



Universiteit Utrecht



Faculteit Bètawetenschappen

Oostelijke faseverschuiving planetaire golven als oorzaak of gevolg van zonaal asymmetrische klimaatopwarming op gemiddelde breedtegraad van het noordelijk halfrond in april

Bachelorscriptie

Dianne B.A. Hubers

Natuur- en wiskunde

Supervisie:

Dr. A.J. Van Delden

Januari 2021

Abstract

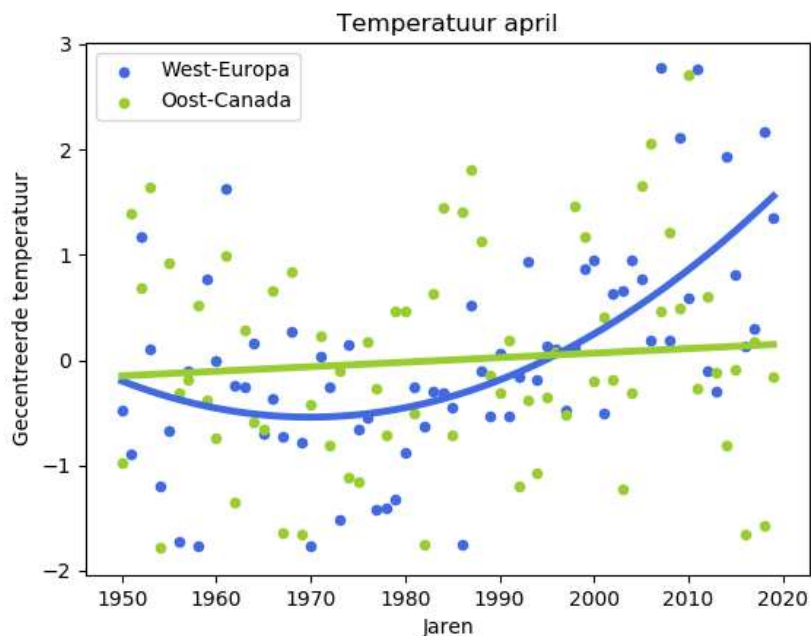
De temperatuur in West-Europa stijgt in april sneller dan jaargemiddeld. Bovendien warmt West-Europa in april sneller op dan andere gebieden op dezelfde breedtegraad, zoals Oost-Canada. In dit verslag bespreek ik of een toename van zuidelijke wind door versterking of oostelijke verschuiving van de trog van planetaire golven rond West-Europa als consequentie van veranderde sneeuwbedekking een oorzaak of gevolg is van de zonaal asymmetrische opwarming en de versterkte opwarming in april van West-Europa. Met behulp van hoofdcomponentanalyse blijkt er een zwak statistisch verband te zijn tussen (i) de temperatuur in West-Europa en de sneeuwbedekking op Eurazië en (ii) de temperatuur in Oost-Canada en sneeuwbedekking op Noord-Amerika. Door het weergeven van de zonaal gemiddelde v-component van de wind in april als functie van de lengtegraad, volgt dat er sprake is van een oostelijke verschuiving van het de trog boven de Atlantische oceaan. Er is geen tot weinig verschuiving van de trog in Oost-Canada. Daardoor is er sprake van meer zuidelijke wind in april in West-Europa. Door het bepalen van de lokale tijdafgeleide van de temperatuur blijkt echter dat de term afhankelijk van de meridionale snelheid juist afneemt met de tijd voor West-Europa. Zo volgt dat er sprake is van een longitudinaal homogenere temperatuurverdeling met de jaren waardoor de zuidelijke wind als gevolg van oostelijke verplaatsing van de trog niet de oorzaak kan zijn van de versterkte temperatuurtoename in West-Europa in april. Wel is er in april een toename gemeten van de verticale windsnelheid in De Bilt en Goose, welke wel een bijdrage levert aan de toegenomen temperaturen in april ten opzichte van het jaargemiddelde.

Inhoudsopgave

Inleiding	Pagina 4-8
Deelvraag 1	Pagina 9-14
<i>Hoe zijn de sneeuwbedekkingen op Eurazië en Amerika veranderd met de jaren en hangen de temperaturen van West-Europa en Oost-Canada direct samen met de sneeuwbedekkingen?</i>	
Deelvraag 2	Pagina 15-17
<i>Is de trog versterkt of verschoven in oostelijke richting?</i>	
Deelvraag 3	Pagina 18-21
<i>Worden de temperaturen van De Bilt en Goose als gevolg van de verschuiving in de planetaire golven beïnvloed?</i>	
Deelvraag 4	Pagina 22-27
<i>Hoe is de atmosfeer boven West-Europa en Oost-Canada veranderd als mogelijke oorzaak of gevolg van veranderende planetaire golven?</i>	
Conclusie en discussie	Pagina 28-29
Bronnen	Pagina 30
Appendix	Pagina 31

Inleiding

Ik wil mijn verslag beginnen met de observatie dat de temperatuur sneller stijgt in West-Europa dan in Oost-Canada in de maand april. Dit volgt uit de ERA5-reanalysis data die ik heb geploteerd in figuur 1. Om deze grafiek te maken heb ik de gemiddelde temperatuur van de maand april voor de jaren 1950 tot en met 2020 van Oost-Canada en West-Europa gecentreerd. Per jaar heb ik van de maandgemiddelde temperatuur van april de gemiddelde temperatuur van alle aprilmaanden in de periode 1950-2020 afgetrokken. Daarna heb ik beide reeksen gedeeld door de spreiding van die reeksen, ofwel de standaarddeviatie. Dit leidt tot waarden voor West-Europa die aangegeven zijn met de blauwe bolletjes en voor Oost-Canada zijn de waarden aangegeven met de groene bolletjes. Om meer zicht te krijgen in het verloop van de temperatuur met de tijd, heb ik voor beide locaties tweede orde fits gemaakt van de data. Deze fits zijn de groene lijn voor Oost-Canada en de blauwe lijn voor West-Europa. Mij valt daarin de sterke stijging op van de West-Europa vanaf de jaren '80 van de vorige eeuw en de relatief langzaam stijgende lijn door de data punten voor Oost-Canada. Ook heb ik de correlatiecoëfficiënten berekend. De correlatiecoëfficiënt van West-Europa met de tijd is 0.5 en de correlatiecoëfficiënt van Oost-Canada wordt met de tijd is 0.1. Zo volgt ook uit deze coëfficiënten dat er sprake is van verschillende trends in West-Europa en Oost-Canada.

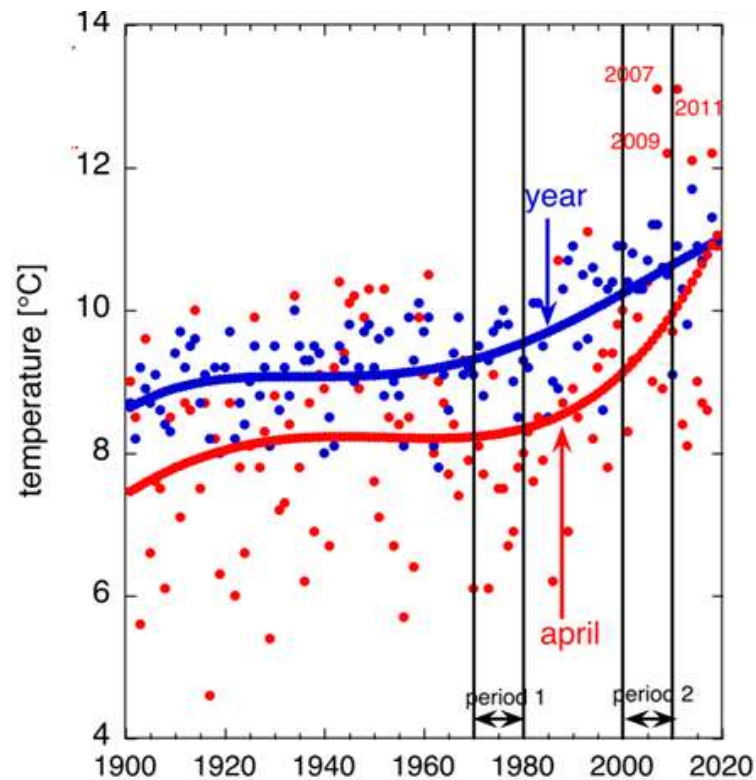


Figuur 1, blauwe en groene punten geven de aprilgemiddelde temperatuur in K weer voor West-Europa respectievelijk Oost-Canada als functie van de jaren voor een periode van 1950-2019. De blauwe en groene lijnen geven de tweede orde fits weer van de bijbehorende punten. West-Europa is gedefinieerd als het gebied tussen $(45^{\circ}, 60^{\circ})$ N en $(-10, 20)$ E. Oost-Canada is gedefinieerd als het gebied tussen $(45^{\circ}, 60^{\circ})$ N en $(90^{\circ}, 60^{\circ})$ W.

Het verschil in temperatuurstijging in figuur 1 is opvallend omdat West-Europa en Oost-Canada ongeveer op dezelfde breedtegraad liggen. Door de draaiing van de aarde om zijn as valt op beide locaties bijna evenveel zonlicht in. In dat opzicht zou ik verwachten dat de temperatuurstijging als gevolg van een toegenomen hoeveelheid broeikasgas niet verschillend is.

De tweede observatie die ik wil noemen is de grotere temperatuurstijging in de maand april in West-Europa dan gemiddeld over alle andere maanden van het jaar. Deze observatie volgt uit figuur 2 die mijn begeleider heeft gemaakt van de temperaturen in De Bilt. De blauwe punten geven de jaargemiddelde temperaturen aan en de rode punten geven de maandgemiddelde temperaturen aan van april. De blauwe lijn is een vierde orde fit door de blauwe punten. De rode lijn is een vierde orde

fit door de rode punten. Op deze manier wordt de relatief snelle opwarming van april zichtbaar. Om dit verder te ondersteunen wil ik de volgende meetgegevens vermelden. De gemiddelde temperatuur van april tot de jaren '80 met 8 graden 1 graden onder de gemiddelde jaar temperatuur. Aan de trendlijn te zien in onderstaande figuur is inmiddels 11 graden de gemiddelde temperatuur van zowel het jaar als van de maand april. Daarnaast is de gemiddelde jaartemperatuur in De Bilt in de afgelopen 120 jaar met 2°C gestegen. De gemiddelde temperatuur van de maand april is harder gestegen, namelijk met 3,5°C [1].

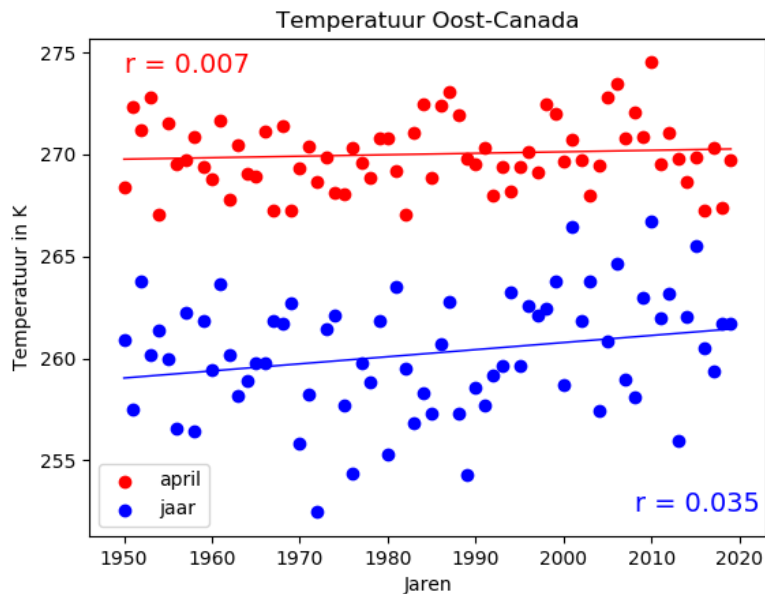


Figuur 2, gemiddelde temperatuur in april (rode punten) en de gemiddelde jaartemperatuur (blauwe punten) als functie van de jaren 1900 tot en met 2019. De respectievelijke rode en blauwe lijnen geven de vierde orde fits door de rode en blauwe datapunten weer. De figuur is gebaseerd op ERA5-reanalisis data [1].

De temperatuurstijging van het klimaat wordt verklaard door de toename van de CO2 concentratie in de atmosfeer, die van 300 ppmv in 1900 naar 410 ppmv in 2019 is gestegen. Echter; de stijging van dit broeikasgas kan niet verklaren dat specifiek april sneller opwarmt dan de rest van de maanden[1].

In Oost-Canada daarentegen lijkt de jaargemiddelde temperatuurstijging juist groter dan de temperatuurstijging in slechts de maand april. Om daar meer over te kunnen zeggen heb ik voor april de maandgemiddelde ERA5-reanalysis data geploteerd in figuur 3. De blauwe punten geven de gemiddelde temperatuur weer van alle maanden. De rode punten geven de gemiddelde temperatuur weer van alleen april. De blauwe en respectievelijk rode lijn zijn eerste order fits van de data.

De correlatiecoëfficiënt van de rode punten met de tijd is 0.09 en van de blauwe punten is deze coëfficiënt gelijk aan 0.24. De temperatuur in Oost-Canada neemt in de maand april gemiddeld met 0.007 Kelvin per jaar toe ten opzichte van een gemiddelde stijging van 0.035 Kelvin per jaar van de jaargemiddelde temperatuur. Daarmee is de gemiddelde jaarlijkse toename vijf keer zo hoog voor het jaarlijkse gemiddelde dan in alleen de maand april.



Figuur 3, de blauwe punten geven de jaargemiddelde temperatuur aan van Oost-Canada. De rode punten geven de gemiddelde temperatuur aan van de maand april. De figuur is gebaseerd op maandgemiddelde ERA5-reanalysis data. De rode en respectievelijk blauwe lijn geven de eerste orde fits aan door de rode en blauwe data punten, waarbij de rode en blauwe letter r staat voor de richtingscoëfficiënt van de trendlijn.

Ik heb uitgerekend met behulp van de zonaal maandgemiddelde waarden voor de temperatuur tussen 45°N en 60°N dat in april de gemiddelde opwarming voor de periode 1950-2019 gelijk is aan 0.021 Kelvin per jaar en voor het gemiddelde van alle maanden is de opwarming 0.020 Kelvin per jaar. Daarvoor heb ik ERA5-reanalysis data gebruikt. Dat betekent dat ik langs de gehele gemiddelde breedtegraad niet of nauwelijks terug zie dat de temperatuur van de maand april sneller stijgt dan het jaargemiddelde.

Kortom; de temperatuur in West-Europa neemt sneller toe in de maand april dan in alle andere maanden. Daarnaast geldt dat de maand april in West-Europa sneller opwarmt dan de maand april op andere locaties op dezelfde breedtegraad. In Oost-Canada neemt de temperatuur in april daarentegen juist langzamer toe dan het jaargemiddelde. Deze trends suggereren dat er sprake is van een mechanisme dat zorgt voor de zonaal asymmetrische en versnelde opwarming van De Bilt, anders dan slechts het effect van de opwarming van de atmosfeer door de toename van broeikasgassen.

Ik wil in deze scriptie een mogelijke verklaring vinden voor deze zonaal asymmetrische opwarming en versterkte opwarming van in De Bilt ten opzichte van het jaargemiddelde. Daarom zal ik uitleggen welke factoren in het algemeen bijdragen aan het veranderende klimaat. In de eerste plaats zal ik verklaringen geven voor de versnelde opwarming in de maand april in West-Europa.

Er zijn twee factoren die ik wil presenteren als oorzaak van de versnelde toename van de temperatuur van de maand april in De Bilt ten opzichte van het jaargemiddelde. De eerste bijdrage is de toegenomen duur van zonschijn, welke vermoedelijk is veroorzaakt door de afname van zwaveldioxide in de lucht. Er is gemeten dat in De Bilt de zonschijnduur in de jaren 1970 tot 1980 gemiddeld 152 uur in april was en dat is minder dan het gemiddelde van 199 zonschijnuren in de maanden april van 2000 tot 2010. Tegelijkertijd zijn de zwaveldioxideconcentraties met een factor 10 afgenomen sinds het einde van de jaren '70. Het zou zo kunnen zijn dat waterdamp zich aan zwaveldioxide bindt en zo laaghangende mist induceert, welke een barrière vormt voor het zonlicht

om de aarde te bereiken. Dit wil ik ondersteunen met het gegeven dat De Bilt gemiddeld 2°C warmer is op een onbewolkte dag, dan op een geheel bewolkte dag. [1].

De tweede oorzaak van de relatief snelle oorzaak van de opwarming van april is de toegenomen warme lucht uit het zuid-oosten. Normaalgesproken breidt het Azorenhogedrukgebied zich uit aan het begin van de lente. Daardoor ontstaat er een noord-westen wind waarmee koude lucht uit het Noordpoolgebied wordt aangevoerd. Tegenwoordig, echter, lijkt er minder frequent sprake te zijn van deze noord-westen wind. Daarnaast lijkt een veranderde luchtdruk aan het oppervlak van de aarde ervoor te zorgen dat relatief warme wind afkomstig van het land bijna is verdubbeld. Gemeten is dat in de warmere periode van 2000 tot 2010 de noord-westen wind minder sterk was dan in de periode van 1970 tot 1980 en daarnaast kwam de wind vaker uit het zuid-oosten in de periode 2000 tot en met 2010. De temperatuur in de Bilt in april gemiddeld ongeveer 4,5°C hoger bij zuid-oosten wind dan bij noorden wind. [1]

Ik zal me in deze scriptie verdiepen in een andere mogelijke oorzaak van het verschil in temperatuur in april in West-Europa ten opzichte van Oost-Canada en de jaargemiddelde temperatuur van West-Europa en ten opzichte van de jaargemiddelde temperatuur van West-Europa. Namelijk een mogelijke verschuiving in oostelijke richting dan wel een versterking van de trog van planetaire golf gelegen boven de Atlantische Oceaan. Deze trog voert relatief koude lucht afkomstig van de Noordpool naar Oost-Canada en voert relatief warme lucht vanuit de richting van de evenaar naar West-Europa. Ik wil uitzoeken in hoeverre er een oorzakelijk verband is tussen de mogelijke veranderingen van de trog en de observaties uit figuren 1, 2 en 3. Ik wil ook uitzoeken welke kant de oorzaak-gevolg relatie op is.

Het vermoeden dat de sterkte of de ligging van de planetaire golven op gemiddelde breedtegraad veranderd is, is gebaseerd op het gegeven dat planetaire golven ontstaan door asymmetrieën op het landoppervlak. [2] Een grote verandering die het landoppervlak ieder jaar ondergaat in de overgang van winter naar zomer is het smelten van de sneeuw op de poolkappen.

Sneeuw heeft een grote invloed op de warmteregulatie van het landoppervlak. Dit komt door het albedo-effect. De reflectiecoëfficiënt van een vers besneeuwd land oppervlak is ongeveer 0.9 en van een niet besneeuwd landoppervlak is ongeveer 0.2. [3] Daaruit volgt dat er veel meer zonlicht weerkaatst wordt op de polen wanneer deze besneeuwd zijn, dan wanneer dit niet het geval is. Als de lente aanbreekt in april neemt de oppervlakte van de sneeuwbedekking af en neemt als gevolg de temperatuur van het aardoppervlak toe. Daardoor worden de onderste lagen van de atmosfeer ook warmer. Zo wordt de lucht beïnvloed door de sneeuwbedekkingsgraad.[4]

Om het mogelijke verband tussen de trog, de sneeuwbedekking en de temperaturen in West-Europa en Oost-Canada te onderzoeken heb ik de volgende deelvragen opgesteld:

1. Hoe zijn de sneeuwbedekkingen op Eurazië en Amerika veranderd met de jaren en hangen de temperaturen van West-Europa en Oost-Canada direct samen met de sneeuwbedekkingen?
2. Is de trog versterkt of verschoven in oostelijke richting?
3. Worden de temperaturen van De Bilt en Goose als gevolg van de verschuiving van de planetaire golven beïnvloed?
4. Hoe is de atmosfeer boven West-Europa en Oost-Canada veranderd als mogelijke oorzaak of gevolg van veranderende planetaire golven?

Ik zal antwoorden proberen te vinden op deze vragen. De eerste vraag zal ik proberen te beantwoorden door middel van een hoofdcomponentanalyse met ERA5-reanalysis data. Deze

statistische methode laat zien in hoeverre meerdere variabelen afhankelijk van elkaar zijn. Zo wil ik meer inzicht krijgen in de mogelijke relaties tussen de sneeuwbedekking en oppervlaktetemperatuur op beide continenten. Ook zal ik de sneeuwbedekkingsgraad in april op Noord-Amerika en Eurazië uitzetten tegen de jaren. De tweede vraag zal ik analyseren voor de zonaal gemiddelde meridionale component van de windsnelheid te plotten als functie van de lengtegraden. Voor het beantwoorden van de derde vraag zal ik de componenten van de lokale tijdsafgeleide van de temperatuur, die afhankelijk zijn van de wind, berekenen. Voor de vierde vraag zal ik de meridionale en verticale windrichtingen bestuderen boven West-Europa, Oost-Canada als maandgemiddelden van april en als jaargemiddelde.

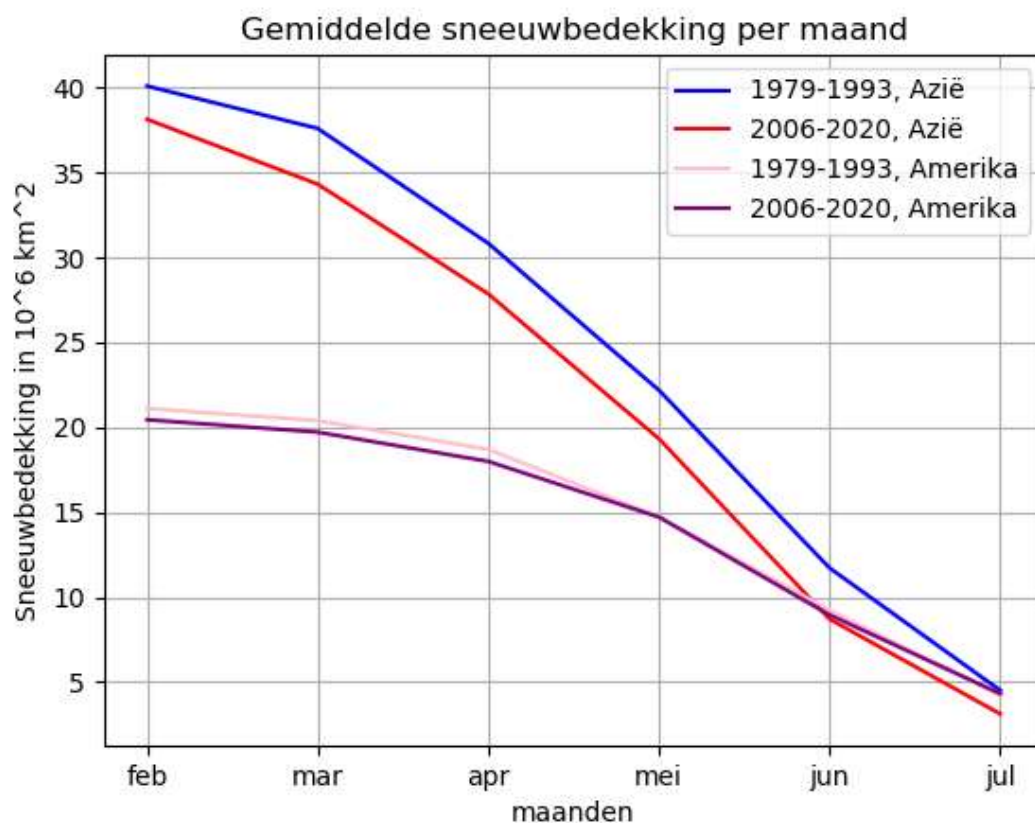
Mijn begeleider en ik verwachten dat de trog is verplaatst in oostelijke richting of versterkt rond West-Europa. We hopen dat de hoofdcomponent analyse een verband laat zien tussen (i) de oppervlaktetemperatuur van West-Europa en de sneeuwbedekkingsgraad van Eurazië en (ii) de oppervlaktetemperatuur van Oost-Canada en de sneeuwbedekkingsgraad van het Noord-Amerikaanse continent. We verwachten daarnaast dat de meridionale component van de tijdsafgeleide van de temperatuur van West-Europa meer is gestegen als gevolg van een toegenomen meridionale snelheid in april voor West-Europa. Een effect dat we niet of in mindere mate verwachten voor Oost-Canada.

Dit verslag kan een bijdrage leveren aan de bestaande kennis over de opwarming van de aarde. Klimaatverandering heeft en zal in steeds grotere mate impact hebben op het leven op aarde en daarom is het waardevol om een vollediger beeld te krijgen van de veranderingen die we kunnen verwachten en de bijbehorende oorzaken daarvan. [5], [9]

Hoe zijn de sneeuwbedekkingen op Eurazië en Amerika veranderd met de jaren en hangen de temperaturen van West-Europa en Oost-Canada direct samen met de sneeuwbedekkingen?

Door klimaatverandering neemt de sneeuwbedekking op de polen ieder jaar af en dat heeft effect op de planetaire golven [6]. Ik wil meer inzicht krijgen in de manier waarop de sneeuwbedekking op Noord-Amerika en Eurazië veranderen met de jaren en met de maanden van het jaar. Daartoe vergelijk ik in figuur 4 de sneeuwbedekking op Eurazië en Noord-Amerika voor vijftienjarige perioden 1979-1993 en 2006-2020 met elkaar als functie van de maanden februari tot en met juli.

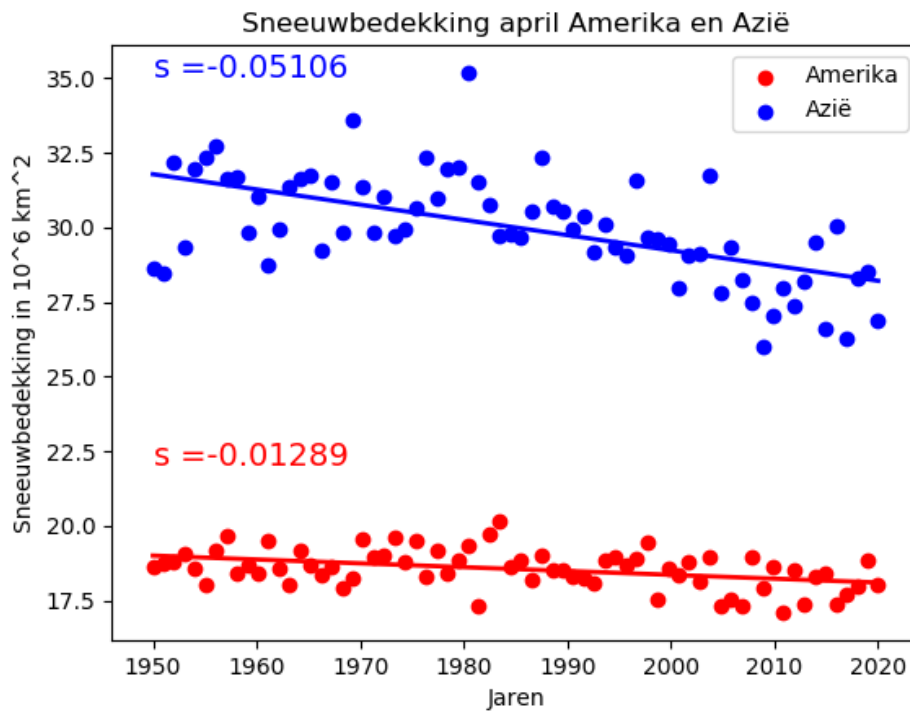
Om de grafiek te maken heb ik voor de maanden februari tot en met juli van de jaren 1979 tot en met 2020 de maandgemiddelde ERA5-reanalysis data gebruikt voor de sneeuwbedekking van Eurazië en Noord-Amerika. De blauwe lijn geeft de gemiddelde sneeuwbedekking aan voor op het Aziatische continent van 1979 tot en met 1993 per maand en de rode lijn geeft de gemiddelde sneeuwbedekking aan op het hetzelfde continent voor de periode 2006-2020. Mij valt op dat de sneeuwbedekking in de maanden maart, april, mei en juni het sterkst afneemt en bovendien zie ik dat de blauwe lijn per maand zo'n $1.4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ tot $3.3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ boven de rode lijn ligt. Dit laat zien dat er afname is in de sneeuwbedekking op het Aziatische continent in de twee vergeleken tijdsperioden. Ik heb uitgerekend dat er gemiddeld over de periode van februari tot juli in de periode 2006-2020 89% van het besneeuwde oppervlak besneeuwd is wat in de periode 1979-1993 besneeuwd is geweest. Voor slechts de maand april is dit percentage 90%.



Figuur 4, de blauwe en respectievelijk rode lijn geven de sneeuwbedekking weer op het Euraziatische continent voor de perioden 1979-1993. De roze en respectievelijk paarse lijn geven de sneeuwbedekking weer op het Euraziatische continent voor de perioden 1979-1993. De y-as geeft de sneeuwbedekking weer in 10^6 km^2 . De x-as geeft de gespecificeerde maanden weer. De waarden zijn gemiddelden per maand.

De roze lijn geeft de gemiddelde waarde van de sneeuwbedekking in 10^6 km^2 weer van de periode 1979-1993 als een functie van de maand en de paarse lijn geeft de op hetzelfde continent de

sneeuwbedekkingsgraad weer van de periode 2006-2020. De sneeuw op Noord-Amerika smelt met name in de maanden mei en juni. Ik zie dat de sneeuwbedekking in Amerika in de laatste vijftien jaar is afgenomen met $0.01 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ tot $0.71 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ voor iedere maand. De bovenstaande afbeelding laat zien dat er in het begin van de winter een afname is in de sneeuwbedekking van het Noord-Amerikaanse continent. Ik heb uitgerekend dat er gemiddeld over de periode van februari tot juli in de periode 2006-2020 97% van het besneeuwde oppervlak besneeuwd is wat in de periode 1979-1993 besneeuwd is geweest. Voor alleen de maand april is dit percentage 96%.



Figuur 5, de blauwe en respectievelijk rode punten geven de gemiddelde sneeuwbedekking weer in de maand april op het Euraziatische en Noord-Amerikaanse continent voor de perioden 1950-2020. De y-as geeft de sneeuwbedekking weer in 10^6 km^2 . De x-as geeft het jaartal weer.

Ook vraag ik me af in hoeverre de sneeuwbedekking voor de individuele maand april afneemt als functie van de jaren in Amerika en Azië. Daartoe heb ik figuur 5 gemaakt met behulp van de maandgemiddelde ERA5-reanalysis data van de maand april voor Eurazië en Noord-Amerika voor de periode 1979 tot en met 2020. De blauwe punten geven de sneeuwbedekking weer als functie van het jaar. De rode punten doen dit voor Noord-Amerika. De respectievelijke blauwe en rode lijnen geven de eerste orde fit door de datapunten weer.

Ik vergelijk de twee continenten en ik zie dat de sneeuwbedekking in Azië procentueel meer is afgenomen dan de sneeuwbedekking in Amerika in de twee vijftienjarige perioden. Want ik heb berekend dat het sneeuwdek van Amerika voor de maanden februari tot juli van de periode 1979-1993 60.1% is van het sneeuwdek van Azië. In de periode 2006-2020 is het sneeuwdek van Amerika gemiddeld 65.5% van het sneeuwdek van Azië. Daarnaast vindt de jaarlijkse afname van het sneeuwdek in Amerika later plaats dan in Azië. De correlatiecoëfficiënt tussen de sneeuwbedekking van Amerika en de jaren is -0.40. De correlatiecoëfficiënt tussen de sneeuwbedekking van Eurazië en de jaren is -0.59. Voor Azië is de richtingscoëfficiënt van de eerste orde fit gelijk aan $-5.12 \cdot 10^4$ vierkante kilometer voor Amerika is deze waarde $-1.29 \cdot 10^4$ vierkante kilometer. De sneeuwbedekking is in 1950 in Azië 1.7 keer zo veel oppervlak bedekt. Maar per jaar neemt het met sneeuw bedekte oppervlak 4 keer zo snel af in Azië dan in Amerika. Zo wordt zichtbaar dat in april de

sneeuwbedekking ook naar verhouding met het besneeuwde oppervlak sneller afneemt in Azië dan in Amerika.

Het zou zo kunnen zijn dat de combinatie van een veranderend klimaat en de jaarlijkse relatief grote afname van de sneeuwbedekking voor de maand april ervoor zorgen dat de planetaire golven beïnvloed worden door het asymmetrisch afnemende sneeuwdek.

Om na te gaan in hoeverre de sneeuwbedekking samenhangt met de temperatuur op de continenten heb ik een hoofdcomponent analyse uitgevoerd. Ik zal eerst uitleggen hoe ik dat gedaan heb en daarna welke resultaten ik verkregen heb.

De data die ik gebruik in mijn analyse zijn afkomstig van de ERA5-reanalysis. Ik kies voor de maandgemiddelde waarden van april voor de jaren 1979 tot en met 2019. Ik gebruik de gemiddelde oppervlaktetemperatuur op West-Europa, Oost-Canada en de gehele gemiddelde breedtegraad. Daarnaast kies ik de gemiddelde sneeuwbedekking op Eurazië en Noord-Amerika. Dat zijn vijf variabelen. West-Europa is gedefinieerd als het gebied tussen $(45^{\circ}, 60^{\circ})$ N en $(-10^{\circ}, 20^{\circ})$ E. Oost-Canada is gedefinieerd tussen $(45^{\circ}, 60^{\circ})$ N en $(90^{\circ}, 60^{\circ})$ W.

Ik zal nu uitleggen hoe hoofdcomponentanalyse (PCA) werkt voor de gespecificeerde vijf variabelen. PCA houdt in dat ik de data voorstel als data punten in een vijf dimensionale ruimte, waarbij ieder as een van onze variabelen representeert, zoals bijvoorbeeld het totale oppervlak van de sneeuwbedekking op Noord-Amerika. Ik centreer de data rond het nulpunt door de afwijking van de gemiddelde waarde te nemen per variabele en te delen door de standaardafwijking. Vervolgens bepaal ik de correlatie matrix; dit is een vijf bij vijf matrix waarin de correlatiecoëfficiënten van ieder tweetal van onze vijf variabelen in weergegeven zijn. Ik wil het aantal dimensies van mijn analyse verkleinen. Deze matrix is symmetrisch en heeft slechts enen op de diagonaal. Daarom kan ik de eigenwaarden en de behorende eigenvectoren bepalen van deze vijf bij vijf matrix. Deze eigenwaarden geven een maat voor de variantie (of wel spreiding) van onze data ten opzichte van de bijbehorende eigenvector die zich bevindt in onze vijf-dimensionale dataruimte. Hoe hoger de eigenwaarde, hoe groter de totale bijdrage in de variantie van de eigenvector. Ieder van de vijf eigenvectoren heeft een richting die qua componenten afhangt van de assen van ons oorspronkelijke assenstelsel met de vijf variabelen. De grootte en richting van de specifieke componenten van de eigenvector laat een verband zien tussen onze vijf gespecificeerde variabelen.

Ik reken de correlatiecoëfficiënten voor alle variabelen uit. Ik zal de meest opvallende en relevante coëfficiënten nu weergeven.

- **-0.68** tussen de sneeuwbedekking op Eurazië en de temperatuur op de gehele gemiddelde breedtegraad.
- **-0.56** tussen de sneeuwbedekking op Eurazië en de temperatuur van West-Europa.
- **0.47** tussen de temperatuur van West-Europa en van de gehele gemiddelde breedtegraad.
- **0.38** tussen de sneeuwbedekking op Noord-Amerika en de sneeuwbedekking van Azië
- **-0.37** tussen de sneeuwbedekking op Noord-Amerika en de temperatuur op de gehele gemiddelde breedtegraad.
- **-0.30** tussen de sneeuwbedekking van Noord-Amerika en de temperatuur van Oost-Canada.

Ik voer de PCA uit voor de vijf variabelen en dat levert de volgende twee grootste eigenvectoren op, welke weergegeven zijn in tabel 1.

As	Eigenvector 1	Eigenvector 2
	Eigenwaarde =49%	Eigenwaarde = 21%
Oppervlaktetemperatuur West-Europa	0.47	0.38
Oppervlaktetemperatuur Oost-Canada	0.25	-0.74
Oppervlaktetemperatuur gemiddelde breedtegraad	0.55	0.09
Sneeuwbedekking Eurazië	-0.55	-0.23
Sneeuwbedekking Noord-Amerika	-0.34	0.49

Tabel 1, de tabel geeft in de laatste vijf rijen van de tweede en derde kolom de grootte van de component van de eigenvectoren weer uit de PCA behorende bij een as. In de eerste kolom is gespecificeerd welke variabele de as representeert. In de tweede rij is het percentage van de eigenwaarde ten opzichte van de som van alle eigenwaarden gegeven.

Uit de correlatiecoëfficiënten deduceer ik dat met name de sneeuwbedekking op het Euraziatische continent van belang is voor het bepalen van de temperatuur op de gehele gemiddelde breedtegraad en West-Europa. Ik zie verder dat de oppervlaktetemperatuur van Oost-Canada en de sneeuwbedekking van Noord-Amerika minder met elkaar samenhangen dan de oppervlaktetemperatuur van West-Europa en de sneeuwbedekking op het Euraziatische continent.

De eerste eigenvector laat zien dat de temperatuur van West-Europa en de temperatuur van de gehele gemiddelde breedtegraad positief gecorreleerd zijn, maar dat deze twee variabelen beide negatief correleren met de sneeuwbedekking op Eurazië. De eerste eigenvector laat een negatief verband zien tussen de temperatuur van Oost-Canada en de sneeuwbedekking op Noord-Amerika. Ook zie ik dat de eerste eigenvector een positief verband aangeeft tussen de oppervlaktetemperatuur van West-Europa en de oppervlaktetemperatuur van Oost-Canada. De eerste eigenvector verklaart 49% van de variantie. Deze eigenvector draagt echter weinig bij aan de kennisvorming, omdat de gevonden verbanden haast triviaal zijn.

De tweede eigenvector laat daarentegen een negatief verband zien tussen de oppervlaktetemperatuur van West-Europa en de oppervlaktetemperatuur van Oost-Canada. Ook laat de tweede eigenvector een negatief verband zien tussen de sneeuwbedekking op Eurazië en Noord-Amerika. Ook zie ik dat de tweede eigenvector een positief verband aangeeft tussen de oppervlaktetemperatuur van Oost-Canada en de sneeuwbedekking op Eurazië. De tweede eigenvector verklaart 21% van de variantie. De tweede eigenvector onderbouwt wel mijn vermoeden dat de oppervlakte temperatuur van Oost-Canada en Noord-Amerika een negatief verband aangaan dat los staat van het negatieve verband dat West-Europa en de sneeuwbedekking op Eurazië. De oppervlakte temperatuur van Oost-Canada en West-Europa correleren immers negatief met elkaar net als de sneeuwbedekking van Noord-Amerika en Eurazië. Deze verbanden laten een losstaande correlatie zien tussen de beide geografische locaties. Dat is ook precies wat ik wil zien in het verband met de trog.

In de hoofdcomponentanalyse zoals ik deze zojuist uitgevoerd heb, worden de correlatiecoëfficiënten echter beïnvloed door structurele trends, namelijk de stijging met de jaren van de temperatuur en de daling van de sneeuwbedekking. Daardoor zijn de correlatiecoëfficiënten tussen de variabelen hoger, maar dit heeft niets te maken met de mogelijke verplaatsing van de trog. Als ik de trend aftrek van de data, houd ik de relatieve waarden ten opzichte van de trend over. Deze relatieve waarden zeggen meer over de mate waarin de sneeuwbedekkingen en de temperatuur samenhangen met als tussenliggend mechanisme de trog.

Ik kies voor een eerste orde fit door de data omdat deze de hoogste correlatiecoëfficiënt heeft met mijn datapunten. Ik heb deze correlatiecoëfficiënt in de appendix opgenomen. Dan trek ik per jaar de waarde van de eerste orde fit af van mijn data punten voor iedere variabelen. Daarna bereken ik opnieuw de correlatiematrix en bijbehorende eigenwaarden en eigenvectoren.

Dit levert mij de volgende correlaties:

- **-0.49** tussen de sneeuwbedekking op Eurazië en de temperatuur op de gehele gemiddelde breedtegraad.
- **-0.39** tussen de sneeuwbedekking op Eurazië en de temperatuur van West-Europa.
- **0.23** tussen de temperatuur van West-Europa en van de gehele gemiddelde breedtegraad.
- **0.11** tussen de sneeuwbedekking op Noord-Amerika en de sneeuwbedekking van Azië
- **-0.01** tussen de sneeuwbedekking op Noord-Amerika en de temperatuur op de gehele gemiddelde breedtegraad.
- **-0.24** tussen de sneeuwbedekking van Noord-Amerika en de temperatuur van Oost-Canada.

Voor de eigenwaarden en bijbehorende eigenvectoren vind ik:

As	Eigenvector 1	Eigenvector 2
	Eigenwaarde =37%	Eigenwaarde = 24%
Oppervlaktetemperatuur West-Europa	0.43	0.40
Oppervlaktetemperatuur Oost-Canada	0.35	-0.57
Oppervlaktetemperatuur gemiddelde breedtegraad	0.57	0.04
Sneeuwbedekking Eurazië	-0.59	-0.19
Sneeuwbedekking Noord-Amerika	-0.16	0.68

Tabel 2, de tabel geeft in de laatste vijf rijen van de tweede en derde kolom de grootte van de component van de eigenvectoren weer uit de PCA behorende bij een as. In de eerste kolom is gespecificeerd welke variabele de as representeert. In de tweede rij is het percentage van de eigenwaarde ten opzichte van de som van alle eigenwaarden gegeven. Voor de PCA zijn van de datapunten de afstanden ten opzichte van de trendlijn gebruikt van de vijf variabelen.

Zoals verwacht hebben de vijf variabelen lagere correlaties na het detrenden van de datapunten. Zo zie ik dat er met de de-trende data slechts medium correlaties zijn tussen de sneeuwbedekking op Eurazië en de temperatuur op de gehele gemiddelde breedtegraad, en tussen de temperatuur van West-Europa en de sneeuwbedekking op Eurazië.

Ik kijk naar de waarden van de componenten van de eigenvectoren. Ik zie dat de verbanden die ik beschreven heb bij de PCA met de data voordat deze gede-trend is, bijna gelijk zijn met de verbanden die de PCA met de gede-trende data aangeeft. Daarnaast is het zo dat het percentage van de eigenwaarde van de eerste eigenvector met 12% gedaald is en de eigenwaarde van de tweede eigenvector 3% meer weergeeft van de totale eigenwaarden. Zo verklaart de tweede eigenvector van de PCA met de gede-trende data een groter deel van de variantie. Echter de tweede eigenvector verklaart nog steeds slechts 24% van de variantie.

Kortom, in de maand april neemt de sneeuwbedekking boven het Euraziatische continent en Noord-Amerika af. Bovendien zie ik dat de sneeuwbedekking af sterker afneemt op Eurazië dan op Noord-Amerika in de maand april. De tweede eigenvector in de ge-detrende PCA laat zien dat twee statistisch zwakke, losstaande, negatieve verbanden zijn tussen enerzijds de sneeuwbedekking van

Eurazië en de oppervlakte temperatuur van West-Europa en anderzijds de sneeuwbedekking van Noord-Amerika en de oppervlaktetemperatuur van Oost-Canada.

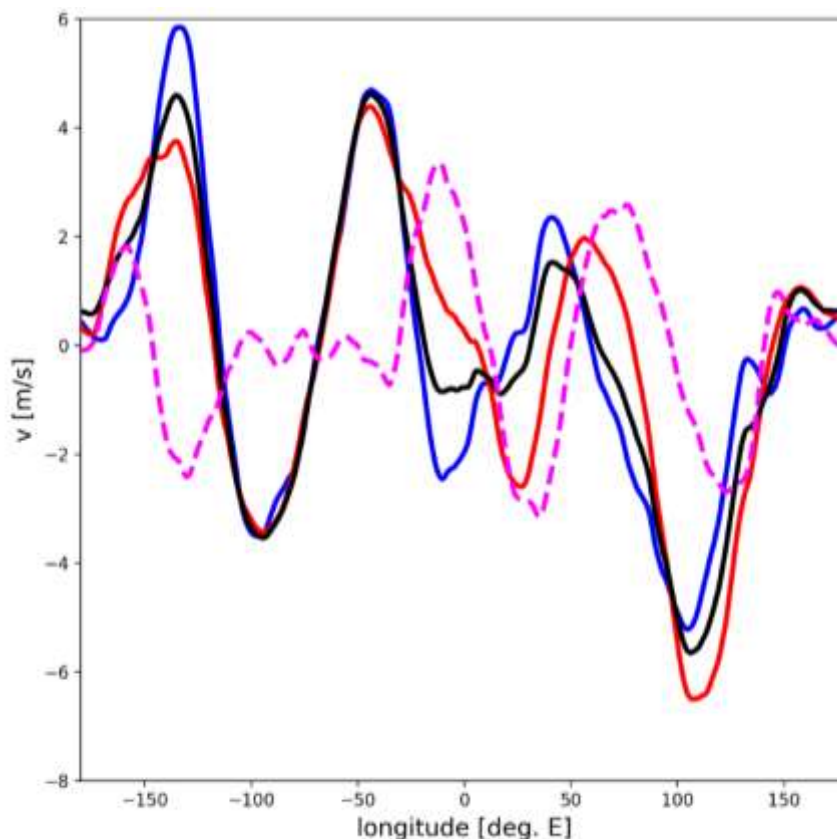
Is de trog versterkt of verschoven in oostelijke richting?

Zojuist heb ik laten zien dat er een zwak statistisch verband is tussen (i) de temperaturen van West-Europa en de sneeuwbedekking van Eurazië en (ii) de temperaturen van Oost-Canada en Noord-Amerika. De mogelijke verklaring voor verbanden (i) en (ii) als beschreven in de inleiding is de verschuiving of versterking van de planetaire golven.

Nu wil ik antwoord geven op de vraag of de planetaire golven versterkt zijn of verschoven in oostelijke richting. Eerst zal ik de methode en de data beschrijven die gebruikt zijn om deze vraag te beantwoorden. Dan laat ik de resultaten zien en leg ik uit wat ik daaruit concludeer.

Om een beeld te krijgen van de ligging en sterkte van deze golven heeft mijn begeleider de zonaal gemiddelde meridionale snelheidscomponent van de wind berekend voor de maand april op 300, 500 en 850 hPa voor alle lengtegraden.

Daarvoor heeft mijn begeleider ERA5-reanalysis data gebruikt. Namelijk, de maandgemiddelde v-component van de wind op 300, 500 en 850 hPa in de maand april voor een periode van 1979-2020 rond de gehele lengtegraad, voor de breedtegraden van 45°N tot 60°N, beide met een resolutie van 0.25° x 0.25°. Van deze data is per lengtegraad de zonaal gemiddelde v-component berekend per jaar. Daarmee heeft mijn begeleider gemiddelde waarden bepaald worden voor de snelheid voor de periodes 1979-2020, 1979-1993 en 2006-2020. Mijn begeleider heeft van deze gemiddelden grafieken gemaakt als functie van de lengtegraad en deze zijn weergegeven in figuur 6.



Figuur 6, de grafiek geeft de zonaal maandgemiddelde meridionale snelheid in m/s per lengtegraad weer op 500 hPa voor april die gemiddeld is over de breedtegraden 45°N en 60°N. De zwarte lijn geeft deze snelheid weer als gemiddelde van de periode 1979-2020. De blauwe lijn geeft deze snelheid weer als gemiddelde van de periode 1979-1993. De rode lijn geeft deze snelheid weer als gemiddelde van de periode 2006-2020. De roze stippellijn geeft het verschil weer van de rode en blauwe lijn. De figuur is gemaakt met behulp van ERA5-reanalysis data.

Bovenstaande grafiek 6 laat de zonaal gemiddelde meridionale component van de windsnelheid tussen de breedtegraden tussen 45°N en 60°N op 500 hPa in april zien voor drie tijdsperioden. De zwarte lijn geeft het meridionale gemiddelde weer als functie van de lengtegraad voor de periode 1979 tot en met 2020, de blauw lijn de periode 1979 tot en met 1993 en de rode lijn voor de periode 2006 tot en met 2020. De roze lijn is het verschil van de rode met de blauwe lijn en geeft zo de verandering van sterkte van de meridionale windsnelheid weer.

Ik zie dat de amplitudes van de blauwe en de rode lijnen nauwelijks verschillend zijn. Maar de roze stippellijn ligt niet op nul, omdat er wel sprake is van een verschuiving van de rode lijn naar het oosten ten opzichte van de blauwe lijn. Zo zie ik dat tussen 30°W en 10°O, waarin in het gebied van de Oost-Atlantische oceaan ligt, de meridionale component van de wind in de laatste vijftien jaar sterker noordwaarts is dan in de periode 1979-1993. Aan de andere kant van de oceaan tussen 45°W en 100°W waar Oost-Canada zich bevindt, is het verschil tussen de twee vijftienjarige perioden kleiner dan tussen 30°W en 10°O. Deze trend is ook zichtbaar op 300 hPa en 850 hPa.

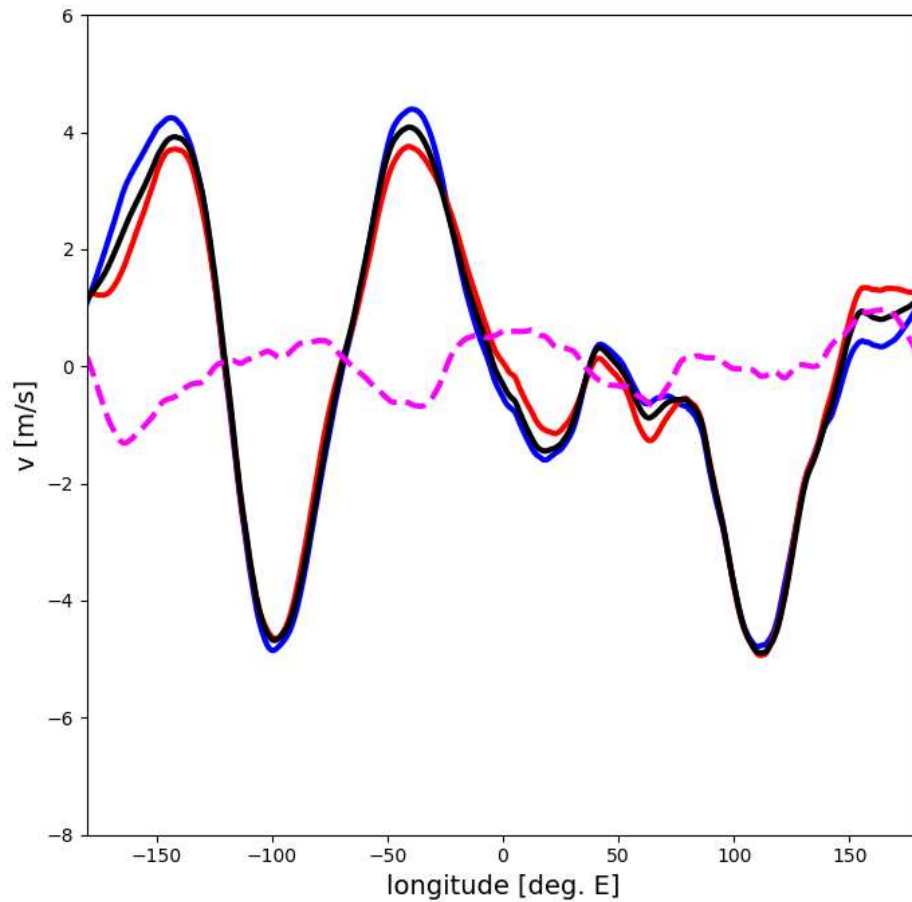
De amplitude van de grafieken is bepalend voor de sterkte van de trog, ofwel de snelheid van de wind. In de grafieken zie ik dat de amplitudes tussen 30°W en 10°O niet veel zijn veranderd en dat is ook het geval op de locatie van Oost-Canada. Daarom stel ik dat er geen sprake is van een versterking van de trog in De Bilt en niet in Oost-Canada.

Dan volgt nu een tweede vraag. Zou de oostelijke verschuiving van de trog tussen 30°W en 10°O niet een structureel gevolg kunnen zijn van klimaatverandering voor alle maanden? Als dit wel het geval is, dan kan de verschuiving van de trog geen antwoord geven op de vraag waarom de maand april in De Bilt sneller opwarmt dan de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt.

Om deze vraag te beantwoorden heb ik op soortgelijke manier als mijn begeleider een grafiek gemaakt van de gemiddelde meridionale snelheidscomponent van alle maanden. Ik heb daartoe de maandelijkse gemiddelde v-component van de ERA5-reanalysis data gebruikt voor alle twaalf maanden van het jaar op 500 hPa voor de periode 1979-2019. Ik heb de gemiddelde waarde van alle twaalf maanden van het jaar uitgerekend van de v-component per jaar per punt op de breedtegraad en lengtegraad. Om zo tot een waarde voor de meridionale windsnelheid te komen per lengtegraad per jaar heb ik dezelfde berekeningen gedaan als voor figuur 6. Daarmee heb ik de gemiddelde waarden bepaald worden voor de snelheid voor de periodes; 1979-2019, 1979-1993 en 2006-2019. Deze zijn weergegeven in figuur 7.

Ik zie in figuur 7 dat de rode en de blauwe lijnen in vergelijking met plots van de maand april in figuur 6 minder verschillen.

Ik concludeer dat er een oostelijke verschuiving van de trog heeft plaats gevonden in april de periode 2006-2020 ten opzichte van de periode 1979-1993. De trend tussen de tijdperioden neem ik niet waar gemiddeld over alle maanden van het jaar. Daaruit deduceer ik dat er wel een structureel verschil als mogelijk gevolg van klimaatverandering voortkomt in de maand april voor de verschuiving van de trog, maar dat dit voor het jaargemiddelde niet het geval is. Op deze manier kan de oostelijke verschuiving van de trog wel een verandering in de temperatuur in de maand april tot gevolg hebben en niet voor het hele jaar in De Bilt. Of andersom, een grotere verandering in de temperatuur in de maand april kan de oostelijke verschuiving van de trog veroorzaken.



Figuur 7, de grafiek geeft de jaargemiddelde meridionale snelheid in m/s per lengtegraad weer op 500 hPa die gemiddeld is over de breedtegraden 45°N en 60°N. De zwarte lijn geeft deze snelheid weer als gemiddelde van de periode 1979-2019. De blauwe lijn geeft deze snelheid weer als gemiddelde van de periode 1979-1993. De rode lijn geeft deze snelheid weer als gemiddelde van de periode 2006-2019. De roze stippellijn geeft het verschil weer van de rode en blauwe lijn. De figuur is gemaakt met behulp van ERA5-reanalysis data.

Worden de temperaturen van De Bilt en Goose als gevolg van de verschuiving van de planetaire golven beïnvloed?

Net heb ik laten zien dat in de maand april de planetaire golven in oostelijke richting zijn verschoven in het gebied rond De Bilt maar niet in het gebied rond Goose. De vraag is nu of deze verschuiving ook daadwerkelijk zorgt voor de opwarming van de onderste luchtlagen in de atmosfeer van De Bilt in April en niet in Goose. Dat is immers wel mijn verwachting.

Om een indruk te krijgen van de mate waarin de wind de luchttemperatuur beïnvloed wil ik de lokale tijdsafgeleide van de temperatuur berekenen op twee geografische locaties, namelijk De Bilt en Goose. De tijdsafgeleide van de temperatuur wordt gegeven door de volgende vergelijking:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p - v \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_p - \omega \frac{\partial T}{\partial p} + \frac{\alpha \omega}{c_p} + \frac{J}{c_p} \quad \text{vgl. 1.}$$

In bovenstaande vergelijking geeft T de temperatuur aan in Kelvin. u , v en ω zijn respectievelijk de zonale, meridionale en verticale snelheden van de wind in meter per seconde. t is de tijd in seconde en x en y geven respectievelijk de zonale en de meridionale ligging aan. c_p is de warmte capaciteit op constante drukvlakken en deze waarde is gelijk aan 1104 Joule per kilogram per Kelvin voor droge lucht. p geeft de druk aan in Pascal. J is de warmte transportatie van een luchtpakketje in Joule per kilogram per seconde. α is 1 gedeeld door de dichtheid van de lucht en heeft als eenheid kubieke meter per kilogram [7].

De eerste en tweede term in vlg. 1. geven de mate weer waarin de zonale en respectievelijk meridionale componenten van de wind de temperatuur op het aardoppervlak beïnvloeden. De derde en vierde term zijn afhankelijk van de verticale snelheid van de lucht en geven daarmee een maat voor de drukverandering van de atmosfeer als gevolg van luchtverplaatsing langs de verticale as. Uit de ideale gaswet volgt dat temperatuur evenredig is met druk. De eerste vier termen adiabatisch. De vijfde term daarentegen geeft diabatische opwarming weer en daarmee wordt energie bedoeld die van buiten de atmosfeer komt, zoals invallend zonlicht. De vijfde term kan ik niet bepalen, maar de eerste vier wel.

Om deze termen te bepalen voor De Bilt en Goose heb ik ERA5-reanalysis data gebruikt. Ik zal per term uitleggen welke variabelen ik gebruikt heb en hoe ik vervolgens de term berekend heb. Vervolgens zal ik mijn waarden voor iedere term voor De Bilt en Goose weergeven in grafiek die ik daarna zal interpreteren.

Voor de eerste term (term 1) heb ik voor ieder uur van de dertig dagen van de maand april voor de periode 1979-2020 de u-component van de wind en de temperatuur op 850 hPa opgevraagd. Met een resolutie van $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Voor De Bilt voor de punten tussen op de breedtegraad 4.25°O en 5.75°O en op de lengtegraad tussen 51.5°N en 52.5°N . Voor Goose voor de punten tussen langs de breedtegraad 59.25°W en 60.75°W en langs de lengtegraad tussen 51.5°N en 52.5°N .

In de eerste plaats heb ik per uur, per punt op de breedte graad en per punt op de lengtegraad de volgende afschatting bepaald:

$$-u \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p \approx u_{i,j,k} \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2\Delta x}$$

In deze afschatting geeft i, j, k respectievelijk de ligging op de breedtegraad, de ligging op de lengtegraad en tijd weer van de opgevraagde datapunten. Δx is de afstand tussen twee datapunten langs de breedtegraad, die ik afschat op 17000 meter.

Voor de tweede term (term 2) heb ik voor ieder uur van de dertig dagen van de maand april voor de periode 1979-2020 de v-component van de wind en de temperatuur op 850 hPa opgevraagd. Met een resolutie van $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Voor De Bilt voor de punten langs de breedtegraad tussen 4.5°O en 5.5°O en langs de lengtegraad tussen 51.25°N en 52.75°N en voor Goose voor de punten langs de breedtegraad tussen 59.5°W en 60.5°W en langs de lengtegraad tussen 51.25°N en 52.75°N .

In de eerste plaats heb ik per uur per coördinaat de volgende afschatting bepaald:

$$-v \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_p \approx v_{i,j,k} \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k}}{2\Delta y}$$

In deze afchatting geeft i, j, k respectievelijk de ligging op de breedtegraad, de ligging op de lengtegraad en tijd weer van de opgevraagde datapunten. Δy is de afstand tussen twee datapunten langs de lengtegraad die ik afschat op 27750 meter.

Voor de derde term (term 3) heb ik voor De Bilt de data gedownload langs de breedtegraad tussen 4.5°O en 5.5°O en langs de lengtegraad tussen 51.50°N en 52.50°N met een resolutie van $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ voor ieder uur van de maand april in de jaren 1979 tot en met 2020. Ik heb op het drukvlak van 850 hPa de waarde voor de verticale snelheid ω gedownload. En ik heb voor de drukvlakken 875hPa en 825 hPa de temperatuur opgevraagd.

Voor het bepalen van de derde term gebruik ik de volgende afchatting:

$$-\omega \frac{\partial T}{\partial p} \approx \omega_{i,j,k} \frac{T_{i,j,k}^{p875} - T_{i,j,k}^{p825}}{2\Delta p}$$

Voor de vierde term (term 4) die ik heb uitgerekend, heb ik de data voor De Bilt de data gedownload langs de breedtegraad tussen 4.5°O en 5.5°O en langs de lengtegraad tussen 51.55°N en 52.50°N voor ieder uur van de maand april in de jaren 1979 tot en met 2020 met een resolutie van $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Ik heb daarvoor de verticale snelheid en de temperatuur op 850 hPa gedownload. Daarmee heb ik de volgende formule gebruikt om mijn data te verwerken, waarbij ik α heb gesubstitueerd met behulp van de ideale gaswet.

$$\frac{\alpha \omega}{c_p} = \frac{RT_{i,j,k} \omega_{i,j,k}}{p^{850} c_p}$$

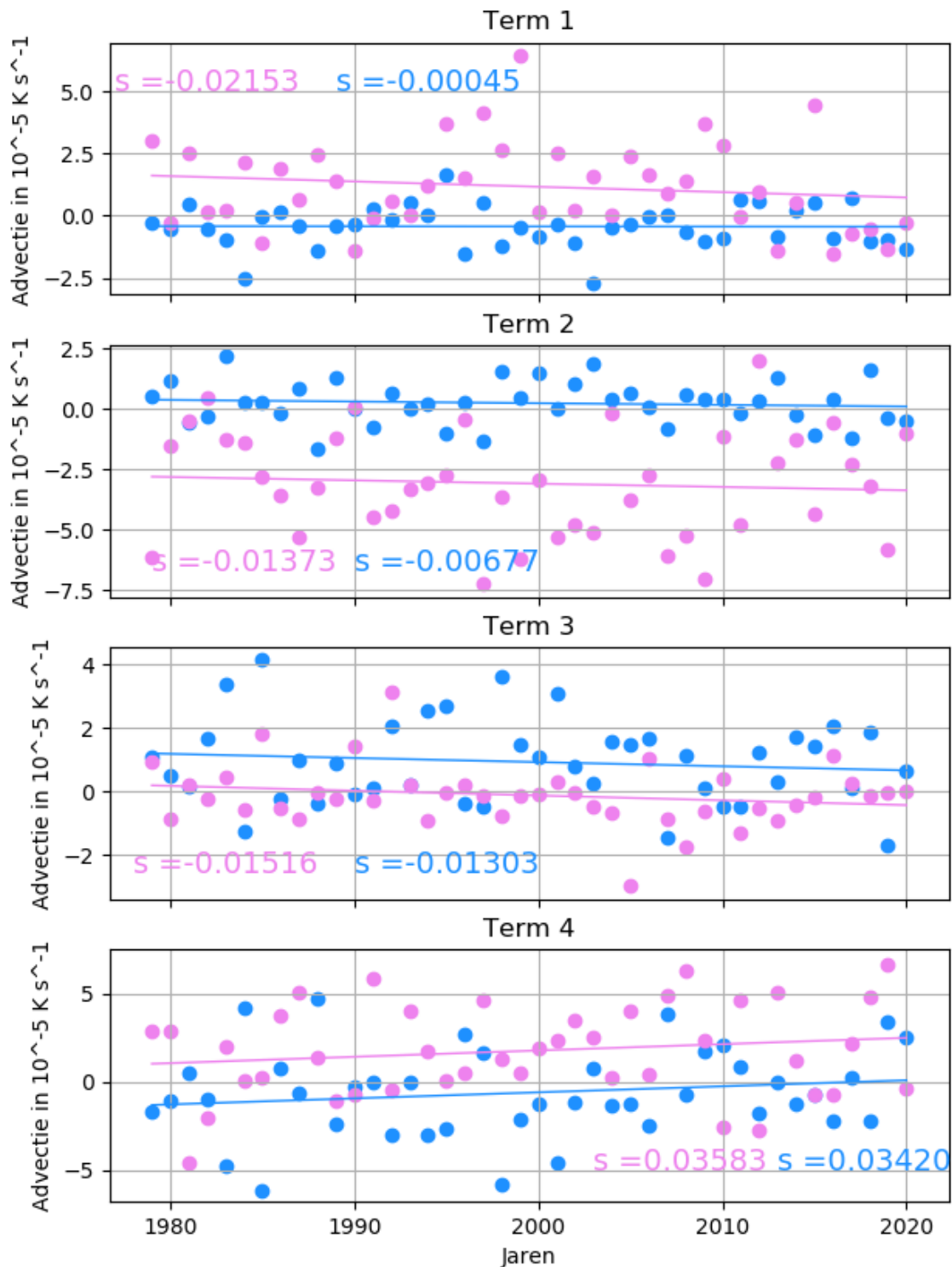
R is de gas constante en heeft een waarde van at 287 Joule per kilogram per Kelvin.

Ik heb de term vier uitgerekend voor ieder punt en vervolgens heb ik het gemiddelde uitgerekend per jaar. Dat wil zeggen dat ik gemiddeld heb over alle $24 \cdot 30 = 720$ datapunten behorende bij een uur per maand april op ieder coördinaat. Daarna heb ik ook het gemiddelde berekend tussen alle $5 \cdot 5 = 25$ coördinaten voor ieder maand april behorende bij een jaar tussen 1979-2020. De resultaten laat ik zien in figuur 8.

In figuur 8 heb ik de termen genoemd naar de bijbehorende term als in de volgorde van *vgl.* 1. De paarse punten geven de waarden voor Oost-Canada en de blauwe punten geven de waarden voor De Bilt van een gespecificeerde advectieterm. De respectievelijke paarse en blauwe lijnen zijn de eerste orde fits met de tijd voor de betekende waarden van de advectietermen. De letter s in iedere plot geeft de richtingscoëfficiënt van de eerste orde fit weer in 10^{-5} Kelvin per seconde.

De eerste drie termen dalen met de tijd zowel voor Goose als voor De Bilt. De derde en vierde term daarentegen stijgen voor zowel Goose als De Bilt. Daarnaast zie ik dat de waarde voor de meridionale advectieterm (term 2) twee keer zo snel daalt in Goose dan in De Bilt. De eerste term, afhankelijk van

de zonale snelheid, daalt ongeveer 48 keer sneller in Goose dan in de Bilt. De derde term laat een gelijke dalende trend zien voor zowel Goose als De Bilt.



Figuur 8, deze vier grafieken geven de corresponderende advectietermen weer in de volgorde gegeven in vgl 1. De paarse punten geven de waarden voor De Bilt weer en de blauwe punten geven de waarden voor Goose weer. Op de x-as staan de jaartallen aangegeven en op de y-as staat de waarde van de term in 10^{-5} K/s . De blauwe en paarse lijnen zijn de eerste orde fits door de respectievelijke datapunten. Met de letter s wordt de richtingscoëfficiënt in 10^{-5} K/s aangegeven dan de lijn door de data. De letter r staat voor de correlatiecoëfficiënt tussen de tijd en de waarde van de term.

Ik wil meer zeggen over de bijdragen van de individuele advectionstermen op de totale temperatuurverandering met de tijd. Daarom heb ik voor alle vier de termen in 10^{-5} Kelvin per seconde de gemiddelden waarde uitgerekend voor de perioden 1979-1993 en 2006-2020. Dit heb ik verwerkt in tabel 3.

De Bilt	1979-1993	2006-2020	verschil	Goose	1979-1993	2006-2020	verschil
Term 1	-0.42	-0.34	0.08	Term 1	0.80	0.70	-0.10
Term 2	0.26	0.13	-0.13	Term 2	-2.56	-3.05	-0.49
Term 3	0.88	0.54	-0.34	Term 3	0.30	-0.26	-0.56
Term 4	-0.71	0.23	0.94	Term 4	1.29	2.10	0.81
Totaal	0.01	0.56	0.55	Totaal	-0.17	-0.51	-0.34

Tabel 3, de waarden in de tabel zijn gegeven in 10^{-5} K/s. De rijen geven de gemiddelde waarde van de termen 1 tot en met 4 aan uit vgl.1. De kolommen geven de gemiddelde waarden weer van de perioden 1979-1993, 2006-2020 en het verschil tussen de twee tijdperioden. De linker vier kolommen zijn voor waarden van De Bilt. De rechter vier kolommen geven waarden uit Goose.

Uit bovenstaande tabel blijkt zo dat met name term 4 van invloed is op de verandering van de temperatuur in De Bilt. Deze waarde is namelijk in de periode 2006-2020 met 0.94 Kelvin per seconde toegenomen. In Goose is term 4 met 0.81 Kelvin per seconde toegenomen. Verder zie ik dat door de veranderende wind de temperatuur in De Bilt in 2006-2020 ten opzichte van 1979-1993 met $0.55 \cdot 10^{-5}$ Kelvin per seconde opwarmt in april. In Goose nam de temperatuur in 2006-2020 juist af met $0.34 \cdot 10^{-5}$ Kelvin per seconde ten opzichte van de periode 1979-1993 als gevolg van de wind.

Als ik de meridionale advectionsterm van Goose vergelijk met De Bilt, zie ik dat het verschil in opwarming als in figuur 1 wel deels verklaard kan worden door de meridionale advectionsterm. Het is namelijk zo dat de meridionale advectionsterm sterker af is genomen is in Goose dan in De Bilt in de periode 2006-2020 ten opzichte van 1979-1993. De vierde term daarentegen is in De Bilt juist meer toegenomen in de periode 2006-2020 ten opzichte van 1979-1993 dan in Goose. Zo volgt dat Goose minder is opgewarmd dan april als gevolg van de vierde term. Zo draagt ook de vierde term bij aan het verschil in de opwarming tussen Goose en De Bilt als in figuur 1.

Uit figuur 8 en tabel 3 concludeer ik dat de lucht De Bilt meer opwarmt in 2006-2020 dan in 1979-1993 door luchtverplaatsing. Deze opwarming wordt niet veroorzaakt door een toenemende meridionale snelheidscomponent van de wind en dat is anders dan mijn begeleider en ik verwacht hadden. Wij hadden gedacht dat als gevolg van de oostelijke verplaatsing van de trog meer warmte lucht vanuit het zuiden aangevoerd zou worden en zo de oppervlaktetemperatuur van De Bilt zou doen stijgen. Dit is echter niet terug te zien in de tabel en de grafieken, want de meridionale advectionsterm is juist afgenomen met de tijd en zo kan ik niet concluderen dat deze term van invloed is op de temperatuurstijging van De Bilt. Ik concludeer dat de temperatuurstijging van De Bilt in april in ieder geval niet veroorzaakt kan worden door meer lucht afkomstig uit het zuiden als gevolg van de oostelijke verplaatsing van de trog.

De wind doet de temperatuur in Goose afnemen in de periode 2006-2020 ten opzichte van 1979-1993. Deze daling is met name het gevolg van de afname in de tweede en de derde term. Mogelijk neemt de tweede term af door een negatieve meridionale windsnelheid. De derde term zou af kunnen nemen door een versterkte dalende luchtverplaatsing. De vierde term kan juist zijn toegenomen door een hogere waarde voor de verticale snelheid ω .

Hoe is de atmosfeer boven West-Europa en Oost-Canada veranderd als mogelijke oorzaak of gevolg van veranderende planetaire golven?

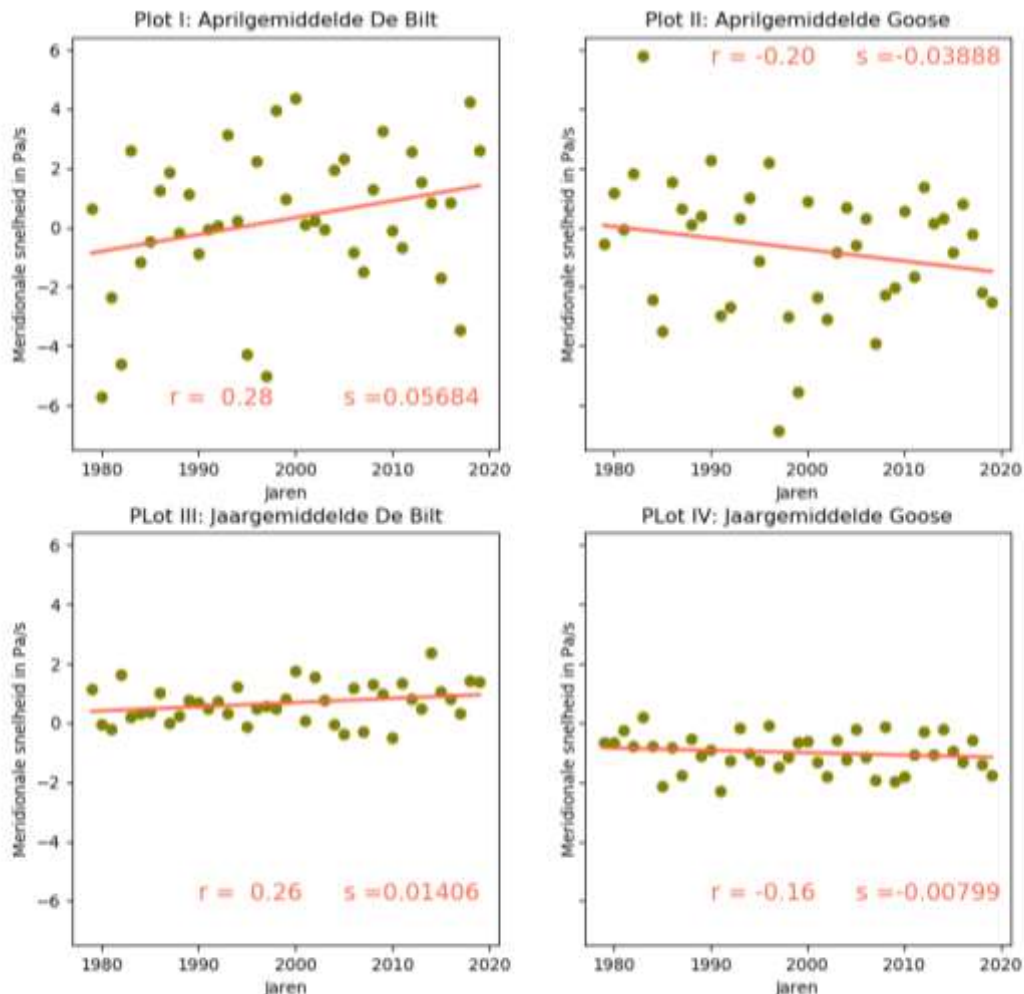
Het antwoord op de vorige vraag heeft geleid tot het inzicht dat de temperatuurverandering van West-Europa door de wind met name veroorzaakt wordt door de vierde term welke afhangt van de verticale snelheid. De tweede term die afhangt van de meridionale snelheid van de wind blijkt daarentegen niet bij te dragen aan de opwarming van april. Daarom vragen mijn begeleider en ik ons af of er sprake is van groter wordende neerwaartse verticale luchtstroming voor De Bilt en Goose welke de groeiende waarde voor de vierde term kan bepalen. Een neerwaartse verticale snelheid wordt namelijk aangegeven met een positieve waarde voor ω . Bovendien geldt dat $-\frac{\partial T}{\partial p} + \frac{\alpha}{c_p} > 0$ en daarom leidt het toenemen van ω tot een temperatuurstijging. Met andere woorden, dalende lucht leidt tot hogere temperaturen. Daarnaast vraag ik me af wat ervoor zorgt dat de tweede term gedaald is. Zou dit komen door, anders dan we verwachtten, een afname van de meridionale component? Of is er uit sprake van een meer homogene temperatuurverdeling langs de lengtegraad?

Om dit uit te zoeken heb ik de maandgemiddelde ERA5-reanalysis data voor de temperatuur, de verticale en meridionale snelheidscomponent op 850 hPa gebruikt voor alle maanden in de periode 1979-2019. Ik heb deze data opgevraagd voor $(1^\circ, 9^\circ)\text{E}$ en $(50^\circ, 55^\circ)\text{N}$ voor De Bilt en $(56^\circ, 64^\circ)\text{W}$ en $(50^\circ, 55^\circ)\text{N}$ voor Goose. De data heeft wederom een resolutie van $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Ik heb van alle punten voor de vier variabelen het gemiddelde berekend van de geografische locaties. Op deze manier heb ik voor iedere van de vier variabelen een lijst met ieder $41 \times 12 = 492$ elementen waarvan ieder vierde element de gemiddelde maandelijkse waarde is voor april voor zowel het gebied om Goose als om De Bilt. Ik heb met deze acht lijsten zestien scatterplots gemaakt. Ik heb de verticale en meridionale snelheden uitgezet tegen de tijd en de temperatuur op 850 hPa voor de aprilgemiddeldes van Goose, de aprilgemiddeldes van De Bilt en het jaargemiddelde van De Bilt. Door deze punten heb ik eerste orde fits gemaakt. Het getal r in de plots staat voor de correlatiecoëfficiënt en het getal s staat voor de richtingscoëfficiënt van de trendlijn. Met andere woorden staat het getal s voor de gemiddelde stijging of daling van de data punten van de verticale as ten opzichte van de horizontale as.

Ik zie in de vier scatterplots van figuur 9 dat de meridionale snelheid in De Bilt in april gemiddeld is toegenomen met 0.057 Pa/s per jaar. Gemiddeld over het hele jaar is de snelheid met 0.014 Pa/s per jaar toegenomen. In april is de gemiddelde stijging van de meridionale snelheid van de wind vier keer zo groot dan gemiddeld in de rest van het jaar. De gemiddelde snelheid in April van de periode 1979-1993 is -0.31 Pa/s en voor de periode 2006-2019 is deze waarde 0.64 Pa/s . De gemiddelde snelheid van het jaar van de periode 1979-1993 is 0.51 Pa/s en voor de periode 2006-2019 is deze waarde 0.90 Pa/s . Ook daaruit volgt dat er een groter verschil is tussen de stijging van de meridionale snelheid in april voor de perioden 1979-1993 en 2006-2020 dan voor het jaargemiddelde.

Hoe hoger de waarde van de meridionale snelheid, hoe meer warme lucht afkomstig van de evenaar over West-Europa trekt. In plot I van figuur 9 zie ik dat de meridionale snelheid toeneemt met de jaren. Echter; uit de figuur 8 is gebleken dat de waarden van term 2 juist afnemen met de jaren. In de inleiding heb ik genoemd dat bij wind uit het zuid-oosten de temperatuur in De Bilt in april ongeveer 4.5°C warmer is dan bij een noorderwind. De trends die ik geplot heb, lijken in tegenstelling met het zojuist genoemde gegeven uit de inleiding. Zoals ik al gezegd heb, kan een versterkte zuidelijke wind als gevolg van de oostelijke verplaatsing van de planetaire golven niet de oorzaak zijn van de versterkte opwarming van De Bilt in april ten opzichte van het jaargemiddelde als in figuur 1, maar eventueel wel het gevolg.

Uit de stijging van de meridionale snelheid in plot I van figuur 9 met de jaren en de daling van de meridionale advectieterm met de jaren in figuur 8 volgt dat de afgeleide van de temperatuur langs de meridionale as afneemt met de jaren. Daarmee is er sprake van een homogener temperatuurverdeling langs de meridionale as met de jaren.



Figuur 9, deze vier plots laten de meridionale snelheden zien in Pa/s als functie van de jaren 1979-2019. Plot I laat voor april de maandgemiddelde data en plot III laat het jaargemiddelde zien van het gebied $(1^{\circ}, 9^{\circ})E$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$. Plot II laat voor april je maandgemiddelde data zien en plot IV laat de jaargemiddelde data zien voor het gebied $(56^{\circ}, 64^{\circ})W$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$. Dit is data van 850 hPa.

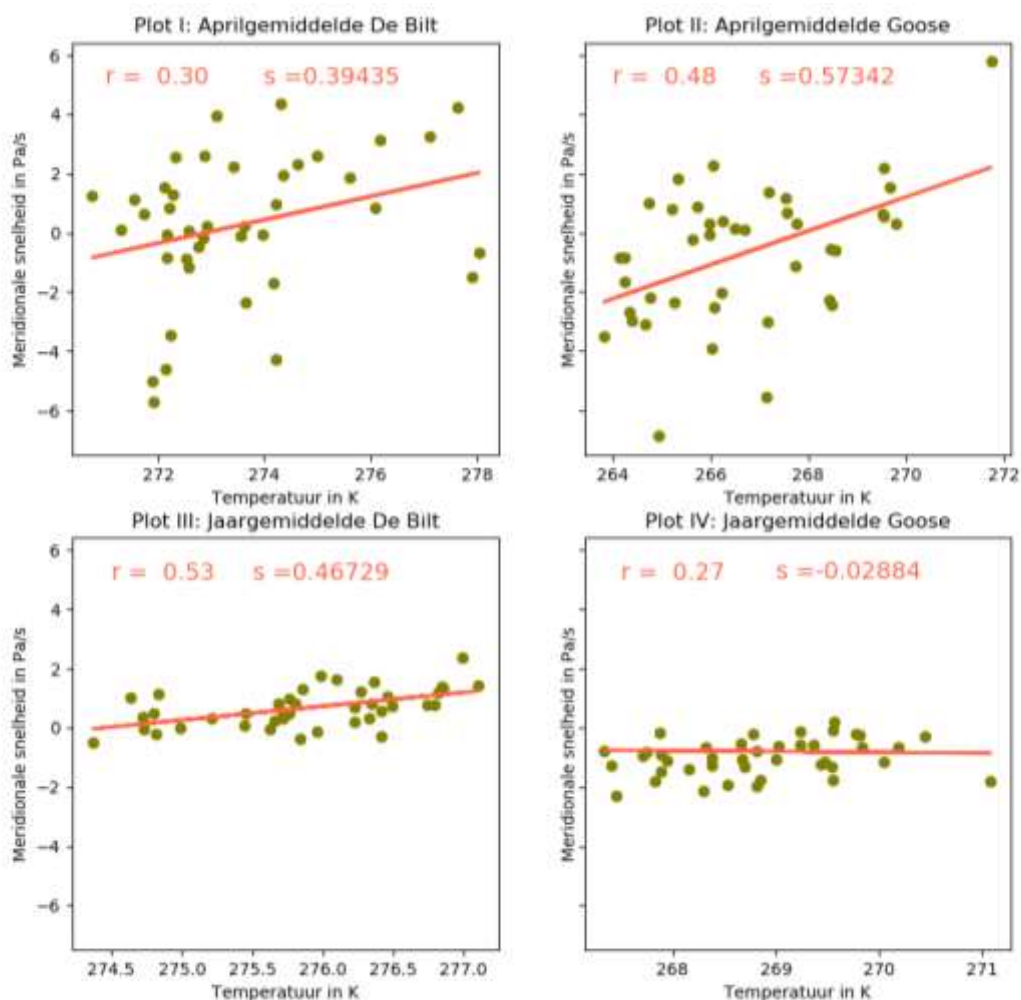
In Goose voor de maand april daarentegen is een daling te zien van 0.034 Pa/s per jaar en een daling van 0.008 Pa/s per jaar gemiddeld van alle maanden van het jaar. De daling over het jaargemiddelde is bijna vijf keer groter dan slechts in de maand april. De gemiddelde snelheid in April van de periode 1979-1993 is 0.13 Pa/s en voor de periode 2006-2019 is deze waarde -0.86 Pa/s. De gemiddelde snelheid van het jaar van de periode 1979-1993 is -0.93 Pa/s en voor de periode 2006-2019 is deze waarde -1.12 Pa/s. Ook daaruit volgt dat er een groter verschil is tussen de daling van de meridionale snelheid in april voor de perioden 1979-1993 en 2006-2020 dan voor het jaargemiddelde.

In de inleiding heb ik in figuur 3 laten zien dat de temperatuur in Oost-Canada in april vanaf 1950 ongeveer gelijk is gebleven in april, maar wel gemiddeld gestegen is op jaarbasis. De koudere wind uit het noorden kan een bijdrage leveren aan de langzamere opwarming van de maand april in Oost-Canada ten opzichte van het jaargemiddelde. De tweede term van de tijdsafgeleide van de temperatuur hangt evenredig af van de meridionale snelheid. Ik vergelijk de plots in figuur 9 ook met de waardes die ik gevonden heb voor de meridionale term (term 2) in figuur 8 en tabel 3. Uit tabel 3

volgt dat de meridionale advectieterm in Goose in de periode 1979-1993 negatief is. De meridionale advectieterm is gemiddeld meer negatief in de periode 2006-2020 dan in de periode 1979-1993. Uit plot II van figuur 9 blijkt dat de meridionale snelheid in Goose in april afneemt. De afname van de temperatuur in Goose kan daarom wel verklaard worden door de afgenomen meridionale snelheid. Het zou daarnaast zo kunnen zijn dat ook in Oost-Canada er een meer homogeen verdeeld temperatuurveld zich voordoet, maar wel zo dat deze de uiteindelijke daling van de tweede term niet geheel teniet doet.

Ik vergelijk Goose en De Bilt, dan zie ik dat de meridionale component in Goose afneemt en in De Bilt toeneemt, geheel naar de oorspronkelijke verwachting uit de inleiding. Toch blijkt uit de vorige deelvraag dat de manier waarop deze meridionale snelheid de temperatuur beïnvloed anders is dan we dachten.

Ik ben nu benieuwd of er een statistisch verband is tussen de temperatuur en de meridionale snelheid. Figuur 10 onderstaand zal daar antwoord op geven.

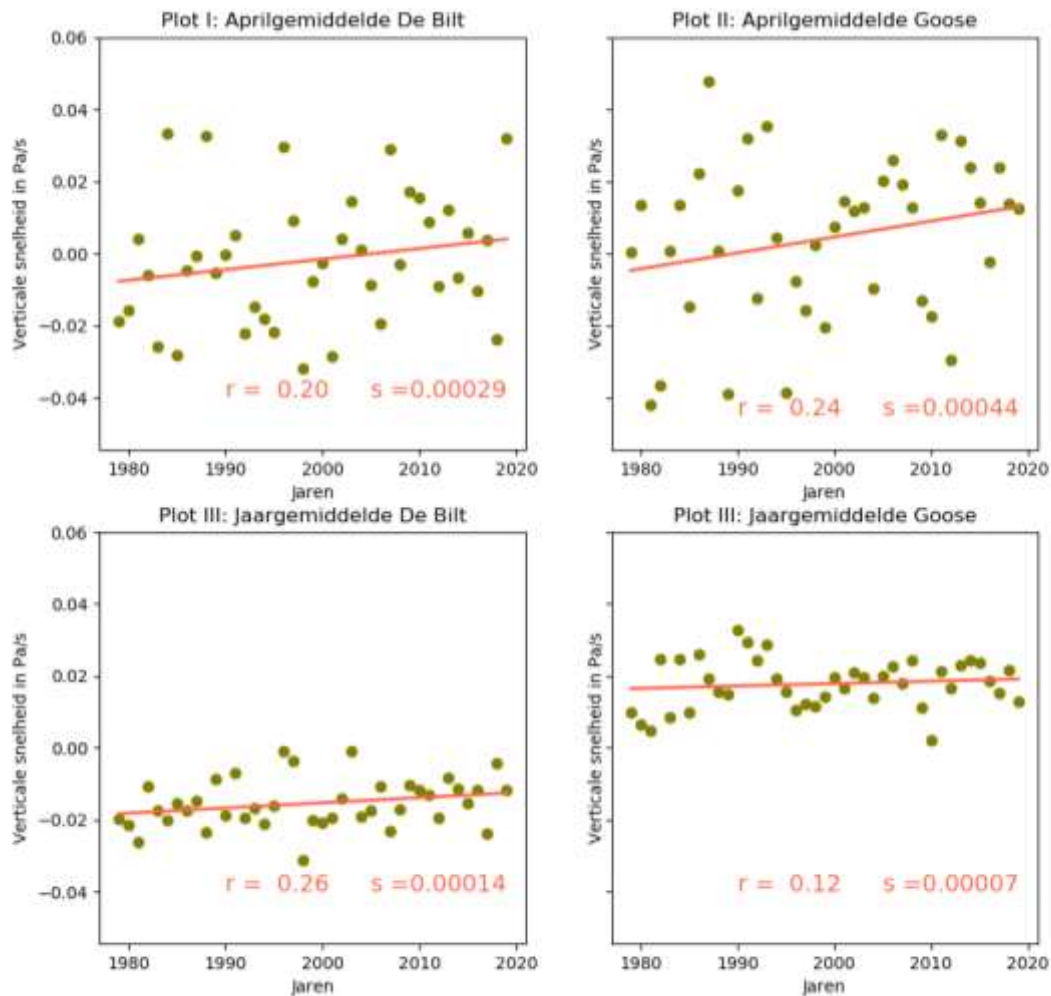


Figuur 10, deze vier plots laten de meridionale snelheden zien in Pa/s als functie van de temperatuur in Kelvin per jaar van 1979-2019. Plot I laat voor april de maandgemiddelde data en plot III laat het jaargemiddelde zien van het gebied $(1^{\circ}, 9^{\circ})E$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$. Plot II laat voor april je maandgemiddelde data zien en plot IV laat de jaargemiddelde data zien voor het gebied $(56^{\circ}, 64^{\circ})W$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$.

De correlatiecoëfficiënt tussen (i) de temperatuur in De Bilt in april en (ii) de meridionale snelheid in De Bilt in april is 0.3 en geeft daarmee een zwakke correlatie aan. Terwijl de correlatiecoëfficiënt 0.5

is voor (i) het de jaargemiddelde temperatuur van De Bilt en (ii) de jaargemiddelde meridionale snelheid van De Bilt en geeft daarmee een medium correlatie aan. Daaruit volgt dat de meridionale snelheid in april voor De Bilt minder informatie geeft over de temperatuur dan gemiddeld in het hele jaar.

Voor Goose is de correlatiecoëfficiënt tussen (i) de temperatuur in april en (ii) de meridionale component voor april gelijk aan 0.5 en daarmee een medium correlatie. De correlatiecoëfficiënt is 0.3 voor (i) de jaargemiddelde temperatuur in Goose en (ii) de jaargemiddelde meridionale component in Goose. Daaruit volgt dat de meridionale snelheid in april in Goose meer informatie geeft over de temperatuur dan gemiddeld in het hele jaar.



Figuur 11, deze vier plots laten de verticale snelheden zien in Pa/s als functie van de jaren 1979-2019. Plot I laat voor april de maandgemiddelde data en plot III laat het jaargemiddelde zien van het gebied $(1^{\circ}, 9^{\circ})E$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$. Plot II laat voor april je maandgemiddelde data zien en plot IV laat de jaargemiddelde data zien voor het gebied $(56^{\circ}, 64^{\circ})W$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$.

Dan kijk ik naar de verticale component weergegeven in figuur 11. Ik zie dat deze in De Bilt in de maand april per jaar gemiddeld met 0.00029 Pa/s toe is genomen. Gemiddeld over het hele jaar in De Bilt is deze toename 0.00014 Pa/s. In april is de gemiddelde stijging van de meridionale snelheid van de wind in april twee keer zo groot dan gemiddeld in de rest van het jaar. De aprilgemiddelde waarde voor de verticale snelheid in De Bilt is -0.0044 Pa/s gemiddeld voor de periode 1979-1993 en voor de periode 2006-2019 is deze waarde 0.0037 Pa/s. De jaargemiddelde waarde voor de verticale

snelheid in De Bilt is -0.017 Pa/s gemiddeld voor de periode 1979-1993 en voor de periode 2006-2019 is deze waarde -0.014 Pa/s.

In figuur 8 heb ik laten zien dat de vierde advectionsterm voor De Bilt toeneemt met de jaren. Deze term is evenredig met de verticale snelheid. Ik zie in tabel 3 voor de periode 1979-1993 dat de vierde advectionsterm voor april negatief is in De Bilt, terwijl de vierde term sterk toegenomen en positief is in de periode 2006-2020. Uit plot I van figuur 11 volgt dat de verticale snelheid van een negatief gemiddelde in de periode 1979-1993, naar een positief gemiddelde gaat in 2006-2019. Zo volgt dat de verticale snelheid de vierde advectionsterm doet stijgen en neemt ook de lokale tijdsafgeleide van de temperatuur in De Bilt toe in april.

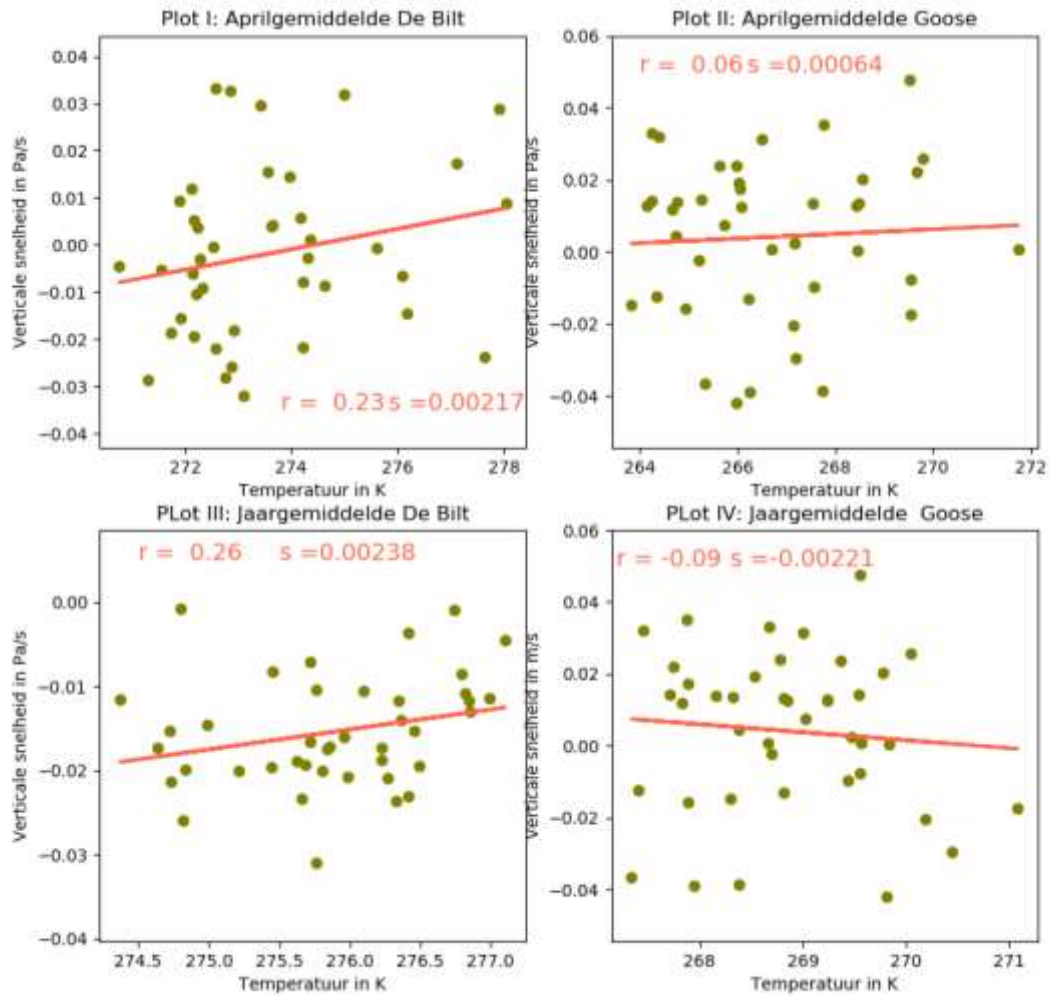
In Goose is net als in De Bilt een stijging te zien van de waarden van de verticale component met de jaren in de maand april. Zo stijgt de temperatuur per aprilmaand in Goose gemiddeld met 0.00044 Pa/s, terwijl deze toename per jaar gemiddeld over alle twaalf maanden gelijk is aan 0.00007 Pa/s. De gemiddelde waarde voor de verticale snelheid in Goose in april is 0.0026 Pa/s gemiddeld voor de periode 1979-1993 en voor de periode 2006-2019 is deze waarde 0.011 Pa/s. Zo is de verticale snelheid in april met een factor 4 toegenomen in de periode 2006-2019 ten opzichte van 1979-1992. De jaargemiddelde waarde voor de verticale snelheid in Goose is 0.019 Pa/s gemiddeld voor de periode 1979-1993 en voor de periode 2006-2019 is deze waarde ook 0.018 Pa/s.

De vierde advectionsterm in april in Goose is met een factor 1.6 toegenomen in 2006-2019 ten opzichte van 1979-1993. Zo volgt dat de stijging van de verticale snelheid bij heeft gedragen aan de opwarming van de temperatuur in Goose. Omdat de verticale snelheid met een factor 4 is toegenomen en de uiteindelijke vierde advectionsterm maar met een factor 1.6 is toegenomen, volgt dat $\alpha = \frac{1}{\rho} = \frac{RT}{p}$ afgenomen moet zijn. Dat betekent dat ofwel de temperatuur is afgenomen, wat ook het geval is of dat de druk is toegenomen, wat vermoedelijk ook het geval is door de verticale luchtverplaatsing.

Om te zien wat de correlatie is tussen de temperatuur en de verticale windsnelheid, heb ik figuur 12 gemaakt. De waarde van de correlatiecoëfficiënt van de temperatuur in de maand april in De Bilt en de verticale snelheid van april in De Bilt is 0.23. De waarde van de correlatiecoëfficiënt van de temperatuur over het jaargemiddelde in De Bilt en de verticale snelheid van het jaargemiddelde in De Bilt is 0.26. De correlaties zijn zwak. Er lijkt zo geen direct verband te zijn tussen de temperaturen in Goose en De Bilt en de verticale snelheid.

Wel blijkt de correlatiecoëfficiënt in De Bilt wel sterker dan in Goose. Dit betekent dat de verticale snelheid een grotere voorspellende waarde heeft op de temperatuur in De Bilt dan in Goose.

Kortom, uit figuur 11 concludeer ik dat er sprake is van een dalende beweging van lucht in zowel Goose als De Bilt voor het jaargemiddelden en met name voor april. Deze dalende beweging zorgt deels voor de stijging van de vierde advectionsterm. Voor de meridionale snelheid zie ik een versterkte trend in de maand april ten opzichte van het jaargemiddelde in zowel De Bilt als in Goose. Uit de gepresenteerde gegevens lijkt te volgen dat de sterke opwarming van de maand april in De Bilt als in figuur 2 niet veroorzaakt wordt door een zuiden wind, maar door een verticale wind. In Goose is de relatief langzame de temperatuurverandering in de maand april ten opzichte van het jaargemiddelde, als in figuur 3, wel voor een deel toe te schrijven aan meer koele wind uit het noorden.



Figuur 12, deze vier plots laten de meridionale snelheden zien in Pa/s als functie van de temperatuur in Kelvin per jaar van 1979-2019. Plot I laat voor april de maandgemiddelde data en plot III laat het jaargemiddelde zien van het gebied $(1^{\circ}, 9^{\circ})E$ en $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$. Plot II laat voor april je maandgemiddelde data zien en plot IV laat de jaargemiddelde data zien voor het gebied $(56^{\circ}, 64^{\circ})W$ $(50^{\circ}, 55^{\circ})N$.

Conclusie en discussie

In de inleiding heb ik in figuur 1 de temperatuur van West-Europa en Oost-Canada in de maand april met elkaar vergeleken. Ik zag dat de temperatuur in West-Europa sneller toenam dan de temperatuur in Oost-Canada. In figuur 2 heb ik laten zien dat de temperatuur in De Bilt in de maand april sneller toenam dan gemiddeld over alle maanden. In figuur 3 heb ik laten zien dat voor Oost-Canada de temperatuur gemiddeld over alle maanden juist sneller toeneemt dan alleen in de maand april.

Een mogelijke verklaring voor de observaties in figuur 1,2 en 3 is de oostelijke verschuiving van de trog van de planetaire golven boven de Atlantische oceaan in de maand april. De planetaire golven zouden verschoven kunnen zijn als gevolg van de veranderende sneeuwbedekkingen boven Eurazië en Noord-Amerika. Ik heb in figuren 2 en 3 laten zien dat de sneeuwbedekking op Noord-Amerika minder snel afneemt dan de sneeuwbedekking op Eurazië. Ik heb laten zien met een hoofdcomponentanalyse dat er twee losse verbanden zijn tussen de sneeuwbedekking van Eurazië en Noord-Amerika en de temperaturen van respectievelijk West-Europa en Oost-Canada. Omdat de eigenvector waaruit dit verband blijkt slechts een eigenwaarde van 24% heeft, geeft deze analyse een zwak statistisch verband aan. Ik kan geen directe conclusies trekken over een mogelijk link met de trog. Maar onderzoek toont wel aan dat er een nauw verband is tussen de krimpende Euraziatische sneeuwbedekking en Arctische zee-eisgraad aan de ene kant en aan de andere kant de recente warmtegolven in Europese zomers [6]. Met deze bron wil ik onderbouwen dat er wel een relatie bestaat tussen de sneeuwbedekking en de temperatuur in Europa.

Uit figuur 6 volgt dat de trog is verschoven in oostelijke richting voor De Bilt in de maand april. Deze oostelijke verschuiving van de trog is niet als jaargemiddelde geobserveerd in figuur 7. Daaruit volgt dat deze verschuiving een effect kan hebben op de temperatuur in april dat er niet is gemiddeld over alle maanden van het jaar. Daarmee zou ik het verschil in figuur 1 deels kunnen verklaren.

Uit figuur 8 volgt dat de term in de tijdsafgeleide van de temperatuur, die afhankelijk is van de meridionale component, afneemt met de jaren. Dit is anders dan ik verwacht had. Uit de afname van de meridionale term met de jaren volgt dat de temperatuurafgeleide langs de lengtegraad is afgenomen met de jaren. Op deze manier zou er sprake zijn van een meer homogeen verdeelde temperatuur langs de lengtegraad in de periode 2006-2020 dan in 1979-1993.

Er bestaat een relatie tussen de temperatuurgradiënt en de globaal gemiddelde temperatuur relatief aan een referentieklimaat, namelijk; als de globaal gemiddelde temperatuur hoger (lager) is, dan vindt de grootste opwarming (koeling) plaats in de poolregio's. Dit fenomeen heeft de naam polaire amplificatie [8]. Uit ander onderzoek gebleken dat de poolregio twee keer zo snel is opgewarmd dan het noordelijkhalfrond [10].

Polaire amplificatie zou ervoor kunnen zorgen dat de waarden van meridionale advectieterm in De Bilt niet stijgen met de jaren ondanks de toegenomen zuidelijke wind in recentere perioden zoals is gebleken in plot I van figuur 9.

Daarnaast blijkt uit onderzoek blijkt dat het gecombineerde effect van de krimpende zee-eis- en sneeuwbedekking, drogere grond en een sterkere warmteflux ten eerste een verzwakking veroorzaken van de naar de polen gerichte temperatuurgradiënt op hoge en gemiddelde breedtegraad en ten tweede op gemiddelde breedtegraad de straalstroom beïnvloeden [6]. Met deze bron wil ik laten zien dat er een verband bestaat tussen de sneeuwbedekking en de naar de polen gerichte temperatuurgradiënt. Ook laat de bron zien dat er een verband is tussen de straalstroom en de sneeuwbedekking.

In figuur 8 bleek met name de vierde term, die afhankelijk is van de verticale snelheid, te stijgen met de jaren zowel in Goose als in De Bilt. In plots I en II van figuur 11 heb ik laten zien dat de verticale snelheid is toegenomen in April en in Goose met de jaren. De toename in de verticale snelheid levert een bijdrage aan de toename van de vierde advectieterm. Daaruit deduceer ik dat de toename van de verticale snelheid een bijdrage levert aan de toegenomen temperaturen in Goose en in De Bilt. De vierde term is meer gestegen in De Bilt in de recentere periode dan in Goose en daarom levert deze term een bijdrage aan het verschil in opwarming in figuur 1.

Al met al kan ik concluderen dat de verschuiving van de trog van de planetaire golven met als gevolg meer zuidelijke wind boven West-Europa in april, niet de oorzaak kan zijn van de zonaal asymmetrische opwarming en de versterkte opwarming van april in West-Europa ten opzichte van het gemiddelde over alle maanden. De zonaal asymmetrische opwarming in april zou er wel voor kunnen zorgen dat de trog verschuift in oostelijke richting. In Oost-Canada heb ik laten zien dat er geen sprake is van een verschuiving van planetaire golven en daarbij is er amper toename in de temperatuur, dit volgt uit figuren 3 en 6. Op deze manier ondersteunen de figuren 3 en 6 dat de temperatuurtoename in De Bilt een oostelijke verschuiving veroorzaakt van de planetaire golven.

Uit onderzoek blijkt dat de versterking van planetaire golven op gemiddelde breedtegraad in de atmosfeer een verhoogde frequentie van weersextremen tot gevolg heeft. De onderzoekers stellen dat de disproportionele opwarming van de polen ten opzichte van de gemiddelde breedtegraden, geassocieerd met zwakkere noord-zuid gradiënt, de versterking van de planetaire golven veroorzaakt. De onderzoekers stellen wel dat de observationele onderbouwing niet eenduidig is [9]. Met deze bron wil ik laten zien dat onevenredige opwarming langs de lengtegraden invloed heeft op de sterkte van planetaire golven. De bron laat zien dat er een mogelijk verband is tussen planetaire golven en longitudinaal asymmetrische opwarming. Het zou kunnen dat er ook een verband is tussen de ligging van planetaire golven en zonaal asymmetrische opwarming.

Bronnen:

- [1] : Delden van, A.J. (2019). April opnieuw warm en zonnig: de seizoenen schuiven op. *Meteorologica*, mei editie.
- [2] : Nigam, S., & DeWeaver, E. (2003). Stationary Waves (Orographic and Thermally Forced). *Elsevier*, volume 4, 2121–2137
- [3] : Perovich, D. (2007). Light reflection and transmission by a temperate snow cover. *Journal of Glaciology*, **53**(181), 201-210.
- [4] : Delden van, A.J. (2020). Atmospheric dynamics, p. 166.
- [5] : NOS, 10-09-2019, <https://nos.nl/artikel/2301064-investeringen-nodig-om-forse-klimaatschade-te-voorkomen.html> (geraadpleegd op 23-01-2021).
- [6] : Zhang, R., Chenghu, S., *et al.* (2020). Increased European heat waves in recent decades in response to shrinking Arctic sea ice and Eurasian snow cover. *Climate and Atmospheric Science*, p.1.
- [7] : Delden van, A.J. (2020). Atmospheric dynamics, p. 133.
- [8] : Lee, S. A. (2014) theory for polar amplification from a general circulation perspective. *Asia-Pacific J Atmos Sci* **50**, p.31.
- [9] : Screen, J., Simmonds, I. (2014). Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. *Nature Clim Change* **4**, 704–709.
- [10] : Stuecker, M.F., Bitz, C.M., Armour, K.C. *et al.* (2018). Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks. *Nature Clim Change* **8**, 1076–1081.

Appendix:

Tabel geeft de correlatiecoëfficiënten tussen de eerste orde fit van de data en de data.

Oppervlaktetemperatuur West-Europa	Oppervlaktetemperatuur Oost-Canada	Oppervlaktetemperatuur gehele gemiddelde breedtegraad	Sneeuwbedekking Eurazië	Sneeuwbedekking Noord-Amerika
0.85	1.00	0.70	0.81	0.91