

KLIMAATVERANDERING
WETENSCHAPPELIJKE ASSESSMENT EN BELEIDSANALYSE
(WAB)

**Zongedreven klimaatveranderingen:
een wetenschappelijke verkenning**

Samenvatting van WAB rapport 500102 001

Redactie

Dr. R. van Dorland

Auteurs

Prof. dr. C. de Jager

Dr. G.J.M. Versteegh

Dr. R. van Dorland

2006



Wetenschappelijke Assessment en Beleidsanalyse (WAB) Klimaatverandering

Het programma Wetenschappelijke Assessment en Beleidsanalyse Klimaatverandering in opdracht van het ministerie van VROM heeft tot doel:

- Het bijeenbrengen en evalueren van relevante wetenschappelijke informatie ten behoeve van beleidsontwikkeling en besluitvorming op het terrein van klimaatverandering;
- Het analyseren van voornemens en besluiten in het kader van de internationale klimaatonderhandelingen op hun consequenties.

Het betreft analyse- en assessment werk dat beoogt een gebalanceerde beoordeling te geven van de stand van de kennis ten behoeve van de onderbouwing van beleidsmatige keuzes. Deze analyse- en assessment activiteiten hebben een looptijd van enkele maanden tot ca. een jaar, afhankelijk van de complexiteit en de urgentie van de beleidsvraag. Per onderwerp wordt een assessment team samengesteld bestaande uit de beste Nederlandse experts. Het gaat om incidenteel en additioneel gefinancierde werkzaamheden, te onderscheiden van de reguliere, structureel gefinancierde activiteiten van het consortium op het gebied van klimaatonderzoek. Er dient steeds te worden uitgegaan van de actuele stand der wetenschap. Klanten zijn met name de NMP-departementen, met VROM in een coördinerende rol, maar tevens maatschappelijke groeperingen die een belangrijke rol spelen bij de besluitvorming over en uitvoering van het klimaatbeleid.

De verantwoordelijkheid voor de uitvoering berust bij een consortium bestaande uit MNP, KNMI, CCB Wageningen-UR, ECN, Vrije Universiteit/CCVUA, UM/ICIS en UU/Copernicus Instituut. Het MNP is hoofdaannemer en draagt de eindverantwoordelijkheid.

Voor meer informatie:

Milieu- en Natuurplanbureau (MNP), WAB secretariaat (Postbak 90), Postbus 303, 3720 AH Bilthoven, tel. 030 – 2743728, email: wab-info@mnp.nl. Deze samenvatting is tevens beschikbaar in pdf-formaat op www.mnp.nl

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)
Klimaatonderzoek en seismologie
Postbus 201
3730 AE De Bilt

T: +31 30 2206775
E-mail: info@knmi.nl

Copyright © 2006, Milieu en Natuur Planbureau, Bilthoven

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior written permission of the copyright holder.

Inhoudsopgave

In het kort	5
Samenvatting	6
1 Inleiding	8
2 Wat is bekend over variabiliteit van de zon?	13
3 Wat vertellen proxy archieven over zonnevariabiliteit en klimaatverandering?	15
4 Kan zonneactiviteit gereconstrueerd worden?	18
5 Hoe gevoelig is het klimaatstelsel voor veranderingen in zonneactiviteit?	20
6 Zijn er aanwijzingen voor de invloed van zonneactiviteit op het klimaat?	22
7 Conclusies	25
Over de Auteurs	30

In het kort

De mate waarin variaties in zonneactiviteit het aardse klimaat beïnvloeden is een belangrijk wetenschappelijk thema. Het aandeel van de zon in klimaatveranderingen staat ter discussie en het debat is heftiger dan ooit vanwege de samenloop van mondiale opwarming en de hoge zonneactiviteit. In opdracht van het programma Wetenschappelijke Assessments en Beleidsanalyses (WAB) Klimaatverandering hebben drie specialisten op het gebied van zonnedynamica, reconstructies van klimaatverandering en zonneactiviteit, en op het gebied van de klimaatwetenschap onder leiding van het KNMI de huidige wetenschappelijke kennis over deze onderwerpen gebundeld. De huidige inzichten zijn verwoord in het WAB rapport "Scientific Assessment of Solar Induced Climate Change" (WAB rapport 500102 001, zie www.mnp.nl). In deze brochure is een samenvatting van de resultaten opgenomen.

Een belangrijke conclusie uit het rapport is dat de kwantificering van het effect van langetermijnvariaties in zonneactiviteit op het klimaat problematisch is. Het is daarom onwaarschijnlijk dat een definitieve en eenduidige verklaring gegeven kan worden over de oorzaken van het temperatuurverloop in de laatste eeuwen. Zo is bekend dat de zonneactiviteit gedurende de Kleine IJstijd rond 1700 laag was en in de 20e eeuw een niveau bereikte, die de hoogste was in de laatste tienduizend jaar. Volgens de meest recente inzichten is de middenschatting een temperatuuroename van 0,1 graad met een maximum van 0,4 graad Celsius. Waarschijnlijk kan een deel (tot maximaal een derde) van de waargenomen temperatuurverandering in de eerste helft van de 20e eeuw worden toegeschreven aan de toegenomen zonneactiviteit. In de tweede helft van de 20e eeuw is de zonneactiviteit nagenoeg constant gebleken en kan dus geen verklaring zijn voor de waargenomen temperatuurstijging.

Samenvatting

De zon vervult een cruciale rol in het aardse klimaat, zoals de seizoensgang en het transport van warmte van evenaar naar poolgebieden, waarmee het weer wordt aangedreven. Variaties in zonneactiviteit kunnen klimaatveranderingen op mondiale schaal veroorzaken en veranderingen in klimaatpatronen op de regionale schaal teweegbrengen. Voor de wijze waarop dit kan plaatsvinden worden drie mechanismen beschouwd (1) Kleine variaties in het zichtbare licht beïnvloeden de atmosfeer via het aardoppervlak. (2) Grotere variaties van ultraviolette straling beïnvloeden de hoeveelheid ozon (een sterk broeikasgas) hoog in de atmosfeer. (3) Variaties in de zonnwind en van kosmische straling onder invloed van de zon werken door op de vorming van aerosolen, wolken en ozon.

Sinds 1978 wordt de totale hoeveelheid zonnestraling gemeten. Die verschilt bijna 0,1% tussen de zonnevlekkenmaxima (elke 11 jaar) en minima. Het verschil tussen de minima onderling is kleiner dan 0,01%. De verschillen zijn klein in het infrarood en groter in het ultraviolet. Variaties in het UV veroorzaken veranderingen in de ozonconcentraties in de hogere atmosfeer. Zowel de veranderingen in totale lichtkracht als in ozon gedurende de 11-jarige zonnevlekkencyclus resulteren in kleine tot verwaarloosbare klimaatveranderingen op mondiale schaal. Voor de invloed van kosmische straling op de wolkenvorming bestaat geen duidelijke fysische basis, noch ondersteunen waarnemingen deze hypothese.

Met betrekking tot lange termijn variaties in zonneactiviteit zijn geen directe metingen beschikbaar. Reconstructies van variaties in de totale hoeveelheid straling afkomstig van de zon worden bepaald aan de hand van drie waarneembare grootheden: (1) veranderingen in de aa-index als maat voor de magnetische activiteit van de zon, (2) reconstructies van kosmogene isotopen als maat voor de kosmische straling, die samenhangt met de magnetische activiteit van de zon en (3) de bandbreedte van variabiliteit bij zonachtige sterren. Volgens de meest recente inzichten in de bovengenoemde drie peilers waarop de reconstructie van variaties in zonnestraling is gebaseerd, veroorzaakt de lichtkrachttoename van de zon tussen het Maunder Minimum (1645-1715) en de huidige "gemiddelde" zon een wereldgemiddelde temperatuurstijging van hooguit 0,4 C. De invloed van de Zon op de lange termijn is hiermee substantieel kleiner dan vijf jaar geleden was geschat.

Overeenkomstige fluctuaties in reconstructies van zonneactiviteit en klimaatreeksen kunnen aanwijzingen geven van de invloed van variaties in zonneactiviteit op het klimaat, hoewel het oorzakelijk verband niet altijd duidelijk is. Zonnesignalen zijn vaak niet eenvoudig te onderscheiden van andere bronnen van klimaatverandering zoals vulkaanuitbarstingen, El Niño en lange termijn interne variabiliteit. De invloed van de mens op het wereldklimaat is pas substantieel sinds 1950, zodat reeksen van klimaatverandering voor die tijd geschikt zijn om natuurlijke factoren te bestuderen. De onzekerheid in de metingen neemt echter wel toe met de ouderdom van de gegevens. Bovendien zijn de reconstructies van aspecten van zonneactiviteit omgeven door onzekerheden: zo wordt de koolstof-14 isotoop beïnvloed door biogeochemische processen, is de depositie van de Beryllium-10 isotoop afhankelijk van atmosferische circulatie en wordt de aa-index beïnvloed door veranderingen in het aardmagnetische veld. Gegeven deze onzekerheden is het van belang de onderliggende mechanismen van klimaatbeïnvloeding door variaties in zonneactiviteit te begrijpen.

Met behulp van klimaatmodellen kunnen de gevoeligheden en mechanismen van klimaatverandering door de zon en ander factoren bestudeerd worden. Bovendien kunnen met klimaatmodellen de diverse forceringen geïsoleerd onderzocht worden. Het onderzoek richt zich zowel op de energetische beïnvloeding via de stralingsforcering als op de dynamische beïnvloeding via afwijkingen in circulatiepatronen in de hoge atmosfeer. Zo zijn de effecten van lichtkrachtvariaties van de zon en die van UV variaties op de ozonconcentraties goed in kaart gebracht. Echter, klimaatmodellen spreken elkaar in sommige aspecten tegen op de regionale schaal en daardoor is het lastig conclusies te trekken over oorzaak-gevolg relaties die zich afspelen op dat schaalniveau. Het in kaart brengen van de invloed van variaties in kosmische straling blijft problematisch, ook omdat de waarnemingen onvoldoende aanwijzingen geven voor het onderliggende mechanisme.

1 Inleiding

Het klimaatsysteem omvat de atmosfeer, de oceanen, de ijskappen, landoppervlak en de biosfeer. Naast fysische processen spelen ook chemische en biologische processen en hun onderlinge wisselwerking een belangrijke rol. Deze processen zijn actief op vele tijd- en ruimteschalen. De wisselwerking tussen de deelsystemen van het klimaat geeft aanleiding tot complex gedrag. Het klimaatsysteem wordt aangedreven door de energie afkomstig van de zon. Deze stralingsenergie wordt deels gereflecteerd naar de ruimte toe. Het resterende gedeelte wordt opgenomen (geabsorbeerd) door de atmosfeer en het aardoppervlak en wordt vervolgens omgezet in warmte. Deze warmte verlaat via infrarode straling het klimaatsysteem. De netto binnenkomende zonnestraling en uitgaande infrarode straling zijn gemiddeld over de aardbol en over een voldoende lange periode in balans.

Klimaatverandering

Het klimaat is allesbehalve constant. Klimaatveranderingen worden veroorzaakt door een scala aan factoren, dat uitvoerig in de literatuur wordt beschreven. Bij klimaatveranderingen onderscheiden we interne variabiliteit en externe forcering. Interne variabiliteit – ook wel autogene forcering genoemd - wordt veroorzaakt door wisselwerkingen tussen de componenten van het klimaatsysteem met specifieke en verschillende tijdschalen van respons. In het gekoppelde systeem geven de vaak niet-lineaire wisselwerkingen aanleiding tot rode ruis, dat wil zeggen dat de amplitude van de klimaatfluctuaties in termen van temperatuur-, neerslag en circulatieveranderingen, toenemen met de tijdschaal. Spectra van klimaatvariabiliteit vertonen eveneens pieken, een manifestatie van resonanties veroorzaakt door terugkoppelingsmechanismen op specifieke tijdschalen. Externe forceringen worden veroorzaakt door veranderingen in één of meer deelsystemen van het klimaat (endogene forcering) of door veranderingen buiten het klimaatsysteem (exogene forcering), zoals veranderingen in de elektromagnetische eigenschappen of deeltjes emissies van de zon. Forceringen resulteren in veranderingen van de energie- en stralingsstromen in het klimaatsysteem. Interne variabiliteit en externe forcering zijn soms moeilijk te scheiden vanwege de altijd aanwezige terugkoppelingen of wisselwerkingen tussen de deelsystemen van het klimaat.

De belangrijkste invloed van de zon op het klimaat vindt plaats via de absorptie van zonnestraling door de atmosfeer en het aardoppervlak. De stroming in de atmosfeer wordt voor een groot deel bepaald door de verdeling van de geabsorbeerde zonnestraling en die van de uitgaande infrarood straling. Zelfs bij een constant niveau van zonneactiviteit worden klimaatprocessen dus beïnvloed door de zon. Duidelijke voorbeelden hiervan zijn de dagelijkse en jaarlijkse gang. Op de heel lange tijdschaal veroorzaakt de wisselwerking tussen de ijskappen en de periodieke veranderingen van de aardbaan, waardoor de totale hoeveelheid ontvangen zonne-energie in de poolgebieden gedurende het zomerseizoen varieert, het optreden van ijsstijden en interglacialen.

Variatie van zonneactiviteit

Variaties in zonneactiviteit stellen het klimaatstelsel bloot aan additionele forceringen. Deze forceringen veroorzaken klimaatveranderingen op mondiale schaal en respons patronen op de regionale schaal, afhankelijk van het mechanisme van die invloed. Behalve een directe beïnvloeding via variaties in de totale hoeveelheid energie uitgestraald door de zon, wordt naarstig gezocht naar indirecte mechanismen, die de klimaatrespons versterken. Tenminste drie concurrerende mechanismen worden beschouwd:

- (1) Kleine variaties in het zichtbare deel van het zonnespectrum, die de atmosfeer vanaf het aardoppervlak beïnvloeden.
- (2) Variaties van ultraviolette (UV) straling, die rechtstreeks inwerken op de stratosfeer en de hoeveelheid ozon. Hierbij worden de lagere delen van de atmosfeer beïnvloed door veranderingen hogerop.
- (3) Variaties van deeltjesstromen afkomstig van de zon of geïnduceerde modulaties van kosmische straling, die effect hebben op de elektrische en magnetische eigenschappen van de atmosfeer met gevolgen voor de atmosferische samenstelling hetzij door aërosolen- en wolkenformatie hetzij door effecten op de ozonconcentratie.

Verder kunnen directe en indirecte forceringen ten gevolge van variaties in zonneactiviteit in wisselwerking treden met interne klimaatvariabiliteit, zoals El Nino – Southern Oscillation (ENSO), de Northern Atlantic Oscillation (NAO) en de Quasi-Biennial Oscillation (QBO). Dit kan aanleiding geven tot het teweegbrengen, versterken of het verschuiven van deze klimaatmodi.

Zonneactiviteit en klimaat

Overeenkomstige fluctuaties in reconstructies van zonneactiviteit en klimaatreeksen kunnen aanwijzingen geven van de invloed van variaties in zonneactiviteit op het klimaat, hoewel het in het algemeen onduidelijk is in hoeverre deze correlaties worden veroorzaakt door variaties in zonneactiviteit. De oorsprong van deze controverses is gelegen in het feit dat mogelijke zonne-signalen niet eenvoudig te onderscheiden zijn van andere bronnen van klimaatvariabiliteit, zoals de forceringen door vulkaanuitbarstingen, ENSO en lange termijn interne variabiliteit van het klimaatsysteem. Bovendien zijn de reconstructies omgeven met onzekerheden, waardoor een eenduidig bewijs van zon klimaat connecties niet eenvoudig te leveren is. Hoewel correlaties tussen zonneactiviteit en klimaatparameters niet beschouwd mogen worden als bewijs voor oorzaak gevolg relaties, kunnen ze wel een indicatie geven voor mogelijke onderliggende mechanismen van klimaatverandering door variaties in zonneactiviteit.

De respons van de diverse klimaatfactoren waaronder variaties in zonneactiviteit kan worden bestudeerd met behulp van gekoppelde atmosfeer-oceaan algemene circulatiemodellen (GCM's). Deze modellen dienen als gereedschap om het klimaat te begrijpen en om een schatting te maken van verstoringen van zowel natuurlijke als menselijke aard op het klimaat. Deze klimaatmodellen omvatten vele fysische en chemische processen en hun interacties. Evaluatie met waarnemingen is essentieel om vertrouwen te krijgen in de huidige generatie klimaatmodellen, hoewel een gelijkenis met de werkelijkheid in alle aspecten tot op heden onmogelijk is gebleken. Momenteel verschillen GCM simulaties vooral op de regionale schaal. Daarom is het niet eenvoudig om conclusies te trekken met betrekking tot oorzaak gevolg relaties, die zich op regionale schaal afspelen.

De mens en het klimaat

De kwantificering van de menselijke invloed op het klimaat hangt sterk samen met het begrip van het klimaatsysteem inclusief de natuurlijke variabiliteit, die aangedreven wordt door zowel interne variaties als externe forceringen. Eén van die externe forceringen wordt veroorzaakt door de veranderlijke activiteit van de zon. Vóór de industriële revolutie (die rond 1800 begon) kan de menselijke invloed worden uitgesloten en tot 1950 is deze invloed op mondiale schaal te verwaarlozen. De klimaatveranderingen die zijn opgetreden vóór 1950 zijn daarom bij uitstek geschikt om de impact van natuurlijke factoren op het klimaat te bestuderen. Helaas neemt de onzekerheid in de metingen toe naarmate we verder terug in de tijd gaan. Omdat metingen in principe lokaal zijn, kan verstoring door de mens ook plaatsvinden vóór de industriële revolutie, bijvoorbeeld door veranderend landgebruik. Een additioneel probleem bij het vinden van

klimaatveranderingen door zonneactiviteit is dat verschillende natuurlijke forceringen en hun interacties met interne klimaatmodi gelijktijdig werkzaam zijn. Het is daarom van belang om ook de onderliggende mechanismen te begrijpen: met andere woorden begrijpen hoe de diverse factoren het aardse klimaat beïnvloeden. Dit vergt niet alleen begrip van relevante processen in het klimaatsysteem, maar ook begrip van de processen die de forceringen veroorzaken. In geval van de zon betekent dit het doorgronden van de zonnedynamo en de variaties daarin, die veranderingen in het elektromagnetische veld inclusief de afschermingseffecten van kosmische straling en deeltjesstromen van de zon teweegbrengen.

Het verloop van de isotopen ^{14}C en ^{10}Be in de laatste millennia is mogelijk een manifestatie van de magnetische activiteit van de zon. Veranderingen in de lichtkracht van de zon zijn pas sinds 1979 rechtstreeks door instrumenten aan boord van satellieten gemeten. De lichtkracht is gecorreleerd met het aantal zonnevlekken. Het waarnemen van zonnevlekken aantallen is begonnen in 1610 en de reconstructie van lichtkrachtvariaties zou kunnen worden afgeleid met behulp van deze correlatie. Er zijn echter sterke aanwijzingen dat variaties in de geëmitteerde straling van de zon ook samenhangen met andere parameters van zonneactiviteit dan zonnevlekken. Het blijkt lastig om de mix van parameters, waaronder veranderingen in de magnetische activiteit van de zon te vertalen in lichtkrachtvariaties.

Zonneactiviteit en klimaatverandering

Om de huidige kennis van de zon klimaat connectie in kaart te brengen, heeft het Nederlands Onderzoeks Programma met thema "Global Change" (NRP-GC) zich tot het KNMI gewend met de vraag om een project te coördineren, waarin het huidige kennisniveau wordt verzameld op het gebied van de zonnedynamo, de reconstructies van zonneactiviteit en het klimaat alsook van de mogelijke en waarschijnlijke mechanismen van klimaatbeïnvloeding door de veranderingen van zonneactiviteit. Drie specialisten op het gebied van zonnedynamica, reconstructies van proxy archieven en op het gebied van de klimaatwetenschap presenteren in dit rapport hun kijk op de zon klimaat connectie. Ondanks de verschillende invalshoeken zijn we erin geslaagd gemeenschappelijke conclusies te trekken over dit thema. Dat neemt niet weg dat, hoewel de zoektocht naar de invloed van variaties in zonneactiviteit op het klimaat een lange geschiedenis heeft met een versnelling van wetenschappelijke ontwikkelingen in de laatste decennia, er nog vele hiaten zitten in het inzicht in de relatieve betekenis van de vele parameters die samenhangen met zonneactiviteit voor klimaatverandering, de interpretatie van de proxy gegevens en de kennis van mechanismen in het klimaatsysteem.

In het WAB rapport “Scientific Assessment of Solar Induced Climate Change” (WAB rapport 500102 001, zie www.mnp.nl) presenteren de auteurs de huidige inzichten in de volgende wetenschappelijke thema's:

- (1) Reconstructies van zonneactiviteit, met een focus op die parameters die mogelijk relevant zijn voor klimaatverandering. Relevantie hangt sterk samen met (4).
- (2) Reconstructies van proxies van zonnevariabiliteit, bijvoorbeeld de kosmogene isotopen.
- (3) Reconstructies van zowel het mondiale als het regionale klimaat met betrekking tot temperatuur, neerslag en circulatie.
- (4) Het fysische inzicht in de mechanismen van belang in de zon klimaat connectie.

De studie beperkt zich tot het Holocene, het tijdperk na de laatste ijstijd, met nadruk op de laatste eeuwen vanwege de beschikbaarheid van data en om verwarring te vermijden tussen de klimaatrespons door veranderingen in aardbaanparameters en die in zonneactiviteit. Bovendien is de 20^e eeuw interessant met betrekking tot de vergelijking van menselijke invloed en de klimaatveranderingen door variaties in zonneactiviteit. In deze brochure is een samenvatting van de bevindingen in genoemde studie en rapport opgenomen.

2 Wat is bekend over variabiliteit van de zon?

Zonneactiviteit manifesteert zich in vijf goed gedefinieerde quasi-periodieke veranderingen. Pogingen om de zonnedynamo theoretisch te beschrijven zijn tot op heden alleen succesvol geweest in het verklaren van kwalitatieve aspecten. De numerieke beschrijving schiet echter tekort, zodat het voorspellen van zonneactiviteit met een acceptabele precisie onmogelijk is. Dit komt doordat de zonnedynamo een niet-lineair systeem is dat soms fasecatastrofen vertoont. De zonnedynamo kan beschouwd worden als een quasi-periodieke motor met eigenschappen van deterministische chaos. De toekomst van een dergelijk chaotisch systeem is per definitie onvoorspelbaar.

- De zonnedynamo wordt gekarakteriseerd door interne toroïdale en de meer zich aan de oppervlakte manifesterende poloïdale velden met een wisselende en alternerende periode van 22 jaar. Vanuit deze twee componenten van het magnetische veld van de zon rijzen twee mogelijkheden voor de zon klimaat connectie op:

- (1) Variaties in de straling afkomstig van de zon, die samenhangen met die in het toroïdale magnetisch veld. De fractie van het zonlicht dat de onderste regionen van de troposfeer en het aardoppervlak bereikt wordt geëmitteerd door de fotosfeer van de zon. De betrekkelijk rustige fotosfeer varieert nauwelijks gedurende de cyclus. Het variabele gedeelte van de zonnestraling is voornamelijk afkomstig van het chromosferische deel van de Activiteiten Centra (CA). Deze straling met golflengten kleiner dan het zichtbare licht wordt voornamelijk geabsorbeerd in de hogere regionen van de atmosfeer (de stratosfeer en daarboven) en bereikt het aardoppervlak dus niet. Veranderingen, die een de troposfeer plaatsvinden moeten in dat geval een gevolg zijn stratosfeer-troposfeer koppeling. Het groepszonnevlekkengetal (R_G) is een maat voor de variabele component van de zonnestraling en voor de toroïdale veldfluctuaties.
- (2) De tweede component bestaat uit door de zon geëmitteerde plasma wolken, zoals de Coronale Massa Emissies (CME's) en plasma uitgestoten door de ephimerale regionen op de zon. De CME's worden geëmitteerd vanuit de Activiteiten Centra op de zon. Deze zijn dus gerelateerd aan het toroïdale magnetische veld en dus geldt ook hiervoor dat het groepszonnevlekkengetal (R_G) maatgevend is voor de variatie van deze component. Overige coronale massa emissies houden verband met variaties in het poloïdale magnetische veld. Energetische emissies, zoals X-ray uitbarstingen, vertonen in het algemeen hun intensiteitmaximum ongeveer een jaar na het optreden van het maximum

aantal zonnevlekken: dit wordt ook wel de Energetische Emissie Vertraging (Energetic Emissions Delay) genoemd. Het geëmitteerde gas vult als het ware de heliosfeer met gemagnetiseerd plasma. Door variaties van het magnetische veld in de heliosfeer wordt de aarde meer of minder afgeschermd voor de kosmische straling (CR). Modulatie is belangrijk voor deeltjes in de kosmische straling met energieën onder de 50 GeV. Deze deeltjes verhogen de ionisatie in de atmosfeer vanaf een hoogte van enkele kilometers en zijn betrekkelijk onbelangrijk nabij het aardoppervlak. De amplitude van kosmische stralingsvariaties hangt samen met de sterkte van de zonnecyclus. De atmosferische ionisatiegraad varieert met de intensiteit van kosmische straling. Volgens een hypothese beïnvloeden de wisselingen in ionisatiegraad de hoeveelheid bewolking op aarde. Hiermee kan de zon via dit plasma de aardse atmosfeer dus op een indirecte manier beïnvloeden. Kosmogene isotopen zoals ^{10}Be zijn proxies voor deze invloed en voor de poloïdale veldfluctuaties, hoewel deze proxies ook beïnvloed worden door variaties van het aardmagneetveld zelf.

- Het groep zonnevlekkengetal (R_G) en de kosmogene isotopen zijn, hoewel enigszins gecorreleerd, manifestaties van twee verschillende aspecten van de zonnedynamo met verschillende invloeden op het klimaat. Bovendien bereiken ze de maximum intensiteit niet gelijktijdig en moeten daarom als aparte parameters worden beschouwd. Er zijn gevallen bekend waarbij het ene aspect sterk varieerde, terwijl het andere aspect nagenoeg constant bleef. De verklaring hiervan is intrinsiek verbonden met de dynamotheorie.
- Nog nooit gedurende de laatste tienduizend jaar is de zon zo actief geweest in het uitstoten van gemagnetiseerd plasma als in de afgelopen halve eeuw, hoewel sinds 1950 de hoge zonneactiviteit nagenoeg constant is gebleven. Schattingen suggereren dat de zonneactiviteit momenteel over het maximum heen is en dat de komende decennia de activiteit mogelijk weer zal afnemen.

3 Wat vertellen proxy archieven over zonnevariabiliteit en klimaatverandering?

- Aanwijzingen voor de zonneactiviteit en klimaatveranderingen in het verleden liggen besloten in de instrumentele data (sinds 1700), historische bronnen (laatste paar duizend jaar) en proxies (laatste 10.000 jaar en verder terug) met een resolutie van één tot enkele jaren.
- Proxies geven aanwijzingen over klimaatveranderingen gedurende het relatief warme en stabiele Holoceen. Het aandeel van de zon in deze veranderingen staat ter discussie en is tegenwoordig heviger dan ooit vanwege de huidige combinatie van mondiale opwarming en de uitzonderlijk actieve zon. Publicaties voor en tegen de dominante rol van de zon in klimaatveranderingen, zowel mondiaal als regionaal, zijn in de literatuur te vinden. De aard van de klimaatrespons in combinatie met de geografische coherentie is van groot belang voor de evaluatie van mechanismen van de zonneforcering en de voor de validatie van klimaatmodellen.
- Informatie over klimaatveranderingen is door de natuur opgeslagen in bijvoorbeeld boomringen, veen, stalagmieten, landijs, meer- en marine sedimenten. Kosmogene isotopen in sedimenten, zoals ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al and ^{36}Cl , vormen de belangrijkste informatiebron van zonneactiviteit in het pre-instrumentele tijdperk. Deze natuurlijke archieven zijn vaak continu over lange perioden and vormen als zodanig nuttig studiemateriaal, ook om de beperkingen van instrumentele reeksen aan te vullen.
- Kosmogene isotopen worden gevormd door hoogenergetische deeltjes, die de atmosfeer binnendringen en vervolgens botsen met atomen in de lucht, waarbij zeldzame en onstabiele isotopen ontstaan. De zonnewind beschermt de atmosfeer tegen het binnendringen van deze deeltjes in tijden van hoge zonneactiviteit. De productiesnelheid van de kosmogene isotopen neemt af als het magnetische veld sterker wordt, dus als de zonneactiviteit toeneemt. De vorm van het magnetische veld veroorzaakt een toename van de productie van kosmogene isotopen van evenaar naar de magnetische polen.
- De productie van kosmogene isotopen wordt verder beïnvloed door fluctuaties in het aardmagnetische veld, die ontstaan door wisselwerkingen tussen de mantel en kern van de aarde. Het nauwkeurig in kaart brengen van de veranderingen van het aardmagnetische veld is dus van belang voor het begrijpen van het zonnesignaal. Kleine veranderingen in de lange termijn trend van het aardmagnetische veld kunnen de archieven van kosmogene

isotopen dermate verstoren dat het moeilijk is om de amplitude en soms zelfs het teken van de zonneactiviteit af te leiden.

- Interpretatie van de proxy archieven wordt bemoeilijkt door:
 - (1) vertaling van de proxies in kwantitatieve klimaatparameters
 - (2) het verkrijgen van een goede datering
 - (3) het ophelderen van ruimtelijke patronen en verbanden hiertussen
 - (4) het scheiden van de zonneforcering van andere forceringen
 - (5) het gebrek aan een compleet fysisch begrip van de mechanismen waarmee de aspecten van de zonneactiviteit het klimaat beïnvloedt.
- Om deze redenen wordt het in kaart brengen van de zonneactiviteit in het verleden vaak beperkt tot de identificatie van correlaties tussen zonneactiviteit enerzijds en klimaatverandering anderzijds. De centrale vragen zijn dus: waar, hoe en wanneer zijn klimaatveranderingen opgetreden, en hoe en in welke mate wordt het klimaat beïnvloed door de diverse parameters van zonneactiviteit?
- Hoewel de oceanen ongeveer 2/3 van de aarde beslaan, is het marine milieu ondervertegenwoordigd in de klimaatarchieven. Deze tekortkoming werkt door in het begrijpen van zowel de kwantitatieve als kwalitatieve aspecten van mechanismen werkzaam in de zon klimaat connectie.
- Alle frequentie componenten, die verondersteld worden met zonneactiviteit samen te hangen, komen tot uiting in de klimaatarchieven. Door ruis en veelal tekort schietende resolutie in de tijd kunnen de hoogfrequente signalen niet worden opgelost. Dit betreft voornamelijk de 11-jaar en 22-jaar cycli. Daar staat tegenover dat langzamere variaties, zoals de circa 90-jaar Gleissberg en de circa 200-jaar Suess cycli zowel in de ^{10}Be en ^{14}C data als proxy voor zonneactiviteit als in de archieven van klimaatverandering wel goed vertegenwoordigd zijn. Ook verschijnt de circa 1500-jaar Bond cyclus in diverse klimaatreconstructies.
- Waarschijnlijk worden de lange termijn klimaatveranderingen gedurende het preindustriële tijdperk gedomineerd door de zonneforcering. De aanwijzingen van dergelijke zon klimaat connecties zijn echter wel ongelijk verdeeld over de aardbol. Dit suggereert dat de lange termijn respons op een verandering van zonneactiviteit een regionaal karakter heeft, waarbij het signaal in sommige regio's de amplitude door andere oorzaken van natuurlijke variabiliteit overtreft.
- De zonneforcering lijkt vooral een grote impact te hebben op de regionale neerslag en verdampingbudgetten. Dit suggereert dat het mechanisme van de door de zon gegenereerde klimaatveranderingen via variaties in de verdeling van latente warmte opereert. De oceanen spelen hier wellicht een grote rol in, hoewel nog onduidelijk is hoe.

- Verder suggereren proxy archieven dat variaties in zonneactiviteit vaak een verschuiving van klimaatregimes veroorzaken, die samenhangen met veranderingen in circulatiepatronen. Dit induceert op diverse locaties een niet-lineair signaal en is mogelijk de verklaring voor het feit dat er in archieven discontinuïteiten en fasesprongen gevonden worden. Deze complicerende factor bij het in kaart brengen van de zon klimaat connectie vraagt om een niet-lineaire analyse van proxy archieven met een hoge tijdsresolutie op de regionale schaal, aangezien alleen een regionaal netwerk de eventuele verschuivingen van klimaatregimes en daarmee zon klimaat connecties kunnen ontrafelen. Helaas is de analyse van niet-lineaire effecten van de zonneforcering nog een onontgonnen onderzoeksgebied, hoewel belangrijke klimaatmodi, zoals ENSO en de Arctische Oscillatie (AO) ook niet-lineaire dynamica volgen.
- Een bron van onzekerheid is de sterkte van de zonneforcering in vergelijking met andere forceringen. Voor diverse regio's manifesteert het zonnesignaal zich alleen gedurende perioden met grote veranderingen in zonneactiviteit. In geval van kleine variaties wordt het signaal overstemd door de respons op andere forceringen, zoals vulkanisme, of door interne variabiliteit. De signaal ruis verhouding in de analyse van proxies kan waarschijnlijk verbeterd worden door de perioden met gelijke (veranderingen in) zonneactiviteit en de detecteerde klimaatrespons te middelen.
- Een aantal en goed gedateerde studies wijzen op een vroege en bijna instantane klimaatverandering als respons op perioden met snel afnemende zonneactiviteit. Aangezien een dergelijke instantane respons het aantal mogelijkheden voor de mechanismen van de zon klimaat connectie beperkt, zou het realiteitsgehalte en de algemene geldigheid van dit fenomeen beter onderzocht moeten worden.

4 Kan zonneactiviteit gereconstrueerd worden?

- Sinds 1978 worden met behulp van stralingsinstrumenten aan boord van satellieten de totale hoeveelheid zonnestraling (TSI) gemeten. Deze meetreeks is continu, maar is wel samengesteld aan de hand van verschillende instrumenten. In deze periode, die ruim twee zonnevlekkencycli beslaat, laten de waarnemingen een periodieke verandering in de totale hoeveelheid zonnestraling zien met maxima rond 1980, 1990 en 2001 en minima rond 1986 en 1996. Deze variaties corresponderen goed met zonnevlekken aantallen. Het verschil in TSI tussen de maxima en minima bedroeg ongeveer 1 Wm^{-2} , ofwel iets minder dan 0,1% van de zonneconstante. Verder kan op basis van de metingen geconcludeerd worden dat de geëmitteerde energie door de rustige zon, dus bij afwezigheid van zonnevlekken, nagenoeg constant is: de gevonden verschillen zijn kleiner dan 0,01%, zodat er geen sprake is van een significante trend in de laatste 26 jaar. Spectrale metingen laten zien dat variaties bij alle golflengten optreden. De stralingsveranderingen correleren positief met de zonnevlekkencyclus met relatief kleine veranderingen in het infrarode deel van het spectrum en grote verschillen in het ultraviolette deel.
- Lange termijn veranderingen in de hoeveelheid straling afkomstig van de zon zijn in het algemeen gebaseerd op drie waarneembare grootheden, terwijl de calibratie meestal wordt uitgevoerd op schattingen van de verschillen tussen het Maunder Minimum (1645-1715) en de huidige rustige zon:
 - (1) Veranderingen in de aa-index als een maat voor de magnetische activiteit van de zon: deze index wijst op een veel hogere activiteit van de huidige zon ten opzichte van het begin van de metingen, zo'n anderhalve eeuw geleden. Recente studies opperen de mogelijkheid dat de lange termijn trends in de aa-index gedeeltelijk te wijten zijn aan instrumentele afwijkingen.
 - (2) Reconstructies van kosmogene isotopen wijzen op fluctuaties van kosmische straling, die terug te voeren zijn op de magnetische activiteit van de zon. Simulaties van het transport van de magnetische flux in de zon en de propagatie van de open flux naar de heliosfeer laten zien dat trends in de aa-index en kosmogene isotopen, beide gegenereerd door de open flux, niet noodzakelijkerwijs gelijke trends opleveren in de door de zon geëmitteerde totale hoeveelheid straling (de zogeheten gesloten flux).
 - (3) De bandbreedte van variabiliteit bij zonachtige sterren. Hoewel voorheen gesuggereerd werd dat de zon in staat is een veel grotere reikwijdte aan activiteit te vertonen dan is waargenomen in de meest recente zonnevlekkencycli, laat een heranalyse van gegevens

van zonachtige sterren zien dat de huidige zon veel meer een normale ster is dan bovengemiddeld actief ten opzichte van andere sterren.

- Volgens de meest recente inzichten in de bovengenoemde drie peilers, waarop de reconstructie van TSI is gebaseerd, is de lichtkracht van de zon vanaf het Maunder Minimum (1645-1715) tot de huidige rustige zon (d.w.z. bij afwezigheid van zonnevlekken) toegenomen waarschijnlijk met $0,5 \text{ Wm}^{-2}$, met een hoogste schatting van $1,6 \text{ Wm}^{-2}$. Wanneer ook de effecten van de 11-jarige zonnevlekkencyclus worden meegenomen, wordt de beste schatting van de lichtkrachttoename van het Maunder Minimum tot de huidige "gemiddelde" zon $1,1 \text{ Wm}^{-2}$. Omgerekend naar een wereldgemiddelde temperatuurverandering (met gebruikmaking van de hoogste schatting van lichtkrachttoename van $2,2 \text{ Wm}^{-2}$ en een hoge klimaatgevoeligheid van 4,5 graden voor een verdubbeling van het CO_2) bedraagt deze 0,4 graden.
- Lange termijn variaties in de zonnestraling vertonen waarschijnlijk evenals variaties met betrekking tot de 11-jarige cyclus de sterkste relatieve veranderingen in het UV. Reconstructies van TSI variaties zijn gebaseerd op diverse aannamen en keuzes, die niet of slechts gedeeltelijk kunnen worden gevalideerd. Zo worden schattingen van de mondiaal gemiddelde temperatuurverandering sinds de Kleine IJstijd gebruikt om de verandering van de toename van TSI af te schatten, terwijl onafhankelijke schattingen een betere basis zouden vormen voor het inzicht in de zon klimaat connectie.

5 Hoe gevoelig is het klimaatsysteem voor veranderingen in zonneactiviteit?

- De respons op verstoringen van de stralingsbalans, bijvoorbeeld in termen van de verandering van temperatuur nabij het aardoppervlak, kunnen worden versterkt of gedempt als gevolg van temperatuurafhankelijke processen in het klimaatsysteem. Deze zogeheten klimaat-terugkoppelingen zijn vooral aanwezig in de hydrologische cyclus vanwege de combinatie van enerzijds de beschikbaarheid van grote hoeveelheden water op onze planeet en anderzijds de grote impact op de energiebalans van variaties in de drie aggregatie-toestanden: ijs, vloeibaar water en waterdamp. De integrale werking van klimaat-terugkoppelingen bepaalt de evenwichtklimaatgevoeligheid, gedefinieerd als de verhouding van verandering van evenwichttemperatuur en de mondiaal opgelegde verstoring van de stralingsbalans (de zogeheten stralingsforcing). Volgens het derde IPCC rapport [IPCC, 2001] ligt de klimaatgevoeligheid tussen de 0,5 en 1,1 K/Wm⁻². Dit is gebaseerd op zowel waarnemingen als modelstudies. Deze klimaatgevoeligheid geldt in feite voor de verstoring door veranderingen van goed gemengde broeikasgassen. Voor vele andere factoren laten modelstudies zien dat de forcing-respons relatie mank gaat als gevolg van de geografische en/of verticale verdeling van de forcing. Het gaat hierbij vooral om hoe deze patronen van forcing de verschillende regiogebonden terugkoppelingen aanslaan.
- Zo laten modelstudies zien dat voor zonneactiviteit met betrekking tot de 11-jarige zonnevlekkencyclus de temperatuurrepons een factor 0,75 tot 1 lager is dan voor eenzelfde forcing door veranderingen in goed gemengde broeikasgassen. Dit houdt mogelijk verband met het feit dat een aanzienlijk deel van de veranderingen in TSI in het ultraviolette gedeelte van het spectrum plaats vindt. Aangezien UV straling grotendeels wordt geabsorbeerd door zuurstof en ozon in de hogere lagen van de atmosfeer, zijn variaties in UV inefficiënt in termen van stralingsforcing voor het oppervlakte-troposfeersysteem.
- Daarentegen zijn er aanwijzingen dat de klimaatgevoeligheid voor de langzamere variaties op de schaal van decennia tot eeuwen iets hoger zou kunnen uitvallen dan voor goed gemengde broeikasgassen. Dit houdt mogelijk verband met veranderingen in oceaan-circulatie en met de wisselwerkingen tussen de effecten van de zonneforcing en klimaatmodi, die versterkend kunnen werken. Dit betekent dat de eerder genoemde hoogste schatting van temperatuurverandering, namelijk 0,4 graden, tussen het huidige tijdperk (met referentie de gemiddelde zon) en het Maunder Minimum iets hoger zou kunnen uitvallen.

- Verder is de actuele temperatuurrepons (in tegenstelling tot de evenwichtrespons) van het klimaatsysteem sterk afhankelijk van de periode van de opgelegde forcering. De oorzaak hiervan is gelegen in de grote warmtecapaciteit en daarmee de bufferwerking van de oceaan. Een stralingsforcering van 1 Wm^{-2} ten gevolge van de Suess cyclus van ~200 jaar veroorzaakt een amplitude van de mondiaal gemiddelde temperatuurrepons, die een factor twee tot vier maal zo groot is als de respons op dezelfde forcering ten gevolge van de 11-jarige zonnevlekkencyclus. Deze factor is afhankelijk van de klimaatgevoeligheid, de diepte van de oceanische menglaag en de sterkte van warmtediffusie in de oceaan.
- Het klimaat kan behalve energetisch aangeslagen worden via de stralingsforcering, bijvoorbeeld door de variabele hoeveelheid zonne-energie en door mechanismen, die via de stralingsbalans verlopen of de klimaatgevoeligheid veranderen (variaties in broeikasgassen, wolken of circulatieveranderingen in de oceaan), ook beïnvloed worden via een dynamische reactie van de atmosfeer door lineaire en niet-lineaire wisselwerkingen met klimaatmodi. Zo kunnen door differentiële verwarming van de stratosfeer of door land-zee contrasten troposferische circulatie- en drukpatronen aangeslagen worden. Zulke veranderingen manifesteren zich vooral op de regionale schaal. Inzicht in deze patronen zijn cruciaal voor de interpretatie van klimaatarchieven en van modelsimulaties waarin forceringen van allerlei aard worden opgelegd.

6 Zijn er aanwijzingen voor de invloed van zonneactiviteit op het klimaat?

- Lineaire regressie technieken, die gebruik maken van de signatuur (in plaats van de amplitude) van de zonneforcering, laten zien dat de opwarming in de eerste helft van de 20^e eeuw gedeeltelijk veroorzaakt wordt door de toename van zonneactiviteit in die periode. Het kwantificeren van dit effect is echter geheel afhankelijk van de gebruikte tijdserie van TSI. Bovendien is het zonnesignaal in competitie met de temperatuurveranderingen door andere factoren, zoals de interne variabiliteit en de vulkaanforcering. Het is daarom onwaarschijnlijk dat een definitieve en eenduidige verklaring kan worden gegeven voor de oorzaken van het temperatuurverloop in de laatste eeuwen. Aan de andere kant is het waarschijnlijk dat een aanzienlijk deel van de waargenomen temperatuurverandering in de eerste helft van de 20e eeuw kan worden toegeschreven aan de toegenomen zonneactiviteit.
- Waarnemingen laten zien dat de ozonconcentraties in de stratosfeer positief correleren met de UV variaties met betrekking tot de 11-jarige zonnevlekkencyclus. Experimenten met algemene circulatiemodellen (GCM's), waarin de veranderende ozonconcentraties opgelegd of interactief berekend worden aan de hand van fotolyse door UV, laten een respons als functie van geografische breedte en hoogte zien die kwalitatief consistent is met de waarnemingen na correctie voor de invloed van vulkaanuitbarstingen, El Niño en ozondepletie door CFK's. Kwalitatief, omdat de modelrespons ongeveer 30% lager uitvalt dan het signaal dat uit waarnemingen is afgeleid. Met betrekking tot de zomerrespons op beide halfronden verschillen de modellen onderling aanzienlijk. Deze discrepantie wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de modelklimatologie in zomersituaties slechter is. De respons op UV variaties in de troposfeer laat een bandstructuur zien met betrekking tot de wind- en temperatuur-anomalieën. Dit patroon lijkt sterk op de respons met betrekking tot de zonneforcering zoals afgeleid uit de NCEP/NCAR analyse. De stralingsforcering door de ozonveranderingen geïnduceerd door UV variaties tussen een zonnevlekkenmaximum- en minimum is klein tot verwaarloosbaar. De regionale veranderingen worden daarom waarschijnlijk veroorzaakt door de dynamische respons ten gevolge van de troposfeer-stratosfeer koppeling. Dergelijke veranderingen resulteren in wijzigingen in de Arctische Oscillatie (en Noord Atlantische Oscillatie), die op haar beurt een verandering van weerregimes in Europa teweegbrengt.

- Zeer recent is een verband onderzocht tussen de zonnedeeltjes, kosmische straling en de productie van stratosferisch ozon via NO_x in de mesosfeer met behulp van een volledig interactief gekoppeld chemie Algemeen Circulatie Model. Dit resulteerde in stratosferische ozonveranderingen die vergelijkbaar zijn met die geïnduceerd door UV variaties gedurende de 11-jarige zonnevlekkencyclus. Dit vormt mogelijk de verklaring dat modelexperimenten geforceerd met alleen UV variaties een kleinere ozonrespons laten zien in vergelijking met de waarneming.
- Een andere geopperde mogelijkheid voor de versterking van de klimaatrespons op variaties in zonneactiviteit is de kosmische straling – wolken connectie: Kosmische straling wordt gemoduleerd door variaties in het magnetische veld gedurende de zonnevlekkencyclus. Volgens de hypothese zou de binnendringende galactische kosmische straling in de atmosfeer de hoeveelheid condensatiekernen en daarmee de microfysische eigenschappen van wolken en bedekkinggraad kunnen beïnvloeden. Hoewel correlaties tussen kosmische straling en (lage) bewolking in de waarnemingen gevonden zijn gedurende zonnevlekkencyclus 22, is deze periode veel te kort om definitieve uitspraken te doen over dit effect. Bovendien correleert de verandering van temperatuur uitgaande van dit effect op de bewolking slechts in de laatste vijftig jaar. In de eerste helft van de 20^e eeuw zijn de temperatuur en zonnevlekkengetallen als proxy voor de variaties in kosmische straling juist in antifase. Bovendien laat deze link over de 20^e eeuw geen temperatuurtrend toe. Verder zijn er calibratieproblemen met de ISCCP (wolken)dataset, waardoor de variatie in de bedekkinggraad en dus het verband met kosmische straling niet goed aantoonbaar is. Uit zowel theoretische als experimentele studies is het vooralsnog onduidelijk of de gestimuleerde condensatie ten gevolge van de ionisatie plaatsvindt in de hoge of juist in de lage atmosfeer. Dit is belangrijk omdat variaties in hoge en lage bewolking een tegenovergesteld effect op de verandering van temperatuur nabij het aardoppervlak bewerkstelligt. Hoewel dit mechanisme niet geheel kan worden uitgesloten, hebben andere factoren zoals vulkaanuitbarstingen en El Niño mogelijk ook bijgedragen aan wolkenvariaties. Aangezien de pieken in de spectra van vulkaan- en zonneactiviteit in de laatste 40 jaar dicht bij elkaar liggen, is het lastig om definitieve conclusies te trekken over de oorzaak van variaties in bedekkinggraad.
- Het bestuderen van overeenkomsten tussen zonneactiviteit en klimaatveranderingen in het frequentiedomein is een ruimere benadering voor de detectie van een mogelijk zonnesignaal. Meer dan 40 cycli (waaronder hogere harmonische van de basiscycli) worden toegekend aan de invloed van de zon. Een kanttekening hierbij is dat vanwege de variabiliteit in de lengte van de cycli Fourieranalyse tot een onderschatting van de verklaarde variantie leidt en als zodanig slechts gedeeltelijk voldoet. Technieken, zoals “Wavelet

analysis" waarin ook de variaties in de tijd worden meegenomen, zijn hiervoor beter toegerust. Bovendien is een dergelijke analysemethode ook geschikt om onnauwkeurigheden in de ouderdomsbepaling van proxies het hoofd te bieden.

- De in de tijd en plaats variërende correlaties tussen klimaatparameters en zonneactiviteit heeft aan het eind van de 19^e en het begin van de 20^e eeuw geleid tot de suggestie dat het klimaatstelsel in ieder geval op de regionale schaal mogelijk op een niet-lineaire manier reageert. Het probleem hierbij is dat twee niet-gerelateerde tijdreeksen ook toevallig sterk lineair gecorreleerd kunnen zijn over bepaalde perioden, terwijl twee niet-lineair gerelateerde tijdreeksen een veel lagere correlatie kunnen hebben. De vraag doemt dan op hoe onderscheid te maken tussen de niet-lineaire forcing respons relatie en toevallige overeenkomsten. Slechts in een klein aantal studies is het mogelijk niet-lineair gedrag van de respons op de zonneforcering onderzocht.
- Hoewel zon klimaat connecties zijn gevonden in een groot aantal proxies in vele regio's, zijn slechts een klein deel hiervan goed gedocumenteerd. Voor de meeste regio's is deze connectie onduidelijk of zijn er onvoldoende data beschikbaar.
- De eenduidige bepaling van mechanismen waarmee veranderingen in zonneactiviteit het klimaat kunnen beïnvloeden is tot op heden onmogelijk gebleken, omdat de verschillende mechanismen dezelfde aspecten van het klimaatstelsel kunnen veranderen. Ook kunnen deze mechanismen gelijktijdig inwerken op een scala van fysische processen met mogelijk wederzijdse wisselwerkingen en veranderingen teweegbrengen in klimaatmodi. Elk van deze mechanismen heeft zijn eigen geografische, hoogteafhankelijke en tijdsafhankelijke patroon. Bovendien kan het mechanisme en daarmee het patroon van respons afhangen van de toestand waarin het klimaatstelsel verkeert, en dus samenhangen met andere klimaatforceringen zoals de menselijke invloed, die de basistoestand kan wijzigen.

7 Conclusies

- Zonneactiviteit manifesteert zich in vijf goed gedefinieerde quasi-periodieke veranderingen. Pogingen om de zonnedynamo theoretisch te beschrijven zijn tot op heden alleen succesvol geweest in het verklaren van kwalitatieve aspecten. De numerieke beschrijving schiet echter tekort, zodat het voorspellen van zonneactiviteit met een acceptabele precisie onmogelijk is. Dit komt doordat de zonnedynamo een niet-lineair systeem is dat soms fasecatastrofen vertoont. De zonnedynamo kan beschouwd worden als een quasi-periodieke motor met eigenschappen van deterministische chaos. De toekomst van een dergelijk chaotisch systeem is per definitie onvoorspelbaar.
- De zonnedynamo is de motor van de variabiliteit van de zon en wordt gekarakteriseerd door interne toroïdale en de meer zich aan de oppervlakte manifesterende poloïdale velden met een wisselende en alternerende periode van 22 jaar. Vanuit deze twee componenten van het magnetische veld van de zon rijzen twee mogelijkheden voor de zon klimaat connectie op:
 - (1) Variaties in de straling afkomstig van de zon, die samenhangen met die in het toroïdale magnetisch veld. Het variabele gedeelte van de zonnestraling bevindt zich in het UV deel van het spectrum en is voornamelijk afkomstig van het chromosferische deel van de Activiteiten Centra (CA). Het groep zonnevlekkengetal (R_G) is een maat voor de variabele component van de zonnestraling en voor de toroïdale veldfluctuaties.
 - (2) De tweede component bestaat uit door de zon uitgestoten plasma wolken, zoals de Coronale Massa Emissies (CME's) en plasma uitgestoten door de ephimerale regionen op de zon. De CME's worden geëmitteerd vanuit de Activiteiten Centra op de zon. Deze zijn dus gerelateerd aan het toroïdale magnetische veld en dus geldt ook hiervoor dat het groepszonnevlekkengetal (R_G) maatgevend is voor deze component. Overige coronale massaemissies houden verband met variaties in het poloïdale magnetische veld. Via de uitstoot van gemagnetiseerd plasma, dat de heliosfeer vult, wordt de hoeveelheid galactische kosmische straling (CR) gemoduleerd die de atmosfeer binnendringt. Door variaties van het magnetische veld in de heliosfeer wordt de aarde meer of minder afgeschermd voor de kosmische straling (CR). De amplitude van de CR variaties hangen samen met de zonnevlekencyclus. Kosmogene isotopen zijn proxies voor deze invloed.
- Nog nooit gedurende de laatste tienduizend jaar is de zon zo actief geweest in het uitstoten van gemagnetiseerd plasma als in de afgelopen halve eeuw, hoewel in de huidige periode

de hoge zonneactiviteit nagenoeg constant is gebleven. Schattingen suggereren dat de zonneactiviteit momenteel over het maximum heen is en dat de komende decennia de activiteit mogelijk weer zal afnemen.

- Aanwijzingen voor de zonneactiviteit en klimaatveranderingen in het verleden liggen besloten in de instrumentele data (sinds 1700), historische bronnen (laatste paar duizend jaar) en proxies (laatste 10.000 jaar en verder terug) met een resolutie van één tot enkele jaren.
- Informatie over klimaatveranderingen is door de natuur opgeslagen in bijvoorbeeld boomringen, veen, stalagmieten, landijs, meer- en marine sedimenten. Kosmogene isotopen in sedimenten, zoals ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al and ^{36}Cl , vormen de belangrijkste informatiebron van zonneactiviteit in het pre-instrumentele tijdperk.
- De productie van kosmogene isotopen wordt verder beïnvloed door fluctuaties in het aardmagnetische veld, die ontstaan door wisselwerkingen tussen de mantel en kern van de aarde. De veranderingen van het aardmagnetische veld zijn moeilijk in kaart te brengen. Kleine veranderingen in de lange termijn trend van het aardmagnetische veld kunnen de archieven van kosmogene isotopen dermate verstoren dat het moeilijk is om de amplitude en soms zelfs het teken van de zonneactiviteit af te leiden. Verder kunnen biochemische en meteorologische processen het beeld met betrekking tot de zonneactiviteit in de isotopenarchieven verstoren.
- Interpretatie van de proxy archieven worden bemoeilijkt door (1) de vertaling van de proxies in kwantitatieve klimaatparameters, (2) het verkrijgen van een goede datering, (3) het ophelderen van ruimtelijke patronen en verbanden hiertussen, (4) het scheiden van de zonneforcering van andere forceringsfactoren en (5) het gebrek aan een compleet fysisch begrip van de mechanismen waarmee de aspecten van de zonneactiviteit het klimaat beïnvloedt. Om deze redenen wordt het in kaart brengen van de zonneactiviteit in het verleden vaak beperkt tot de identificatie van correlaties tussen zonneactiviteit enerzijds en klimaatverandering anderzijds.
- Alle frequentie componenten, die verondersteld worden met zonneactiviteit samen te hangen, komen tot uiting in de klimaatarchieven. Door ruis en veelal tekort schietende resolutie in de tijd kunnen de hoogfrequente signalen niet opgelost worden. Dit betreft voornamelijk de 11-jaar en 22-jaar cycli. Daar staat tegenover dat langzamere variaties, zoals de circa 90-jaar Gleissberg en de circa 200-jaar Suess cycli in de ^{10}Be en ^{14}C proxy archieven van zonneactiviteit wel goed vertegenwoordigd zijn in de archieven van klimaatverandering. Ook is de circa 1500-jaar Bond cyclus zichtbaar in diverse klimaatreconstructies.

- De klimaatrespons door variaties in zonneactiviteit is in competitie met de effecten van andere factoren, zoals de interne variabiliteit en de vulkaanforcering. Zeker als slechts één locatie beschouwd wordt, kan de klimaatinformatie in het proxy archief overstemd worden door de soms grote amplitude van natuurlijke variabiliteit. Dit kan de verklaring zijn dat voor diverse regio's het zonnesignaal alleen gedurende perioden met grote veranderingen in zonneactiviteit opduikt. Middeling van diverse Proxy archieven binnen regio's kan informatie robuuster maken, maar als sprake is van signalen met tegengesteld teken kan het eventuele zonnesignaal ook verloren gaan. De signaal ruis verhouding in de analyse van proxies kan waarschijnlijk verbeterd worden door de perioden met gelijke (veranderingen in) zonneactiviteit en de detecteerde klimaatrespons te middelen.
- Met betrekking tot individuele minima in zonneactiviteit (Spörer and Maunder-type) zijn duidelijke connecties gevonden met klimaatveranderingen in het Holoceen. In het Noord-Atlantische gebied zijn deze minima zijn geassocieerd met uitbreidingen van het zeeijs in zuidwestelijke richting en met een koel en nat klimaat in Europa. Tijdens sommige minima in zonneactiviteit blijven dit soort klimaatverandering echter uit. Er is dus geen sprake van een eenduidige link tussen zonneactiviteit en klimaat: klimaatveranderingen treden op zonder beduidende veranderingen in zonneactiviteit en omgekeerd.
- Het waargenomen verschil in TSI tussen de zonnevlekkenmaxima- en minima bedraagt ongeveer 1 Wm^{-2} , ofwel iets minder dan 0,1% van de zonneconstante. Verder kan op basis van de metingen geconcludeerd worden dat de geëmitteerde energie door de rustige zon, dus bij afwezigheid van zonnevlekken, nagenoeg constant is: de gevonden verschillen zijn kleiner dan 0,01%, zodat er geen sprake is van een significante trend in de laatste 26 jaar. De stralingsveranderingen correleren positief met de zonnevlekkencyclus met relatief kleine veranderingen in het infrarode deel van het spectrum en grote verschillen in het ultraviolette deel.
- De mondiaal gemiddelde temperatuurrespons ten gevolge van TSI veranderingen, gerelateerd aan de 11-jarige zonnevlekkencyclus, is klein. Berekeningen laten zien dat deze respons kleiner is dan 0,05 graden en daarmee dus nauwelijks zichtbaar is in de temperatuurreeks. Op de regionale schaal is de impact van de zonnevlekkencyclus op de temperatuur groter, in de orde van enkele tienden van graden. Samenhangend met de UV variaties in de zonnevlekkencyclus zijn ozonveranderingen in de stratosfeer waargenomen, die resulteren in differentiële verwarming van de stratosfeer. Via een cascade van dynamische reacties kunnen circulatiepatronen in de troposfeer worden aangeslagen. Sommige waargenomen patroonveranderingen in wind en druk worden toegeschreven aan de effecten van UV variaties. Voor de kosmische straling – wolken link bestaat echter geen duidelijk fysische basis, noch ondersteunen waarnemingen deze hypothese.

- Lange termijn veranderingen in de hoeveelheid straling afkomstig van de zon zijn in het algemeen gebaseerd op drie waarneembare grootheden, terwijl de calibratie meestal wordt uitgevoerd op schattingen van de verschillen tussen het Maunder Minimum (1645-1715) en de huidige rustige zon:
 - (1) Veranderingen in de aa-index als een maat voor de magnetische activiteit van de zon: deze index wijst op een veel hogere activiteit van de huidige zon ten opzichte van het begin van de metingen, zo'n anderhalve eeuw geleden. Recente studies opperen de mogelijkheid dat de lange termijn trends in de aa-index gedeeltelijk te wijten zijn aan instrumentele afwijkingen.
 - (2) Reconstructies van kosmogene isotopen wijzen op fluctuaties van kosmische straling, die terug te voeren zijn op de magnetische activiteit van de zon. Simulaties van het transport van de magnetische flux in de zon en de propagatie van de open flux naar de heliosfeer laten zien dat trends in de aa-index en kosmogene isotopen, beide gegenereerd door de open flux, niet noodzakelijkerwijs gelijke trends opleveren in de door de zon geëmitteerde totale hoeveelheid straling (de zogeheten gesloten flux).
 - (3) De bandbreedte van variabiliteit bij zonachtige sterren. Hoewel voorheen gesuggereerd werd dat de zon in staat is een veel grotere reikwijdte aan activiteit te vertonen dan is waargenomen in de meest recente zonnevlekkencycli, laat een heranalyse van gegevens van zonachtige sterren zien dat de huidige zon veel meer een normale ster is dan bovengemiddeld actief ten opzichte van andere sterren.
- De reconstructies van TSI variaties zijn gebaseerd op diverse aannamen en keuzes, die niet of slechts gedeeltelijk kunnen worden gevalideerd. Zo worden schattingen van de mondiaal gemiddelde temperatuurverandering sinds de Kleine IJstijd gebruikt om de verandering van de toename van TSI af te schatten, terwijl onafhankelijke schattingen een betere basis zouden vormen voor het inzicht in de zon klimaatconnectie.
- Volgens de meest recente inzichten is de lichtkracht van de zon vanaf het Maunder Minimum tot de huidige rustige zon (d.w.z. bij afwezigheid van zonnevlekken) toegenomen met waarschijnlijk $0,5 \text{ Wm}^{-2}$, en een hoogste schatting van $1,6 \text{ Wm}^{-2}$. Wanneer ook de effecten van de 11-jarige zonnevlekkencyclus worden meegenomen, wordt de beste schatting van de lichtkrachttoename van het Maunder Minimum tot de huidige "gemiddelde" zon $1,1 \text{ Wm}^{-2}$. Omgerekend naar een wereldgemiddelde temperatuurverandering (met gebruikmaking van de hoogste schatting van lichtkrachttoename van $2,2 \text{ Wm}^{-2}$ en een hoge klimaatgevoeligheid van 4,5 graden voor een verdubbeling van het CO_2) bedraagt deze 0,4 graden.
- Lange termijn variaties in zonneactiviteit kunnen weldegelijk leiden tot een detecteerbaar klimaatsignaal. De aanwijzingen hiervan liggen besloten in de proxy archieven en

temperatuurdata van vóór 1950, toen de menselijke invloed op het klimaat zeer waarschijnlijk verwaarloosbaar klein was. Het kwantificeren van de zonneforcering is echter geheel afhankelijk van de gebruikte tijdserie van de TSI. Bovendien is het zonnesignaal in competitie met de temperatuurveranderingen door andere factoren, zoals de interne variabiliteit en de vulkaanforcering. Het is daarom onwaarschijnlijk dat een definitieve en eenduidige verklaring kan worden gegeven voor de oorzaken van het temperatuurverloop in de laatste eeuwen. Aan de andere kant is het waarschijnlijk dat een aanzienlijk deel van de waargenomen temperatuurverandering in de eerste helft van de 20e eeuw kan worden toegeschreven aan de toegenomen zonneactiviteit.

Over de Auteurs

Prof. dr. C. de Jager is emeritus hoogleraar Fysica van de Zon. Z'n proefschrift aan de Universiteit van Utrecht (1952, cum laude) ging over het waterstofspectrum van de Zon. Zijn onderzoek sedertdien richtte zich voornamelijk op het ophelderen van de fysieke structuur van de zonne-atmosfeer en later op variabiliteit van de zon, met name zonnevlammen, hun mechanismen en effecten. Hij was directeur van de Utrechtse sterrenwacht, stichter en eerste directeur van het Utrecht Space Research Laboratory en stichter van het Astrofysisch Instituut van de Universiteit van Brussel. Hij was voorzitter van COSPAR (een internationale organisatie voor ruimte onderzoek) en de International Council for Science (ICSU). Hij was de oprichter en eerste redacteur van het wetenschappelijke tijdschrift "Solar Physics". Hij ontving ere-doctoraten van de Universiteiten van Parijs en Wroclaw. Hij onving veel prijzen en onderscheidingen waaronder de Gouden Medaille van de Royal Astronomical Society (GB), de Hale Medal van de American Astronomical Society (voor onderzoek aan de zon, VS), de Jules Janssen Medaille (voor onderzoek aan de zon, Frankrijk), de Gagarin Medaille en Ziolkowski Medaille (voor ruimte-onderzoek, Sovjet-Unie).

Dr. G.J.M. Versteegh is gast-onderzoeker aan de Faculteit Geologie van de Universiteit van Bremen en de Marine Biogeochemie en Toxicologie eenheid van het Nederlands Instituut voor het Onderzoek aan de Zee (NIOZ). Hij is afgestudeerd als bioloog aan de Universiteit van Utrecht in 1989 en, na werk bij het Geologisch Instituut van de Universiteit van Oslo, promoveerde hij in 1995. Daarna was hij werkzaam aan het Organische Geochemie en Toxicologie eenheid van het NIOZ. Na z'n promotie heeft z'n onderzoek zich gericht op het ontwikkelen en beoordelen van indicatoren (proxies) voor milieumstandigheden in vroeger tijden. Door dit werk raakte hij betrokken bij het beoordelen van aanwijzingen voor variabiliteit van de zon en het effect daarvan op fossielen op tijdschalen van tientallen tot honderden jaren. Momenteel is hij een van de belangrijkste onderzoekers in twee interdisciplinaire en internationale projecten "Tropical environmental change and its teleconnections during the last deglaciation: a lipid biomarker study dated with 14C wiggle-matching" en "Possible solar forcing mechanisms on an alkenon-derived sea surface temperature record from the Gallipoli Platform (S. Italy)".

Dr. R. van Dorland is senior onderzoeker bij de afdeling Klimaatonderzoek en Seismologie van het KNMI. Hij is afgestudeerd als meteoroloog aan de Universiteit Utrecht in 1988 en promoveerde daar in 1999 op het onderwerp "Radiation and Climate: from Radiative Transfer Modelling to Global Temperature Response". Vanaf 1988 had z'n werk bij het KNMI vooral betrekking op de stralingsbalans van het aarde-atmosfeer systeem. Door dit werk raakte hij sterk betrokken bij de klimaatproblematiek en de reactie van het systeem aarde op stralingsvariëaties van de zon. Sinds 2004 is hij een lid van de aarde en klimaatraad van de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen (KNAW). Hij is tevens als lead author betrokken bij het vierde Assessmentrapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), werkgroep 1.

