



Vlaanderen
is wetenschap

Onderzoeksprogramma 2021-2025 voor het uitvoeren van radaronderzoek naar de effecten van windturbines op vogels en vleermuizen

Analyse van vogeltracks nabij windturbines

Thierry Onkelinx, Raïsa Carmen

INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK

Auteurs:

Thierry Onkelinx , Raïsa Carmen 

Reviewers:

Joris Everaert 

Het INBO is het onafhankelijk onderzoeksinstituut van de Vlaamse overheid dat via toegepast wetenschappelijk onderzoek, data- en kennisontsluiting het biodiversiteitsbeleid en -beheer onderbouwt en evalueert.

Vestiging:

INBO Brussel

Herman Teirlinckgebouw, Havenlaan 88, 1000 Brussel

vlaanderen.be/inbo

e-mail:

thierry.onkelinx@inbo.be

Wijze van citeren:

Onkelinx, T. & Carmen, R. (2024). Onderzoeksprogramma 2021-2025 voor het uitvoeren van radaronderzoek naar de effecten van windturbines op vogels en vleermuizen. Analyse van vogeltracks nabij windturbines. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2024 (55). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: 10.21436/inbor.114415092

D/2024/3241/376

Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2024 (55)

ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:

Hilde Eggermont

Foto cover:

Windturbine in Antwerpse haven. ©Joris Everaert

Dit onderzoek werd uitgevoerd in samenwerking met:

VLEEMO NV

Hoge Weg 157

2940 Hoevenen

informatie@vleemo.be

<https://www.vleemo.be>



ONDERZOEKSPROGRAMMA 2021-2025 VOOR HET
UITVOEREN VAN RADARONDERZOEK NAAR DE
EFFECTEN VAN WINDTURBINES OP VOGELS EN
VLEERMUIZEN

Analyse van vogeltracks nabij windturbines

Thierry Onkelinx, Raïsa Carmen

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de stand van zaken van de analyse van de vogelradargegevens rond windturbines. De ruwe data zit in een grote Postgresql-databank. Om efficiënter te kunnen werken, importeren we de relevante informatie in een lokale SQLite-databank. Hiervoor hebben we een set van functies uitgewerkt als het package `birdradar` in de statistische software `R`.

Om de analysedatabank zo compact mogelijk te houden, importeren we enkel de relevante tracks. In eerste instantie gebruiken we hiervoor eenvoudige maten zoals de duur, gemiddelde snelheid en lengte van de track. In tweede instantie kijken we ook naar het verschil tussen het hoogste en laagste punt; tracks met weinig hoogteverschil leveren zelden bruikbare gestandaardiseerde tracks. Daarnaast kijken we naar de verhouding tussen de oppervlakte van de convexe schil rond de track (welke oppervlakte bestrijkt de track) en de lengte van de track. Een lage verhouding geeft een track aan die veel kronkelt en dus niet bruikbaar is.

Bij het importeren zetten we de relevante tracks tevens om naar gestandaardiseerde tracks. De gestandaardiseerde tracks hebben punten met altijd exact 1 seconde tussentijd. Bovendien stellen we nog een aantal extra eisen aan de snelheid en richtingswijziging tussen de opeenvolgende punten.

Vervolgens analyseren we de dichtheid van de gestandaardiseerde tracks in de omgeving van de windturbines. Ter vergelijking herhalen we de analyse voor controlepunten in de buurt van de windturbines. De vergelijking tussen deze analyses geeft inzicht in de mogelijke invloed van windturbines op de activiteit van de vogels.

Momenteel zijn nog niet alle beschikbare tracks geanalyseerd. Op basis van deze voorlopige resultaten kunnen we wel al een aantal conclusies trekken. De gemiddelde activiteit rond de windturbines is mogelijk de helft lager dan rond de controlepunten. Dit verschil is momenteel niet significant. Kijken we naar de verticale verdeling van de activiteit, dan zien we dat de activiteit rond de windturbines ter hoogte van de rotorbladen slechts een tiende is van deze rond de controlepunten op dezelfde hoogte. Bij de horizontale verdeling zien we dat de activiteit in de onmiddellijke omgeving van de windturbines slechts een tiende bedraagt van deze rond de controlepunten op dezelfde afstand. Dit speelt enkel ter hoogte van de rotorbladen. Zowel het verschil in activiteit als de verticale en horizontale verdeling zijn significant.

Samengevat kunnen we stellen dat vogels in eerste instantie de onmiddellijk omgeving van windturbines vermijden. In tweede instantie vliegen ze op een grotere hoogte en in een grotere straal rond de windturbines.

In dit rapport maken we abstractie van het zichtbaarheid door de radar. Mogelijk zijn het lage aantal tracks op bepaalde locaties het gevolg van een beperkt zichtbaarheid door de radar. In een vervolgonderzoek is het wenselijk om het zichtbaarheid door de radar in kaart te brengen. En vervolgens deze informatie in rekening te brengen bij de analyses.

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
Inhoudsopgave	2
1 Inleiding	3
2 Classificatie van tracks	4
2.1 Relevante tracks	7
2.2 Gestandaardiseerde tracks	11
2.3 Kans op bruikbare gestandaardiseerde tracks in functie van generieke kenmerken	11
3 Analyse op basis van voxels	18
3.1 Analyse rond de windturbines	18
3.2 Vergelijkbare analyse in de omgeving van windturbines	24
3.3 Relatief verschil tussen beide modellen	28
Referenties	33

1 INLEIDING

Dit rapport beschrijft de stand van zaken van de analyse van de vogelradargegevens rond windturbines.

De ruwe data zit in een grote Postgresql databank. Om efficiënter te kunnen werken, importeren we de relevante informatie in een lokale SQLite databank. Hiervoor hebben we een set van functies uitgewerkt als het R package `birdradar` (Onkelinx & Carmen, 2024) in de statische software R (R Core Team, 2024).

Bij het importeren zetten we de relevante tracks tevens om naar gestandaardiseerde tracks. De gestandaardiseerde tracks hebben punten met altijd exact 1 seconde tussentijd. Bovendien stellen we nog een aantal extra eisen aan de snelheid en richtingswijziging tussen de opeenvolgende punten. De volledige set van eisen beschrijven we in een volgend hoofdstuk.

Vervolgens analyseren we de dichtheid van de gestandaardiseerde tracks in de omgeving van de windturbines. Ter vergelijking herhalen we de analyse voor controlepunten in de buurt van de windturbines. De vergelijking tussen deze analyses geeft inzicht in de mogelijke invloed van windturbines op de activiteit van de vogels.

2 CLASSIFICATIE VAN TRACKS

De software bij de radar geeft een automatische classificatie van de ruwe tracks. In tabel 2.1 geven we een overzicht van het aantal ruwe tracks per categorie na automatische classificatie. Het betreft de ruwe tracks van January 2021 tot en met November 2023.

Tabel 2.1: Aantal beschikbare tracks opgedeeld volgens de automatische classificatie. Aandeel: verhouding op totaal

klasse	aantal	aandeel
SMALL_BIRD	143607011	26.0%
INSECTS	135516955	24.5%
MEDIUM_BIRD	80308285	14.5%
LARGE_BIRD	65911588	11.9%
VEHICLE	41458617	7.5%
UNKNOWN	34912334	6.3%
SLOW_TARGET	26231854	4.7%
FLOCK	14126072	2.6%
AIRCRAFT	5774040	1.0%
FAST_TARGET	4816261	0.9%

Een kleine fractie van de ruwe tracks hebben we in het veld gecontroleerd (tab. 2.2). In tabel 2.3 geven we een overzicht van de waarnemingen. Tenslotte geeft tabel 2.4 per automatische categorie het aantal manueel gecontroleerde tracks dat effectief vogels zijn.

Tabel 2.2: Aantal in het veld manueel gecontroleerde tracks. Aandeel: aandeel manueel controleerde tracks t.o.v. alle tracks per categorie.

klasse	automatisch	manueel	aandeel
SMALL_BIRD	143602675	4336	0.00302%
MEDIUM_BIRD	80304702	3583	0.00446%
FLOCK	14123122	2950	0.02088%
LARGE_BIRD	65910013	1575	0.00239%
INSECTS	135515637	1318	0.00097%
VEHICLE	41458582	35	0.00008%
UNKNOWN	34912316	18	0.00005%
SLOW_TARGET	26231839	15	0.00006%
FAST_TARGET	4816250	11	0.00023%
AIRCRAFT	5774030	10	0.00017%

Tabel 2.3: Aantal beschikbare tracks opgedeeld volgens identificatie in het veld. Aandeel: aandeel t.o.v. het totaal.

vogel	soort	aantal	aandeel
ja	zilvermeeuw	1996	14.41%
ja	kokmeeuw	1370	9.89%
ja	houtduif	1231	8.89%
nee	geen vogel	895	6.46%
nee	schip	668	4.82%
ja	buizerd	584	4.22%
ja	gierzwaluw	583	4.21%
ja	kauw	493	3.56%
ja	grauwe gans	491	3.54%
nee	regen	404	2.92%
nee	kraan	349	2.52%
ja	boerenzwaluw	345	2.49%
ja	kleine mantelmeeuw	323	2.33%
ja	kievit	301	2.17%
ja	kolgans	281	2.03%
ja	zwaluw	274	1.98%
nee	vleermuis spec	273	1.97%
ja	lijster	252	1.82%
ja	eend spec	199	1.44%
ja	zangvogel	190	1.37%
ja	vink	173	1.25%
ja	koperwiek	163	1.18%
ja	veldleeuwerik	159	1.15%
ja	wilde eend	150	1.08%
ja	gans spec	147	1.06%
ja	spreeuw	143	1.03%
ja	grote meeuw	115	0.83%
ja	aalscholver	109	0.79%
ja	zwartkopmeeuw	100	0.72%
ja	zanglijster	83	0.60%
ja	holenduif	71	0.51%
ja	vogel spec	64	0.46%
ja	ooievaar	57	0.41%
ja	zwarte kraai	51	0.37%
nee	windturbine	50	0.36%
ja	slechtvalk	47	0.34%
nee	gewone dwergvleermuis	46	0.33%
ja	kleine vogel	44	0.32%
ja	bruine kiekendief	43	0.31%
ja	smient	41	0.30%
ja	watersnip	37	0.27%
ja	blauwe reiger	32	0.23%
ja	canada gans	27	0.19%

(vervolg van tabel op volgende pagina...)



Tabel 2.3: (vervolg van tabel op vorige pagina...)

vogel	soort	aantal	aandeel
ja	huiszwaluw	26	0.19%
ja	havik	23	0.17%
ja	duif spec	22	0.16%
ja	nijlgans	20	0.14%
ja	sperwer	20	0.14%
nee	voertuig	19	0.14%
ja	lepelaar	19	0.14%
nee	gebouw	18	0.13%
ja	graspieper	18	0.13%
ja	kleine meeuw	16	0.12%
ja	kramsvogel	16	0.12%
ja	torenvalk	16	0.12%
ja	stormmeeuw	15	0.11%
ja	oeverzwaluw	14	0.10%
ja	wulp	14	0.10%
ja	grote zilverreiger	12	0.09%
ja	boomvalk	10	0.07%
ja	wespendief	9	0.06%
ja	wintertaling	8	0.06%
ja	meerkoet	6	0.04%
ja	scholekster	6	0.04%
ja	boomleeuwerik	5	0.04%
ja	grote lijster	5	0.04%
nee	balonnetje	4	0.03%
ja	goudplevier	4	0.03%
ja	keep	4	0.03%
ja	krakeend	4	0.03%
ja	reiger spec	4	0.03%
ja	rietgors	4	0.03%
ja	rode wouw	4	0.03%
ja	slobeend	4	0.03%
nee	openstaande brug	3	0.02%
nee	rosse vleermuis	3	0.02%
ja	brandgans	3	0.02%
ja	witte kwikstaart	3	0.02%
ja	bergeend	2	0.01%
ja	grutto	2	0.01%
ja	middelgrote vogel	2	0.01%
ja	uil spec	2	0.01%
ja	visarend	2	0.01%
ja	grote zaagbek	1	0.01%
ja	houtsnip	1	0.01%
ja	knobbelzwaan	1	0.01%
ja	putter	1	0.01%

(vervolg van tabel op volgende pagina...)

Tabel 2.3: (vervolg van tabel op vorige pagina...)

vogel	soort	aantal	aandeel
ja	raaf	1	0.01%
ja	visdief	1	0.01%

Tabel 2.4: Manuele controle van automatische classificatie. Aandeel: aandeel tracks dat een vogel is per categorie.

klasse	vogel	geen vogel	aandeel
SMALL_BIRD	4090	246	94.3%
MEDIUM_BIRD	3168	415	88.4%
FLOCK	2450	500	83.1%
INSECTS	942	376	71.5%
LARGE_BIRD	456	1119	29.0%
VEHICLE	5	30	14.3%
FAST_TARGET	4	7	36.4%
SLOW_TARGET	4	11	26.7%
UNKNOWN	0	18	0.0%
AIRCRAFT	0	10	0.0%
totaal	11119	2732	80.3%

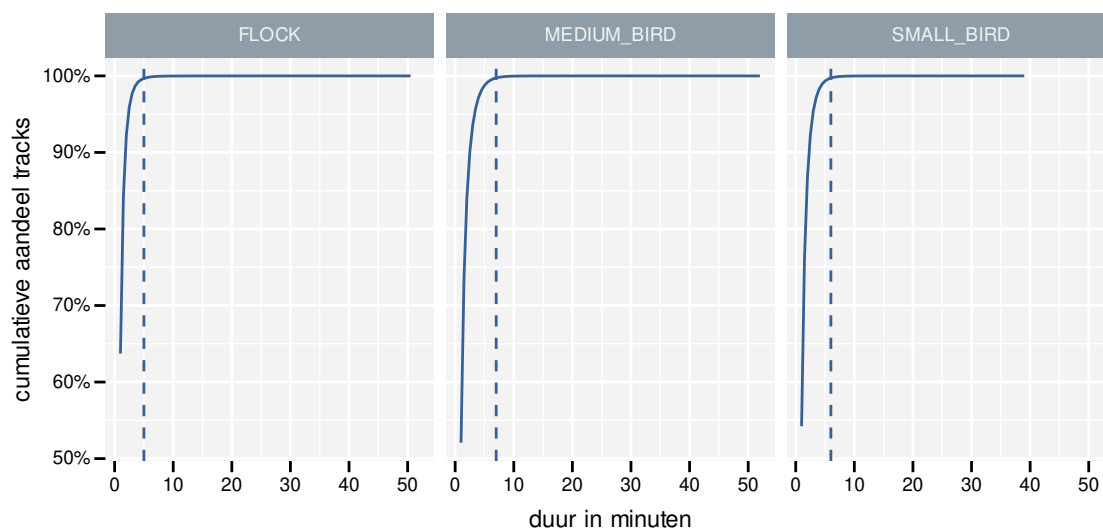
2.1 RELEVANTE TRACKS

Relevante tracks zijn tracks met een hoge waarschijnlijkheid om een vogel te zijn. We stellen dat de tracks voldoende lang in duur moeten zijn. Ten eerste omdat we dan zicht krijgen op een mogelijke verplaatsing. Ten tweede omdat we voldoende lange tracks nodig hebben wanneer we naar verschillen in gedrag willen kijken. Hoewel de tracks een positie per seconde hebben, zullen de meeste punten relatief kleine verschillen hebben. Voor verdere analyse moeten we de tracks mogelijk reduceren tot een punt per 5 of 10 seconden. Door de korte tijd tussen twee punten is er een sterke temporele autocorrelatie.

We gebruiken als ondergrens 60 seconden voor de duur van de track. Indien we de tracks per seconde kunnen gebruiken zijn dit minstens 60 punten. Dat komt overeen met minstens 12 (1 punt per 5 seconden) of 6 punten (1 punt per 10 seconden). We kijken in eerste instantie enkel naar de tracks die door de automatische classificatie als een vogel aangegeven zijn. We stellen vast dat bij de kortere tracks het vaker om een verkeerde indeling gaat (tabel 2.5). 95% van de tracks zijn hoogstens 3,5 minuten lang (fig. 2.1).

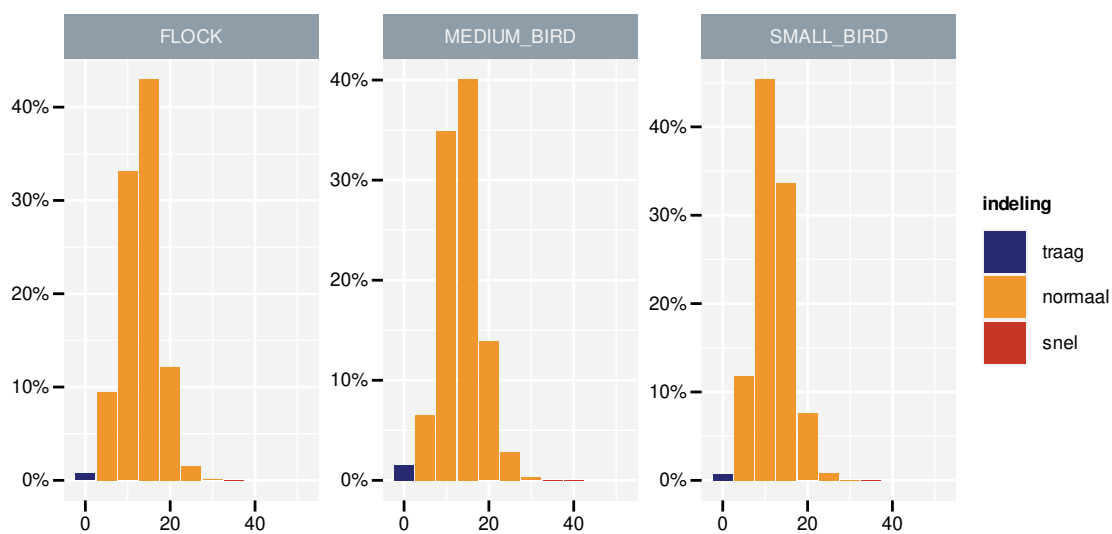
Tabel 2.5: Ruwe indeling in duur per klasse.

klasse	manueel	< 30 sec	30-60 sec	>60 sec
FLOCK	enkel automatisch	76.6%	17.4%	6.0%
FLOCK	geen vogel	48.8%	29.0%	22.2%
FLOCK	vogel	47.8%	28.2%	24.0%
MEDIUM_BIRD	enkel automatisch	75.5%	16.3%	8.1%
MEDIUM_BIRD	geen vogel	72.8%	18.6%	8.7%
MEDIUM_BIRD	vogel	25.0%	25.3%	49.7%
SMALL_BIRD	enkel automatisch	71.5%	18.7%	9.9%
SMALL_BIRD	geen vogel	58.5%	24.8%	16.7%
SMALL_BIRD	vogel	24.5%	26.6%	48.9%



Figuur 2.1: Histogram van de duur per tracks voor alle tracks die minstens 60 seconden lang zijn. De verticale stippelijijn geeft 95% van de tracks aan.

Behalve de lengte van de track kunnen we tevens kijken naar de luchtsnelheid van de track. Vogels hebben een minimale snelheid nodig om in de lucht te blijven. Anderzijds hebben ze een topsnelheid waar ze niet boven kunnen. Momenteel weerhouden we enkel tracks met een luchtsnelheid tussen 5 en 30 m/s (18 en 108 km/u). Het aantal tracks sneller dan 30 m/s is verwaarloosbaar klein (fig. 2.2). Ongeveer 1% van de tracks is trager dan 5 m/s. Slechts zes van de manueel gecontroleerde tracks zijn vogels waarbij de snelheid trager dan 5 m/s was.



Figuur 2.2: Histogram van de luchtsnelheid (in m/s) volgens de radar voor tracks van minstens 1 minuut.

In tabel 2.6 geven we per soort aan welke fractie van ruwe tracks aan deze criteria voldoet. De categorie MEDIUM BIRD omvat alle ruwe tracks met automatische categorie MEDIUM BIRD die niet manueel gecontroleerd werden. Alle andere rijen in de tabel zijn manueel gecontroleerde tracks.

Tabel 2.6: Aantal ruwe tracks die voldoen aan de minimale criteria. Verhouding geeft het aandeel tracks van minstens 60 seconds met luchtsnelheid tussen 5 en 30 m/s.

soort	totaal	import	verhouding
MEDIUM_BIRD	80304702	5934204	7.4%
zilvermeeuw	1996	941	47.1%
kokmeeuw	1370	491	35.8%
houtduif	1231	294	23.9%
geen vogel	895	61	6.8%
schip	668	161	24.1%
buizerd	584	293	50.2%
gierzwaluw	583	160	27.4%
kauw	493	88	17.8%
grauwe gans	491	96	19.6%
regen	404	0	0.0%
kraan	349	40	11.5%
boerenzwaluw	345	28	8.1%
kleine mantelmeeuw	323	166	51.4%
kievit	301	83	27.6%
kolgans	281	79	28.1%
zwaluw	274	35	12.8%
vleermuis spec	273	104	38.1%
lijster	252	122	48.4%
eend spec	199	101	50.8%
zangvogel	190	89	46.8%
vink	173	48	27.7%
koperwiek	163	72	44.2%
veldleeuwerik	159	42	26.4%
wilde eend	150	50	33.3%
gans spec	147	60	40.8%
spreeuw	143	30	21.0%
grote meeuw	115	65	56.5%
aalscholver	109	38	34.9%
zwartkopmeeuw	100	31	31.0%
zanglijster	83	42	50.6%
holenduif	71	18	25.4%
vogel spec	64	27	42.2%
ooievaar	57	13	22.8%
zwarte kraai	51	12	23.5%
windturbine	50	6	12.0%
slechtvalk	47	20	42.6%
gewone dwergvleermuis	46	3	6.5%
kleine vogel	44	17	38.6%
bruine kiekendief	43	14	32.6%
smient	41	14	34.1%
watersnip	37	2	5.4%

(vervolg van tabel op volgende pagina...)

Tabel 2.6: (vervolg van tabel op vorige pagina...)

soort	totaal	import	verhouding
blauwe reiger	32	10	31.2%
canada gans	27	6	22.2%
huiszwaluw	26	7	26.9%
havik	23	11	47.8%
duif spec	22	7	31.8%
nijlgans	20	8	40.0%
sperwer	20	12	60.0%
lepelaar	19	5	26.3%
voertuig	19	6	31.6%
gebouw	18	3	16.7%
graspieper	18	6	33.3%
kleine meeuw	16	13	81.2%
kramsvogel	16	8	50.0%
torenvalk	16	4	25.0%
stormmeeuw	15	9	60.0%
oeverzwaluw	14	2	14.3%
wulp	14	4	28.6%
grote zilverreiger	12	5	41.7%
boomvalk	10	9	90.0%
wespendief	9	6	66.7%
wintertaling	8	2	25.0%
meerkoet	6	4	66.7%
scholekster	6	2	33.3%
boomleeuwerik	5	3	60.0%
grote lijster	5	2	40.0%
balonnetje	4	3	75.0%
goudplevier	4	2	50.0%
keep	4	0	0.0%
krakeend	4	0	0.0%
reiger spec	4	2	50.0%
rietgors	4	0	0.0%
rode wouw	4	0	0.0%
slobeend	4	1	25.0%
brandgans	3	0	0.0%
openstaande brug	3	2	66.7%
rosse vleermuis	3	0	0.0%
witte kwikstaart	3	2	66.7%
bergeend	2	1	50.0%
grutto	2	0	0.0%
middelgrote vogel	2	1	50.0%
uil spec	2	1	50.0%
visarend	2	2	100.0%
grote zaagbek	1	0	0.0%
houtsnip	1	1	100.0%

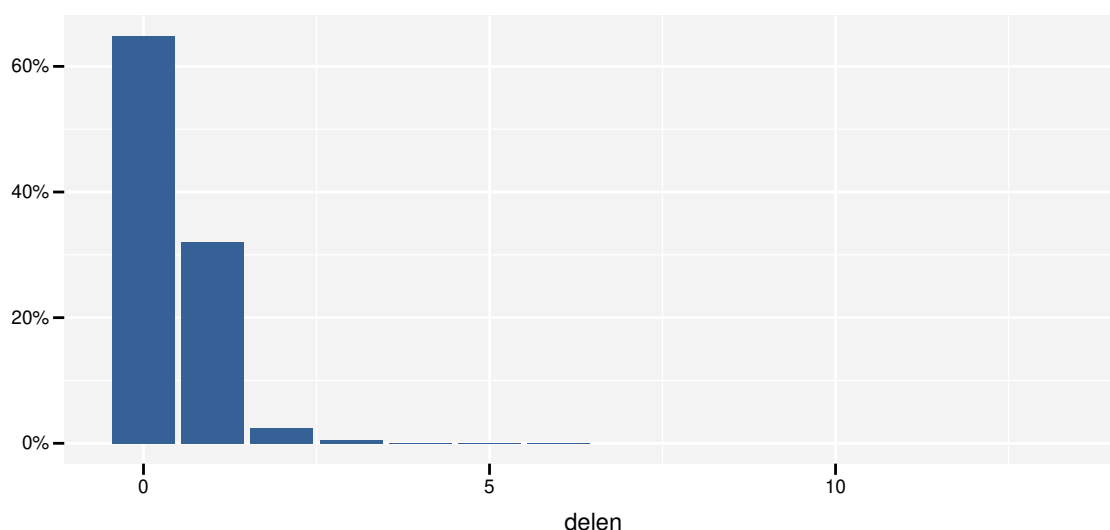
(vervolg van tabel op volgende pagina...)

Tabel 2.6: (vervolg van tabel op vorige pagina...)

soort	totaal	import	verhouding
knobbelzwaan	1	1	100.0%
putter	1	0	0.0%
raaf	1	0	0.0%
visdief	1	1	100.0%

2.2 GESTANDAARDISEERDE TRACKS

De tracks bevatten ongeveer elke seconde een punt. We zetten de tracks om naar tracks met vaste tijdsintervallen. We gebruik hiervoor een lineaire interpolatie op basis van de waargenomen posities. Wanneer de originele track posities bevat met minder dan 0.9 seconde tussentijd¹, dan verwijderen we beide posities. Wanneer de snelheid over de grond groter is dan 30 meter per second is, de wijziging in richting groter dan 157.5°, of de tijd tussen twee punten groter dan 5 seconden, splitsen we de tracks tussen deze twee punten. We weerhouden enkel de delen die minstens 60 seconden duren.



Figuur 2.3: Aantal ruwe tracks opgedeeld per aantal bruikbare tracks met vaste intervallen dat de ruwe track oplevert.

35.2% van de ruwe tracks blijken minstens een bruikbare track met vaste intervallen op te leveren (fig. 2.3). Gemiddeld resulteert een bruikbare ruwe track in 1.11 tracks met vaste tijdsintervallen.

2.3 KANS OP BRUIKBARE GESTANDAARDISEERDE TRACKS IN FUNCTIE VAN GENERIEKE KENMERKEN

Het standaardiseren van een individuele track gebeurt op zicht relatief snel. Het grote aantal tracks zorgt ervoor dat de volledige omzetting veel tijd vraagt. Om tijd en kosten uit te sparen, kunnen we overwegen om te starten met de ruwe tracks met voldoende potentie.

We beschouwen in eerste instantie enkel de relevante tracks. Deze voldoen aan volgende voorwaarden:

¹in de praktijk vaak minder dan 0.1 seconde



- Ofwel manuele identificatie als vogel, ofwel automatische classificatie als MEDIUM_BIRD.
- Minimale duur van 1 minuut.
- Gemiddelde snelheid tussen 5 en 30 meter per seconde.

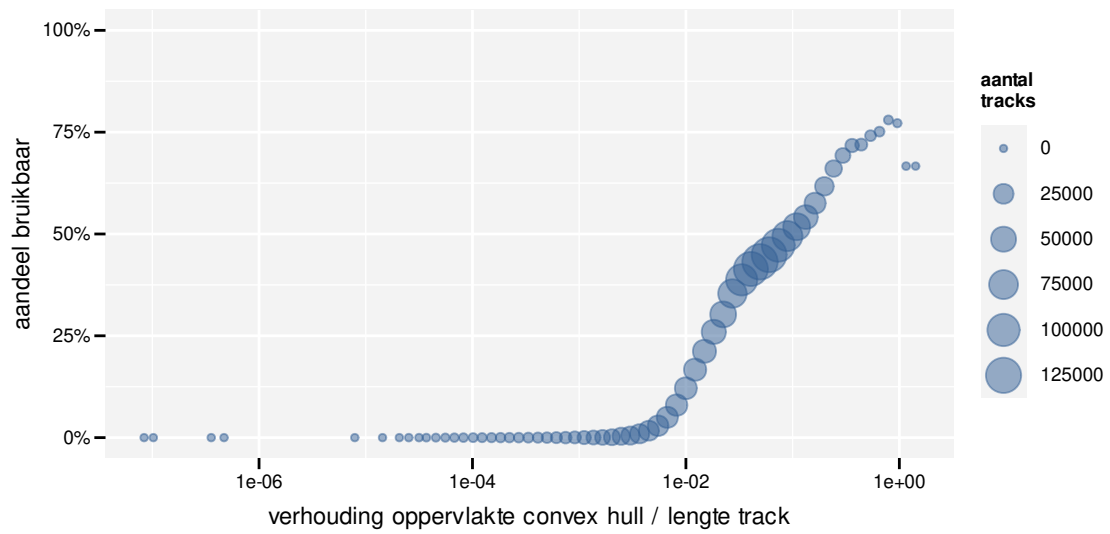
Vervolgens kijken we of we minstens één track met gelijke tijdsintervallen overhouden. In dat geval beschouwen de ruwe track als bruikbaar. Wegens het grote aantal relevante tracks loont het de moeite om na te gaan welke eenvoudig te berekenen kenmerken een invloed hebben om de kans om een bruikbare track op te leveren. We beschouwen volgende kenmerken:

1. Verhouding tussen de oppervlakte van de convex schil (convex hull) en de lengte van de track. Hoe kleiner de verhouding, hoe kleiner het gebied dat de track bestrijkt in verhouding tot de lengte van de track.
2. Hoogteverschil tussen het hoogste en laagste punt van de track.
3. Midden hoogte: het gemiddelde van de kleinste en grootste hoogte van de track.

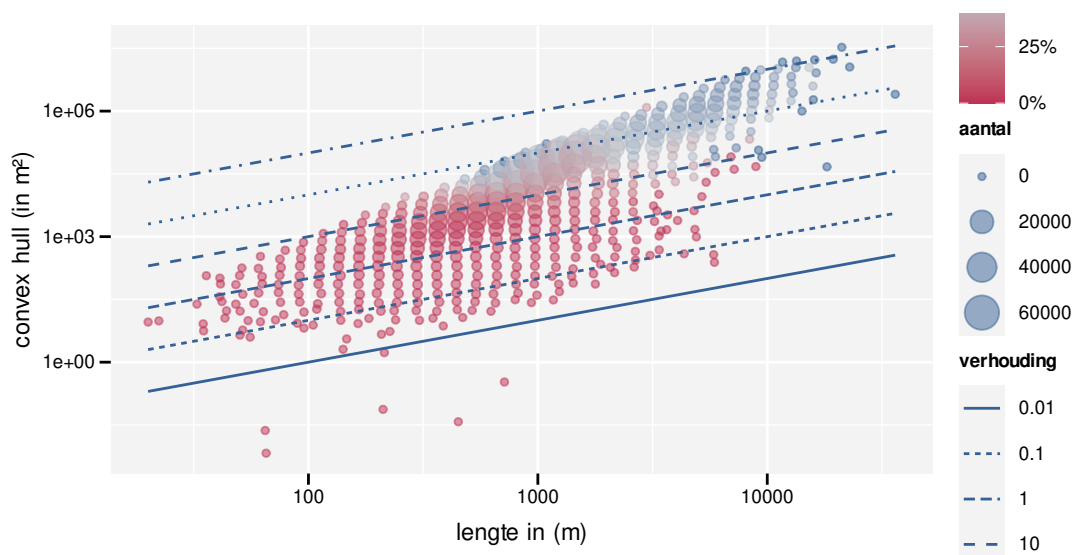
Uit de dataverkenning kunnen we al een eerste inschatting maken van de effecten.

- Bij een lage verhouding van de oppervlakte van de convexe schil en de lengte van de track is de kans klein op bruikbare tracks (fig. 2.4 en 2.5).
- Naarmate het hoogteverschil binnen de track groter is, stijgt de kans op een bruikbare track (fig. 2.6).
- De midden hoogte vertoont een maximum rond de 300 tot 500 m (fig. 2.7). Boven 1000 m is het effect onstabiel, deels door het beperkt aantal tracks.
- Op basis van de combinatie van de verhouding en het hoogteverschil krijgen we de indruk dat beide een ondergrens vertonen (fig. 2.8).
- De combinatie van verhouding en midden hoogte lijkt een optimale gebied te suggereren bij hoge verhouding en midden hoogte onder de 750 m (fig. 2.9).
- De combinatie van verhouding en midden hoogte lijkt een optimale gebied te suggereren bij een midden hoogte onder 750 m en een hoogteverschil boven 100 m (fig. 2.9).

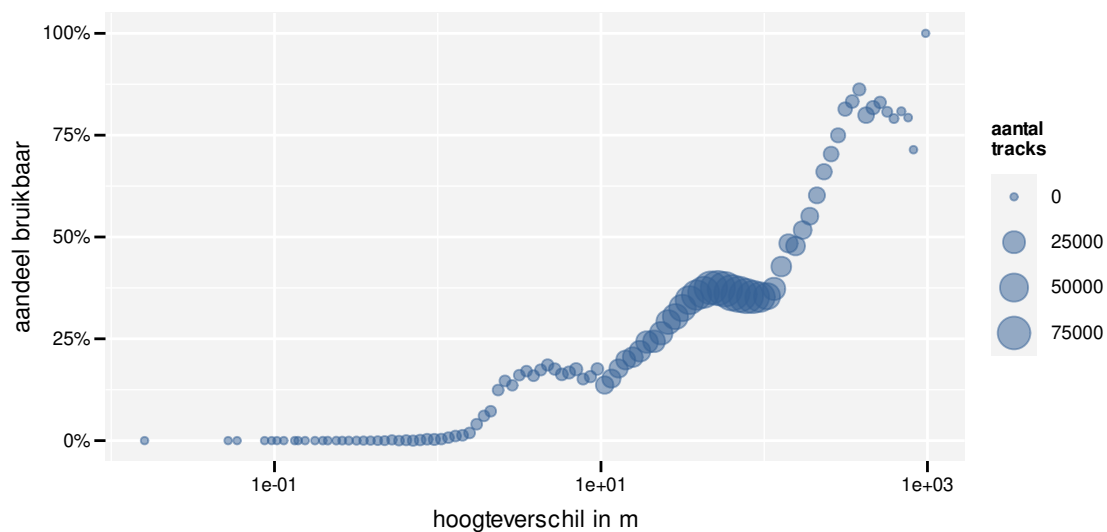
We voeren deze analyse uit op alle relevante tracks die we gestandaardiseerd hebben. In eerste instantie hebben we een aselechte set van relevante tracks gestandaardiseerd die de beschikbare variabiliteit van de drie kenmerken volledig dekt. Deze set liet toe om een eerste analyse uit te voeren. In tweede instantie hebben we ons beperkt tot de relevante tracks met een verhouding groter dan 1 en een hoogteverschil van groter dan 10 m. Omdat we relatief weinig tracks op lage hoogte hebben, zijn we in eerste instantie met deze tracks gestart. De grootte van de punten in de figuren is relatief ten opzichte van het aantal gestandaardiseerde tracks met die kenmerken. De zone met grotere punten geeft inzage in het verloop van de standaardisatie. Momenteel hebben we van de 5938434 relevante tracks 22.5% gestandaardiseerd. Dit leverde 171791 bruikbare gestandaardiseerde tracks op.



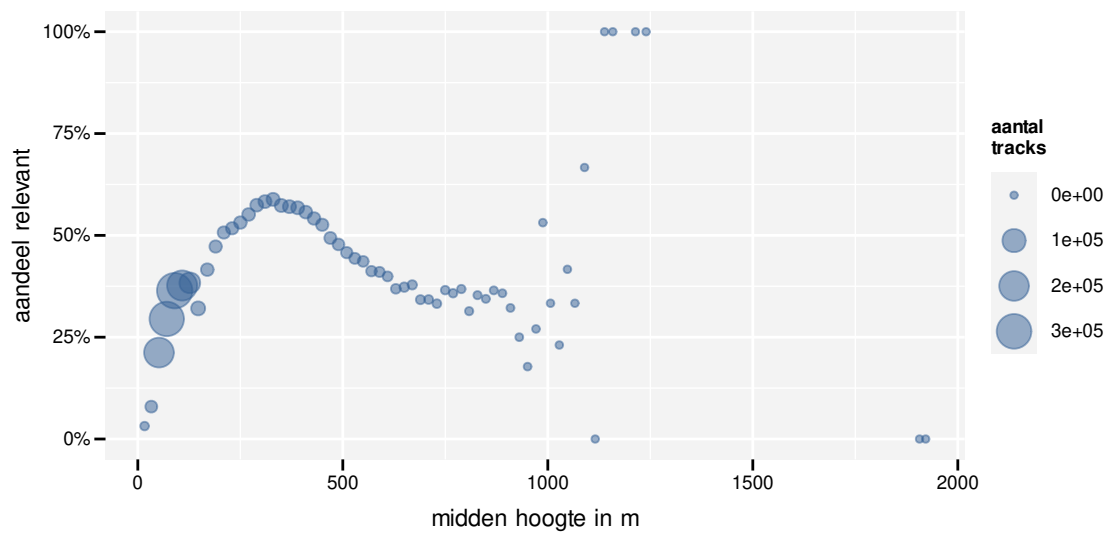
Figuur 2.4: Aandeel bruikbare tracks i.f.v. de verhouding van de oppervlakte van de convex hull en de lengte van de track.



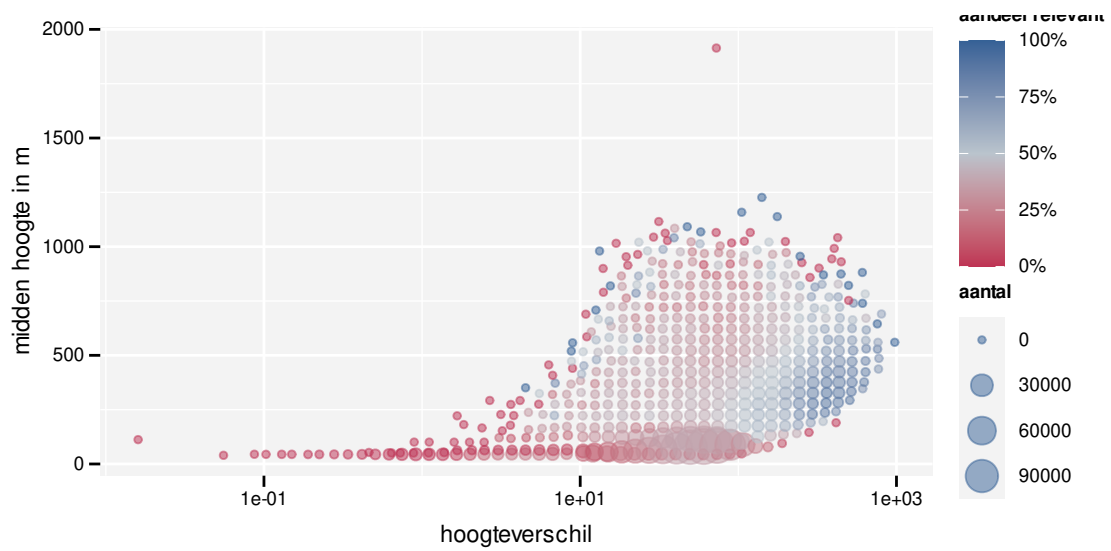
Figuur 2.5: Aandeel bruikbare tracks i.f.v. de de oppervlakte van de convex hull en de lengte van de track.



Figuur 2.6: Aandeel bruikbare tracks i.f.v. het hoogteverschil van de track.

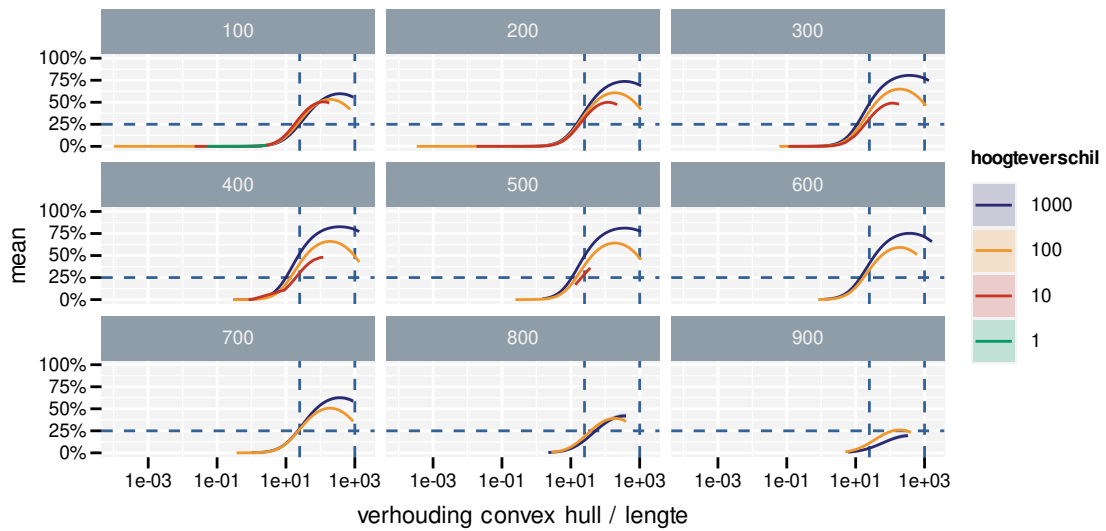


Figuur 2.7: Aandeel bruikbare tracks i.f.v. de hoogte in het midden van het laagste en het hoogste punt van de track.



Figuur 2.10: Aandeel bruikbare tracks i.f.v. het hoogteverschil van de track en de middenhoogte van de track.

In fig. 2.11 geven we de voorspelde kans op een bruikbare track weer in functie van de verhouding tussen de oppervlakte van de convexe schil en de lengte van de track, het hoogteverschil en de midden hoogte van de track. We hebben de hoogste kans op een bruikbare track wanneer de verhouding tussen 25 en 1000 is, het hoogteverschil minstens 10 m is en de midden hoogte onder de 800 m blijft.



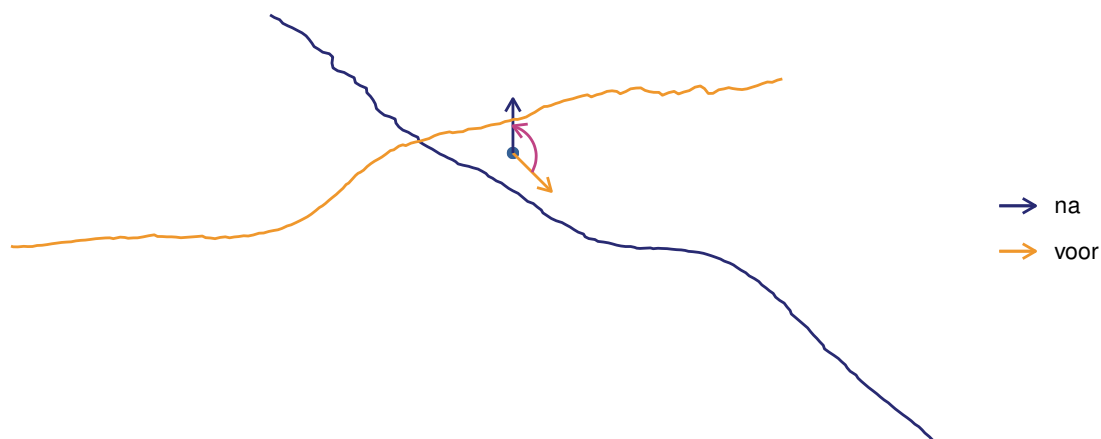
Figuur 2.11: Voorspeld aandeel bruikbare tracks i.f.v. de verhouding van de oppervlakte van de convex hull en de lengte van de track, het hoogteverschil van de track. Opgesplitst volgens de middenhoogte van de track.

3 ANALYSE OP BASIS VAN VOXELS

3.1 ANALYSE ROND DE WINDTURBINES

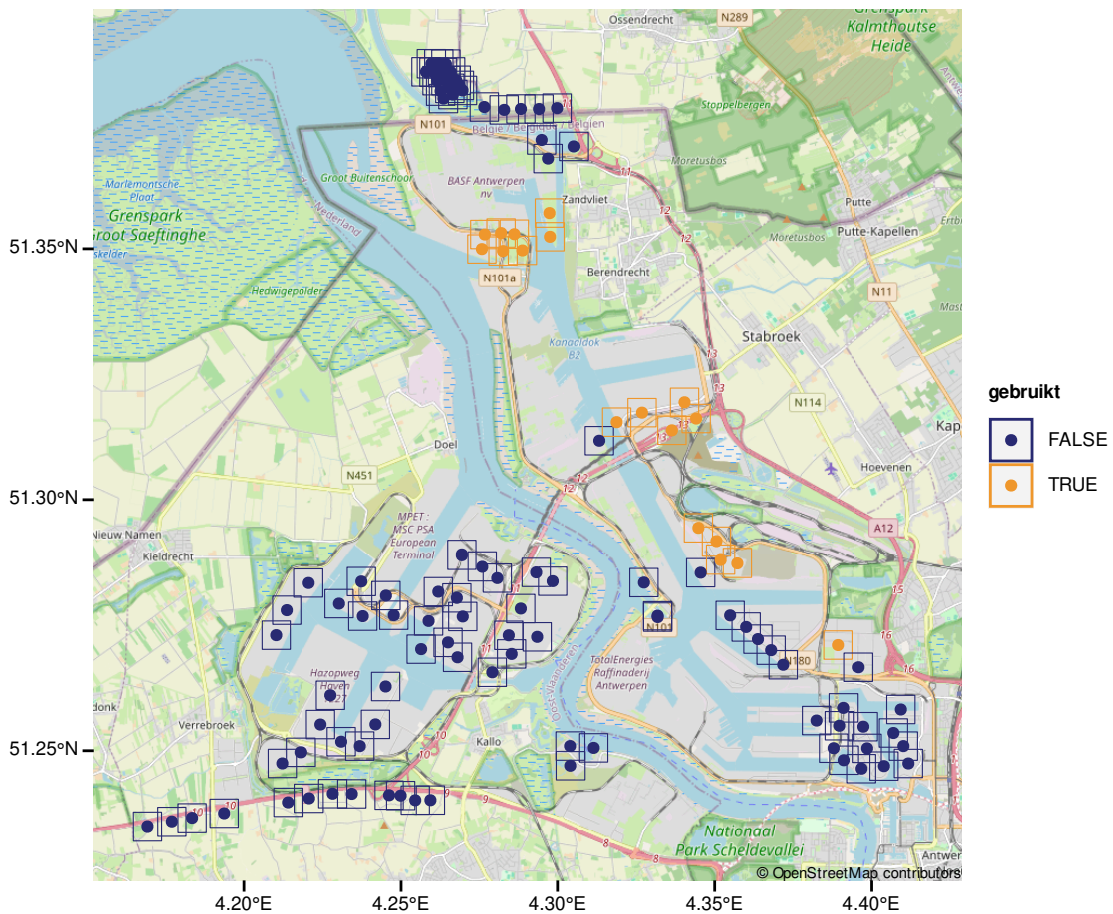
Een voxel is het driedimensionale equivalent van een pixel. Het is een balk met bepaalde breedte, lengte en hoogte. Voor de eenvoud definiëren we de voxel als een kubus met zijde 30 m.

Rond elke windturbine creëren we een raster van 21 voxels in elke richting. Per voxel tellen we het aantal tracks dat door de voxel gaat. Het aantal tracks per voxel is dan een maat voor de activiteit van vogels in de voxel. Onze hypothese is dat de activiteit van de vogels afhangt van de positie ten opzichte van de windturbine en van de windrichting. Om rekening te houden met de windrichting kozen we om de vogeltracks te roteren rond de positie van de windturbine zodat alle geroteerde tracks schijnbaar zuidenwind hebben. Op die manier kijken we naar de relatieve positie van de tracks ten opzichte van het rotorvlak. Bij zuidenwind is het rotorvlak oost - west georiënteerd. In figuur 3.1 geven we een voorbeeld waarbij we zowel de originele track met bijhorende windrichting weergeven als de geroteerde versie. We centreren het voxelgrid op de voet van de windturbine. Een positieve y-waarde is dan het gebied windafwaarts van de windturbine.



Figuur 3.1: Voorbeeld van een track (lijn) en de bijhorende windrichting (pijl) voor en na de rotatie. De fushia pijl geeft de draairichting weer.

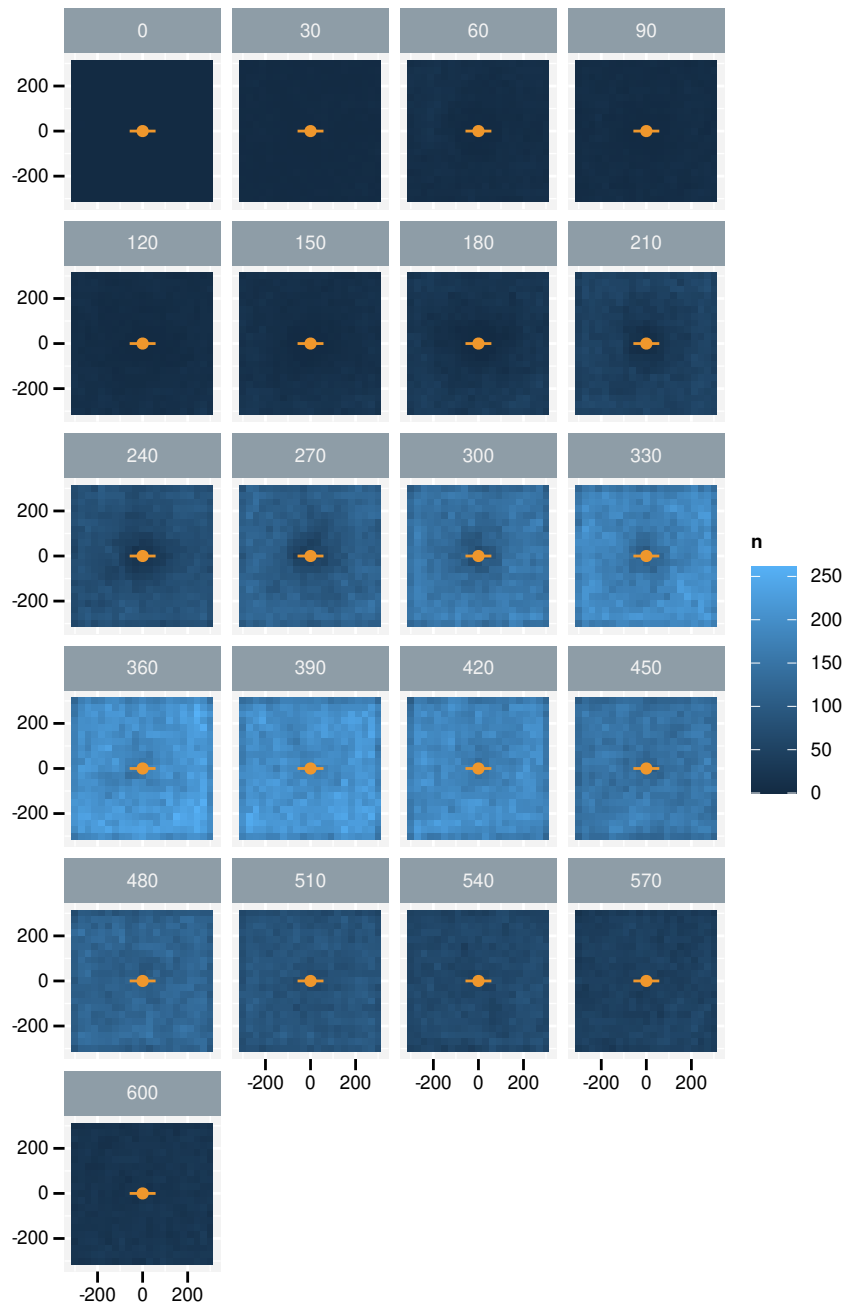
We berekenen het voxelgrid rond alle windturbines in de buurt van de radar. We weerhouden enkel de windturbines waar de som van het aantal tracks per voxel over alle voxels minstens 5% van de windturbine met het hoogste aantal tracks lager dan 200 m bedraagt (fig. 3.2). Dit criterium vermijdt dat we windturbines gebruiken waar de radar te weinig zicht heeft op lage hoogte. Hoe groter de afstand tussen de radar en de windturbine, hoe groter de kans dat de radar onvoldoende zicht heeft op lage hoogte. De windturbines in figuur 3.2 zijn alle windturbines die beschikbaar zijn in OpenStreetMap in de omgeving van de Antwerpse haven. In de omgeving staan een aantal kleinere windturbines. Voor deze analyse beperken we ons tot de turbines met minstens 1 MW vermogen. Indien OpenStreetMap geen informatie bevat over het vermogen, dan hebben we turbine alsnog gebruikt in de analyse.



Figuur 3.2: Gebruikte windturbines voor analyse met aanduiding van de regio van het voxelraster.

In figuur 3.3 tonen we de som over alle relevante windturbines. Elke deelfiguur toont een horizontale snede op een bepaalde hoogte. De meeste activiteit speelt zich af tussen 270 en 450 m. Dat is een zone boven het rotorvlak van de windturbines. Eventuele andere patronen in de figuur zijn minder duidelijk door het sterke verschil in activiteit tussen de verschillende hoogtes.

Om beter zicht te krijgen op de patronen, modelleren we ze met behulp van een statistisch model. De activiteit Y_{xyz} in voxel xy in snede z rond windturbine i volgens een Poisson verdeling met gemiddelde μ_{xyz} (3.1). Dit gemiddelde μ_{xyz} is met een log link gekoppeld aan de lineaire predictor η_{xyz} (3.2). De lineaire predictor η_{xyz} hangt af van het globaal gemiddelde β_0 , het effect b_i van de windturbine i , het effect van de hoogte b_z en het gemiddelde effect $\xi(xy, z)$ van de voxel xy in laag z . We veronderstellen dat het windturbine effect uit een Gaussiaanse verdeling met gemiddelde 0 en standaard afwijking σ_w (3.4). Het effect van de hoogte modelleren we als een tweede orde toevallsbeweging (second order random walk) (3.5). Het effect van de voxel $\xi(xy, z)$ modelleren we als horizontale lagen die een Gaussian Markov Random Field (GMRF) volgen waarbij twee boven elkaar gelegen lagen een autogressief model van order 1 volgen (3.6). Het model schat de correlatie tussen twee boven elkaar gelegen lagen op 0.914 (0.896; 0.929). Het GMRF zorgt voor een ruimtelijke autocorrelatie in het horizontale vlak volgens een Matern covariantie functie.



Figuur 3.3: Overzicht van het totaal aantal tracks per voxel over alle geselecteerde windturbines. In oranje geven we de positie van de mast en rotor weer in 2 dimensies. De deelfiguren geven de verschillende hoogtes weer.

$$Y_{ixyz} \sim \text{Poisson}(\mu_{ixyz}) \quad (3.1)$$

$$\log(\mu_{ixyz}) = \eta_{ixyz} \quad (3.2)$$

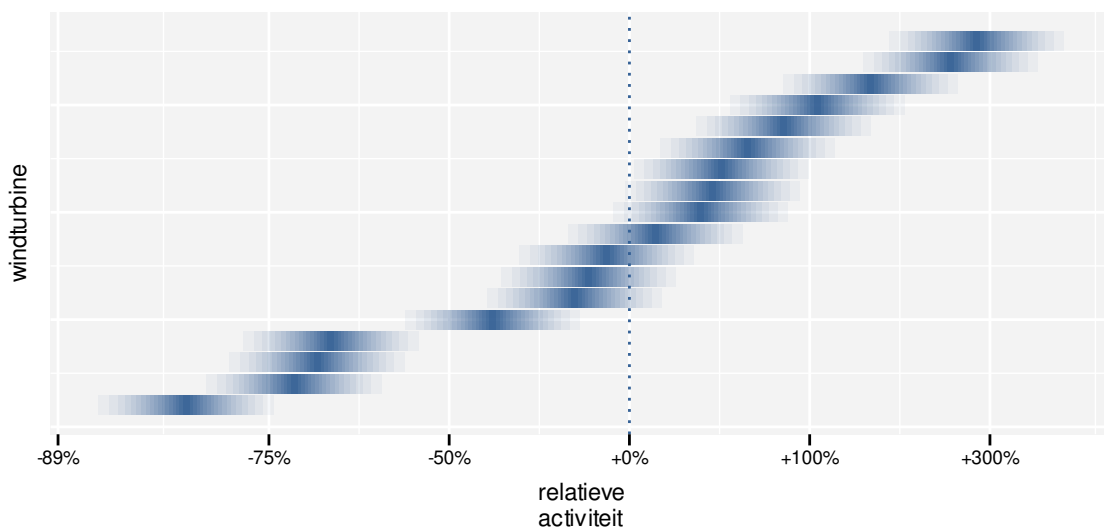
$$\eta_{ixyz} = \beta_0 + b_i + b_z + \xi(xy, z) \quad (3.3)$$

$$b_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_w) \quad (3.4)$$

$$\Delta_z^2 = (b_{z+1} - b_z) - (b_z - b_{z-1}) \Delta_z^2 \sim \mathcal{N}(0, \sigma_z) \quad (3.5)$$

$$\xi(xy, z) = a\xi(xy, z - 1) + w(xy, z) \quad (3.6)$$

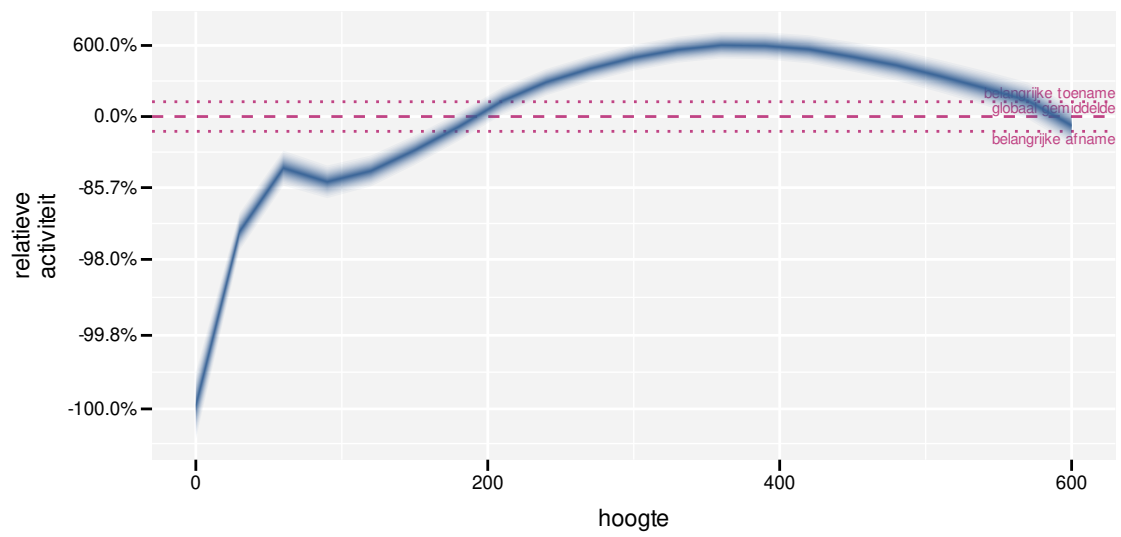
In figuur 3.4 geven we het effect van de windturbine. Het verschil tussen de windturbine met hoogste en laagste activiteit is begrenst omdat we enkel de windturbines gebruiken die minstens 10% van de activiteit van de windturbine met hoogste activiteit hebben. De positie van de radar zal voor een belangrijk deel dit effect verklaren. De radar heeft immers een beperkt bereik. Afhankelijk van de afstand tussen de radar en de windturbine zal de radar meer of minder tracks kunnen waarnemen.



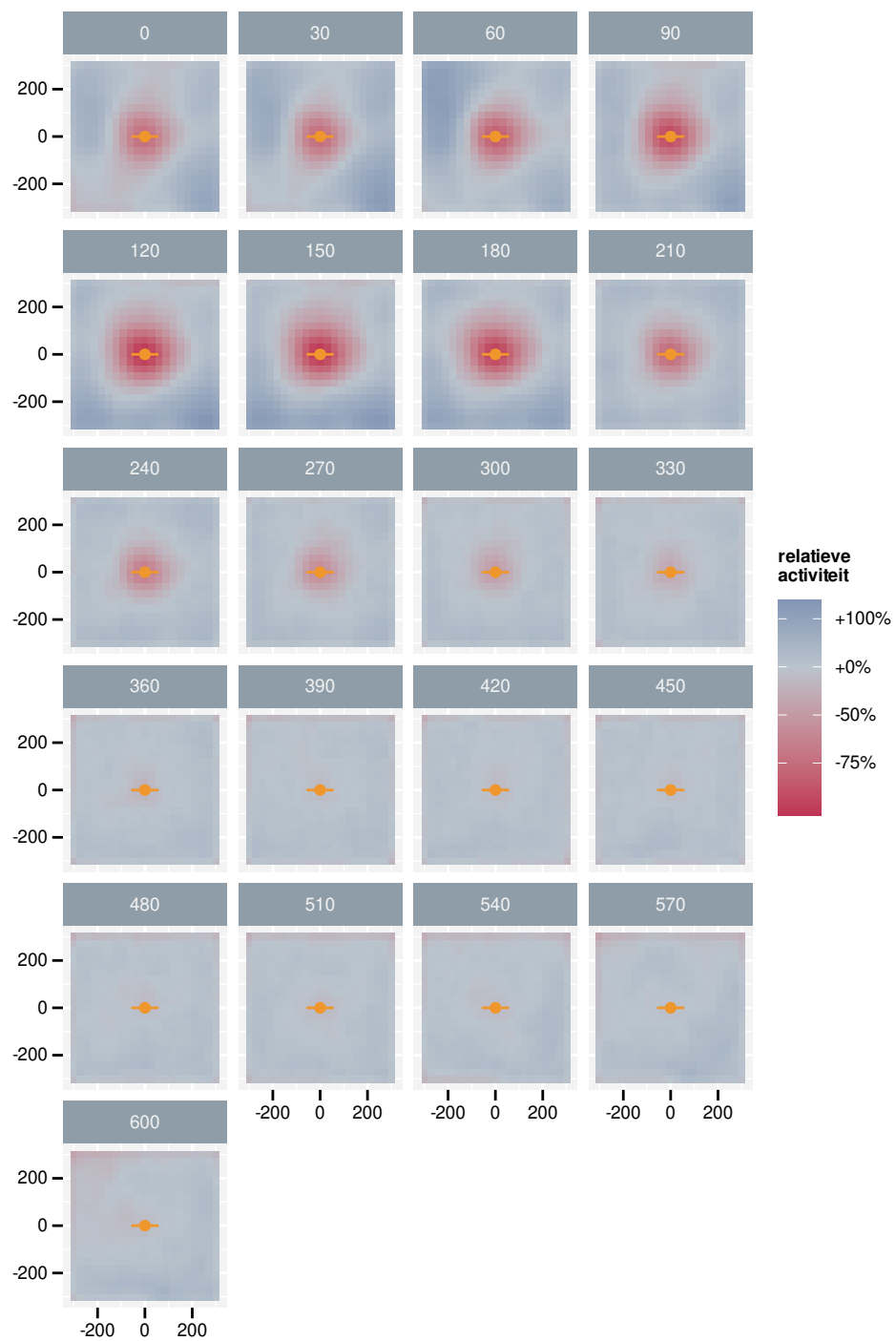
Figuur 3.4: Gemiddelde activiteit per windturbine. Relatief ten opzichte van de globaal gemiddelde activiteit.

Zoals we reeds konden verwachten op basis van figuur 3.3, stellen we een sterk effect volgens de hoogte vast (fig. 3.5). Tussen 200 en 600 m hoogte stellen we een hoger dan gemiddelde activiteit vast met een piek rond 400 m. Onder de 100 m stellen we een sterke afname van de activiteit vast. Dit is mogelijk te wijten aan beperkingen qua zichtbaarheid door de radar.

Ten slotte hebben we nog het effect van de voxels, na de correctie voor het effect van de windturbine en de hoogte. Figuur 3.6 toont twee verschillende patronen. Boven 330 m zien we relatief weinig verschillen tussen verschillende posities in de horizontale vlakken. Tussen 90 en 210 m stellen we een sterk patroon vast in de horizontale lagen. Vlakbij de windturbine is de activiteit beduidend lager dan rond de windturbine. Merk op dat het bereik van de daling in activiteit min of meer overeenkomt met het rotorvlak. De zone met lagere activiteit lijkt windafwaarts van de windturbine (bovenrand van de figuur) iets groter te zijn dan windopwaarts van de windturbine.



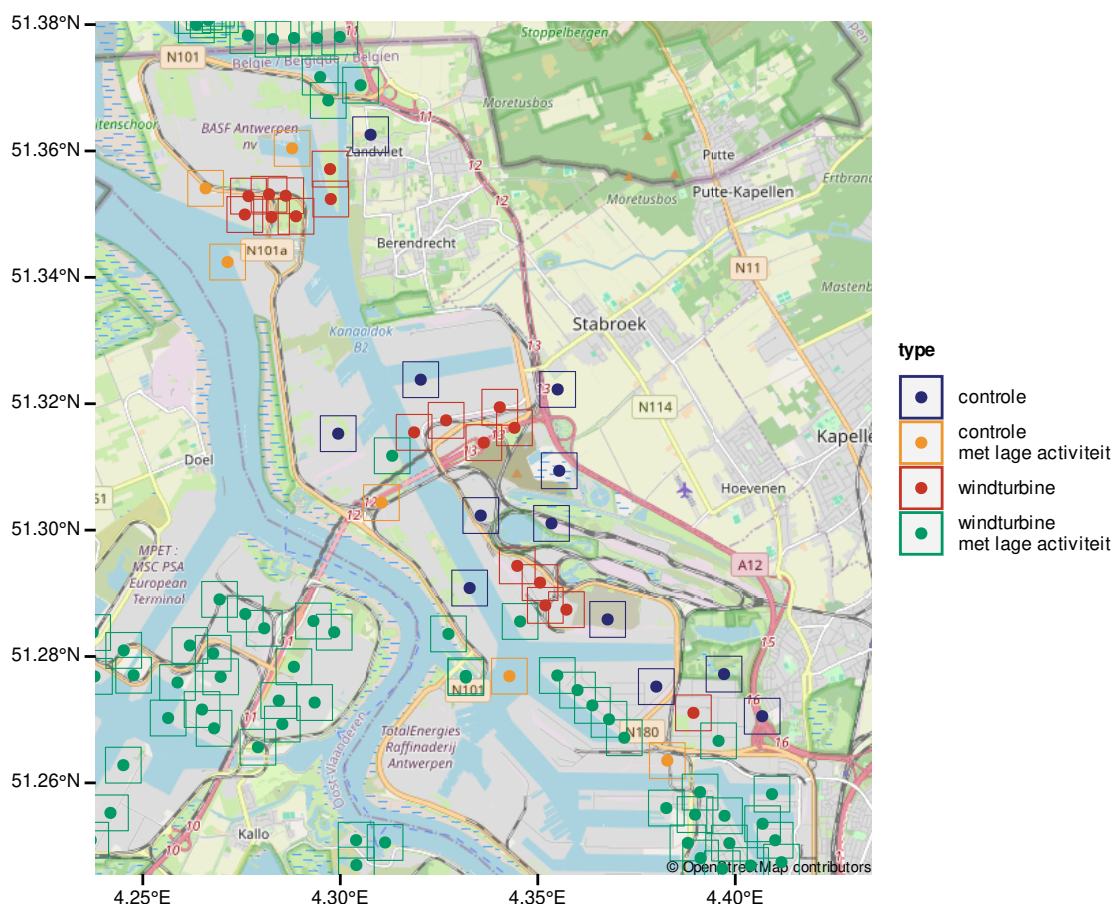
Figuur 3.5: Effect van de hoogte op de relatieve activiteit. Relatief ten opzichte van de globaal gemiddelde activiteit.



Figuur 3.6: Gemiddelde activiteit in de omgeving van een windturbine. Relatief ten opzichte van de gemiddelde activiteit op die hoogte.

3.2 VERGELIJKBARE ANALYSE IN DE OMGEVING VAN WINDTURBINES

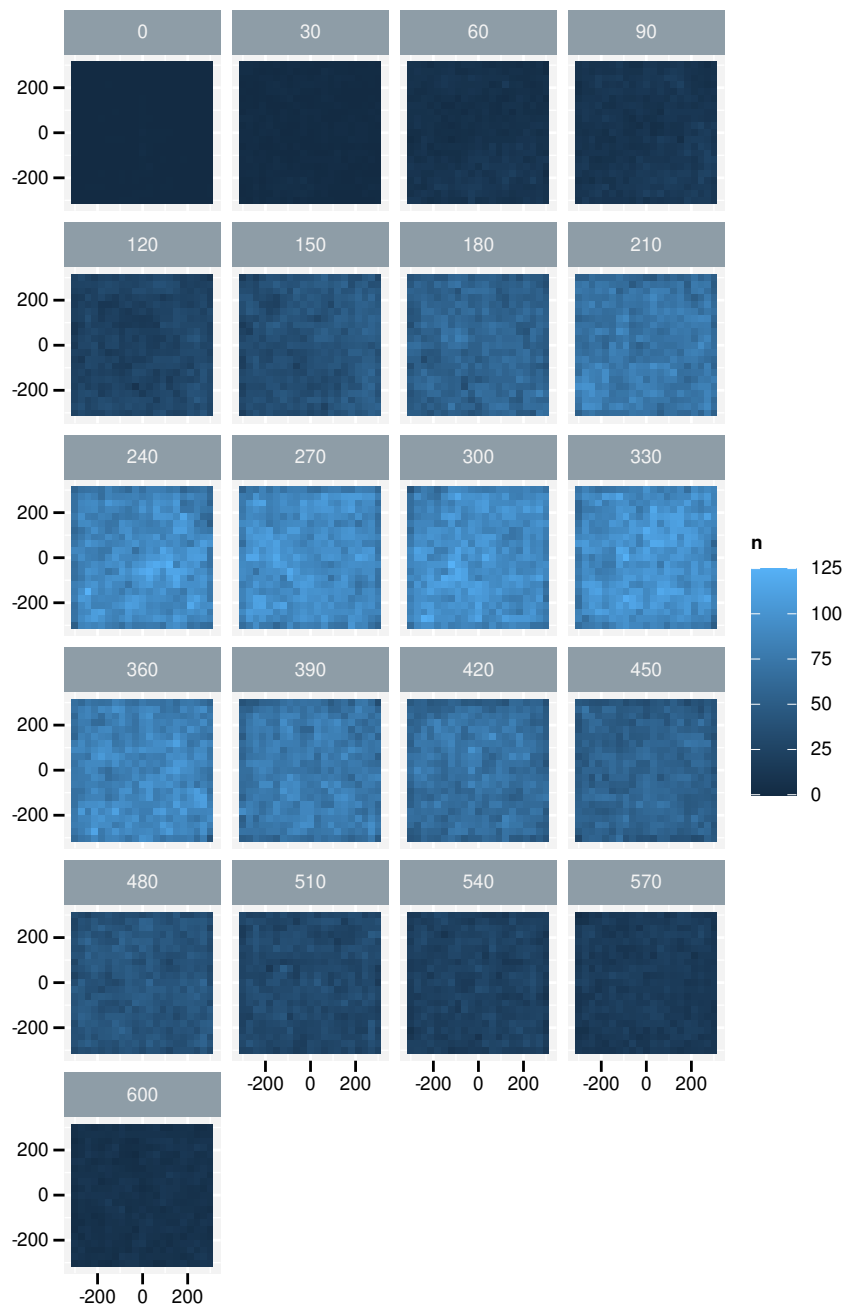
Om na te gaan wat de mogelijke invloed van de windturbine is, herhalen we de analyse voor locaties zonder windturbine. We generen een set van aselechte punten in de omgeving van windturbine zodat de voxelrasters van de controlepunten dichtbij de windturbine zijn, zonder overlap tussen de voxelrasters (fig. 3.7). Ook hier weerhouden we enkel de controlepunten waarvan de activiteit op hoogste 200 m minstens 5% bedraagt van de windturbine met hoogste activiteit onder 200 m. De controlepunten bestaat uit 12 punten, terwijl de originele set uit 18 punten bestaat.



Figuur 3.7: Aselecte controle punten nabij gebruikte windturbines. Kandidaat verwijst naar controle punten met te weinig activiteit.

Wanneer we naar de ruwe gegevens van de controlepunten kijken stellen we opnieuw een sterk effect van de hoogte vast (fig. 3.8). Om een betere vergelijking te kunnen maken, fitten we hetzelfde statistisch model aan de controlepunten.

In eerste instantie kijken we naar de hyperparameters van het model. Dit zijn de parameters die de variabiliteit van de verschillende componenten van het model bepalen. Bij de controlepunten stellen we minder sterke correlaties vast (tabel 3.1). De correlatie tussen de horizontale lagen daalt van 0.90 naar 0.79. De afstand waarover de horizontale autocorrelatie een rol speelt daalt van 460 m naar 320 m. De sterke van de horizontale autocorrelatie halveert. De verschillen tussen de controle punten daalt met een derde. Enkel de variabiliteit van het hoogte-effect verdubbelt nagenoeg. Het hoogte-effect beschrijven we met een tweede orde toevalsbeweging. Een kleine variantie van een tweede orde toevalsbeweging zorgt voor een geleidelijk patroon. Naarmate de variantie groter is, is het patroon flexibeler.

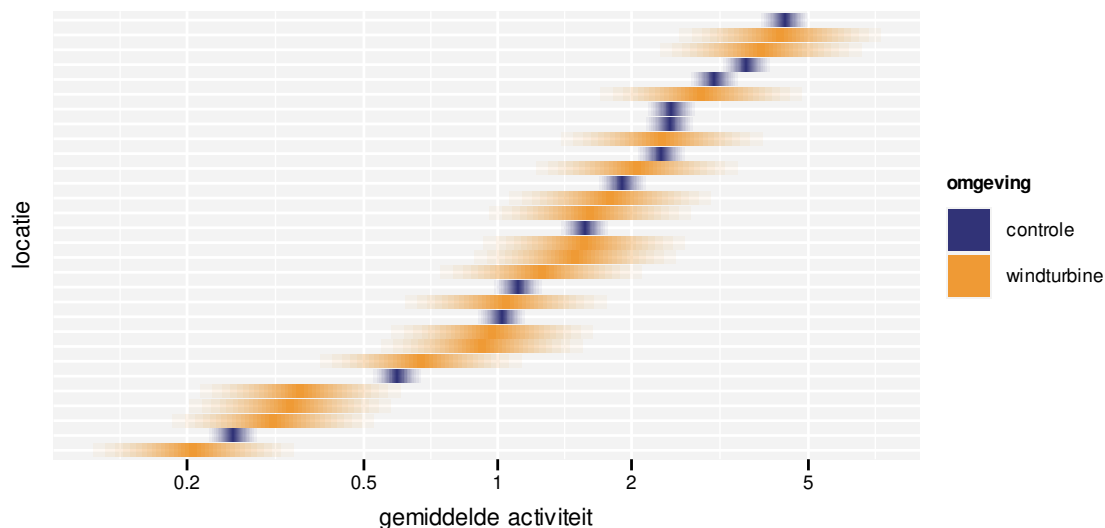


Figuur 3.8: Overzicht van het totaal aantal tracks per voxel over willekeurige punten in de buurt van windturbine. De deelfiguren geven de verschillende hoogtes weer.

Tabel 3.1: Verschil in hyperparameters tussen de modellen.

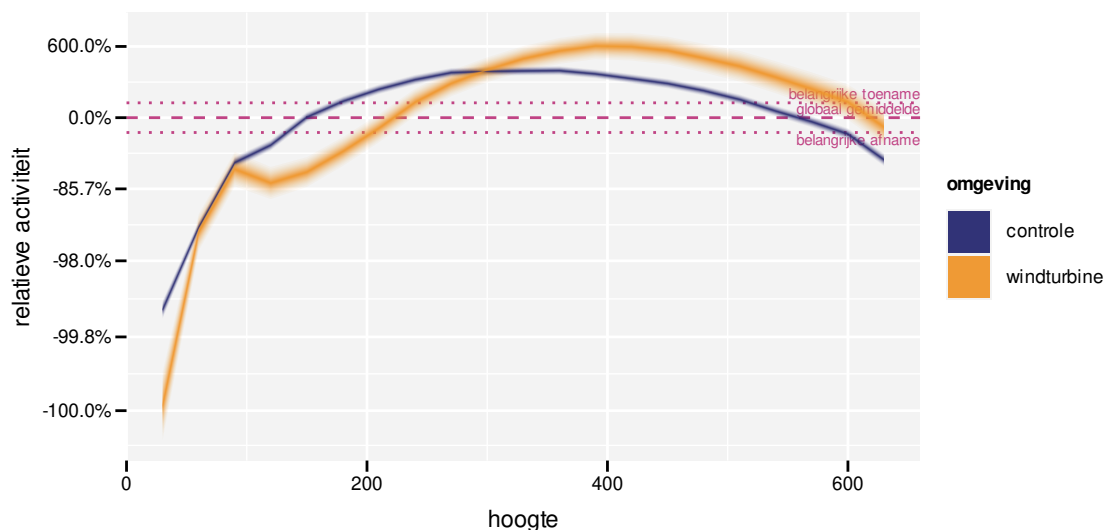
parameter	windturbine	controle
Correlatie tussen horizontale lagen	0.914 (0.896; 0.929)	0.840 (0.800; 0.875)
Afstand ruimtelijke autocorrelatie	620 (490; 800)	330 (280; 400)
Variatie ruimtelijke autocorrelatie	0.113 (0.071; 0.178)	0.032 (0.024; 0.043)
Variatie punten	0.77 (0.40; 1.41)	0.65 (0.29; 1.34)
Variatie hoogte	0.83 (0.38; 1.67)	0.13 (0.06; 0.24)

Bij de windturbine stellen we gemiddelde een lagere activiteit vast (-30% (-70%; +60%), fig. 3.9).



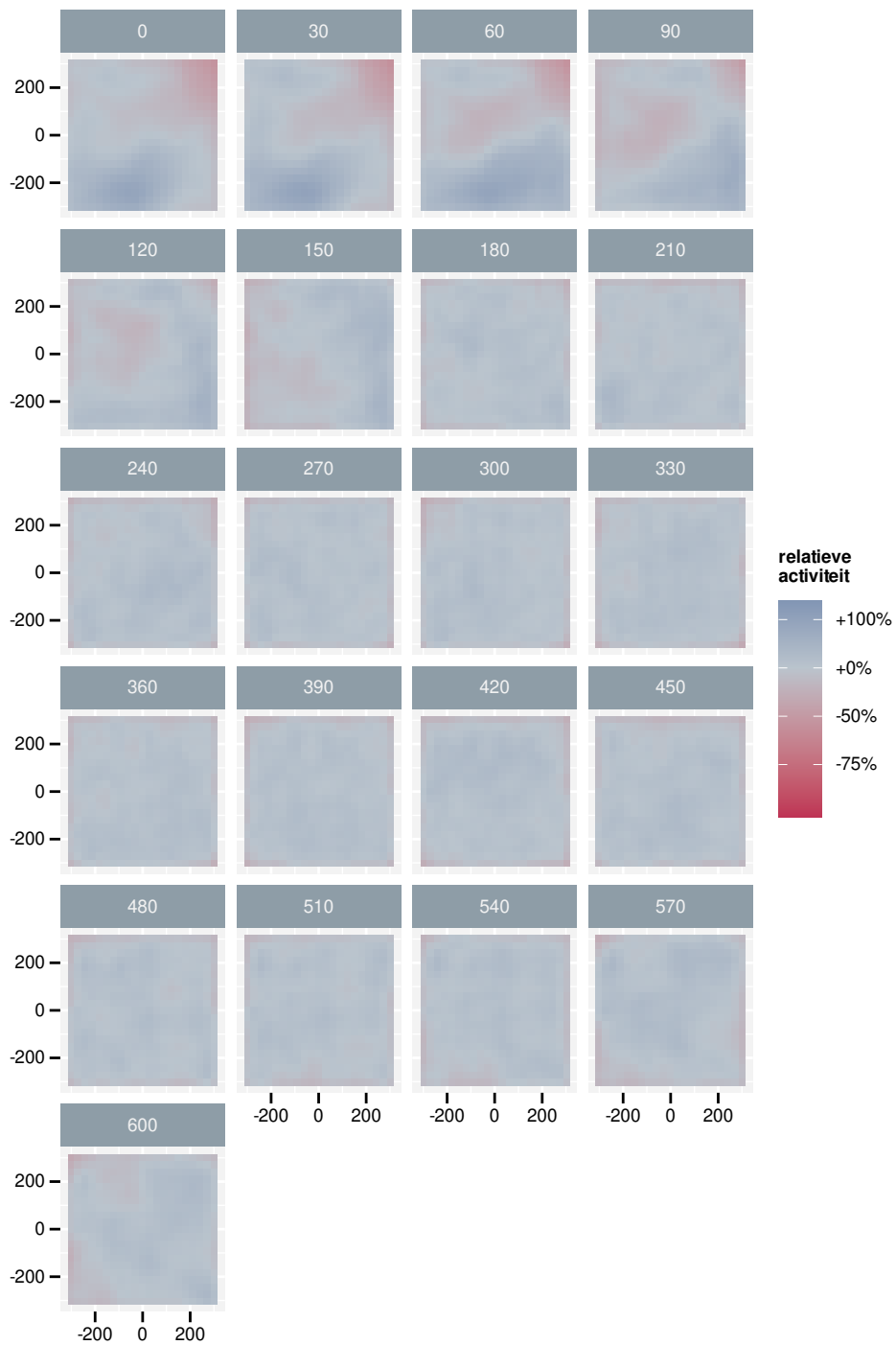
Figuur 3.9: Gemiddelde activiteit per locatie.

Het patroon van het hoogte effect verschilt eveneens (fig. 3.10). Rondom windturbine lijkt er een lagere activiteit te zijn onder 250 m en een hogere activiteit daarboven.



Figuur 3.10: Gemiddelde activiteit in functie van de hoogte. Relatief ten opzichte van de globaal gemiddelde activiteit.

Het verschil bij de voxels is spectaculair. Waar we rond de windturbines op lage hoogte (tot 300 m) sterke patronen vast stellen (fig. 3.6), zijn deze bij de controlepunten slechts in beperkte mate aanwezig (fig. 3.11). De kleurgradiënt in beide figuren gebruikt dezelfde kleurschaal zodat we ze gemakkelijk met elkaar kunnen vergelijken.

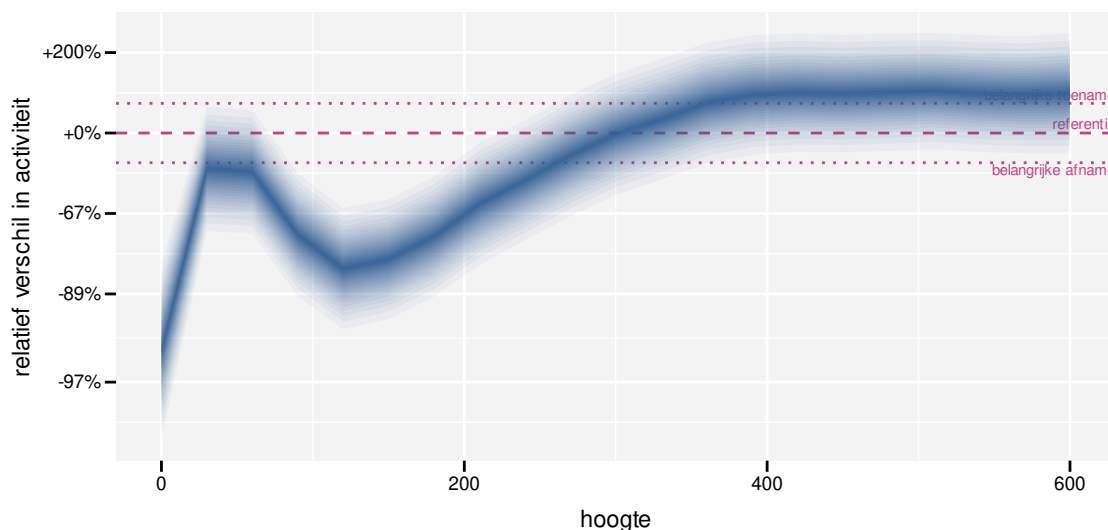


Figuur 3.11: Gemiddelde activiteit in de omgeving van een controlepunt. Relatief ten opzichte van de globaal gemiddelde activiteit.

3.3 RELATIEF VERSCHIL TUSSEN BEIDE MODELLEN

In deze sectie kijken we naar de verschillende in voorspelde waarde tussen beide modellen. Kijken we enkel naar de globale verschillen dan blijkt de activiteit rond windturbines gemiddeld -30% (-70%; +60%) te bedragen van de activiteit rond de nabijgelegen controlepunten.

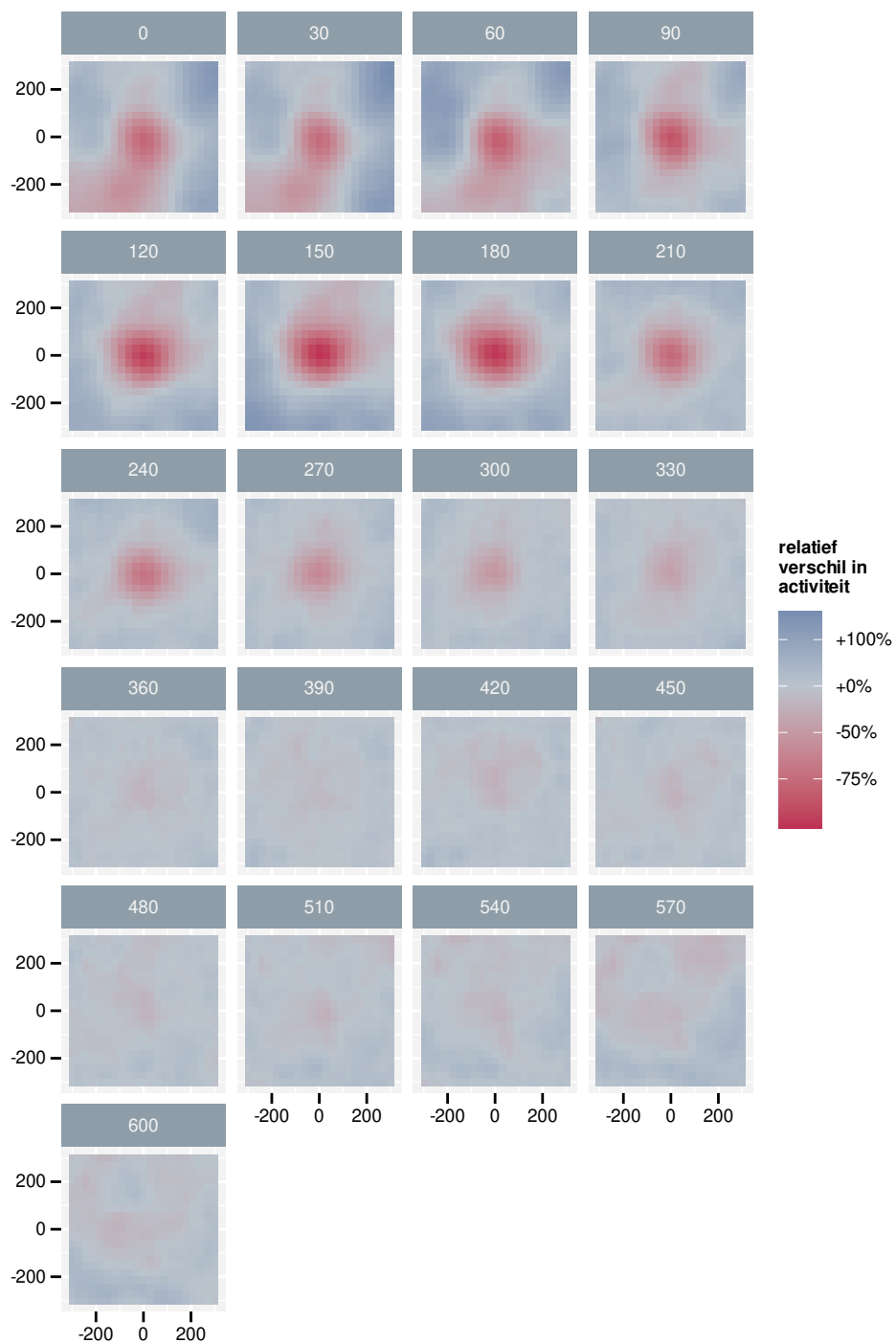
Boven 300 m stellen we geen significant verschil in relatieve activiteit vast (fig. 3.12). Onder 240 m stellen we rond de windturbines een sterke significante afname van de relatieve activiteit vast.



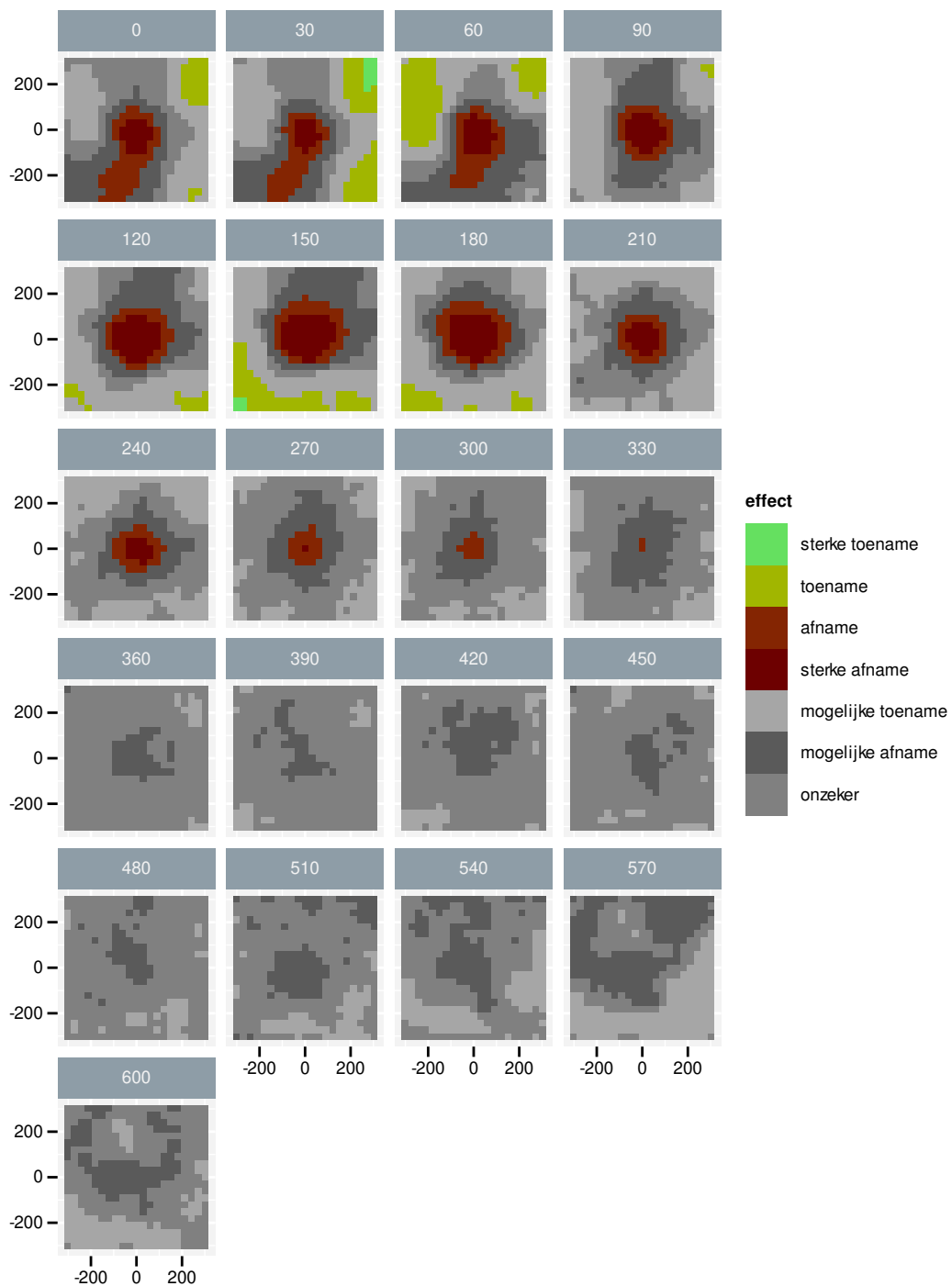
Figuur 3.12: Verschil in relatieve activiteit per hoogte rond windturbines versus rond controlepunten in de omgeving van windturbines.

Aangezien de ruimtelijke patronen rond de windturbines (fig. 3.6) en controle (fig. 3.11) sterk van elkaar verschillen, hoeft het niet te verbazen dat het verschil tussen beide patronen (fig. 3.13) op zich eveneens een sterk patroon vertoont. Boven 300 m is weinig verschil. Tussen 90 m en 240 m stellen we een sterke afname in relatieve activiteit vast. In figuur 3.14 hebben we de verschillen opgedeeld in een aantal klassen. We verwijzen naar Onkelinx (2024) voor meer uitleg over deze indeling. De rode zones geven de gebieden met een statische significante afname weer, de groene zones een statisch significante toename.

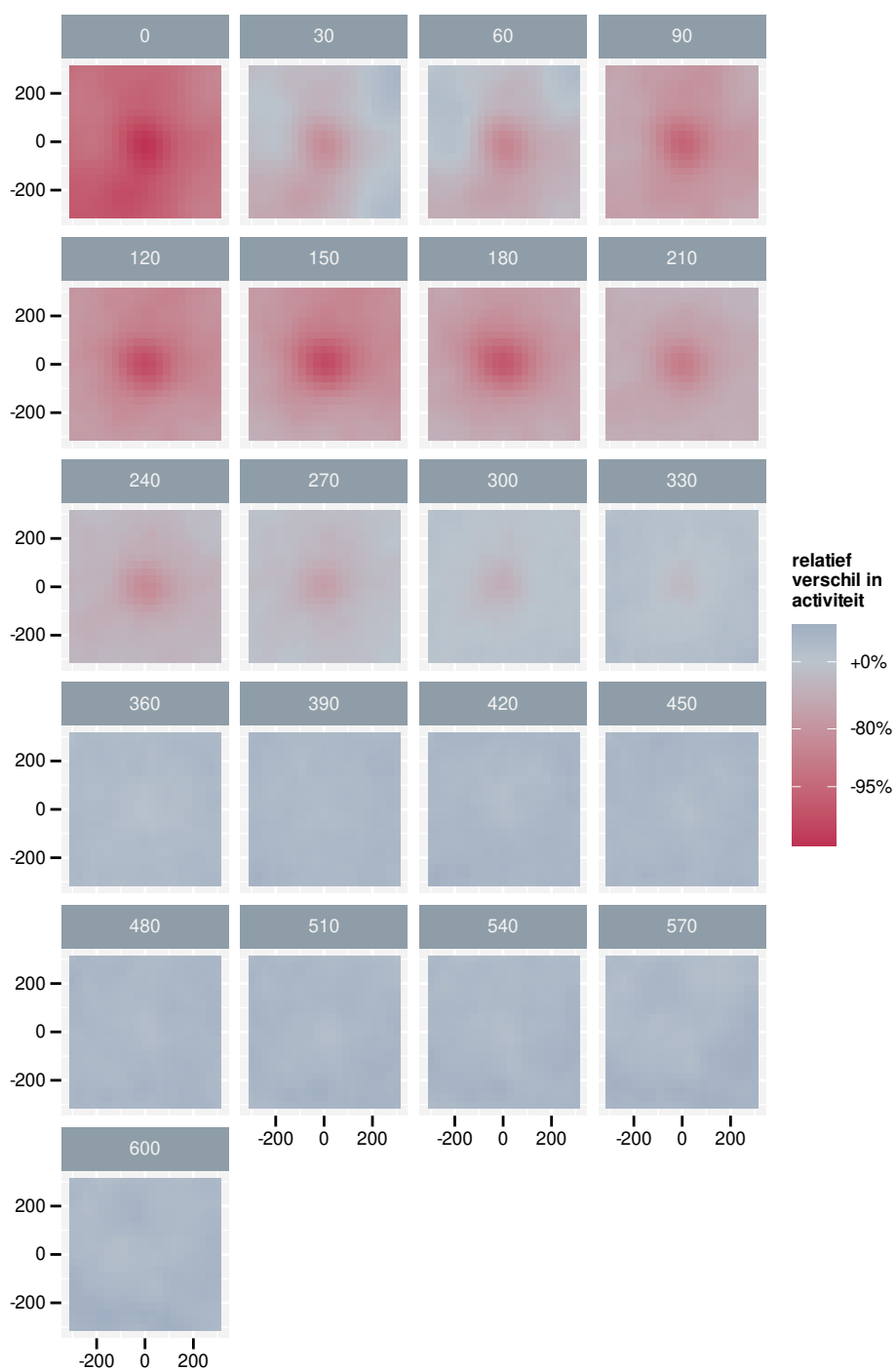
In figuur 3.15 geven we het verschil wanneer we rekening houden met alle effecten, behalve dat van de individuele windturbine. We combineren met andere woorden het globaal gemiddelde, het hoogte-effect en het ruimtelijke patroon. Op lage hoge is bijna overal een sterke afname van de relatieve activiteit (fig. 3.16). Het effect van de positie van de windturbine ter hoogte van het rotorvlak is nog steeds zichtbaar.



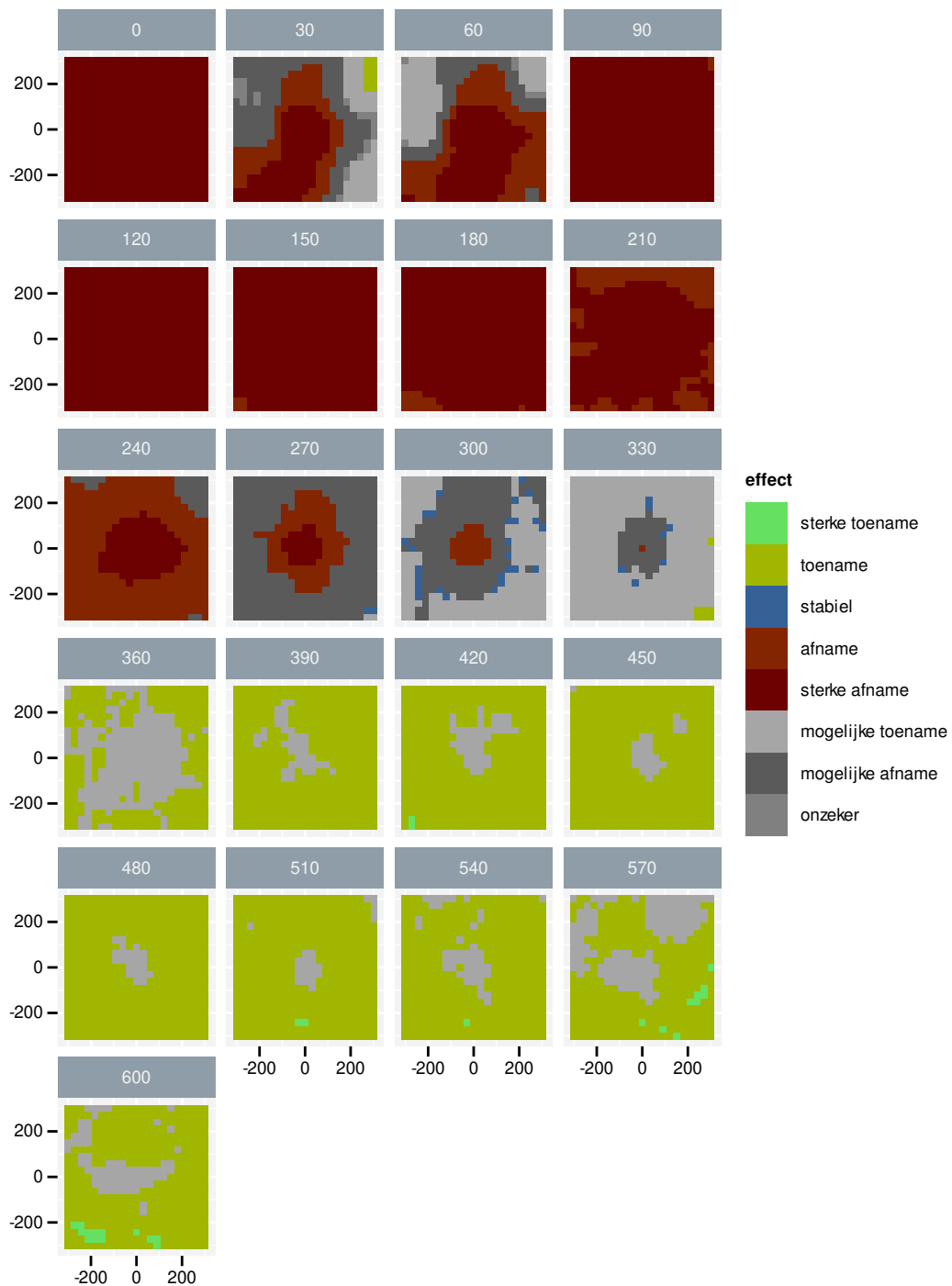
Figuur 3.13: Relatief verschil in gemiddelde activiteit rond windturbine versus de controle. Afname impliceert minder activiteit rond windturbines in vergelijking met de controlepunten.



Figuur 3.14: Classificatie relatief verschil in gemiddelde activiteit rond windturbine versus de controle.



Figuur 3.15: Relatief verschil in gemiddelde activiteit rond windturbine versus de controle.



Figuur 3.16: Classificatie relatief verschil in gemiddelde activiteit rond windturbine versus de controle. Afname impliceert minder activiteit rond windturbines in vergelijking met de controlepunten.

Referenties

- Onkelinx T. (2024). effectclass: Classification and Visualisation of Effects. Version 0.1.5. <https://inbo.github.io/effectclass/>.
- Onkelinx T. & Carmen R. (2024). birdradar: Analysing Animal Movement from Radar. Version 0.0.1. <https://github.com/inbo/birdradar/>.
- R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.