



Vlaanderen
is wetenschap

Kartering van landschappen met houtkanten en bomenrijen in 2024

Toelichting bij de digitalisatie van open en
gesloten landschappen op basis van actuele
topografische kaarten

Myrte Matthijs, Luc De Keersmaeker

**INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK**

Auteurs:

Myrte Matthijs, [Luc De Keersmaeker](#) 

Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

Reviewers:

Jeroen Vanden Borre

Vestiging:

Herman Teirlinckgebouw

INBO Brussel

Havenlaan 88 bus 73, 1000 Brussel

vlaanderen.be/inbo

e-mail:

luc.dekeersmaeker@inbo.be

Wijze van citeren:

Matthijs M., De Keersmaeker L. (2025). Kartering van landschappen met houtkanten en bomenrijen in 2024. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2025 (3). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

DOI: doi.org/10.21436/inbor.117311258

D/2025/3241/039

Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2025 (3)

ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:

Hilde Eggermont

Foto cover:

Yves Adams / Vildaphoto



Kartering van landschappen met houtkanten en bomenrijen in 2024

Toelichting bij de digitalisatie van open en gesloten
landschappen op basis van actuele topografische kaarten

Myrte Matthijs, Luc De Keersmaeker

doi.org/10.21436/inbor.117311258

Dankwoord/Voorwoord

Wij wensen Jan Bastiaens en Hilde Verboven van het Agentschap Onroerend Erfgoed te bedanken voor het vertrouwen en voor de inhoudelijke begeleiding. Thierry Onkelinx (INBO) bracht ons op het spoor van Open Street Map als aanvulling voor de topografische kaarten. We willen ook Lore Deleersnyder bedanken die als jobstudent met veel geduld een aanzienlijk deel van het manuele digitalisatiewerk voor deze studie heeft uitgevoerd en Pieter Roggemans die steeds bereikbaar was voor ondersteuning bij de detectie en de postprocessing. Dank aan Jeroen die dit rapport net als het vorige over de landschappen met houtkanten en bomerijen, grondig nagelezen heeft.



Samenvatting

Onder regie van het agentschap Onroerend Erfgoed voerde het INBO een kartering uit van de huidige landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen, meer bepaald houtkanten en bomenrijen, aan de hand van de meest recente topografische kaart (Top10Vector). Dit technisch rapport richt zich vooral op de gebruikte methodologieën, de methodologische keuzes en het resulterende kaartmateriaal (GIS-data), maar presenteert ook enkele kernresultaten van de analyse.

We maakten gebruik van OrthoSeg (Roggemans 2023) voor de digitalisering van houtkanten en bomenrijen op basis van 4 legendesymbolen van de meest recente Top10Vector-kaart (NGI, Nationaal Geografisch Instituut). OrthoSeg is een software voor beeldsegmentatie op basis van diepe neurale netwerken, die resulteert in polygoonlagen van de gedetecteerde legendesymbolen.

Net zoals in de vorige studie over het voorkomen van landschappen met houtkanten en bomenrijen op historische kaarten (De Vroey et al. 2024), werden tijdens de verwerking polygonen omgezet naar lijnen om de lengte van hagen en houtkanten enerzijds, en bomenrijen anderzijds, te berekenen. Vervolgens werden de kaarten verrasterd en werd de lijndensiteit berekend. Elke 10m x 10m pixel van dit dichtheidsraster toont hoeveel km/km² aan houtkanten en bomenrijen (samengevoegd) binnen een straal van 200 meter aanwezig zijn. Dit wijkt af van de vorige studie waarbij er een onderscheid werd gemaakt tussen bocagelandschap (hoge dichtheid van houtkanten) en coulissenlandschap (hoge dichtheid van bomenrijen) en waarvoor verschillende stralen werden gebruikt. Deze aanpassing was nodig omdat een evaluatie met luchtfoto's en Google streetview aantoonde dat het onderscheid tussen houtkanten en bomenrijen op de Top10Vector-kaart niet consequent gemaakt is. Om deze reden kozen we in overleg met het agentschap Onroerend Erfgoed ook voor de term 'landschapskern met houtige perceelsrandbegroeiingen', terwijl in het vorige project een onderscheid kon gemaakt worden tussen bocage- en coulissenlandschappen.

Op dezelfde wijze als voor de Top10Vector-kaart werden dichtheiden berekend voor de lijnvormige houtige elementen weergegeven door OpenStreetMap (OSM), die het resultaat zijn van citizen science. Een vergelijking tussen de Top10Vector-kaart en OSM wees uit dat er regionale verschillen zijn in het detail van de karteringen en dat OSM complementair kan zijn. Daarom werden de dichtheidsrasters van beide kaarten gecombineerd, waarbij steeds gekozen werd voor de pixel met de hoogste dichtheid.

Op het nieuwe dichtheidsraster dat gebaseerd is op zowel OSM als de Top10Vector-kaart, werd net als in de vorige studie een drempelwaarde van 7,5 km/km² toegepast om de grens tussen open en gesloten landschappen te bepalen. Vervolgens is de landgebruikskaart 2022 (VITO), weliswaar met enkele aanpassingen, geïntegreerd om een helder beeld te krijgen van de huidige verspreiding van landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen. Dit maakte het mogelijk om de verschillende landschapstypes op een nauwkeurige manier te onderscheiden en de huidige structuur van open en gesloten landschappen in kaart te brengen.



De studie van De Vroey et al. (2024) resulteerde in drie momentopnamen (1778, 1873, 1969) van open en gesloten landschappen die zeven categorieën omvatten: bebouwd, water, bos, boomgaard, bocagelandschap, coulissenlandschap, open landschap. De huidige studie voegt een extra momentopname (2024) toe waarbij bocagelandschap en coulissenlandschap vervangen zijn door landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen. Door de veranderingen in het landschap van de 18e eeuw tot nu te analyseren, krijgen we een duidelijk inzicht in de historische ontwikkeling van het Vlaamse landschap en de vorming van het huidige landschap.

Tot slot was het ook een doelstelling om de resultaten van de eerdere studie (De Vroey et al. 2024), waarin historische topografische kaarten werden geanalyseerd met behulp van AI (OrthoSeg), te valideren. Door de lijnenkaarten o.b.v. detecties van houtkanten en bomerijen, weergegeven op de kaarten van 1778, 1873 en 1969, te vergelijken met manuele digitalisaties, konden we de nauwkeurigheid van de detecties en postprocessing beoordelen.



Aanbevelingen voor beheer en/of beleid

Uit onze analyses blijkt dat de nauwkeurigheid van AI-gebaseerde segmentatiemodellen, zoals OrthoSeg, toeneemt naarmate de kaarten recenter zijn. Nieuwere kaarten vertonen minder variatie in de wijze waarop houtkanten en bomenrijen worden weergegeven, wat bijdraagt aan een verbeterde herkenning door AI-modellen. Het AI-model doet het dus beter op de recentere kaarten, maar dat betekent niet dat recentere kaarten beter de realiteit weergeven dan oudere. Zo is waar te nemen dat de Top10Vector-kaart over verschillende tijdsperioden ingetekend en bijgewerkt is, wat resulteert in een opvallende variatie in de dichtheid van gekarteerde landschapselementen per kaartblad, vooral in peri-urbaan gebied. Tijdens de validatie met orthofoto's (Geopunt) en Google Street View werd ook duidelijk dat bomenrijen op de Top10Vector-kaart vaak in werkelijkheid haagstructuren met bomen zijn, of vice versa. We raden daarom aan om de kaart met landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen in 2024 aan te vullen met de kaarten van de eerdere studie uitgevoerd op historisch kaartmateriaal. Op die manier kan achterhaald worden of de actuele landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen ontstaan zijn in een bocagelandschap, een coulissenlandschap, of mogelijk zelfs in een landschap dat voorheen open was.

De vorige studie wees al uit dat het bocagelandschap sterk is afgenomen en in beperkte mate is geëvolueerd tot een coulissenlandschap (denk aan het Waasland). Deze afname manifesteert zich vooral in het buitengebied. Een aanzienlijk deel van de actuele gekarteerde landschapselementen bevindt zich in verstedelijkte (peri-urbane) gebieden, waardoor ze niet langer als onderdeel van het traditionele bocage- of coulissenlandschap kunnen worden beschouwd. Deze evolutie onderstreept het belang om relatief intacte historische bocage- en coulissenlandschappen te behouden, maar ook het toenemende belang van houtige structuren in een verstedelijkte omgeving. De kaarten die het resultaat zijn van onze studies kunnen ook gebruikt worden om houtkanten en bomenrijen in een stedelijke omgeving beter in het historische landschap in te passen.

De drempelwaarde van 7,5 km/km² voor landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen is gebaseerd op de dichtheiten van de historische OGL-kaarten (open-en-gesloten-landschappen-kaarten). Aangezien er nu veel minder houtkanten en bomenrijen zijn, raden we aan om aanvullend ook de dichtheitskaart zelf te bekijken, zodat ook landschappen met lagere dichtheiten van bomenrijen en/of houtkanten, die mogelijk relict bevatten van bocage- of coulissenlandschappen, niet aan de aandacht ontsnappen.

De historische en huidige landschapskaarten en de evolutie hiertussen, kunnen op deze wijze gebruikt worden om de cultuurhistorische visievorming rond bijkomende houtkanten en bomenrijen in het landschap te onderbouwen, en bij uitbreiding de transversale visievorming te ondersteunen.



English abstract

Under the supervision of the Flanders Heritage Agency (Agentschap Onroerend Erfgoed), the Research Institute for Nature and Forest (INBO) mapped current landscapes with a high density of linear woody landscape elements, such as hedgerows and tree rows, using the most recent topographic map (Top10Vector). This technical report primarily focuses on the applied methodologies, methodological choices, and the resulting cartographic material (GIS data), but also presents key findings from the analysis. In broad terms we followed the methodology by De Vroey et al. (2024) who did the same on historical maps.

We used OrthoSeg (Roggemans 2023) to digitize hedgerows and tree rows based on four legend symbols depicted by the latest Top10Vector map (NGI). OrthoSeg is an image segmentation software powered by deep neural networks, which produces polygon layers of detected legend symbols.

As in the previous study, the resulting polygons were converted into centerlines to calculate the lengths of hedges and hedgerows on the one hand, and tree rows on the other. Subsequently, the maps were rasterized, and line densities were calculated. Each 10m x 10m pixel of the density raster represents the total length (in km/km²) of hedgerows and/or tree rows within a 200-meter radius. This approach differs from the previous study, which distinguished between bocage landscapes (with high densities of hedgerows) and coulissen landscapes (with high densities of tree rows) and used varying radii to discriminate both. We abandoned this method as a thematic evaluation using aerial photographs and Google Street View revealed that the distinction between hedgerows and tree rows on the Top10Vector map was not consistently made. For this reason, in consultation with the Flanders Heritage Agency, the term "landscape core with linear woody landscape elements" was adopted to indicate landscapes with a high density of linear elements that can either be hedgerows, or tree rows.

In a similar way densities were calculated for the linear woody elements represented by OpenStreetMap (OSM), which are the result of citizen science. A comparison between the Top10Vector map and OSM showed regional differences in the level of detail of the mapping, and it was determined that both datasets are complementary. Therefore, the densities calculated on both maps were compared, and the highest density value of both was withheld in the final density raster map.

On the density raster based on both OSM and the Top10Vector map, we applied the same threshold value of 7.5 km/km² as in the previous study to delineate the boundary between open landscapes and landscape cores with linear woody landscape elements. Subsequently, the 2022 land use map (VITO), albeit with some modifications, was integrated to provide a clear overview of relevant land use in combination with the discerned open and closed countryside.

From the previous study, we had three snapshots (1778, 1873, 1969) of open and closed landscapes, covering seven categories: built-up areas, water, forest, orchard, bocage landscape, coulisse



landscape, and open landscape. The current study adds a new snapshot for 2024, in which bocage and coulisse landscapes are replaced by landscape cores with linear woody landscape elements. By analyzing the changes in the landscape from the 18th century to present, we gain a clearer understanding of the evolution through time of Flemish landscapes.

Additionally, we validated the results of the earlier study, in which historical topographic maps were analyzed using GeoAI (OrthoSeg). By comparing the line maps derived from the detection of hedgerows and tree rows on the maps of 1778, 1873, and 1969 with manual digitizations in 100 randomly selected validation boxes, we were able to assess the accuracy of the digitization process.



Inhoudstafel

Dankwoord/Voorwoord.....	1
Samenvatting.....	2
Aanbevelingen voor beheer en/of beleid.....	4
English abstract.....	5
Inhoudstafel.....	7
Lijst van figuren.....	8
Lijst van tabellen.....	9
1. Inleiding.....	10
2. Aanvulling bij De Vroey et al. (2024).....	11
3. Methodologie.....	13
3.1. Kaart van open en gesloten landschappen (OGL) in 2024.....	13
3.1.1. Identificatie van houtige kleine landschapselementen met Machine Learning.....	13
3.1.2. Nabewerking van de polygonen.....	14
3.1.3. Van polygonen naar lijnen.....	15
3.1.4. Aanmaak van een densiteitskaart.....	15
3.1.5. Uniformiteit van de Top10Vector kartering en aanvulling met OpenStreetMap.....	16
3.1.6. Landschapsclassificatie op basis van densiteiten.....	18
3.1.7. Integratie van landgebruiksklassen.....	18
3.1.8. Herclassificatie kleine clusters en losse pixels.....	21
3.2. Evolutie tussen 1778 en 2024.....	21
3.3. Validaties.....	21
3.3.1. Validatie van de detecties voor de 4 tijdstippen.....	21
3.3.2. Thematische validatie.....	23
4. Resultaten.....	24
4.1. Kaart van open en gesloten landschappen (OGL) in 2024.....	24
4.2. Evolutie tussen 1778 en 2024.....	25
4.3. Validaties.....	28
4.3.1. Validatie van de detecties op de 4 tijdstippen.....	28
4.3.2. Thematische validatie.....	30
Referenties.....	35
Bijlage 1: technische handleiding.....	36



Lijst van figuren

Figuur 2-1 Aanpassing van de OGL kaarten waardoor de oorspronkelijke weergave van bebouwing, tuinen en wegen van de historische landgebruikskaarten behouden blijft.....	11
Figuur 3-1 Weergave van vier houtige lijnvormige elementen op de Top-10 kaart.....	13
Figuur 3-2 Onderbroken polygonen (links) werden verbonden met elkaar via een buffer en dissolve (rechts).....	14
Figuur 3-3 De onderbreking is een foutje dat niet door de nabewerking werd hersteld.....	14
Figuur 3-4 Onregelmatigheden van de middellijn (links) werden weggewerkt door een smoothing (rechts).....	15
Figuur 3-5 Een bomenrij gelegen in bos is niet relevant voor de kartering van open en gesloten landschappen die we in dit project tot doel hebben.....	16
Figuur 3-6 Verschil in densiteiten van lijnvormige houtige landschapselementen in Top10Vector, met het kaartenrooster dat per kaartblad het tijdstip van de herziening door het NGI weergeeft.	17
Figuur 3-7 Bomenrijen die als bos beschouwd werden in de landgebruikskaart 2022 (o.b.v. de boswijzer 2021), werden geherclassificeerd naar open landschap (landschap ten oosten van de kruising van de Bosveldstraat met de Kortrijksestraat in Oostkamp).....	19
Figuur 3-8 Waar Cartoweb.be geen bos weergeeft, werden pixels die volgens de landgebruikskaart bos zijn, in een aparte klasse (blauw) geplaatst. Maar omdat dit eilandjes in het bos zijn, konden ze niet worden geherclassificeerd naar een andere landgebruiksklasse en werden ze daarom terug tot bos gerekend.....	20
Figuur 4-1 Actuele kaart van de open en gesloten landschappen (OGL-kaart 2024), die eveneens de landgebruiksklassen bos, recreatie, bebouwd, water en boomgaard weergeeft.....	24
Figuur 4-2 Evolutie van OGL-kaarten van 1778 tot 2024, met een specifieke legende voor 2024.....	26
Figuur 4-3 Evolutie van de oppervlakte (km ²) van de verschillende landschapstypes met recreatie, water en bebouwd gebundeld in de klasse “overige”.....	27
Figuur 4-4 Spreiding van de som van lengtes van bomenrijen en houtkanten, als resultaat van de detectie en postprocessing (resultaten) en van de manuele intekening (validatie), in 10 validatieboxen voor elk tijdstip.....	30
Figuur 4-5 Verdeling van de pixelwaarden (densiteiten) binnen de 10 thematische validatieboxen met in het groen de densiteiten op basis van de detectie en postprocessing (resultaten) en in het oranje de densiteiten op basis van de manuele intekening (validatie). Dit zowel voor bomenrijen (links) als houtkanten (rechts).....	31
Figuur 4-6 Verdeling van de pixelwaarden (densiteiten) binnen de 10 thematische validatieboxen met in het groen de densiteiten van de detectie met postprocessing (resultaten) en in het oranje de densiteiten op basis van de manuele intekening (validatie). Dit voor de gecombineerde dataset van bomenrijen en houtkanten, waarbij de densiteit werd berekend met straal 200m.....	31
Figuur 4-7 Gemiddelde densiteiten voor bomenrijen en houtkanten per validatiebox, modeldetectie met postprocessing in groen (resultaten) en manuele referentie in oranje (validatie). De	



x-as geeft de labels weer van de 10 validatieboxen.....	32
Figuur 4-8 Gemiddelde densiteiten voor bomenrijen en houtkanten samen per validatiebox (nummering x-as), modeldetectie met postprocessing in groen (resultaten) en manuele referentie in oranje (validatie).....	32
Figuur 4-9 Verschil gemiddelde densiteiten (km/km ²) per validatiebox tussen de modeldetectie en de manuele referentie, voor de bomenrijen in groen en de houtkanten in oranje. De x-as geeft de labels weer van de 10 validatieboxen.....	33
Figuur 4-10 Een Google Streetview beeld (links) toont aan dat het landschapselement dat op Top10Vector is ingetekend als bomenrij (midden) geïnterpreteerd moet worden als houtkant (rechts).....	34
Figuur 4-11 Links toont de middenschalige winterfoto van 2023 een houtkant die niet is weergegeven op de Top10Vector-kaart; en rechts geeft de Top10Vector-kaart een haag met bomen weer die er volgens de luchtfoto van 2023 niet meer is (maar voorheen mogelijk wel).....	34

Lijst van tabellen

Tabel 4-1 De kolom 'totaal' geeft totale lengte (in km) van alle bomenrijen, houtkanten en beide samengenomen, gedetecteerd voor elk van de 4 tijdstippen. De kolommen 'aangepast' zijn de totale lengtes gecorrigeerd op basis van de validaties (zie verder onderdeel 4.3.1). De kleurengradiënt van licht naar donker geeft voor elke kolom een rangschikking van de kleinste naar de grootste lengte.....	25
Tabel 4-2 Het aantal bomenrijen en houtkanten, de F1-score, de totale lengte (km) van deze elementen en de afwijkingen berekend op de totale lengtes, in de 100 validatieboxen voor elk tijdstip.....	28
Tabel 4-3 Resultaten Wilcoxon Test per kaart die de lengte op basis van de detectie en postprocessing vergelijkt met de manueel ingetekende lengte, van bomenrijen en houtkanten in de 100 validatieboxen.....	29



1. Inleiding

Onder regie van het Agentschap Onroerend Erfgoed voerden we een analyse uit van de meest recente topografische kaart om te bepalen waar hagen en houtkanten enerzijds, en bomenrijen anderzijds, beeldbepalend zijn in het huidige Vlaamse landschap. De GIS-data die in de loop van dit project werden ontwikkeld, dienen als basis voor de visievorming rond initiatieven voor meer bos en de uitvoering van het houtkantenplan, om zo het landschapsbeheer en de ecologische planning te ondersteunen.

Voor deze studie maakten we gebruik van GIS-data en methodes die specifiek voor dit project zijn ontwikkeld. Deze bouwen voort op technieken die eerder zijn toegepast bij de kartering van historische landschappen met houtkanten en bomenrijen (De Vroey et al. 2024). In plaats van historische kaarten, zoals in het vorige project, werken we nu met de meest recente topografische gegevens van de Top10Vector-kaart, uitgegeven door het Nationaal Geografisch Instituut (NGI) en gedeeld via het geoportaal geo.be.

Op basis van AI-detecties van houtkanten en bomenrijen met behulp van OrthoSeg werden GIS-analyses als postprocessing uitgevoerd, om open en gesloten landschappen te onderscheiden. Deze aanpak kwam niet helemaal overeen met de methodologie die werd gehanteerd in de vorige studie, omdat het thematische onderscheid tussen bocage- en coulissenlandschap niet meer zo duidelijk te maken is. Er werd daarom overkoepelend gekeken naar landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen, die zowel kunnen bestaan uit houtkanten als uit bomenrijen. In de hierna volgende onderdelen worden de keuzes voor de methodologische aanpassingen onderbouwd, en worden de resultaten van de kartering van actuele houtkanten en bomenrijen toegelicht.

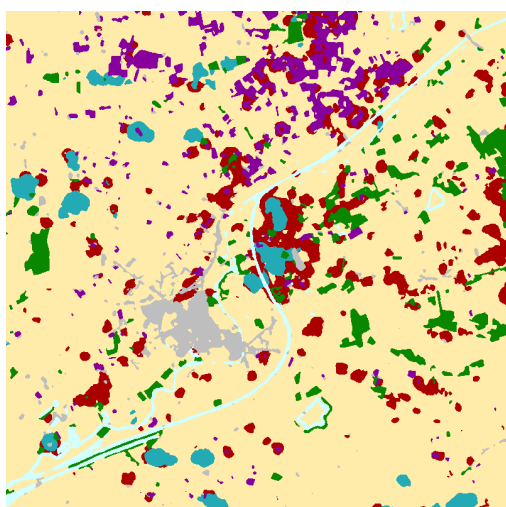


2. Aanvulling bij De Vroey et al. (2024)

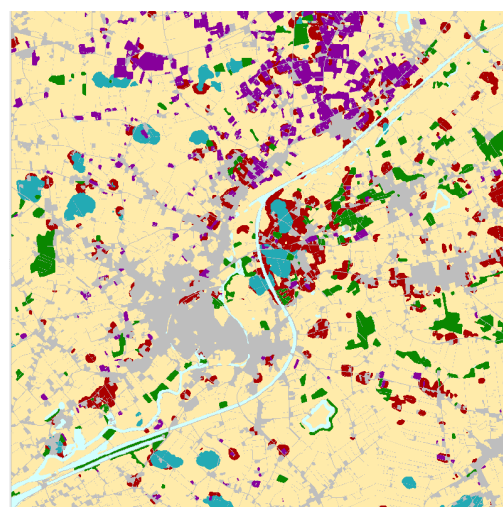
De kaarten met de open en gesloten historische landschappen, aangevuld met landgebruik op 3 tijdstippen (OGL 1778, 1873, 1969) en de overlay daarvan met de historische evolutie van open en gesloten landschappen tussen 1778 en 1969, zijn na de publicatie van het technische rapport door De Vroey et al. (2024) op vraag van het Agentschap Onroerend Erfgoed nog aangepast. Op pagina 21 in het rapport van De Vroey et al. (2024) staat beschreven dat filters werden toegepast om ruis in de rasterbeelden weg te nemen. Deze filters hebben echter ook als effect dat verspreide bebouwing en smalle wegen verdwijnen en dat de oppervlakte ingenomen door bebouwing, tuinen en infrastructuur globaal dus verkleint (zie Figuur 2-1).

Dit was niet wenselijk en daarom is teruggegrepen naar de weergave zonder filters van bebouwing, tuinen en infrastructuur op de 10 m x 10 m rasters met historisch landgebruik op de drie tijdstippen. De twee klassen van landgebruik met 'bebouwing en tuinen' en 'infrastructuur' in tabel 9.2 van het rapport door De Keersmaeker et al. (2024), gebaseerd op Poelmans et al. (2023), werden hiervoor samengenomen en zonder aanpassingen toegevoegd aan de kaarten met de (evolutie van) open en gesloten landschappen, waarbij de oorspronkelijke klasse werd overschreven (zie Figuur 2-1).

OGL kaart van 1969 zoals beschreven in De Vroey et al. (2024)



OGL kaart van 1969 met bebouwing zonder filters (MercatorNet en Geopunt)



Figuur 2-1 Aanpassing van de OGL kaarten waardoor de oorspronkelijke weergave van bebouwing, tuinen en wegen van de historische landgebruikskarten behouden blijft.

De aanpassingen werden uitgevoerd met de raster calculator in QGIS:

- De eerste stap was een herclassificatie van de landgebruikskarten van 1778, 1873 en 1969, waarbij 'bebouwing en tuinen' en 'infrastructuur' een waarde 100 kregen en alle andere landgebruik waarde 0.



- Deze binaire rasterkaarten met waarden 0 en 100 werd opgeteld bij de kaarten met de open en gesloten landschappen (OGL) van de drie overeenkomstige tijdstippen, die specifieke waarden bevatten voor elk van de 7 klassen: bebouwd, water, bos, boomgaard, bocage, coulissen en open (zie tabel 5-2 in De Vroey et al. 2024) .
- Op dezelfde wijze werden de waarden 0 en 100 van de binaire rasterkaart ('overige' versus bebouwd') van 1969 opgeteld bij de 24 waarden van elke klasse van de syntheseskaart, die de evolutie van open en gesloten landschappen weergeeft tussen 1778 en 1969.
- Alle pixels van de resulterende kaarten met waarde ≥ 100 werden toegewezen aan de klasse 'bebouwd'. Door de filters was 'bebouwd' kleiner geworden, maar door deze rekenregel worden de waarden van andere klassen terug overgeschreven, en krijgt 'bebouwd' zijn oorspronkelijke weergave terug. De pixels met waarde kleiner dan 100, behouden door deze rekenregel wel hun oorspronkelijke waarde.



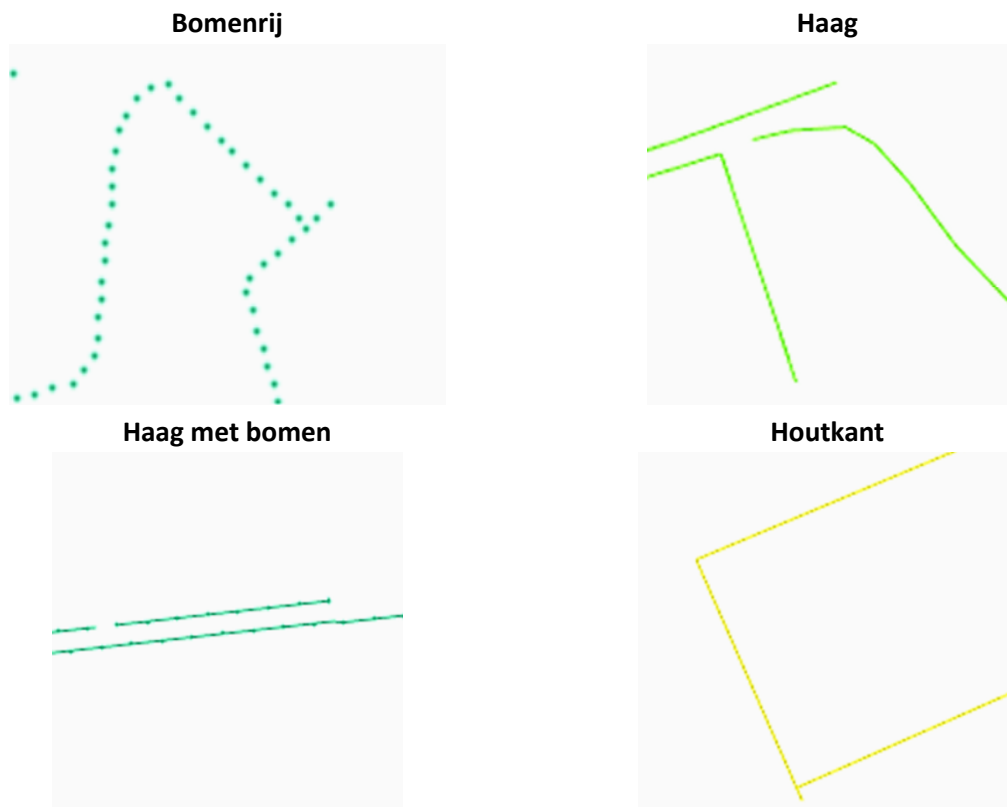
3. Methodologie

De methodologie beschrijft de principes en denkwijzen om de resultaten te verkrijgen. Voor een meer technische beschrijving van de tools en parameters die werden gebruikt in QGIS, verwijzen we naar Bijlage 1.

3.1. Kaart van open en gesloten landschappen (OGL) in 2024

3.1.1. Identificatie van houtige kleine landschapselementen met Machine Learning

De eerste stap bestond uit het trainen van een machine learning-model OrthoSeg (Roggemans 2024) met behulp van handmatig getekende voorbeelden in trainingsboxen. In 200 trainingsgebieden van 256m op 256m werden polygonen getekend rond vier klassen van de Linear Vegetation kaartlaag van de Bodembedekking en vegetatie - Top10Vector dataset, herziening 1/10/2024 (Figuur 3-1).



Figuur 3-1 Weergave van vier houtige lijnvormige elementen op de Top-10 kaart.

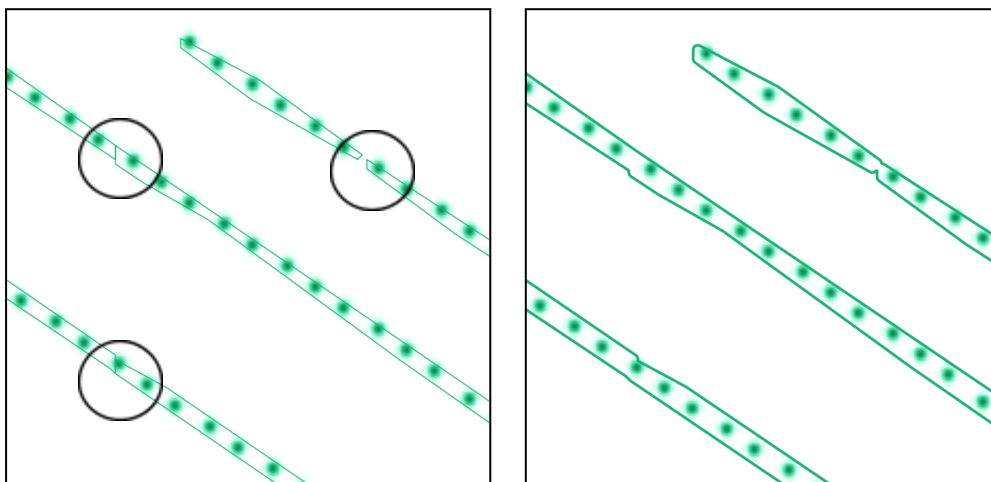
Het model werd getraind om deze vier klassen te onderscheiden en de voorspelling resulteerde in polygonen die zijn ingedeeld in de bovengenoemde klassen. Omdat het model werkt op basis van



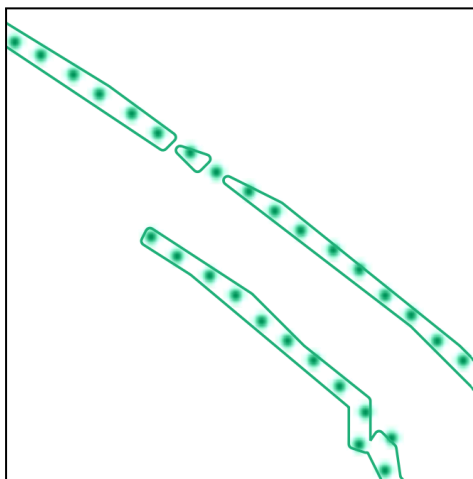
beeldsegmentatie, ontstonden soms onderbrekingen in de polygonen. Om die onderbrekingen weg te werken, was een volgende stap in de verwerking nodig.

3.1.2. Nabewerking van de polygonen

De geclassificeerde polygonen werden bewerkt om fouten te corrigeren die door het AI-model waren veroorzaakt. Onderbroken segmenten met dezelfde classificatie werden samengevoegd door de polygonen te bufferen met +0,5 meter (Figuur 3-2). Deze buffer zorgt ervoor dat aangrenzende polygonen op een afstand van minder dan 1 meter van elkaar met dezelfde classificatie verbonden werden, zonder parallelle bomenrijen of houtkanten samen te voegen. Overige kleine polygonen van minder dan 5 m² werden verwijderd. Dit proces zorgde voor een nauwkeurigere indeling van de landschapselementen, hoewel niet alle onderbroken elementen succesvol werden hersteld, zoals te zien in onderstaande Figuur 3-3.



Figuur 3-2 Onderbroken polygonen (links) werden verbonden met elkaar via een buffer en dissolve (rechts).



Figuur 3-3 De onderbreking is een foutje dat niet door de nabewerking werd hersteld.

Daarna werd een herclassificatie van de polygonen uitgevoerd om te komen tot 'bomenrijen' en 'houtkanten', aan de hand van de volgende regels:

////////////////////////////////////

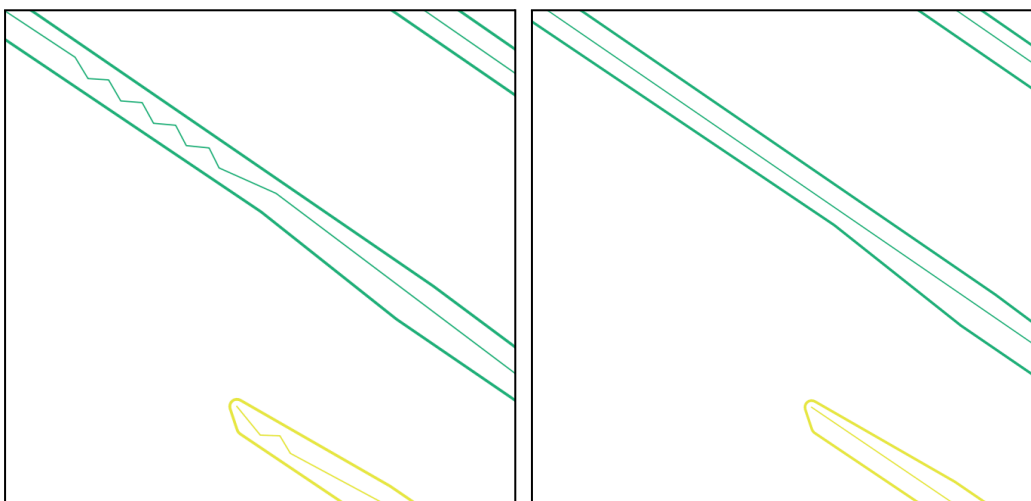
- bomenrij bleef bomenrij
- haag werd geclassificeerd als houtkant
- haag met bomen werd geclassificeerd als houtkant
- houtkant bleef houtkant

Dit werd zo gekozen in functie van de uiteindelijke landschappen die werden onderscheiden waarbij coulissenlandschappen doorzicht hebben en bocagelandschappen geen doorzicht, in overeenstemming met de keuzes die gemaakt zijn in De Vroey et al. (2024).

3.1.3. Van polygonen naar lijnen

Om de lengte van de houtkanten en bomenrijen te berekenen, werd een centerline (middellijn) van de samengevoegde polygonen gegenereerd met behulp van pygeoops (Roggemans 2023), buiten QGIS. In gevallen waar het algoritme niet succesvol was, werd een vereenvoudiging van de geometrie toegepast in python. Deze vereenvoudiging hielp bij het oplossen van geometrische problemen en zorgde voor een stabielere berekening van de middenlijn.

In sommige gebieden vertoonde de berekende middenlijn nog onregelmatigheden, zoals scherpe hoeken die de nauwkeurigheid van de lengtemetingen beïnvloeden. Deze onregelmatige, gekartelde lijnen werden verder vereenvoudigd met een tolerantiewaarde van 1 meter (smoothing in QGIS), zodat de lijnen rechtgetrokken worden en beter overeenkomen met de werkelijke structuur van de houtkanten en bomenrijen, zoals weergegeven door de Top10Vector-kaart (Figuur 3-4).



Figuur 3-4 Onregelmatigheden van de middellijn (links) werden weggewerkt door een smoothing (rechts).

3.1.4. Aanmaak van een densiteitskaart

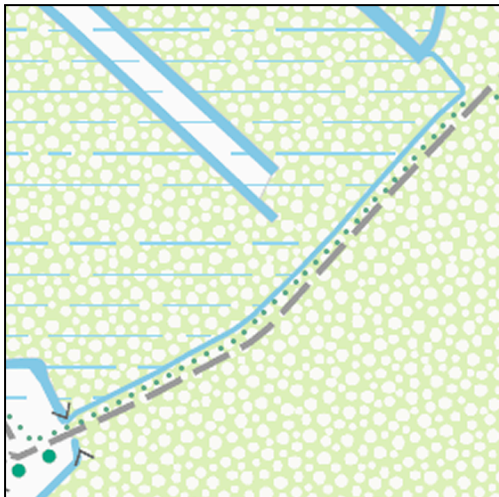
Om een densiteitskaart van bomenrijen en houtkanten in Vlaanderen te creëren, werden eerst voor dit project irrelevante houtkanten en bomenrijen verwijderd. Via OrthoSeg werden hiervoor volgende gebieden van de CartoWeb.be dataset geïdentificeerd:

- Naaldbos
- Loofbos
- Gemengd loof- en naaldbos



- Boomgaard
- Struikgewas

Lijnen binnen deze bosgebieden, boomgaarden en zones met struikgewas werden verwijderd omdat we enkel densiteiten willen berekenen voor landschappen zonder groepen bomen of struiken (Figuur 3-5).



Figuur 3-5 Een bomenrij gelegen in bos is niet relevant voor de kartering van open en gesloten landschappen die we in dit project tot doel hebben.

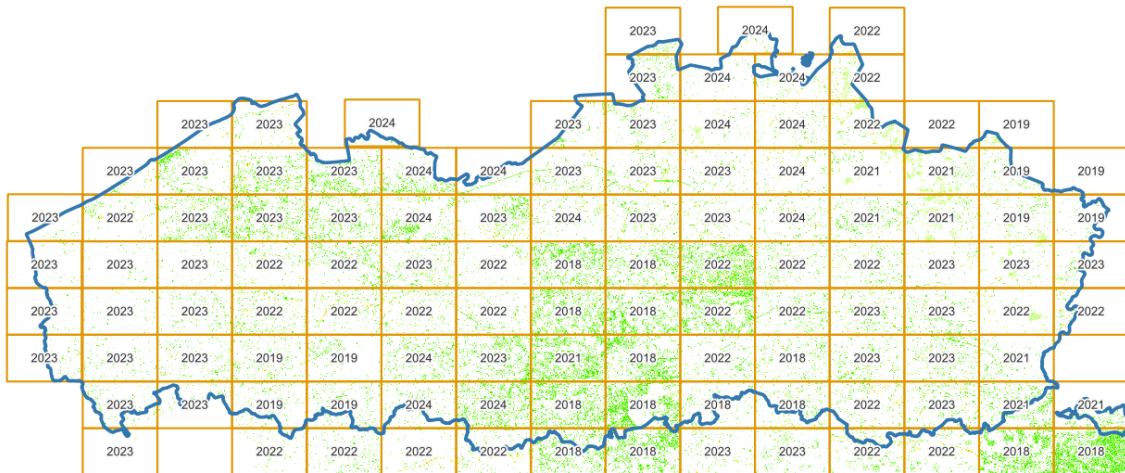
Vervolgens werden de densiteiten van houtkanten en bomenrijen berekend voor een raster met een resolutie van 10 meter. Aangezien het onderscheid tussen houtkanten en bomenrijen op het terrein niet zo duidelijk was (zie verder 3.3.2), werden hiervoor de lijnenkaarten van beide samengevoegd. Er werden voor deze samengevoegde lijnenkaart densiteiten berekend in een straal van 200 meter rondom elke pixel. De resulterende kaart werd uitgedrukt in m/m^2 en vervolgens vermenigvuldigd met 1000 om deze te herleiden tot densiteiten in km/km^2 . Met uitzondering van de samenvoeging van bomenrijen en houtkanten is ook deze werkwijze gebaseerd op die van De Vroey et al. (2024).

3.1.5. Uniformiteit van de Top10Vector kartering en aanvulling met OpenStreetMap

Voor we de volgende stappen van de methodologie verder overlopen, bespreken we een controle op de data, die het resultaat zijn van een OrthoSeg detectie op de meest recente topografische kaart (Top10Vector) van het Nationaal Geografisch Instituut (NGI). De Top10Vector-kaart is over verschillende tijdsperioden ingetekend en bijgewerkt. Hoewel de laatste herziening tussen 2018 en 2024 werd uitgevoerd (Figuur 3-6), bestaat de indruk dat lijnvormige houtige landschapselementen niet steeds samen met het omgevende vlakvormige landgebruik geactualiseerd zijn. Een tweede bedenking is dat er opmerkelijke verschillen zijn tussen de kaartbladen, die erop wijzen dat niet consequent gekarteerd werd (Figuur 3-6). Als we daar verder op inzoomen merken we dat deze opvallende verschillen tussen kaartbladen zich voornamelijk situeren in peri-urbaan gebied.



Peri-urban gebied wordt later in het proces voornamelijk omgezet naar de klasse ‘bebouwd’ waardoor het geen belangrijk probleem vormt voor het buitengebied waar we ons hier op focussen. Een derde aandachtspunt is het zwakke thematische onderscheid tussen houtkanten en bomenrijen. Tijdens de validatie met orthofoto’s en Google Street View werd duidelijk dat bomenrijen op de Top10Vector-kaart soms haagstructuren met bomen bleken te zijn. Dit wordt verder behandeld in onderdeel 4.3.2.



Figuur 3-6 Verskil in densiteiten van lijnvormige houtige landschapselementen in Top10Vector, met het kaartenrooster dat per kaartblad het tijdstip van de herziening door het NGI weergeeft.

Om de volledigheid van de dataset verder te evalueren en te verbeteren, werden de houtkanten en bomenrijen op de Top10Vector-kaart vergeleken met gegevens van OpenStreetMap (OSM) (gedownload op 30 augustus 2024). OpenStreetMap bevat vooral lokaal goed gekarteerde gebieden die het resultaat zijn van citizen science, maar deze karteringen zijn niet gebiedsdekkend. OpenStreetMap bevat zowel polygoenen, lijnen als punten met bomenrijen en houtkanten. De polygoenen en punten zijn niet op een consistente manier ingetekend waardoor deze data niet bruikbaar zijn. Daarom werden alleen lijnvormige elementen uit OpenStreetMap gebruikt en vergeleken met de Top10Vector-kaart.

Het integreren van OpenStreetMap-data kan lokaal een meer gedetailleerde weergave opleveren, aangezien deze gegevens door gebruikers op het terrein worden ingetekend. Echter, gezien het feit dat deze data erg lokaal en vaak door niet-professionele cartografen worden verzameld, zijn de globale consistentie en nauwkeurigheid mogelijk beperkt.

Aangezien OpenStreetMap eerder aanvullend gebruikt is in plaats van als een volwaardige gebiedsdekkende kaart, werden van de lijnen van deze kaart afzonderlijk densiteitskaarten gemaakt, op dezelfde manier als voor de Top10Vector-kaart. De densiteitskaarten van beide bronnen werden gecombineerd door in elke pixel de hoogste van beide densiteitswaarden te nemen, zodat de densiteitskaart werd samengesteld met de meest complete informatie uit beide datasets.



3.1.6. Landschapsclassificatie op basis van densiteiten

De gecombineerde densiteitskaart werd vervolgens gebruikt om verschillende landschapstypes te onderscheiden. Op basis van de densiteiten van houtkanten en bomenrijen samen werden 2 landschapstypes gedefinieerd:

- Landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen (hoge densiteit aan houtkanten en/of bomenrijen)
- Open landschap (gebied met lage densiteit aan houtkanten en/of bomenrijen)

De volgende regels werden gehanteerd bij de classificatie:

- Landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen: $\text{dens}_{200\text{m}} > 7,5 \text{ km/km}^2$
- Open landschap: $\text{dens}_{200\text{m}} < 7,5 \text{ km/km}^2$

met $\text{dens}_{200\text{m}}$ de densiteit berekend in een cirkel met straal 200m rond de centrale pixel waar deze densiteit aan wordt toegekend.

Merk op dat dit afwijkt van het voorgaande onderzoek door De Vroey et al. (2024), waar nog een onderscheid kon gemaakt worden tussen de volgende landschapstypes:

- Bocage (kleinschalig landschap met veel heggen en houtkanten)
- Coulissenlandschap (karakteristiek door bomenrijen en doorkijkjes)
- Open landschap (gebied zonder duidelijke afscheidingen)

Dit onderscheid moest hier verlaten worden vanwege de brondata, die een scherp thematisch onderscheid tussen bocage- en coulissenlandschappen niet toelaten. Er werd door De Vroey et al. (2024) een radius van 100m gebruikt voor de berekening van de densiteit van houtkanten, en van 200m voor de densiteit van bomenrijen op historische kaarten. Om de densiteit te berekenen van de actuele, samengevoegde bomenrijen en houtkanten, is gekozen voor een radius van 200m. De grenswaarde van $7,5 \text{ km/km}^2$ is wel in overeenstemming met De Vroey et al. (2024).

3.1.7. Integratie van landgebruiksklassen

De verkregen landschapsclassificatie werd vervolgens gecombineerd met bestaande landgebruiksdata van de landgebruikskaart 2022 (Poelmans et al. 2023), om een gedetailleerde weergave van het landschap te creëren.

De klassen van de VITO landgebruikskaart 2022 (zie beschrijving in De Keersmaeker et al. 2024) werden als volgt geclusterd:

- Recreatie: recreatiegebieden
- Bebouwd: bebouwing, tuinen en infrastructuur
- Water: waterlichamen
- Bos: bossen
- Boomgaard: boomgaarden
- Open: akkerland, kustduinen, grasland, heide, schorre, slikke, strand, moeras, ruigte en struweel



De klasse 'bos' in de landgebruikskaart is grotendeels gebaseerd op de Boswijzer 2021 (ANB). Daarvan is evenwel bekend dat deze het bos overschat omdat bomenrijen en andere aanplantingen, alsook open terrein dat door boomkruinen wordt overschermd, tot bos worden gerekend (De Keersmaeker et al. 2012). Omdat vooral de weergave van houtige kleine landschapselementen als bos problematisch is voor de kartering van landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen, hebben we de klasse 'bos' van de landgebruikskaart gecorrigeerd met behulp van CartoWeb.be Versie V2024.06, de digitale webservice van het NGL. Waar zowel CartoWeb.be als de landgebruikskaart bos aangeven, werd de klasse bos behouden. Waar CartoWeb.be geen bos aangaf, werden de pixels opnieuw geclassificeerd aan de hand van de omliggende pixels die geen bos zijn.

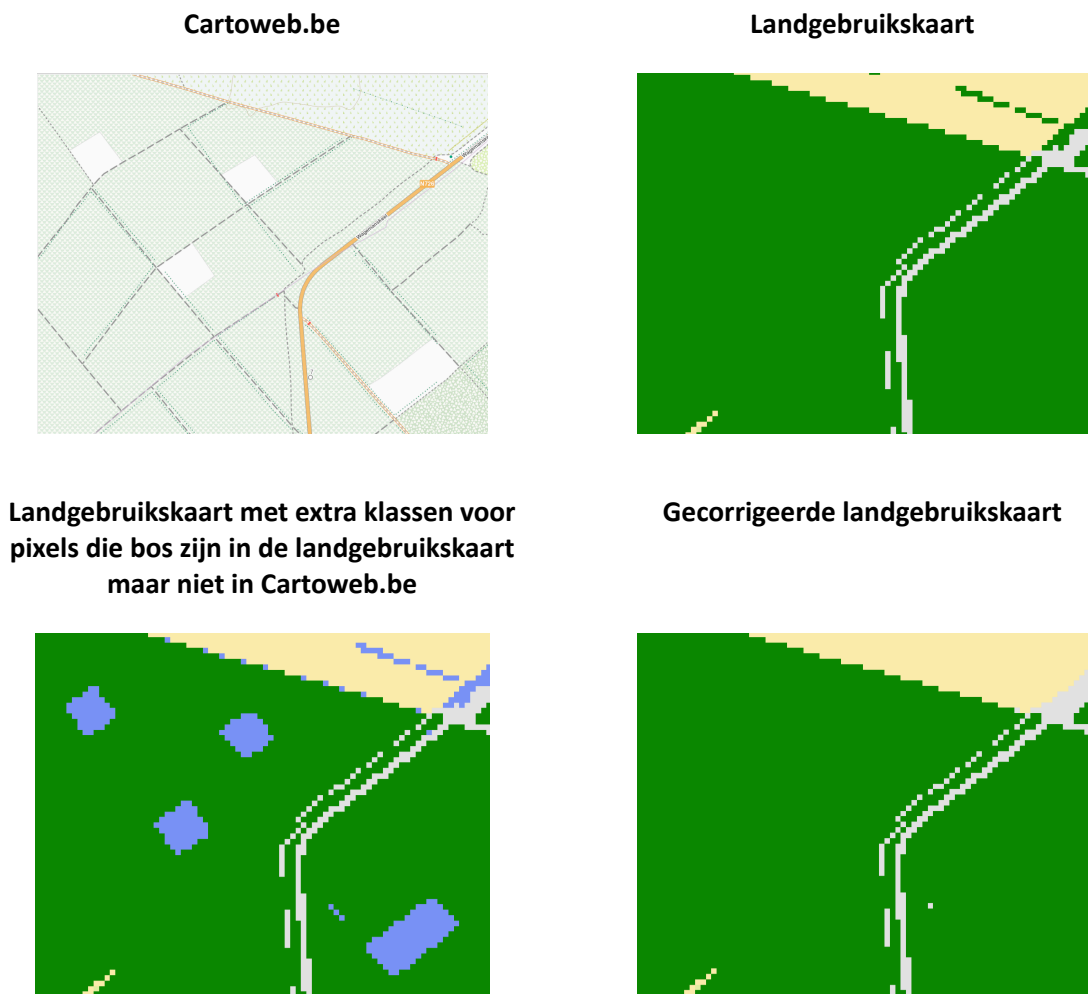
Figuur 3-7 geeft een duidelijk voorbeeld van bomenrijen die door de landgebruikskaart 2022 als bos werden aangegeven, en die geherclassificeerd zijn omdat ze deel uitmaken van een landschapskern met houtige perceelsrandbegroeiing.



Figuur 3-7 Bomenrijen die als bos beschouwd werden in de landgebruikskaart 2022 (o.b.v. de boswijzer 2021), werden geherclassificeerd naar open landschap (landschap ten oosten van de kruising van de Bosveldstraat met de Kortrijksestraat in Oostkamp).



Pixels die volledig omsloten zijn door bos en waarvoor geen ander omliggend landgebruik was volgens de landgebruiksk kaart, werden terug geclassificeerd als bos. Het gaat om 1% van de oppervlakte die bos is volgens de landgebruiksk kaart, maar die geen bos is volgens CartoWeb.be. Dit ging dan over open plekken in het bos, zoals bijvoorbeeld een picknickplaats (Figuur 3-8).



Figuur 3-8 Waar Cartoweb.be geen bos weergeeft, werden pixels die volgens de landgebruiksk kaart bos zijn, in een aparte klasse (blauw) geplaatst. Maar omdat dit eilandjes in het bos zijn, konden ze niet worden geherclassificeerd naar een andere landgebruiksk klasse en werden ze daarom terug tot bos gerekend.

Vervolgens werd een geïntegreerde kaart, of OGL-kaart, gemaakt waarin de geclusterde klasse ‘open’ van de landgebruiksk kaart 2022 werd opgesplitst in ‘landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen’ en ‘open landschap’. De OGL-kaart bevat aldus de volgende klassen:

- Recreatie
- Bebouwd
- Water
- Bos
- Boomgaard



- Landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen
- Open landschap

3.1.8. Herclassificatie kleine clusters en losse pixels

Als laatste stap werden losse pixels of kleine pixelgroepen van alle klassen behalve bebouwd geherclassificeerd naar de klassen van omliggende pixels. Dit werd gedaan door te kijken naar de 8 omliggende pixels en de centrale pixel. De klassen van deze 9 pixels werden geëvalueerd en de meest voorkomende klasse werd toegekend aan de centrale pixel. Dit werd niet gedaan voor de klasse 'bebouwd' om zo veel mogelijk trouw te blijven aan de originele landgebruikskaart en geen elementen zoals smalle wegen te verliezen (zie ook onderdeel 2).

3.2. Evolutie tussen 1778 en 2024

Vervolgens werd de evolutie van houtkanten en bomenrijen over de vier historische kaarten Ferraris (1778), DG (Dépôt de la Guerre) 1873, MGI (Militair Geografisch Instituut) 1969, en NGI Top10Vector (2024) geanalyseerd. De eerste metrieken die we gebruiken om de evolutie te beoordelen zijn de totale en de gecorrigeerde lengtes. De totale lengte is gebaseerd op lijnenkaarten die het resultaat zijn van de detectie en de daarop volgende post-processing om de polygonen om te zetten in lijnen. De gecorrigeerde lengtes zijn gebaseerd op de correcties voor de over- en onderschattingen, berekend met behulp van de validaties op de detecties (zie verder 3.3.1).

Door het gebruik van gecorrigeerde lengtes op basis van de validatie-informatie konden we een beter inzicht krijgen in de evolutie van houtkanten en bomenrijen in Vlaanderen over een tijdsperiode van meer dan twee eeuwen.

Merk op dat er in deze studie geen update bevat van de synthesekaart die door De Vroey et al. (2024) is gemaakt. Een eerste reden hiervoor is dat de nieuwe methodologie afwijkt en we dus in 2024 niet dezelfde landschapstypen kunnen onderscheiden als in 1778, 1873 en 1969. De oorzaak hiervoor is, zoals eerder beschreven, dat bomenrijen en houtkanten op de Top10Vector-kaart niet consequent onderscheiden worden, waardoor een betrouwbaar onderscheid van de actuele (relicten van) bocage- en coulissenlandschappen niet meer mogelijk is. Bovendien zou een bijkomend tijdstip (2024) met een nieuwe klasse meer dan 2000 combinaties van landschapsevolutie opleveren, waardoor de kaart moeilijk te interpreteren zou zijn.

3.3. Validaties

3.3.1. Validatie van de detecties voor de 4 tijdstippen

De nauwkeurigheid van de lijnenkaarten werd geëvalueerd aan de hand van 100 willekeurig geselecteerde validatieboxen van 256x256 meter per kaartreeks, verspreid over Vlaanderen. Binnen deze validatieboxen werden de houtkanten en bomenrijen manueel ingetekend op basis van de originele kaarten. De lengtes van de manueel ingetekende lijnen binnen deze boxen werden vergeleken met de lijnenkaarten die het resultaat zijn van de detectie, inclusief de daaropvolgende omzetting van polygonen naar lijnen en de postprocessing. De uitgevoerde statistische tests, zoals de



F1 score en de Wilcoxon-test, kunnen gebruikt worden om de nauwkeurigheid van dit proces te beoordelen. Deze validatie werd uitgevoerd voor alle kaartenreeksen: Ferraris (1778), DG 1873, MGI 1969 en NGI Top10Vector (2024) en voor elke kaartreeks werden dezelfde validatieboxen gebruikt.

De F1-score geeft een objectieve maat voor de accuraatheid van het resultaat van de AI detectie en postprocessing, in vergelijking met de handmatige digitalisatie van de lijnen door de gebruiker. De F1-score combineert twee belangrijke statistische maten: precisie en herinnering (ook wel recall genoemd), en biedt een gebalanceerde evaluatie van de prestaties van het model, vooral in situaties met een ongelijk aantal positieve en negatieve voorbeelden (zoals gebieden zonder bomenrijen of houtkanten).

De F1-score helpt om zowel de nauwkeurigheid van de detectie als de volledigheid van het model te evalueren, op basis van de volgende definities:

- Precisie geeft aan hoeveel van de door de AI gedetecteerde bomenrijen en houtkanten daadwerkelijk correct zijn, in vergelijking met de validatieset. Dit is belangrijk om te meten hoe goed het model onjuiste detecties (vals-positieven) kan vermijden.

$$Precisie = \frac{TP}{TP + FP}$$

Waarbij:

- TP (True Positives): Correct gedetecteerde bomenrijen/houtkanten.
 - FP (False Positives): Onterecht gedetecteerde bomenrijen/houtkanten (d.w.z. waar het model bomenrijen of houtkanten ziet, maar die er in werkelijkheid niet zijn)
- Herinnering meet hoeveel van de werkelijk aanwezige bomenrijen en houtkanten correct door de AI zijn gedetecteerd. Dit geeft aan hoe compleet het model is in het detecteren van de objecten.

$$Herinnering = \frac{TP}{TP + FN}$$

Waarbij:

- FN (False Negatives): Bomenrijen/houtkanten die door de AI gemist zijn (d.w.z. aanwezig in de validatieset, maar niet gedetecteerd door het model).
- F1-score is het harmonisch gemiddelde van precisie en herinnering, en biedt een balans tussen beide. De F1-score is bijzonder nuttig in situaties waar een hoge precisie en een hoge herinnering gewenst zijn, of als de kosten van valse positieven en valse negatieven gelijkwaardig worden beschouwd.

$$F1 - score = 2 * \frac{Precisie * Herinnering}{Precisie + Herinnering}$$



Vervolgens werd de totale lengte van de detectie en referentie binnen de validatieboxen berekend en vergeleken met elkaar om te zien hoeveel ze van elkaar afwijken. Deze resultaten werden gebruikt om de totale lengte van houtkanten en bomenrijen te corrigeren.

De Wilcoxon signed-rank test is uitgevoerd om te onderzoeken of er een significant verschil bestaat tussen de door het AI-model gedetecteerde lengtes (inclusief postprocessing) van bomenrijen en houtkanten en de handmatig gevalideerde lengtes. Deze test is geschikt voor gepaarde datasets en wordt toegepast wanneer de verdeling van de verschillen niet normaal is, zoals vastgesteld door de Shapiro-Wilk test.

De test vergelijkt de mediane verschillen tussen de twee datasets (AI-detectie en validatie) door de verschillen te rangschikken en de tekenen van deze verschillen (positief of negatief) te evalueren. Hierbij werd de volgende hypothese getoetst:

- Nulhypothese: Er is geen significant verschil tussen de mediane lengtes van de door het AI-model gedetecteerde bomenrijen/houtkanten en de handmatig gevalideerde lengtes.
- Alternatieve hypothese: Er is een significant verschil tussen de mediane lengtes van de door het AI-model gedetecteerde bomenrijen/houtkanten en de handmatig gevalideerde lengtes.

3.3.2. Thematische validatie

Om een scherper beeld te krijgen op het probleem van het zwakke thematische onderscheid tussen houtkanten en bomenrijen, en de gevolgen daarvan voor de dichtheidskaarten (zie onderdeel 3.1.4) werd een systematische controle gedaan in 10 zorgvuldig geselecteerde validatieboxen (256m x 256m). 7 zijn geselecteerd uit de validatieboxen van de detectie en aanvullend komen de 3 overige boxen uit de trainingboxen van OrthoSeg. De houtkanten en bomenrijen in deze boxen werden manueel ingetekend met behulp van luchtfoto's en Google Streetview, en vervolgens vergeleken met de weergave door de Top10Vector-kaart. Voor de validatie werd gekeken naar de lijnlengte van houtkanten en bomenrijen, maar ook naar de daarvan afgeleide dichtheiden, volgens de methodiek in De Vroey et al. (2024).

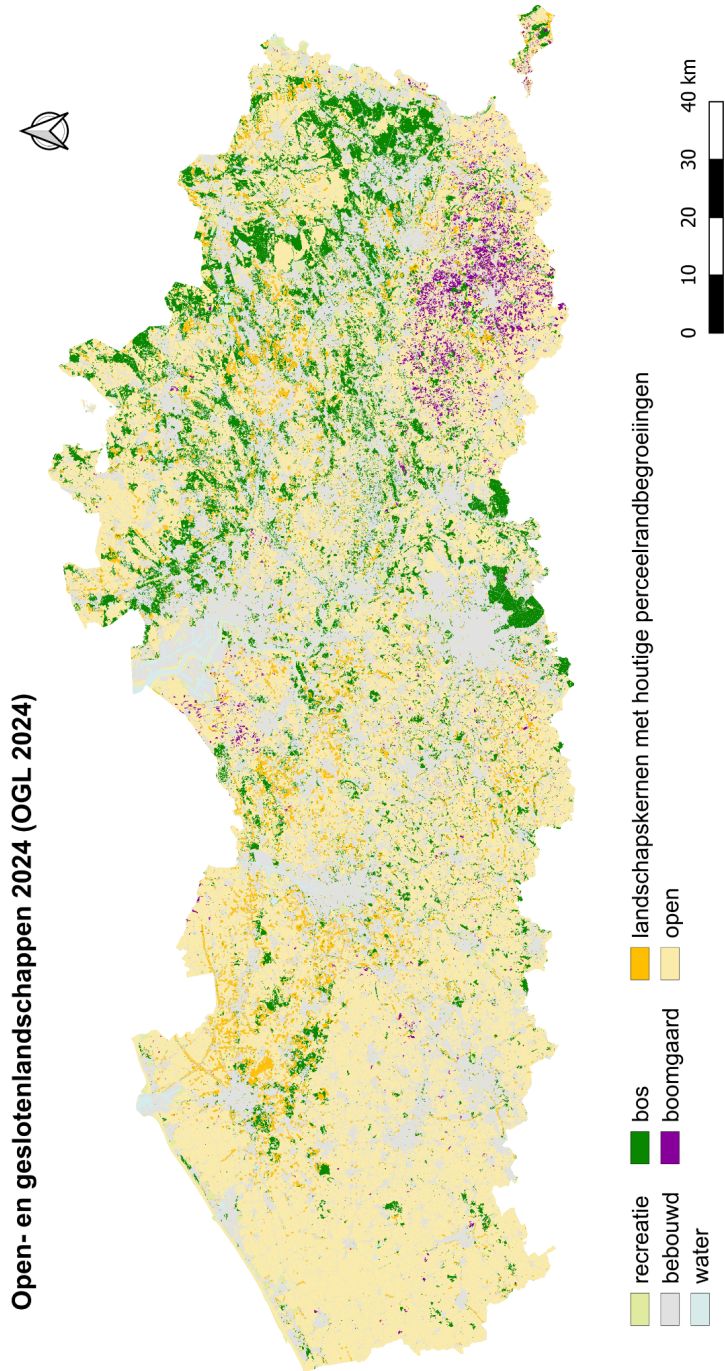
Voor de validatie van de dichtheiden werden de pixelwaarden (de berekende dichtheid voor elke pixel) van de manueel ingetekende boxen vergeleken met de dichtheiden berekend op basis van de gecombineerde Top10Vector en OSM kaart. Eerst werden statistische testen uitgevoerd om te bekijken of de pixelwaarden van beide dichtheidskaarten significant van elkaar verschillen met een Wilcoxon test. Dit werd gedaan door de pixelwaardes toe te kennen aan centroiden punten van de pixels en vervolgens enkel de punten binnen de validatiebox mee te nemen. Vervolgens werden globaal per box de algemene statistieken vergeleken zoals gemiddelde, mediaan en het maximum van de pixelwaarden. De verdelingen van de dichtheidenresultaten werden dus statistisch geanalyseerd om te bepalen hoe goed de gecombineerde Top10Vector en OSM dichtheidkaart overeenkomen met de 'ground truth' gebaseerd op de luchtfoto's en Google Streetview.

Voor de volledigheid werd er dan voor dezelfde 10 boxen ook gekeken naar de resulterende dichtheiden van de nieuwe methodologie waarbij de lijnen van bomenrijen en houtkanten zijn samengevoegd en de dichtheiden berekend zijn binnen een straal van 200m.



4. Resultaten

4.1. Kaart van open en gesloten landschappen (OGL) in 2024



Figuur 4-1 Actuele kaart van de open en gesloten landschappen (OGL-kaart 2024), die eveneens de landgebruiksklassen bos, recreatie, bebouwd, water en boomgaard weergeeft.

De recente OGL kaart bevat een extra categorie in vergelijking met de historische OGL-kaarten. Dit is de categorie recreatie die uit de landgebruikskaart komt. Aangezien dit in vele gevallen eerder een bestemming of een eigendoms categorie (bv. provinciaal domein) is, die uit verschillende landgebruiksklassen (bos, water, grasland, ...) kan bestaan, kon die niet bij één van de andere categorieën worden geclusterd.

Vergeleken met de vorige OGL kaarten is er een opmerkelijke toename van bebouwde oppervlakte (inclusief tuinen) en van open buitengebied, dus met lage dichtheden van houtkanten en bomenrijen. Beiden nemen de grootste oppervlakte in en landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen zijn maar sporadisch meer aanwezig op de kaart (Figuur 4-1).

4.2. Evolutie tussen 1778 en 2024

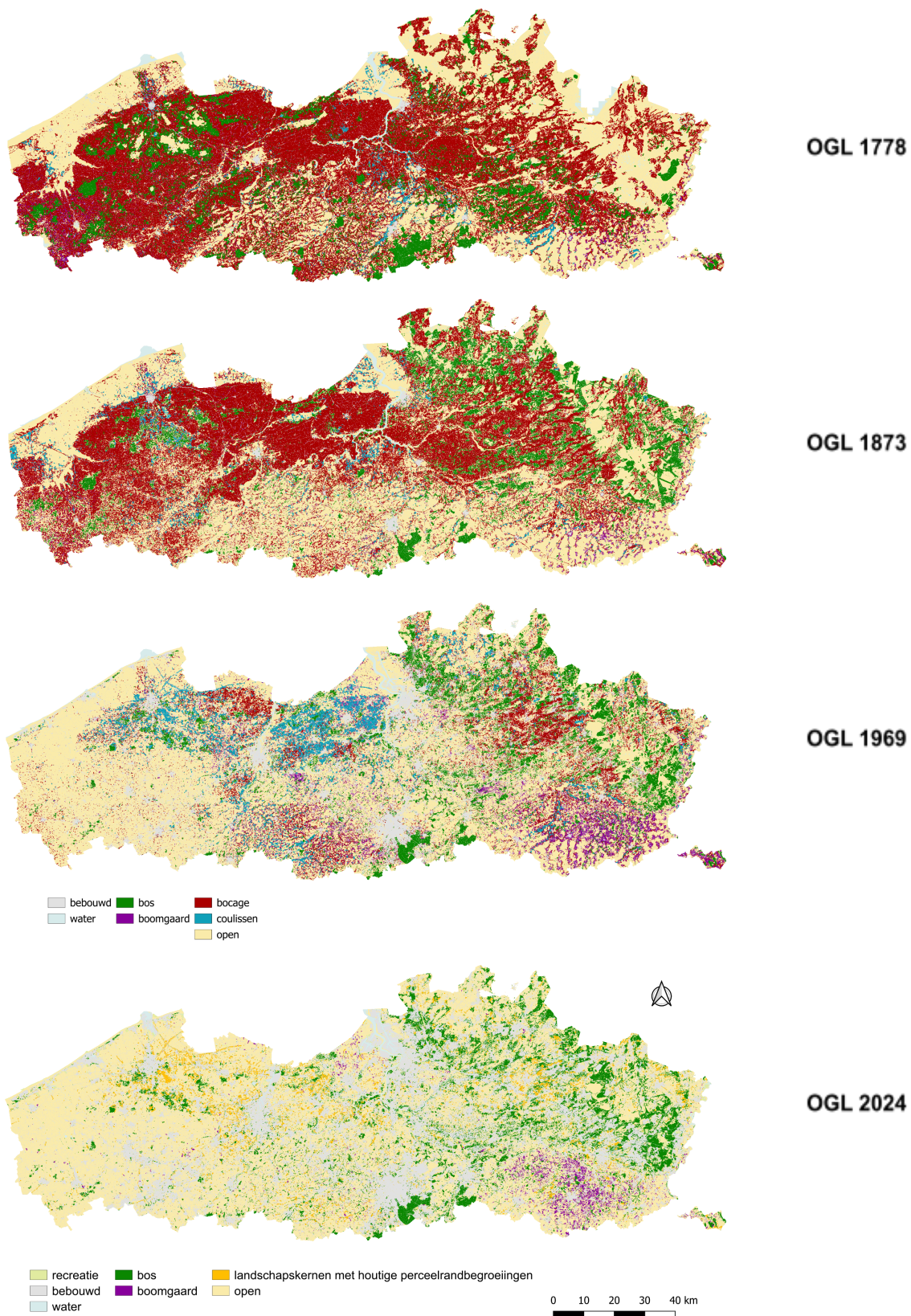
Tabel 4-1 met de lengtes van bomenrijen en houtkanten afzonderlijk, en beide samen genomen, geeft weer dat er minder houtkanten werden gedetecteerd op de recentere dan op de oudere kaarten. De afname van houtkanten is het grootst tussen 1873 en 1969, maar zet zich nog verder door tussen 1969 en 2024. Bomenrijen nemen tussen 1778 en 1969 toe, maar compenseren de afname van houtkanten niet. Tussen 1969 en 2024 verandert de totale lengte van bomenrijen maar weinig. Bij Tabel 4-1 past de opmerking dat het thematische onderscheid tussen houtkanten en bomenrijen in 2024 niet goed meer gemaakt kon worden (zie verder onderdeel 4.3.2). Maar ook de totale lengte van bomenrijen en houtkanten samen genomen neemt in de loop van de tijd steeds meer af.

	Bomenrijen		Houtkanten		Samengenomen	
	Totaal	Aangepast	Totaal	Aangepast	Totaal	Aangepast
1778	17241	20862	116530	128532	133771	149394
1873	23256	21395	89415	102828	112671	124223
1969	32870	34185	29276	25763	62146	59948
Top10Vector	34251	34354	10120	10161	44371	44515

Tabel 4-1 De kolom 'totaal' geeft totale lengte (in km) van alle bomenrijen, houtkanten en beide samen genomen, gedetecteerd voor elk van de 4 tijdstippen. De kolommen 'aangepast' zijn de totale lengtes gecorrigeerd op basis van de validaties (zie verder onderdeel 4.3.1). De kleurengradiënt van licht naar donker geeft voor elke kolom een rangschikking van de kleinste naar de grootste lengte.

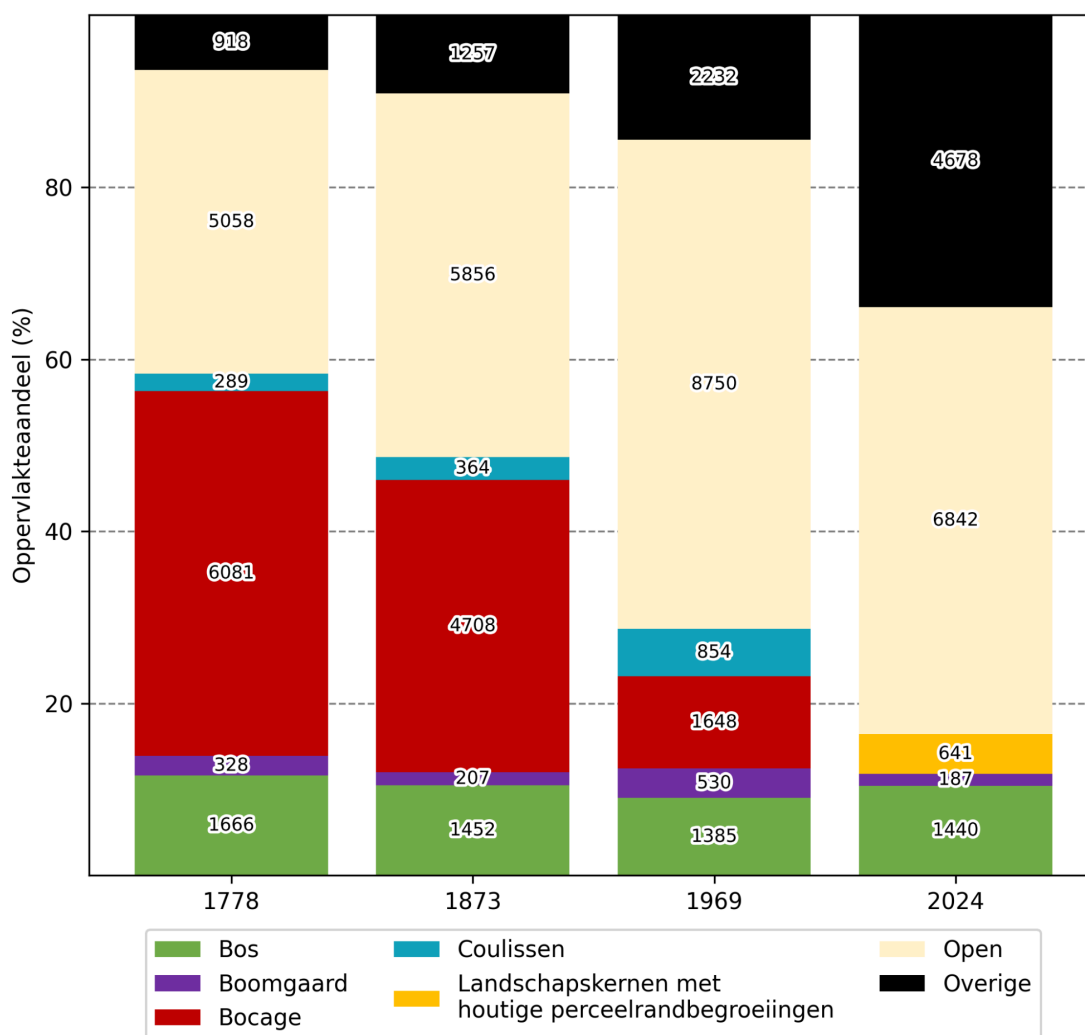
De onderstaande kaarten (Figuur 4-2) tonen de evolutie van het landschap tussen 1778 en 2024.





Figuur 4-2 Evolutie van OGL-kaarten van 1778 tot 2024, met een specifieke legende voor 2024.

De onderstaande Figuur 4-3 toont welke fractie werd ingenomen door de onderscheiden landschapstypes doorheen de tijd, waardoor de evolutie van het landschap goed weergegeven wordt. De hoeveelheid overige bevat water, bebouwd en recreatie, en neemt sterk toe (vooral door de toename van bebouwd). Dit terwijl vooral het bocagelandschap enorm afneemt. In 2024 is er geen onderscheid meer tussen bocage- en coulissenlandschap, maar de klasse ‘landschapskernen met houtige perceelrandbegroeiingen’ is veel kleiner dan de som van de coulissen- en bocagelandschappen in 1969. Niet enkel de lengte van de houtige KLE’s neemt dus verder af na 1969 (zie Tabel 4-1), maar ook landschappen waarin deze elementen een dichtheid van tenminste 7,5 km/km² hebben, worden steeds zeldzamer.



Figuur 4-3 Evolutie van de oppervlakte (km²) van de verschillende landschapstypes met recreatie, water en bebouwd gebundeld in de klasse “overige”.



4.3. Validaties

4.3.1. Validatie van de detecties op de 4 tijdstippen

De F1-score die is berekend voor zowel bomenrijen als houtkanten geeft aan hoe goed het resultaat van het AI-model met postprocessing presteert bij het detecteren van deze elementen op de historische kaarten, vergeleken met de handmatige intekening. Een hoge F1-score betekent dat het model zowel accuraat als volledig is in zijn detecties. Een lagere F1-score zou erop wijzen dat het model moeite heeft om alle bomenrijen en houtkanten te detecteren, of dat het vaak fouten maakt door objecten te identificeren die er niet zijn.

Omdat de 100 validatieboxen over heel Vlaanderen zijn verspreid en er veel gebieden zijn zonder bomenrijen of houtkanten, biedt de F1-score een waardevolle balans tussen de gevallen waarin het model geen objecten detecteert waar ze wel zijn, en situaties waarin het onterecht objecten detecteert.

Tabel 4-2 toont overwegend hoge F1-scores, wat aangeeft dat het model in grote mate correct detecteert en slechts een beperkte hoeveelheid fout-positieve en fout-negatieve resultaten genereert. Dit wijst erop dat wanneer er in een validatiebox een bomenrij of houtkant aanwezig is, deze vaak accuraat wordt geïdentificeerd, en omgekeerd, dat de afwezigheid van een dergelijke lijnvormige structuur eveneens goed wordt herkend. Let op dat dit enkel de aanwezigheid aangeeft. Dit wil niet zeggen dat ook de volledige lengte van de bomenrij of houtkant correct gedetecteerd is. Soms zijn er maar kleine stukken gedetecteerd of heel soms foute stukken.

	Bomenrijen				Houtkanten			
	Aantal	F1	Lengte	Afwijking	Aantal	F1	Lengte	Afwijking
1778	56	0,90	8,3	-21,0%	242	0,98	53,7	-10,3%
1873	79	0,71	9,7	+7,9%	322	0,96	49,9	-14,9%
1969	130	0,86	11,2	-3,7%	197	0,94	14,3	+12,3%
Top10Vector	184	0,99	16,1	-0,3%	56	1	4,2	-0,4%

Tabel 4-2 Het aantal bomenrijen en houtkanten, de F1-score, de totale lengte (km) van deze elementen en de afwijkingen berekend op de totale lengtes, in de 100 validatieboxen voor elk tijdstip.

Om daarover meer inzicht te verkrijgen, geeft de tabel ook de afwijking tussen de totale lengte van de gedetecteerde bomenrijen en houtkanten ten opzichte van de ingetekende referentielijnen in de validatieboxen. Afwijkingen worden visueel weergegeven: rood met negatieve waarden voor onderschattingen, waarbij het model minder detecteert dan de werkelijkheid, en groen met positieve waarden voor overschattingen, waarbij het model meer detecteert dan aanwezig is. Uit



deze resultaten blijkt dat de detectie op oudere kaarten meer fouten vertoont in vergelijking met de recentere kaarten. Ook worden voornamelijk onderschattingen waargenomen, wat suggereert dat het model regelmatig elementen niet detecteert die wel aanwezig zijn, maar omgekeerd weinig vals positieven genereert.

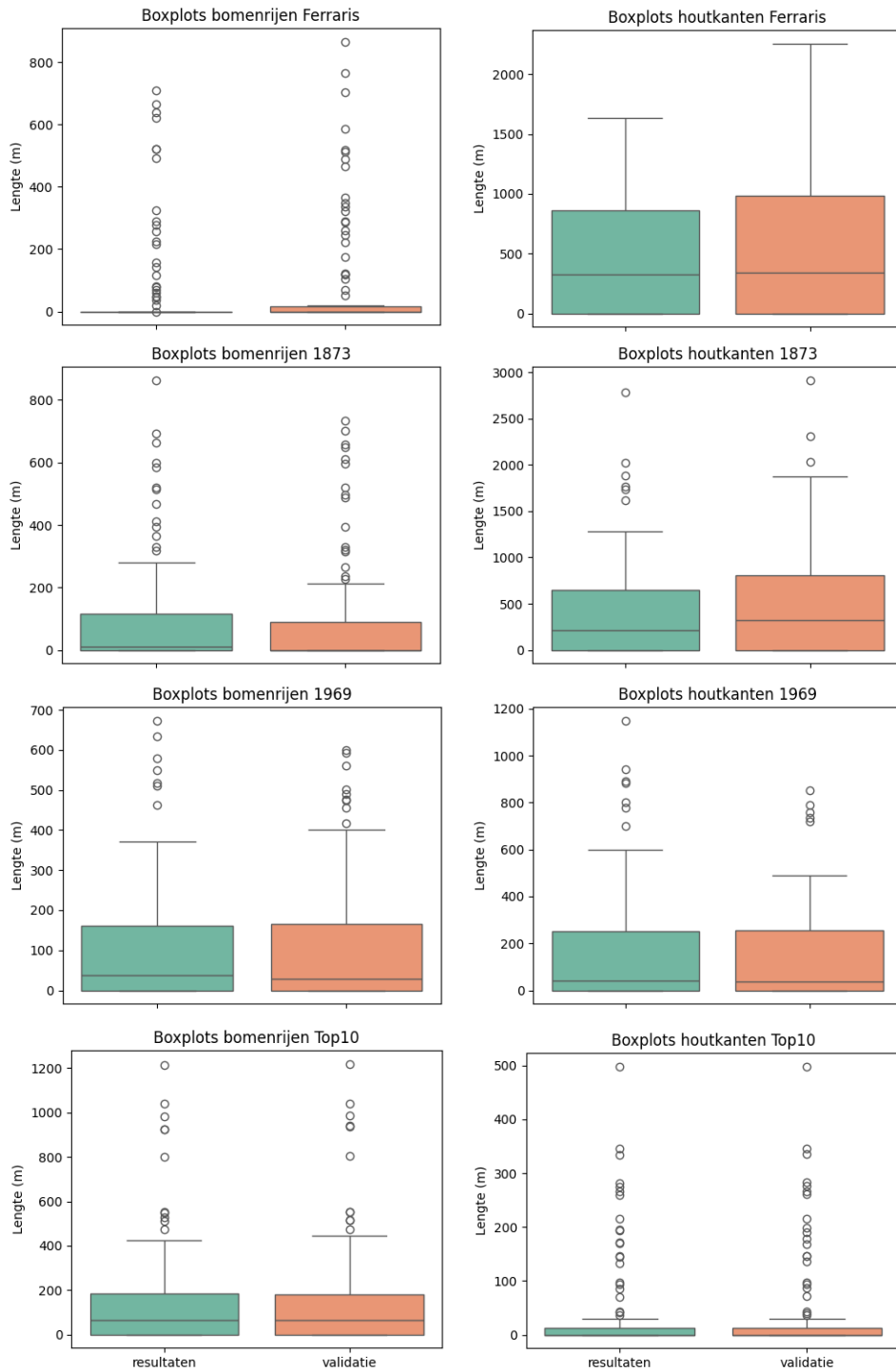
Tabel 4-3 toont de resultaten van de Wilcoxon test om na te gaan of de lengtes van de door het AI-model gedetecteerde bomenrijen/houtkanten met de daarop volgende postprocessing en de handmatig gevalideerde lengtes, significant van elkaar verschillen. Hierbij zien we dat er bij de Ferrariskaarten (1778) zowel voor bomenrijen als houtkanten een significant verschil (onderschatting) is. Voor de kaart van 1873 is er enkel een significante onderschatting voor de houtkanten. Voor de andere kaarten zijn er geen significante verschillen.

	Bomenrij	Houtkant
1778	≠	≠
1873	=	≠
1969	=	=
Top10Vector	=	=

Tabel 4-3 Resultaten Wilcoxon Test per kaart die de lengte op basis van de detectie en postprocessing vergelijkt met de manueel ingetekende lengte, van bomenrijen en houtkanten in de 100 validatieboxen.

De boxplots (Figuur 4-4) met de verdeling van de lengtes van bomenrijen en houtkanten, geven een beter inzicht in de verschillen tussen de gedetecteerde en manueel ingetekende validatieboxen. Voor de topokaart van 1969 en de Top10Vector-kaart van 2024 zijn er nauwelijks verschillen tussen beide boxplots. Dat is niet zo voor de boxplots van de Ferrariskaart (1778) en de topokaart van 1873: validatieboxen met een grote lengte aan bomenrijen op de Ferrariskaart worden onderschat door de detectie. Een gelijkaardige afwijking tussen de detectie en de manuele intekening zien we voor de lengte aan houtkanten, en dit zowel voor de Ferrariskaarten als voor de topokaarten van 1873.





Figuur 4-4 Spreiding van de som van lengtes van bomenrijen en houtkanten, als resultaat van de detectie en postprocessing (resultaten) en van de manuele intekening (validatie), in 100 validatieboxen voor elk tijdstip

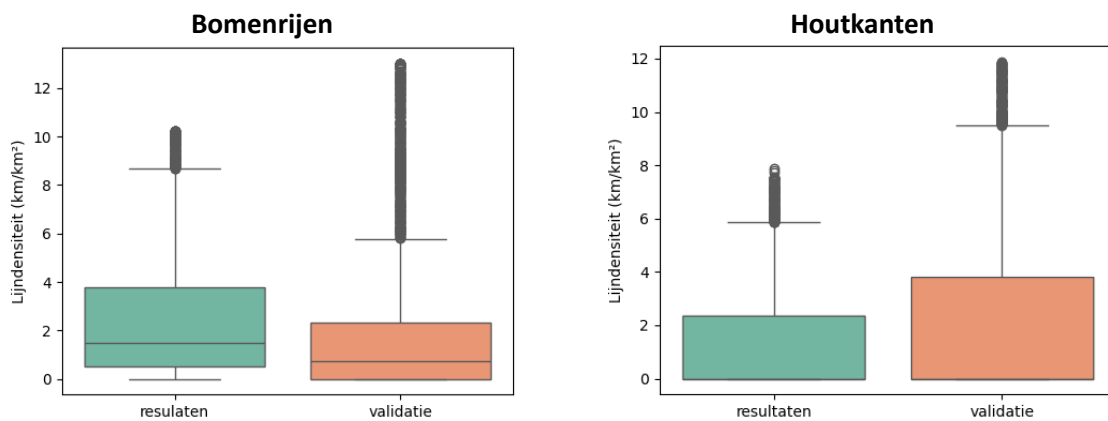
4.3.2. Thematische validatie

Zowel voor bomenrijen als houtkanten geeft de validatie significante verschillen van de densiteiten van de pixels in de 10 boxen die gebruikt zijn voor de thematische validatie. Dit wil zeggen dat de

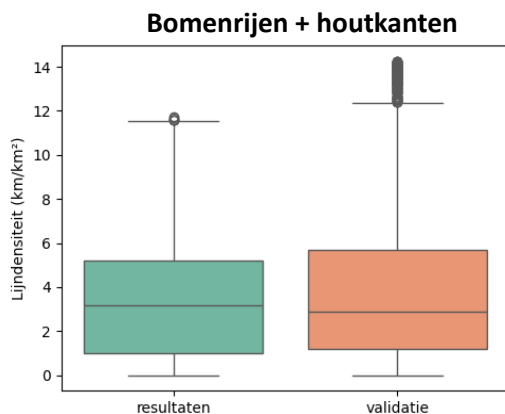


densiteiten afgeleid uit de Top10Vector-kaart en OSM niet overeenkomen met de densiteiten berekend op basis van de lengtes van bomenrijen en houtkanten, waargenomen op de orthofoto's en via Streetview en die waarschijnlijk een correcter beeld geven van de actuele situatie.

De onderstaande Figuur 4-5 toont de spreiding van de densiteiten berekend op de resultaten van de detectie en postprocessing, vergeleken met de manuele intekening. Hier kan een duidelijk verschil tussen de verdelingen worden waargenomen, bevestigd door de Wilcoxon test. De densiteit van bomenrijen werd overschat door het model, die van de houtkanten onderschat. Na samenvoegen van de datasets lijken de verdelingen van de modeldetectie en de manuele digitalisatie sterker op elkaar, maar er is nog steeds een significant verschil volgens de Wilcoxon test (Figuur 4-6).



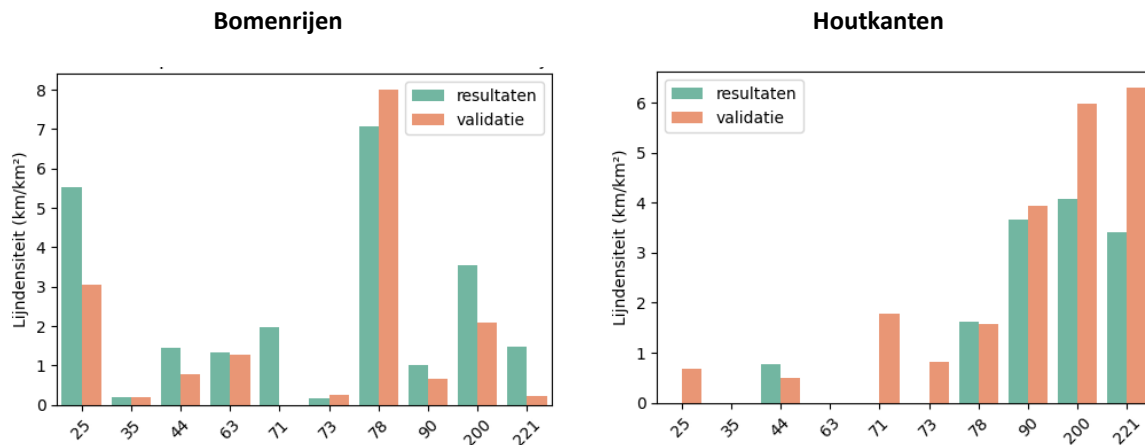
Figuur 4-5 Verdeling van de pixelwaarden (densiteiten) binnen de 10 thematische validatieboxen met in het groen de densiteiten op basis van de detectie en postprocessing (resultaten) en in het oranje de densiteiten op basis van de manuele intekening (validatie). Dit zowel voor bomenrijen (links) als houtkanten (rechts).



Figuur 4-6 Verdeling van de pixelwaarden (densiteiten) binnen de 10 thematische validatieboxen met in het groen de densiteiten van de detectie met postprocessing (resultaten) en in het oranje de densiteiten op basis van de manuele intekening (validatie). Dit voor de gecombineerde dataset van bomenrijen en houtkanten, waarbij de densiteit werd berekend met straal 200m.

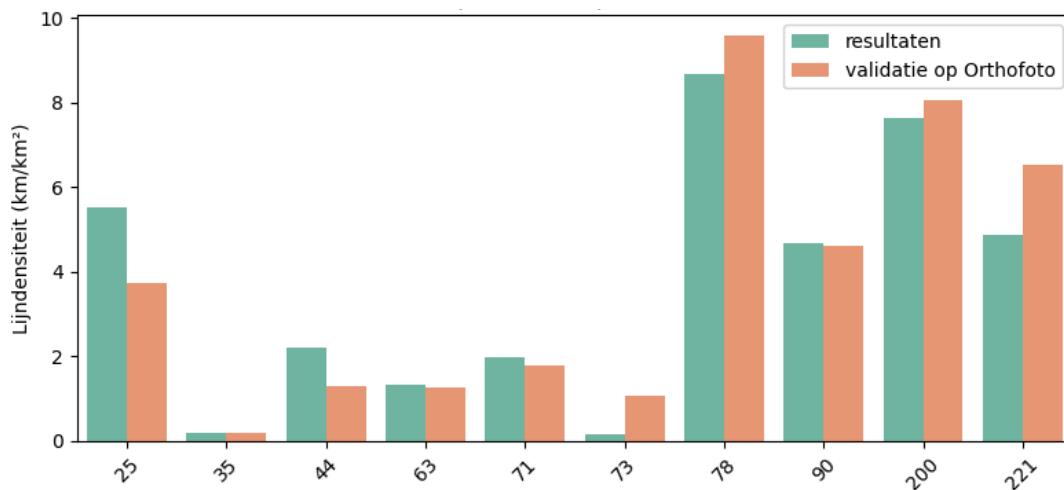


De volgende Figuur 4-7 vergelijkt de gemiddelde densiteiten van de detectie en postprocessing met de manuele intekening, per validatiebox. Hieruit blijkt dat voor vele boxen de densiteiten van bomenrijen en houtkanten echt grote verschillen vertonen tussen de modeldetectie en de manuele intekening.



Figuur 4-7 Gemiddelde densiteiten voor bomenrijen en houtkanten per validatiebox, modeldetectie met postprocessing in groen (resultaten) en manuele referentie in oranje (validatie). De x-as geeft de labels weer van de 10 validatieboxen.

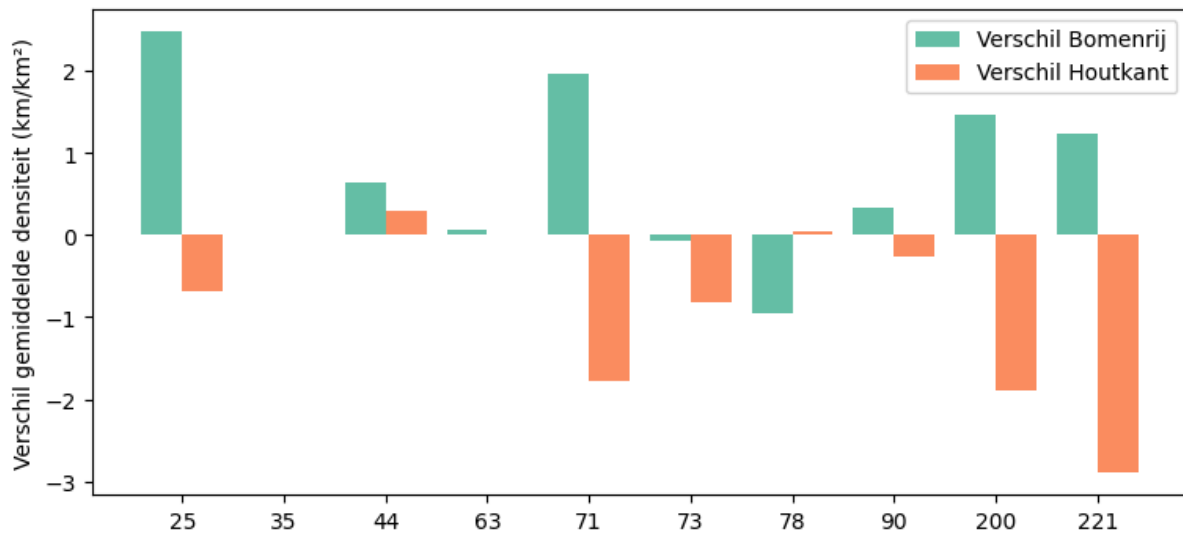
Als de gemiddelde densiteiten van bomenrijen en houtkanten worden opgeteld, zijn er minder verschillen waar te nemen voor elke validatiebox. Dit toont aan dat de classificatie van een houtige begroeiing als bomenrij dan wel als houtkant vaak afhankelijk is van de interpretatie van de karteerder (Top10Vector + OSM versus eigen interpretatie), maar dat de aan- of afwezigheid en de lengte van beide samen globaal genomen weinig verschillen vertoont (Figuur 4-8).



Figuur 4-8 Gemiddelde densiteiten voor bomenrijen en houtkanten samen per validatiebox (nummering x-as), modeldetectie met postprocessing in groen (resultaten) en manuele referentie in oranje (validatie).



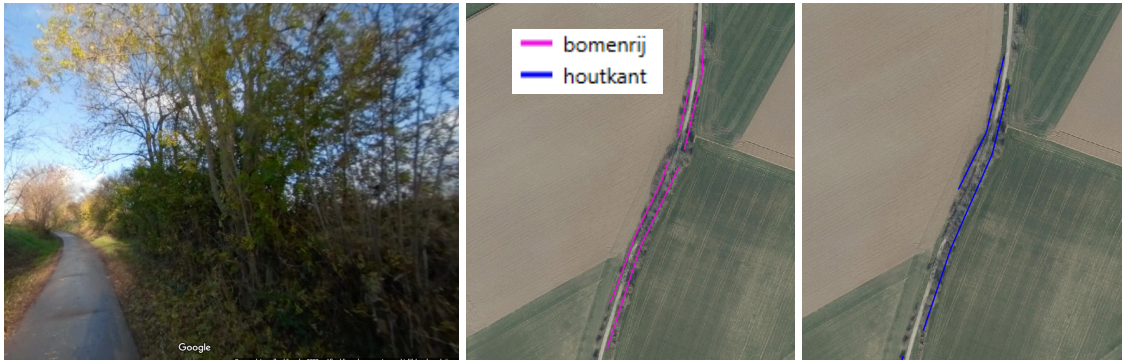
De afwijkingen kunnen ook voorgesteld worden als het verschil tussen het gemiddelde van de resultaten van de detectie en de manuele intekening, per validatiebox (Figuur 4-9). Bij boxen 25, 71, 90, 200 en 221 zijn bomenrijen overschat en houtkanten onderschat. De verklaring is wellicht dat bomenrijen zonder doorzicht (met een lagere houtige begroeiing tussen), op de Top10vectorkaart als bomenrij geкартеerd zijn, terwijl ze volgens de definitie gehanteerd in 3.1.1 en 3.1.2 gerekend worden tot de houtkanten en tijdens de validatie als dusdanig zijn ingetekend.



Figuur 4-9 Verschil gemiddelde densiteiten (km/km²) per validatiebox tussen de modeldetectie en de manuele referentie, voor de bomenrijen in groen en de houtkanten in oranje. De x-as geeft de labels weer van de 10 validatieboxen.

De controles met Google Streetview en de meest recente middenschalige winter-orthofoto van 2023 (Geopunt) wezen uit dat het thematische onderscheid tussen bomenrijen en houtkanten met de Top10Vector-kaart daardoor niet goed gemaakt kan worden (Figuur 4-10). Er werden ook regelmatig houtige KLE's op de luchtfoto's van 2023 waargenomen, die niet op de Top10Vector-kaart staan, en vice versa (Figuur 4-11). Verschillen tussen het tijdstip van de Top10vector kartering en de orthofo, zouden hiervoor een verklaring kunnen zijn.





Figuur 4-10 Een Google Streetview beeld (links) toont aan dat het landschapselement dat op Top10Vector is ingetekend als bomenrij (midden) geïnterpreteerd moet worden als houtkant (rechts).



Figuur 4-11 Links toont de middenschalige winterfoto van 2023 een houtkant die niet is weergegeven op de Top10Vector-kaart; en rechts geeft de Top10Vector-kaart een haag met bomen weer die er volgens de luchtfoto van 2023 niet meer is (maar voorheen mogelijk wel).



Referenties

De Keersmaeker L., Peymen J., Van Der Aa B., De Blust G., & Van Daele T. (2012). Vergelijking van de digitale boswijzer 2010 met de bosinventarisatie 2009 in functie van toepassing in de natuurrapportering. Advies van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO.A.2012.106). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

De Keersmaeker L., Roggemans P., Ghysels T., Poelmans L., Buskens I., Petermans T., Tallir S., Van Valckenborgh J.(2024). Digitalisatie van historisch landgebruik en analyse van landgebruiksveranderingen in Vlaanderen (1778-2022). Resultaten van deep learning (AI) beeldclassificatie toegepast op drie historische kaarten. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2024 (16). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: doi.org/10.21436/inbor.102669971

De Vroey M., Roggemans P., & De Keersmaeker L. (2024). Kartering van historische landschappen met houtkanten en bomenrijen: Toelichting bij de digitalisatie van open en gesloten landschappen aan de hand van historische kaarten. (Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek; Nr. 2). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. <https://doi.org/10.21436/inbor.101416035>

Poelmans L., Janssen L., Hamsch L. (2023). Landgebruik en ruimtebeslag in Vlaanderen, toestand 2022. VITO in opdracht van het Vlaams Planbureau voor Omgeving.

Roggemans, P. (2024). OrthoSeg (Version 0.6.0) [Computer software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12938241>

Roggemans, P. (2023). PyGeoOps (Version 0.4.0) [Computer software]. <https://pygeoops.readthedocs.io/en/latest/index.html#>



Bijlage 1: technische handleiding

Alle GIS stappen werden uitgevoerd met behulp van tools in QGIS.

Stap 1: OrthoSeg

In 200 trainingsboxen werden polygonen rond de 4 klassen in de Top10Vector-kaart (WMS layer) getekend. Het OrthoSeg model werd getraind op deze vakken. OrthoSeg leerde zo de verschillende klassen onderscheiden. Dit leverde een resultaat met polygonen verdeeld in 4 klassen volgens de legende eenheden die houtkanten en bomenrijen weergeven in de Top10Vector WMS layer. De polygonen liggen rond deze lijnvormige elementen van de WMS layer.

Stap 2: Voorbewerking van de polygonen voor het berekenen van de centerline

Omdat sommige polygonen onderbroken waren door imperfecties in het AI-model, en doordat de AI de WMS-afbeelding in blokken knipt voor de detectie, werden de polygonen soms opgedeeld. Daarom was het noodzakelijk om onderbroken lijnen met dezelfde classname te verbinden, zonder bomenrijen die parallel naast elkaar staan, samen te voegen.

- De afstand tussen de onderbroken segmenten en tussen twee rijen bomen werd gemeten.
- Rekening houdend met deze afstanden werden de polygonen met 0,5 m gebufferd en aangrenzende polygonen met dezelfde classname werden door deze buffer opgelost tot één geheel.
- Polygonen met een oppervlakte kleiner dan 5 m² werden verwijderd.
- Vervolgens werd een nieuwe kolom classname_hernoemd aangemaakt met de volgende regels:
 - houtkant → houtkant
 - bomenrij → bomenrij
 - haag met bomen → houtkant
 - haag → houtkant

Het bufferen heeft redelijk wat onderbroken elementen geconnecteerd maar niet allemaal. Soms werden 2 bomenrijen verbonden door de buffer. De 0,5 m is een compromis dat voor het beste resultaat zorgt.

Stap 3: Omzetting van polygonen naar lijnen door de centerline te berekenen

De kaart met polygonen van houtkanten en bomenrijen, die het resultaat is van de vorige stap, werd verwerkt met pygeoops (Roggemans 2023) om de centerline te berekenen. Voor sommige polygonen bleek het nodig eerst de geometrie te corrigeren (met de simplify-tool van geopandas), alvorens de centerline berekend kon worden door pygeoops.

Stap 4: Postprocessing van de centerline

De middellijn kon er in sommige delen nog wat onregelmatig (gekarteld) uitzien. Soms gingen de lijnen van de ene lange kant naar de andere lange kant van de polygoon onder hoeken van 90°. Dat zou natuurlijk resulteren in onjuiste lengtemetingen, wat ongewenst is. Om dit te corrigeren, werden de segmenten vereenvoudigd:

- De lengte van de onregelmatige segmenten werd gemeten.



- Met behulp van de simplify-tool en een tolerantiewaarde van 1 meter werden de hoeken gladgestreken en werd de lijn rechtgetrokken.

Het uiteindelijke resultaat was een nette weergave, met maar een beperkte fout. Soms zijn er nog enkele lijnen onderbroken en worden hoeken en bochten niet perfect gevolgd. Dit resulteert in een kleine, niet significante onderschatting van de totale lengte.

Stap 5: Aanmaken van een densiteitskaart

Om een densiteitskaart te maken van bomenrijen en houtkanten in Vlaanderen, werden lijnen in bossen geëlimineerd, omdat deze niet relevant zijn voor het open buitengebied, maar door hun aanwezigheid binnen de zoekradius de densiteit wel mee kunnen bepalen.

- OrthoSeg werd gebruikt om bossen op CartoWeb.be te herkennen. Hierbij werden naaldbos, loofbos, gemengd loof- en naaldbos, boomgaard en stuikgewas als bos beschouwd.
- Alle lijnen binnen bossen werden geëlimineerd via de difference QGIS tool.
- De datasets van bomenrijen en houtkanten werden samengevoegd.
- Vervolgens werd de lijndensiteit berekend met een rasterresolutie van 10 m en een straal van 200m met de linedensity QGIS tool.
- Het raster is weergegeven in m/m^2 en werd daarom vermenigvuldigd met 1000 in de raster calculator, om km/km^2 te bekomen.

Stap 6: Top10Vector vs Openstreetmap

Bomenrijen en houtkanten lijken niet overal even grondig gekarteerd te zijn op de Top10Vector-kaart. Daarom werd Openstreetmap (OSM) ook betrokken om te kunnen vergelijken en aan te vullen.

- De houtkanten en bomenrijen, ingetekend in Openstreetmap, werden gedownload.
- Enkel de lijnvormige elementen werden in rekening genomen (geen polygonen en punten).
- De densiteitskaart van de Openstreetmap werd op dezelfde manier als die van Top10Vector berekend voor de gecombineerde dataset van bomenrijen en houtkanten.
- Deze densiteitskaart van Openstreetmap werd vergeleken met die van Top10Vector.

Openstreetmap lijkt eerder lokaal een aantal goed gekarteerde locaties te hebben. De OSM data zijn dus eerder aanvullend en kunnen zeker niet afzonderlijk gebruikt worden. Om densiteitskaarten te verbeteren werd besloten om de data van Top10Vector en Openstreetmap te combineren.

Stap 7: Top10Vector gecombineerd met Openstreetmap

Voor de uiteindelijke densiteitskaarten werd voor elke pixel de maximumwaarde genomen van de densiteitskaarten gebaseerd op Openstreetmap en Top10Vector. Daarvoor moest eerst de extent van de rasterkaarten gelijk gezet worden.

- Via de rastercalculator in QGIS werden de extents allemaal naar dezelfde grootte gezet.
- Vervolgens werden de NoData pixels aangepast naar 0 via QGIS r.null tool.
- Per pixel werd via de rastercalculator de maximum waarde van beide lagen behouden.

Deze resulterende densiteitskaarten voor houtkanten en bomenrijen werden gebruikt in de OGL kaart en bij de verdere validatie.

Stap 8: Van densiteitskaarten naar OGL kaart

De densiteitskaart van 200m werd gebruikt om het landschap te classificeren.



- De rastercalculator werd gebruikt met de volgende regels:
 - Landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen: $\text{dens}_{200m} > 7,5 \text{ km/km}^2$
 - Open landschap: $\text{dens}_{200m} < 7,5 \text{ km/km}^2$

Dit resulteert in een raster met 2 soorten landschappen. Aangezien dit onderscheid niet voor alle types landgebruik relevant is, werd deze tweedeling gecombineerd met een aantal landgebruiksklassen van de landgebruikskartaat 2022 (Poelmans et al. 2023).

Stap 9: Landgebruikskartaat aanpassen

Omdat bos overschat wordt door de landgebruikskartaat 2022, werden een aantal bewerkingen uitgevoerd om deze te verbeteren.

- Er werd een laag gemaakt met de rastercalculator waarbij pixels die bos waren in de landgebruikskartaat en niet in CartoWeb.be in een aparte categorie werden geplaatst. Pixels die volgens beide bos zijn, werden steeds als bos behouden in de aangepaste landgebruikskartaat.
- Vervolgens werd er een laag gemaakt met reclassify table waarbij al de pixels die enkel bos zijn op één van beide kaarten, en ook alle pixels die bos zijn volgens beide kaarten, no data werden. De waarde van bos (3000) en alle overige pixels in de restcategorie (10000) werden niet in de tabel gestoken waardoor ze in no data veranderden. We doen dit om te voorkomen dat de pixels van de restcategorie opnieuw worden geclassificeerd als bos bij de nearest neighbor tool.
- Vervolgens werd 5 maal na elkaar de tool r.neighbors gebruikt.
 - De mode stats werden toegepast (waarbij de centrale pixel de waarde krijgt van de meest voorkomende klasse in het window)
 - Voor het aantal neighbours werd een window van 3x3 gebruikt
- Dit zorgt voor een neighbors laag waar de no data cellen worden opgevuld met waardes van de dichtstbijzijnde meest voorkomende cellen.
- Vervolgens werd er een expliciete no data value toegekend van -9999 met r.null aan deze neighbors laag.
- Met de rastercalculator werd dan volgende logische functie toegepast:
 - Als de landgebruikskartaat een waarde had van 10000 en de resulterende neighbors laag een waarde groter dan 0 werd de waarde uit de neighbors laag overgenomen.
 - Als de landgebruikskartaat een waarde had van 10000 en de resulterende neighbors laag een waarde van -9999 bleef de waarde van 10000 van de landgebruikskartaat behouden.
 - Als de landgebruikskartaat een waarde verschillend van 10000 had, werd de waarde van de landgebruikskartaat behouden.
 - (Dus alle pixels die bos zijn op zowel de landgebruikskartaat als op CartoWeb.be, die bij nearest neighbor zijn geherclassificeerd naar een andere klasse omdat ze ook NoData hadden, blijven gewoon bos omdat ze de waarde van de landgebruiksklassen overnemen.)
- Dit resulteerde in een laag waarvan 1% van de restcategorie nog steeds een waarde van 10000 had. Dit zijn pixels die geen omliggende pixels hadden buiten bos, dus eilanden in het bos. Deze pixels werden dan terug geherclassificeerd als bos met de rastercalculator.

Stap 10: Landgebruiksklassen integreren

De originele landgebruiksklassen werden als volgt geclusterd:

////////////////////////////////////

- recreatie: recreatie
- bebouwd: bebouwd en infrastructuur
- water: water
- bos: bos
- boomgaard: boomgaard
- open: akkerland, kustduinen, grasland, heide, schorre, slikke, strand, moeras, ruigte en struweel

Vervolgens werden met behulp van de rastercalculator de eerste 5 geclusterde klassen overgenomen en de laatste klasse (open) opgesplitst in 2 met het volgende resultaat:

- recreatie
- bebouwd
- water
- bos
- boomgaard
- landschapskernen met houtige perceelsrandbegroeiingen
- open (dus met een lage densiteit van houtige perceelsrandbegroeiingen)

Stap 11: Herclassificatie van kleine clusters en losse pixels

Als laatste stap werd er een herclassificatie gedaan van losse pixels en kleine clusters, om de kaart 'op te kuisen'.

- Via r.neighbors werden pixels geherclassificeerd.
 - De mode stats werden toegepast
 - Op een 3x3 neighbors filter
- Vervolgens werd er via de rastercalculator een combinatie gemaakt van de twee lagen:
 - Voor de pixels met klasse bebouwd werden de originele pixels van de landgebruikkaart overgenomen
 - Voor de pixels van de andere klassen werden de geherclassificeerde waardes genomen

Stap 12: Valideren van de detectie en postprocessing met aselect gekozen validatieboxen

Voor de validatie werden de lengtes van bomenrijen en houtkanten berekend binnen 100 willekeurig over Vlaanderen verspreide validatieboxen van 256x256 meter.

- Er werd een grid gemaakt met vakken van 256x256 meter binnen de contouren van Vlaanderen.
- 100 willekeurige punten werden gegenereerd.
- De vakken met een punt in werden geselecteerd als validatieboxen.

Stap 13: Berekening van de lengte van houtkanten en bomenrijen binnen de validatieboxen

Voor zowel de Top10Vector laag als de historische kaarten werden er validatielijnen manueel ingetekend in de 100 validatieboxen.

- De lengte van de lijnen in de validatieboxen werd berekend.
- De centerlines die het resultaat zijn van de postprocessing, werden binnen de validatieboxen geknipt en de lengte werd opnieuw berekend.



- Vervolgens werd de som genomen van de lengtes van de lijnen van dezelfde klassen per validatiebox, met de join attributes by location GIS tool.
- De laatste stap werd apart gedaan voor bomenrijen en houtkanten en dit voor elk tijdstip: de 3 historische kaarten en de Top10Vector (de OSM kaart was voor deze boxen niet relevant).

Stap 14: Statistische onderbouwing van de validatie van de detectie en postprocessing

De resultaten uit de validatieboxen werden gebruikt voor statistische analyses om het model te valideren, waarbij de F1-score werd berekend en de Wilcoxon-test werd toegepast.

- Voor de F1-score werd er gekeken of de detectie in dezelfde validatieboxen houtkanten en bomenrijen detecteren als de manuele intekening, zonder rekening te houden met de lengte van deze elementen (enkel aan- of afwezigheid).
- Aanvullend bekijkt de Wilcoxon test of de lengtes van de houtkanten en bomenrijen in deze validatieboxen significant verschillen tussen de resultaten van de detectie en postprocessing en de manuele intekening.

Stap 15: Thematische validatie

Aangezien Top10Vector en Openstreetmap geen volledige en precieze weergave van de realiteit lijken, werden de resultaten hiervan gevalideerd met een visuele interpretatie van de winter-orthofoto van 2023 met een grondresolutie van 15 cm (<https://www.vlaanderen.be/datavindplaats/catalogus/orthofotomozaiek-middenschalig-winteropnamen-kleur-2023-vlaanderen>), aangevuld met Google Streetview.

- Validatielijnen werden ingetekend in 7 aselecte validatieboxen (zie stap 13). Die boxen werden gekozen in het open landschap met schaarse bebouwing (buitengebied), waarvoor de kwaliteit van de luchtfoto goed was.
- Aanvullend werden er nog 3 boxen van de OrthoSeg trainingslaag geselecteerd.
- Van de ingetekende lijnen werd ook een densiteitskaart gemaakt binnen deze 10 boxen.
- Deze densiteitskaart werd gealigneerd met de resulterende kaart van Top10Vector en Openstreetmap.
- De pixels werden omgezet naar centroïdpunten, waaraan de waarde van de pixel werd toegekend.
- De gecombineerde Top10Vector en OSM densiteitkaarten werden geclipt binnen de 10 boxen.
- De resulterende waarden werden ook toegevoegd aan de centroïdpunten.

Stap 16: Statistische onderbouwing van de thematische validatie

Er werd vervolgens gekeken of de densiteiten berekend voor elke pixel van de validatieboxen, significant verschillen tussen de intekening o.b.v. de luchtfoto van 2023 en Google Streetview, en de kartering met behulp van Top10Vector en OSM.

- Er werd een Wilcoxon test uitgevoerd op de data (centroïdpunten met pixelwaarden)
- De gemiddelde, mediaan en max van de gedetecteerde en manueel ingetekende densiteiten werden berekend voor elk van de 10 boxen.
- Deze statistieken werden visueel vergeleken met grafieken.

