandel bij ons thuis. Wat er ook gebeurt, mijn familie was (is!) er om op terug te vallen, voor ondersteuning, raad en daad. Gevraagd én ongevraagd.... Zodra mijn moeder begint met: "wij moeten even praten, jongetje!", weet ik al hoe laat het is. Ik hoop dat we nog heel veel zullen "moeten praten": Dankjewel!

Iets van die warmte en harmonie en 'ruimte-om-fouten-te-mogen-maken' van thuis heb ik samen met Meta proberen door te geven in ons eigen gezinnetje en als ik kijk hoe Mathilde, Britte en Nynke in het leven staan, lijkt ons dat aardig te lukken. Jullie waren vaak op elkaar aangewezen als ik weer eens op pad was, op zee, in een woestijn of bij een congres. Ik ben ontzettend trots op jullie dat jullie dat zo goed gelukt is en dat ik hier nu sta heb ik vooral ook aan jullie te danken: Dankjewel!

Een paar collega's mogen niet onvermeld blijven. Allereerst natuurlijk Maarten Prins. Met jouw enthousiasme voor het vak ben jij een zeer inspirerende collega, mentor en onderwijzer, niet alleen voor mij maar voor talloze middelbare scholieren, bachelor- en master studenten en promovendi. En, sinds kort ook voor volwassenen die je in je vrije tijd ook nog je kennis over de natuur bijbrengt. Altijd als wij bij elkaar zitten hebben we binnen de kortste keren de prachtigste projecten bedacht waarvan we er al een paar hebben uitgevoerd. Ik hoop dat we deze wisselwerking nog heel lang in mooie projecten kunnen blijven omzetten: Dankjewel!

Talloze andere collega's uit binnen- en buitenland doe ik tekort door ze niet met naam te noemen maar als wetenschappers zijn ze hopelijk gewend helemaal niets persoonlijk te nemen, tenzij het een compliment is. Een paar collega's die ik zelf heb mogen begeleiden als stoffige co-promotor wil ik nog graag noemen omdat ik

misschien nog wel meer van hen geleerd heb dan zij van mij: Inka, Carmen, Michèle, Laura, Chris en Catarina en de 57 bachelor en master studenten die ik de afgelopen jaren begeleid heb:

Dankjewel!

Ook al zijn ze niet aanwezig in de zaal, toch wil ik ook graag een paar internationale collega's noemen omdat ze al tijdens mijn eerste voorzichtige stapjes als wetenschapper hun vertrouwen in mij stelden en mij unieke kansen gaven, bijvoorbeeld om mee te varen tijdens zeegaande expedities, en mij de volledige vrijheid gaven zelfstandig onderzoek te komen doen als postdoc in Bremen; Ralph Schneider, Dierk Hebbeln, Gerold Wefer en vele andere MARUM collega's:

Danke schön!

Eén andere collega, inspirator en mentor wil ik ook graag nog even apart noemen: Patrick De Deckker, één van de meest veelzijdige aardwetenschappers die ik ken. De manier waarop hij vooral anderen stimuleert het beste uit zichzelf en uit het schaarse onderzoeksgeld te halen is echt een voorbeeld voor mij en vele anderen, naast zijn gastvrijheid, geduld, humor en verbazingwekkende manier om na een lange velddag in de woestijn zelfs op de meest primitieve houtvuurtjes "in-the-middle-of-letterlijk-nowhere" een koningemaal op tafel weet te zetten:

Thanks so much Mate!

NIOZ-collega's; van matrozen tot kapiteins, van technici tot laboranten, van schoonmakers, kantinedames en administratief personeel tot secretaresses en andere ondersteuners maar vooral iedereen binnen de afdeling Ocean Systems:

Dankjewel!

VU-collega's van alle clusters; naaste collega's in de mariene groep maar bovenal die van de vierde verdieping en uiteraard alle studenten die ik tijdens college iets probeer bij te brengen maar waarvan ik stiekem zelf nog veel meer leer:

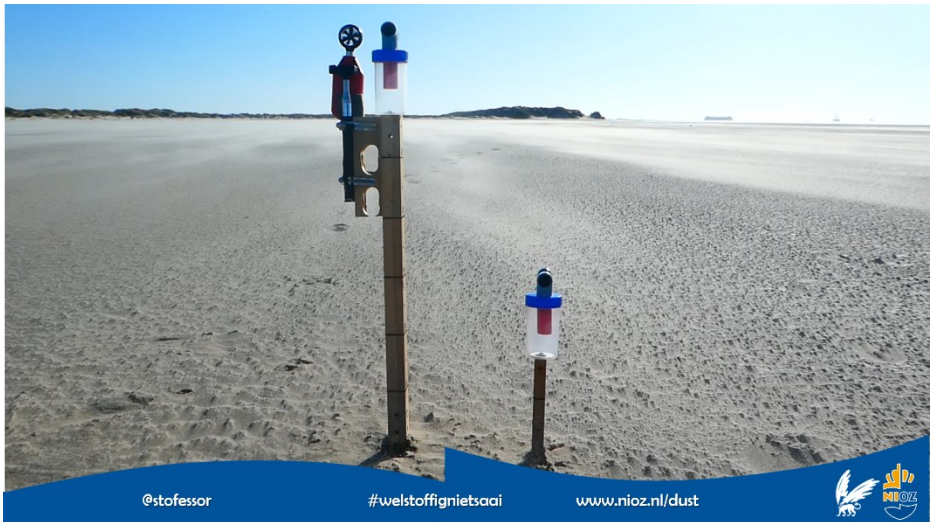
Dankjewel.

Familie en vrienden die mijn stoffige verhalen altijd moesten aanhoren (en ik heb er nog veel méér!):

Dankjewel!

Tot slot: ik hoop dat ik u *stof tot nadenken* heb gegeven.

Ik heb gezegd.



De ceremonie van deze inaugurele rede is terug te kijken via: www.stuut.tv/news

Voor meer informatie over *aeolische sedimentologie*, zie: www.nioz.nl/dust

Geciteerde publicaties:

- 1 Shao, Y., Wyrwoll, K.-H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., Mikami, M., Tanaka, T. Y., Wang, X. & Yoon, S. (2011) Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research* 2, 181-204.
- 2 Lambert, F., Delmonte, B., Petit, J. R., Bigler, M., Kaufmann, P. R., Hutterli, M. A., Stocker, T. F., Ruth, U., Steffensen, J. P. & Maggi, V. (2008) Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. *Nature* 452, 616-619.
- 3 Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. & Stocker, T. F. (2008) High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453, 379-382.
- 4 Tierney, J. E., Zhu, J., King, J., Malevich, S. B., Hakim, G. J. & Poulsen, C. J. (2020) Glacial cooling and climate sensitivity revisited. *Nature* 584, 569-573.
- 5 Grosswald, M. G. (1980) Late Weichselian Ice Sheet of Northern Eurasia. *Quaternary Research* 13, 1-32.
- 6 Tjallingii, R., Claussen, M., Stuut, J.-B. W., Fohlmeister, J., Jahn, A., Bickert, T., Lamy, F. & Rohl, U. (2008) Coherent high- and low-latitude control of the northwest African hydrological balance. *Nature Geoscience* 1, 670-675.
- 7 Groot, J. J. & Groot, C. R. (1966) Pollen spectra from deep-sea sediments as indicators of climatic changes in southern South America. *Marine Geology* 4, 525-537.
- 8 Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y. & Sambridge, M. (2014) Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 15296-15303.

- 9 Pedersen, R. A., Langen, P. L. & Vinther, B. M. (2017) The last interglacial climate: comparing direct and indirect impacts of insolation changes. *Climate Dynamics* 48, 3391-3407.
- 10 Etheridge, D., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., Francey, R., Barnola, J.-M. & Morgan, V. I. (1996) Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research* 101, 4115-4128.
- 11 Arrhenius, S. (1896) On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41, 237-276.
- 12 Foote, E. (1856) Circumstances Affecting the Heat of the Sun's Rays. *The American Journal of Science and Arts* 22, 382-383.
- 13 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press)
- 14 Martin, J. H. (1990) Glacial-interglacial CO₂ change: the iron hypothesis. *Paleoceanography* 5, 1-13.
- 15 Martin, P., van der Loeff, M. R., Cassar, N., Vandromme, P., d'Ovidio, F., Stemmann, L., Rengarajan, R., Soares, M., González, H. E., Ebersbach, F., Lampitt, R. S., Sanders, R., Barnett, B. A., Smetacek, V. & Naqvi, S. W. A. (2013) Iron fertilization enhanced net community production but not downward particle flux during the Southern Ocean iron fertilization experiment LOHAFEX. *Global Biogeochemical Cycles* 27, 871-881.
- 16 Smetacek, V., Klaas, C., Strass, V.H., Assmy, P., Montresor, M., Cisewski, B., Savoye, N., Webb, A., d'Ovidio, F., Arrieta, J.M., Bathmann, U., Bellerby, R., Berg, G.M., Croot, P., Gonzalez, S., Henjes, J., Herndl, G.J., Hoffmann, L.J., Leach, H., Losch, M., Mills, M.M., Neill, C., Peeken, I., Rottgers, R., Sachs, O., Sauter, E., Schmidt, M.M., Schwarz, J., Terbruggen, A., Wolf-Gladrow, D., (2012) Deep carbon export from a Southern Ocean iron-fertilized diatom bloom. *Nature* 487, 313-319. 2012.
- 17 Weltje, G. J. & Prins, M. A. (2013) Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics. *Sedimentary Geology* 162, 39-62.
- 18 Van der Does, M., Korte, L. F., Munday, C. I., Brummer, G. J. A. & Stuut, J. B. W. (2016) Particle size traces modern Saharan dust transport and deposition across the equatorial North Atlantic. *Atmospheric Chemistry & Physics* 16, 13697-13710.
- 19 Otto, S., de Reus, M., Trautmann, T., Thomas, A., Wendisch, M. & Borrmann, S. (2007) Atmospheric radiative effects of an in situ measured Saharan dust plume and the role of large particles. *Atmospheric Chemistry & Physics* 7, 4887-4903.
- 20 Claquin, T., Roelandt, C., Kohfeld, K. E., Harrison, S. P., Tegen, I., C., P. I., Balkanski, Y., Bergametti, G., Hansson, M., Mahowald, N. M., Rodhe, H. & Schulz, M. (2003) Radiative forcing of climate by ice-age atmospheric dust. *Climate Dynamics* 20, 193-202.
- 21 Satheesh, S. K. & Ramanathan, V. (2000) Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and Earth's surface. *Nature* 405, 60-63.
- 22 Korte, L.F., Brummer, G.J.A., van der Does, M., Guerreiro, C.V., Hennekam, R., van Hateren, J.A., Jong, D., Munday, C.I., Schouten, S., Stuut, J.B.W. (2017) Downward particle fluxes of biogenic matter and Saharan dust across the equatorial North Atlantic. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 6023-6040.
- 23 Van der Does, M., Pourmand, A., Sharifi, A. & Stuut, J.-B. W. (2018) North African mineral dust across the tropical Atlantic Ocean: Insights from dust particle size, radiogenic Sr-Nd-Hf isotopes and rare earth elements (REE). *Aeolian Research* 33, 106-116.
- 24 Guerreiro, C. V., Baumann, K. H., Brummer, G. J. A., Fischer, G., Korte, L. F., Merkel, U., Sá, C., de Stigter, H. & Stuut, J. B. W. (2017) Coccolithophore fluxes in the open tropical North Atlantic: influence of thermocline depth, Amazon water, and Saharan dust. *Biogeosciences* 14, 4577-4599.
- 25 Guerreiro, C. V., Baumann, K.-H., Brummer, G.-J. A., Korte, L. F., Sá, C. & Stuut, J.-B. W. (2019) Transatlantic gradients in calcifying phytoplankton (coccolithophore) fluxes. *Progress in Oceanography* 176, 102140.
- 26 Van der Does, M., Brummer, G.-J. A., van Crimpen, F. C. J., Korte, L. F., Mahowald, N. M., Merkel, U., Yu, H., Zuidema, P. & Stuut, J.-B. W. (2020) Tropical rains controlling deposition of Saharan dust across the North Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters* 47, 1-10.
- 27 Korte, L. F., Pausch, F., Trimborn, S., Brussaard, C. P. D., Brummer, G. J. A., van der Does, M., Guerreiro, C. V., Schreuder, L. T., Munday, C. I. & Stuut, J. B. W. (2018) Effects of dry and wet Saharan dust deposition in the tropical North Atlantic Ocean. *Biogeosciences Discussions* 1-20.
- 28 Van der Does, M., Knippertz, P., Zschenderlein, P., Harrison, G. R. & Stuut, J.-B. W. (2018) The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles. *Science Advances* 4.

