

Aspecten en bevindingen der palaeoklimatologie

J. J. Nossin en Th. F. Rijnberg

(Vervolg)

A. THEORIEËN OVER TERRESTRISCHE OORZAKEN

a. *Continentverschuiving*

Deze, door WEGENER in 1924 ontwikkelde theorie houdt zich feitelijk niet met klimaatswijzigingen bezig, maar met het binnendrijven van continent-schollen in andere klimaatsgordels, waardoor uiteraard zo'n gebied een ander klimaat krijgt.

Hij neemt dus een over de aarde als geometrische figuur constante ligging van de klimaatsgordels aan; de continenten hebben in geologische tijd t.o.v. elkaar en t.o.v. de polen, verschillende bewegingen uitgevoerd.

Geologisch gezien heeft Wegener's theorie nog steeds veel aantrekkelijks; het moderne palaeomagnetische onderzoek geeft aan het idee van continentbewegingen een meer solide basis dan voordien mogelijk was. Palaeoklimatologisch vindt Wegener niet zoveel aanhang. De bewegingen zijn, volgens Wegener, zeer langzaam, waardoor de kleinere klimaatsfluctuaties in het geheel niet kunnen worden verklaard. Voor de Permocarbonische ijstijd zou een aanvaarden van Wegener's theorie geen moeilijkheden opleveren, maar voor de oudere ijstijden des te meer.

b. *Geografische Klimaatscontrole*

Orogenetische fasen met tussenruimten van ca. 250 miljoen jaar zouden de oorzaak van klimaatswijzigingen op grote schaal (i.c. verijzingen) kunnen zijn. Door opheffing zou de temperatuur dalen door de toegenomen hoogte, en de neerslag om dezelfde reden toenemen, waardoor verijzing van gebergten optreedt, die als kern voor latere landijskappen zou dienen.

Na het hoogtepunt van de orogenese zou dan het ijs weer verdwijnen door de geringere wordende hoogte.

Het feit evenwel, dat een ijstijd altijd pas enige miljoenen jaren na een gebergte-ording optreedt, geeft moeilijkheden. Men heeft hiervoor o.a. verklaringen gezocht in:

Het langzame afkoelen van de Oceanen. Eerst wanneer gletschers de zee bereiken, zou de afkoeling van het oceaanoewater sneller gaan, waardoor de verijzing een wereldvattend karakter zou krijgen. Dit zou dus pas geruime tijd na de orogenese het geval zijn.

Bergvorming alleen is *niet voldoende*; een andere oorzaak (zon?!) zou de glaciatie in gang moeten brengen.

Bergvorming zou gepaard gaan met *temperatuurverhoging* van de bodem, door het vrijkomen van aardwarmte tijdens de gebergte-ording.

BROOKS gaat wat uitvoeriger in op de invloed van gebergten op het klimaat.

Algemeen wordt aanvaard, dat de aanwezigheid van gebergten een noodzakelijke voorwaarde is voor het ontstaan van glaciaties; bergen vormen een accumulatie- en verzamelbekken. (Over de Keewatin ijskap heeft hij het maar niet). De invloed van gebergten op het klimaat brengt hij onder vier factoren:

1e. De temperatuuurdaling met de hoogte 0,5 gr C/ 100 m, of 3 gr. F per 1000 voet. Een stijging van 1000 voet geeft over landgebieden een temp. daling van 3 gr. F, of van 0,8 gr. F. over de hele aarde.

2e. Reflectie van zonnestraling door wolken. Aan de loefzijde van gebergten heerst een grotere bewolking, die zich gedeeltelijk nog over de waterscheiding voortzet. Wolken kaatsen ca. 60-75% van de zonnestraling naar de ruimte terug, waarbij niet de meervoudige reflecties worden genoemd. Alleen in de winter op hogere breedten is het reflectiepercentage beduidend geringer.

3e. De afkoelende werkingen van de oppervlakte van ijs en sneeuw (grote albedo).

4e. Warmteverlies bij toegenomen verdamping (want er is in glaciële tijden immers ook meer neerslag!)

Aldus komt BROOKS voor het maximum (de maxima) der Pleistocene verijzing(en) op een berekening van de temperatuur daling:

Temp. afname met de toegenomen hoogte	: 0,8 gr. F.
Toename bewolking, temp. daling daardoor	: 0,4 gr. F.
Toename sneeuw- en ijsgebied, afkoelende werking, temperatuur daling	: 1,5 gr. F.
Toename verdamping	: 1,2 gr. F.
Totaal	<u>3,9 gr. F.</u>

Aan het einde van een (geologisch en orogeenetisch) rustige periode schat hij, door de gemiddeld geringere hoogte van de landgebieden der hele aarde, de temperatuur nog eens een 9 gr. F. hoger dan thans.

De rol van polaire ijskappen: De huidige lage wintertemperatuur in het Noordpoolgebied, met minima van -40 gr. F. in januari, is geheel het gevolg van de aanwezigheid van het ijs (aldus BROOKS). Zie ook de uitspraken van FLOHN, die dit eerder als de oorzaak van de aanwezigheid van ijs zou willen zien, algemeen gesteld. Was, zo zegt BROOKS, het ijs er niet, en waren overigens de condities gelijk, dan was de gemiddelde wintertemperatuur bij de pool iets van 24 gr. F., dus lichte vorst. Wanneer een ijskern een diameter van ca. 250 km. heeft bereikt, dan groeit hij, door zijn eigen afkoelende werking, dóór, ondanks de hogere temperaturen, waar hij op lagere breedten aan wordt blootgesteld, totdat het grootste gedeelte van de Arctische bassins is gevuld.

Was al dat ijs weg, dan zou, bij overigens gelijke condities, het klimaat aanzienlijk beter zijn, de depressiebanen zouden veel Noorderlijker liggen, terwijl de depressies zelf veel zwakker zouden zijn, en vegetatie zou zich tot op veel hogere breedten voortzetten (BROOKS). Flohn vermeldt ongeveer hetzelfde, bij zijn beschrijving van de circulatie in een interglaciaal.

Aldus, nog steeds BROOKS, bedraagt het temperatuur verschil voor hoge breedten tussen glaciële- en ijsvrije tijden, slechts een 10 gr. F. Vijf gr. F. temperatuurstijging op die breedten zou reeds voldoende zijn, om al het ijs in de arctische wateren te doen verdwijnen. Dit kan dus veroorzaakt worden door een temperatuurstijging van de hele aarde, maar het hoeft niet, want het kan net zo goed worden veroorzaakt door een verhoogd warmtetransport naar hogere breedten.

In geologisch rustige tijden, zo verwacht BROOKS, zijn de continenten kleiner, de zeestraten naar de Arctische gebieden zullen daardoor allicht breder zijn geweest dan thans (smaller kan nl. vrijwel niet) en het Poolwaartse warmtetransport zou dus veel intensiever geweest zijn.

In het LAAT-PALAEOZOICUM had het Noordelijk halfmond een goed klimaat waarin

rijke vegetatie mogelijk was (steenkool!), terwijl gelijktijdig of kort daarna grote ijskappen op lage breedte voorkwamen. WEGENER'S theorie geeft een snelle verklaring daarvan, maar om verschillende redenen geeft BROOKS de voorkeur aan een andere theorie daarover.

De ligging van de continenten zou zodanig geweest zijn, dat op 't Zuidelijk continent grote gletschers ontstonden, die door mist- en wolkenvelden tegen de tropenzone(!) zouden moeten beschermd zijn geworden. Toen deze gletschers de Oceaan tenslotte bereikten, koelde het Oceaanwater snel af, waardoor de steenkool-vegetatie op het Noordelijk Continent een einde nam, en ook dáár glaciatie begon.

Deze theorie lijkt rijkelijk onwaarschijnlijk, en we zullen er daarom ook niet verder op ingaan.

Hiermee stappen we van deze geografische klimaatscontrole af.

Een theorie die nog even de moeite van het noemen waard is, is die van HUMPHREY, die meent dat na tijden van sterke vulkanische activiteit, de stratosfeer een groot gehalte aan vulcanisch stof zal bevatten, waardoor de instraling wordt onderschept, en de temperatuur daalt en de neerslag (condensatiekernen) toeneemt: ijstijd.

Veel aanhang vindt de theorie niet.

Vergelijkend zien we dus, dat er in temperatuurberekeningen tussen WILLETT en BROOKS nogal wat verschillen bestaan, terwijl verder de theorieën, door hun totaal verschillende punten van uitgang, moeilijk vergelijkbaar zijn. Ook REX, zoals we straks zullen zien, komt even op de orografische invloeden, maar dan die op de circulatie, waaruit hij het min of meer stationaire karakter van zijn blokkerende maxima tracht te verklaren.

HUNTINGTON is de opsteller van een theorie, die wij alleen even zouden willen noemen, zonder er op in te gaan, nl. die van *de beweging van de depressiebanen rondom de magneetpool*.

Aangezien de magneetpool van ligging verandert, zou ook de baan der depressies veranderen. Hierover is evenwel nog weinig bekend.

c. Thermische isolatie

De hypothese van EWING en DONN welke dateert van 1956 tracht een verklaring te vinden van het ritme van de afzonderlijke glaciaties. Aan de basis van hun ideeën liggen in feite twee concepten, n.l.:

1. Voor de groei van ijskappen is een grote hoeveelheid vocht en koude noodzakelijk.
2. De geografische polen dienen zich te bevinden in een gebied dat thermisch geïsoleerd is.

Punt 1 behoeft na het vorige geen nadere uitleg meer. Het tweede vereist dat echter wel. Door verschil in warmtetoevoer (de polen ontvangen minder energie dan de streken rond de equator) ontstaan circulatiepatronen welke weer, min of meer, gecompenseerd worden door convectiestromen. Anders gezegd: de Noord-Zuid (N. Half-rond) gerichte luchtstroming induceert een Noord-Zuid gerichte oppervlaktestroming in de oceanen. Er vloeit als het ware water van de polen naar de equator. Hiervoor wordt gecompenseerd door een relatief warmere onderstroom van de equator naar de polen. Dit algemene systeem wordt vanzelfsprekend doorsneden door systemen welke afhankelijk zijn van de land-zee verdeling. Deze kunnen een positief dan wel een negatief effect hebben op het generale systeem. Ook de rotatie van de aarde oefent invloed uit op deze circulatiesystemen.

Een gebied wordt thermisch geïsoleerd genoemd als genoemde convectiestromen het gebied niet kunnen bereiken. Dit is b.v. het geval als een zeebekken omringd is door land. Of indien een landgebied omringd is door zee. Dit is precies het geval met resp. de Noordpool en de Zuidpool. De polen nu ontvangen de minste zonne-energie. Het is bekend dat in het geologisch verleden de magnetische polen op plaatsen gelegen hebben welke verschillen van de huidige.

Men neemt tevens aan dat de geografische polen de magnetische volgen tijdens hun wandeling. De hoek tussen beide assen blijft daarbij nagenoeg hetzelfde, dus gering. Komt de geografische pool in een thermisch geïsoleerd gebied terecht dan koelt het poolgebied overmatig af. Warmte-uitwisseling met de omgeving wordt sterk gereduceerd. Alle vocht rond het poolgebied slaat als sneeuw in dat gebied en het haar omringende gebied neer. De oceanen verliezen daarbij water en in het geval van de Noordpool komt de drempel van de Beringstraat droog te liggen. De aanvoer van relatief warm zeewater uit zuidelijker streken stagneert, en daarmee ook de vochtvoevoer, en dus de sneeuwval. Er wordt geen nieuw landijs meer gevormd, ergo het ijs wordt vanuit het zuiden afgesmolten. Een glaciaal is afgelopen en maakt plaats voor een interglaciaal. De zeespiegel zal vervolgens weer stijgen en na verloop van tijd kan de historie zich weer herhalen.

Het glaciatieproces wordt tevens versterkt door de versterking van het reliëf waardoor, vanwege de hoogte, lagere temperaturen worden bereikt waardoor de verijzing toeneemt. Door een groter albedo van sneeuw en ijs wordt tevens veel zonnestraling teruggekaatst, dus wederom een versterking van het systeem waardoor lagere temperaturen bereikt kunnen worden. Om een verklaring te geven van het einde der ijstijden dient diep ingegaan te worden in een complexe materie die wij hier zullen laten rusten. EWING en DONN hebben zich aldus met name gericht op de verschijnselen rond de Noordpool.

d. WILSON (1964) echter richt zijn aandacht op het andere einde der wereld. Wordt een pakket ijs dikker, dus zwaarder, dan zal op een zeker moment door wrijving van het ijs over het (ruwe) onderliggende oppervlak en de reeds aanwezige warmte vanuit de aarde de invloed van de lage omgevingstemperatuur op de temperatuur van het ijs aan haar basis afnemen.

Het pakket ijs kan gaan glijden en zich vanuit het centrum radiaal over de omringende zee uitspreiden. Aldus kan het ijs geleidelijk een groot oppervlak gaan beslaan. De oceanen koelen daarbij af. Vanwege het grote albedo van ijs en sneeuw wordt veel warmte de ruimte ingestuurd en deze twee factoren veroorzaken een algemene afkoeling van het aardoppervlak, een ijstijd. Door dit proces raakt Antarctica zelf veel ijs kwijt. De temperatuur van de omgeving krijgt weer de overhand over de basistemperatuur van het ijs. Het wegglijden neemt af, de spreiding van het ijs over de oceanen houdt op, de aarde warmt wederom op en de ijstijd behoort tot het verleden.

e. Blokkade in de midden-troposfeer

De term 'blocking action' is hier vertaald door 'blokkade', het is moeilijk, er een juiste vertaling voor te vinden.

De theorie over blocking action is door REX ontwikkeld. Bij zijn beschouwingen gaat hij uit van de toestand van het 500 mb. niveau.

Blocking action is een bepaalde anomalie in de jetstream, onafhankelijk van het seizoen.

Normaliter is de jetstream een zonale stroming waarin hoge windsnelheden worden bereikt.

De jetstream valt bij een bepaald punt uiteen in twee banen. Gewoonlijk ontwikkelt zich een warme rug (anticyclon, een 'hoog' van het 500 mb. vlak) juist stroomafwaarts van het splitsingspunt van de jetstream. Dit is het blokkerend hogedruk gebied. De ligging van de blokkade is dikwijls quasi-stationnair; de overgang van zonale naar cellulaire circulatie geschiedt *abrupt* en bij voorkeur tussen 30 gr. WL en 10 gr. EL.

De karakteristieken, waaraan een dergelijke anomalie van de jetstream moet voldoen, om door REXX als blocking action te worden beschouwd, zijn:

1. De Westenwindstroom moet in twee takken splitsen.
2. Elke tak moet een flinke luchtmassa transporteren.
3. Het dubbel-jet stelsel moet zich over minstens 45 gr. lengte uitstrekken.
4. Er moet een scherpe, uitgesproken overgang zijn tussen het zonale circulatietype bovenstrooms, en het meridionale type benedenstrooms van het splitspunt.
5. Het aldus beschreven circulatiepatroon moet minstens gedurende 10 dagen duidelijk herkenbaar zijn.

De blokkade begint, als geval 1 optreedt.

Vervolgens geeft REX een gedetailleerde beschrijving van enige blokkade-gevallen, en leidt vervolgens op grond van een hydrologisch-analoog, een aantal formules voor windsnelheid, momentoverdracht, e.d. af.

Boven- en benedenstrooms van het splitspunt heerst een groot verschil in windsnelheid. Voor zo'n plotselinge sprong in windsnelheid moet de stroomsnelheid van de lucht boven een bepaalde kritische waarde liggen. Ook is van belang de expansieverhouding, d.i. de verhouding van de doorsneden van de stroombaan boven resp. beneden de jump.

Blocking ontstaat dus als de jetstream een super-critische snelheid heeft. Maar dit is doorgaans het geval. Blokkade begint pas na de inwerking van een eindige, externe factor op het systeem. Naarmate de stroom sneller en minder diep is, is hij gevoeliger voor dergelijke impulsen. Deze impuls kan kleiner zijn, naarmate de *critische verhouding N* groter is. Zie figuur 1.

U_{00} is de kritische snelheid,

$$N = \frac{U_{00}}{U_0}$$

U_0 is de snelheid stroomopwaarts van de jump.

Naarmate N groter is, groeit de blokkade sneller. De beweging van het 'block' is onregelmatig, met een tendens tot achterwaartse (westwaartse) beweging tijdens zijn groei, en een voorwaartse (oostwaartse) beweging tijdens de afname ervan. I.h.a. hangt een achterwaartse beweging samen met een grote waarde van N . Het verdwijnen van een blocking action hangt samen met, of is een gevolg van het zeer laag worden van N .

Soms is het eerste element na het splitspunt niet een warme rug, maar een koude trog.

Meestal vindt men slechts één blokkade op een halfrondpatroon, soms twee, maar dan lost in de regel één van de twee zeer snel op, terwijl de andere bijzonder krachtig wordt.

Soms wordt het geblokkeerde gebied zo groot, dat het zich rondom het halfrond uitstrekt tot in de bovenloop van zijn 'eigen' jetstream, aldus zichzelf vernietigend.

Meandervorming in de jetstream veroorzaakt ook meridionale uitwisseling, maar is

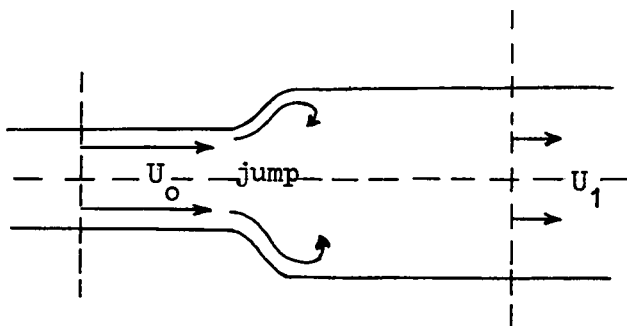


Fig. 1

toch iets heel anders. Dit hangt nl. samen met veranderingen in de stroombaan, die in tijd en ruimte min of meer continu zijn; blokkade daarentegen hangt typisch samen met het verschijnen van een semi-stationnaire discontinuïteit in de stroomeigenschappen langs het 'stroomkanaal'.

Uit een studie van alle blokkade-gevallen sinds 1932 kan Rex vervolgens een aantal interessante conclusies afleiden.

Er zijn *twee uitgesproken voorkeursgebieden* voor blokkade, nl. tussen 5 en 15 gr. WL (Atlantisch; 82 gevallen in de periode 1932-40 en 1945-49), en tussen 145 en 155 gr. WL (Pacifisch; 30 gevallen).

De ligging van deze voorkeursgebieden is niet verwonderlijk. I.v.m. de ligging van IJsland- en Aleuten-minimum, die in de lagere troposfeer koude luchtmassa's Zuidwaarts transporteren en daardoor plaatselijk sterkere en geconcentreerdere jetstreams veroorzaken, die dus ook gevoeliger zijn voor externe impulsen, waarvan deze minima ook weer de leveranciers zijn.

Gemiddeld komt over de Atlantische Oceaan 1 blokkade per 2 maanden voor, waarvan de meeste tussen maart en mei, de minste tussen juli en september. Over de Pacifische Oceaan gemiddeld 1 per 4 maanden. Dit is ook heel verklaarbaar, daar de jetstream over Noord-Amerika en de Westelijke Atlantic veel sterker en smaller is, dan over de Westelijke Pacific.

De *duur* van een Atlantische blokkade bedraagt gemiddeld 16-17 dagen, een maximum frequentie van 14 dagen, en een maximum tijdsduur van 34 dagen. Atlantische blocks bewegen meestal gedurende de eerste helft van hun bestaan een 10 gr. naar het W, waarna ongeveer 20 gr. naar het E.

BOLIN besprak de stabiele golven in de jetstream die door orografische invloeden worden veroorzaakt; het lijkt REX niet onmogelijk, dat de vrij stabiele ligging van de blokkades hiermee samenhangt, dus dat ze in een 'orografisch' veroorzaakte rug in de Westelijke bovenwinden blijven hangen.

EFFECT VAN BLOKKADE OP HET EUROPEESE KLIMAAT

1. *Neerslag* over continent, Scandinavië, en Britse eilanden vèr beneden normaal.
2. *Winter-temperaturen* aan de oppervlakte 2-6 gr. C. boven normaal in Centraal- en Noord Scandinavië, maar beneden normaal over het hele continent en de Britse Eilanden, met uitersten over de Balkan, waar de wintertemp. 8-10 gr. C. beneden normaal is,

Zomertemperaturen: In Scandinavië hoger, en over de Britse Eilanden en Centraal-West Europa eveneens positieve anomalieën.

3. *Neerslag* i.h.a. ver beneden normaal in de winter; de neerslag wordt voor een goed deel veroorzaakt door buien t.g.v. convectie.

4. *Winden* i.h.a. over het continent NNE. Stormen vrijwel afwezig, geen frontpassages.

Geblokkeerde perioden worden doorgaans niet gevolgd door een periode met tegen-gestelde klimaatseigenschappen.

EFFECT VAN EEN ZONAAL CIRCULATIETYPEN OP HET EUROPEESE KLIMAAT

Karakteristieken van een periode met sterke zonale circulatie in de bovenlucht:

1. *Neerslag*bedragen over Schotland, Scandinavië e.o. zijn *enige malen* (250 - 300%) *groter*, dan normaal.

2. In de winter over Continent, Scandinavië en Britse Eilanden, abnormaal *hoge temperaturen*, (2-4 gr. C. boven normaal).

In de *zomer*, temp. iets beneden normaal (1-2 gr. C.) over de west hellingen van Noorwegen en West Europa, met positieve anomalieën aan de lijszijde van gebergten.

3. Grootste deel van de neerslag veroorzaakt door frontale activiteit, neerslag i.h.a. ver boven normaal.

4. Over Scandinavië en Noord Europa voornamelijk sterke Westenwinden aan de oppervlakte, met stormachtig weer. Zuid-Europa: zwakke winden, en rustig weer.

EFFECT VAN BLOKKADE OP GLACIATIE.

AHLMANN maakte duidelijk dat vooral de zomertemperaturen van belang zijn bij het ontstaan of verdwijnen van ijs. In verband met het bovenstaande zal duidelijk zijn, dat i.h.a. *blokkade ongunstig* is voor het optreden van glaciaties; een *zonale circulatie daarentegen* is *gunstig* voor glaciaties (in de zomer dan koele, vochtige, luchtmassa's, met i.h.a. bewolkte hemel, veel neerslag, weinig ablatie.)

ROL VAN BLOKKADE BIJ IJSUITBREIDING

Bij zonale circulatie in de bovenlucht ligt de jetstream op ca. 55 gr. NB; dus gunstig voor de gletschergroei en ijskapsvorming in Scandinavië: Onder invloed van de zwaartekracht beweegt het ijs zich naar het Z, waardoor de polaire anticycloon aan de oppervlakte intensiever wordt, en de jetstream naar een zuidelijker baan wordt verlegd; dus ook de zone van maximale neerslag, hetgeen weer gunstig is voor verdere ijsuitbreiding. Dit geldt echter tot de blokkade van de jetstream. De ijsuitbreiding gaat nog lang daarna door, alleen al onder invloed van de zwaartekracht. Aldus zou een periode met frequentere blokkade steeds enige duizenden jaren vooraf moeten gaan aan een maximale ijsuitbreiding. Tal van andere auteurs huldigen eveneens de opvatting, dat de klimaatsverbetering reeds inzette, lang voor het ijs zijn maximale uitbreiding had bereikt, en dat de terugtrekking van het ijs lang achter de klimaatsverbetering aanhobbelde. In het algemeen dus, dat de klimaatsfluctuaties een fase vóór zijn op, dan wel min of meer in tegengestelde fase met de gletscheroscillaties.

REX' theorie schijnt wel een opvatting met perspectief te zijn. Evenwel geeft ook deze theorie niet de oorzaak van het ontstaan van een blokkade.

f. Veranderingen in CO-2 gehalte van de atmosfeer.

Eén van de oudste theorieën in de palaeoklimatologie is de CO-2 theorie. In de

laatste jaren had hij vrijwel geen aanhang meer, daar 'alle langgolelige straling (d.i. uitgaande warmtestraling van de aarde), die door CO-2 wordt geabsorbeerd, ook door waterdamp wordt geabsorbeerd' (BROOKS).

Op grond van nieuwe, veel nauwkeuriger stralingsmetingen wil PLASS de CO-2 theorie nieuw leven inblazen, zonder hem daarbij meteen als alleenzaligmakend te beschouwen.

Bij zijn berekeningen neemt PLASS aan, dat, wanneer het CO-2 gehalte van de atmosfeer wisselt, de andere factoren die de stralingsbalans beïnvloeden, constant blijven.

Uitgangspunt van zijn berekeningen is: Als de gemiddelde temperatuur van het aardoppervlak met 1 gr. C. toeneemt, wordt door de aarde 0,0033 cal/cm²/min. méér naar de ruimte uitgestraald. Dit bedrag is nog niet nauwkeurig vast te stellen voordat ook, naast het CO-2 absorptiespectrum, een nauwkeurige studie is gemaakt van het H₂O absorptiespectrum. Eventueel moeten dus later al zijn uitkomsten met een hieraan ontleende correctiefactor worden vermenigvuldigd. Hiervan uitgaande vindt hij:

Als het CO-2 gehalte in de atmosfeer wordt verdubbeld, stijgt de temp. van de aardoppervlakte met 3,6 gr. C; wordt het gehalveerd, dan daalt de temperatuur met 3,8 gr.C. Dit voor heldere hemel. Bij een matige bewolking komt hij op 2,5 resp. 2,7 gr. C. omdat het CO-2 minder uitstraling absorbeert in de nabijheid van wolken. Bezwaar tegen de CO-2 theorie is gewoonlijk, dat het water in precies dezelfde spectrumzone absorbeert als het CO-2, en dat CO-2 absorptie dus nooit veel invloed kan hebben. Hiertegen voert PLASS aan, dat de waterdamp vooral in de onderste delen van de atmosfeer is geconcentreerd, en dat dus betrekkelijk dicht boven de aarde reeds de uitstraling volledig wordt geregeerd door het CO-2 gehalte. Verder concludeert hij, uit de ligging van de spectraallijnen, dat de gecombineerde doorlating van H₂O en CO-2 ca. gelijk is aan het produkt van de beide afzonderlijke doorlatenheden. Ook ELSASSER meent, dat de rol van waterdamp bij de straling veel bescheidener is dan men altijd heeft gemeend.

Vervolgens komt Plass tot het opstellen van een CO-2 balans, die voor ons verhaal weinig ter zake doet.

De sleutel van PLASS' theorie ligt in de uitwisseling van CO-2 tussen de atmosfeer en de Oceanen.

De doorstroomtijd van het Oceaanwater door de diepzee ligt in de orde van grootte van 10.000 jaar.

Tussen de atmosfeer en de Oceaan heerst een zeker evenwicht in CO-2 gehalte; op het ogenblik is dit evenwicht vrijwel bereikt.

Tevens moet in het Oceaanwater een evenwicht heersen of zich instellen tussen CO-2 en carbonaatgehalte. Is er teveel vrije CO-2, dan slaan carbonaten neer, is er te weinig, dan lossen carbonaten op.

Tenslotte speelt bij al deze evenwichten het *volume* van de Oceaan een rol; in glaciële tijden is dat aanzienlijk minder dan in interglaciële tijden of interstadia. Schattingen noemen een bedrag van 5-10%, van het volume van de Oceanen, dat als ijs zou zijn vastgezet in glaciële tijden.

Als de atmosferische CO-2 druk wisselt van ¼ tot 4 maal zijn huidige waarde, dan verandert de pH van het Oceaanwater slechts met ½ eenheid. Daar verschillende

dieren grotere pH-wisselingen niet verdragen, concludeert PLASS: *De hoeveelheid CO-2 in de atmosfeer kan dus blijkbaar snel veranderen met een factor 53, zonder daarbij het mariene leven te beïnvloeden.*

VERKLARING VAN KLIMAATSWIJZIGINGEN DOOR CO-2 THEORIE.

Als de totale hoeveelheid CO-2 in het systeem atmosfeer-oceaan een weinig minder wordt dan thans, gaat het klimaat schommelen tussen perioden met ijsmassas, en perioden met weinig of geen ijs. Er is dan geen klimatologische stabiliteit mogelijk.

Deze uitspraak wordt geïllustreerd met het volgende voorbeeld:

Aanname is, dat een temperatuur daling van de aardoppervlakte met 3,8 gr. C., glaciële condities zou doen intreden. Verder, dat de gemiddelde circulatietijd door de diepzee 10.000 jaar is. De tijd om, na verstoring, het evenwicht van CO-2 in het systeem opnieuw te bereiken, schat hij dan op 50.000 jaar.

Aldus gaat hij er van uit, dat op een bepaald moment de totale hoeveelheid CO-2 in het *gehele systeem* atmosfeer-Oceaan, met 7% vermindert, en op deze totaalwaarde blijft gedurende de eerstkomende miljoenen jaren.

Dan stelt zich tussen atmosfeer en Oceaan dus een *nieuw evenwicht* in op een lager totaal; en als dat bereikt is, is de CO-2 druk van de atmosfeer juist *de helft* van die van vroeger. Aldus ontstaat (zie boven) een temperatuurdaling van 3,8 gr. C. die glaciële condities oproept. Daardoor neemt het volume van de Oceaan af, waardoor een overmaat van CO-2, in de Oceanen, ontstaat. De Oceaan staat dus CO-2 af aan de atmosfeer, om weer in evenwicht te komen. Daardoor neemt dus het CO-2 gehalte van de atmosfeer toe, nadat het (theoretische) nieuwe evenwicht zich heeft ingesteld, de temperatuur stijgt daardoor, en de gletschers smelten weer af.

Daardoor neemt het volume van de Oceaan weer toe, er is dus een CO-2 tekort, dat wordt aangevuld uit de atmosfeer: temperatuur daalt weer, dus opnieuw gletschers, etc. Zo herhaalt zich dit spelletje met periodes van ca. 50.000 jaar.

Zolang dus de totale CO-2 hoeveelheid maar kleiner blijft dan voor de evenwichtstoestand noodzakelijk is, is er geen klimatologische stabiliteit mogelijk. De glaciaal-interglaciaal, afwisseling eindigt, als het totale CO-2 bedrag van het systeem weer is toegenomen

De hier genoemde bedragen en tijden zijn natuurlijk arbitrair, maar het *principe* wordt er voldoende mee geïllustreerd.

Voor een glaciatie is ook verhoogde *neerslag* nodig. De CO-2 theorie verklaart ook dit. Bij een verminderd CO-2 gehalte van de atmosfeer zal de bovenkant van de wolken aanzienlijk meer warmte kunnen uitstralen, zowel absoluut als ten opzichte van de onderkant. Daardoor neemt de verticale temperatuur gradiënt in de wolk beïnvloedend toe, waardoor grotere convectie en meer en sneller neerslag optreden.

Na perioden van gebergtevorming worden grote hoeveelheden kristallijn gesteente aan verwerking blootgesteld; carbonaatvorming legt CO-2 uit de lucht vast. Mogelijk is hier, aldus PLASS, tevens het verband met de orogenesen en de ijstijden aangeduid, en dan tevens het feit dat er tussen beide gebeurtenissen steeds een flinke tijd verloopt.

Met betrekking tot de Carbonische verijzing merkt PLASS op, dat het niet uitgeslo-

ten is, dat deze ijstijd beïnvloed werd door de grote hoeveelheid CO-2 die door de veengroei in deze tijd (steenkol) aan de atmosfeer werd onttrokken.

Om zijn theorie (die ook, door menselijke activiteiten in een continue temperatuur stijging van het aardoppervlak voorziet) te checken, is dus nog wel een groot aantal waarnemingen nodig. Ook van de uitwisseling tussen beide halfronden is nog weinig bekend. Waarnemingen omtrent de rol van H₂O en O₃ in de absorptie moeten worden uitgevoerd. Een verklaring van de stijging van het CO-2 gehalte aan het einde van een ijstijd geeft PLASS niet, maar hij noemt wel een paar mogelijkheden, zoals vermindering van het aan vertering blootgestelde oppervlak door ijsbedekking; vulcanisme, en dergelijke.

Het had ons beter geleken, als Plass niet was uitgegaan van een CO-2 afname in het *hele* systeem, want de daling van het CO-2 gehalte van de Oceaan kan alleen maar onder uitwisseling met de atmosfeer plaatsvinden. Er moet dus uit de atmosfeer een ontzaglijke hoeveelheid CO-2 worden vastgelegd, zóveel, dat daardoor de voortdurende, dan intredende, CO-2 toevoer uit de Oceanen nog wordt overtroffen. Zoals PLASS zelf zegt, geeft zijn theorie een verklaring voor alle verschijnselen die met glaciaties samenhangen.

Dat zegt evenwel haast elke auteur van zijn theorie.

De moderne gedachtingangen gaan dan ook haast allemaal in de richting van *combinatie* van een aantal factoren, meestal dan een externe met één of meer terrestische.

De statistieken wijzen echter uit dat de gemiddelde temperatuur van de atmosfeer tussen 1840 en 1940 met 4°C is gestegen en sinds 1940 met enkele tienden graden Celcius is gedaald. Ondanks het feit dus dat het percentage CO-2 in de atmosfeer sinds 1940 tamelijk sterk is gestegen, is de temperatuur aan het aardoppervlak gedaald. Kortom, wij zijn nog lang niet precies op de hoogte van de processen welke de oppervlakte temperatuur van de aarde beïnvloeden. Dit zal vermoedelijk te wijten zijn aan gebrek aan kennis omtrent de integrale werking van de dynamica en thermo-dynamica van de atmosfeer en van de interactie tussen oceanen en atmosfeer. De met onze kennis berekende temperatuursveranderingen worden daardoor erg onzeker.

Alles met elkaar blijkt wel, dat in de palaeoklimatologie een enorme verscheidenheid van meningen heerst over de aanpak van eenzelfde probleem; elke theorie heeft zijn verdiensten en zal ongetwijfeld op bepaalde punten wel juist zijn. Het kan echter niet ontkend worden, dat in vele gevallen de onderzoekers elkaar op de meest volledige wijze tegenspreken, iets dat zijn oorzaak vindt in de fundamenteel verschillende uitgangspunten van de diverse onderzoekers.

FLOHN formuleert waarschijnlijk wel de mening van de meeste onderzoekers door er op te wijzen, dat de verklaring van de verschillende palaeoklimatologische problemen alleen door combinatie van verschillende onderzoekingsmethoden dichter bij een oplossing te brengen is.

LITERATUUR:

1. FLOHN, H. Allgemeine atmosphärische Zirkulation und Paläoklimatologie. Geol. Rundschau 1952, pp. 153-179.

2. BROOKS, C.E.P. Geological and Historical Aspects of Climatic Change. *Compendium of Meteorology*. 1952, pp. 1004-1019.
3. REX, D.F. Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. *Tellus* 2, 1950, pp. 196-211 en 275-302.
4. VIETE, G. Ueber die allgemeine atmosphärische Zirkulation während der diluvialen Vereisungsperioden. *Tellus* 2, 1950, pp. 102-116.
5. PLASS, G.N. The Carbon Dioxyde Theory of Climatic Change. *Tellus* 8, 1956, pp. 140-155.
6. WILLET, H.C. Solar Variability as a factor in the fluctuations of Climate during geological time. *Geografiska Annalen* 1949, pp. 295-315.
7. AHLMANN, H.W. Glaciological research on the North Atlantic Coasts. *Royal Geogr. Soc. Research Series No. I*. Londen 1948.
8. VLERK, I.M. v.d. & F. FLORSCHUTZ. *Nederland in het ijstijdvak*. Utrecht 1950.
9. MC CORMAC, B.M. (ed). *Introduction to the scientific study of atmospheric pollution*. Dordrecht, 1971.
10. The MIT, Press, *Mans Impact on the Global Environment*, Cambridge, Massachusetts, 1970.
11. ZONNEVELD, J.I.S. *Tussen de bergen en de zee*. Utrecht, 1971.
12. HAGEMANN, B.P. *Moderne onderzoekingen in verband met ijstijden Intermediar*, 1970-1971.