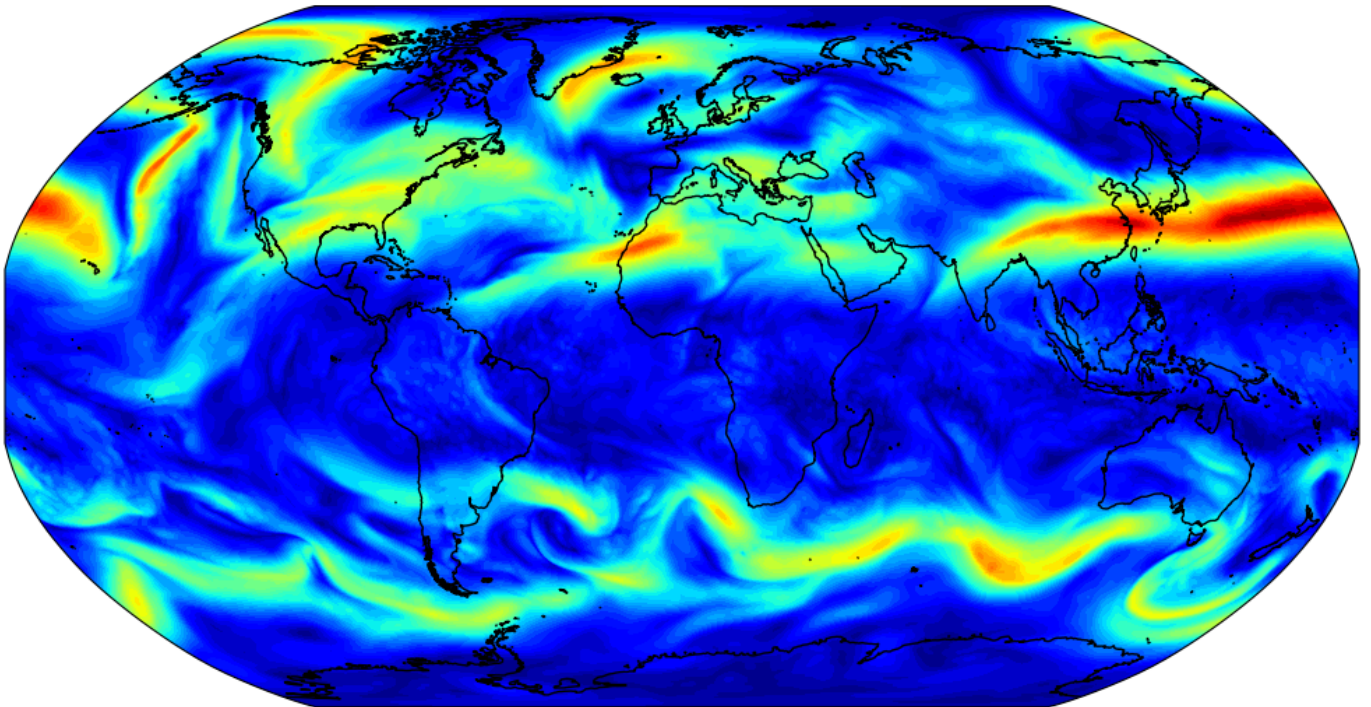


Trends in de Kracht, Positie en Meandering van de Straalstroom op het Noordelijk Halfrond sinds 1940

BSc Thesis bij de Meteorology & Air Quality Group van de WUR

Een studie gefocust op het beschrijven van de eigenschappen van de straalstroom en het analyseren van trends in de kracht, positie en meandering van de straalstroom op het Noordelijk Halfrond van 1940 tot 2020 met behulp van de recent uitgebreide ERA5 heranalyse dataset.



(Copernicus, 2023)

Geschreven door Jelmer van der Graaff

Datum 3 juli 2023

Samenvatting

De straalstroom is een band van sterke windsnelheden op een hoogte van ongeveer 10 kilometer die weerspatronen wereldwijd beïnvloed. De straalstroom zou kunnen afzwakken of meer kunnen gaan meanderen als gevolg van de snelle opwarming van de Noordpool ten opzichte van andere regio's. Dit zou dan kunnen leiden tot meer extreem weer op het Noordelijk Halfrond. Er is echter weinig bekend over trends in de kracht, positie en meandering van de straalstroom over de laatste decennia. Enerzijds omdat het nauwkeurig beschrijven van de eigenschappen van de straalstroom gecompliceerd is en anderzijds vanwege een gelimiteerde hoeveelheid historische weerdata. Sinds maart 2023 is de heranalyse dataset van ERA5 uitgebreid tot het jaar 1940, waardoor de analyse over een langere tijdsperiode kan worden gedaan.

Het eerste doel van deze studie is het beter definiëren van de eigenschappen van de straalstroom, wat wordt gedaan door het combineren van verschillende methodes uit voorgaande onderzoeken en het verifiëren van de uitkomsten. Vervolgens worden de eigenschappen van de straalstroom van 1940 tot en met 2020 berekend en wordt er een trendline gefit op de datapunten. De resultaten geven aan dat de Sinuosity-index – letterlijk vertaald een 'bochtigheids-index' en een metriek om de lengte van de straalstroom ten opzichte van de omtrek van de Aarde uit te drukken – uit een vorige studie kan worden aangepast. Door een seizoensgebonden interpolatie te maken voor het bereik van de breedtegraden kan de positie van de straalstroom het beste worden benaderd.

De trendanalyse laat zien dat de gemiddelde kracht van de straalstroom tussen 1940 en 2020 significant is toegenomen, voor alle seizoenen. De meandering is tevens significant toegenomen, behalve gedurende de winter. Op jaarbasis en in de meeste seizoenen is geen trend gevonden in de gemiddelde positie van de straalstroom. Alleen gedurende de winter is er een zuidelijke trend. Deze resultaten hintten – vooral in de zomer – op een trend naar een meer meanderend grootschalig patroon en daarmee potentieel ook op meer geblokkeerde weerssituaties. Het relateren van deze resultaten aan regionale veranderingen in weerpatronen of extreem weer is echter lastig door de verschillende schaal van deze studie (globaal) en het weer (regionaal).

Voorwoord

Nou, hetgeen je nu op het punt staat om te lezen is het resultaat van bijna 3 jaar studeren aan de Wageningen University & Research. Oké, misschien niet helemaal omdat – zoals sommigen al zullen weten – ik ook in mijn vrije tijd al veel met weerkaarten en meteorologische data bezig ben. En met vrije tijd bedoel ik praktisch altijd wanneer ik wakker ben en geen afspraken heb. Maar alsnog heeft de Bachelor studie Bodem, Water & Atmosfeer aan de WUR mij (onbewust) veel bijgebracht. Laat me je meenemen naar ongeveer drie jaar terug, toen ik mijn profielwerkstuk – een onderdeel van het afronden van de middelbare school – inleverde.

Dat profielwerkstuk ging over de reden voor de snelle opwarming van het Noordpoolgebied vergeleken met elders en de mogelijke impact daarvan op het Noordelijk Halfrond. Indien je de samenvatting hebt gelezen zal je wellicht denken: “Is dat niet gewoon hetzelfde als wat je nu hebt onderzocht?”. Nou, het is inderdaad vrij vergelijkbaar. Toen ik dat rapport – bestaande uit een veel te hoog aantal van 59 pagina’s – destijds inleverde grapte ik dat ik het zo weer zou kunnen inleveren voor mijn Bachelor scriptie. Gelukkig heb ik dat niet heb gedaan. Mijn begeleiders waren er waarschijnlijk niet al te blij mee geweest en ook de presentatie van de resultaten zou best wel saai zijn geweest.

Het was een achtbaan, die drie jaar in Wageningen. Allereerst vanwege een virus waardoor het principe van ‘veel contacturen’ – waarmee de studie Bodem, Water & Atmosfeer adverteerde – volledig kwam te vervallen. Door online lessen te volgen via *Microsoft Teams* of door heen en weer te reizen tussen de universiteit in Wageningen en thuis (in Rotterdam) kwam ik steeds meer te weten over het *Systeem Aarde*. Sommige vakken waren misschien leuker dan andere, maar uiteindelijk ben ik het er zeker mee eens dat de combinatie van alle domeinen – bodem, water en atmosfeer – de beste ervaring biedt. Voordat ik kwam studeren aan de WUR wist ik dat het weer tal van processen op Aarde beïnvloedde, maar de diepgaande lesstof in combinatie met een brede visie maakte mij pas echt duidelijk wat voor interacties plaatsvinden in het systeem van de Aarde.

Men zegt wel eens, “De tijd vliegt”. Nou, dat doet het inderdaad. Ik woonde amper een jaar op mezelf in Wageningen toen ik al moest gaan nadenken over mijn scriptie. Niet de interessante lessen over meteorologie of statistiek, maar de scriptie is met afstand het meest belangrijke onderdeel van de studie en zeker het 3^e jaar. Toen ik de mogelijke scriptie-onderwerpen zag voor het domein *Atmosfeer*, wist ik gelijk welke ik als eerste keuze zou doorgeven. Juist, het onderwerp waar ook mijn profielwerkstuk over ging. En niet omdat ik dingen wilde kopiëren en het mezelf makkelijk wilde maken, maar vooral om te zien hoe ik vooruit ben gegaan in het doen van wetenschappelijk onderzoek en het aanpakken van zulke grote projecten in het algemeen. Als ik zo terugkijk was mijn profielwerkstuk geschreven door een kind terwijl dit scriptie-onderzoek is gedaan door een toekomstig wetenschapper. En dat is ook hoe ik me voel. Studeren in Wageningen heeft me getransformeerd van een tienerjongen tot een professionele, serieuze en immens gemotiveerde toekomstige klimatoloog. Zowel mentaal (weten hoe je zo’n uitdaging aanpakt) en fysiek (de kennis die ik heb opgedaan over *systeem Aarde*).

Echter, dit alles was niet mogelijk geweest zonder de hulp van vrienden, familie, collega’s en medestudenten. Lees daarom vooral ook het hoofdstuk *Dankwoord* op pagina 26, waar ik iedereen die heeft meegeholpen aan dit project bedank en specifiek enkele personen die een belangrijke bijdrage hebben geleverd.

Dat is alles wat ik vooraf wilde zeggen, dus hier is ‘ie dan. Mijn scriptie *Trends in Northern Hemisphere Jet Stream Strength, Latitudinal Position and Waviness since 1940*”, vertaald naar het Nederlands. Ik hoop dat je niet alleen geniet van het lezen van dit onderzoek, maar vooral ook nieuwe dingen leert over ons altijd interessante *Systeem Aarde*.

Jelmer van der Graaff,

Wageningen op 3 juli 2023

Inhoud

Samenvatting	i
Voorwoord	ii
1. Introductie.....	5
1.1. Context.....	5
1.2. Probleemstelling	5
1.3. Onderzoeksvragen.....	6
2. Materialen en Methodes	8
2.1. Data collectie.....	8
2.2. Methodologie	8
2.2.1. Introductie.....	8
2.2.2. Bereik breedtegraden	9
2.2.3. Eigenschappen straalstroom.....	11
2.2.4. Trendanalyse	12
2.2.5. Analyses voor discussiepunten	12
3. Beschrijving van de straalstroom eigenschappen	14
3.1. Breedtegraden om te testen	14
3.2. Windsnelheden voor verschillende scenario's	15
3.3. Beschrijving van de kracht, positie en meandering van de straalstroom	18
4. Trendanalyse.....	19
4.1. Jaarlijks gemiddelde trends.....	19
4.2. Trends per seizoen	20
4.3. Vergelijking met vorige studies	20
4.3.1. Neuraal-netwerk gebaseerde analyse van de polaire en subtropische straalstroom	20
4.3.2. ERA5 analyse sinds 1979	21
5. Discussie	22
5.1. Interpolatie van het bereik.....	22
5.2. Definitie en berekening van de straalstroom eigenschappen	22
5.3. Opmerkingen over de trendanalyse	23
5.4. Vergelijking van de resultaten met vorige studies.....	23
5.5. Onzekerheid in de heranalyse data.....	23
6. Conclusie	25
Dankwoord	26
Bronnen.....	27
Appendix A: Spreidingplots met trendlijnen	29

Appendix B: Plot van Cattiaux et al. 30

1. Introductie

1.1. Context

Klimaatverandering is tegenwoordig een ‘hot topic’. Temperaturen zijn wereldwijd snel aan het stijgen en extreme weersfenomenen zoals droogtes, overstromingen en hittegolven komen steeds vaker voor (IPCC, 2023). De straalstroom speelt hier een belangrijke rol in, aangezien deze het ontstaan van hoge- en lagedrukgebieden aandrijft. De straalstroom is een band van sterke windsnelheden op een hoogte van ongeveer 10 kilometer, gedreven door de temperatuurgradiënt tussen de koude lucht in het Noordpoolgebied en de warme lucht in de tropen (NWS, 2023b). Wanneer er een grote golf in de straalstroom is kunnen sommige regio’s te maken krijgen ongewoon warm en droog weer, terwijl het elders atypisch koel en nat weer is (Figuur 1). De ongekennde hittegolf in de *Pacific Northwest* in juni 2021 – toen temperaturen in Canada opliepen naar bijna 50°C – is een vrij recent voorbeeld van een grote golf in de straalstroom die leidt tot zeer extreem weer (White et al., 2023).

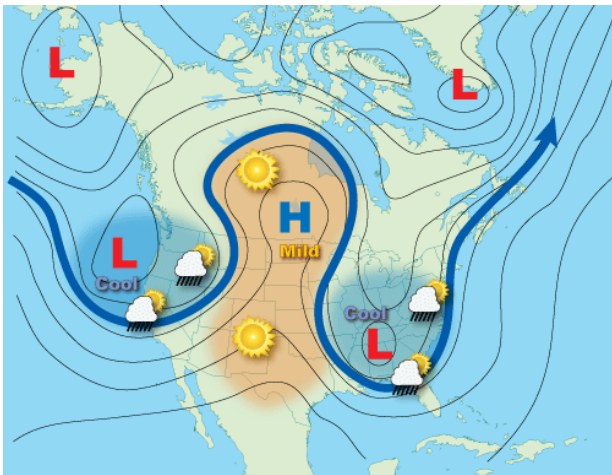


Figure 1: Een voorbeeld van een ongewoon weerpatroon boven Noord-Amerika veroorzaakt door een grote golf in de straalstroom, gekleurd in blauw. Ver in het noorden van het centrale deel van Noord-Amerika is het extreem warm, terwijl het bij de Oost- en Westkust juist erg koel en nat is (NWS, 2023a).

De straalstroom is het sterkst gedurende de winter. In deze tijd van het jaar is het contrast in temperatuur tussen de Noordpool en de tropen namelijk het grootst. In de zomer zijn de temperatuurverschillen tussen de Noordpool en de tropen kleiner en is de straalstroom over het algemeen minder krachtig (NWS, 2023b).

Door het positieve feedback mechanisme warmt het Noordpoolgebied sneller op dan de rest van de wereld. Dit is ook wel bekend als Arctische amplificatie (IPCC, 2023). Het belangrijkste mechanisme is de afname in het zeeijs oppervlak, waardoor meer zonnestraling wordt geabsorbeerd en de temperaturen sneller toenemen (Serreze & Barry, 2011). Arctische amplificatie resulteert in kleinere temperatuurverschillen tussen de Noordpool en de tropen in de onderste delen van de atmosfeer. Echter, vanaf een hoogte van circa 6 kilometer lijken de temperatuurverschillen juist toe te nemen (EUMETSAT, 2023).

1.2. Probleemstelling

Omdat de kracht van de straalstroom afhangt van de temperatuurgradiënt tussen de Noordpool en de tropen, is de algemene hypothese dat door klimaatverandering de kracht van de straalstroom zal afnemen of meer meandering zal gaan vertonen (Coumou et al., 2018; Francis & Vavrus, 2015; Meleshko et al., 2016). Omdat de straalstroom een belangrijke aanjager is voor weersystemen is onderzoek naar historische en toekomstige veranderingen in de eigenschappen van de straalstroom belangrijk. Een studie naar de impact van Arctische amplificatie op extreem weer in de gematigde breedtegraden (*mid-latitudes*) toonde dat extreem weer frequenter wordt door een langzamere progressie van weerpatronen en een meer meanderende bovenstroom (Francis & Vavrus, 2012). Volgens een andere studie zorgt Arctische amplificatie voor meer persistent heet en droog weer tijdens de zomer (Coumou et al., 2018). Echter, er is nog altijd veel onbekend over het gedrag van de straalstroom. Niet alleen lopen de uitkomsten van observationele studies en klimaatmodellen uiteen (Cohen et al., 2020), verleden trends in de kracht, positie en meandering van de straalstroom zijn daarnaast moeilijk te bepalen. De meeste studies focussen op de relatie tussen Arctische amplificatie en extreem weer in de gematigde breedtegraden en geven geen kwantitatieve trend in de eigenschappen van de straalstroom over de laatste decennia.

Volgens een *neuraal-netwerk* gebaseerde studie is de straalstroom tussen 1979 en 2014 minder krachtig geworden (Molnos et al., 2017). Voor de trend in de positie werden tegengestelde veranderingen gevonden voor de polaire en subtropische straalstroom. Een eventuele trend in de mate van meandering werd niet onderzocht. Een andere studie op basis van ERA5 heranalyse data van 1979 tot 2022 vond juist een toename van de zonale windsnelheid op ongeveer 11 kilometer hoogte, een vergelijkbare parameter als de kracht van de straalstroom (Simmons, 2022). Ook deze studie heeft geen potentiële trend in de meandering van de straalstroom onderzocht.

Één van de uitdagingen is het beschrijven van de eigenschappen van de straalstroom. Zonale gemiddelden worden vaak gebruikt voor trendanalyse, maar omdat de straalstroom golft volgt deze geen specifieke breedtegraad. Een veelgebruikte methode voor het beschrijven van een meanderende stroom is door de bochtigheid (*Sinuosity*) te berekenen, zie Figuur 2 (Fuller et al., 2013). De *Sinuosity-Index* (SI) kan ook worden gebruikt voor het analyseren van de meandering van de straalstroom door een isohypse van de 500 hPa geopotential hoogte te gebruiken om de baan van de straalstroom te benaderen (Cattiaux et al., 2016). Hiervoor moet wel een arbitraire keuze worden gemaakt voor welke breedtegraden worden gebruikt voor het bepalen van de waarde van de isohypse. Hoewel de studie een uitgangspunt geeft omtrent de relevante breedtegraden is niet onderzocht of dit daadwerkelijk de beste benadering van het pad van de straalstroom is. Bovendien was die studie ook meer gefocust op de stroming in de bovenste lagen van de atmosfeer in het algemeen in plaats van de straalstroom in het specifiek.

Een andere uitdaging was de beperkte hoeveelheid aan historische weerdata. Tot voorkort was uurlijkse heranalyse data van de ERA5 dataset alleen beschikbaar vanaf 1979. Sinds maart 2023 is de dataset is uitgebreid als onderdeel van het Copernicus Programma en gaat nu terug tot 1940 (Copernicus, 2023).

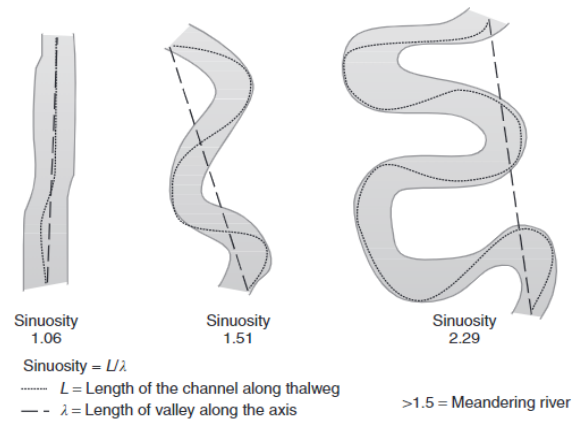


Figure 2: Een illustratie van de ‘Sinuosity’ voor verschillende stromen (Fuller et al., 2013).

1.3. Onderzoeksvragen

Het doel van deze studie is om inzicht te krijgen in veranderingen van de eigenschappen van de straalstroom in het verleden. De eigenschappen zijn: de kracht, positie (breedtegraad) en de meandering. In plaats van onderzoek te doen naar de correlatie tussen Arctische amplificatie en de frequentie van extreem weer focust deze studie zich alleen op de trends in de drie eigenschappen van de straalstroom zoals hierboven benoemd. Nu de heranalyse data van ERA5 terug gaat tot 1940 kunnen trends worden bepaald over een periode van ruim 80 jaar. Deze studie kijkt naar de periode van 1940 tot en met 2020. Uiteindelijk is het herkennen van trends in de eigenschappen van de straalstroom over de afgelopen decennia belangrijk om te kunnen zeggen wat voor veranderingen ons in de toekomst mogelijk nog staan te wachten. Bovendien heeft deze studie als doel het beter definiëren en beschrijven van de eigenschappen van de straalstroom om analyses in toekomstige studies naar de straalstroom makkelijker te maken.

Het eerste onderdeel van deze studie is het definiëren en beschrijven van de eigenschappen van de straalstroom. Dit is de basis voor de volgende stap, namelijk de trendanalyse. Uiteindelijk zijn er drie onderzoeksvragen om te beantwoorden:

1. Hoe kan de vergelijking voor de *Sinuosity-index* (SI) worden aangepast om het werkelijke pad van de straalstroom zo goed mogelijk te benaderen?

2. Hoe is de kracht, positie en de meandering van de straalstroom op jaarbasis veranderd tussen 1940 en 2020?
3. Hoe verschillen de trends in de eigenschappen van de straalstroom (kracht, positie en meandering) van 1940 tot 2020 per seizoen?

De hypothese is dat om de vergelijking voor de SI te optimaliseren, de range van de breedtegraden waarop de waarde van de 500 hPa geopotentiale waarde is gebaseerd noordelijker moet worden. De initiële formule voor de SI gebruikt een range van 30° tot 70°N, dus gecentreerd rond 50°N (Cattiaux et al., 2016). Echter, gedurende de periode van 1979 tot 2014 lag de kern van de polaire straalstroom gemiddeld waarschijnlijk dichterbij zo'n 60°N (Molnos et al., 2017). In het geval van grote verschillen in de positie van de straalstroom per seizoen kan het nuttig zijn een seizoensgebonden interpolatie te gebruiken voor de range.

Voor de trendanalyse is de hypothese dat de straalstroom in kracht afneemt. Dat is voornamelijk gebaseerd op het kleiner wordende temperatuurverschil tussen de Noordpool en de

tropen vanwege Arctische amplificatie (IPCC, 2023) en zoals aangegeven in sommige voorgaande studies (Molnos et al., 2017). Omdat voor het benaderen van de locatie van de straalstroom de SI wordt gebruikt is sprake van een gefixeerde referentie voor de breedtegraad. Daarom wordt geen significante trend in de positie van de straalstroom verwacht. De meandering zal waarschijnlijk toenemen door de impact van Arctische amplificatie. Bovendien correleert een zwakkere stroming hogerop in de atmosfeer vaak met een meer meanderend patroon (Meleshko et al., 2016).

De afname van de kracht van de straalstroom zal waarschijnlijk het meest uitgesproken zijn in de zomer en het minst uitgesproken in de winter, zoals meerdere studies hebben geconcludeerd (Molnos et al., 2017; Simmons, 2022). Omdat een trend in de positie van de straalstroom op jaarbasis niet wordt verwacht, zullen verschillen tussen de seizoenen ook moeilijk te bepalen zijn. De meandering van de straalstroom zal waarschijnlijk het meest toenemen in de zomer – wanneer de afname in de kracht van de straalstroom het meest significant is – en het minst gedurende de winter.

2. Materialen en Methoden

2.1. Data collectie

Voor deze studie zijn historische weergegevens op basis van een heranalyse nodig om de kracht, positie en meandering van de straalstroom in het verleden te kunnen bepalen. Naar heranalyse data wordt ook wel eens verwezen als ‘*maps without gaps*’ – in het Nederlands ‘kaarten zonder gaten’ – vanwege de complete en consistente datasets (ECMWF, 2020). Één van de meest uitgebreide datasets beschikbaar is de ERA5 heranalyse, gebaseerd op het bekende weermodel EMCWF. Tot voorkort was de dataset van ERA5 beschikbaar vanaf 1979, maar sinds maart 2023 zijn meer jaren beschikbaar gemaakt. Momenteel gaat de heranalyse van ERA5 terug tot 1940 (Copernicus, 2023). Daarmee kan een trendanalyse over ruim 80 jaar worden uitgevoerd.

De ERA5 heranalyse dataset bevat uurlijkse weergegevens voor vele meteorologische variabelen wereldwijd (Hersbach et al., 2020). De benodigde variabelen voor deze studie zijn de geopotentiale hoogte op een drukniveau van 500 hPa en de U- en V-componenten van de wind op de drukniveaus van 250 en 500 hPa. Alle ERA5 heranalyse data kan gratis worden opgehaald van de Copernicus Climate Data Store (Copernicus, 2023).

Voor de componenten van de wind op 500 hPa is alleen maandelijks gemiddelde data nodig. Deze kan worden opgehaald van de “*ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present*” dataset. De geopotentiale hoogte en componenten van de wind op 250 hPa zijn nodig met een 6-uurlijks interval. Deze data is te verkrijgen van de “*ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present*” dataset. Voor de componenten van de wind op 250 hPa waren bovendien nog twee extra datasets nodig voor analyses omtrent de zonale U-wind op 250 hPa en de onzekerheid in de heranalyse. Voor beide analyses is de geselecteerde variabele de U-component van de wind op een drukniveau van 250 hPa. In het geval van de analyse van de zonale wind is het producttype “*Monthly averaged reanalysis*” geselecteerd. Het producttype “*Monthly averaged*

ensemble members by hour of the day” maakt het mogelijk om de spreiding tussen de leden van de heranalyse te berekenen. Alle data is enkel voor het Noordelijk Halfrond opgehaald om de bestandsgrootte te reduceren.

De data voor deze studie is opgeslagen in een gedeelde map op de *Anunna* server van de Wageningen University & Research (WUR), dezelfde server waarop de Python scripts voor de analyses worden uitgevoerd en opgeslagen.

2.2. Methodologie

Deze studie bestaat uit drie hoofdcomponenten die allemaal een andere aanpak vragen. In sectie 2.2.1. *Introductie* worden de basis van de studie en de drie hoofdcomponenten geïntroduceerd.

2.2.1. Introductie

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden is het belangrijk om eerst de basis van de straalstroom analyse te begrijpen. Het begint allemaal met het bepalen van de positie van de straalstroom. Hoewel de straalstroom wordt gekenmerkt door een band met hoge windsnelheden op een hoogte van ongeveer 10 kilometer (NWS, 2023b), is het lastig om windsnelheden te gebruiken om het pad van de straalstroom te benaderen. Er is namelijk niet één constante windsnelheid of stroomlijn die rond de hele wereld kan worden gevolgd. Dit is wel nodig om de meandering te bepalen, die is gedefinieerd met behulp van de Sinuosity-index (SI), de lengte van een bochtige lijn vergeleken met een volledig rechte lijn tussen twee datapunten (zie Figuur 2 in sectie 1.2. *Probleemstelling*). Hoe hoger de *Sinuosity*, hoe meer meanderend een stroom is (Fuller et al., 2013).

Een voorgestelde oplossing is om een isohypse van de geopotentiale hoogte op 500 hPa te gebruiken om de positie van de straalstroom te benaderen. Een eerdere studie gebruikte deze methode ook om de SI van de stroming hoog in de atmosfeer te bepalen (Cattiaux et al., 2016). Vergelijking 1 is de formule die werd gebruikt om de SI te berekenen op basis van een 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse.

$$SI = \frac{\text{arclength}(\overline{Z500}_{\text{lat. extent}})}{2\pi a \cos(\overline{\text{latitude}})} \quad \text{Vergelijking 1)}$$

Hierbij staat de *arclength* voor de lengte van de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse en *a* staat voor de omtrek van de aarde bij de Evenaar, wat 40,075 kilometer is (Geographic, 2023). De twee resterende termen in de vergelijking zijn van specifiek belang voor deze studie, namelijk:

$$\overline{Z500}_{\text{lat. extent}} \text{ en } \overline{\cos(\text{latitude})}$$

De eerste term beschrijft de waarde van de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse, welke is gedefinieerd als het ruimtelijk gemiddelde van de 500 hPa geopotentiale hoogte tussen twee gespecificeerde breedtegraden. De studie waarin de SI werd geïntroduceerd om stromingspatronen hogerop in de atmosfeer te beschrijven gebruikte een bereik van 30° tot 70°N (Cattiaux et al., 2016), maar in sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden* worden meer bereiken geïntroduceerd. De tweede term wordt gebruikt om de omtrek van de Aarde op een bepaalde breedtegraad te berekenen. Hoewel de studie waar de SI is van overgenomen een vaste breedtegraad van 50°N gebruikte om de omtrek van de Aarde te berekenen (Cattiaux et al., 2016), zal deze studie de gemiddelde breedtegraad van alle coördinaten langs de isohypse als input nemen, zie ook sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom*.

Uiteindelijk is het doel om een isohypse te hebben die de positie van de straalstroom het beste kan benaderen. Dit kan worden getest door te kijken naar de overlap tussen de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse – die ook de basis voor de SI vormt – en de windsnelheid op 250 hPa. In Figuur 3 is een voorbeeld te zien met de dikke rode lijn als de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse met een waarde van 580 dam, overgetekend uit de bovenste plot. In de onderste plot is de overlap van deze isohypse met de windsnelheid op 250 hPa (gekleurde contouren) te zien.

In sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden* wordt de methodologie achter de verschillende bereiken voor de SI uitgelegd. Hieronder valt ook het testen van de overlap tussen de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse en de kern van de straalstroom op 250 hPa, zoals in Figuur 3. Als de formule voor de SI

eenmaal is aangepast om de positie van de straalstroom zo goed mogelijk te benaderen moeten de drie eigenschappen van de straalstroom – de kracht, positie en meandering – worden gedefinieerd. De methodologie hiervoor is uitgewerkt in sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom*. In sectie 2.2.4. *Trendanalyse* worden de methoden om trends in de eigenschappen van de straalstroom tussen 1940 en 2020 uitgelegd. En tot slot staat in sectie 2.2.5. *Analyses voor discussiepunten* beschreven hoe sommige extra analyses voor de resultaten en discussie zijn uitgevoerd.

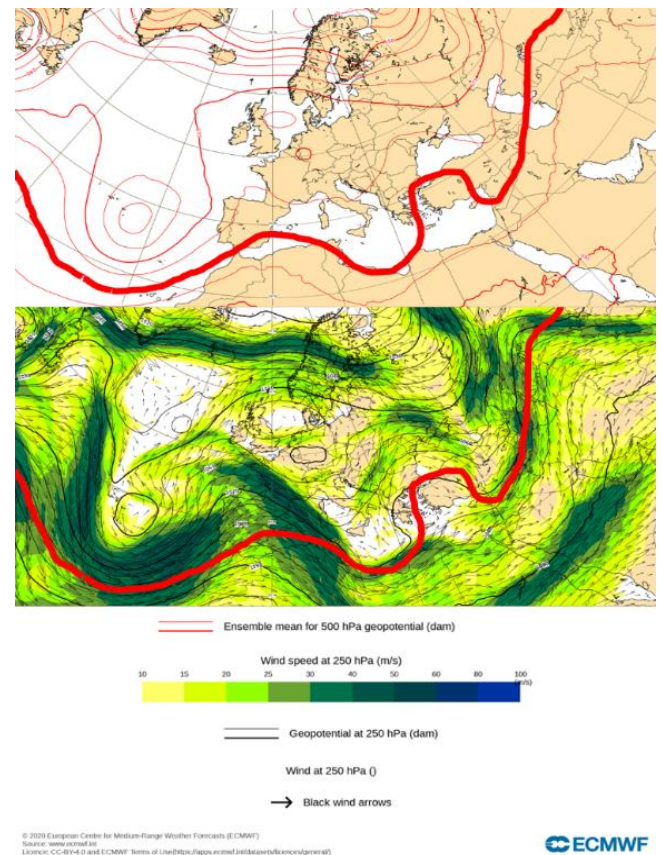


Figure 3: Een voorbeeld van de overlap tussen een 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse en de windsnelheid op 250 hPa voor 7 juni 2023 om 00 UTC volgens het weermodel ECMWF (Molteni et al., 1996).

2.2.2. Bereik breedtegraden

Om uit te zoeken welk bereik van breedtegraden voor de SI (zie Vergelijking 1) de beste resultaten geeft, wordt de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse berekend voor verschillende bereiken. De kern van de straalstroom wordt gekenmerkt door de hoogste windsnelheden op een hoogte van 250

hPa. Kortom, het bereik van breedtegraden waarmee de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de isohypse het hoogste is, zal worden gebruikt voor de volgende analyse.

Het eerste bereik om te testen zijn de breedtegraden van 30° tot 70°N, zoals gebruikt in de originele studie naar de SI (Cattiaux et al., 2016). De overige bereiken zijn gebaseerd op de zonale U-wind (west naar oost) op 500 hPa. Het bereik van de breedtegraden voor de SI is waar de 500 hPa zonale U-wind minimaal de helft is van het zonale maximum (Batelaan, 2020). Bijvoorbeeld, wanneer de maximale zonale U-wind op 500 hPa 10 m/s is, wordt het bereik weergegeven door de breedtegraden waarop de zonale U-wind op 500 hPa minimaal 5 m/s is. Om een extra bereik te creëren is deze analyse niet alleen toegepast op basis van de wereldwijd zonale gemiddelden (alle lengtegraden), maar ook de Atlantische sector die tussen de lengtegraden 50°W to 40°O ligt (Cattiaux et al., 2016).

Omdat de resultaten van deze 500 hPa U-wind analyse kunnen veranderen per seizoen kan het nuttig zijn om een seizoensgebonden interpolatie van het bereik van de breedtegraden te creëren. Dit betekent dat het bereik veranderd gedurende het jaar. De interpolatie zou daarvoor een bereik moeten geven voor iedere dag van het jaar, van DOY (dag van het jaar) 1 tot 365. Wanneer *spline-interpolatie* wordt gebruikt om een uniek bereik voor iedere dag te genereren zijn ten minste zes datapunten voor verschillende seizoenen nodig, het liefst nog wat meer (zie de discussie in sectie 5.1. *Interpolatie van het bereik*). Deze zes zijn:

- Één datapunt vóór de start van het jaar, dus de voorgaande herfst met een negatieve waarde voor de DOY;
- Die vier seizoengemiddelde waarden van het jaar. De data zijn de 15^e van januari, april, juli en oktober, dus in het midden van de seizoenen;
- Één datapunt na het einde van het jaar, dus de volgende winter met een waarde van meer dan 365 voor de DOY.

De x -waarden voor de interpolatie zijn de waarden voor de dag van het jaar (DOY) en de y -waarden

is de minimum of maximum breedtegraad van het bereik. De interpolatie wordt gedaan in Python met de *Scipy-Interpolate* module (SciPy 1.0 Contributors et al., 2020) en de resultaten zullen worden gebruikt als het bereik van de breedtegraden voor de SI-vergelijking.

De berekening voor de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de geopotentiale hoogte isohypse is gebaseerd op enkel een sub-selectie van de volledige dataset om de bestandsgrootte en de benodigde rekentijd te reduceren. Om een gebalanceerde representatie te krijgen van de verschillende seizoenen en klimatologische periode bestaat de sub-selectie uit 108 tijdstappen, gelijk verdeeld over de jaren en seizoenen in de volledige dataset. Gebruikt zijn de eerste tijdstappen aan het begin van iedere maand (1 januari om 00 UTC, 1 februari om 00 UTC enzovoorts) voor het eerste jaar van ieder decade (1940, 1950 en zo verder tot en met 2020). Het aantal van 108 tijdstappen is minder dan 0.1% van het totale aantal datapunten in de hele tijdserie. Echter, het doel is niet om een gemiddelde van de eigenschappen van de straalstroom te berekenen, maar wat de verschillen in de overlap tussen de isohypse en de windsnelheid op 250 hPa zijn tussen de verschillende bereiken voor de breedtegraden.

Het bereik van de breedtegraden dat gemiddeld de hoogste windsnelheid op 250 hPa geeft zal worden gezien als de beste benadering van de positie van de straalstroom en daarom ook worden gebruikt voor verdere analyses. Voor deze stap in het onderzoek zijn voor alle tijdstappen van de sub-selectie kaarten geplot met de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse bovenop de 250 hPa windsnelheid met de *Cartopy*-module in Python (Ari & Ustazhanov, 2014). Dit om een visuele check en interpretatie van de resultaten mogelijk te maken.

Een voorbeeld script om de straalstroom te analyseren met de SI is verstrekt door Thomas Batelaan-Bruggeman, die op eenzelfde manier de straalstroom heeft geanalyseerd voor een Aquaplaneet (Batelaan, 2020). Sommige delen van dit script worden gebruikt als uitgangspunt,

voornamelijk omtrent het bepalen van het bereik van de breedtegraden op basis van de U-wind op 500 hPa.

2.2.3. Eigenschappen straalstroom

Wanneer het optimale bereik van breedtegraden voor de SI is bepaald kunnen de eigenschappen van de straalstroom worden geanalyseerd. Een visuele check van de overlap tussen de isohypse en de windsnelheid op 250 hPa door een kaart te plotten is al gedaan voor een sub-selectie van de dataset in sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden*, dus dit is niet meer nodig voor de trendanalyse. Echter, het (virtueel) intekenen van een contourlijn (of isohypse) is nog altijd nodig. Zowel om de coördinaten langs de isohypse te krijgen voor de gemiddelde windsnelheid en breedtegraad als voor het bepalen van de totale lengte van de isohypse, van belang om te meandering te bepalen. De *matplotlib*-module in Python heeft een ingebouwde functie om een virtuele contourlijn te creëren direct vanuit een dataset, zonder dat het nodig is om een kaart te plotten met *Basemap* of *Cartopy* (Ari & Ustazhanov, 2014), wat een hoop rekentijd scheelt. Van deze virtuele contourlijn worden de coördinaten opgehaald om gebruikt te worden voor vervolgstappen. Een kleine opmerking is dat het gebruik van een andere methode ten opzichte van de beschreven methode in sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden* kan resulteren in enig verschil voor de eigenschappen van de straalstroom. Zie ook de discussie in sectie 5.2. *Definitie en beschrijving van de straalstroom eigenschappen*. Het script voor de trendanalyse is gemaakt in Jupyter Notebook op de *Anunna* server van de WUR.

Kracht van de straalstroom

De kracht van de straalstroom is gedefinieerd als de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa – berekent van de U- en V-componenten van de wind – van alle coördinaten langs de isohypse. Omdat de coördinaten van de isohypse waarschijnlijk niet precies op de gridpunten van de heranalyse dataset liggen wordt de *slicing* gedaan op basis van de methode ‘nearest’ (dichtstbijzijnde). Dit betekent dat als een coördinaat van de isohypse zich niet precies boven een gridpunt bevindt, het

dichtstbijzijnde gridpunt zal worden gebruikt als referentie.

Positie van de straalstroom

De gemiddelde positie van de straalstroom – qua breedtegraad – wordt bepaald door het gemiddelde te nemen van alle breedtegraden van de coördinaten langs de isohypse. Echter, de keuze voor een seizoensgebonden variatie in het bereik van de breedtegraden kan een probleem vormen voor met name de trendanalyse. In de zomer is het bereik van de breedtegraden voor de SI noordelijker dan in de winter (zie ook sectie 3.1. *Bereiken breedtegraden om te testen*), wat ook de gemiddelde noord-zuid positie van de straalstroom zal beïnvloeden.

Wanneer een geïnterpoleerd bereik voor de breedtegraden wordt gebruikt met unieke waarden voor iedere dag van het jaar kunnen twee opeenvolgende dagen niet meer direct met elkaar worden vergeleken. In deze studie zijn alleen exact dezelfde perioden met elkaar vergeleken, dan is er geen probleem. Echter, indien in toekomstig onderzoek wel twee verschillende maanden, seizoenen of andere perioden met elkaar vergeleken moeten worden, dan kan het berekenen van een genormaliseerde breedtegraad een oplossing zijn. Het verschil tussen het bereik van breedtegraden gebruikt voor de SI (een bereik van 30° tot 70°N kan worden gezien als een breedtegraad van gemiddeld 50°N) en de jaarlijks gemiddelde waarde kan dan worden afgetrokken van de originele breedtegraad van de straalstroom, om zo een genormaliseerde breedtegraad te creëren.

Meandering van de straalstroom

De meandering van de straalstroom kan worden gedefinieerd met behulp van de SI. In Vergelijking 1 (sectie 2.2.1. *Introductie*) is de standaard functie voor de SI gegeven. De essentie van de SI is de lengte van een meanderende stroom of pad te delen door de lengte van het kortste, directe pad tussen dezelfde twee punten. In deze studie staat de straalstroom voor het meanderende pad en de meest directe weg is de omtrek van de Aarde. De lengte van de straalstroom wordt berekend door alle afstanden tussen twee opeenvolgende

coördinaten langs de geopotential isohypse op te tellen. Dit wordt gedaan met behulp van de *Haversine*-formule, die de grootcirkelafstand tussen twee coördinaten op een bol bepaalt (Robusto, 1957). De omtrek van de Aarde varieert afhankelijk van de breedtegraad. Bij de Evenaar is de omtrek van de Aarde 40.075 kilometer. Voor elk andere breedtegraad is de omtrek 40.075 kilometer vermenigvuldigd met de cosinus van de breedtegraad (in graden). Voor deze studie is de breedtegraad die wordt gebruikt de gemiddelde breedtegraad van de straalstroom (zie *Positie van de straalstroom* in sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom*).

2.2.4. Trendanalyse

Voor alle tijdstappen tussen 1 januari 1940 om 00 UTC en 31 december 2020 om 18 UTC worden met een 6-uurlijks interval de eigenschappen van de straalstroom berekend zoals uitgelegd in sectie 2.2.3. *Eigenschappen Straalstroom*. De 6-uurlijkse data wordt herordend per seizoen en per jaar met de *Pandas*-module in Python (McKinney, 2011). Met behulp van de *Statsmodels*-module kan een OLS (*Ordinary Least Squares Regression*) worden uitgevoerd (Seabold & Perktold, 2010). Met de resultaten van de OLS kunnen de coëfficiënt van de afhankelijke variabele en de bijbehorende P-waarde worden verkregen. Indien de P-waarde lager is dan 0.05 kan worden gezegd dat de coëfficiënt van de afhankelijke variabele significant verschillend is van de nulhypothese en daarmee sprake is van een significante trend. Met de module *Matplotlib* kan een spreidingsplot worden gemaakt, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trendlijn (Ari & Ustazhanov, 2014).

2.2.5. Analyses voor discussiepunten

Naar aanleiding van de resultaten uit de trendanalyse voor de eigenschappen van de straalstroom zijn drie extra analyses uitgevoerd, namelijk:

- Om te zien of er een correlatie is tussen de anomalieën in de kracht en de meandering van de straalstroom;
- Te checken of de trend in de gemiddelde noord-zuid positie van de straalstroom

hetzelfde is wanneer de SI of zonale gemiddelden worden gebruikt;

- Te zeggen of de onzekerheid in de heranalyse data de resultaten van de trendanalyse heeft kunnen beïnvloeden.

Plot van anomalieën

De anomalieën van zowel de kracht van de straalstroom (windsnelheid) en de meandering worden tegen elkaar uitgezet in een spreidingsplot met de *Matplotlib*-module (Ari & Ustazhanov, 2014). Dit om te zien of er een relatie tussen beide variabelen is. Er is gekozen voor de residuen – de waarde min de trendlijn – omdat het doel is om een correlatie op jaarbasis te herkennen in plaats van een trend op de lange termijn. De determinatiecoëfficiënt (R^2) wordt berekend met de *sum of squared errors*. Deze coëfficiënt kan aangeven of er sprake is van een significante correlatie tussen de twee variabelen.

Zonaal gemiddelde windsnelheden

Omdat deze studie een specifiek bereik van breedtegraden gebruikt om de locatie van de straalstroom te benaderen kan de trendanalyse voor de gemiddelde noord-zuid positie een enigszins vertekend beeld geven (zie sectie 2.2.1. *Introductie*). De trend die is gevonden met de SI-methode kan worden vergeleken met de trend in de breedtegraad waar de hoogste zonale U-windsnelheid op 250 hPa voorkomt. Daarvoor is een aparte dataset met maandelijks gemiddelde waarden gedownload (zie sectie 2.1. *Data collectie*) en geanalyseerd. Met behulp van de *Pandas* module in Python wordt de maandelijkse data hergeordend tot een jaarlijks zonaal gemiddelde (McKinney, 2011). Met *NumPy* kan de breedtegraad waar de hoogste zonale 250 hPa U-windsnelheid voorkomt worden bepaald. Tot slot wordt een spreidingsplot met trendlijn en 95% betrouwbaarheidsinterval gemaakt op dezelfde manier zoals uitgelegd in sectie 2.2.4. *Trendanalyse*.

Onzekerheid in de heranalyse data

Hoewel de heranalyse data gebaseerd zijn op eerdere observaties, is er nog steeds enige onzekerheid. Over het algemeen geldt dat hoe minder observaties er zijn, hoe onzekerder de heranalyse data worden (Hersbach et al., 2020).

Om te zien of de onzekerheid in de heranalyse data een significante invloed kan hebben op de bepaalde trend, worden grafieken gemaakt van de spreiding in het 10-leden heranalyse-ensemble voor verschillende perioden. Deze perioden kunnen gebaseerd zijn op de resultaten van de trendanalyse,

bijvoorbeeld als een reeks jaren zeer afwijkende waarden vertoont. In Python kan de gemiddelde standaardafwijking tussen de ensembleleden worden bepaald en op een kaart worden geplot met behulp van de Cartopy-module (Ari & Ustazhanov, 2014).

3. Beschrijving van de straalstroom eigenschappen

3.1. Breedtegraden om te testen

Een methode om het bereik van de breedtegraden te bepalen waarmee de gemiddelde 500 hPa geopotentiale hoogte wordt berekend is door te kijken naar de gemiddelde U-windsnelheid op 500 hPa, zie sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden*. De breedtegraden waar de zonaal gemiddelde windsnelheid in de U-richting minstens de helft van het zonale maximum bedraagt kan worden gebruikt als uitgangspunt voor het bereik van de breedtegraden (Batelaan, 2020). In Figuur 4 wordt de absolute zonaal gemiddelde U-windsnelheid op 500 hPa over de periode 1940 tot 2020 per seizoen getoond. In de winter liggen de gemiddelde zonale U-windsnelheden tussen 20 en 55 graden noorderbreedte ten minste op de helft van het zonale maximum, in de zomer is dit tussen 34 en 59 graden noorderbreedte, zie Table 1. Op jaarbasis is de minimale breedtegraad van het bereik 24°N en de maximale breedtegraad 60°N. Hierbij is het gemiddelde niet gebaseerd is op het gemiddelde van de seizoensgebonden bereiken, maar op de jaarlijks gemiddelde zonale U-wind op 500 hPa zoals weergegeven in Figuur 4. Voor verschillende klimatologische perioden (1941 – 1970 en 1991 – 2020) is er geen significant verschil in zowel het maximum van de zonale U-windsnelheid als het daarvan afgeleide bereik voor de breedtegraden (zie Figuur 5).

Table 1: Bereik van de breedtegraden waarbij de zonaal gemiddelde U-windsnelheid minstens de helft van het maximum is, per seizoen.

Seizoen	Minimum breedtegraad	Maximum breedtegraad
Winter	20°N	55°N
Lente	21°N	58°N
Zomer	34°N	59°N
Herfst	30°N	62°N
Jaarlijks	24°N	60°N

Interessant genoeg verschillen deze resultaten aanzienlijk van de breedtegraden die eerdere onderzoeken hebben gebruikt. Deze liggen voornamelijk rond 50°N (Cattiaux et al., 2016) of

zelfs 60°N (Molnos et al., 2017). De dominantie van de sterke subtropische straalstroom boven Azië en de Stille Oceaan kan verantwoordelijk zijn voor het nogal zuidelijke bereik van de breedtegraden (Simmons, 2022). De andere twee onderzoeken richten zich mogelijk meer op alleen de polaire straalstroom in plaats van een combinatie.

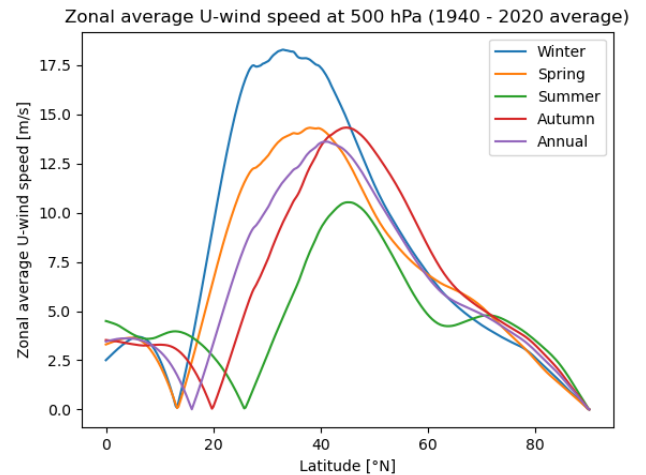


Figure 4: Zonaal gemiddelde U-windsnelheid op 500 hPa voor de verschillende seizoenen.

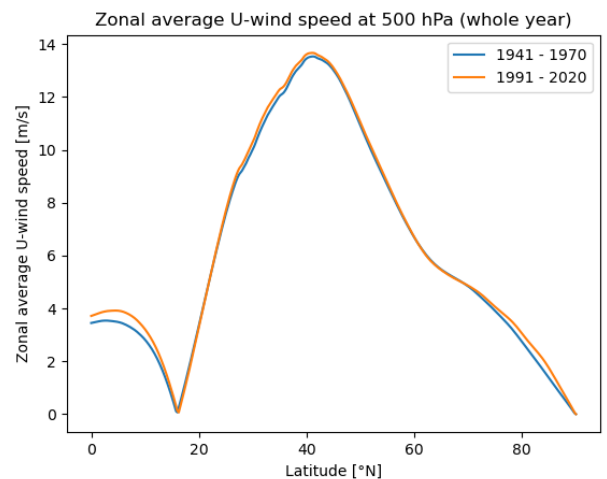


Figure 5: Jaarlijks gemiddelde zonale U-windsnelheid op 500 hPa voor verschillende klimatologische perioden.

De meeste eerdere studies hebben een constant bereik voor het hele jaar gebruikt (Cattiaux et al., 2016). De resultaten in Tabel 1 laten echter aanzienlijke verschillen per seizoen zien. Het gebruik van de jaarlijkse gemiddelden voor alle seizoenen brengt het risico met zich mee dat de isohypse van de 500 hPa geopotentiale hoogte in de zomer te ver naar het noorden en in de winter te

ver naar het zuiden ligt. Door *spline-interpolatie* te gebruiken, kan een bereik van breedtegraden worden gespecificeerd voor elke dag van het jaar, waarbij rekening wordt gehouden met de seizoenscyclus (zie sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden*). De y-waarden (breedtegraden) die worden gebruikt voor de interpolatie zijn de seizoensgemiddelde waarden zoals vermeld in Tabel 1. De resulterende interpolatie voor alle dagen van een jaar wordt weergegeven in Figuur 6.

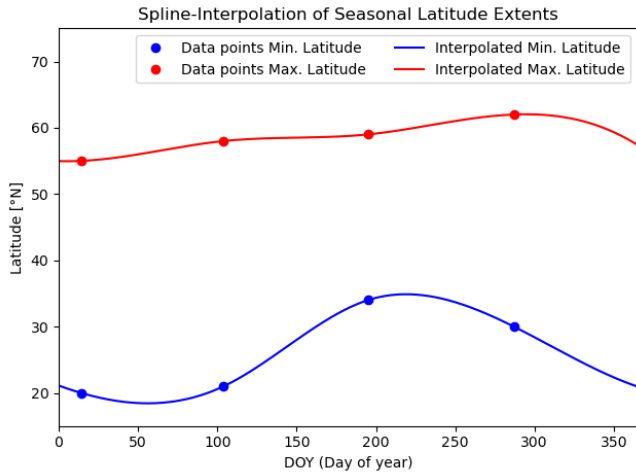


Figure 6: Visualisatie van de spline-interpolatie om een variabel bereik van de breedtegraden te verkrijgen op basis van de dag van het jaar.

Zoals gezegd is het gemiddelde bereik van de breedtegraden behoorlijk ver naar het zuiden, waarschijnlijk vanwege de relatief sterke en zuidelijke subtropische straalstroom boven de Stille Oceaan. Een scenario waarin dit deel van de straalstroom wordt genegeerd, is wanneer alleen wordt gekeken naar de 500 hPa U-windsnelheid voor het Atlantische gebied. Boven de Atlantische Oceaan is meestal een wat meer uitgesproken polaire straalstroom aanwezig. De studie waarvan de basis-SI wordt aangepast, heeft de wereld al verdeeld in vier verschillende sectoren (tussen verschillende lengtegraden), waarvan één het Atlantische gebied is met lengtegraden tussen 50°W en 40°O (Cattiaux et al., 2016). Voor dit gebied wordt dezelfde analyse uitgevoerd op basis van de wereldwijde gemiddelde 500 hPa U-windcomponent, maar alleen voor de breedtegraden binnen het Atlantische gebied, zie sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden*. De resultaten staan weergegeven in

Tabel 2. Opnieuw zijn de verschillen tussen de seizoenen vrij groot. Om hiermee rekening te houden, zal een seizoensgebonden variabel bereik van breedtegraden worden gecreëerd met behulp van spline-interpolatie, zoals ook gedaan voor de resultaten van de 500 hPa U-windmethode voor het gehele noordelijk halfrond.

Tot slot zal ook het bereik van 30° tot 70°N, zoals in de oorspronkelijke studie, worden geanalyseerd ter vergelijking (Cattiaux et al., 2016).

Table 2: Bereik van de breedtegraden waarbij de zonaal gemiddelde U-windsnelheid minstens de helft van het maximum is, per seizoen voor de Atlantische sector.

Seizoen	Minimum breedtegraad	Maximum breedtegraad
Winter	16°N	68°N
Lente	18°N	76°N
Zomer	32°N	61°N
Herfst	27°N	78°N
Jaarlijks	22°N	78°N

3.2. Windsnelheden voor verschillende scenario's

Er zijn in totaal vijf scenario's waarvoor de gemiddelde windsnelheid van de straalstroom wordt geanalyseerd. Deze zijn:

1. Global Yearly: 24° tot 60°N, gebaseerd op de 500 hPa U-windmethode voor alle lengtegraden;
2. Atlantic Yearly: 22° tot 78°N, gebaseerd op de 500 hPa U-windmethode alleen voor het Atlantische gebied;
3. Cattiaux et al.: 30° tot 70°N, gebaseerd op het bereik dat in de vorige studie met de SI werd gebruikt;
4. Global Seasonal: Een variabel bereik met geïnterpoleerde waarden voor alle dagen van het jaar zoals weergegeven in Figuur 6, voor alle lengtegraden;
5. Atlantic Seasonal: Een variabel bereik met geïnterpoleerde waarden voor alle dagen van het jaar zoals weergegeven in Figuur 6, maar alleen voor het Atlantische gebied.

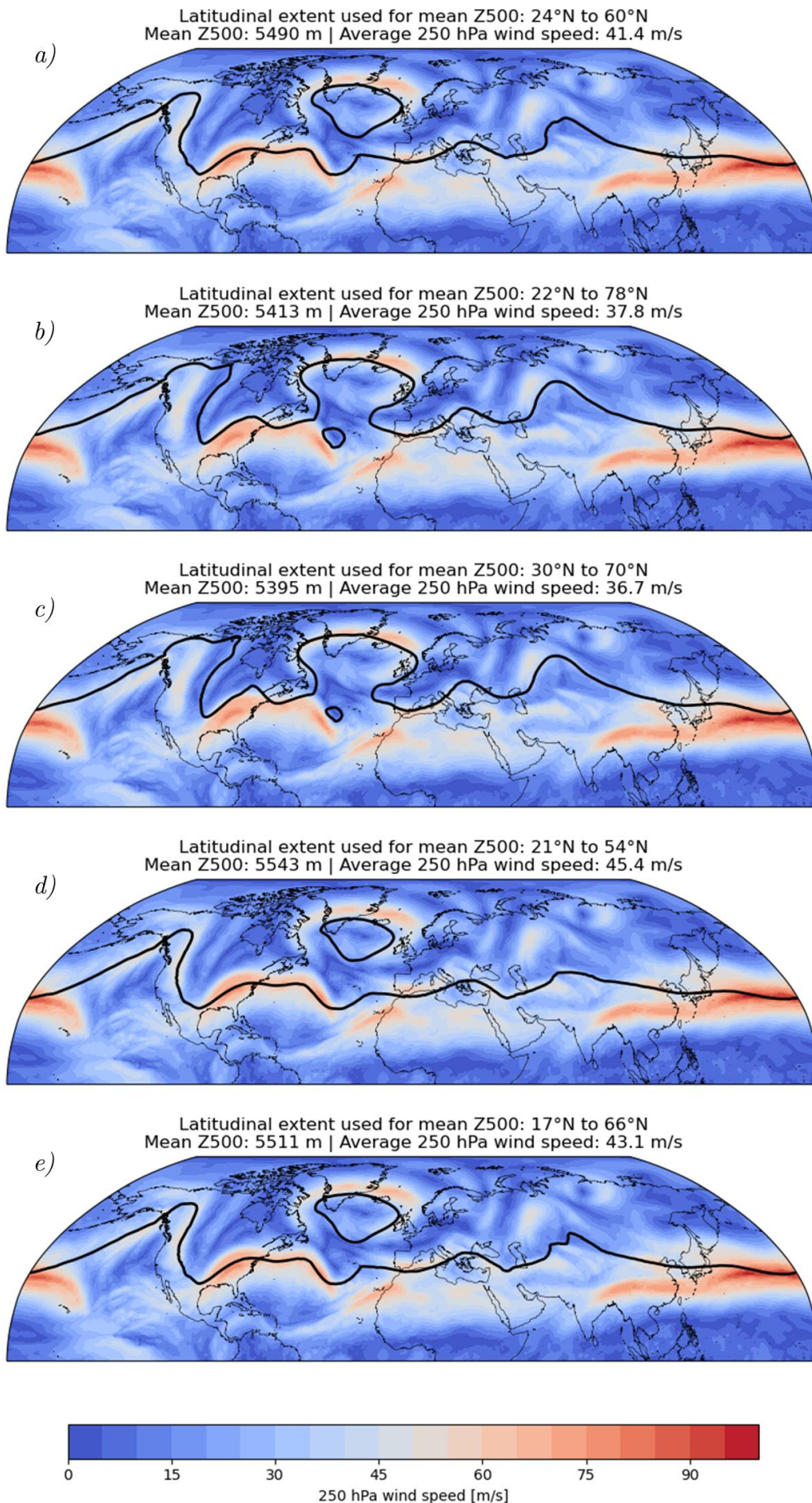


Figure 7: Windsnelheid op 250 hPa en de contourlijn van de gemiddelde Z500 over een gespecificeerd bereik van breedtegraden op 1 januari 1970 om 00 UTC. Voor subplots a, b en c is het bereik van de breedtegraden constant voor alle tijdstappen, respectievelijk 24°N tot 60°N (Atlantic – Yearly), 22°N tot 78°N (Atlantic – Yearly) en 30°N tot 70°N (Cattiaux et al.). Voor subplots d en e is het bereik van de breedtegraden variabel door een interpolatie van de seizoensgebonden waarden, resulterend in een bereik van 21°N tot 54°N (Global – Seasonal) en 17°N tot 66°N (Atlantic – Seasonal).

In Figuur 7 staan vijf plots van de windsnelheid op 250 hPa en de contour van een gespecificeerde isohypse van de 500 hPa geopotentiale hoogte voor 1 januari 1970 om 00 UTC. Zoals beschreven in sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden* wordt de waarde voor de geopotentiale hoogte van deze isohypse dynamisch berekend voor elke afzonderlijk tijdstap door het gemiddelde van de geopotentiale hoogte binnen een bepaald bereik van breedtegraden te nemen. Voor subplots *a* tot *c* is de omvang gebaseerd op een constante waarde, terwijl deze voor subplots *d* en *e* wordt berekend op basis van een interpolatie van de seizoensgebonden waarden.

Zoals te zien is in Figuur 7, leidt het gebruik van verschillende bereiken voor de breedtegraden tot een andere 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse die de werkelijke locatie van de straalstroom zou moeten benaderen. Daarmee is ook de overlap met de straalstroom – aangegeven door de roodachtige – verschillend. In de bijschriften boven de subplots in Figuur 7 worden de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de isohypse getoond, evenals de waarde van de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse die gevolgd is, geldig voor 1 januari 1970 om 00 UTC.

Voor dit specifieke tijdstip heeft het *Global – Seasonal* scenario – zie subplot *d* – de hoogste gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de isohypse met 45.4 m/s en zou daarom de voorkeur genieten voor verdere analyse. Het *Cattiaux et al.* scenario heeft de laagste gemiddelde windsnelheid op 250 hPa voor dit specifieke tijdstip met 36.7 m/s.

Zoals uitgelegd in ie 2.2.2. *Bereik breedtegraden*, wordt deze analyse uitgevoerd voor een totaal van 108 tijdstappen. Gemiddeld genomen heeft het *Global – Seasonal* scenario op jaarbasis de hoogste gemiddelde windsnelheid op 250 hPa (zie Tabel 3). Ook in de winter en lente is de windsnelheid op 250 hPa langs de isohypse gemiddeld genomen het hoogst met dit scenario. Hoewel in de zomer en herfst het gebruik van het vaste bereik van 22° tot 78°N (het *Atlantic – Yearly* scenario) de hoogste gemiddelde windsnelheid op 250 hPa oplevert, presteert het *Global – Seasonal* scenario op

jaarbasis nog steeds beter. Daarom zal het variabele bereik gebaseerd op een seizoensgebonden interpolatie en de wereldwijde zonale U-wind op 500 hPa worden gebruikt voor verdere analyse.

Table 3: Gemiddelde windsnelheid op 250 hPa in m/s langs de isohypse van de 500 hPa geopotentiale hoogte per seizoen en voor vijf verschillende bereiken van de breedtegraden. Onderstreepte getallen geven het scenario met de hoogste gemiddelde windsnelheid aan.

Periode	250 hPa Windsnelheid [m/s]				
	Global - Yearly	Atlantic - Yearly	Cattiaux et al.	Global - Seasonal	Atlantic - Seasonal
Winter	42.9	40.0	38.7	<u>44.3</u>	43.2
Lente	39.9	38.2	37.8	<u>40.1</u>	39.4
Zomer	29.9	<u>31.2</u>	31.1	30.8	31.1
Herfst	35.8	<u>38.5</u>	38.3	37.7	38.3
Jaar	37.1	37.0	36.5	<u>38.2</u>	38.0

In Figuur 8 wordt de overlap van de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse en de windsnelheid op 250 hPa getoond voor 6 januari 2010 om 00 UTC. Dit was een datum die werd uitgelicht in het oorspronkelijke onderzoek waarin de SI-methode werd geïntroduceerd (Cattiaux et al., 2016). Subplot *a* toont dat met een bereik van breedtegraden tussen 30° tot 70°N zoals gebruikt in die studie een zeer golvend patroon zou worden herkend. Echter, in bepaalde delen van het Noordelijk Halfrond – zoals boven delen van de Atlantische Oceaan en Azië – volgt de isohypse de straalstroom minder goed. Met het aangepaste bereik (*Global – Seasonal* scenario) is de isohypse minder meanderend, maar zit wel dicht bij de hoogste windsnelheden, zie subplot *b*. Dit is relevanter, aangezien deze studie zich uitsluitend richt op de kracht, positie en meandering van de belangrijkste takken van de straalstroom.

Iets om rekening mee te houden is dat de isohypse in subplot *a* niet helemaal hetzelfde is als de isohypse die wordt getoond in een plot van de oorspronkelijke studie (zie Figuur 19 in Bijlage B), hoewel de onderliggende methode en het tijdstip hetzelfde zijn. Een mogelijke verklaring hiervoor is het gebruik van een ander gegevensbestand. Deze studie maakt namelijk gebruik van de bijgewerkte

ERA5 heranalyse dataset, terwijl de plot van Cattiaux et al. gebaseerd was op ERA-Interim heranalyse-data met een lagere resolutie en minder waarnemingen.

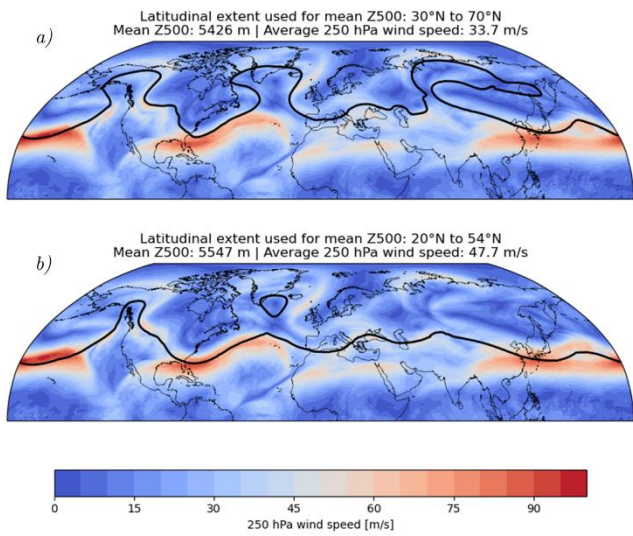


Figure 8: Windsnelheid op 250 hPa en de gemiddelde Z500 op basis van de het oorspronkelijke bereik van 30° tot 70° N (Cattiaux et al., 2016) in subplot a) en de geoptimaliseerde, variabele breedtegraadomvang voor 6 januari 2010 om 00 UTC.

3.3. Beschrijving van de kracht, positie en meandering van de straalstroom

Nu het optimale bereik van de breedtegraden voor de SI is onderzocht, kunnen de eigenschappen van de straalstroom worden bepaald. In sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom* worden de methoden beschreven. In Figuur 9 staan twee plots met de windsnelheid op 250 hPa en de 500 hPa geopotentiale hoogte isohypse, voor 1 januari (subplot a) en 1 augustus 2020 (subplot b). Beide tijdstippen maken deel uit van de kleine subset die is gebruikt voor de verificatie van de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de isohypsen van de verschillende scenario's.

Op 1 januari ligt de isohypse verder naar het zuiden en zijn de windsnelheden op 250 hPa langs de isohypse over het algemeen hoger dan op 1 augustus. Beide plots laten ongeveer dezelfde mate van meandering zien; de lengte van de isohypse gedeeld door de omtrek van de aarde op de gemiddelde breedtegraad van de straalstroom.

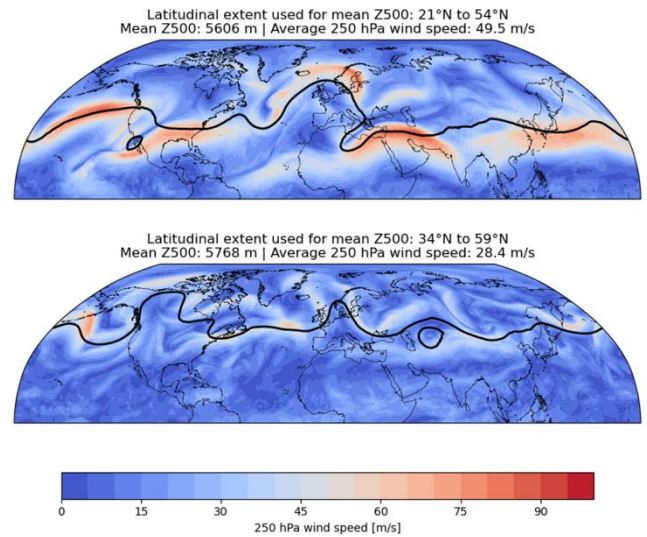


Figure 9: Windsnelheid op 250 hPa en isohypse-plots voor 1 januari (boven) en 1 augustus 2020 (onder).

In Tabel 4 worden de berekende eigenschappen van de straalstroom voor de twee data (1 januari en 1 augustus 2020) getoond. Zoals beschreven in sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom* is een gestandaardiseerde breedtegraad toegevoegd om een betere vergelijking mogelijk te maken voor de positie van de straalstroom. Omdat het bereik van breedtegraden dat wordt gebruikt om de isohypse te bepalen in de winter verder naar het zuiden ligt, is de gestandaardiseerde breedtegraad hoger dan de oorspronkelijke breedtegraad. Voor de zomer geldt het tegenovergestelde. Om de meandering te berekenen, is de omtrek van de Aarde op een bepaalde breedtegraad nodig. In tegenstelling tot de oorspronkelijke studie waarin de SI werd geïntroduceerd, gebeurt dit dynamisch door het de gemiddelde breedtegraad van de straalstroom te gebruiken, zie ook sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom*.

Table 4: Berekende eigenschappen van de straalstroom (sterkte, breedtegraadpositie en meandering) voor 1 januari en 1 augustus 2020.

Variable	1 Januari 2020	1 Augustus 2020
Windsnelheid	49.5 m/s	28.4 m/s
Breedtegraad	39.6°N	50.2°N
Std. Breedtegraad	44.5°N	46.1°N
Meandering/SI	1.31	1.38

4. Trendanalyse

4.1. Jaarlijks gemiddelde trends

Nu de eigenschappen van de straalstroom zijn gedefinieerd kunnen de kracht, noord-zuid positie en de meandering van de straalstroom worden geanalyseerd voor de periode van 1 januari 1940 om 00 UTC tot 31 december 2020 om 18 UTC. Zoals beschreven in sectie 2.2.4. *Trendanalyse* is de data gehergroepeerd per seizoen en jaar. In Figuur 10 zijn de jaarlijks gemiddelde windsnelheid, positie en meandering van de straalstroom geplote, samen met de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

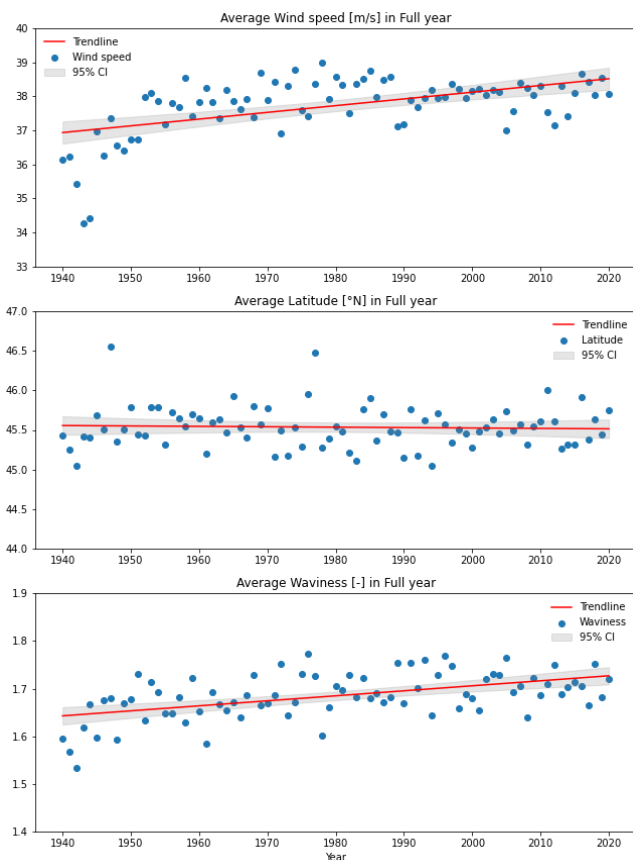


Figure 10: Spreidingsplots voor de jaarlijks gemiddelde windsnelheid, breedtegraad (positie) en meandering van de straalstroom van 1940 tot en met 2020, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

De gemiddelde kracht en meandering van de straalstroom tonen een stijgende trend van respectievelijk $+0.2$ m/s en $+0.011$ per decennium. De gemiddelde noord-zuid positie van de straalstroom toont een licht dalende trend van -0.01°N per decennium. Gebaseerd op de P-waarde voor de coëfficiënt van de trendlijn kunnen de trends in kracht en meandering op jaarbasis als

statistisch significant worden beschouwt ($\alpha = 0.05$), zie Tabel 5 in sectie 4.2. *Trends per seizoen*. De trend voor de gemiddelde (noord-zuid) positie van de straalstroom tussen 1940 en 2020 is niet statistisch significant met een P-waarde van 0.69. Iets om op te merken is dat de jaarlijks gemiddelde kracht van de straalstroom in de eerste 5 jaar van de analyse (1940 t/m 1944) sterk afwijkt van de trendlijn. Dit kan enige impact hebben op de trendlijn voor de kracht van de straalstroom met een meer uitgesproken stijgende trend. In sectie 5.5. *Onzekerheid in de heranalyse data* staat een discussie over of deze sterke afwijking komt door natuurlijke variatie of dat onzekerheid in de heranalyse dataset deze afwijkende waarden mogelijk kan verklaren.

De gemiddelde kracht en meandering van de straalstroom tonen interessant genoeg beide een stijgende trend, iets dat tegengesteld is aan de algemene hypothese van een zwakkere straalstroom die resulteert in meer meandering (Francis & Vavrus, 2012), zie sectie 1.2. *Probleemstelling*. Om te zien of beide eigenschappen op jaarbasis correleren, zijn de residuen van de twee variabelen tegen elkaar afgezet in een spreidingsplot in Figuur 11, zie de uitleg in sectie 2.2.5. *Analyses voor discussiepunten*.

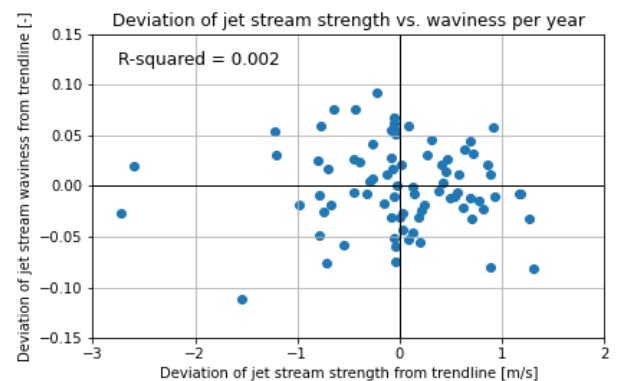


Figure 11: Spreidingsdiagram van de correlatie tussen de jaarlijks gemiddelde residuen van kracht en meandering van de straalstroom, inclusief de determinatiecoëfficiënt.

De resultaten geven aan dat er op jaarbasis geen significante correlatie is tussen de afwijking in de meandering en kracht van de straalstroom, met een R2-waarde van slechts 0.002. Dit ondanks het feit

dat beide variabelen op lange termijn een stijgende trend vertonen.

Zoals beschreven in sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom* is een nadeel van de SI-methode dat het vinden van een mogelijke trend in de gemiddelde noord-zuid positie nogal moeilijk is. Deze methode maakt namelijk gebruik van een vast bereik van breedtegraden dat in de loop der jaren niet verandert. De positie van de straalstroom zal zich altijd ergens in het midden van het gespecificeerde bereik bevinden, waardoor het minder waarschijnlijk is om een trend in de noord-zuid positie te vinden.

Een oplossing is om dezelfde trendanalyse uit te voeren voor de positie van de straalstroom, gebruik makend van de zonaal gemiddelde 250 hPa U-windsnelheid, zie ook sectie 2.2.5. *Analyses voor discussiepunten*. De breedtegraad waar de hoogste zonaal gemiddelde waarde voorkomt wordt daarbij als referentie genomen voor de noord-zuid positie van de straalstroom. In Figuur 12 is te zien dat de trendlijn een licht dalende trend toont voor de gemiddelde positie van -0.04°N per decennium. De trend is echter verre van significant met een P-waarde van 0.66 voor de coëfficiënt van de trendlijn. Voor verdere discussie zie sectie 5.3. *Opmerkingen over de trendanalyse*.

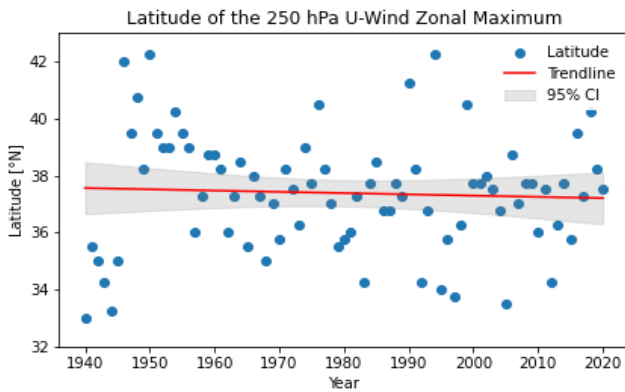


Figure 12: Spreidingsdiagram voor de breedtegraad van de maximale zonaal gemiddelde U-windsnelheid op 250 hPa van 1940 tot en met 2020, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

4.2. Trends per seizoen

In Tabel 5 staan de trends per seizoen vermeld, met de coëfficiënt van de trendlijn voor de afhankelijke variabele en de bijbehorende significantie. De

kracht van de straalstroom is significant toegenomen in alle seizoenen, waarbij de toename het meest uitgesproken is tijdens de winter en het minst tijdens de zomer. Voor de meandering is er in alle seizoenen een significante toename gevonden, behalve voor de winter. De noord-zuid positie vertoont geen significante trend in de meeste seizoenen, behalve in de winter wanneer een trend naar een zuidelijkere positie van de straalstroom te zien is, zie Tabel 5. Spreidingsdiagrammen met de eigenschappen van de straalstroom per seizoen, inclusief trendlijn en betrouwbaarheidsinterval (vergelijkbaar met Figuur 10), zijn te vinden in Bijlage A op pagina 29.

Table 5: Coëfficiënt van de afhankelijke variabelen voor de trends in eigenschappen van de straalstroom van 1940 tot en met 2020 en de significantie van deze coëfficiënten, waarbij dikgedrukte waarden wijzen op een P-waarde van <0.05 (statistisch significant).

Season	Strength [m/s]		Latitude [$^{\circ}\text{N}$]		Waviness [-]	
	Trend/decade	$P> t $	Trend/decade	$P> t $	Trend/decade	$P> t $
Winter	0.37	<0.01	-0.07	0.01	-0.002	0.53
Spring	0.17	<0.01	0.03	0.12	0.012	<0.01
Summer	0.10	0.02	0.02	0.41	0.022	<0.01
Autumn	0.14	0.01	-0.01	0.66	0.011	<0.01
Annual	0.20	<0.01	-0.01	0.69	0.011	<0.01

4.3. Vergelijking met vorige studies

Hoewel er nog niet veel bekend is over trends in de eigenschappen van de straalstroom over de afgelopen decennia, hebben sommige studies veranderingen in de gemiddelde noord-zuid positie en kracht van de straalstroom onderzocht.

4.3.1. Neuraal-netwerk gebaseerde analyse van de polaire en subtropische straalstroom

Een neutraal-netwerk gebaseerde studie keek naar veranderingen in de kracht en positie van zowel de polaire als de subtropische straalstroom van 1979 tot en met 2014 (Molnos et al., 2017). Omdat in deze studie met behulp van de SI-methode geen onderscheid wordt gemaakt tussen de polaire- en subtropische straalstroom, is het moeilijk om de resultaten uit de vorige neutraal-netwerk gebaseerde studie te vergelijken met de resultaten in Tabel 5. Echter, wanneer de resultaten voor de polaire- en subtropische straalstromen uit de

neutraal-netwerk gebaseerde studie worden gemiddeld, blijkt de gemiddelde kracht tussen 1979 en 2014 op jaarbasis te zijn afgenomen. Wat betreft de verschillen tussen de seizoenen, toonden de resultaten een afname in de kracht van de straalstroom – gemiddeld voor de polaire- en subtropische straalstroom – voor alle seizoenen, behalve in de winter (Molnos et al., 2017).

Een positieve (noordwaartse) trend werd gevonden voor de subtropische straalstroom en een negatieve (zuidwaartse) trend voor de poolstraalstroom in de neutraal-netwerk gebaseerde studie. Voor de lente en zomer is er geen of een hele lichte noordwaartse trend. Tijdens de herfst en winter is er een iets meer uitgesproken zuidelijke trend (Molnos et al., 2017).

Hoewel de resultaten van deze studie (zie Tabel 5) een toename in de sterkte van de straalstroom laten zien voor alle seizoenen, zijn de relatieve verschillen tussen de seizoenen vrij vergelijkbaar. De relatief sterkste positieve trend in de kracht van de straalstroom doet zich voor tijdens de winter, terwijl de trend in de zomer lager is (meer negatief of minder positief). Ook tonen de resultaten van deze studie een lichte noordwaartse trend in de gemiddelde breedtegraadpositie tijdens de lente en zomer (hoewel niet significant) en een zuidwaartse

trend tijdens de winter. Ook dit komt overeen met de resultaten van de neutraal-netwerk gebaseerde analyse (Molnos et al., 2017).

4.3.2. ERA5 analyse sinds 1979

Een studie die gebruikmaakte van ERA5 data van 1979 tot en met 2022 toonde over het algemeen een positieve decenniumtrend in de zonale windsnelheid op 200 hPa voor het noordelijk halfrond boven ongeveer 35°N, met als enige uitzondering een gebied boven de Stille Oceaan (Simmons, 2022). In Figuur 13 worden vier plots van deze studie getoond met de lineaire trendlijn van de zonale windsnelheid op 200 hPa voor de verschillende seizoenen. De groene lijnen zijn geplaatst op de gemiddelde breedtegraad van de straalstroom per seizoen, zoals gevonden in deze studie. Visueel gezien lijkt de sterkste positieve trend in de zonale windsnelheid op 200 hPa langs de gemiddelde breedtegraad te worden gevonden tijdens de winter. Hoewel er geen exacte cijfers beschikbaar zijn uit deze studie, suggereren de plots dat de resultaten van de vorige studie met ERA5 heranalysegegevens over de gemiddelde kracht van de straalstroom waarschijnlijk vergelijkbaar zijn met de resultaten van deze studie (zie Tabel 5).

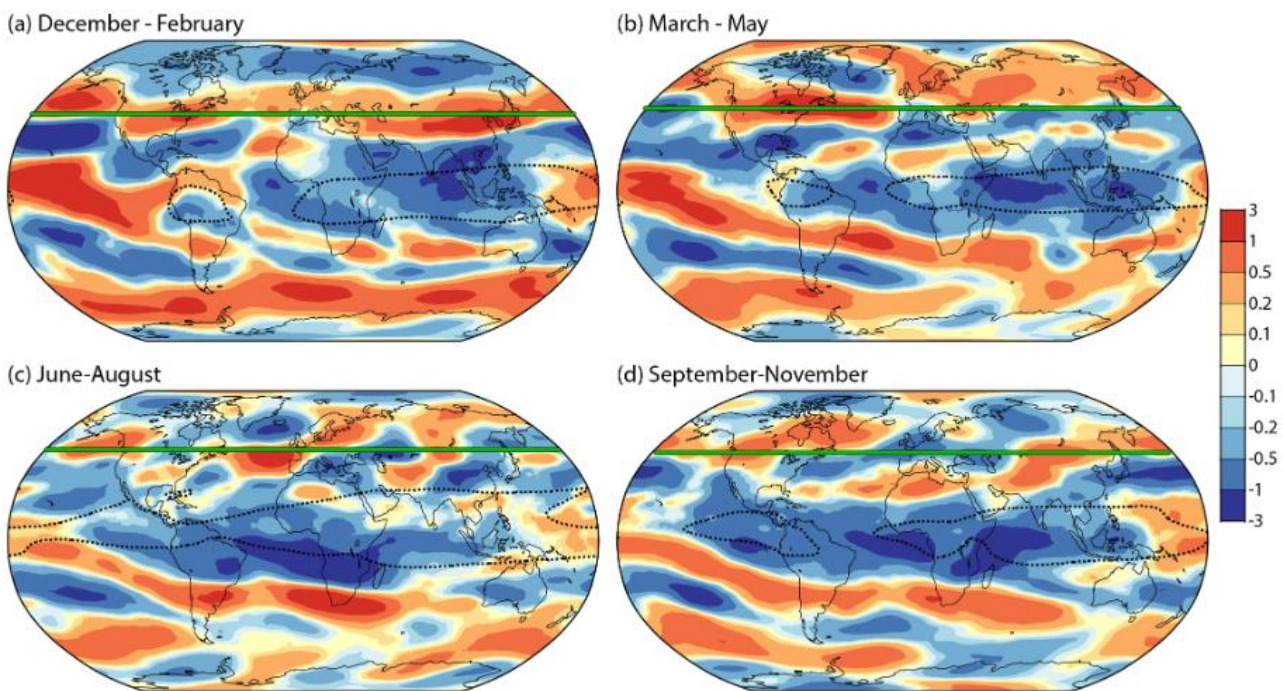


Figure 13: De lineaire trend (m/s per decennium) in de zonale windsnelheid op 200 hPa ERA5-seizoensgemiddelde voor (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA en (d) SON van MAM 1979 tot DJF 2021/22 op basis van de studie uit 2022 (Simmons, 2022). De groene lijnen zijn de seizoensgemiddelde breedtegraad van de straalstroom gevonden in deze studie.

5. Discussie

5.1. Interpolatie van het bereik

Bij de bepaling van de eigenschappen van de straalstroom is een variabel bereik gebruikt als input voor de SI. Het variabele bereik werd berekend op basis van vier seizoensgemiddelde waarden – gebaseerd op de 500 hPa U-windsnelheid – en daarna geïnterpoleerd. Deze interpolatie zorgt voor een zeer geleidelijke variatie in het bereik van breedtegraden gedurende het jaar (zie Figuur 6 in sectie 3.1. *Breedtegraden om te testen*), maar het is de vraag of dit representatief is voor hoe de variatie gedurende het jaar er in werkelijkheid uit ziet. Er kan bijvoorbeeld sprake zijn van een meer abrupte verschuiving tijdens een bepaalde periode in plaats van een geleidelijke overgang. Een mogelijkheid is om een omvang te berekenen voor elke individuele dag op basis van de 500 hPa U-windsnelheid, maar dit valt buiten de reikwijdte van deze studie.

Een ander punt om rekening mee te houden is dat de waarden voor de interpolatie van de maximale breedtegraad aan het einde van het jaar mogelijk iets te laag zijn doordat onvoldoende datapunten zijn toegevoegd buiten de seizoenscyclus. Er is slechts één seizoensgemiddelde waarde toegevoegd vóór het begin van het jaar (herfst) en slechts één na de laatste dag van het jaar (winter), zie sectie 2.2.2. *Bereik breedtegraden*. Deze fout werd pas later ontdekt, toen de data-analyse al was begonnen. De impact zou echter beperkt moeten zijn aangezien het verschil niet erg groot is; de "plotselinge" sprong van 31 december naar 1 januari is ongeveer 2°N voor de maximale breedtegraad en verwaarloosbaar voor de minimale breedtegraad van het bereik. Voor toekomstige studies wordt echter aanbevolen om ten minste twee seizoenswaarden vóór het begin van het jaar (zomer en herfst) en na het einde van het jaar (winter en lente) te gebruiken om de nauwkeurigheid van de interpolatie te verbeteren.

5.2. Definitie en berekening van de straalstroom eigenschappen

De bepaling van het beste bereik voor de breedtegraden is gebaseerd op de gemiddelde windsnelheid op 250 hPa langs de isohypse voor een

kleine subset van tijdstappen. Deze gemiddelde windsnelheid is berekend met de coördinaten verkregen van de isohypse die werd geplot met de *Cartopy*-module in Python. Voor de trendanalyse is echter gekozen om geen gebruik te maken van *Cartopy* om een plot te maken voor alle tijdstappen, omdat dit de rekentijd aanzienlijk zou verhogen. In plaats daarvan is een virtuele isohypse getekend met behulp van de *Matplotlib*-module rechtstreeks vanuit de dataset-array. De verkregen coördinaten met behulp van *Matplotlib* zijn echter iets anders verdeeld langs de isohypse als gevolg van de verschillende projecties (een Mercatorprojectie bij gebruik van *Matplotlib* en een Robinson-projectie met de *Cartopy*-module). Dit resulteert in enige inconsistentie tussen de gemiddelde windsnelheden voor de kleine subset en de volledige trendanalyse. Aangezien het verschil in windsnelheden over het algemeen klein is (minder dan 1 m/s), zal dit gemiddeld genomen waarschijnlijk geen invloed hebben op de uitkomst van de resultaten voor het meest optimale bereik op basis van de steekproef. Bovendien zou de tijdreeksanalyse nog steeds mogelijk zijn geweest in het onwaarschijnlijke geval dat een andere breedtegraadomvang zou zijn geselecteerd. Het doel is namelijk om trends te vinden tussen 1940 en 2020, waarbij het belangrijkste is om consistent hetzelfde bereik van breedtegraden te gebruiken voor alle tijdstappen.

Voor de normalisatie van de gemiddelde breedtegraad gedurende het jaar is ervoor gekozen om een correctie toe te passen op basis van de gemiddelde breedtegraad van het bereik voor een specifieke dag van het jaar, zie sectie 2.2.3. *Eigenschappen straalstroom*. Dit zou een nuttige parameter zijn geweest om de genormaliseerde breedtegraad tussen verschillende tijdstippen van het jaar te vergelijken. Uiteindelijk was dit echter niet nodig voor de resultaten van deze studie, omdat alleen dezelfde periodes (vier seizoenen en jaarlijkse gegevens) met elkaar werden vergeleken. Deze eigenschap kan nog steeds worden gebruikt voor toekomstige onderzoeken.

5.3. Opmerkingen over de trendanalyse

Waar op jaarbasis en voor bijna alle seizoenen de trends in de kracht en meandering van de straalstroom significant zijn, geldt dit niet voor de gemiddelde noord-zuid positie van de straalstroom (zie Tabel 5 in sectie 4.1. *Jaarlijks gemiddelde trends*). Een mogelijke reden voor het ontbreken van een significante trend kan zijn dat het gekozen bereik voor de SI min of meer de locatie bepaalt van de isohypse waarmee de straalstroom wordt benadert, zie ook sectie 2.2.1. *Introductie*.

Aangezien het variabele bereik alleen afhangt van de dag van het jaar en niet van het jaar in de tijdreeks, zal de jaarlijks gemiddelde noord-zuid positie van de straalstroom relatief constant blijven. Echter is volgens deze studie ook met andere methoden te ondersteunen dat een trend in de noord-zuid positie van de straalstroom ontbreekt. Zoals beschreven in sectie 3.1. *Breedtegraden om te testen*, zijn er geen significante verschillen in het bereik van breedtegraden voor twee verschillende klimatologische perioden (1941 tot 1970 en 1991 tot 2020). Bovendien toont de aanvullende analyse in sectie 4.1. *Jaarlijks gemiddelde trends* voor de zonaal gemiddelde U-windsnelheid op 250 hPa geen significante trend in de breedtegraad waar het zonaal maximum wordt bereikt. Hoewel beide resultaten het ontbreken van een significante trend in de jaarlijkse gemiddelde breedtegraad van de straalstroom ondersteunen, is het belangrijk om dit potentiële nadeel van de SI-methode in overweging te nemen bij toekomstig onderzoek.

5.4. Vergelijking van de resultaten met vorige studies

Er is nog niet veel bekend over trends in de eigenschappen van de straalstroom. In sectie 4.3. *Vergelijking met vorige studies* werden de resultaten van deze studie vergeleken met de uitkomsten van twee eerdere studies. Echter, beide studies hebben geen onderzoek gedaan naar een mogelijke trend in de hoeveelheid meandering van de straalstroom. Een studie die wel onderzoek heeft gedaan naar de mate van meandering van de straalstroom is het onderzoek waarvan de basis van de SI is overgenomen en aangepast. Echter, de

gepresenteerde resultaten waren voornamelijk gericht op regionale trends met verschillende tijdschalen en op algemene stromingspatronen in de hogere atmosfeer, in plaats van op het exacte pad van de straalstroom (Cattiaux et al., 2016). Daarom kan er geen duidelijke vergelijking worden gemaakt wat betreft trends in de meandering van de straalstroom.

5.5. Onzekerheid in de heranalyse data

Een ander punt om op te merken gaat over de kwaliteit van de heranalyse data. In Figuur 10 (sectie 4.1. *Jaarlijks gemiddelde trends*) is te zien dat tijdens de eerste vijf jaar van de tijdreeks (de jaren 1940 tot en met 1944) een gemiddelde windsnelheid laten zien die ruim onder de trendlijn ligt en meer afwijkt dan vrijwel alle andere jaren. De ERA5 heranalyse data is gebaseerd op historische waarnemingen (Hersbach et al., 2020). Aan het begin van de heranalyse periode waren minder observaties beschikbaar. Een gebrek aan waarnemingen vergroot de kans op substantiële verschillen tussen de heranalyse data en de werkelijkheid.

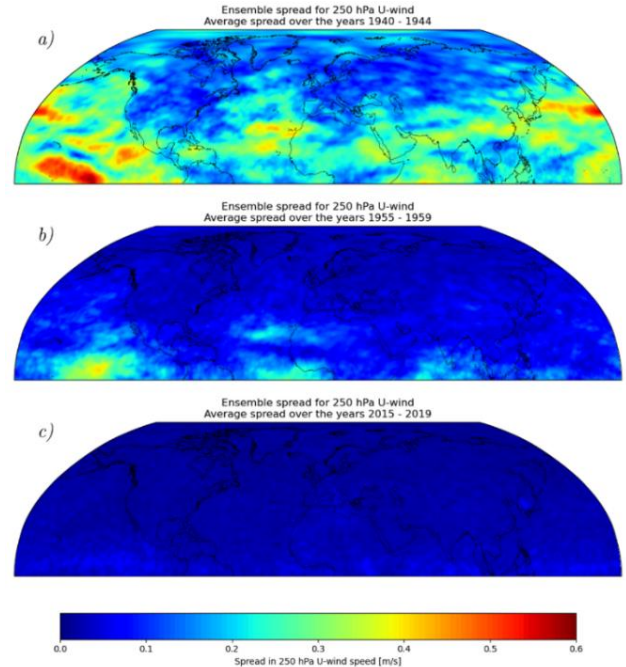


Figure 14: De spreiding van het heranalyse ensemble met 10 leden voor de U-component van windsnelheid op 250 hPa, gemiddeld over de jaren a) 1940 tot en met 1944, b) 1955 tot en met 1959 en c) 2015 tot en met 2019.

Om de onzekerheid in de ERA5 heranalyse data te onderzoeken, is de standaarddeviatie van de U-component van de windsnelheid op 250 hPa tussen

de 10 heranalyse ensembleleden geplot in Figuur 14, voor drie verschillende periodes. Gemiddeld over de jaren 1940 tot en met 1944 (subplot *a*) varieerde de spreiding in de U-windsnelheid op 250 hPa van ongeveer 0.2 tot 0.5 m/s boven de Stille Oceaan en van 0.1 tot 0.2 m/s boven Europa en Noord-Amerika. Dit is niet alleen significant hoger dan de meest recente jaren van de heranalyse (gemiddelde van 2015 tot en met 2019, subplot *c*), maar ook in vergelijking met slechts 15 jaar later (gemiddelde van 1955 tot en met 1959, subplot *b*). Dit laat zien dat tijdens de eerste jaren van de heranalyse data

de onzekerheid inderdaad relatief groot was. Het is echter de vraag of de sterk afwijkende waarden voor de jaarlijks gemiddelde windsnelheid gedurende die jaren (tot 2 à 3 m/s lager dan de trendlijn) hierdoor verklaard kunnen worden. De standaarddeviatie in de gegevens is namelijk van de orde van 0.1 tot 0.5 m/s en door te middelen over veel tijdstappen zou de gemiddelde afwijking naar nul moeten convergeren. Het kan niet worden uitgesloten dat er sprake is van een bias voor de U-windsnelheid op 250 hPa volgens ERA5 voor deze jaren, maar dit kan niet worden afgeleid uit de dataset zelf.

6. Conclusie

Het doel van deze scriptie was om de volgende drie onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. Hoe kan de vergelijking voor de *Sinuosity-index* (SI) worden aangepast om het werkelijke pad van de straalstroom zo goed mogelijk te benaderen?
2. Hoe is de kracht, positie en de meandering van de straalstroom op jaarbasis veranderd tussen 1940 en 2020?
3. Hoe verschillen de trends in de eigenschappen van de straalstroom (kracht, positie en meandering) van 1940 tot 2020 per seizoen?

De eerste onderzoeksvraag werd behandeld in Hoofdstuk 3. *Beschrijving van de straalstroom eigenschappen*. Door de SI (*Sinuosity-index*) te combineren met de toepassing ervan op stromingspatronen hogerop in de atmosfeer is een basisformulering verkregen om de locatie van de straalstroom te beschrijven. Voor vijf verschillende bereiken van breedtegraden werd de overlap tussen een isohypse van de 500 hPa geopotentiale hoogte en de windsnelheid op 250 hPa bepaald, aangezien de kern van de straalstroom de hoogste windsnelheden op 250 hPa kent. Uiteindelijk is het gekozen bereik voor de breedtegraden gebaseerd op de zonaal gemiddelde U-windsnelheid op 500 hPa en interpolatie van seizoensgemiddelde waarden (*Global – Seasonal scenario*). De windsnelheid op 250 hPa langs de isohypse is gemiddeld het hoogst voor dit scenario. Het testen van meerdere bereiken om de positie van de straalstroom te beschrijven met behulp van de SI wordt ook aanbevolen voor toekomstige studies naar de straalstroom.

De tweede en derde onderzoeksvraag zijn beantwoord door het bepalen van de gemiddelde 250 hPa windsnelheid langs de isohypse, de gemiddelde breedtegraad en de totale lengte van de

isohypse (voor de SI) voor alle tijdstappen in de dataset, dus elke 6 uur tussen 1 januari 1940 om 00 UTC en 31 december 2020 om 18 UTC. Op jaarbasis is zowel de gemiddelde kracht als de meandering van de straalstroom tussen 1940 en 2020 significant toegenomen, terwijl er geen trend is gevonden in de gemiddelde noord-zuid positie.

Voor de meteorologische lente, zomer en herfst zijn dezelfde trends gevonden voor de periode 1940 tot en met 2020; een significante toename in de kracht en meandering van de straalstroom, terwijl de gemiddelde noord-zuid positie niet significant is veranderd. Voor de meteorologische winter is ook een significante toename in de sterkte van de straalstroom gevonden. Echter, de gemiddelde noord-zuid positie van de straalstroom is significant afgenomen (zuidelijke trend) en er is geen verandering in meandering van de straalstroom tijdens de winter gevonden. De relatieve verschillen tussen de seizoenen wat betreft de kracht en noord-zuid positie van de straalstroom zijn vergelijkbaar met eerdere studies.

Belangrijk om op te merken is dat hoewel deze resultaten een idee kunnen geven van de historische trends voor de verschillende eigenschappen van de straalstroom, het moeilijk is om deze trends te relateren aan veranderingen in regionale weerspatronen en extreme weersgebeurtenissen. Ten eerste omdat de schaal van de analyse van de straalstroom (een wereldwijd gemiddelde) verschilt van de schaal waarop weerspatronen en extreme weersgebeurtenissen spelen (lokaal tot regionaal). Bovendien is nog niet volledig bekend hoe de verschillende eigenschappen van de straalstroom (kracht, breedtegraad en meandering) exact van invloed zijn op deze weerspatronen en extreme weersgebeurtenissen.

Dankwoord

Nu het einde van deze scriptie nadert, is het tijd om iedereen te bedanken die mij heeft geholpen tijdens de afgelopen tweeënhalve maand van brainstormen, schrijven, discussiëren en presenteren. Vanwege mijn enthousiasme over het onderwerp, de resultaten en de hele 'uitdaging' zelf, heb ik veel gedachten en ideeën gedeeld met vrienden, familie, collega's en medestudenten. Dit heeft niet alleen nuttige inzichten opgeleverd, maar het heeft me ook enorm gemotiveerd gedurende de 16 weken dat ik aan dit project heb gewerkt. Ik ben ook dankbaar voor het *Copernicus-programma* van de Europese Unie, omdat zij een enorme hoeveelheid (historische) data gratis beschikbaar stellen die gebruikt kan worden voor dit soort meteorologische studies.

Er zijn een aantal mensen die ik specifiek wil bedanken voor hun significante bijdrage aan dit project. Allereerst mijn eerste begeleider Chris Weijenborg. Chris, hoewel ik je voor het begin van deze scriptie nog niet echt had ontmoet, wist ik vanaf de eerste ontmoeting dat je een geweldige begeleider zou zijn. Je kon niet alleen inhoudelijke hulp bieden, zoals het verzamelen van de Terabytes aan benodigde data, het geven van commentaar op de voorgestelde methoden en het bespreken van de resultaten, maar je vond ook de perfecte balans tussen mij voldoende bijstaan in het proces en andere verantwoordelijkheden juist aan mij overlaten. In het begin wilde ik waarschijnlijk iets té veel werk doen, terwijl jij probeerde het voorgestelde werk een beetje te veel te beperken naar mijn smaak. Uiteindelijk zijn we tot een fantastisch onderzoeksvoorstel gekomen met de juiste hoeveelheid werk die binnen twee halve perioden kon worden voltooid. En in plaats van strikt het onderwerp te volgen zoals beschreven in de projectomschrijving, zijn we samen overeengekomen om de aanpak iets te veranderen, wat goed heeft uitgepakt.

Verder wil ik Thomas Batelaan-Bruggeman bedanken. Thomas, het was misschien puur toeval dat je aanwezig was tijdens één van de eerste ontmoetingen die ik had met Chris, maar daar ben ik erg dankbaar voor. Ten eerste omdat jouw Master-scriptie een goed vertrekpunt was voor mijn onderzoek en je in staat was om de essentie van de methoden duidelijk aan mij uit te leggen. Maar ik ben het meest dankbaar voor het feit dat je praktisch bij elk overleg aanwezig was, ook al was je helemaal niet verplicht om te komen of informatie te verstrekken. Ik denk dat jouw inbreng in termen van het bespreken van de voorgestelde methodologie en de resultaten mijn scriptie naar een hoger niveau heeft getild. Zonder jouw bijdrage had ik waarschijnlijk verschillende punten voor discussie en aanvullende resultaten gemist.

Ook wil ik Bert Heusinkveld, Antonija Rimac-van Heerwaarden en Arnold Moene bedanken. Bert, als mijn tweede begeleider ben je misschien niet veel betrokken geweest bij deze scriptie, maar ik weet dat je er voor me zou zijn geweest als Chris niet in staat was geweest om te helpen vanwege onvoorziene omstandigheden. Antonija, je bent erg druk geweest met het organiseren van alles rondom de scriptie voor alle studenten van Soil, Water & Atmosphere. Ook al hebben we elkaar alleen gezien tijdens het introductiecollege en de presentaties, wil ik je bedanken voor het organiseren van alles wat nodig was. Van de on-campus symposia tot de digitale leeromgeving met veel documentatie over (schrijf)vaardigheden en het beschikbaar zijn voor alle vragen met betrekking tot de scriptie. En tot slot, Arnold, als programmadirecteur van de bacheloropleiding Soil, Water & Atmosphere, wil ik je bedanken voor het aanbieden van deze prachtige bacheloropleiding aan de Wageningen University & Research, samen met al je collega's. Ik was al overtuigd dat dit de beste studie was om te volgen als toekomstig klimatoloog. Nu ik bijna klaar ben, kan ik dat alleen maar bevestigen.

Bronnen

- Ari, N., & Ustazhanov, M. (2014). Matplotlib in python. 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO),
- Batelaan, T. J. (2020). *The Atmospheric General Circulation Response to Polar Amplification on an Aquaplanet* Wageningen University & Research].
- Cattiaux, J., Peings, Y., Saint-Martin, D., Trou-Kechout, N., & Vavrus, S. J. (2016). Sinuosity of midlatitude atmospheric flow in a warming world. *Geophysical Research Letters*, *43*(15), 8259-8268.
- Copernicus. (2023). *Hourly weather and climate snapshots now available from 1940* <https://climate.copernicus.eu/hourly-weather-and-climate-snapshots-now-available-1940>
- Coumou, D., Di Capua, G., Vavrus, S., Wang, L., & Wang, S. (2018). The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nature Communications*, *9*(1), 2959.
- ECMWF. (2020). Fact sheet: Reanalysis. Retrieved June 27th, 2023, from <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>
- EUMETSAT. (2023). Tropospheric warming and stratospheric cooling in the 21st century. Retrieved June 6th, 2023, from <https://www.eumetsat.int/tropospheric-warming-and-stratospheric-cooling-21st-century>
- Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, *39*(6).
- Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environmental Research Letters*, *10*(1), 014005.
- Fuller, I., Reid, H., & Brierley, G. (2013). Methods in geomorphology: investigating river channel form. In *Treatise on geomorphology: Methods in geomorphology* (pp. 73-91). Elsevier.
- Geographic, N. (2023). *Equator*. Retrieved June 27th, 2023 from <https://education.nationalgeographic.org/resource/equator/>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999-2049.
- IPCC. (2023). *Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)* https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- McKinney, W. (2011). pandas: a foundational Python library for data analysis and statistics. *Python for high performance and scientific computing*, *14*(9), 1-9.
- Meleshko, V. P., Johannessen, O. M., Baidin, A. V., Pavlova, T. V., & Govorkova, V. A. (2016). Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, *68*(1), 32330.
- Molnos, S., Mamdough, T., Petri, S., Nocke, T., Weinkauff, T., & Coumou, D. (2017). A network-based detection scheme for the jet stream core. *Earth System Dynamics*, *8*(1), 75-89.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petroliagis, T. (1996). The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *122*(529), 73-119.
- NWS. (2023a). *Basic Wave Patterns*. Retrieved June 6th, 2023 from <https://www.weather.gov/jetstream/basic>
- NWS. (2023b). *The Jet Stream*. Retrieved March 22nd, 2023 from <https://www.weather.gov/jetstream/jet>
- Robusto, C. C. (1957). The cosine-haversine formula. *The American Mathematical Monthly*, *64*(1), 38-40.
- SciPy 1.0 Contributors, Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, . . . Mulbregt, P. v. (2020). *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*. In Nature Methods.
- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference,

- Serreze, M. C., & Barry, R. G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and planetary change*, 77(1-2), 85-96.
- Simmons, A. J. (2022). Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022. *Weather and Climate Dynamics*, 3(3), 777-809.
- White, R. H., Anderson, S., Booth, J. F., Braich, G., Draeger, C., Fei, C., Harley, C. D., Henderson, S. B., Jakob, M., & Lau, C.-A. (2023). The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021. *Nature Communications*, 14(1), 727.

Appendix A: Spreidingplots met trendlijnen

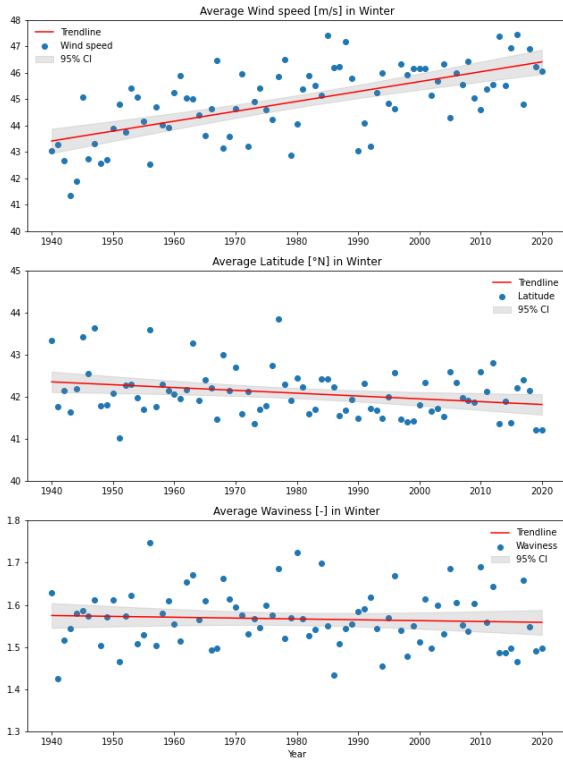


Figure 15: Spreidingsplot voor de gemiddelde windsnelheid, breedtegraad en meandering van de straalstroom in de winter van 1940 tot en met 2020, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

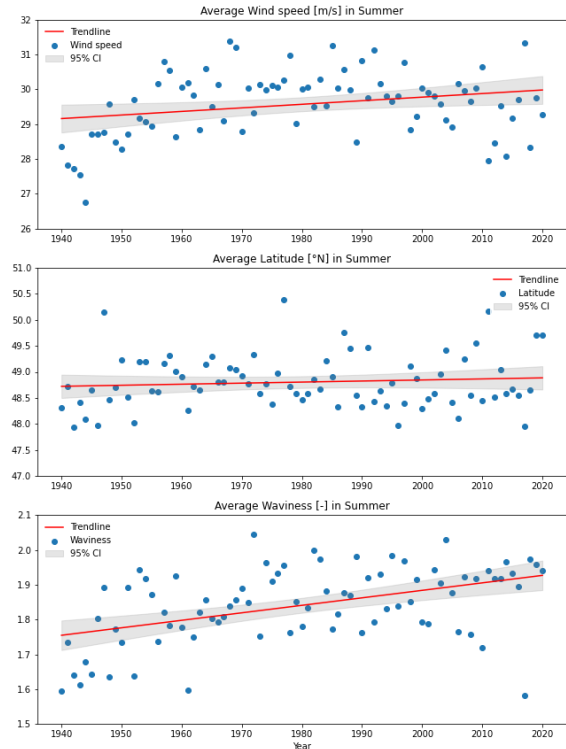


Figure 17: Spreidingsplot voor de gemiddelde windsnelheid, breedtegraad en meandering van de straalstroom in de zomer van 1940 tot en met 2020, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

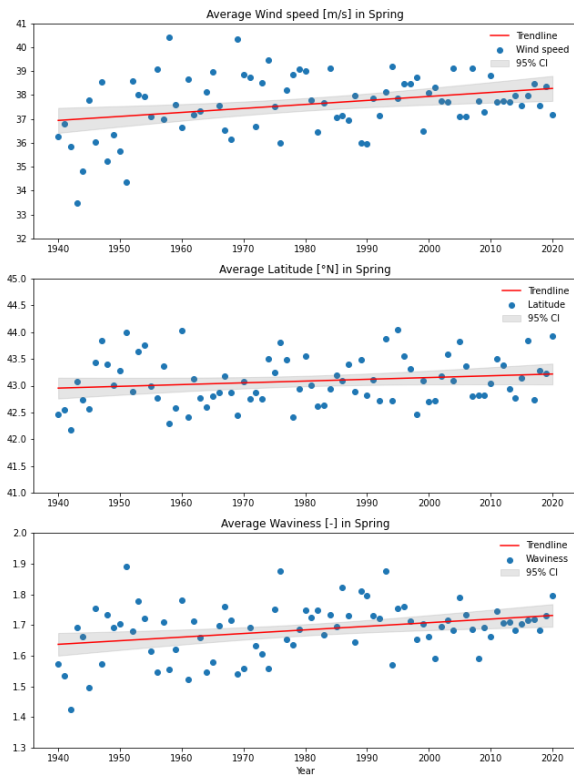


Figure 16: Spreidingsplot voor de gemiddelde windsnelheid, breedtegraad en meandering van de straalstroom in de lente van 1940 tot en met 2020, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

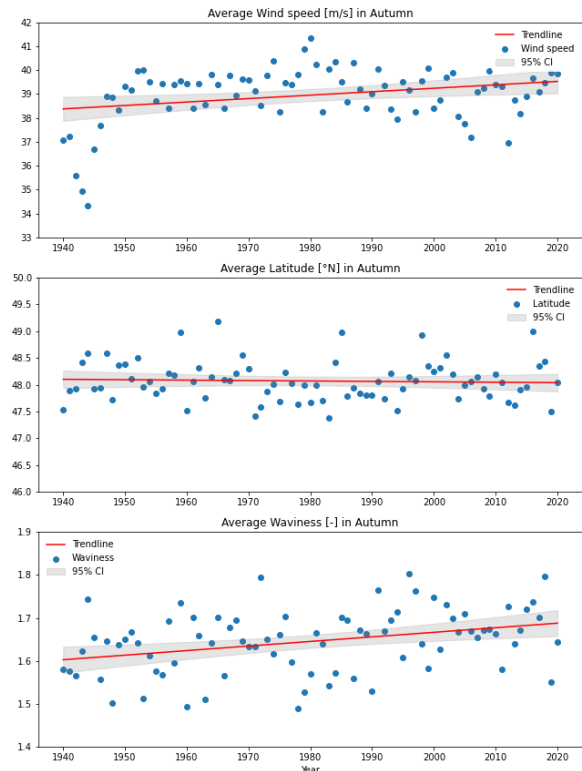


Figure 18: Spreidingsplot voor de gemiddelde windsnelheid, breedtegraad en meandering van de straalstroom in de herfst van 1940 tot en met 2020, inclusief de trendlijn en het 95% betrouwbaarheidsinterval.

Appendix B: Plot van Cattiaux et al.

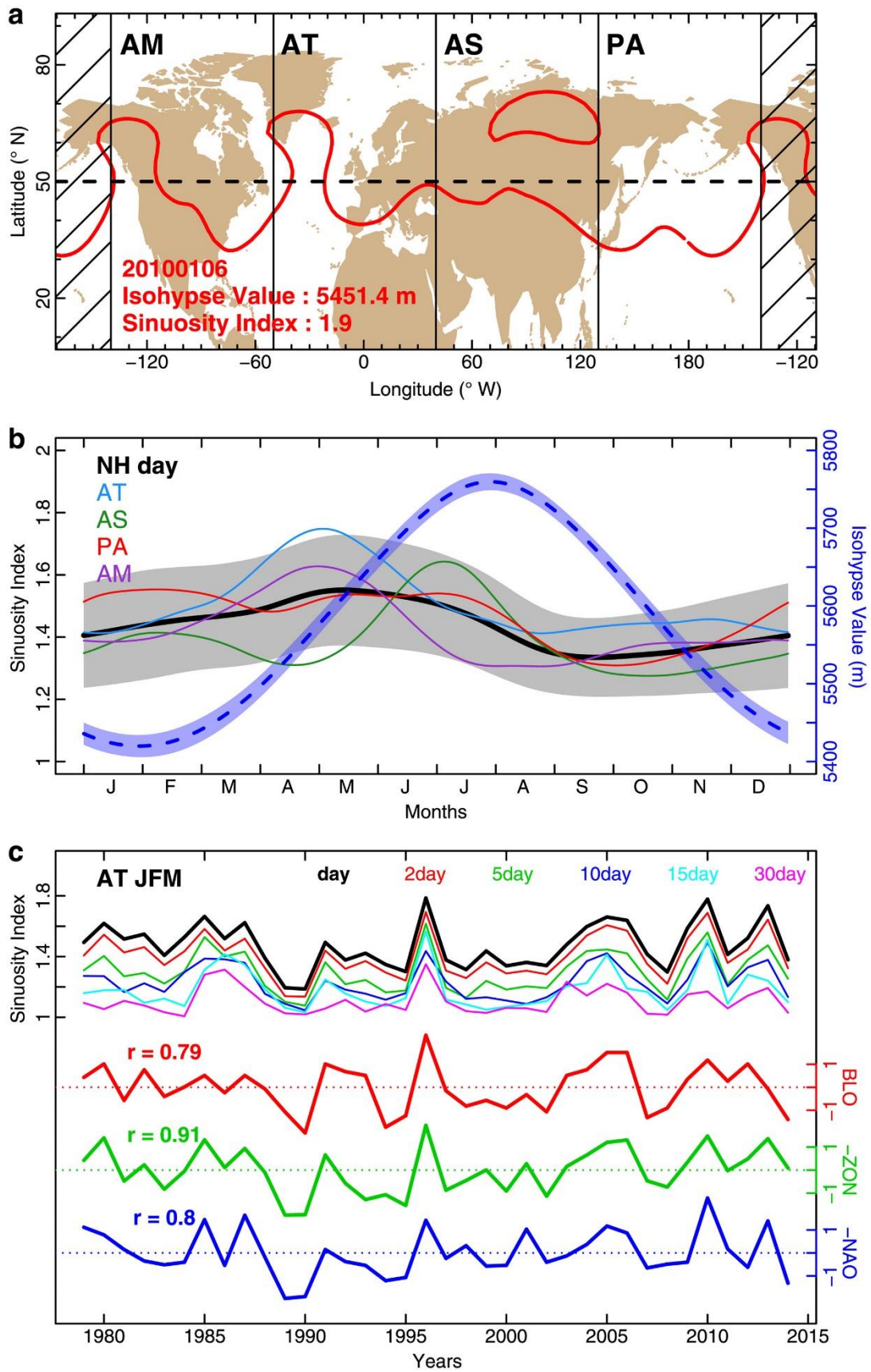


Figure 19: Plot van Cattiaux et al. met in subplot a) de 500 hPa geopotentiale isohypse gebruikt voor de Sinuosity-index (SI) op 6 januari 2010.