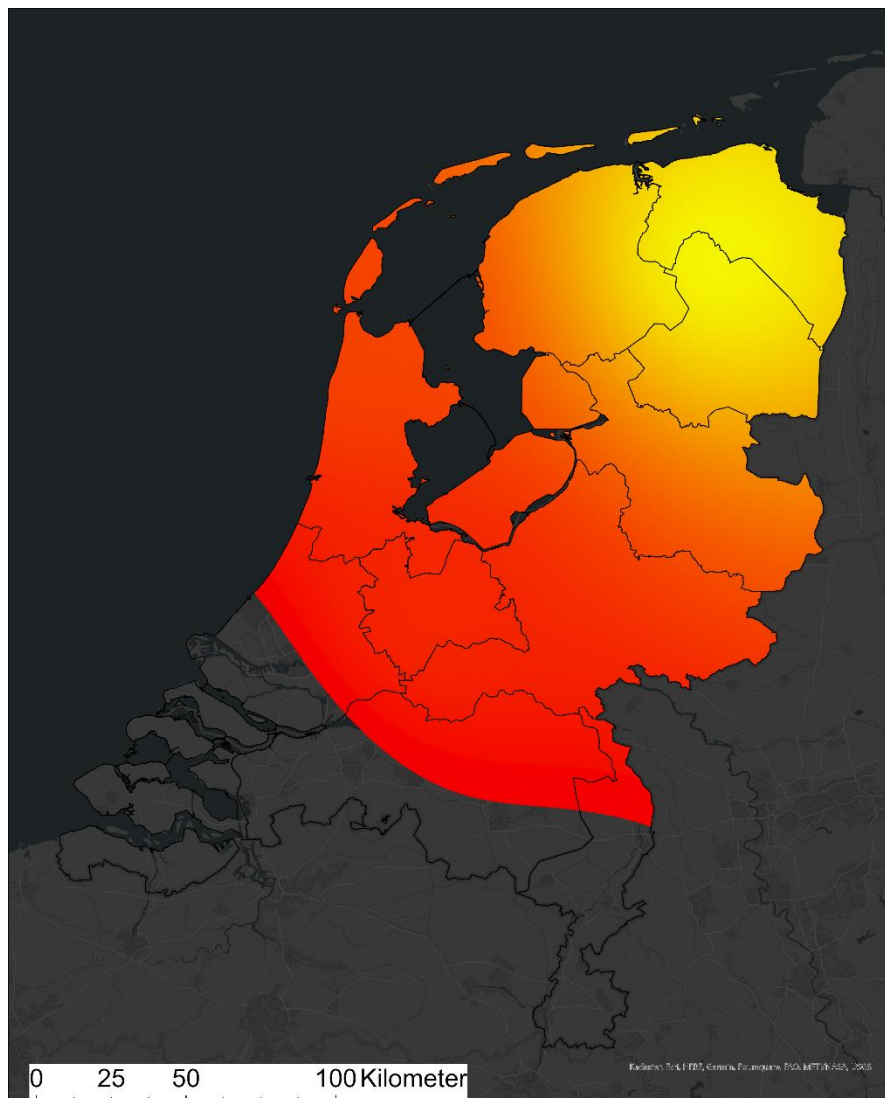


Klimaatverandering kaart voor Nederlandse boomsoorten

Effecten van klimaatverandering op verschillende boomsoorten in Nederland in kaart gebracht



Pseudotsuga Kust Gemiddelde Temperatuur 2100 Mn



Colofon

Titel: Klimaatverandering kaart voor Nederlandse boomsoorten

Datum: 08-01-2024

Auteur: Glenn Duvigneau

Studentnummer: 000019623

Onderwijsinstelling: Hogeschool van Hall Larenstein

Opleiding: Bos- en Natuurbeheer

Begeleiders: Ute Sass-Klaassen, Wimke Crets

Versie: 1.1

Inhoud

Voorwoord	4
Samenvatting	5
1. Aanleiding & kader	6
2. Doelstelling & onderzoeksvragen	8
2.1 Doelstelling	8
2.2 Hoofdvraag	8
2.3 Deelvragen	8
3. Methode	9
3.1 Deelvraag 1	9
3.2 Deelvraag 2	9
3.3 Deelvraag 3	10
3.4 Methode schema	11
4. Resultaten	12
4.1 Klimaatenvelop beuk, zomereik, grove den, douglasspar, fijnspar soorten	12
4.2 Klimaat tabellen & kaarten	13
4.3 Ruimtelijke klimaatenvelop kaarten	14
5. Conclusie	23
6. Discussie	24
Bibliografie	25
Bijlage	28
Bijlage 1: Gemiddelde jaarlijkse neerslag kaarten	28
Bijlage 2: Gemiddelde jaarlijkse temperatuur kaarten	31

Voorwoord

Dit onderzoek verkent de toekomstige perspectieven van diverse boomsoorten binnen een veranderend klimaat. De verspreiding van deze bomen wordt in kaart gebracht, waardoor beheerders weloverwogen beslissingen kunnen nemen over de keuze van boomsoorten in hun bossen. Hoewel klimaatverandering een zorgwekkend onderwerp is dat persoonlijk weinig vreugde brengt, beseffen we dat we als individuen weinig directe invloed hebben, maar als mensheid wel collectieve verantwoordelijkheid dragen.

Dit onderzoek behandelt niet alleen de impact van klimaatverandering en de klimaatenveloppen van diverse boomsoorten, maar bevat tevens een GIS-component. Mijn studie in bos- en natuurbeheer, waarbij ik de minor ruimtelijke informatietechnologie heb gevolgd om me te specialiseren in GIS, heeft me aangenaam verrast. Voordat ik aan mijn opleiding begon, was ik niet bekend met GIS, maar nu realiseer ik me hoe boeiend en relevant dit vakgebied is.

Tijdens dit onderzoek heb ik bewust geprobeerd een positieve instelling te behouden, ondanks dat dit niet mijn eerste afstudeerproject is. Mijn eerdere opdracht paste niet bij mijn interesses, maar dankzij de begeleiding van mijn oude en huidige afstudeerbegeleider, Wimke Crets, heb ik dit boeiende onderzoeksthema ontdekt. Haar bijdrage heeft mijn ervaring aanzienlijk positiever gemaakt, en daar ben ik haar zeer dankbaar voor.

Ik wil ook mijn vorige studieloopbaanbegeleider, Hermine de Wolf, bedanken voor haar begeleiding tijdens mijn studie. Bovendien ben ik Ute Sass-Klaassen erkentelijk voor het toekennen van deze opdracht.

Samenvatting

Klimaatverandering brengt onzekerheid voor de toekomst van bosbeheer met zich mee, waarbij stijgende temperaturen en droogte een negatieve invloed hebben op Nederlandse bossen (Lerink, Toor, König, & Nabuurs, 2019). Verschillende boomsoorten worden op diverse manieren beïnvloed door deze veranderingen. Om weerbaar en duurzaam bosbeheer te realiseren, is ruimtelijk inzicht voor beheerders van cruciaal belang. Het is essentieel om te weten waar specifieke boomsoorten zich toekomstig buiten hun klimaatenvelop zouden bevinden in verschillende klimaatscenario's voor Nederland.

Dit onderzoek heeft tot doel om kaarten te ontwikkelen die bijdragen aan dit inzicht. De kaarten zijn gemaakt door extrapolatie van de actuele KNMI klimaatscenario's data (Bessembinder, et al., 2023) in ArcGIS Pro, waarbij vervolgens de klimaatenvelop waarden van beuk, eik, grove den, douglasspar en fijnspar (Köling, 2007) zijn toegepast. Een klimaatenvelop is gedefinieerd als het potentiële verspreiding gebied volgens de atmosferische waarden van neerslag en temperatuur. Het resultaat omvat diverse klimaatkaarten die het mogelijke toekomstige leefgebied van 2050 tot 2150 binnen de klimaatenvelop waarden van deze vijf soorten ruimtelijk weergeven in Nederland.

In het hoge uitstoot klimaatscenario is er vanaf 2100 geen enkel gebied in Nederland waarin de vijf boomsoorten conform hun klimaatenvelopen nog zouden kunnen groeien. In de matige scenario's beslaat het groeigebied van beuk en eik tot 2150 nog bijna heel Nederland, met uitzondering van Zeeland in het matig droge scenario. Grove den en fijnspar maken op basis van hun klimaatenvelopen in toekomstige scenario's geen kans op geschikte groeiplaatsen in Nederland. De douglasspar kan in de hoge uitstootscenario's van 2050 alleen nog in het noorden van Nederland groeien, terwijl in de matig droge uitstootscenario's van 2050 een klein deel van Gelderland en Noord-Holland nog binnen het potentieel mogelijke groeigebied valt. In het matig natte scenario van 2050 vormt heel Flevoland en het grootste deel van Gelderland en Noord-Holland nog een potentieel groeigebied voor de douglasspar. Echter, in 2100 en 2150 vallen ook deze regio's buiten de klimaatenvelop voor de douglasspar.

In vergelijking met de andere vier boom soorten heeft douglasspar een breder klimaatenvelop. In 2050 kan de soort in de matige uitstootscenario's nog overal in Nederland groeien, terwijl in de extreme klimaatscenario's alleen niet in Zeeland. In 2100 verliest de douglasspar onder het matig natte klimaatscenario groeigebied in grote delen van Limburg, Noord-Brabant, Zuid-Holland en heel Zeeland. Onder het matig droge scenario van 2100 verliest de douglasspar groeigebied in grote delen van Gelderland, Utrecht, en Noord-Holland en heel Zeeland, Limburg, en Noord-Brabant. De natte matige uitstootscenario van 2150 beperkt het groeigebied op de drie noordelijke provincies, Overijssel, en kleine delen van Gelderland, Flevoland, en Noord-Holland. De droge matige uitstootscenario van 2150 beperkt het groeigebied op de drie noordelijke provincies en delen van Overijssel en Flevoland.

1. Aanleiding & kader

Meer dan 99% van alle wetenschappelijke rapporten over klimaatverandering is het erover eens dat klimaatverandering bestaat en dat menselijke activiteit hiervan de oorzaak is (Lynas, Houlton, & Perry, 2021), (IPCC, 2023). De gemiddelde jaarlijkse temperatuur in Nederland is tussen 1907 en 2022 gestegen met $2,3 \pm 0,6$ °C (Compendium voor de Leefomgeving, 2023). Zomers worden droger en stortbuien komen vaker voor (KNMI, 2021), wat negatieve gevolgen heeft voor bomen die tijdens het groeiseizoen veel water nodig hebben. De droge zomer van 2018 toonde duidelijk minimale tot geen groei aan in meerdere boomsoorten op verschillende locaties in Nederland (Lerink, Toor, König, & Nabuurs, 2019).

Voor beheerders vormt het gebrek aan boomgroei niet alleen een financieel risico vanwege verminderde houtproductie op termijn, maar ook een bedreiging voor het ecosysteem. Een weerbaar bos met een hoge diversiteit aan boomsoorten is gunstig voor veel plant- en diersoorten (Bauhus, et al., 2017). Een mogelijke oplossing om de effecten van een veranderend klimaat op te vangen, naast het verhogen van de biodiversiteit, is het bevorderen en introduceren van droogtebestendige boomsoorten (Hlásny, et al., 2014). Hierbij wordt vaak eerst gefocust op inheemse soorten en hun groeipotentieel en droogteresistentie op verschillende standplaatsen (Pretzsch, Schütze, & Uhl, 2012) & (Orman, Adamus, & Szewczyk, 2016). Het aanplanten van exotische boomsoorten, zowel al aanwezige als nieuw te introducerende, wordt ook in Nederland overwogen. Echter, het planten van exotische boomsoorten brengt risico's met zich mee, voornamelijk door invasiviteit van sommige exotische soorten en de bedreiging van inheemse soorten (Roy, et al., 2023).

Voor de beslissing over welke boomsoorten in een toekomstig warmer en droger klimaat in Nederland kunnen groeien, is het bepalen van de zogenaamde "klimaatenvelop" van een boomsoort essentieel. Dit geeft aan onder welke klimaatcondities een boomsoort kan gedijen, waarbij niet alleen verdroging en opwarming van belang zijn, maar ook het verdragen van late nachtvorst tijdens vervroegde groei. Ondanks gemiddeld warmere temperaturen en een vroegere lente kan het nog steeds spontaan vriezen, wat schadelijk is voor bomen met jonge bladeren die gevoelig zijn voor vorst (Zohner, et al., 2020).

Aanpassen aan klimaatverandering is al uitdagend, maar de mate van klimaatverandering is ook niet duidelijk. Sommige bronnen suggereren dat klimaatverandering sneller optreedt dan verwacht (Van Oldenborgh, et al., 2009), mogelijk veroorzaakt door een "carbon feedback" door het vrijkomen van opgeslagen koolstof in permafrost (Schuur, et al., 2015). Hierdoor zijn er niet één maar meerdere klimaatscenario's.

In 2019 heeft het Duitse onderzoeksinstituut FVA Baden-Württemberg kaarten gepubliceerd met geo-informatie over scenario's van toekomstige ontwikkeling van bossen onder klimaatverandering. Deze kaarten zijn gebaseerd op soortverspreidingsmodellen en de RCP-klimaatscenario's van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, sd). RCP staat voor "Representative Concentration Pathway", wat voorspellingen zijn van broeikasgasemissies in de toekomst en de bijbehorende effecten (IPCC, 2014). Er zijn vier RCP-scenario's die veranderingen in klimaatfactoren afhankelijk van toekomstige emissies, dat wil zeggen de menselijke inzet voor het verminderen van uitstoot van broeikasgassen, weergeven: RCP 2.6, 4.5, 6, en 8.5. RCP 2.6 is het scenario waarin de mensheid klimaatverandering maximaal bestrijdt, terwijl RCP 8.5 een scenario is waarin de mensheid niets doet om klimaatverandering te bestrijden (IPCC, 2014). FVA Baden-Württemberg gebruikt RCP 4.5 en RCP 8.5 voor het maken van kaarten, die de geschiktheid van boomsoorten op basis van hun potentieel klimaatafhankelijk verbreidingsgebied aangeven (FVA Baden-Württemberg, 2019). Dergelijke kaarten

van potentiële toekomstige boomsoortenverspreidingen zijn voor Nederland tot nu toe nog niet beschikbaar. Wel heeft het KNMI op 9 oktober 2023 nieuwe klimaatscenario's gepresenteerd die gebruikmaken van de RCP-scenario's (Bessembinder, et al., 2023) en daarmee de kans bieden om vergelijkbare kaarten voor een selectie van relevante boomsoorten in Nederlandse bossen te maken.

Een dergelijke benadering kan bijdragen aan besluitvorming over de omvorming van bestaande bossen die nu al negatieve effecten van droogte vertonen of mogelijk gevaar lopen door uniforme opbouw qua soortsaamenstelling en leeftijdsverdeling. Informatie over toekomstig potentieel geschikte groeigebieden van verschillende boomsoorten kan ook nuttig zijn bij herbebossing na bijvoorbeeld insectenplagen of de aanleg van nieuw bos, zoals de geplante 37.000 hectare nieuw aan te leggen in Nederland volgens de Bossenstrategie (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2020).

In Nederland is zijn verschillende onderzoeken gedaan naar "de boom van de toekomst". De WUR heeft verschillende onderzoeken uitgevoerd en artikelen geschreven, zoals "Klimaatbestendige bossen in Nederland en Europa" (Nabuurs, 2020), en "CSI Trees: Klimaatbomen met toekomst" (Ravesloot, 2022). De Natuur en Milieufederatie Noord-Holland heeft in 2019 een rapport gepubliceerd over klimaatbestendige bomen in het specifieke gebied van Badhoevedorp (Wijk, 2019). Dit reflecteert het interesse in meer kennis over klimaatbestendige boomsoorten, zowel op theoretisch niveau, dat wil zeggen gebaseerd op klimaat gebaseerde informatie over verspreiding van een boomsoort, als op de invloed van specifieke locaties en bodems op het groeipotentiaal van verschillende boomsoorten.

Een kaart die informatie geeft over de toekomstige geschiktheid van boomsoorten kan Nederlandse bosbeheerders helpen bij besluitvorming en experimenten met nieuwe combinaties van boomsoorten. Door te simuleren hoe verschillende boomsoorten, die nu voorkomen presteren in Nederland als de klimaattrends zich voortzetten, kunnen beheerders aanvullende informatie verkrijgen die kan worden meegenomen bij het kiezen van boomsoorten voor aanplant. Zo behouden en creëren we gezonde, klimaatbestendige bossen met diverse ecosysteemfuncties waar de samenleving van kan profiteren en waar beheerders in de toekomst nog steeds hout kunnen winnen.

2. Doelstelling & onderzoeksvragen

Klimaatverandering maakt Nederland steeds droger en warmer. Dit heeft een negatief effect op inheemse boomsoorten die door extreme droogte minder goed groeien (Lerink, Toor, König, & Nabuurs, 2019). Mogelijk worden in de toekomst optimale en overleefbare grenzen overschreden. Maar waar liggen klimaat-gerelateerde grenzen voor het voortbestaan van relevante boomsoorten in het huidige Nederlandse bos?

2.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het creëren van potentiële verspreiding kaarten waarin, door middel van klimaatsimulatie potentiële effecten van klimaatverandering op de verspreiding van geselecteerde in Nederland voorkomende boomsoorten gekeken wordt naar mogelijke keuzes voor het plannen van weerbare en duurzame bossen.

2.2 Hoofdvraag

Zijn de beuk, zomereik, grove den, fijnspar, en douglasspar geschikt voor Nederlandse bossen in verschillende toekomstige klimaatscenario's?

2.3 Deelvragen

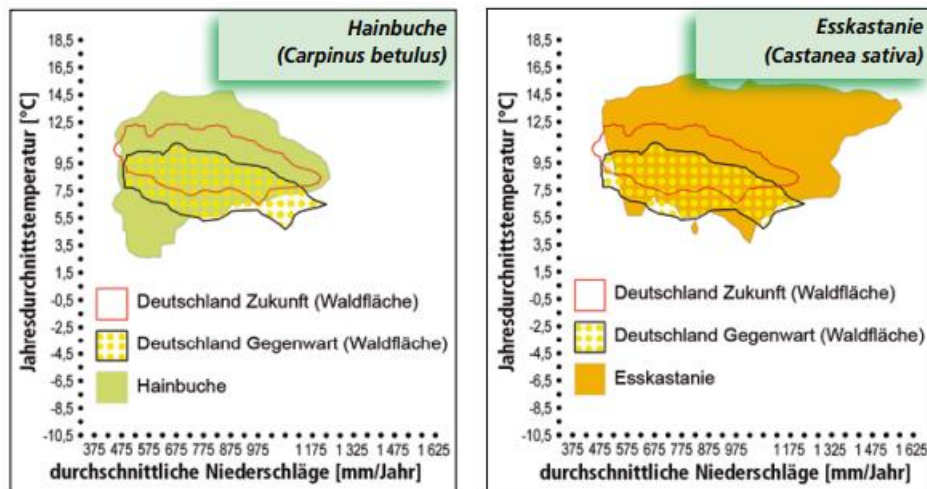
1. Wat is de klimaatenvelop van de beuk, zomereik, grove den, douglasspar, en fijnspar?
2. Wat is de ruimtelijke voorspelde verandering in temperatuur en neerslag in Nederland onder verschillende toekomstige KNMI klimaat scenario's?
3. Hoe beïnvloeden ruimtelijke trends in klimaatverandering in Nederland de potentiële verspreiding van de boomsoorten beuk, zomereik, grove den, douglasspar en fijnspar?

3. Methode

Al de data die gebruikt werd in dit onderzoek is al publiek beschikbaar gemaakt door verschillende organisaties. Het gaat hier om de ruimtelijke informatie over de actuele en toekomstig gemiddelde temperatuur en neerslagssom in Nederland (Bessembinder, et al., 2023), en informatie over de klimaatenvelopen, dat wil zeggen de klimaat gerelateerde potentiële verspreidingsgebieden van de beuk, zomereik, grove den, douglasspar, en fijnspar.

3.1 Deelvraag 1

De klimaatenvelopen van de beuk, zomereik, grove den, douglasspar, fijnspar en andere soorten zijn beschreven in het artikel, *Klimahüllen für 27 Waldbaumarten* (Kölling, 2007). Hier worden grafieken gebruikt met gemiddelde jaarlijkse neerslag op de x-as en de gemiddelde jaarlijkse temperatuur op de y-as (zie figuur 1). In deze grafiek liggen meerdere vlakken, van belang is het vlak dat de klimaatenvelop waarden van de boomsoort weergeeft, dit vlak is genoemd naar de boomsoort. Deze vlakken vertonen vaak veel nuance. Voor dit onderzoek worden de klimaatenvelop waarden versimpeld, door alleen naar de uiterste waarden te gebruiken. Het resultaat hiervan is een tabel met daarin de uiterste klimaat waarden voor de verschillende boomsoorten, die het potentiële, klimaat gebaseerde, verspreidingsgebied van een soort aangeven.



Figuur 1: Voorbeeld klimaatenvelopen van de haagbeuk (links) en tamme kastanje (rechts). Bron: Klimahüllen für 27 Waldbaumarten.

3.2 Deelvraag 2

De KNMI data is afkomstig van vijf Nederlandse weerstations in De Bilt, Den Helder, Groningen (stad), Maastricht, en Vlissingen. De door het KNMI berekende klimaatscenario's voor Nederland zijn gebaseerd op de SSP scenario's van het IPCC (2021). Om dit te doen moet de KNMI data eerst aangepast worden zodat de rijen van ieder tabel de weerstations zijn en de kolommen overeenkomen met jaargetal en klimaat scenario. Elk tabel gaat dan over één onderwerp, bijvoorbeeld gemiddelde jaarlijkse neerslag, of gemiddelde jaarlijkse temperatuur.

De klimaatgegevens van de vijf weerstations kunnen makkelijk worden weergegeven in ArcGIS pro doormiddel van een punten shapefile. Vervolgens kan de KNMI data hieraan worden gekoppeld. Door middel van extrapolatie kan van de gekoppelde data een kaart worden gemaakt die een beeld geeft van het gekozen klimaat onderwerp (bijvoorbeeld neerslag) in de vorm van heel Nederland. De gekozen extrapolatie methode is "Inverse Distance Weighted" (IDW) (Esri, sd). Het resultaat van de extrapolatie in ArcGIS is een rasterfile van de gekozen klimaat data in de vorm van Nederland. Een uniek rasterfile wordt gemaakt voor ieder klimaat scenario en voor ieder gewenste klimaat

onderwerp. De pixel grote van dit rasterfile is hierbij 100, dat is dus 100 vierkante meter in de werkelijkheid.

KNMI geeft gebruikers de mogelijkheid om temperatuur, neerslag, droogte, verdamping, en vochtigheid in de vijfweerstations te weergeven in 2033, 2050, 2100, en 2150. Hier is gekozen alle data te verzamelen van 2050, 2100, en 2150. Het jaar 2033 komt te vervallen omdat dit op relatief korte termijn is in de levenscyclus van een boom.

De KNMI data gebruikt codes voor ieder klimaat scenario. Deze codes worden ook gebruikt in dit onderzoek voor de scenario analyses. Voor de uitleg van de codes zie tabel 1.

Tabel 1: KNMI klimaat code uitleg

	Jaartal	Uitstoot broeikas gassen	Vocht
Code	2050, 2100, 2150	H, M	d, n
Betekenis	Jaartal waar de data over gaat.	H = Hoog uitstoot scenario M = Matig uitstoot scenario	d = droog scenario n = nat scenario

Voorbeeld code: 2050 Hd (2050, hoog uitstoot scenario, droog scenario).

De KNMI data bevat geen data over de jaarlijkse gemiddelde temperatuur. Data over de jaarlijkse gemiddelde minimum en jaarlijkse gemiddeld maximum temperatuur is wel beschikbaar. Door het gemiddelde te nemen van het jaarlijks minimum en jaarlijks maximum is handmatig een jaarlijks gemiddelde temperatuur kaart gebouwd.

3.3 Deelvraag 3

De toekomstige ruimtelijke verspreiding van de verschillende boomsoorten kan zichtbaar worden gemaakt door de eerder gebouwde kaarten uit te knippen op de klimaatenvelop waarden van de boomsoorten. Dit wordt gedaan door middel van een “*batch extract by attribute*” tool in ArcGIS pro. Hierbij wordt de gewenste klimaat kaart gebruikt als batch input raster. De hoogste en laagste waarden temperatuur en neerslag waarden van de beuk, zomereik, grove den, douglasspar, en fijnspar worden individueel ingevoerd als de clause. Zie figuur 2 voor een voorbeeld *clause*. De resultaten hiervan zijn potentiële verspreiding kaarten van deze boomsoort in de toekomstige scenario's.

Where VALUE is greater than 4,5

And VALUE is less than or equal to 13,5

+ Add Clause

Figuur 2: voorbeeld clause in batch extract by attribute

3.4 Methode schema

Het volgende schema is een versimpelde weergave van de methode (figuur 3).



Figuur 3: Methodiek schema

4. Resultaten

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de klimaatenveloppen van de beuk, zomereik, grove den, fijnspar, en douglasspar, en de klimaatkaarten gebouwd uit de KNMI data werden gecombineerd om toekomstige ruimtelijke verspreiding kaarten van de vijf soorten te bouwen.

4.1 Klimaatvelop beuk, zomereik, grove den, douglasspar, fijnspar soorten

In Tabel 2 zijn de klimaatenveloppen van de 5 geselecteerde boomsoorten zoals weergegeven in *Klimahüllen für 27 Waldbaumarten* (Kölling, 2007). Douglasspar heeft zowel voor het oogst gebied en kust gebied een klimaatvelop. Deze worden beide gebruikt. Hier is zichtbaar dat de beuk en eik dezelfde temperatuur oppervaarde hebben. Aangezien het in Nederland warmer wordt betekend dit dat de temperatuur kaarten van de beuk en de eik hetzelfde zijn. De naaldbomen hebben lagere temperatuur oppervwaarden dan de loofbomen. Dat zij gemiddeld lagere temperaturen kunnen verdragen gaat hun niet helpen in een steeds warmer wordend Nederland.

Alle soorten verschillen in neerslag waarden. Hier is opvallend dat de douglasspar's minimum neerslag zowel het hoogste en laagste is afhankelijk van of de kust of oogst gebied waarden worden gebruikt.

Tabel 2: Klimaatenveloppen van de beuk, zomereik, grove den, douglasspar, en fijnspar (Kölling, 2007). Aangegeven zijn de uit de enveloppen afgeleide bandbreedtes van respectievelijk jaarlijks gemiddelde temperatuur en neerslag, die de verbreidingsgebieden van de boomsoorten bepalen.

Boomsoort	Jaarlijks gemiddelde temperatuur in graden Celsius	Jaarlijks gemiddelde neerslag in millimeters
Beuk	4,5 – 13,5	475 – 1375
Zomereik	0,5 – 13,5	325 – 1275
Grove den	-4,5 – 10,5	375 – 1325
Douglasspar	-4,5 – 12,5 (kust) -0,5 – 11,5 (oogst gebied)	100 – 1625 (kust) 575 – 1625 (oogst gebied)
Fijnspar	-4,5 – 9,5	400 – 1200

4.2 Klimaat tabellen & kaarten

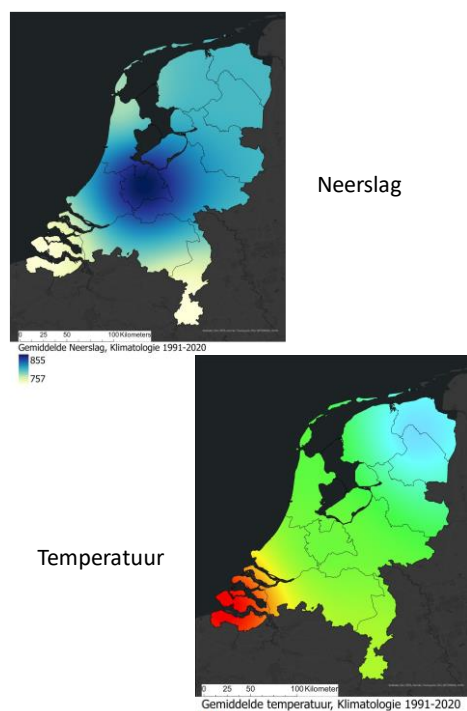
Klimaat kaarten voor jaarlijks gemiddelde neerslag en jaarlijks gemiddelde temperatuur zijn gebouwd. Deze gebruiken data zichtbaar in tabellen 3 en 4. Als voorbeeld zijn de klimaat kaart van 1991-2020 zichtbaar in figuur 4. Deze zijn alle zichtbaar in bijlage 1 en 2.

In alle scenario's blijft Nederland van 2050 tot 2150 aan het opwarmen. De opwarming is zoals verwacht groter in de hoge uitstoot scenario's. In de 2150 Hd en 2150 Hn scenario's komt nergens meer de temperatuur onder 0 graden Celsius.

De droge en natte scenario's hebben een onderling temperatuur verschil. De droge scenario's zijn allemaal warmer dan de natte scenario's.

Volgens alle KNMI klimaat scenario's wordt droger in Nederland. Er zit enige nuance in de verdroging in de natte scenario's. De 2150 Mn April & Mei neerslagtekort kaart weergeeft lokale vernatting in het noorden van Nederland met verdroging in de rest van het land. Deze trend zet zich niet door in de rest van het groei seizoen.

1991-2020



Figuur 4: de 1991-2020 neerslag en temperatuur kaarten

Tabel 3: Gemiddelde jaarlijkse temperatuur in grade Celsius bij elk weerstation volgens de KNMI klimaatscenario's.

Gemiddeld temperatuur													
Station	Klimatologie 1991-2020	2050 Md	2050 Mn	2050 Hd	2050 Hn	2100 Md	2100 Mn	2100 Hd	2100 Hn	2150 Md	2150 Mn	2150 Hd	2150 Hn
De Bilt	10,45	11,6	11,5	12,1	11,9	12,5	12,35	14,85	14,65	12,7	12,6	16,5	16,15
Den Helder	10,4	11,5	11,4	11,75	11,8	12,35	12,25	14,35	14,3	12,55	12,45	16	15,7
Groningen	9,7	10,9	10,75	11,3	11,15	11,75	11,6	14,05	13,85	11,95	11,85	15,7	15,4
Maastricht	10,65	11,9	11,75	12,35	12,2	12,8	12,6	15,35	15,05	13,1	12,85	17,05	16,65
Vlissingen	11,35	12,45	12,4	12,85	12,7	13,3	13,2	15,45	15,3	13,55	13,4	17,05	16,7

Tabel 4: Gemiddelde jaarlijkse neerslag in millimeters bij elk weerstation volgens de KNMI klimaatscenario's.

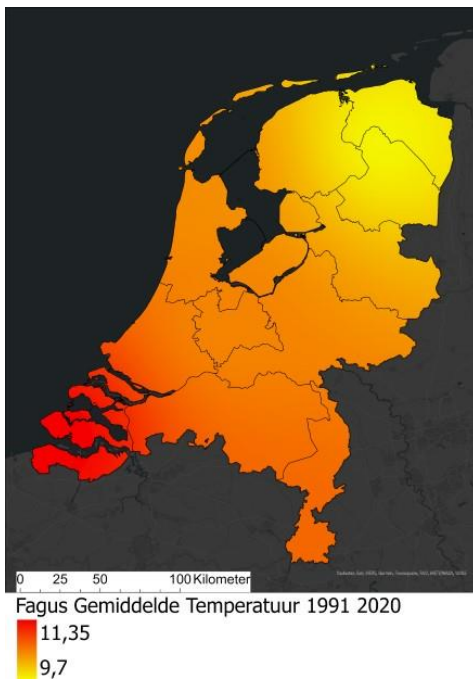
Neerslag													
Station	Klimatologie 1991-2020	2050 Md	2050 Mn	2050 Hd	2050 Hn	2100 Md	2100 Mn	2100 Hd	2100 Hn	2150 Md	2150 Mn	2150 Hd	2150 Hn
De Bilt	855	837,9	863,55	812,25	855	829,35	880,65	795,15	889,2	829,35	880,65	812,25	923,4
Den Helder	787	787	810,61	771,26	810,61	787	834,22	771,26	865,7	787	842,09	802,74	897,18
Groningen	805	805	821,1	788,9	837,2	788,9	837,2	796,95	893,55	780,85	829,15	829,15	925,75
Maastricht	757	749,43	764,57	734,29	764,57	726,72	787,28	704,01	794,85	719,15	779,71	726,72	817,56
Vlissingen	759	751,41	774,18	743,82	774,18	743,82	789,36	728,64	812,13	743,82	789,36	736,23	842,49

4.3 Ruimtelijke klimaatenvelop kaarten

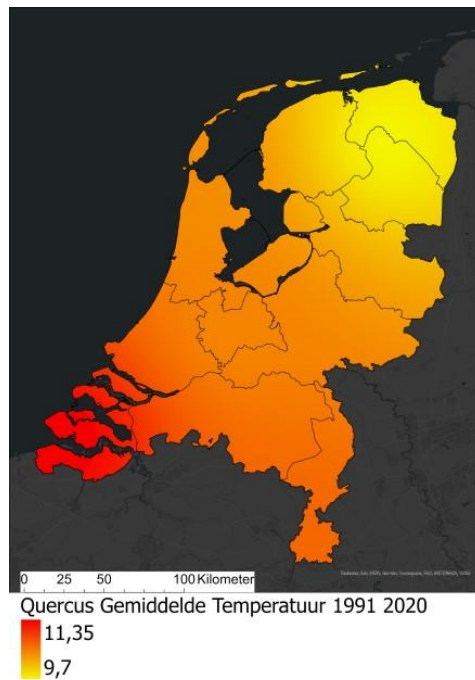
De klimaatenvelopkaarten zijn samengesteld op basis van gemiddelde jaarlijkse temperatuurkaarten, aangezien de gemiddelde jaarlijkse neerslag in geen enkel scenario buiten de grenzen van de klimaatenvelop valt. Deze kaarten zijn zichtbaar in figuren 5 tot en met 12. Ondanks het verwaarloosbare verschil in neerslag, is er wel een onderscheid in temperatuur tussen natte en droge klimaatscenario's. Hierdoor zijn droge scenario's over het algemeen minder gunstig voor boomsoorten. Een boomsoort die in alle toekomstige klimaatscenario's in Nederland groeigebied binnen de waarden van haar klimaatenvelop heeft, moet temperaturen van minstens 15,7 graden Celsius in haar klimaatenvelop hebben.

Opvallend is dat in de hoge uitstootscenario's van 2100 en 2150 er geen locaties in Nederland zijn waar de klimaatenvelopen van de onderzochte boomsoorten van toepassing zijn. Volgens de droge matige uitstootscenario verliezen de beuk en eik in 2150 groeigebied in Zeeland dat binnen de klimaatenvelop waarden valt. Grove den heeft geen enkel toekomstig scenario waarin een deel van Nederland binnen de waarden van de klimaatenvelop valt en heeft in de 1991-2020 kaart ook geen groei gebied binnen de klimaatenvelop waarden in het zuiden van Nederland. Bij gebruik van de kust klimaatenvelop waarden voor de douglasspar verdwijnt snel beschikbare ruimte. Geen enkel hoge uitstootscenario van 2100 en 2150 biedt ruimte binnen de klimaatenvelop waarden. Voor de oogstgebied klimaatenvelop waarden van de douglasspar is het beeld nog extremer, met geen enkel scenario naar 2050 waarin het groei gebied bin. Zelfs volgens de temperatuurklimatologiekaart van 1991-2020 heeft de fijnspar geen geschikte groeilocatie in Nederland binnen de klimaatenvelop waarden.

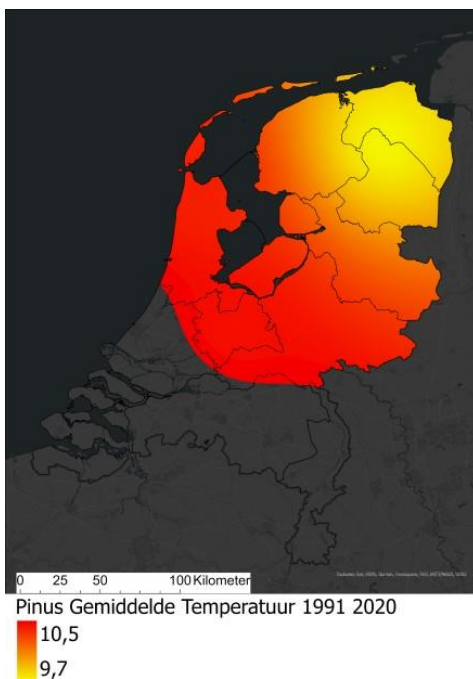
Alle soorten 1991-2020



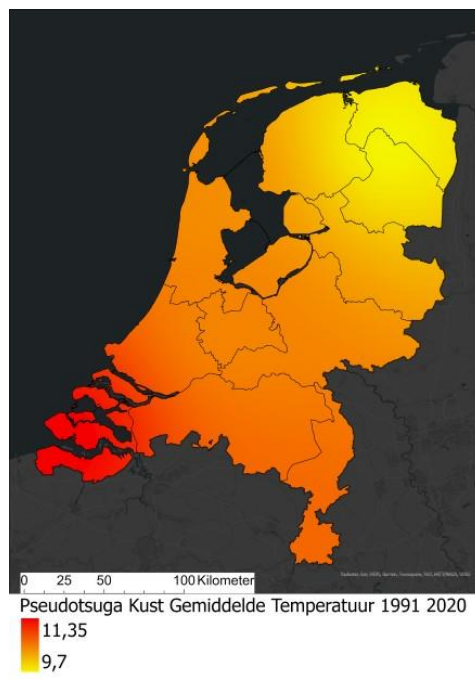
Beuk



Eik



Grove den

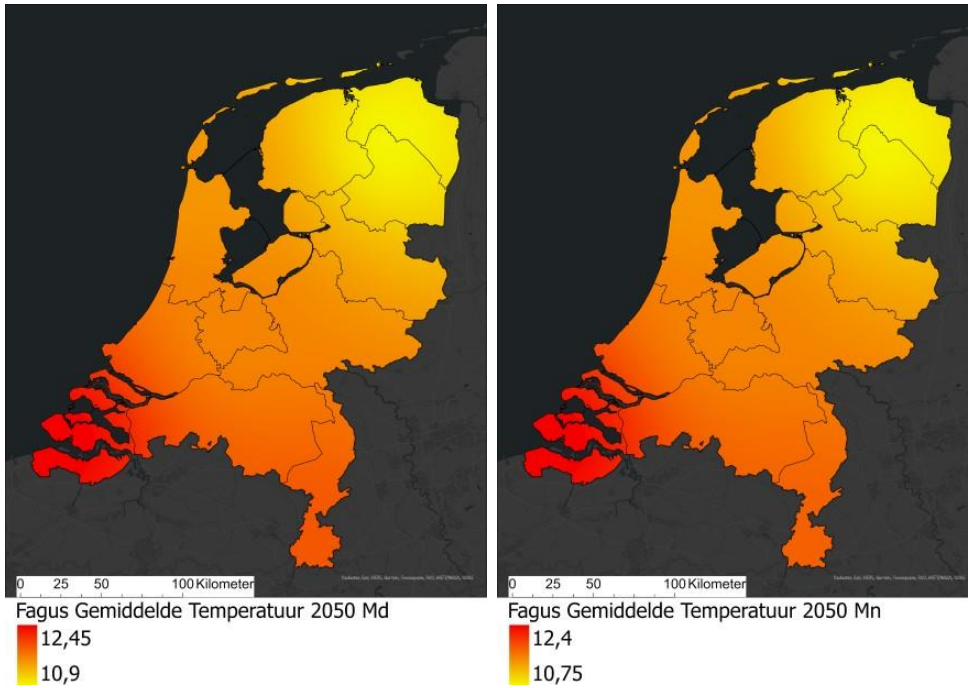


Douglasspar kust

Figuur 5: Klimaatenvelop gebied van alle soorten volgens de 1991-2020 klimatologie kaarten. De fijnspar heeft geen kaart omdat de fijnspar in de 1991-2020 kaart nergens in Nederland leefgebied binnen de klimaatenvelop waarden heeft.

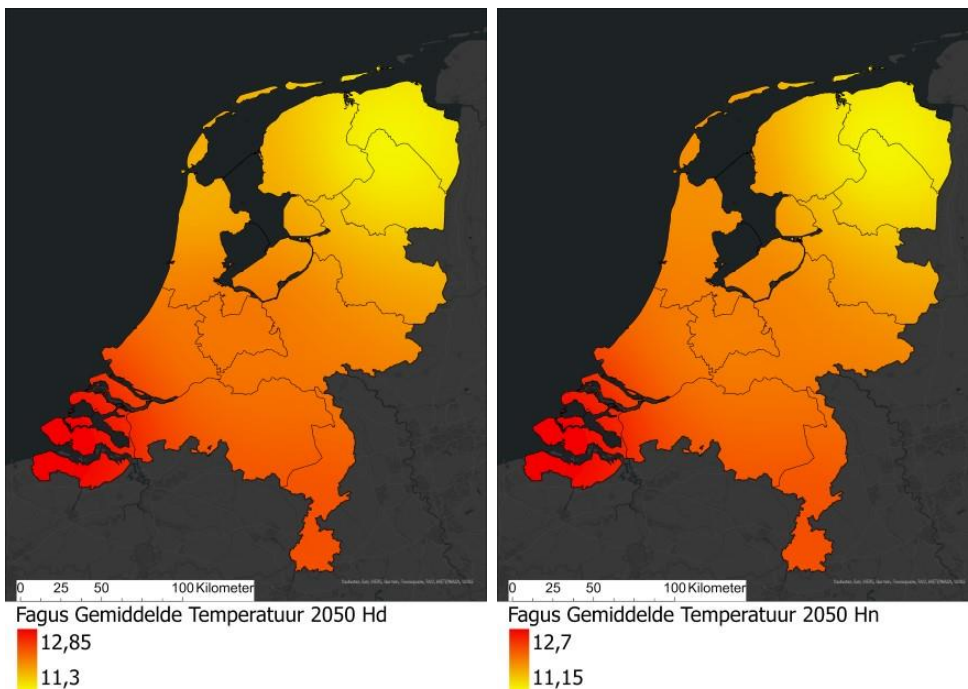
Beuk 2050

Matige uitstoot



Droog

Nat

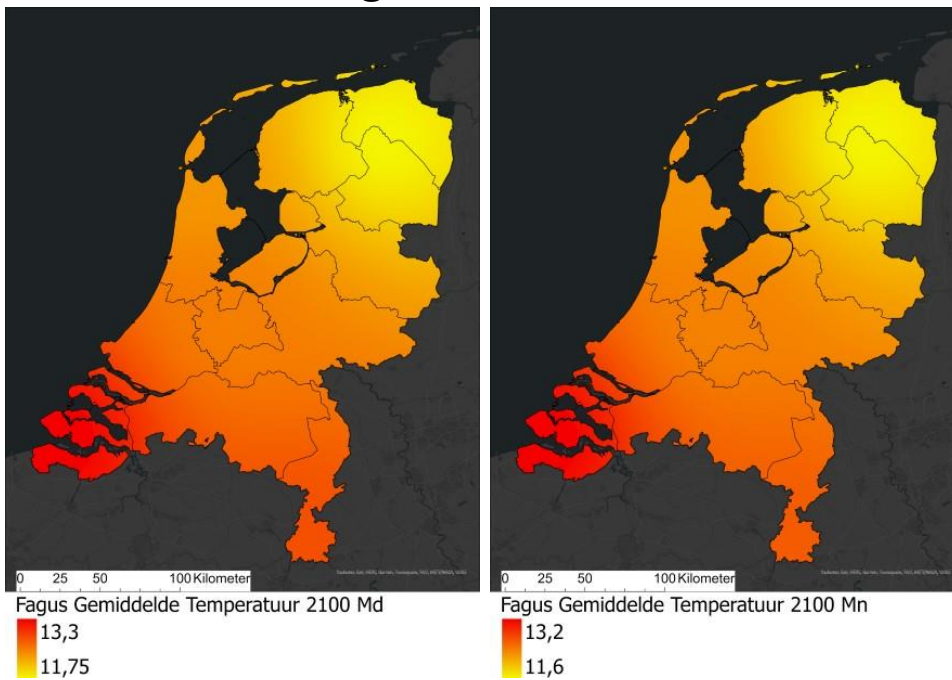


Hoge uitstoot

Figuur 6: In alle 2050 scenario's is overal in Nederland leefgebied voor de beuk binnen de envelopwaarden.

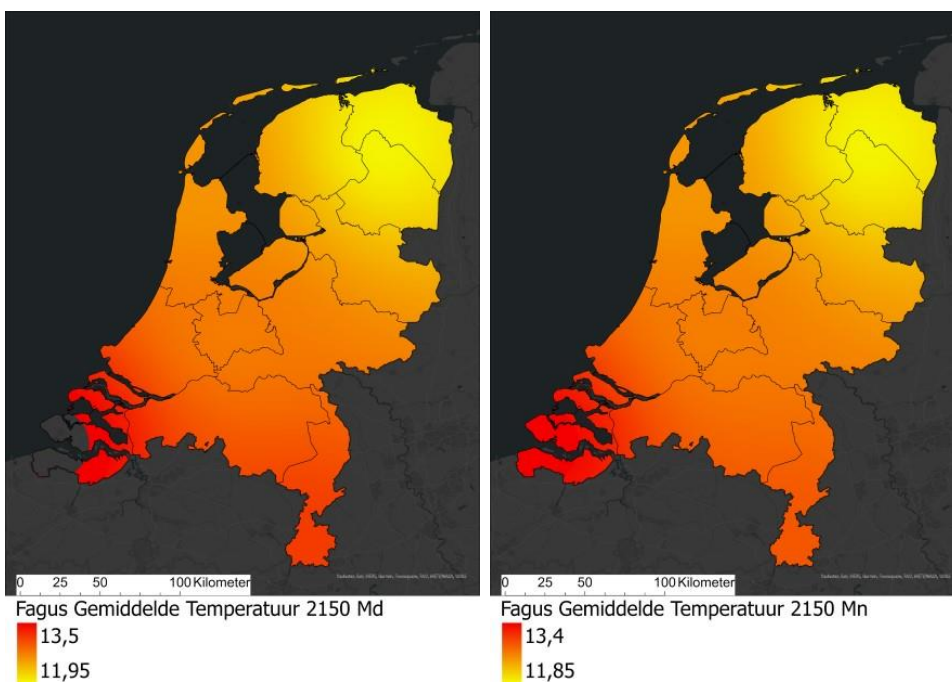
Beuk 2100 & 2150

Matige uitstoot 2100



Droog

Nat



Matige uitstoot 2150

Figuur 7: klimaatenvelop verspreiding voor de beuk in de matige scenario's in 2100 & 2150

Eik 2050

Matige uitstoot



Droog



Nat

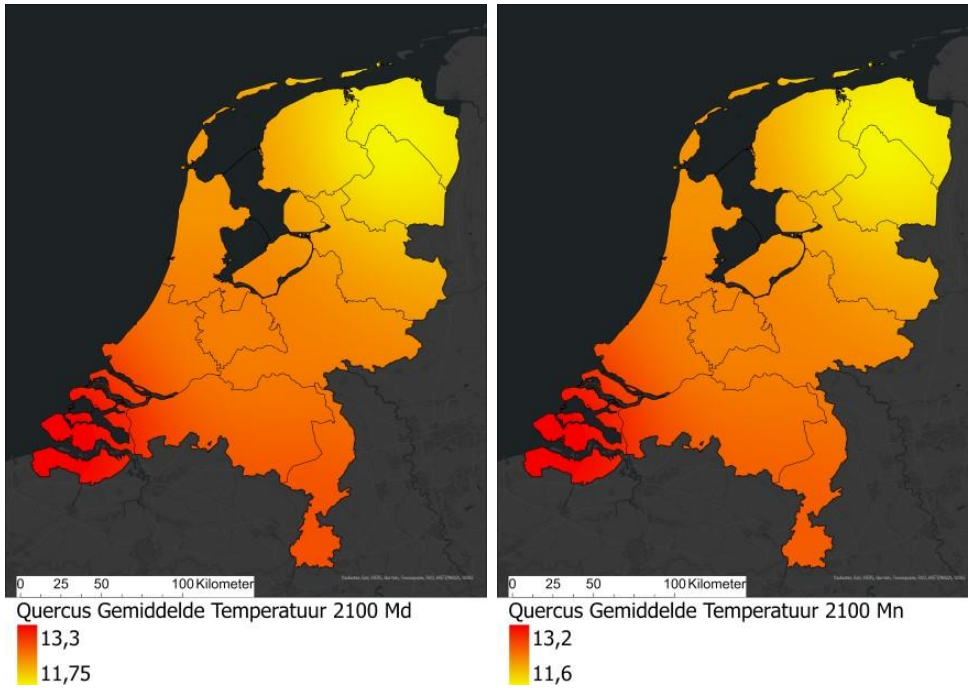


Hoge uitstoot

Figuur 8: In alle 2050 scenario's is overal in Nederland leefgebied voor de eik binnen de envelopwaarden

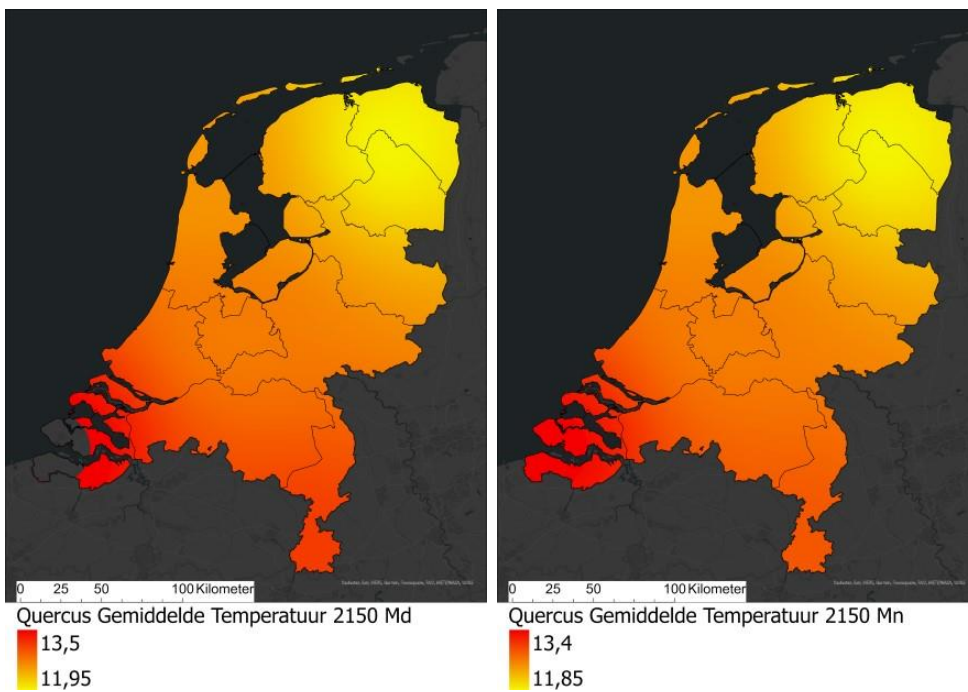
Eik 2100 & 2150

Matige uitstoot 2100



Droog

Nat

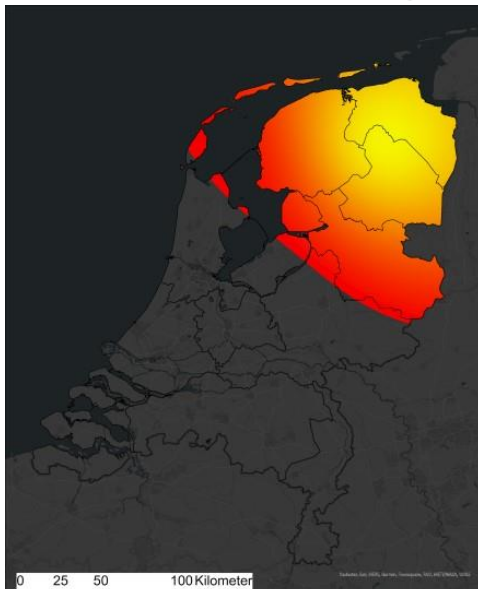


Matige uitstoot 2150

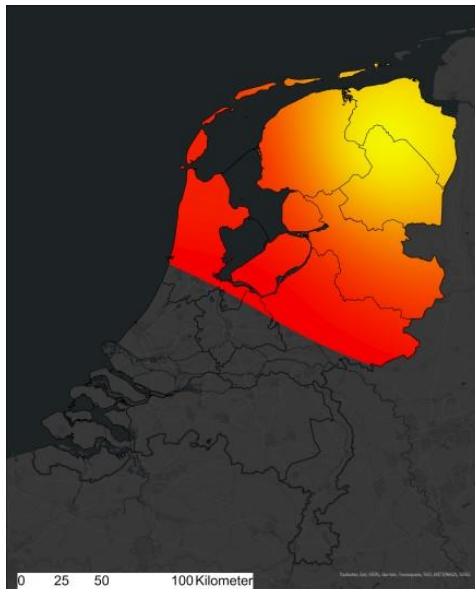
Figuur 9: klimaatenvelop verspreiding voor de eik in de matige scenario's in 2100 & 2150

Groeigebied Douglasspar 2050

Matige uitstoot



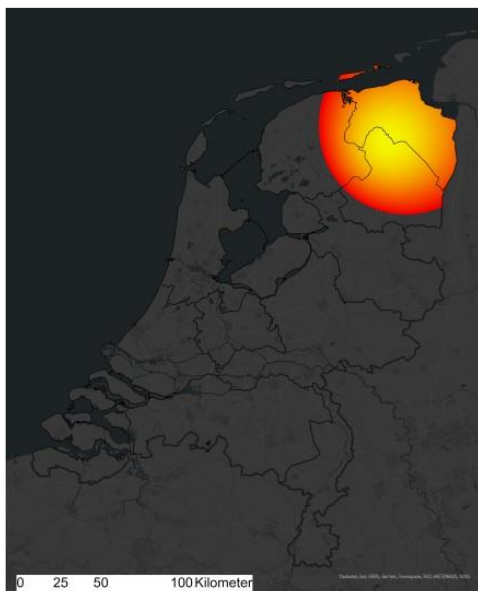
Pseudotsuga Gemiddelde Temperatuur 2050 Md
11,5
10,9



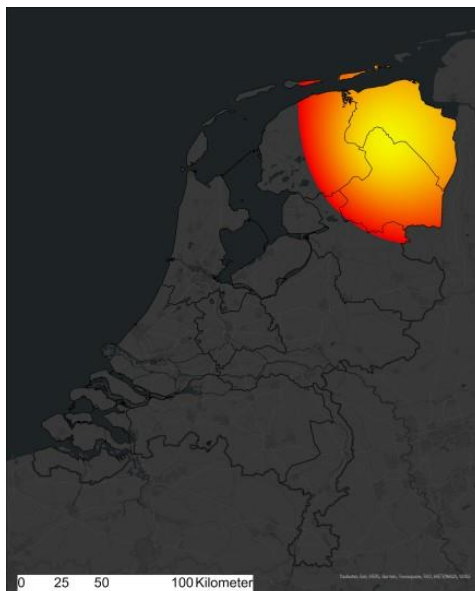
Pseudotsuga Gemiddelde Temperatuur 2050 Mn
11,5
10,75

Droog

Nat



Pseudotsuga Gemiddelde Temperatuur 2050 Hd
11,5
11,3



Pseudotsuga Gemiddelde Temperatuur 2050 Hn
11,5
11,15

Hoge uitstoot

Figuur 10: Groeigebied binnen klimaatenvlop waarden voor de douglasspar in 2050 volgens de oogstgebied waarden van de douglasspar

Kust Douglasspar 2050

Matige uitstoot



Droog

Nat

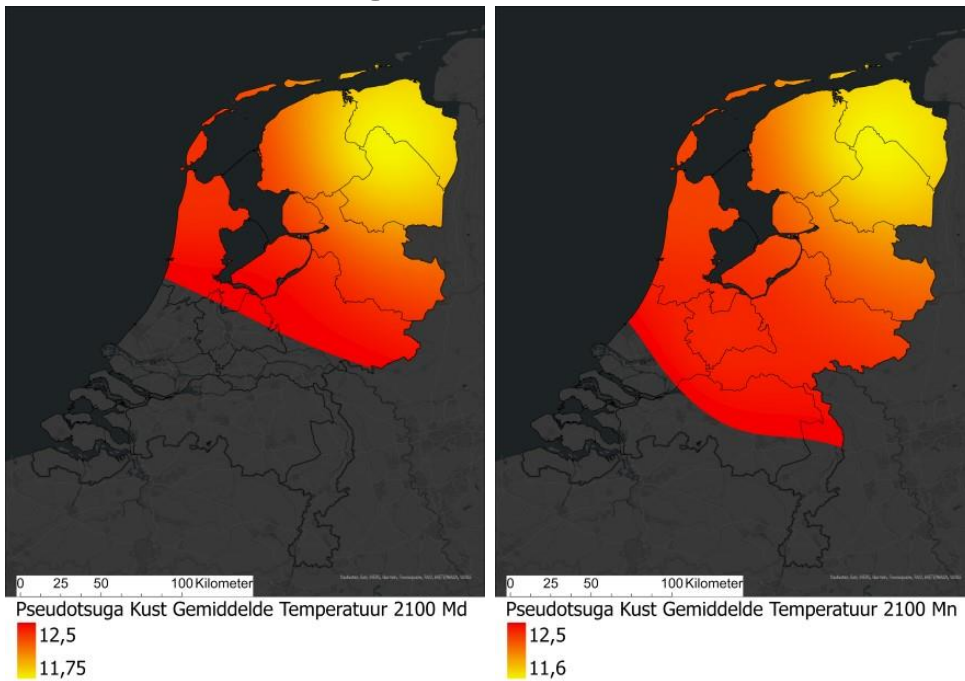


Hoge uitstoot

Figuur 11: Groeigebied binnen klimaatenvelop waarden voor de douglasspar in 2050 volgens de kustgebied waarden van de douglasspar

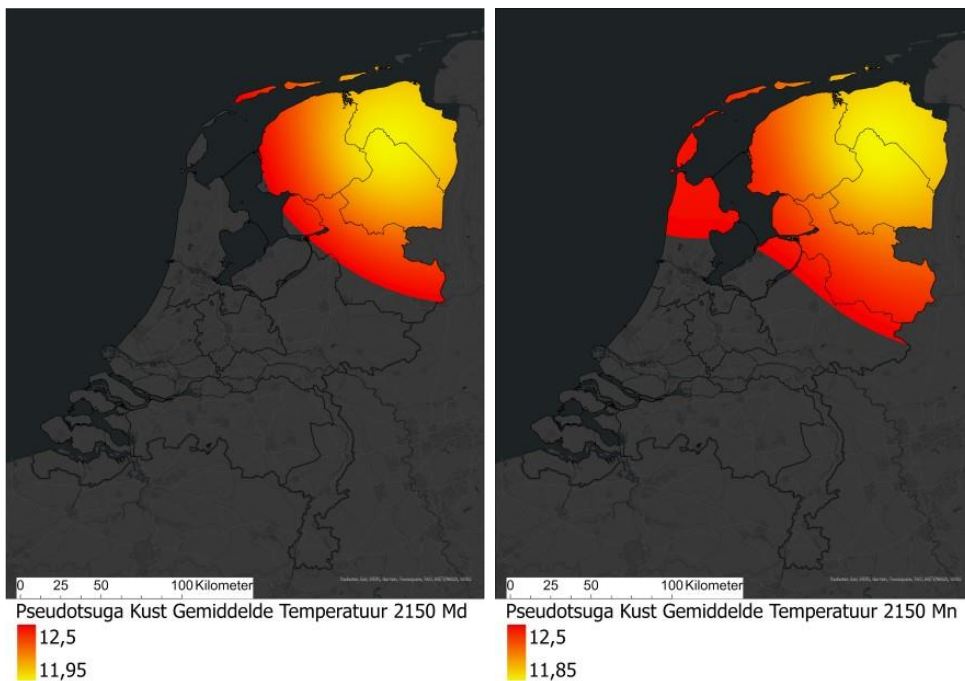
Kust Douglasspar 2100 & 2150

Matige uitstoot 2100



Droog

Nat



Matige uitstoot 2150

Figuur 12: Groeigebied binnen klimaatvelop waarden voor de douglasspar in 2100 & 2150 volgens de kustgebied waarden van de douglasspar

5. Conclusie

De beuk en eik staan er het best voor in de meerdere toekomstige scenario's. Ze hebben in alle 2050's scenario geen wegval van groeigebied binnen de klimaatvelop waarden. En in de droge matige uitstoot scenario verliezen ze alleen in 2150 groeigebied in Zeeland. De hoge uitstoot scenario's zijn niet gunstig voor de beuk en eik, in 2100 is er al nergens in Nederland gebied dat binnen de klimaatvelop waarden valt.

Grove den heeft geen toekomstig scenario's waarin er plek is in Nederland waar de temperatuur binnen de klimaatvelop waarden valt. De verwachting is dan ook dat de gezondheid van de grove den in het jaar 2050 achteruit begint te gaan en dat mortaliteit verhoogt. Ook in de 1991-2020 klimatologie kaart heeft de grove den in het zuiden van Nederland geen groei gebied binnen de klimaatvelop waarden.

Douglasspar ervaart al in 2050 een serieuze groeigebied vermindering. In het meest gunstig scenario, matig nat, valt zo grofweg de helft van Nederland weg. In matig droog blijft grofweg één derde over. En in de hoge uitstoot scenario's is alleen Groningen en een deel van Drenthe en Friesland nog binnen de klimaatvelop waarden. Het beeld is minder extreem als de kust waarden van douglasspar worden gebruikt. Hierin blijft er tot 2150 gebied over voor de douglasspar, met veel verschil in gebied verlies tussen de matig droge en matig natte scenario's.

De Fijnspar heeft huidig en in de toekomst nergens in Nederland groeigebied binnen de klimaatvelop waarden.

6. Discussie

De huidige observaties laten zien dat de Fijnspar momenteel nergens in Nederland gedijt binnen de klimaatvelop. Dit komt tot uiting in de aantasting van Fijnsparren in Nederland door parasieten en schimmels, wat hoofdzakelijk wordt toegeschreven aan de te warme omgeving voor deze boomsoort in Nederland, resulterend in verzwakking (Boeren, 2022). Het is echter onduidelijk of deze observatie kan worden toegepast op andere boomsoorten. Bijvoorbeeld, klimatologische kaarten geven aan dat de Grove den in het zuiden van Nederland ook geen groeigebied binnen de klimaatvelop heeft. Of deze Grove dennen in werkelijkheid minder gezond zijn dan die in het noorden, gezien de inheemse aard van de soort die al 12.000 jaar in Nederland aanwezig is (Wolterson), is nog onbeantwoord. Het is mogelijk dat de den resistent is tegen ziekten en parasieten, waardoor klimaatverandering minder impact heeft op haar gezondheid. Deze hypothese vereist verder onderzoek.

Indien de trend van de Fijnspar als voorspelling kan dienen voor andere boomsoorten, is het van belang nauwlettend te kijken naar welk klimaatscenario zich in de werkelijkheid ontvouwt. Bij overeenkomstige temperaturen met de hoge uitstootscenario's kunnen de belangrijkste boomsoorten, zoals de beuk en de eik, onder druk komen te staan. Beuken, eiken en dennen uit warmere landen zoals Frankrijk en Spanje zijn mogelijk resistent tegen hogere temperaturen en kunnen wellicht in Nederland worden geplant. Vervolgonderzoek kan inzicht verschaffen in de mogelijkheden van deze exotische bomen. De vraag blijft echter of loofbomen late vorst kunnen overleven, aangezien het groeiseizoen steeds vroeger in het voorjaar begint, wat het risico op schade door late vorst verhoogt. Vorst kan de ontwikkelende knoppen van loofbomen schaden en daarmee de vitaliteit van de boom verminderen.

Hoewel de toekomstige gemiddelde jaarlijkse neerslag binnen de klimaatvelop van alle boomsoorten valt, betekent dit niet dat droogte geen impact zal hebben op het toekomstige bos. Het gebruik van gemiddelde jaarlijkse neerslag als enige maatstaf voor vochtbehoefte verliest nuance, aangezien factoren zoals neerslagtekort in het groeiseizoen en meerjarige aaneen lopende droogte niet worden meegenomen in de klimaatveloppen. De beschikbare KNMI-data over neerslagtekort in het groeiseizoen kan mogelijk worden gebruikt, maar informatie over meerjarige droogte ontbreekt. Een diepgaander onderzoek naar droogte in de toekomst en droogtetolerantie van boomsoorten kan bijdragen aan een nauwkeurigere voorspellingskaart.

Het planten van het bos van de toekomst is niet alleen een dringende taak, maar ook een essentieel onderdeel van duurzaamheid in bosbeheer. De onzekerheden met betrekking tot de toekomst vormen een uitdaging, vooral gezien het sombere vooruitzicht dat naar voren komt in de hoge uitstootscenario's, wat zelfs twijfels oproept over het voortbestaan van de meest voorkomende Nederlandse loofboomsoorten.

De kaarten die in dit onderzoek zijn ontwikkeld, streven naar meer duidelijkheid en bieden een waardevol instrument voor het plannen van duurzame bosgebieden. Echter, ondanks deze inspanningen blijft de toekomst onvoorspelbaar, en het feit dat onze individuele invloed beperkt is, benadrukt de noodzaak van collectieve inzet voor duurzame praktijken.

Het gebrek aan garanties voor het gedijen en gezond blijven van boomsoorten in elke mogelijke toekomst benadrukt de complexiteit van ecologische duurzaamheid. Om duurzaam bosbeheer te waarborgen, is het cruciaal dat we niet alleen anticiperen op klimaatrends, maar ook blijven investeren in onderzoek naar en implementatie van klimaatbestendige boomsoorten. Alleen door voortdurende aandacht voor duurzaamheidsprincipes kunnen we ervoor zorgen dat het bos van de toekomst niet alleen levensvatbaar is, maar ook bijdraagt aan het behoud van ecologische balans en biodiversiteit op de lange termijn.

Bibliografie

- Bauhus, J., Forrester, D., Gardiner, B., Jactel, H., Vallejo, R., & Pretzsch, H. (2017). *Ecological Stability of Mixed-Species Forests*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bessembinder, J., Bintanja, R., Dorland, R. v., Homan, C., Overbeek, B., Selten, F., & Siegmund, P. (2023, oktober 09). *KNMI'23 klimaatscenario's*. Opgehaald van KNMI: https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf
- Boeren, I. (2022, februari 9). *Hoe kevers en schimmels naaldbossen uitdunnen*. Opgehaald van EOS Wetenschap: <https://www.eoswetenschap.eu/natuur-milieu/hoe-kevers-en-schimmels-naaldbossen-uitdunnen>
- Caudullo, G., Welk, E., & San-Miguel-Ayanz, J. (2017, mei 07). *Chorological maps for the main European woody species*. Opgehaald van sciencedirect: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.05.007>
- Climate Neutral Group. (2021, October 7). *Five future scenarios' Climate Report AR6 IPCC 2021*. Opgehaald van climateneutralgroup: <https://www.climateneutralgroup.com/en/news/five-future-scenarios-ar6-ipcc/>
- Compendium voor de Leefomgeving. (2023, augustus 15). *Temperatuur in Nederland en mondiaal, 1907 - 2022*. Opgehaald van clo: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0226-temperatuur-mondiaal-en-in-nederland#:~:text=De%20jaargemiddelde%20temperatuur%20is%20trendmatig,%C2%B0C%20per%20jaar%20geweest.>
- Ertsen, A., Alkemade, J., & Wassen, M. (1998). Calibrating Ellenberg indicator values for moisture, acidity, nutrient availability and salinity in the Netherlands. *Plant Ecology*, 113–124.
- Esri. (sd). *How IDW Work*. Opgehaald van ArcGIS Pro: [https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm#:~:text=Inverse%20distance%20weighted%20\(IDW\)%20interpolation,of%20a%20ocationally%20dependent%20variable.](https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm#:~:text=Inverse%20distance%20weighted%20(IDW)%20interpolation,of%20a%20ocationally%20dependent%20variable.)
- Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. (sd). *BAUMARTENEIGNUNGS- UND VULNERABILITÄTSKARTEN*. Opgehaald van fva-bw: <https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/klimakarten>
- FVA Baden-Württemberg. (2019, December). *Leitfaden für das Portal Klimafolgenforschung FVA-BW*. Opgehaald van fva-bw: https://www.fva-bw.de/fileadmin/user_upload/Daten_und_Tools/Geodaten/Klimakarten/leitfaden_baumarteneignung_vulnerabilitaetskarten_2019.pdf
- Hlásny, T., Mátyás, C., Seidl, R., Kulla, L., Merganičová, K., Trombik, J., . . . Konôpka, B. (2014). Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Central European Forestry Journal*, 5 - 18.
- IPCC. (2014). *Future Climate Changes, Risks and Impacts*. Opgehaald van ar5-syr.ipcc: https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_futurechanges.php
- IPCC. (2023). *CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report, Summary for Policymakers*. Opgehaald van IPCC.ch: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

- klimateffectatlas. (2023). *klimateffectatlas*. Opgehaald van klimateffectatlas: <https://www.klimateffectatlas.nl/nl/>
- KNMI. (2021). *KNMI Klimaatsignaal'21: Hoe het klimaat in Nederland snel verandert*. De Bilt: KNMI.
- Kölling, C. (2007). Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *AFZ-Der Wald* 23, pp. 1242-1245.
- Lerink, B., Toor, M. v., König, L., & Nabuurs, G. (2019, oktober). Heeft het bos stilgestaan in 2018? *Vakblad Natuur Bos Landschap*, pp. 28 - 30.
- Lynas, M., Houlton, B., & Perry, S. (2021). Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*, 16(11).
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. (2020). *Bos voor de toekomst*. Den Haag: Publicatie-nr. 1120-001.
- Nabuurs, G. (2020, Mei 11). *Klimaatbestendige bossen in Nederland en Europa*. Opgehaald van weblog.wur: <https://weblog.wur.nl/uitgelicht/klimaatlim-bosbeheer-in-nederland-en-europa/>
- Orman, O., Adamus, M., & Szewczyk, J. (2016). Regeneration processes on coarse woody debris in mixed forests: do tree germinants and seedlings have species-specific responses when grown on coarse woody debris? *Journal of Ecology*, 1809–1818.
- Peters, R. (1995). Inheemse boomsoorten? *Nederlands Bosbouw tijdschrift* 67, 119 - 123.
- Pretzsch, H., Schütze, G., & Uhl, E. (2012). Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *plant biology*, 483-495.
- Ravesloot, M. (2022). *CSI Trees: Klimaatbomen met toekomst*. Opgehaald van WUR: <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksprojecten-Inv/soorten-onderzoek/kennisonline/csi-trees-klimaatbomen-met-toekomst.htm>
- Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., Tanara, R. T., Bacher, S., Galil, B. S., . . . Vandvik, V. (2023). *Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Duitsland: IPBES.
- Schuur, E. a., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., . . . Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *nature*, 171–179. Opgehaald van <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Thurm, E. A., Hernández, L., Baltensweiler, A., Ayan, S., Rasztovits, E., Bielak, K., . . . Falk, W. (2018). Alternative tree species under climate warming in managed European. *Forest Ecology and Management*, 485–497.
- Van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S., Van Ulden, A., Haarsma, R. J., Sterl, A., Severijns, C., . . . Dijkstra, H. A. (2009, Januari 21). Western Europe is warming much faster than expected. *Clim. Past*, 5, 1–12. Opgehaald van copernicus: <https://cp.copernicus.org/articles/5/1/2009/>
- Walentowski, H., Falk, W., Mette, T., Kunz, J., Bräuning, A., Meinardus, C., . . . Leuschner, C. (2017). *Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: A case study in southern Germany*. *Annals of Forest Research*.

Wijk, S. v. (2019). *Bomen voor klimaatadaptatie*. Zaandam: Natuur en milieufederatie Noord-Holland.

Wolterson, J. F. (sd). *Veredelingsaspecten van Pinus sylvestris L. in Nederland*. Wageningen: Bosbouwproefstation.

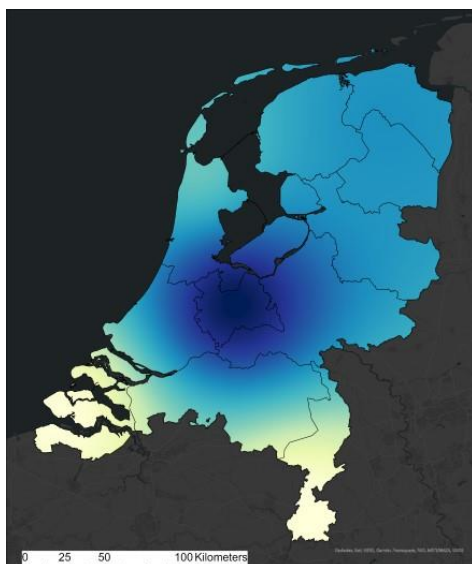
Zohner, C. M., Mo, L., Renner, S. S., Svenning, J.-C., Vitasse, Y., Benito, B. M., . . . Crowther, T. W. (2020, Mei 11). *Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia*. Opgehaald van pnas: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1920816117>

Bijlage

Bijlage 1: Gemiddelde jaarlijkse neerslag kaarten

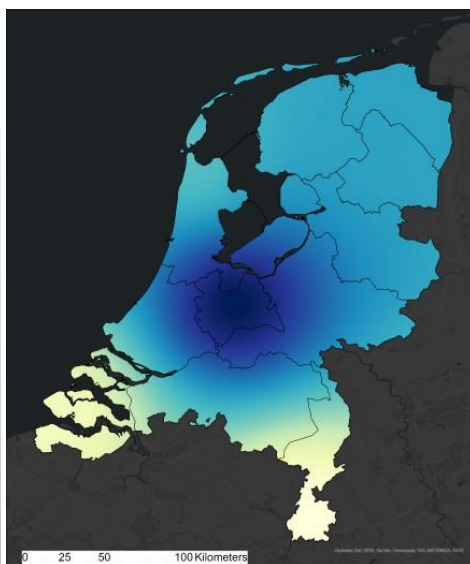
Neerslag 2050

Matige uitstoot



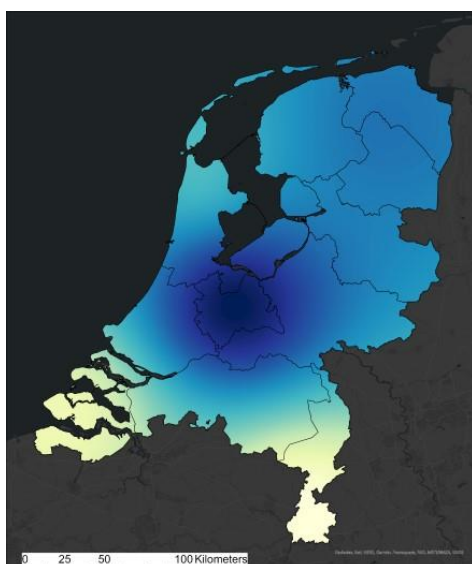
Gemiddelde Neerslag, 2050 Md
837,9
749,43

Droog

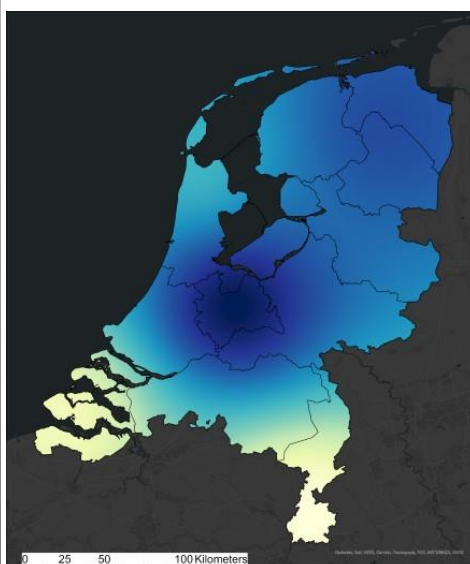


Gemiddelde Neerslag, 2050 Mn
863,55
764,57

Nat



Gemiddelde Neerslag, 2050 Hd
812,25
734,29

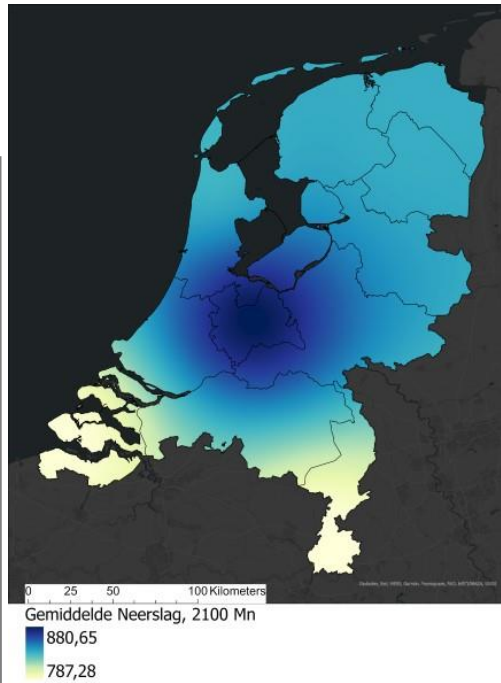
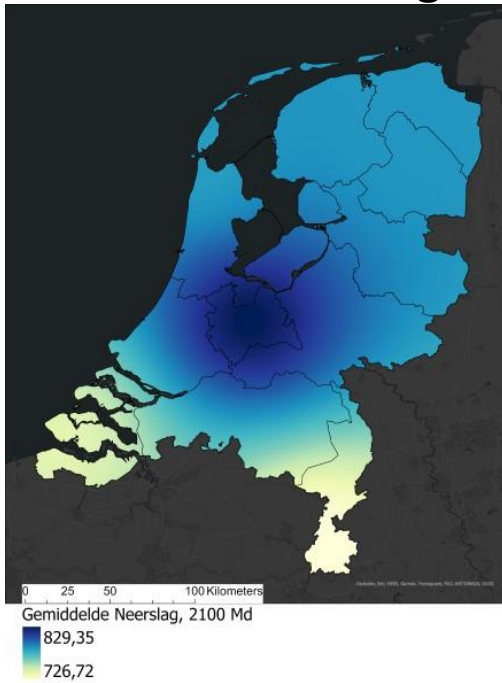


Gemiddelde Neerslag, 2050 Hn
855
764,57

Hoge uitstoot

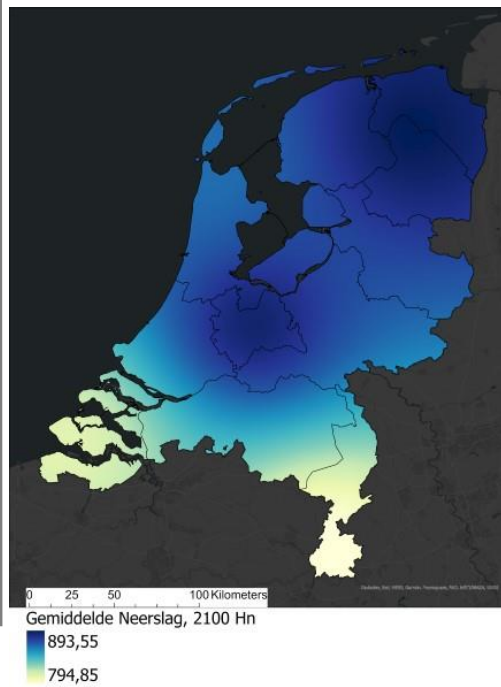
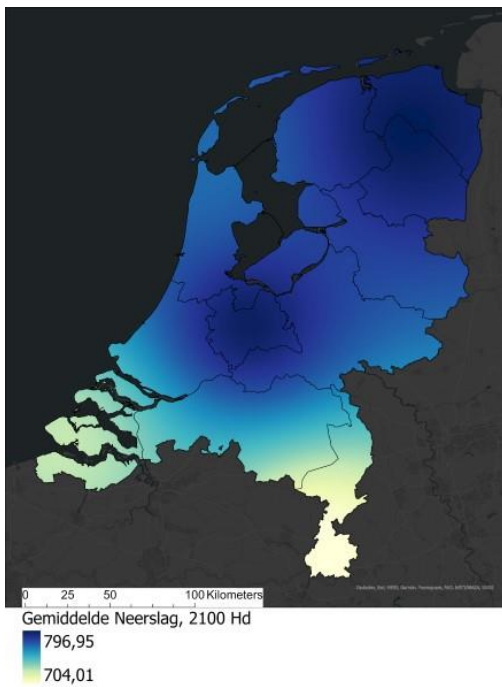
Neerslag 2100

Matige uitstoot



Droog

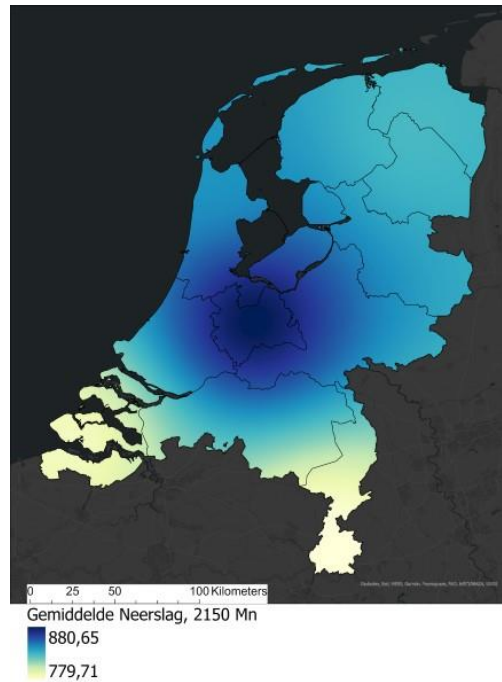
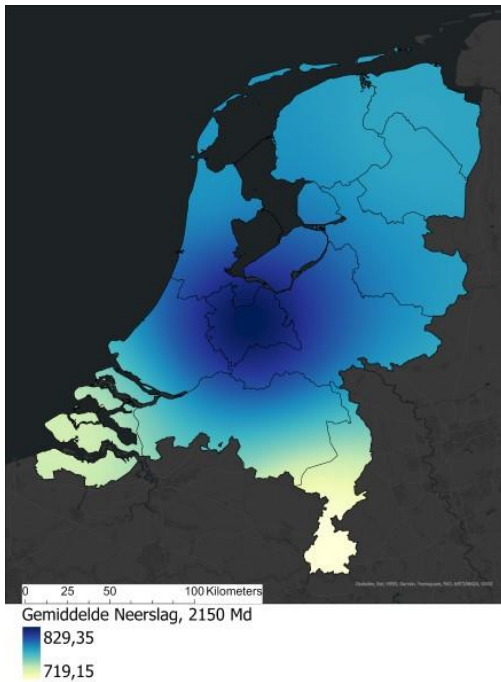
Nat



Hoge uitstoot

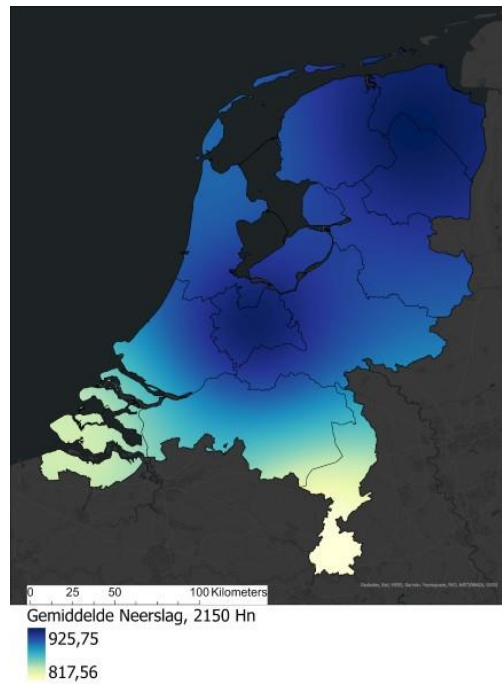
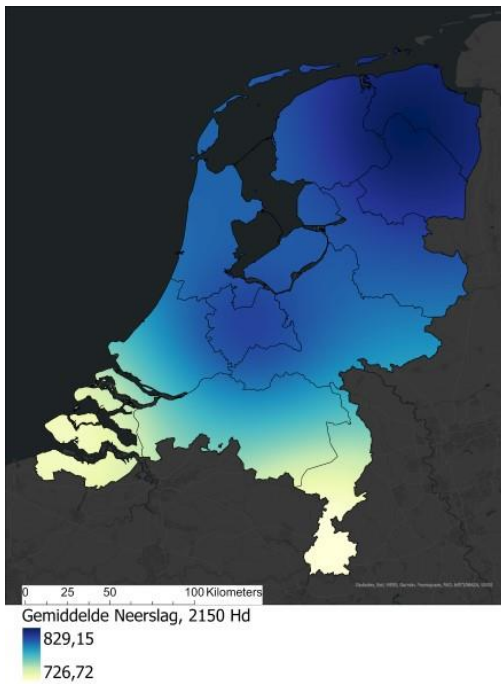
Neerslag 2150

Matige uitstoot



Droog

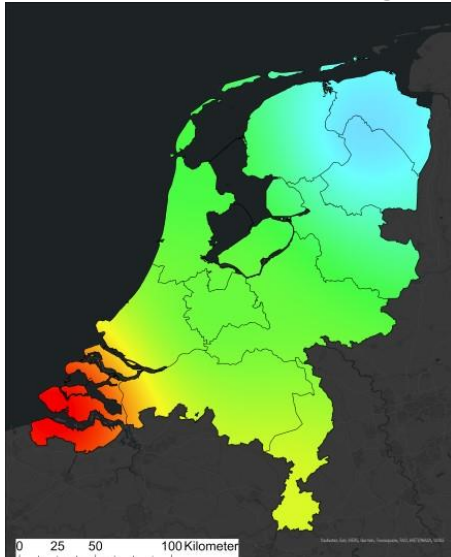
Nat



Hoge uitstoot

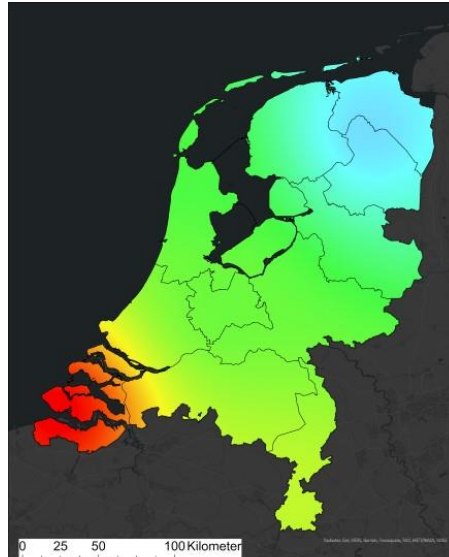
Temperatuur 2050

Matige uitstoot



Gemiddelde temperatuur, 2050 Md

12,45
10,9

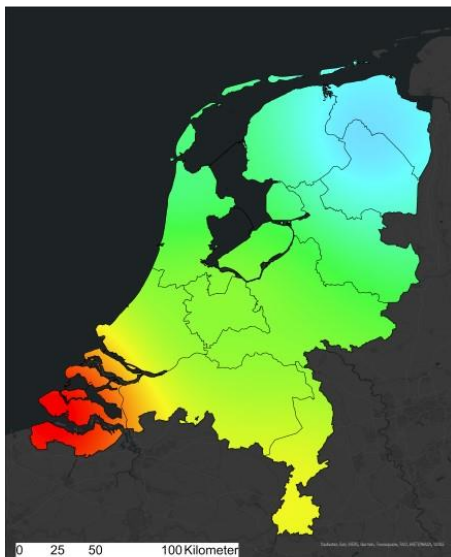


Gemiddelde temperatuur, 2050 Mn

12,4
10,75

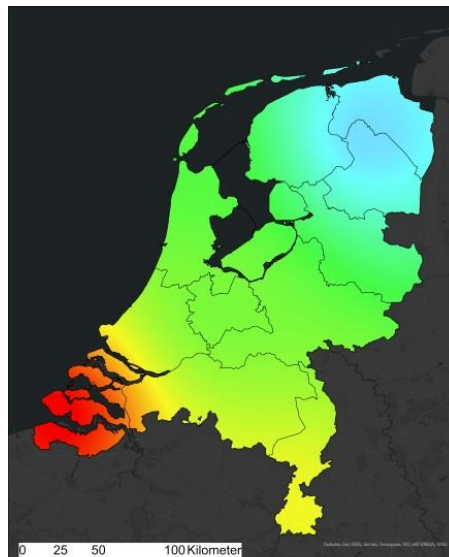
Droog

Nat



Gemiddelde temperatuur, 2050 Hd

12,85
11,3



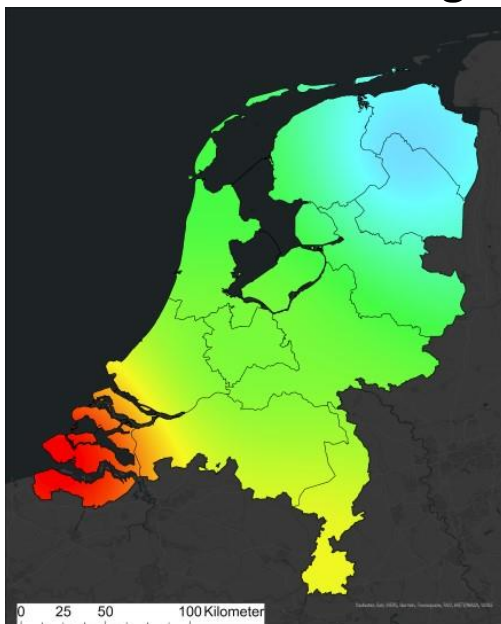
Gemiddelde temperatuur, 2050 Hn

12,7
11,15

Hoge uitstoot

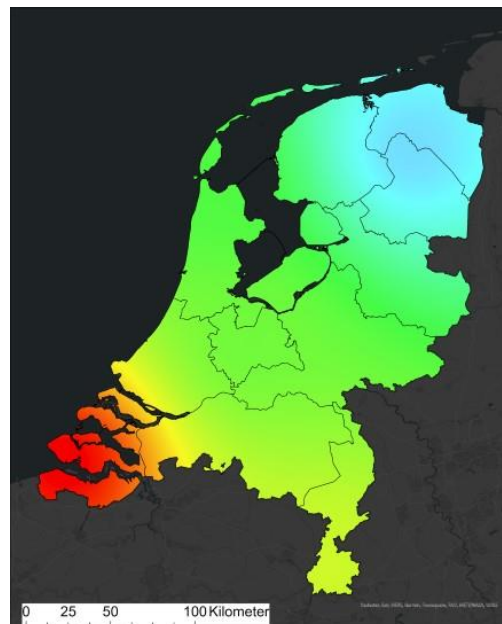
Temperatuur 2100

Matige uitstoot



Gemiddelde temperatuur, 2100 Md

13,3
11,75

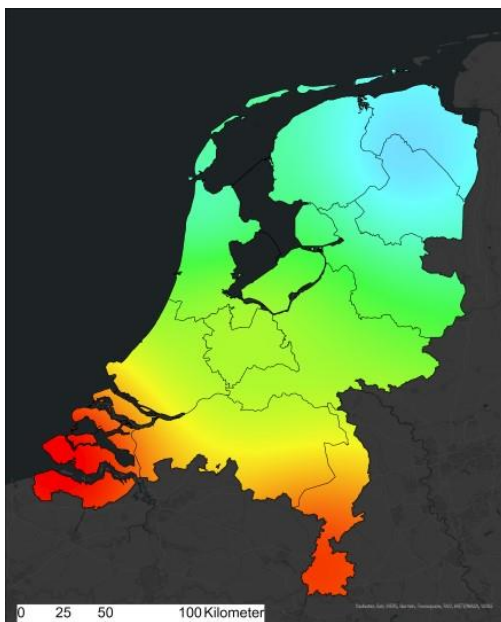


Gemiddelde temperatuur, 2100 Mn

13,2
11,6

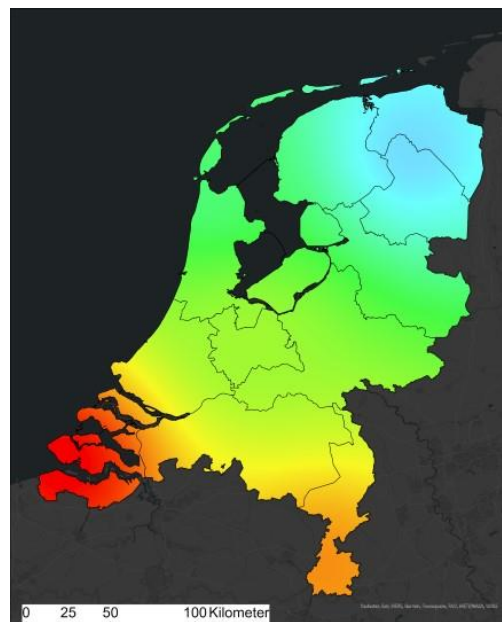
Droog

Nat



Gemiddelde temperatuur, 2100 Hd

15,45
14,05



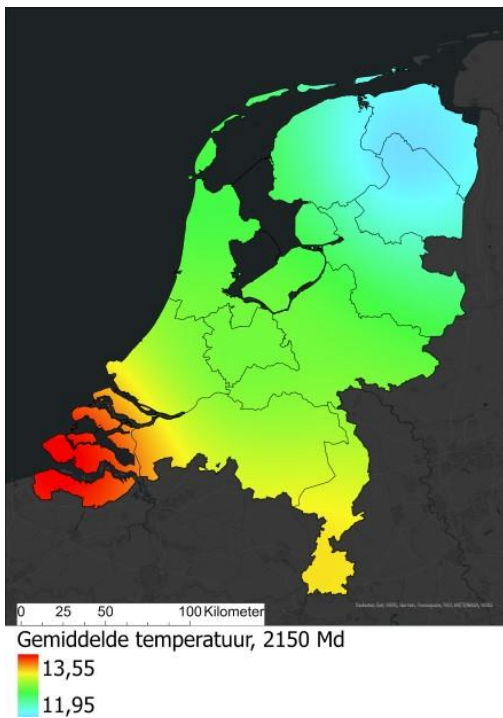
Gemiddelde temperatuur, 2100 Hn

15,3
13,85

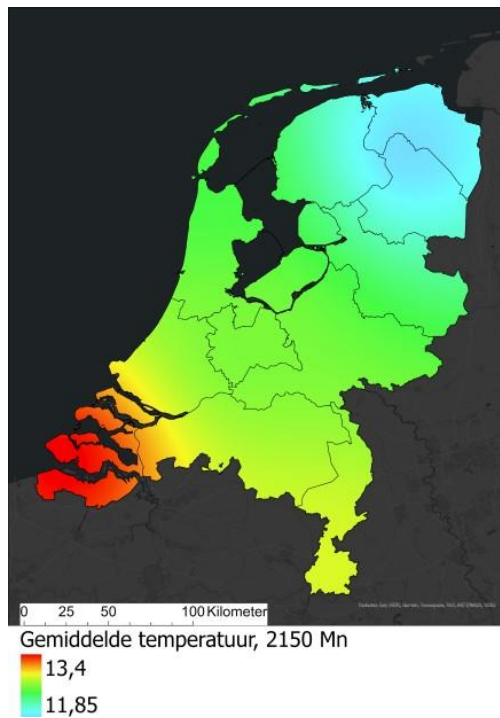
Hoge uitstoot

Temperatuur 2150

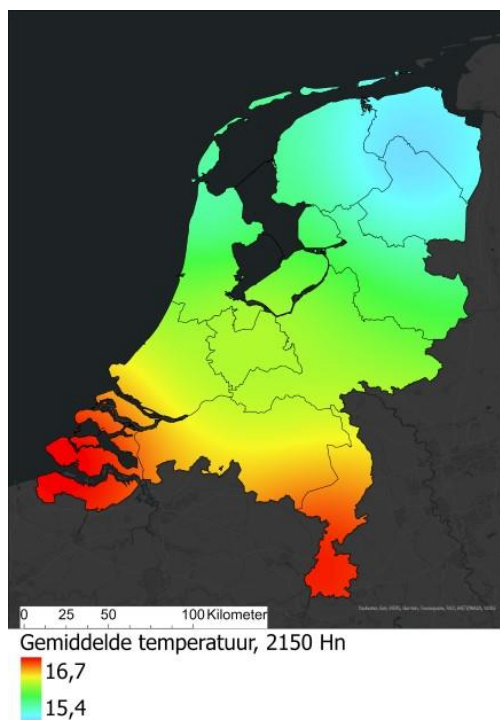
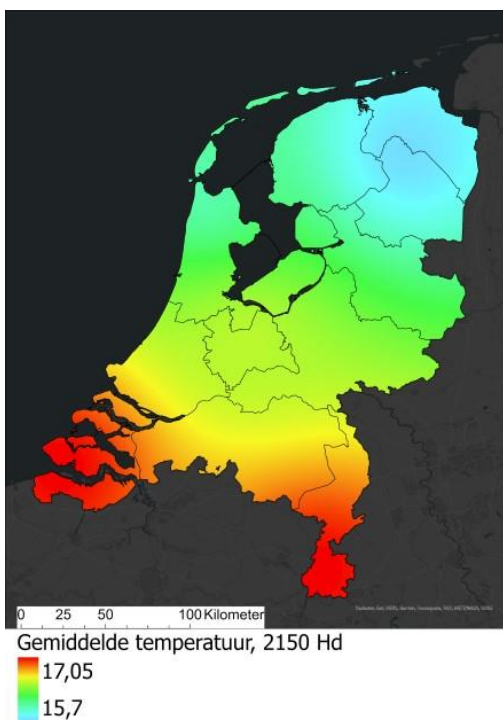
Matige uitstoot



Droog



Nat



Hoge uitstoot