

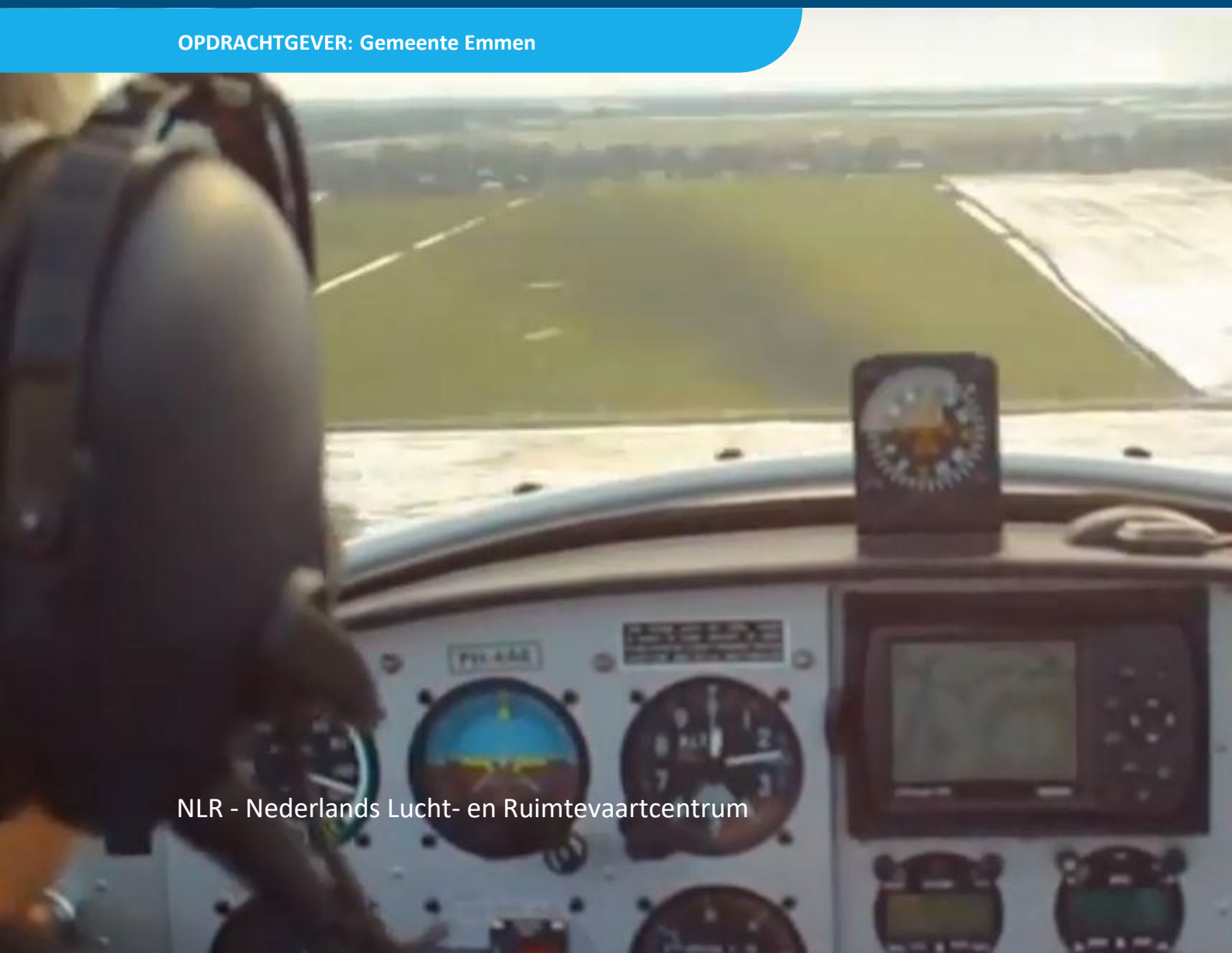


Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2018-478 | RevEd 1

Luchtvaartstudie windpark Pottendijk nabij vliegstrip EHEM

OPDRACHTGEVER: Gemeente Emmen



NLR - Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het NLR is een toonaangevend, mondiaal opererend onderzoekscentrum voor de lucht- en ruimtevaart. Met zijn multidisciplinaire expertise en ongeëvenaarde onderzoeksfaciliteiten, levert NLR innovatieve, integrale oplossingen voor complexe uitdagingen in de aerospace sector.

De werkzaamheden van het NLR beslaan het volledige spectrum van Research Development Test & Evaluation (RDT&E). Met zijn kennis en faciliteiten kunnen bedrijven terecht bij het NLR voor validatie, verificatie, kwalificatie, simulatie en evaluatie. Zo overbruggt het NLR de kloof tussen onderzoek en toepassing in de praktijk. Het NLR werkt zowel voor overheid als industrie in binnen- en buitenland. Het NLR staat voor praktische en innovatieve oplossingen, technische expertise en een lange termijn ontwerpvisie. Hierdoor vindt NLR's cutting edge technology zijn weg naar succesvolle lucht- en ruimtevaartprogramma's van OEM's zoals Airbus, Embraer en Pilatus. Het NLR draagt bij aan (defensie)programma's zoals ESA's IXV re-entry voertuig, de F-35, de Apache-helikopter en Europese programma's als SESAR en Clean Sky 2.

Opgericht in 1919 en met 600 betrokken medewerkers, realiseerde NLR in 2017 een omzet van 76 miljoen euro. 81% hiervan is afkomstig uit contractonderzoek, het overige betreft een overheidsbijdrage.

Voor meer informatie bezoek: www.nlr.nl

TREFWOORD(EN)
Veiligheid
windturbine
MLA
turbulentie

Beschrijving van de werkzaamheden

Voor de vliegoperaties op EHEM is een veiligheidsanalyse uitgevoerd ten aanzien van het botsingsrisico en het risico van atmosferische verstoringen wanneer een MLA op korte afstand een windturbine in het windpark passeert.

Hierbij zijn drie aspecten meegenomen: het effect van tipwervels, van windhinder en van turbulentie. Voor de beoordeling van dergelijke aspecten bestaat geen nationale of internationale wet- en regelgeving. Daarom heeft de beoordeling plaatsgevonden op basis van literatuur en eigen ervaring van het NLR. Hierbij is rekening gehouden met het windklimaat, de eigenschappen van de MLA en met de eigenschappen van de windturbine (type Nordex N131). Om de risico's zoveel mogelijk te beperken zijn de effecten van een aantal mitigerende maatregelen in kaart gebracht.

Resultaten en conclusies

De resultaten van de studie tonen aan dat de botsingskans extreem laag is. Het grootste risico voor de vliegoperaties wordt gevormd door de effecten van de tipwervels van de rotorbladen van de windturbine. De risico's die geïdentificeerd zijn worden niet als onacceptabel beoordeeld, maar zijn wel van het niveau "medium". Een dergelijk risico is niet zonder meer aanvaardbaar. Mogelijke mitigerende maatregelen betreffen: een operationele maatregel (niet vliegen bij bepaalde windsterkte en -richting), korter indraaien, verschuiven of draaien van de baan of een combinatie van maatregelen.

De operationele maatregel, het draaien van de baan en een combinatie van kort indraaien en een parallelle verschuiving van de baan maken de risico's volledig acceptabel. De andere maatregelen verminderen wel het risico, maar laten een zeker restrisico over.

Toepasbaarheid

De resultaten van deze studie kunnen worden gebruikt om oplossingen te vinden voor een veilige continuering vliegoperaties op de vliegstrip EHEM na realisatie van het windpark Pottendijk.

NLR

Anthony Fokkerweg 2

1059 CM Amsterdam

p) +31 88 511 3113

e) info@nlr.nl i) www.nlr.nl



Dedicated to innovation in aerospace

NLR-CR-2018-478 | RevEd1

Luchtvaartstudie windpark Pottendijk nabij vliegstrib EHEM

OPDRACHTGEVER: Gemeente Emmen

AUTEUR(S):

P.J. van der Geest

NLR

Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar.

OPDRACHTGEVER	Gemeente Emmen
CONTRACTNUMMER	
EIGENAAR	Gemeente Emmen
NLR DIVISIE	Aerospace Operations
VERSPREIDING	Beperkt
RUBRICERING TITEL	ONGERUBRICEERD

GOEDGEKEURD DOOR:																				
AUTEUR							REVIEWER							BEHERENDE AFDELING						
P.J. van der Geest							H. Smit							A. Rutten						
DATUM					1	9	DATUM					1	9	DATUM					1	9

Contents

Afkortingen	5
1 Introductie	7
2 Beschrijving van de situatie	8
2.1 Vliegstrip Emmer-Compascuum (EHEM)	8
2.2 Het windpark Pottendijk	9
2.3 Probleembeschrijving en onderzoeksvraag	11
3 Veiligheidsstudie	13
3.1 Methodiek	13
3.2 Hazard-identificatie	14
3.3 H1 - Botsingsrisico	15
3.3.1 Ernst van een botsing	15
3.3.2 Kans op een botsing	15
3.4 H2 – Windturbinezog	18
3.4.1 Ernst van het windturbinezog	18
3.4.2 Frequentie van windverstoring	29
3.5 Risicoclassificatie	31
3.6 Mitigerende maatregelen	32
4 Conclusies en aanbevelingen	39
5 Referenties	40
Appendix A Risicoclassificatietabellen	41
Appendix B Wiskundige modellering	44

Afkortingen

ACRONIEM	OMSCHRIJVING
CAA	Civil Aviation Authority
C_t	Trekrachtscoefficient
C/L	Center Line (baan middenlijn)
D	Rotor Diameter
EHEM	ICAO aanduiding vliegstrip Emmer-Compascuum
FAA	Federal Aviation Administration
H1	Hazard 1
H2	Hazard 2
I	Intensiteit van turbulentie
ICAO	International Civil Aviation Organization
IHS	Horizontaal Binnenvlak
MLA	Micro-Light Airplane
NLR	Netherlands Aerospace Centre
NM	Nautische Mijl (1852 meter)
RCR	Roll Control Ratio
RD	Rijksdriehoek coördinaat
RMS	Root Mean Square
RVGLT	Regeling Veilig Gebruik Luchthavens en andere Terreinen
SERA	Standardised European Rules of the Air
THR	Baandrempel (threshold)
TU	Technische Universiteit
VFR	Visuel Flight Rules
VMC	Visual Meteorological Conditions
WGS84	World Geodetic System 1984
WT	Windturbine
z_0	Terrein ruwheid

Deze pagina is opzettelijk blanco.

1 **Introductie**

Door de Gemeente Emmen is het gebied Pottendijk aangewezen als locatie waar een windmolenpark gebouwd mag worden. Het windpark zal uit veertien grote windturbines bestaan van het type Nordex N131 of vergelijkbare turbines (met dezelfde as- en tiphoogte). Het windpark Pottendijk is echter gelegen in de nabijheid van een privé- vliegstrip (ICAO code: EHEM), waarvan een lokale bewoner gebruik maakt voor vliegbewegingen met een zogenaamd Micro-Light Airplane (MLA). Voor de vliegstrip is een luchthavenregeling afgegeven. Voor een dergelijke luchthaven gelden bepaalde obstakelbeperkingen. De windturbines van het windpark Pottendijk interfereren niet met deze beperkingen, en in deze zin voldoet het windpark aan de vigerende regelgeving. Desondanks is het mogelijk dat de windturbines een risico vormen voor de vliegoperaties op EHEM. De nominale vliegroutes van en naar de vliegstrip passeren het windpark binnen een afstand van drie rotordiameters van het betreffende type windturbine.

Dit kan niet alleen leiden tot een zeker botsingsrisico, maar ook tot het risico van blootstelling aan significante atmosferische verstoringen, die mogelijk een gevaar kunnen opleveren voor passerende MLAs.

In de huidige studie worden deze risico's in kaart gebracht en beoordeeld op basis van criteria uit de literatuur, aangevuld met eigen ervaring. De methodiek die gehanteerd wordt is gebaseerd op het Safety Management Manual van ICAO. Binnen de luchtvaart is dit de meest gangbare methode voor het beoordelen van veiligheidsrisico's.

In de studie wordt nadruk gelegd op de verschillende aspecten van zogturbulentie achter een windturbine. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de effecten van tipwervels, windhinder in het zog, en turbulentie.

In Hoofdstuk 2 wordt allereerst de situatie geschetst van de vliegstrip en de het windpark, en wordt de scope en onderzoeksvraag nader geformuleerd.

In Hoofdstuk 3 wordt eerst de methodiek geïntroduceerd en wordt deze methodiek vervolgens toegepast op de identificatie van de risico's van het windpark. Vervolgens wordt het botsingsrisico en het risico van zogturbulentie nader geanalyseerd, ten aanzien van de mogelijke consequenties en de frequentie. De risico's worden geclassificeerd met behulp van de ICAO risicomatrix. Tenslotte wordt ingegaan op de effectiviteit van een aantal maatregelen om de risico's verder zoveel mogelijk te mitigeren. Mitigaties die besproken worden zijn: een operationele maatregel (niet vliegen bij bepaalde windsterkte en -richting), korter indraaien, verschuiven of draaien van de baan en een combinatie van maatregelen.

In Hoofdstuk 4 worden de conclusies en aanbevelingen van de studie gepresenteerd.

2 Beschrijving van de situatie

2.1 Vliegstrip Emmer-Compasuum (EHEM)

Enkele kilometers ten westen van Emmer-Compasuum (ter plaatse Kanaal B NZ 77) is een privé-vliegstrip gelegen die wordt aangeduid met de ICAO code EHEM. Voor deze vliegstrip is een luchthavenregeling afgegeven in de Luchtvaartverordening Drenthe (paragraaf 3.6) [1]. In deze regeling is bepaald dat van de luchthaven uitsluitend gebruik gemaakt mag worden door de exploitant (de heer Snuverink) en door hem aangewezen gastvliegers. Verder is bepaald dat op de luchthaven per jaar maximaal 320 vliegbewegingen (160 starts en landingen) mogen plaatsvinden, met een maximum van zes bewegingen per dag. De vliegbewegingen mogen uitsluitend worden uitgevoerd met Micro Light Aeroplanes (MLA).

Gezien het privé karakter van de luchthaven bestaan er geen formele publicaties met betrekking tot de lay-out van de vliegstrip en de vliegprocedures. De meest noodzakelijke gegevens worden bekend gemaakt via de website (www.ehem.nl).

Het luchthaven referentiepunt heeft de volgende coördinaten: N52°48'53", E007°00'13".

De baan is een grasbaan met afmetingen 500 x 20 meter. De baan kan in twee richtingen gebruikt worden: baan 18 in (magnetische) richting 175° en baan 36 in richting 355°. Uit de bestaande gegevens zijn zo goed mogelijk de coördinaten van de baandrempels afgeleid, zie Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Baancoördinaten grasbaan vliegstrip EHEM

Baandrempel	WGS84 LAT	WGS84 LON	RD, Oost [m]	RD, Noord [m]
18	52°48'57.41"N	7°00'11.99"E	263958	537742
36	52°48'41.67"N	7°00'16.33"E	264042	537258

Voor de huidige studie zijn vooral de procedures voor het landen op baan 18 (vanuit noordelijke richting) en start van baan 36 (in noordelijke richting) van belang.

Uit de gegevens die door de exploitant zijn aangeleverd blijkt dat er een linkerhandcircuit¹ gevlogen wordt voor naderen op baan 18 en een rechterhandcircuit voor vertrek van baan 36. Dit betekent dat, via een bocht over het zogenaamde dwarswindbeen, aankomst vanuit en vertrek in oostelijke richting plaatsvindt.

De circuithoogte is 500 voet boven de grond. Op basis van het aangeleverde kaartmateriaal is de ligging van de strip en de nominale aanvliegprocedure, inclusief het dwarswindbeen van het circuit, weergegeven op een stafkaart van de omgeving, zie Figuur 2-1. De nominale vliegroute is hierbij met een streeplijn aangegeven. Deze nominale route is door de exploitant aangegeven als een veilige route, waarvan gastvliegers gebruik kunnen maken bij naderingen of vertrek via de noordelijke route. Het is de individuele verantwoordelijkheid van vliegers (zowel van de exploitant zelf als van gastvliegers) om deze route te volgen of er van af te wijken.

De exploitant maakt gebruik van een klein sportvliegtuig van het type Zodiac CH601.

¹ Een linkerhandcircuit is een verkeerskring die uitsluitend uit linkerbochten bestaat. Volgens de internationale luchtverkeersregels (SERA) moeten vliegtuigen die naderen voor de landing en na de start linkerbochten maken, tenzij een andere richting is aangegeven. Het staat de exploitant vrij om ook rechterbochten te maken, indien dit ook aan gastvliegers kenbaar gemaakt is.

Uit de gegevens van de exploitant blijkt dat het afgelopen jaar 75 starts en landingen op de vliegstrip hebben plaatsgevonden. Daarvan zijn 57 starts en landingen door de exploitant met het genoemde type uitgevoerd. De overige bewegingen werden uitgevoerd door gastvliegers met een soortgelijk type vliegtuig.



Figuur 2-1: Vliegstrip EHEM en noordelijke aankomst- en vertrekprocedure

2.2 Het windpark Pottendijk

Het voornemen bestaat om in de buurt van de vliegstrip EHEM het zogenaamde windpark Pottendijk te realiseren. Het windpark Pottendijk omvat volgens het plan de plaatsing van veertien windturbines van het type Nordex N131. Dit zijn grote windturbines met een rotordiameter van 131 meter en een ashoogte van 84.5 meter boven het maaiveld. Hiermee bedraagt de tiphoogte 150 meter (492 voet), waarmee deze vrijwel tot de hoogte van het vlieg-circuit van EHEM reikt.

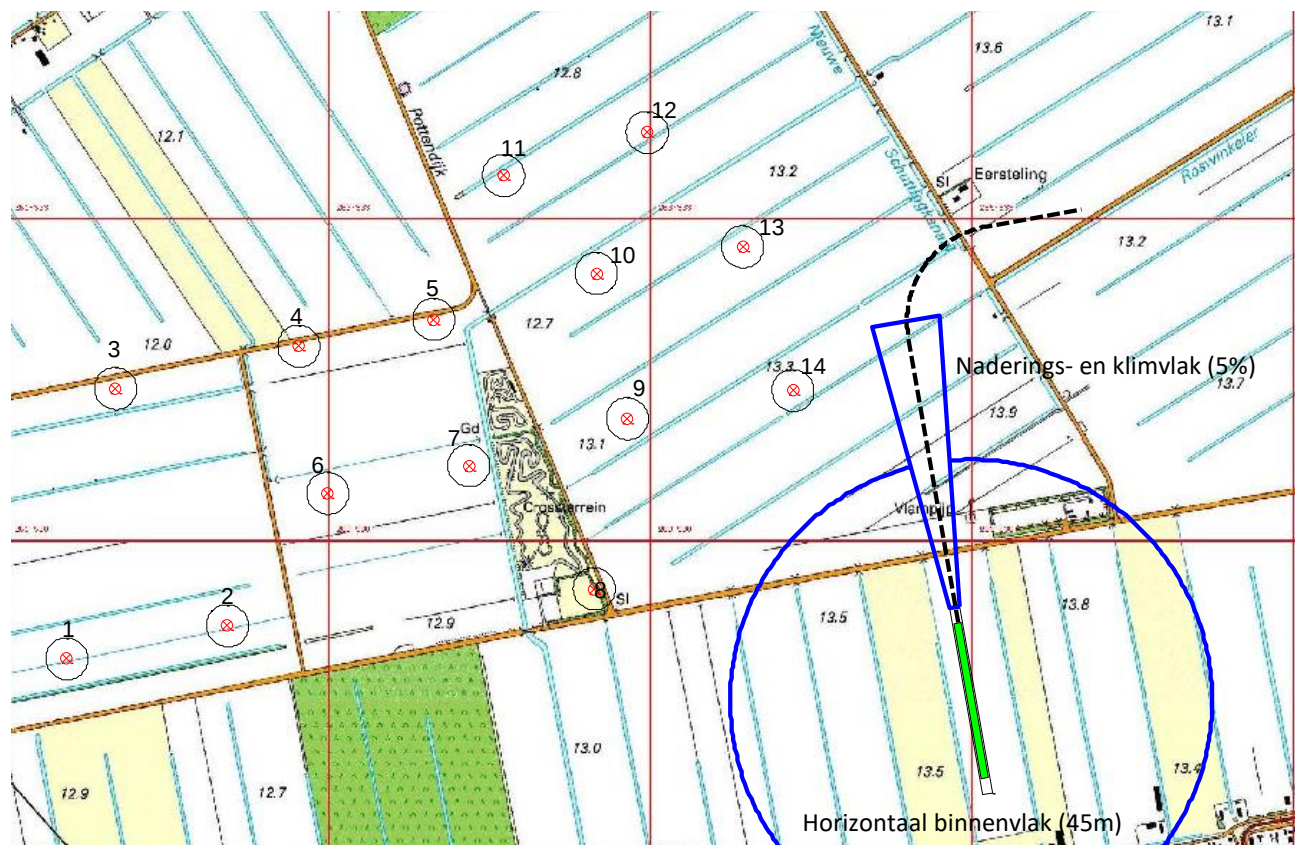
In Tabel 2-2 zijn de locaties van de windturbines weergegeven en tevens de afstand tot de verlengde middenlijn van de vliegstrip (afstand tot C/L) en de afstand tot de baandrempel van baan 18 (THR18).

Hieruit blijkt dat vooral windturbine WT14 dicht in de buurt staat van de vliegstrip en de daarbij horende vliegroutes.

In Figuur 2-2 is de ligging van de windturbines ten opzichte van de vliegstrip weergegeven. Tevens zijn op deze kaart de contouren van de hindernisbeperkende vlakken weergegeven, zoals gedefinieerd in de Regeling Veilig Gebruik Luchthavens en andere Terreinen (RVGLT) [3]. Het betreft het horizontaal binnenvlak (straal 750 meter en een hoogte van 45 meter) en het naderings- en klimvlak (met een helling van 5% en een divergentie van 10%). Hieruit blijkt dat de geplande windturbines niet interfereren met deze beschermingsvlakken.

Tabel 2-2: Locatie windturbines in het windpark Pottendijk en afstand tot de vliegstrip

WT	Lat WGS84	Lon WGS84	RD Noord [m]	RD Oost [m]	Afstand naar C/L [m]	Afstand naar THR18 [m]
1	52°48'55.76"	6°57' 44.31"	261186	537630	2751	2775
2	52°48'58.73"	6°58'11.12"	261686	537733	2241	2272
3	52°49'22.85"	6°57'53.40"	261338	538471	2458	2720
4	52°49'26.71"	6°58'23.99"	261908	538603	1874	2224
5	52°49'29.10"	6°58'46.51"	262328	538686	1446	1884
6	52°49'11.84"	6°58'28.26"	261998	538145	1863	2001
7	52°49'14.31"	6°58'51.79"	262437	538231	1416	1598
8	52°49'01.64"	6°59'12.16"	262827	537848	1097	1136
9	52°49'18.68"	6°59'18.29"	262930	538377	905	1208
10	52°49'33.36"	6°59'13.70"	262834	538829	923	1564
11	52°49'43.43"	6°59'58.62"	262545	539134	1155	1983
12	52°49'47.45"	6°59'22.65"	262992	539268	692	1806
13	52°49'35.72"	6°59'38.09"	263289	538912	460	1348
14	52°49'21.15"	6°59'45.94"	263446	538465	382	886



2.3 Probleembeschrijving en onderzoeksvraag

Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven interfereert het windpark Pottendijk niet met de wettelijke bepalingen ten aanzien van obstakelbescherming voor MLA luchthavens. Dit betekent echter niet dat er geen risico's verbonden zouden kunnen zijn aan de situatie zoals hiervoor geschetst.

Hierbij spelen twee aspecten een rol, die hierna worden toegelicht.

Obstakelbescherming voor MLA operaties

MLAs zijn per definitie lichte en kleine vliegtuigen die met een relatief lage snelheid vliegen. Hierdoor zijn zij in staat om korte bochten te draaien en hebben ze dus weinig ruimte nodig om te manoeuvreren. Om deze reden heeft het horizontaal binnenvlak² dat in de RVGLT is gedefinieerd voor MLA luchthavens een relatief geringe afmeting (een straal van 750 meter). Het doel van het horizontaal binnenvlak is om het manoeuvreren in de buurt van de luchthaven, om het vliegtuig in positie te brengen voor de landing, te vrijwaren van mogelijke obstakels. Het gaat dan vooral om het beschermen van het naderingscircuit.

Bij de huidige regelgeving moeten echter wel enige kanttekeningen geplaatst worden. Hoewel MLAs aanzienlijk lichter zijn dan reguliere sportvliegtuigen (zoals bijvoorbeeld een Cessna C172) die niet onder de MLA-regeling vallen, zijn de verschillen in snelheid echter niet heel groot. Bijvoorbeeld het maximum gewicht van een Cessna C172 is 1050 kg en dat van een Zodiac CH601 is 590kg. De overtreksnelheid (in de landingsconfiguratie) van een C172 is 41 knopen en van de Zodiac CH601 is die 38 knopen. Het verschil in manoeuvreerbaarheid tussen beide toestellen is dus niet heel groot. Toch gelden voor luchthavens voor "reguliere" sportvliegtuigen significant andere, strengere, eisen. Zo is in de internationale regelgeving (ICAO Annex 14 [2]) opgenomen dat voor luchthavens met een baanlengte van minder dan 800 meter een horizontaal binnenvlak met een straal van 2000 meter gehanteerd moet worden. De vraag doet zich dan ook voor of het horizontaal binnenvlak zoals gedefinieerd voor MLA luchthavens voldoende bescherming biedt voor manoeuvres in de buurt van de luchthaven.

Uit Figuur 2-2 blijkt ook dat het dwarswindbeen³ van het naderingscircuit volledig buiten het horizontaal binnenvlak ligt. Dit vlak biedt dus geen obstakelbescherming in dit gebied. Indien een straal van 2000 meter gehanteerd zou worden voor dit vlak, dan zou het circuit wel volledig binnen het vlak vallen. Tegelijkertijd zou dan een groot deel van het windpark Pottendijk binnen de contour van het horizontaal binnenvlak vallen en dus mogelijk aan obstakelbeperkingen onderhevig kunnen zijn. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het twijfelachtig is of de huidige voorgeschreven afmeting van het horizontaal binnenvlak voor MLA luchthavens voldoende obstakelbescherming biedt voor dit soort vliegtuigen die in de buurt van de luchthaven manoeuvreren.

Om deze reden is het verstandig om het botsingsrisico dat mogelijk veroorzaakt wordt door het windpark Pottendijk voor de MLA operaties op de vliegstrip nader te beschouwen.

Zogturbulentie

Afmetingen van windturbines zijn de laatste jaren significant toegenomen. Vooral van belang is de toename in hoogte en van de diameter van de rotor. Hoewel de efficiency en opbrengst van de windturbines hierdoor aanzienlijk toenemen, kunnen zij door hun hoogte en door verstoring van de luchtstroming een gevaar vormen voor vliegtuigen die achter een windturbine passeren. De bestaande obstakelvlakken zijn niet bedoeld om het vliegverkeer hiertegen te beschermen. Feitelijk bestaat er geen enkel wettelijk voorschrift dat vliegtuigen op dit moment tegen dit risico beschermt.

² Het horizontaal binnenvlak is een horizontaal vlak op een hoogte van 45 meter boven de elevatie van het vliegveld, waardoor geen obstakels mogen steken.

³ Het dwarswindbeen is dat deel van het naderingscircuit dat loodrecht staat op het eindnaderingssegment (het deel van de route recht voor de baan).

In de Europese basisregeling voor de luchtvaart [15] is daarom een algemene regel opgenomen:

Hazards related to human activities and land use [...] shall be monitored. The risk caused by them shall be assessed and mitigated as appropriate:

(a) any development or change in land use in the aerodrome area;

(b) the possibility of obstacle-induced turbulence;

Hierbij wordt dus specifiek verwezen naar het mogelijke risico van door obstakels veroorzaakte turbulentie.

De genoemde Europese regelgeving is formeel niet van toepassing op kleine luchthavens met een baan korter dan 800 meter. Echter vanuit een veiligheidsperspectief is dit onderwerp echter evenzeer van toepassing op MLA-luchthavens.

Om deze reden is het verstandig om het risico van windverstoring en turbulentie, dat mogelijk veroorzaakt wordt door het windpark Pottendijk, voor de MLA-operaties op de vliegstrip nader te beschouwen.

Onderzoeksvraag

De Gemeente Emmen heeft gevraagd de bovengenoemde risico's verder te onderzoeken en te beoordelen. Daarbij is aangegeven dat in geval dat zich onacceptabele risico's zouden voordoen om ook de effecten van mogelijke mitigerende maatregelen in kaart te brengen. Hierbij wordt specifiek de mogelijkheid van het verschuiven of draaien van de vliegstrip als mogelijkheid genoemd.

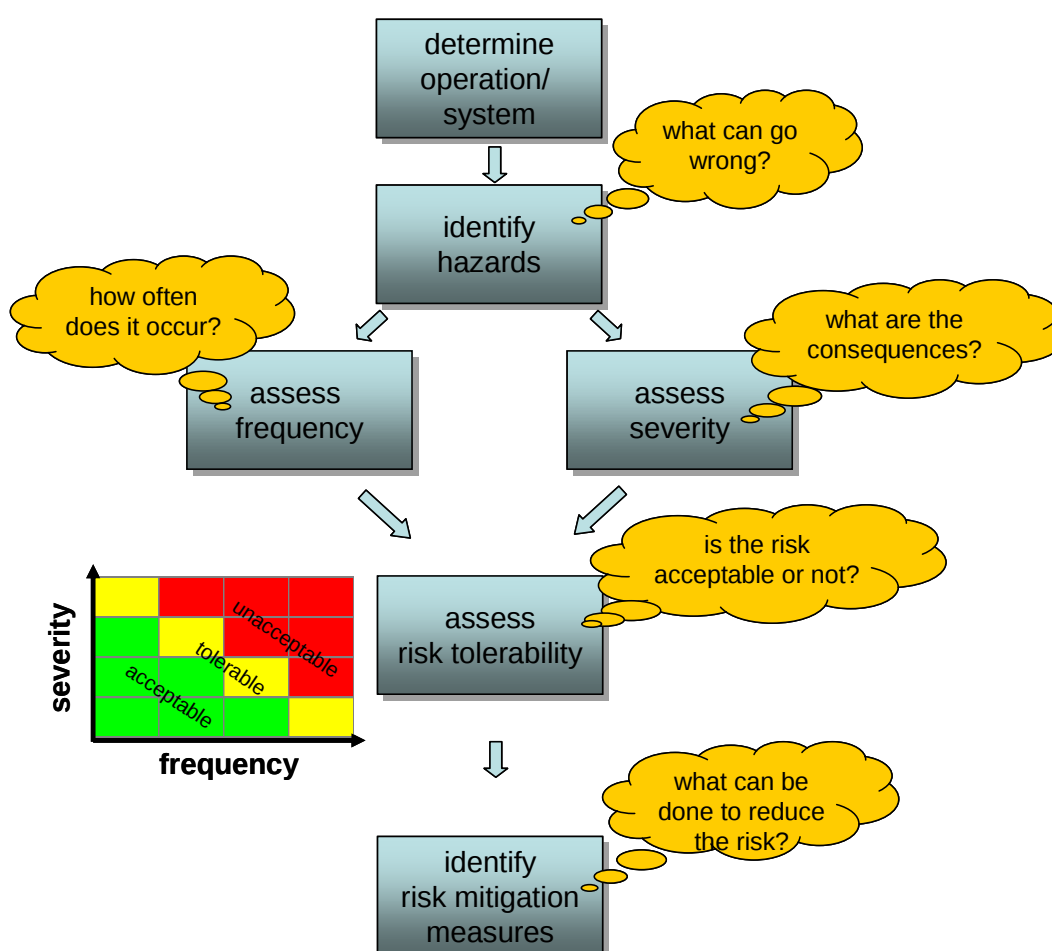
3 Veiligheidsstudie

3.1 Methodiek

Voor de uitvoering van een luchtvaartstudie bestaan in de Nederlandse wet- en regelgeving geen specifieke richtlijnen voor de manier waarop een dergelijke studie dient te worden uitgevoerd. Om deze reden wordt in deze studie de internationale standaard gehanteerd. Deze standaard is gebaseerd op ICAO Annex 19 (Safety Management) [5] en de daarbij gehanteerde richtlijnen zoals opgenomen in ICAO Doc 9859 (Safety Management Manual) [6] en meer specifiek voor luchthavens ICAO Doc 9981 (PANS-Aerodromes) [7].

De beschreven methodiek vereist een beoordeling van veiligheidsrisico's door middel van een inschatting van de waarschijnlijkheid en van de gevolgen van een potentiële "hazard". Een "hazard" wordt hierbij gedefinieerd als "elke omstandigheid of gebeurtenis die zou kunnen leiden tot een schadelijk effect".

Schematisch kan het proces van veiligheidsanalyse in algemene zin worden weergegeven zoals in Figuur 3-1.



Figuur 3-1: Schematisch proces veiligheidsanalyse

Zoals aangegeven hanteert de methodiek een protocol dat uit een aantal stappen bestaat:

1. Beschrijving van de operatie;
2. Identificeren van de hazards;
3. Het beoordelen van de kans van voorkomen (frequentie);

4. Het vaststellen van de gevolgen (ernst);
5. Het beoordelen van de toelaatbaarheid;
6. Het verder reduceren van de risico's, voor zover mogelijk en noodzakelijk.

Bij de beoordeling van de hazards wordt een schatting gemaakt van de ernst en frequentie van voorkomen. Hierbij worden vijf niveaus gehanteerd. De ernst wordt daarbij met een letter (A-E) aangeduid en de frequentie met een cijfer (1-5). Hierbij gelden de volgende algemene definities:

Ernst:

- A. Catastrophic
- B. Hazardous
- C. Major
- D. Minor
- E. Negligible

Frequentie:

1. Extremely improbable
2. Improbable
3. Remote
4. Occasional
5. Frequent

De combinatie van ernst en frequentie levert een zogenaamde risico-index; een combinatie van een cijfer en een letter.

Bij het uitvoeren van dit proces is het van groot belang om goed te definiëren hoe de ernst en frequentie van de hazards worden beoordeeld. Een veel gebruikte definitie wordt gegeven in het ICAO Safety Management Manual (ICAO Doc 9859), en wordt om die reden ook hier toegepast. De gehanteerde definities zijn opgenomen in Appendix A. De ervaring leert echter dat deze definities zeer algemeen van aard zijn en niet toegespitst op specifieke operaties. Om deze reden hanteert het NLR in aanvulling op deze definities de omschrijvingen die door de Amerikaanse luchtvaartautoriteit FAA worden gehanteerd. Deze aanvullende definities zijn meer specifiek (speciaal gericht op luchthavens) en leiden daarom tot meer consistente resultaten. Deze aanvullende definities zijn vastgelegd in de FAA Order 5200.11, [8], en vormen het nationale beleid in de Verenigde Staten ten aanzien van veiligheidsmanagement voor luchthavens.

De betreffende definities zijn ter referentie eveneens in Appendix A opgenomen.

Het beoordelen van de toelaatbaarheid van bepaalde risico's gebeurt aan de hand van een zogenaamde risico-matrix, zoals gedefinieerd in het ICAO Safety Manual (Doc 9859). Deze risico-matrix is internationaal geaccepteerd en wordt bij vele luchthavens toegepast voor het beheersen van risico's. Deze risico-matrix is ter referentie in ook Appendix A opgenomen.

3.2 Hazard-identificatie

Door het realiseren het windpark Pottendijk in de buurt van de vliegstrip EHEM kunnen de volgende hazards ontstaan:

1. Een vliegtuig dat in noordelijke richting vertrekt van baan 36 of nadert in zuidelijke richting naar baan 18 zou significant kunnen afwijken van de nominale route, zoals weergegeven in Figuur 2-2, en in het uiterste geval in botsing kunnen komen met de meest nabije windturbine (WT14). Dit wordt in de rest van de studie aangeduid als H1-“Botsing met windturbine”.
2. Een vliegtuig dat in noordelijke richting vertrekt van baan 36 of nadert in zuidelijke richting naar baan 18 zou bij het volgen van de nominale route, of bij een bepaalde afwijking daarvan, getroffen kunnen worden door

atmosferische verstoringen veroorzaakt door de windturbine. Dit wordt in de rest van de studie aangeduid als H2-“Windturbine zog”.

Voor beide hazards wordt een risicoanalyse uitgevoerd in de volgende paragrafen.

3.3 H1 - Botsingsrisico

3.3.1 Ernst van een botsing

Wanneer een vliegtuig in botsing komt met de één van de rotorbladen van de windturbine zal dit zeer waarschijnlijk leiden tot een fataal ongeval, waarbij het vliegtuig volledig verloren zal gaan en de inzittenden zullen omkomen. De ernst van deze hazard wordt dus als **“Catastrophic”** (Categorie A) gekwalificeerd.

3.3.2 Kans op een botsing

Om een botsing van een vliegtuig met één van de windturbines te laten plaatsvinden, zal een aantal gebeurtenissen tegelijk moeten plaatsvinden, namelijk:

- Baan 36 moet in gebruik zijn voor vertrekkend verkeer (inclusief doorstarts) of baan 18 voor naderend verkeer. In alle andere gevallen is er geen gevaar van een botsing, omdat de vliegoperaties dan aan de zuidzijde van de vliegstrip plaatsvinden en dus de aanwezigheid van het windpark geen risico vormt.
- Het vliegverkeer moet significant afwijken van de nominale route, zoals aangegeven in Figuur 2-1.
- Tegelijk met de laterale afwijking zal het vliegtuig beneden de tiphoogte van de windturbine moeten vliegen om in botsing te kunnen komen met de turbinebladen.

Baangebruik

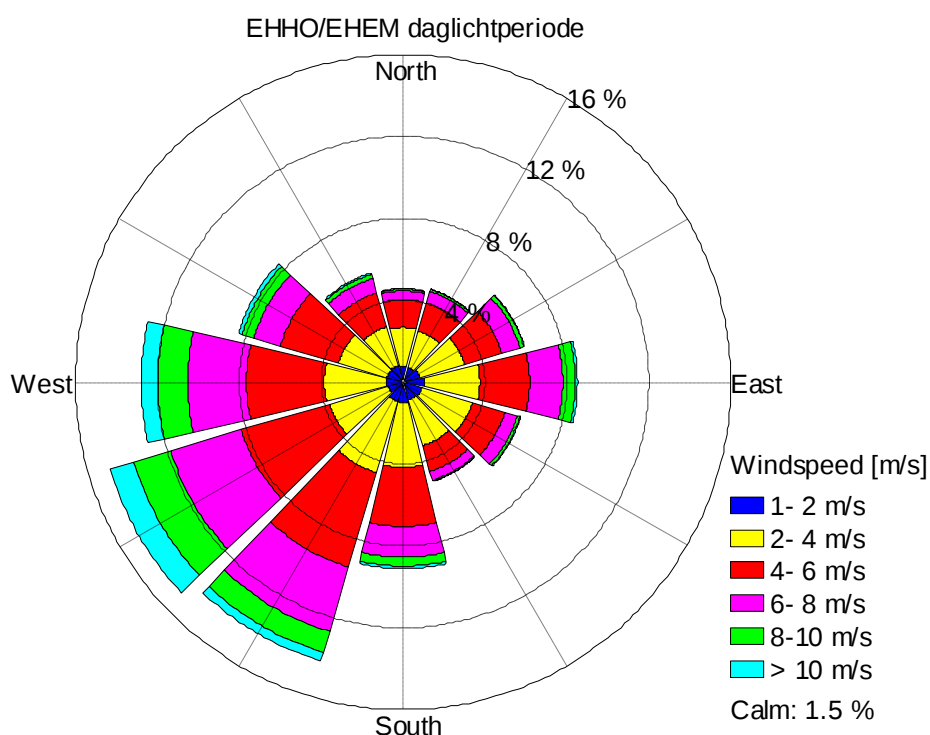
Het gebruik van de baanrichting is in eerste instantie afhankelijk van de heersende windrichting. Bij een te grote dwarswind (voor een Zodiac CH601 ongeveer 10 knopen) zal de baan niet gebruikt kunnen worden. Het preferente baangebruik is zodanig dat hinder voor Emmer-Compascuum en de naburige woningen zoveel mogelijk wordt vermeden. Dat betekent dat zoveel mogelijk in noordelijke richting (baan 36) wordt vertrokken, en zoveel mogelijk in zuidelijke richting (baan 18) wordt geland. Deze operaties zijn alleen mogelijk indien er geen of weinig staartwind is. Er wordt hier vanuit gegaan dat het toestel met een staartwind van 5 knopen nog veilig te landen is.

Om het verwachte baangebruik te kunnen vaststellen is het nodig om over lokale windgegevens te beschikken, en dan specifiek van de windsnelheid en -richting op 10 meter hoogte. Deze gegevens zijn echter niet beschikbaar voor EHEM. Om deze reden wordt hier gebruik gemaakt van het weerstation van de luchthaven Hoogeveen, dat het meest dichtbij gelegen is. Er wordt verondersteld dat het windklimaat op de luchthaven Hoogeveen niet significant verschilt van dat van EHEM. Het NLR beschikt over een database met langjarige (20 jaar periode) windgegevens van luchthaven Hoogeveen. Voor de huidige studie worden deze gegevens gebruikt voor de operaties op EHEM.

In Figuur 3-2 is de betreffende windroos weergegeven. Hieruit blijkt dat de overheersende windrichting in de sector zuid-west is. Operaties vanaf baan 18 in zuidelijke richting zullen qua windrichting dus vaak de voorkeur hebben.

De vraag is hoe vaak verwacht mag worden dat baan 18 in gebruik is voor landing. Op basis van de windgegevens wordt berekend dat circa 83% van de tijd baan 18 te gebruiken is voor landing (uitgaande van een maximale staartwind van 5 knopen). Dit komt neer op maximaal 133 naderingen per jaar.

Op dezelfde manier kan berekend worden hoe vaak naar verwachting baan 36 voor vertrek gebruikt kan worden. Dit komt neer op 71%, ofwel maximaal 114 starts per jaar. In totaal zouden dus per jaar maximaal 247 bewegingen van de noordelijke route gebruik kunnen maken. Hieruit blijkt dat er een redelijk grote mogelijkheid bestaat dat het vliegtuig in noordelijke richting vertrekt en in zuidelijke richting landt. Omdat er waarschijnlijk met enige regelmaat circuitvliegen en doorstarts geoefend zal worden, is het aannemelijk dat in dat geval in dezelfde richting gestart als geland wordt. Het genoemde maximum van 247 bewegingen zal daarom een absolute bovengrens zijn. Omdat het jaarlijkse quotum meestal niet zal worden vol gevolgen, is een realistische schatting dat per jaar circa 100 bewegingen gebruik maken van de noordelijke route.



Figuur 3-2: Windroos voor luchthaven Hoogeveen (EHHO), zoals gebruikt voor het windklimaat op EHEM, gedurende de daglichtperiode.

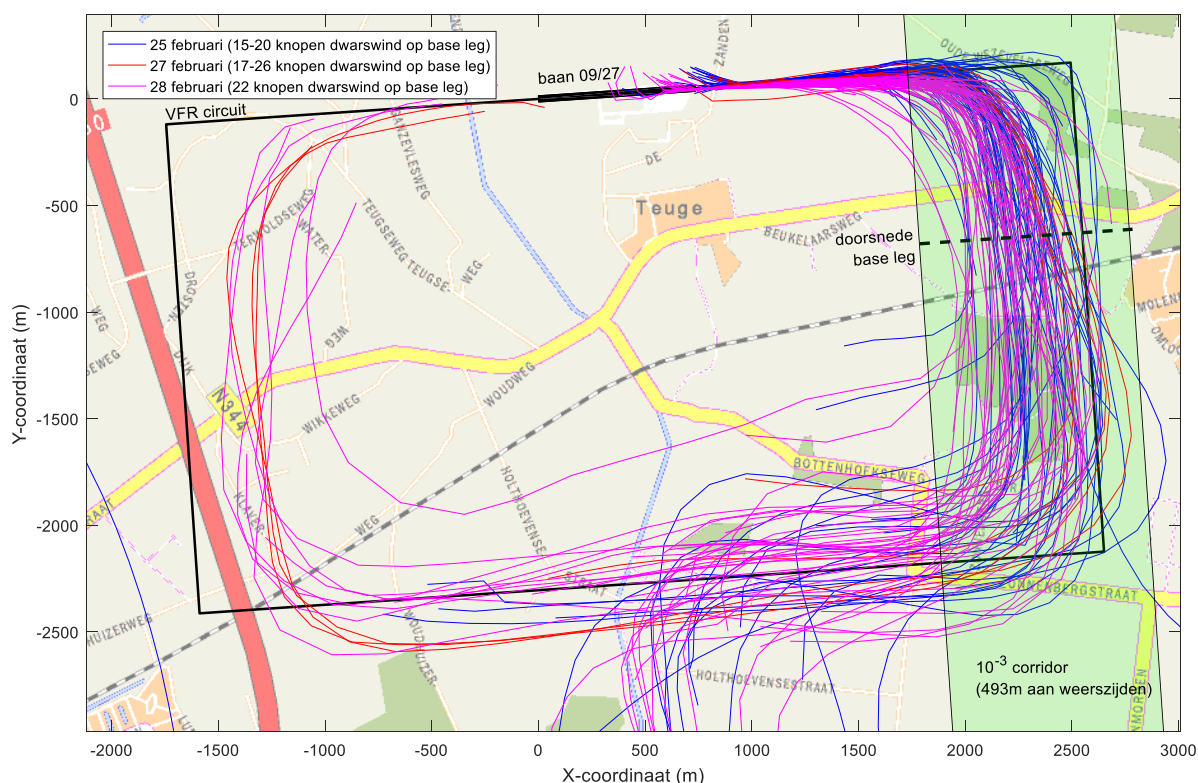
Afwijking van de nominale route

Vervolgens is de vraag hoe groot de kans is dat bij gebruik van de noordelijke route een significante laterale afwijking van de nominale route zou kunnen ontstaan, zodanig dat een vliegtuig in de buurt van de windturbines kan geraken. In algemene zin mag verwacht worden dat deze kans erg klein is. Immers de hoofdgebruiker van de vliegstrip is de exploitant zelf, die zeer goed bekend is met de omgeving.

Er bestaan echter geen meetgegevens die aangeven met welke feitelijke nauwkeurigheid de nominale route wordt gevolgen. Om hier toch enige indruk van te krijgen zijn gegevens gebruikt van metingen van het NLR, die in 1998 zijn uitgevoerd, om de nauwkeurigheid waarmee een circuit wordt gevolgen te kunnen vaststellen. Deze metingen zijn uitgevoerd met het FlyCatcher radarsysteem van het NLR op de luchthaven van Teuge in Nederland. De doelstelling van de metingen was om vooral om de afwijkingen bij sterke wind vast te stellen. Er zijn daarom metingen uitgevoerd met een windsterkte tussen de 15 en 25 knopen. Er mag verwacht worden dat door sterke wind de afwijkingen

gemiddeld zullen toenemen. Daarom is dit een “worst case” benadering voor de spreiding van de vliegbanen. In totaal is er op drie dagen gemeten.

Een overzicht van de gemeten vliegbanen en de spreiding daarvan wordt gegeven in Figuur 3-3. Tevens is aangegeven dat de spreiding normaliter (dus ook onder omstandigheden met sterke wind) binnen een corridor van circa 500 meter aan weerszijden van de nominale route blijft.



Figuur 3-3: Vliegbanen van de metingen op Teuge

Op basis van een normale kansverdeling is berekend dat een kans bestaat van 10^{-3} per vlucht dat een afwijking van meer dan 493 meter wordt overschreden.

Ook is duidelijk dat de spreiding tijdens de eindnadering klein is. Deze blijft ruim binnen de contouren van het naderingsvlak.

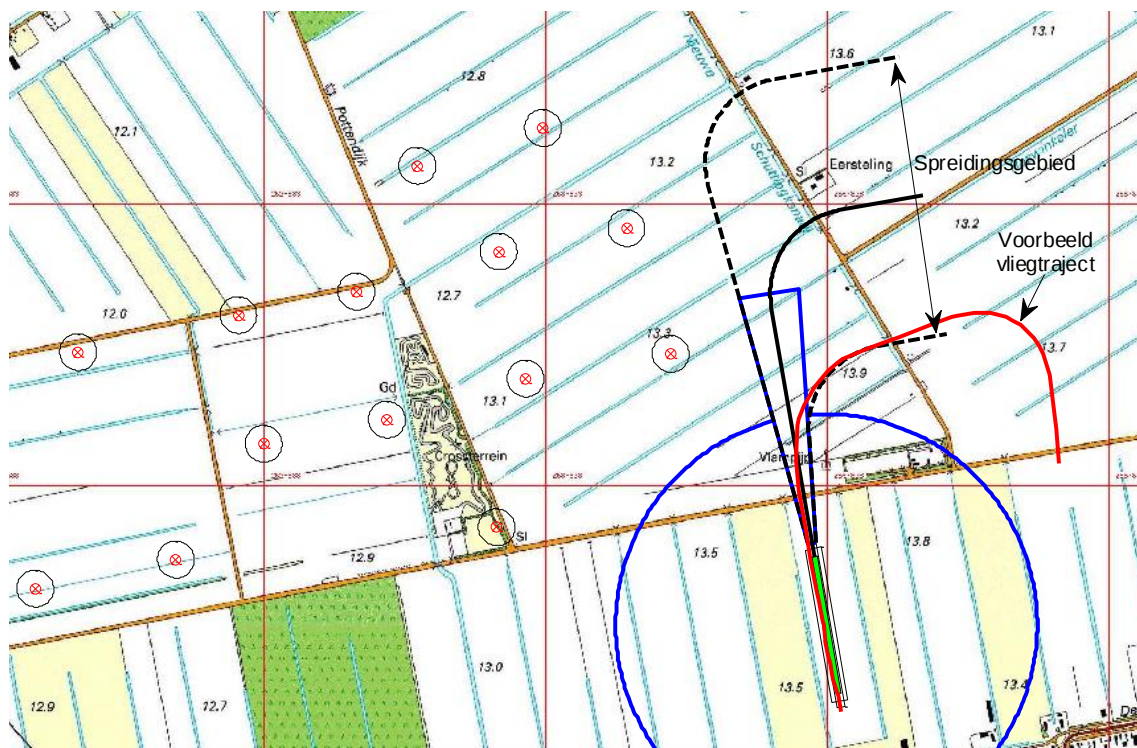
Op basis van deze metingen is het spreidingsgebied geprojecteerd op de noordelijke vliegroute bij EHEM. Dit is weergegeven in Figuur 3-4. Eveneens is een voorbeeld van het naderingstraject weergegeven, dat door de exploitant ter beschikking is gesteld. Hier uit blijkt dat in dit geval kort werd ingedraaid, aan de rand van de binnengrens van het spreidingsgebied. Gezien de vliegervaring van de exploitant mag verwacht worden dergelijke naderingen met enige regelmaat zullen worden uitgevoerd. Dit vergroot uiteraard de afstand tot het windpark.

Verder blijkt uit de figuur dat de verwachte spreiding niet in de buurt van windpark Pottendijk komt. Op basis van het spreidingsmodel kan berekend worden dat de kans dat een afwijking ontstaat die zodanig groot is dat een vliegtuig in de buurt van het windpark (WT13 of WT14) zal komen kleiner is dan 10^{-6} per beweging.

Gegeven het aantal bewegingen dat aan dit risico blootgesteld wordt komt dit neer op een verwachtingswaarde van minder dan eens per 4000 jaar.

Vlieghoogte

Om daadwerkelijk in botsing te komen met een windturbine moet naast een grote laterale afwijking ook de vlieghoogte beneden tiphoogte zijn. Omdat de vlieghoogte van het circuit 500 voet bedraagt en de tiphoogte van de turbines in dezelfde orde is, moet ervan uitgegaan worden dat de kans 100% is dat wanneer eenmaal de laterale afwijking voldoende groot is dat dan ook daadwerkelijk een botsing zal plaatsvinden.



Figuur 3-4: Verwachte spreiding rond de nominale route. In rood is een voorbeeld naderingstraject weergegeven

Conclusie

Op basis van bovenstaande overwegingen wordt de kans dat een vliegtuig in botsing komt met één van de windturbines geschat op kleiner dan eens per 4000 jaar. Op basis van de gegeven definitie (zie Appendix A) wordt de kans op voorkomen van deze hazard geclassificeerd als **“extremely improbable”** (Categorie 1).

3.4 H2 – Windturbinezog

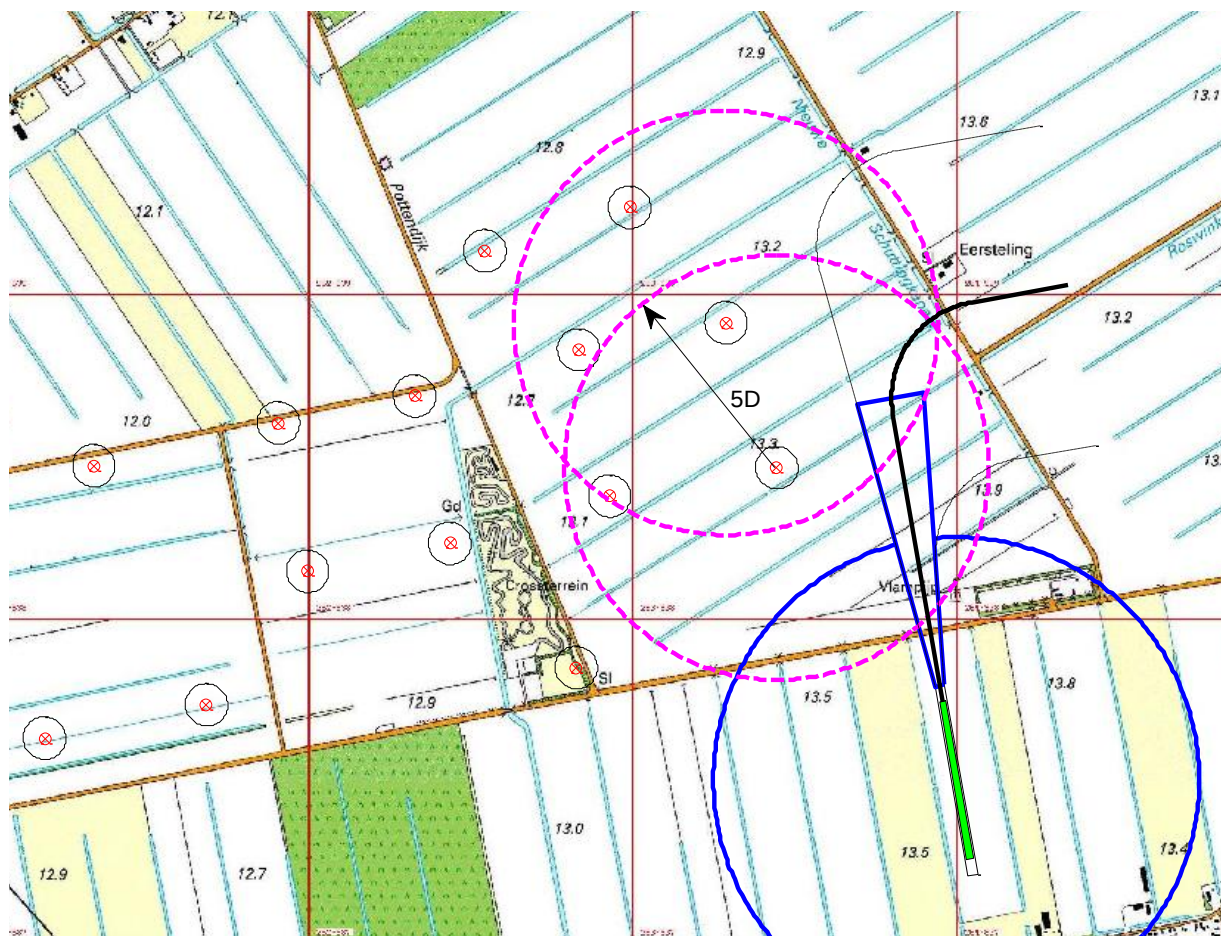
3.4.1 Ernst van het windturbinezog

3.4.1.1 Beoordelingscriteria

Op dit moment bestaat er slechts beperkte kennis in welke mate turbulentie en tipwervels die door windturbines veroorzaakt worden een risico kunnen vormen voor vliegtuigen die door het zog van een windturbine vliegen.

Een goed overzicht van bestaande kennis en initiatieven wordt gegeven in het door de CAA UK uitgegeven document CAP 764 (CAA Policy and Guidelines on Windturbines) [11]. In dit document wordt aanbevolen om voorzichtig te zijn met doorkruisen van het zog van een windturbine binnen een afstand van vijf rotordiameters achter de turbine. Metingen hebben aangetoond dat de luchtsnelheid in het zog achter de windturbine zich herstelt heeft tot 90% van de niet verstoorte stroming op deze afstand. Op deze afstand wordt de resterende verstoring dan als verwaarloosbaar gezien.

In Figuur 3-5 zijn de geplande windturbines op de kaart ingetekend, met een straal van vijf rotordiameters (D) rond de meest nabij gelegen windturbines (WT13 en WT4).



Figuur 3-5: Invloedsgebied van windturbine WT13 en WT14 (magenta lijnen)

Uit deze figuur blijkt dat de nominale route binnen het invloedsgebied van windturbines WT13 en WT14 ligt. Om deze reden is het van belang verder in te gaan op de mate van hinder die zou kunnen ontstaan. Hiertoe wordt een nadere analyse gemaakt van de verstoringseffecten die windturbines kunnen veroorzaken.

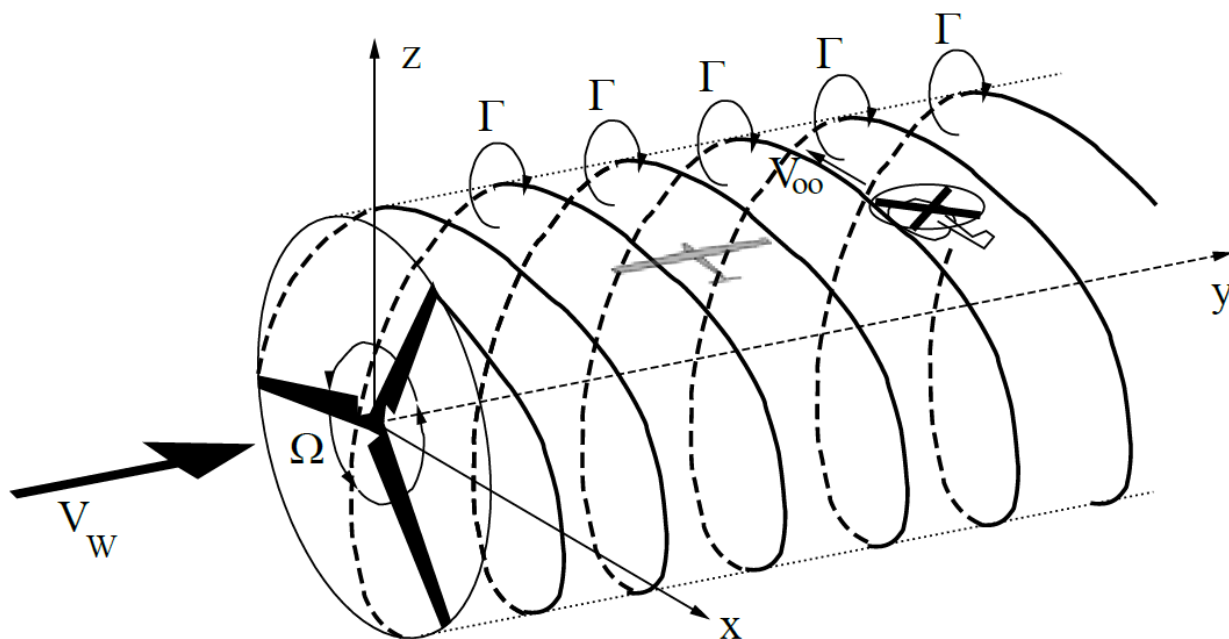
De verstoringseffecten kunnen ingedeeld worden in drie verschillende categorieën, te weten:

1. Verstoring door tipwervels
2. Windhinder als gevolg van snelheidsveranderingen in het windzog
3. Toename van turbulentie

Deze effecten worden hierna nader behandeld.

3.4.1.2 Tipwervels

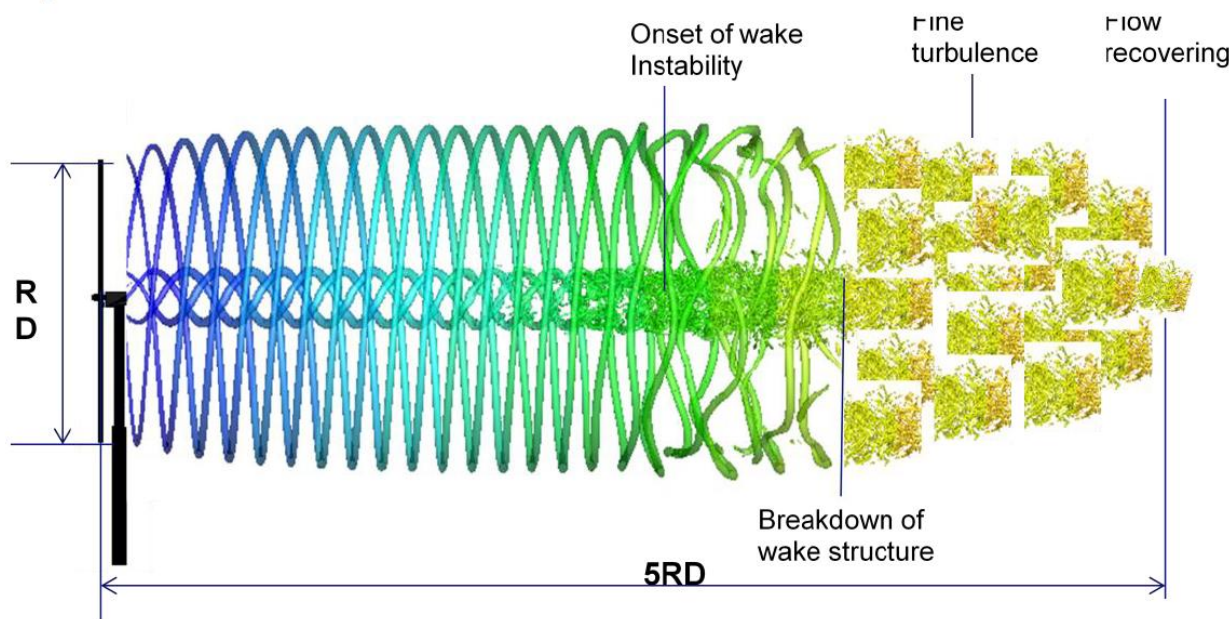
Het vliegtuig kan blootgesteld worden aan de tipwervels, afkomstig van de rotorbladen. Dit is vergelijkbaar met een tipwervel van een vliegtuig, waarvan bekend is dat deze een gevaar kunnen vormen voor achteropkomende vliegtuigen. Om deze reden bestaan er minimum onderlinge separatie-afstanden tussen vliegtuigen (de zogenaamde *wake turbulence-separatie*). De situatie die zich kan voordoen bij windturbines wordt geschetst in Figuur 3-6. Wanneer een luchtvaartuig de tipwervel doorkruist kan dit leiden tot rolverstoringen, die mogelijk (bij een bepaalde sterkte en tijdsduur) tot een verlies van bestuurbaarheid kan leiden. De tipwervel-effecten van een windturbine zijn vergelijkbaar, maar niet helemaal identiek aan de tipwervel-effecten van een vliegtuig. Bij een vliegtuig ontstaan aan de vleugeltippen twee, min of meer rechtlijnige, wervels die in tegengestelde richting draaien, en die beiden bijdragen aan de neerstroming achter de vleugel. Bij een windturbine vormen de tipwervels een helix, een kurkentrekkervormige spiraal, waarbij naast elkaar gelegen wervels allen dezelfde draairichting hebben. Midden tussen twee wervels zijn de geïnduceerde snelheden tegengesteld van richting en zullen ze elkaar ongeveer opheffen. Deze tegengestelde snelheden hebben een dempend effect op de levensduur van de tipwervels. Naar het effect van de tipwervels van windturbines op luchtvaartuigen is slechts op beperkte schaal onderzoek gedaan (zie bijv. [17] en [18]). Er bestaan geen, nationaal of internationaal, geaccepteerde criteria om de effecten te kunnen beoordelen. Wel is het mogelijk, op basis van analogie met de tipwervelproblematiek van vliegtuigen, gelijksoortige criteria te hanteren. Voorlopig onderzoek van DLR [17] laat zien dat de tipwervels van een grote turbine op een afstand van 500m achter de turbine een significant effect kunnen hebben op de bestuurbaarheid van een zweefvliegtuig dat door een tipwervel vliegt.



Figuur 3-6: Schematische weergave windturbine tipwervel met vliegtuigen [17]

De wiskundige modellering van de tipwervels wordt beschreven in [17] en [18]. Hiermee kan de wervelsterkte van de tipwervels van een windturbine worden bepaald. Tevens kan worden bepaald hoe de tipwervels als functie van de tijd en afstand achter de windturbine in sterkte verminderen. De betreffende formules worden samengevat in Appendix B.

Hierbij wordt verder opgemerkt dat op basis van onderzoek van de Universiteit van Liverpool blijkt dat de tipwervels door onderlinge interactie en door viskeuze interactie met de ongestoorde stroming op een bepaalde afstand achter de windturbine onstabiel worden en ophouden te bestaan. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3-7.



Figuur 3-7: Schematische weergave van het zog achter een windturbine [10]

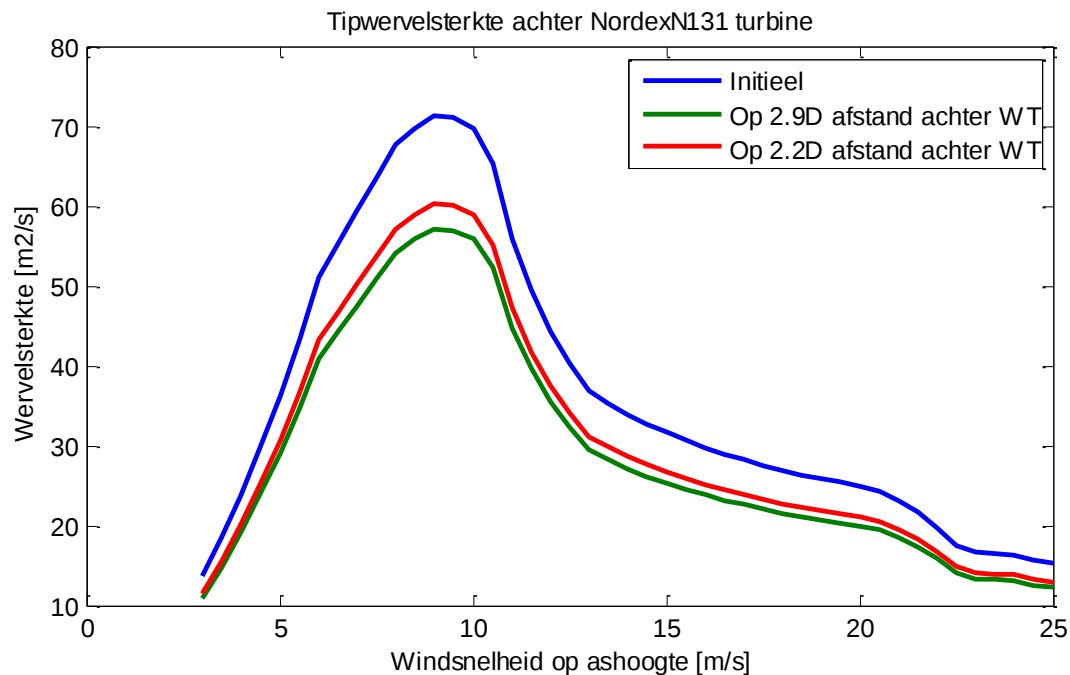
Voor de huidige studie wordt ervan uitgegaan dat de tipwervels tot vier diameters achter de windturbine stabiel zijn.

Zoals uit Figuur 3-5 en Tabel 2-2 blijkt kan een vliegtuig dat indraait voor de eindnadering windturbine WT14 passeren op een afstand van 382 meter. De uiterste rand van het spreidingsgebied ligt op een afstand van circa 290 meter. Het vliegtuig kan dus op 2,2 tot 2,9 diameters achter de windturbine passeren.

Met behulp van de vergelijkingen in Appendix B kan de wervelsterkte van de tipwervels van een Nordex N131 op een bepaalde afstand achter de turbine berekend worden. De resultaten hiervan worden weergegeven in Figuur 3-8. Het toont de initiële wervelsterkte en de wervelsterkte op gegeven afstanden achter de windturbine. Hieruit blijkt dat er een sterke afhankelijkheid is van de windsnelheid. Tussen 5 en 12 m/s wordt de maximale wervelsterkte gevonden (op de schaal van Beaufort windsterkte 3-5). De initiële wervelsterkte is maximaal iets meer dan $70 \text{ m}^2/\text{s}$. Dit is qua sterkte vergelijkbaar met de tipwervels van een klein zakenvliegtuig (bijvoorbeeld een Cessna Citation of een Beechcraft 1900) tijdens de eindnadering.

De vraag is vervolgens welke invloed een dergelijke wervelsterkte kan hebben op de bestuurbaarheid van een klein vliegtuig wanneer dit door een dergelijke wervel zou vliegen. Er bestaan geen specifieke criteria voor de impact van tipwervels van windturbines. Echter het fenomeen is vergelijkbaar met de impact van tipwervels van vaste vleugel vliegtuigen. Hiernaar is heel veel onderzoek gedaan om de veilige onderlinge afstanden te kunnen bepalen voor vliegtuigen die achter elkaar een nadering uitvoeren. Hieruit is bekend dat kleine vliegtuigen minimaal op 5NM achter medium vliegtuigen, zoals een Boeing 737, mogen vliegen en minimaal 4NM achter regionaal straalvliegtuig of – turboprop, zoals een Embraer 170 of Bombardier Dash-8. Door de tipwervels van een windturbine te vergelijken met de tipwervels van vliegtuigen kan dan een inschatting van de ernst gemaakt worden. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat tipwervels van een vliegtuig rechtlijnige wervels zijn, waaraan een volgend vliegtuig gedurende een bepaalde tijd kan worden blootgesteld. Bij windturbines gaat het om kurketrekker-achtige wervels, die een bepaalde kromming hebben afhankelijk van de rotordiameter. Dit betekent dat een vliegtuig dat op een constante hoogte een

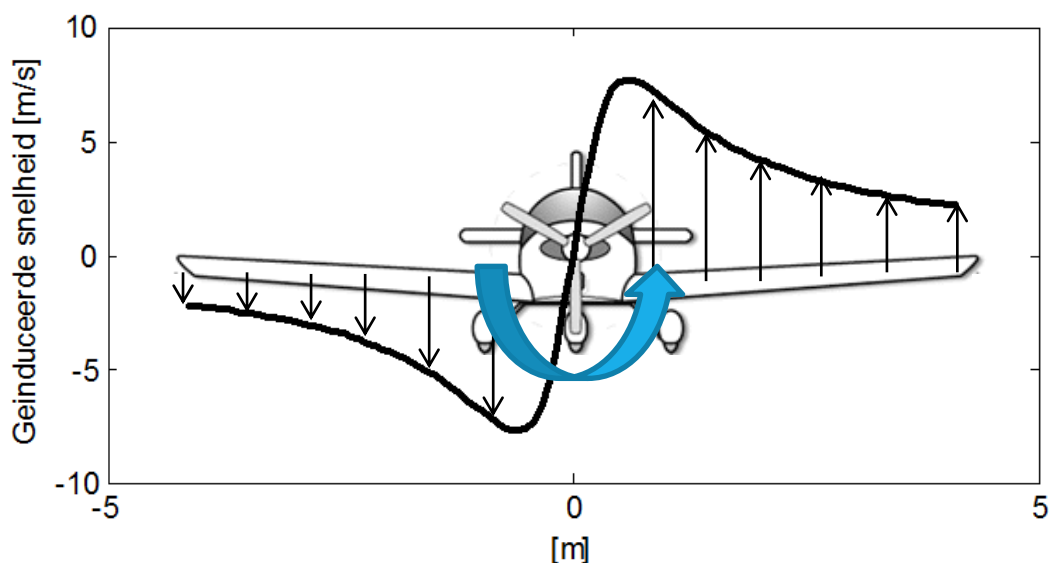
rechtlijnige vlucht uitvoert, slechts een beperkte tijd aan het effect wordt blootgesteld. In die zin kan de vergelijking als conservatief gezien worden. Echter, in afwezigheid van andere criteria wordt deze aanpak hier als uitgangspunt genomen.



Figuur 3-8: Tipwervelsterkte achter een Nordex N131 turbine

Om de impact van het doorkruisen van een tipwervel te bepalen moet het aerodynamisch effect van de wervel op het vliegtuig nader geëvalueerd worden.

Wanneer een vliegtuig door een dergelijke tipwervel vliegt (zoals aangegeven in Figuur 3-6) zal er een geïnduceerd snelheidsveld over de vleugel ontstaan. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 3-9.



Figuur 3-9: Geïnduceerd snelheidsveld over de vleugel en het resulterende rolmoment ten gevolge van een tipwervel.

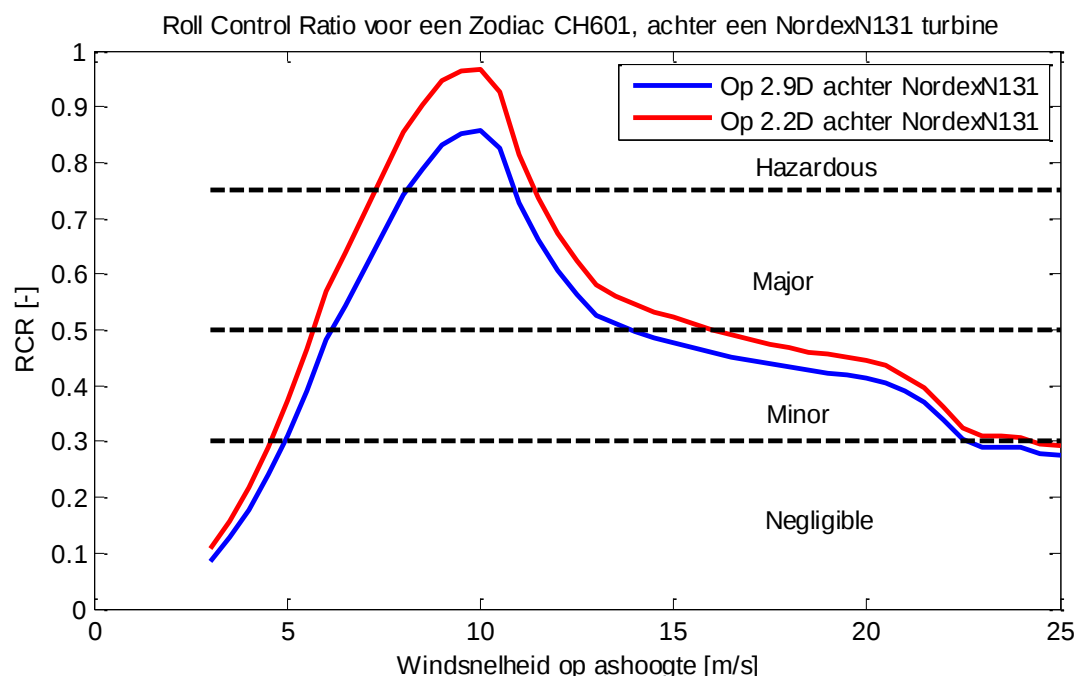
Dit snelheidsveld kan worden berekend met de methode van Burnham-Hallock [19]. De betreffende vergelijking is opgenomen in Appendix B. Door vervolgens het snelheidsveld te integreren over de spanwijdte kan een geïnduceerd rolmoment worden berekend. Dit rolmoment is een maat voor de verstoring. De ernst van de verstoring wordt

gerelateerd aan het rolmoment dat de vlieger zelf kan genereren door middel van een uitslag van de rolroeren. Deze verhouding wordt uitgedrukt in de zogenaamde Roll-Control-Ratio (RCR) [20]. Wanneer de RCR groter wordt dan 1 betekent dit dat het geïnduceerde rolmoment groter is dan de rolcapaciteit van het vliegtuig. Het vliegtuig is dan feitelijk onbestuurbaar. Een $RCR > 1$ wordt in het algemeen als een mogelijk catastrofaal effect gezien. Dit is, zoals eerder aangegeven, conservatief omdat de onbestuurbaarheid tijdelijk van aard is, en even later het vliegtuig wel weer bestuurbaar kan zijn en dus een herstelmanoeuvre kan worden uitgevoerd. Voor de huidige studie wordt echter uitgegaan van de volgende mate van ernst van het doorvliegen van een tipwervel:

- $RCR > 1$: Catastrophic
- $0,75 < RCR \leq 1$: Hazardous
- $0,5 < RCR \leq 0,75$: Major
- $0,3 < RCR \leq 0,5$: Minor
- $RCR \leq 0,3$: Negligible

Gegevens met betrekking tot de maximale rolcapaciteit van een Zodiac CH601 zijn niet beschikbaar. Voor de huidige studie is deze geschat op basis van gegevens van soortgelijke vliegtuigen, gecombineerd met de geometrie van het toestel. De rolroereffectiviteit ($Cl_{\delta a}$) wordt geschat op 0,23/per radiaal. Met een maximale uitslag van ongeveer 30° van het rolroer geeft dit een maximaal (dimensieloos) rolmoment van 0,12. Deze waarde wordt gebruikt voor de berekening van de RCR.

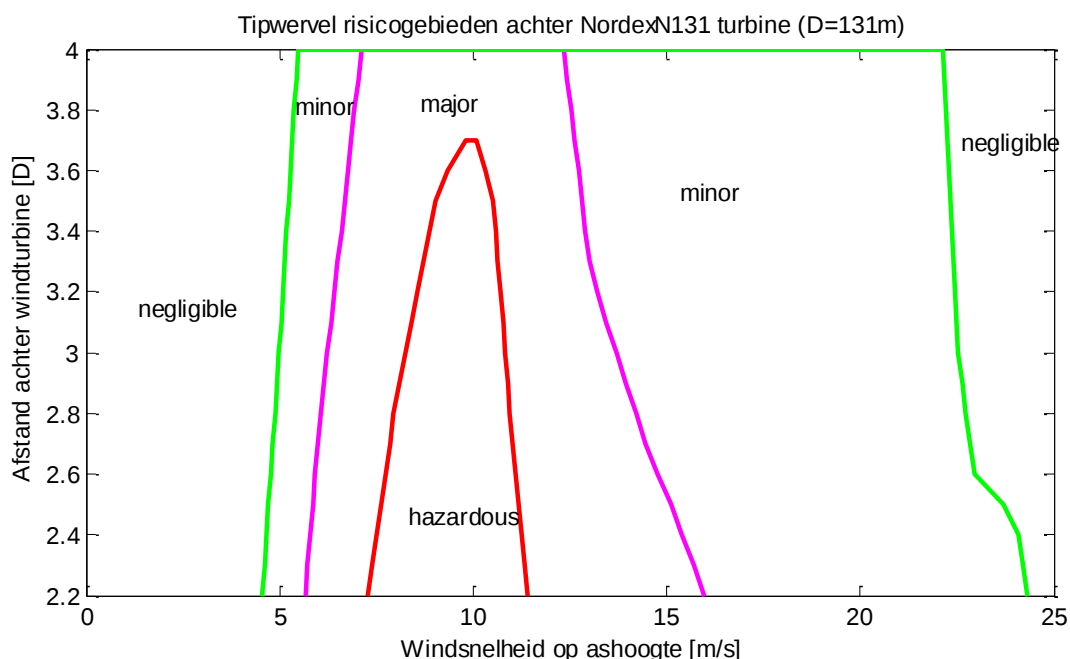
Op basis hiervan kan de impact worden berekend van de tipwervels van een Nordex N131 windturbine voor een Zodiac CH601 vliegend op tiphoogte en op afstanden, die relevant zijn voor de operaties van en naar de vliegstrip EHEM. De resultaten worden weergegeven in Figuur 3-10.



Figuur 3-10: De ernst van het doorkruisen van de tipwervels van een Nordex N131 windturbine door een Zodiac CH601, voor operaties op EHEM.

Hieruit blijkt dat bij bepaalde windsnelheden zich inderdaad een ernstige (hazardous) verstoring kan voordoen. De ernst neemt ook toe als de afstand tot de windturbine kleiner wordt. In Figuur 3-11 is aangegeven in welke gebieden (in termen van combinatie van afstand achter de turbine en windsterkte) zich een bepaald tipwervelrisico kan

voordoen bij passeren op tiphoogte. Hierbij is de figuur afgekapt op een maximum van vier rotordiameters, omdat verwacht mag worden dat voorbij deze afstand de wervels onstabiel worden.



Figuur 3-11: Tipwervel risicogebieden voor een Zodiac CH601 achter een Nordex N131 turbine

3.4.1.3 Windhinder

Een windturbine functioneert door kinetische energie aan de heersende wind te onttrekken en om te zetten in elektrische energie. Het verlies aan kinetische energie manifesteert zich in een verlaging van de luchtsnelheden achter de windturbine; het zogenaamde windturbinezog. Vliegtuigen die dit zog doorkruisen ervaren dit als een laterale of longitudinale windschering, afhankelijk van de richting van doorkruisen. Windschering kan risico's opleveren voor een vliegtuig, doordat het kan leiden tot een verlies van snelheid (en dus van dynamische druk en draagvermogen) of tot een lateraal-directionele verstoring. In beide gevallen kan dit, in het ernstigste geval, leiden tot een verlies van besturing. Windschering heeft in het verleden diverse malen tot ongevallen geleid. De vraag die zich voordoet is of het snelheidsverlies in het windturbinezog tot een significante windschering kan leiden, en tot op welke afstand een dergelijk fenomeen mogelijk een risico voor het luchtverkeer kan opleveren. Dit wordt als een belangrijk risico voor het luchtverkeer gezien, en wordt hier nader uitgewerkt voor de operaties op EHEM.

Zoals reeds eerder is aangegeven bestaan er geen geaccepteerde criteria om het effect van een verstoring van een klein vliegtuig door het zog van een windturbine te kwalificeren. In Nederland is het echter gangbaar om de verstoring achter een windturbine te vergelijken met de windhinder die achter gebouwen kan ontstaan. Op dit gebied is uitgebreid onderzoek gedaan, hetgeen heeft geleid tot een aantal criteria waarmee de windhinder achter gebouwen (op een luchthaven) wordt beoordeeld [9]. Deze effecten zijn vergelijkbaar met de effecten die zich achter een windturbine kunnen voordoen. In het gerefereerde onderzoeksrapport worden een aantal belangrijke conclusies getrokken ten aanzien van criteria die gebruikt kunnen worden om de genoemde effecten te kunnen beoordelen.

Letterlijk luiden deze conclusies:

- *The variation in mean wind speed due to wind disturbing structures must remain below 7 knots along the aircraft trajectory at heights below 200ft. The speed deficit change of 7 knots must take place over a distance of at least 100m.*
- *The variation in mean wind speed due to wind disturbing structures must remain below 6 knots across the aircraft trajectory at heights below 200ft. The speed deficit change of 6 knots must take place over a distance of at least 100m.*

Er worden dus twee criteria gedefinieerd, één voor verstoring in de langsrichting (< 7 knopen) en één voor verstoring in de dwarsrichting (< 6 knopen). Blijkbaar is een laterale verstoring iets kritischer dan een longitudinale verstoring. Verder wordt aangegeven dat de verstoring zich moet voordoen over een afstand van tenminste 100m. Aangezien grote windturbines een rotordiameter hebben die groter is dan 100m, wordt hieraan voldaan. Tenslotte wordt aangegeven dat het hier gaat om verstoringen die zich op lage hoogte (< 200 voet) voordoen.

Het is aannemelijk dat de hoogte een belangrijke rol speelt, omdat een verstoring dichtbij de grond, vlak voor de landing, qua ernst een grotere impact zal hebben dan wanneer een zelfde verstoring op grotere hoogte plaatsvindt, tijdens de start of en-route fase. Bij het vliegen van het circuit moet een vlieghoogte van 500 voet boven de grond aangehouden worden en de windturbines zullen op een grotere hoogte dan 200 voet gepasseerd worden, en daarom zullen bovenstaande criteria conservatief zijn, als zij op grotere hoogte toegepast zouden worden.

Aan de andere kant was de windhinderstudie destijds vooral gericht op commerciële vliegtuigen, zoals een Fokker 100 en groter. Er mag worden verondersteld dat dergelijke vliegtuigen, door hun grotere vliegsnelheid en gewicht, beter bestand zijn tegen een windverstoring dan kleinere vliegtuigen (*General Aviation*). Vanuit de literatuur is echter weinig bekend ten aanzien van windhindercriteria voor kleinere vliegtuigen. Voor het huidige onderzoek wordt daarom als uitgangspunt genomen dat het bestaande windhinder criterium ook van toepassing is voor kleinere vliegtuigen. Dit betekent dat verondersteld wordt dat de twee effecten (kleinere vliegtuigen en hoogte >200 voet) min of meer in evenwicht zijn.

Het windhinder criterium geeft een grens aan waar de verstoring onder moet blijven. Er wordt niet aangegeven hoe de ernst gekwalificeerd zou moeten worden als deze grens overschreden wordt. De windhinderstudie was er op gericht om vast te stellen wat de grens zou zijn waar beneden de windhinder als niet significant kon worden beschouwd. Dit duidt erop dat windhinder beneden de aangegeven grens als "*minor*" moet worden beschouwd. Dit betekent dat windhinder boven de aangegeven grens automatisch als "*major*" moet worden gekwalificeerd. In een NLR-studie voor de Europese Unie naar *Atmospheric Hazard Criteria* [12] is een verband gelegd tussen criteria voor windschering en windhinder. Ook hieruit volgt dat de windhindercriteria uit de windhinderstudie gezien kunnen worden als de grens tussen een "*minor*" en "*major*" effect.

Op basis van bovenstaande overwegingen wordt in de huidige studie verondersteld dat zogeeffecten van een windturbine verwaarloosbaar zijn op een afstand groter dan vijf diameters of wanneer de windverstoring minder dan drie knopen bedraagt. Verder is het uitgangspunt dat een windverstoring van minder dan zes knopen ten gevolge van het doorkruisen van het zog van een windturbine een "*minor*" voorval is. Een dergelijke verstoring zal niet wezenlijk verschillen van verstoringen die zich in de dagelijkse praktijk kunnen voordoen ten gevolge van normale wind en turbulentie. Verstoringen van ≥ 6 knopen worden als significant (*major*) beschouwd, en de kans daarop moet daarom dienovereenkomstig laag zijn om het risico te kunnen beheersen. Uitgangspunt hierbij is dat de laterale verstoring maatgevend is (d.w.z. laagste acceptabele waarde van de windverstoring).

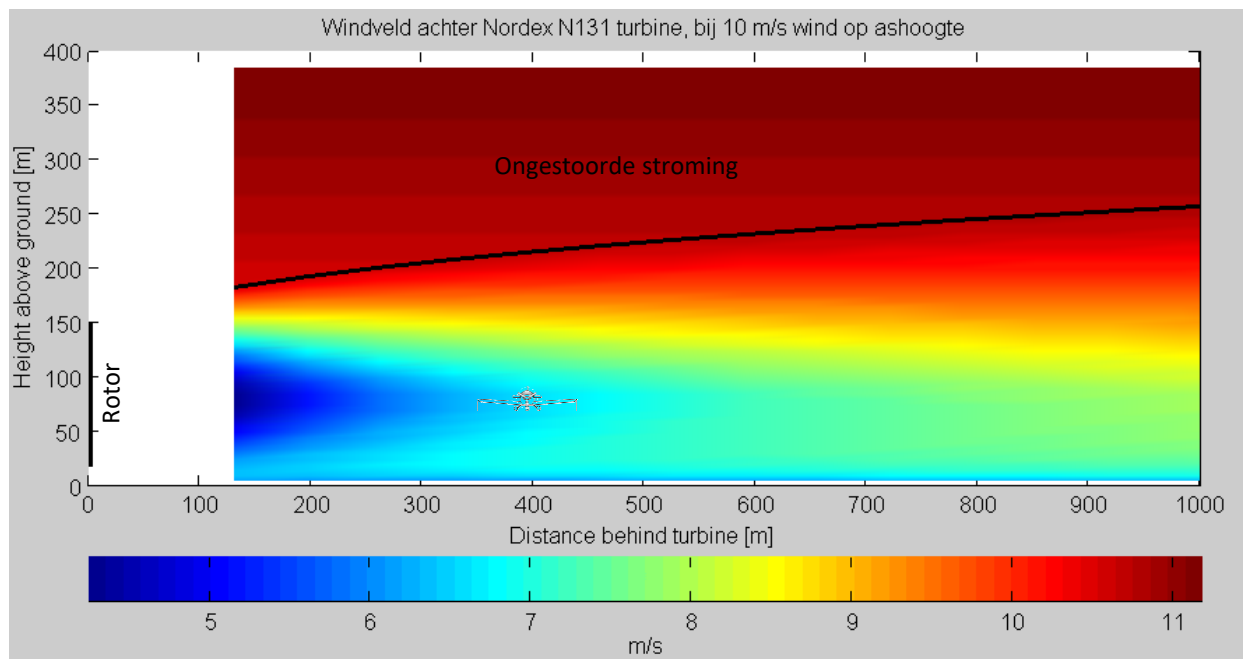
Zogmodel

De vraag is vervolgens op welke afstand van de windturbine en onder welke omstandigheden zich een bepaalde windverstoring kan voordoen. Hiertoe wordt de methode gebruikt die door Gunner Larsen is ontwikkeld [13]. Een validatierapport van de TU Delft [14] laat zien dat dit model een goede voorspelling geeft van het ruimtelijke windveld achter de rotor. Tot een afstand van vijf diameters geeft dit model een nauwkeurige representatie van gemeten windvelden. Op grotere afstand is het model conservatief en geeft een overschatting van het verlies in windsnelheid.

Het Larsen-model berekent naast het snelheidsveld ook de diameter van het zog, als functie van de afstand tot de turbine. Hierdoor wordt een goede afbakening gekregen tussen de niet verstoorde en verstoorde windsnelheid. Het Larsen-model vereist, naast de gegevens van de windturbine (trekkrachtscoëfficiënt C_t), ook enkele omgevingsparameters als input. Dit zijn de terreinruwheid (z_0) en de turbulentie-intensiteit (I). De terreinruwheid is nodig om het snelheidsverloop van de wind in de grenslaag van de aarde te bepalen. De turbulentie-intensiteit is de verhouding van de standaard-deviatie van de turbulentie en de gemiddelde windsnelheid en is een belangrijke factor, die de afstand bepaalt waarover het snelheidsverlies achter de windturbine afneemt. Naarmate de turbulentie van de omringende lucht groter is, zal sneller een menging tussen de verstoorde en niet verstoorde luchtstroming plaatsvinden, waardoor sneller de niet verstoorde stroming achter de windturbine hersteld wordt. Dit kan een groot effect hebben op de mate van windschering waaraan een vliegtuig op een gegeven afstand achter de windturbine wordt blootgesteld. Het is daarom van belang dat deze omgevingsparameters met zorg gekozen worden. Voor windturbines op land in redelijk open terrein wordt vaak door ontwikkelaars een turbulentie-intensiteit van 0.12 gebruikt om de efficiency van windfarms door te rekenen. Deze waarde wordt ook in deze studie gebruikt.

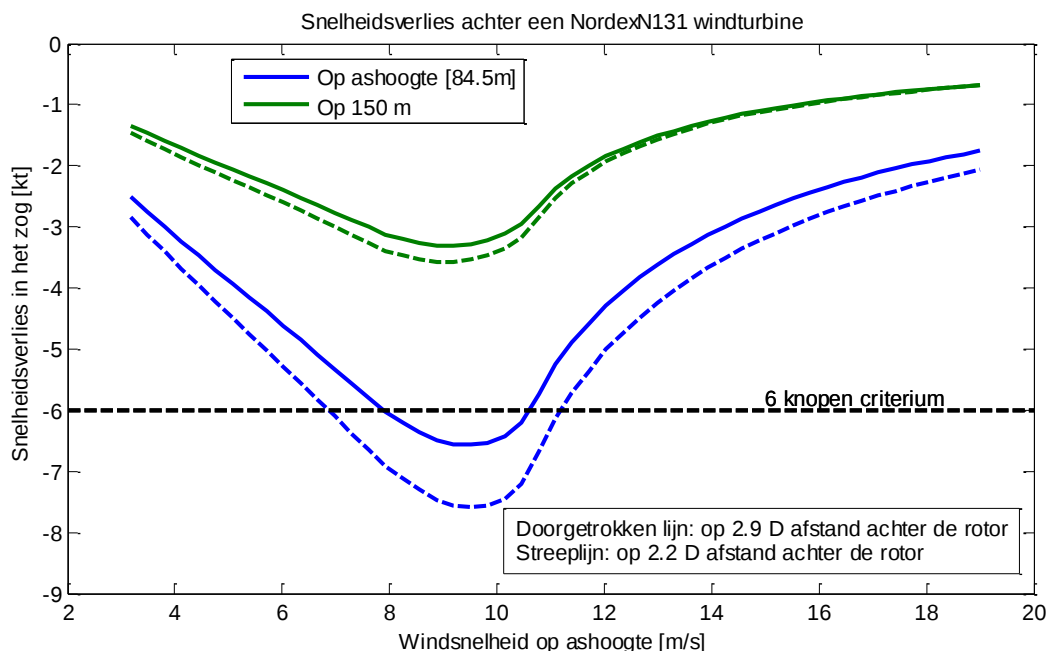
De benodigde gegevens van het relevante type windturbine zijn door de fabrikant (Nordex) aan NLR verstrekt.

Een voorbeeld van het berekende windveld achter een Nordex N131 turbine wordt gegeven in Figuur 3-12. In deze figuur is ook een Zodiac CH601 (niet op schaal) weergegeven die op circa 400 meter achter de rotor op ashoogte het zog passeert. Hieruit blijkt dat op deze afstand de windverstoring achter de turbine nog voelbaar zal zijn.



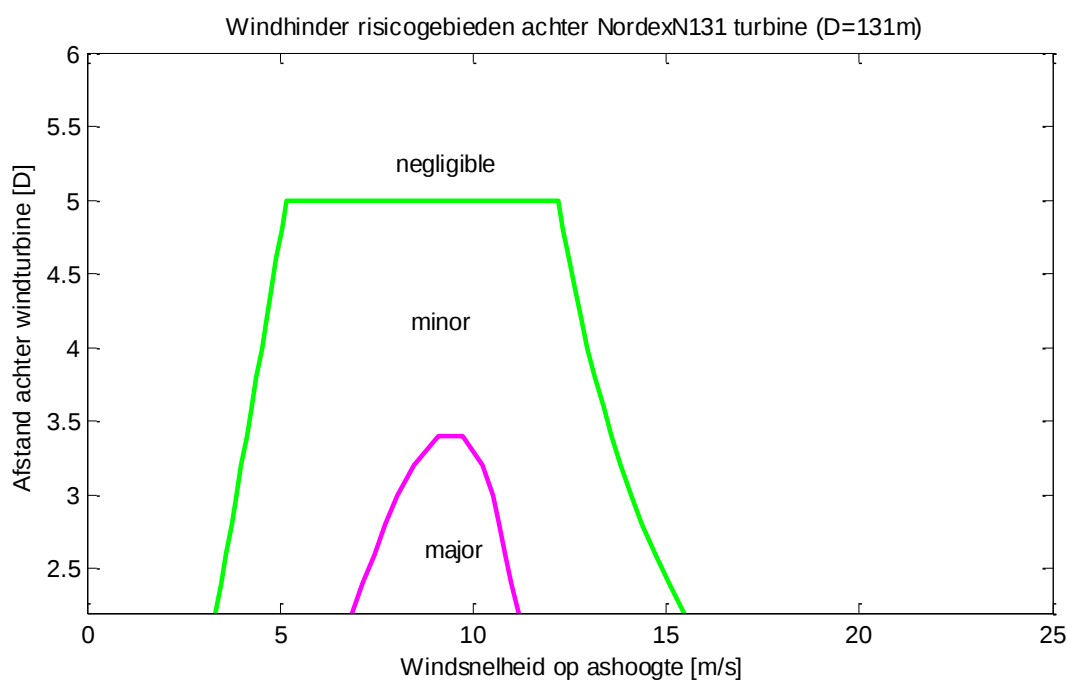
Figuur 3-12: Windveld achter een Nordex N131 turbine bij 10 m/s wind op ashoogte.

Met behulp van het zogmodel kan het snelheidsverlies ten opzichte van de niet verstoorde stroming op een bepaalde afstand en hoogte achter de windturbine berekend worden. Voor de relevante afstanden voor de operatie op EHEM wordt dit snelheidsverlies weergegeven in Figuur 3-13.



Figuur 3-13: Snelheidsverlies in het zog achter een Nordex N131 windturbine.

Hieruit blijkt dat op 500 voet de verstoring relatief gering is, maar dat bij passeren op ashoogte zich een significante windsnelheidsverandering kan voordoen en daarmee de grenswaarde van het 6-knopen criterium overschrijdt. De ernst is afhankelijk van de windsnelheid en de afstand achter de turbine.



Figuur 3-14: Windhinder risico gebied, op ashoogte, voor een Zodiac CH601 achter een Nordex N131 turbine

In Figuur 3-14 is aangegeven in welke gebieden (in termen van combinatie van afstand achter de turbine en windsterkte) zich een bepaald windhinderrisico kan voordoen.

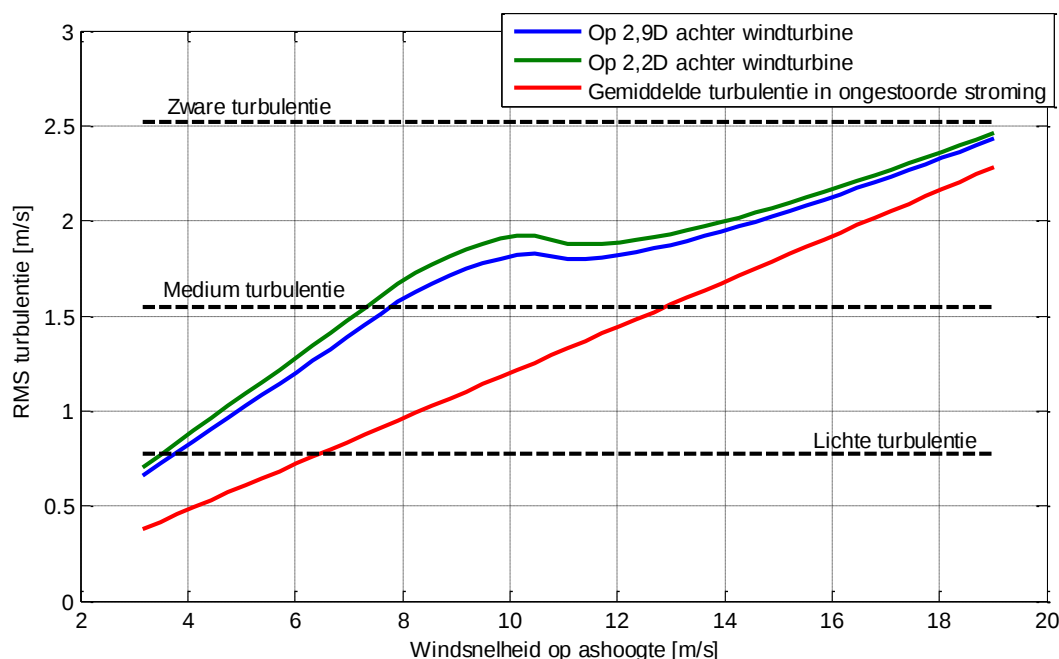
Hieruit blijkt dat het windhinder risico minder ernstig is dan het tipwervelrisico (vergelijk Figuur 3-10). Het “major” gebied voor windhinderrisico is ongeveer gelijk aan het “hazardous” gebied voor tipwervelrisico.

3.4.1.4 Turbulentie

Windturbines veroorzaken afremming van de niet verstoorde stroming. Hierdoor ontstaat frictie tussen de vertraagde stroming in het zog en de niet verstoorde buitenstroming. Dit leidt tot luchtwervelingen, die zich voordoen als een toename van het atmosferische turbulentieniveau. Een sterke toename van het turbulentieniveau kan mogelijk een risico vormen voor vliegtuigen die dit gebied doorkruisen. Dit effect is op zichzelf niet anders dan van elk ander obstakel (gebouw, terrein of bomen) dat eveneens kan leiden tot windverstoringen en daarmee gepaard gaande verhoging van de turbulentie-intensiteit.

Met behulp van het Larsen model kan de toename van het niveau van turbulentie geschat worden op een bepaalde afstand achter de turbine. Hierbij is uitgegaan van een turbulentie intensiteit in de niet verstoorde stroming van $I=0.12$. Dit betekent dat in de niet verstoorde stroming het feitelijke niveau van turbulentie (uitgedrukt in de Root-Mean-Square waarde (RMS) van de snelheidsfluctuaties) lineair toeneemt met de windsnelheid. Het verloop van de turbulentie-RMS-waarden achter de windturbine is weergegeven in Figuur 3-15. Tevens is hierin weergegeven hoe de mate van turbulentie wordt uitgedrukt in termen van lichte (1,5kt), medium (3kt) en zware (4,9kt) turbulentie.

Uit deze figuur blijkt dat het turbulentieniveau significant kan toenemen, vooral rond de windsnelheid van rond 8 á 10 m/s. In plaats van lichte turbulentie wordt het niveau van turbulentie dan medium. Het niveau komt echter niet in de buurt van zware turbulentie. Vliegers zijn in het algemeen voldoende geoefend om met medium turbulentie om te kunnen gaan. Om deze reden wordt de verhoging van de turbulentie als “minor” beoordeeld.



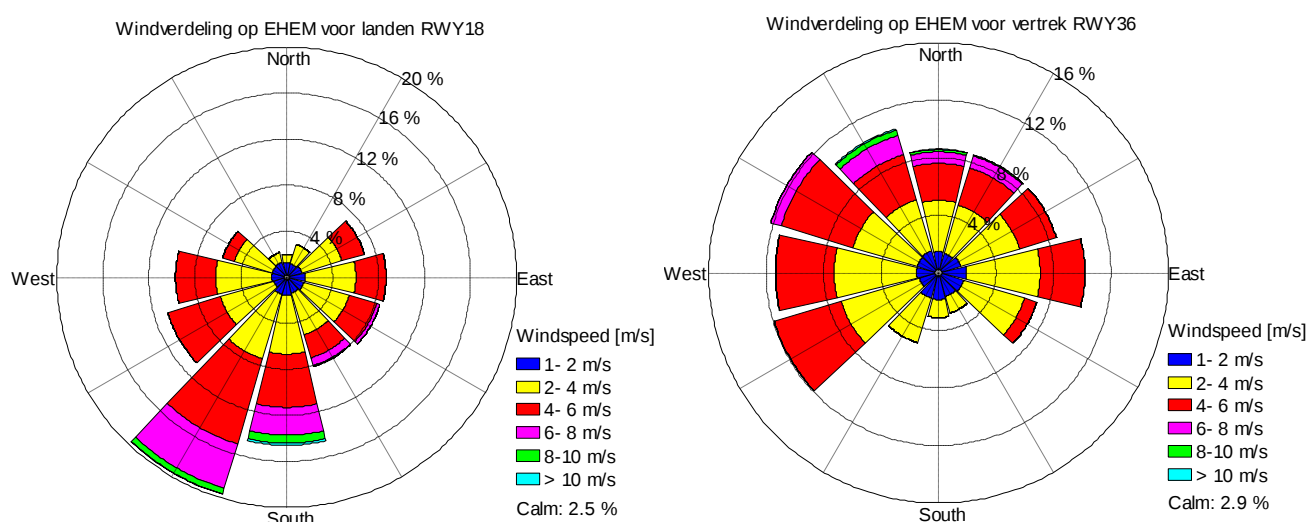
Figuur 3-15: Het verloop van de turbulentie achter de Nordex N131 windturbine.

3.4.2 Frequentie van windverstoring

3.4.2.1 Tipwervels

In paragraaf 3.4.1.2 is de ernst van het passeren van tipwervels beoordeeld. Hierbij komt naar voren dat de mate van ernst afhangt van de windsterkte en de afstand. Daarnaast is de kans dat een vliegtuig wordt blootgesteld aan de hazard afhankelijk van de windrichting. Immers het zog beweegt zich mee met de wind. Bij puur zuidelijke wind zal uiteraard baan 18 gebruikt worden om te landen, maar in dat geval zal het zog van het te volgen traject worden weggeblazen en zal het vliegtuig dus niet worden blootgesteld aan de hazard. Om de kans op blootstelling te bepalen is het dus nodig om de kans op een bepaalde windsterkte gecombineerd met een bepaalde windrichting vast te stellen zodanig dat er feitelijke blootstelling plaatsvindt. Daarnaast moet het vliegtuig op een bepaalde afstand achter de windturbine het zog passeren om aan een bepaald risico te worden blootgesteld (dit is weergegeven in Figuur 3-10). Tenslotte kan de blootstelling alleen plaatsvinden als de windrichting en sterkte zodanig is dat de operaties binnen de limieten van het vliegtuig kunnen plaatsvinden. Voor de huidige studie wordt ervan uitgegaan dat geen operaties zullen plaatsvinden met een dwarswind groter dan 10 knopen. Verder wordt ervan uitgegaan dat een baanrichting niet gebruikt zal worden wanneer de staartwind in die richting groter is dan 5 knopen. Dat betekent dat de windrichting en –sterkte gelimiteerd wordt door de operationele limieten van het vliegtuig. De windverdeling bij het gebruik van de noordelijke route (d.w.z. vertrek baan 36 en landen baan 18 binnen de limieten van het vliegtuig) is weergegeven in Figuur 3-16.

Uitgaande van deze windverdeling kan de blootstelling aan een tipwervel met een bepaalde sterkte worden berekend. Dit is uitgevoerd voor het geval dat het vliegtuig de buitengrens van het spreidingsgebied volgt (zie Figuur 3-4) en wanneer het vliegtuig de nominale route volgt. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-1. Hierbij is tevens het verwachte aantal vliegbewegingen per jaar aangegeven, dat aan het risico wordt blootgesteld, zowel op basis van het maximaal vergunde aantal bewegingen als voor een realistisch aantal bewegingen (op basis van verwacht jaarlijks gebruik).



Figuur 3-16: Operationele windverdeling op EHEM bij gebruik van de noordelijke route

Tabel 3-1: Risico blootstelling EHEM operaties ten gevolge van tipwervels achter een Nordex N131 turbine

Risico blootstelling	Vertrek baan 36			Landen baan 18		
	Percentage [%]	Aantal bewegingen/jaar		Percentage [%]	Aantal bewegingen/jaar	
<i>Nominale route</i>		Maximum	Realistisch		Maximum	Realistisch
Hazardous	0.0	0	0	0.0	0	0
Major	1.7	2	1	2.2	3	1
Minor	12.2	14	6	11.6	15	6
<i>Langs buitengrens</i>						
Hazardous	0.0	0	0	1.4	2	1
Major	7.8	9	4	13.2	18	7
Minor	18.2	21	8	25.0	33	13

Uit deze tabel blijkt dat bij het vliegen van de nominale route blootstelling aan een “hazardous” verstoring niet zal voorkomen. Wel is het mogelijk dat één tot enkele malen per jaar een “major” verstoring voorkomt.

Dit wordt geclassificeerd als “**remote**” (3).

Een “minor” verstoring kan ongeveer eens per maand voorkomen. Dit wordt geclassificeerd als “**occasional**” (4).

Een “hazardous” verstoring kan wel voorkomen wanneer langs de buitengrens van het spreidingsgebied wordt gevlogen. Bij landen op baan 18 zou dit enkele keren per jaar kunnen gebeuren. De kans dat langs de buitengrens wordt gevlogen is echter in de orde van 10^{-3} . De totale kans is dus eens per 500 jaar.

Dit wordt geclassificeerd als “**extremely improbable**” (1).

3.4.2.2 Windhinder

De frequentie van blootstelling aan windhinder ten gevolge van het windturbine zog kan op dezelfde wijze bepaald worden als voor tipwervels, zoals beschreven in de vorige paragraaf. Hierbij wordt uitgegaan van de risicogebieden zoals weergegeven in Figuur 3-14. Verondersteld wordt dat in dit geval het vliegtuig (“worst case”) altijd op ashoogte het turbine zog zal passeren.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3-2.

Tabel 3-2: Risico blootstelling EHEM operaties ten gevolge van windhinder achter een Nordex N131 turbine

Risico blootstelling	Vertrek baan 36			Landen baan 18		
	Percentage [%]	Aantal bewegingen/jaar		Percentage [%]	Aantal bewegingen/jaar	
<i>Nominale route</i>		Maximum	Realistisch		Maximum	Realistisch
Major	0	0	0	0	0	0
Minor	22.6	26	10	24.3	32	13
<i>Langs buitengrens</i>						
Major	0	0	0	0	0	0
Minor	27.4	31	13	34.2	45	18

Uit deze tabel blijkt dat bij het vliegen van de nominale route blootstelling aan een “major” verstoring niet zal voorkomen.

Wel is het mogelijk dat bij één tot (maximaal) enkele vluchten per maand een “minor” verstoring voorkomt. Dit wordt geclassificeerd als “**occasional**” (4).

3.4.2.3 Turbulentie

Zoals in paragraaf 3.4.1.4 is weergegeven wordt de toename van atmosferische turbulentie in alle gevallen als “minor” beoordeeld. De frequentie van blootstelling is gelijk aan blootstelling aan “minor” windhinder zoals aangegeven in Tabel 3-2.

Dit wordt geclassificeerd als “occasional” (4).

3.5 Risicoclassificatie

De classificatie van de risico's die samenhangen met de geïdentificeerde hazards vindt plaats aan de hand van de risico-matrix, zoals gedefinieerd in het ICAO Safety Manual (ICAO Doc 9859), zie Appendix A. De classificatie van de risico's is overeenkomstig de classificatie van de ernst en frequentie van de geïdentificeerde hazards, zoals bepaald in de vorige paragrafen.

Hierin zijn de risico's als volgt aangeduid en geclassificeerd:

- H1 – Risico dat een vliegtuig in botsing komt met een windturbine; risico-index **1A**;
- H2a – Risico dat een vliegtuig aan een geringe (“minor”) verstoring door tipwervels, windhinder of turbulentie van een turbine wordt blootgesteld: risico-index **4D**;
- H2b – Risico dat een vliegtuig aan een significante (“major”) verstoring door tipwervels van een turbine wordt blootgesteld: risico-index **3C**.
- H2c – Risico dat een vliegtuig aan een significante (“hazardous”) verstoring door tipwervels van een turbine wordt blootgesteld: risico-index **1B**.

		Risk severity				
		Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
Risk probability	Frequent 5					
	Occasional 4				H2a	
	Remote 3			H2b		
	Improbable 2					
	Extremely improbable 1	H1	H2c			

Figuur 3-17: Risicomatrix

De kleurcodering van de risicomatrix moet als volgt worden opgevat:

- Rood: Hoog risico. Dit vertegenwoordigt onacceptabel risico.
- Geel: Medium risico. Dit risico is in principe toelaatbaar, maar maatregelen tot verdere mitigatie moeten onderzocht worden. Indien haalbaar en kosteneffectief moeten deze maatregelen worden ingevoerd. Dit kan onderdeel zijn van een managementbeslissing.
- Groen: Laag risico. Dit risico kan zonder verdere maatregelen worden geaccepteerd.

Uit de risicomatrix blijkt dat de risico's ten gevolge van zogturbulentie zich in het gele gebied bevinden, zowel voor "minor" (H2a) als "major" (H2b) blootstelling.

Het botsingsrisico H1 bevindt zich in het gele gebied, om reden van het feit dat risico's met een mogelijk fatale afloop zich nooit in het groene gebied kunnen bevinden, ongeacht de kans op voorkomen. Dit signaleert dat dergelijke risico's altijd gemonitord moeten worden, en dat mitigerende maatregelen, voor zover mogelijk, genomen moeten worden, zonder dat ooit de groene status bereikt zal kunnen worden. Dit is inherent aan de ICAO methodiek. In de volgende paragraaf zal verder ingegaan worden op mogelijke mitigerende maatregelen.

Hier wordt echter benadrukt dat de botsingskans als zeer laag wordt geschat, en dat om die reden het risico aanvaardbaar wordt geacht.

3.6 Mitigerende maatregelen

Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven wordt het risico van windverstoringen van het windpark Pottendijk voor de operaties op EHEM als "medium" risico beoordeeld. Dit vereist een nadere analyse van maatregelen om het risico zoveel als mogelijk en haalbaar te verminderen.

In het kader van verlaging van het risico kan aan de volgende mogelijkheden worden gedacht:

1. Operationele maatregelen (M1);
2. Aanpassen van de route (M2);
3. Verschuiven en/of draaien van de baan (M3);
4. Combinatie van maatregelen (M4).

Deze mogelijkheden worden hierna besproken.

M1. Operationele maatregelen

De vliegstrip EHEM is een privé-vliegstrip, die uitsluitend voor hobbydoeleinden wordt gebruikt. Bij de analyse is er tot nu toe van uitgegaan dat de vliegstrip zonder beperkingen gebruikt kan worden als de wind- en zichtomstandigheden dit toelaten. De analyse laat echter zien dat de windverstoring door de windturbines zich uitsluitend voordoet bij een bepaalde windsterkte en windrichting. Bij de vluchtplanning zou hiermee rekening gehouden kunnen worden, door onder de betreffende omstandigheden geen vluchten uit te voeren.

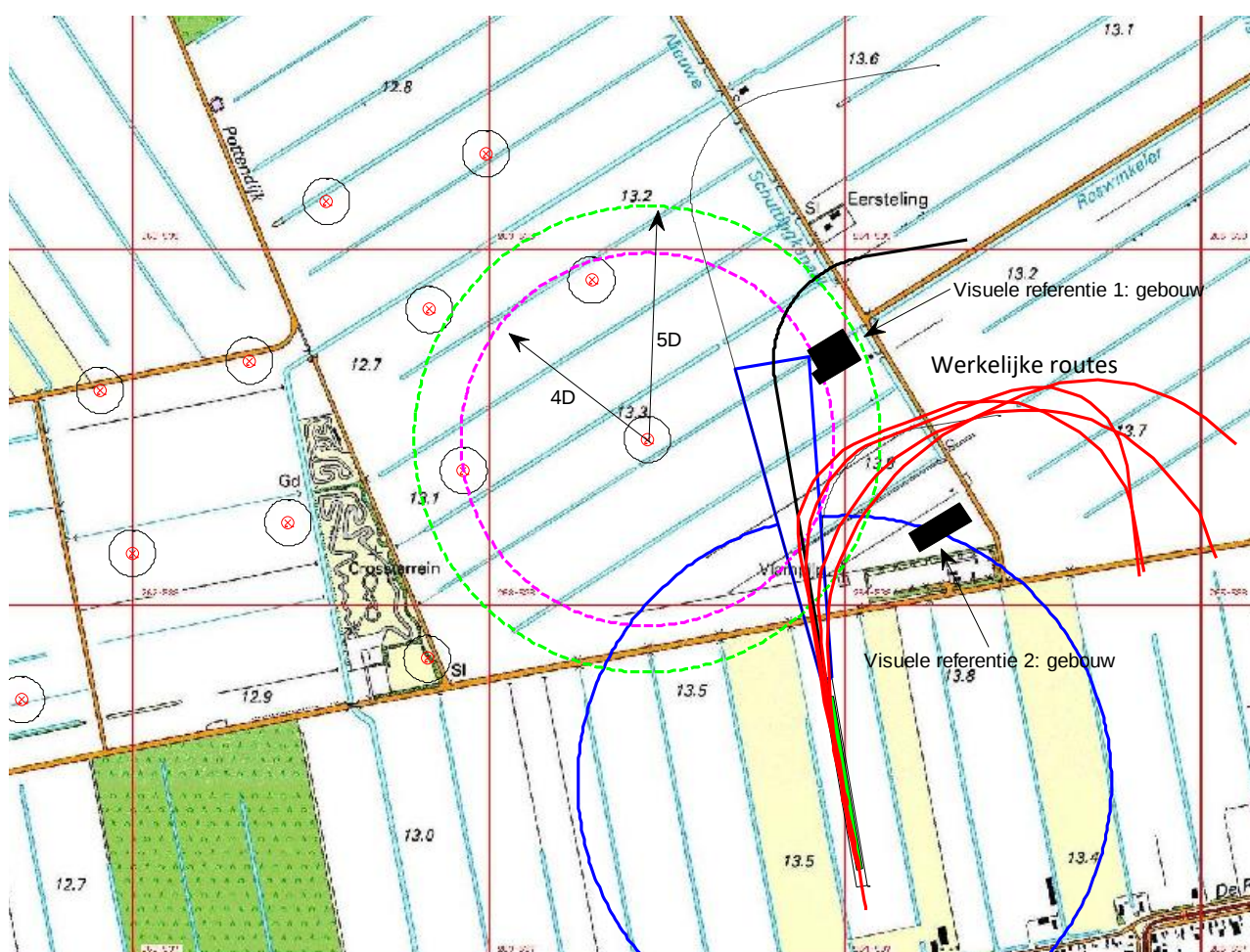
Wanneer geen vluchten via de noordelijke route worden uitgevoerd bij een wind (op grondniveau) groter dan 10 knopen, uit richting tussen 240° en 300°, dan zal mogelijke blootstelling aan een significante verstoring door de windturbines voorkomen worden. Hierdoor neemt de risico-index (H2a en H2b) af naar **2E**.

Daarmee wordt zou het risico voldoende beheerst kunnen worden.

M2. Aanpassen van de route

Bij de analyse is ervan uitgegaan dat bij het vliegen van de noordelijke route het nominale traject of de buitenkant van het spreidingsgebied wordt gevolgd, zie Figuur 3-4. Hierin is ook een voorbeeld gegeven van een werkelijke nadering. Hieruit blijkt dat deze route ongeveer langs de binnengrens van het spreidingsgebied gaat.

Door de exploitant zijn aanvullend nog een aantal werkelijk gevlogen routes verschaft waarmee een indruk kan worden verkregen van de spreiding van feitelijk gevlogen routes. Dit is weergegeven in Figuur 3-18. Verder is door de exploitant aangegeven dat twee gebouwen als visuele referentie worden gebruikt voor het nauwkeurig vliegen van de vertrek- en naderingstrajecten. Deze visuele referenties zijn eveneens in de figuur aangegeven. Hieruit blijkt dat de routes ongeveer midden tussen de twee referenties lopen. In de praktijk wordt dus niet de nominale route gevolgd, maar een kortere route. Door de goede visuele referenties worden de routes met een kleine laterale spreiding gevlogen. Een punt van aandacht is hierbij wel of incidentele gastvlieger de routes op dezelfde manier (binnen dezelfde spreiding) kunnen vliegen. Gastvliegers mogen alleen na toestemming van de exploitant van de vliegstrip gebruik maken. De exploitant heeft aangegeven dat hij gastvliegers altijd goed zal briefen over de te vliegen routes. Er mag dan ook van uitgegaan worden dat ook gastvliegers zich aan de verkorte route zullen houden en in staat zullen zijn om deze met voldoende nauwkeurigheid te vliegen.



Figuur 3-18: Werkelijk gevlogen routes.

Door het korter indraaien wordt de afstand tot de windturbines groter en zal de mogelijke verstoring mindere heftig zijn. Uit de voorbeeld-routes blijkt dat de minimale afstand tot de windturbines tussen 3,8 en 5 diameters van de meest nabije windturbine bedraagt. Indien deze verkorte routes altijd gevlogen worden is er geen kans meer op een

significante ('major') verstoring en kan hooguit nog enige 'minor' verstoring voelbaar zijn. Ook wordt de sector van windrichtingen, waarin de verstoring zou kunnen plaatsvinden kleiner. Bij korter indraaien kan een verstoring zich nog alleen voordoen bij windrichting uit de sector $270^\circ - 320^\circ$. Hierdoor neemt dus ook de kans op een verstoring af van één tot enkele vluchten per maand naar ruimschoots minder dan eens per maand. De frequentie wordt hiermee geclassificeerd als "remote".

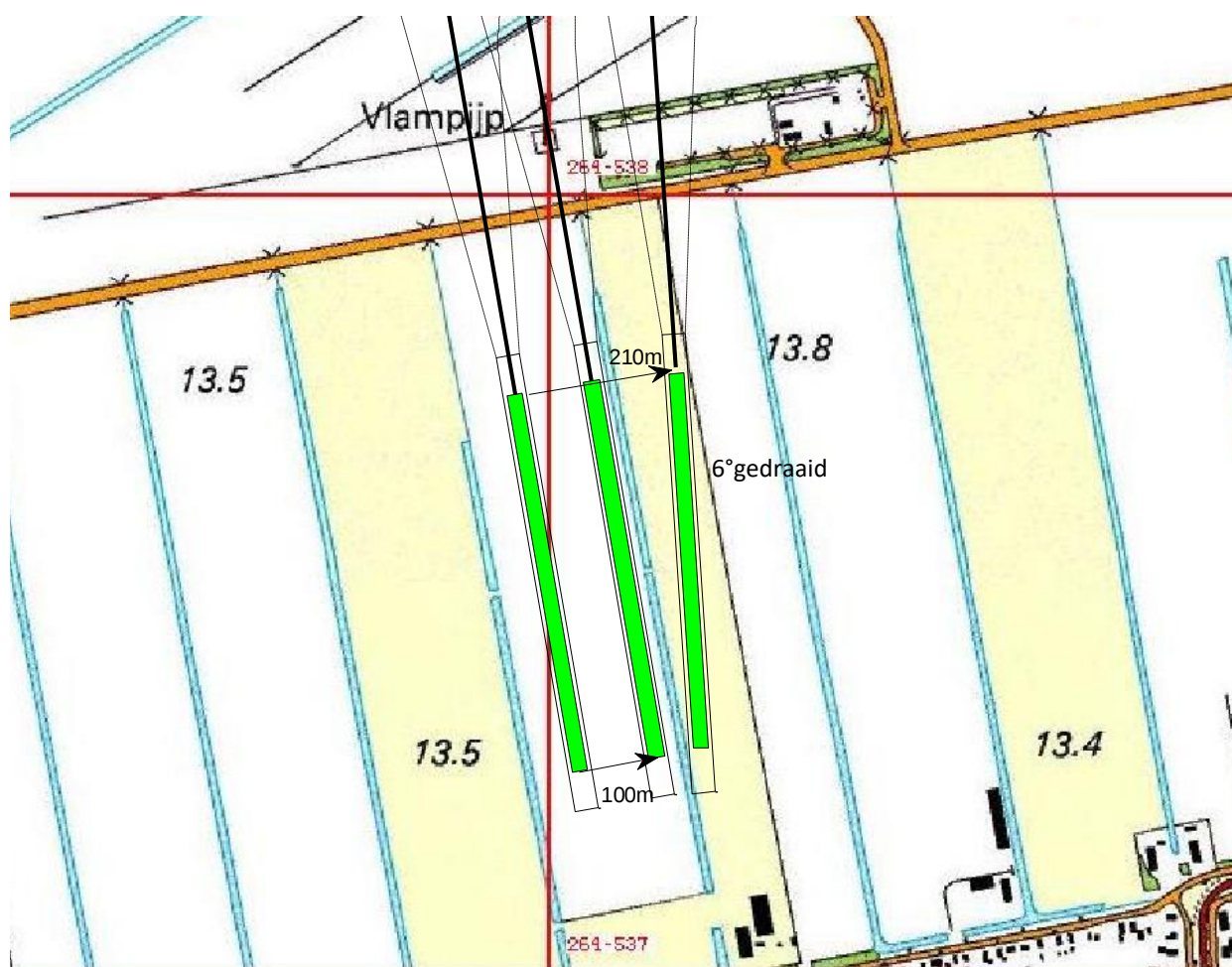
Het korter indraaien lijkt door de specifieke eigenschappen (lage snelheid) van een MLA in principe geen probleem. De risico-index (H2a en H2b) neemt daardoor af naar **3D**. Daarmee is het risico echter nog niet zonder meer acceptabel (in het gele gebied).

M3. Verschuiven en/of verdraaien van de baan

De afstand van de vliegroutes tot de windturbines kunnen ook vergroot worden door de baan te verschuiven en/of te draaien. Hierbij zijn twee varianten onderzocht:

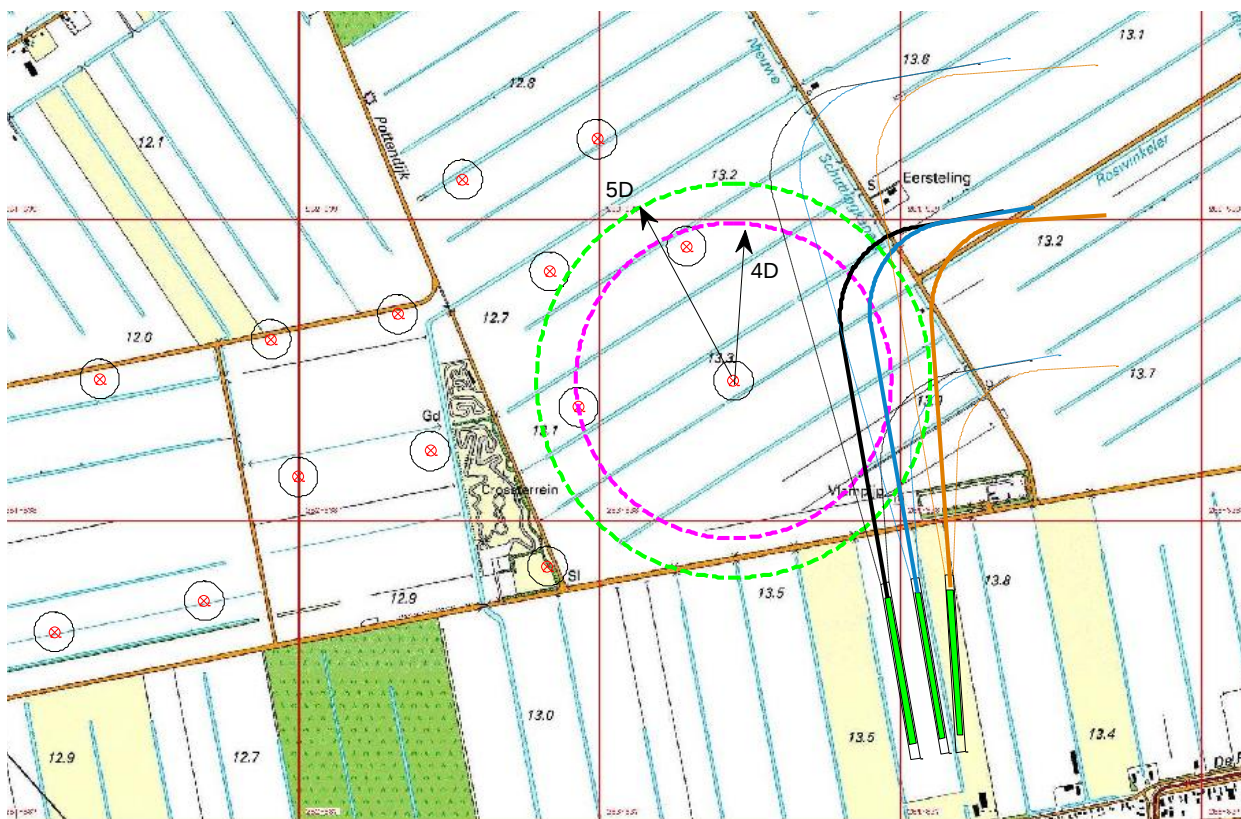
- Verschoven baan (M3a): hierbij wordt de baan parallel verschoven over 100 meter in oostelijke richting;
- Gedraaide baan (M3b): hierbij wordt de baan gedraaid over 6° en tevens in oostelijke richting verschoven. De drempel van baan 18 wordt daarbij over ongeveer 210 meter in oostelijke richting verschoven.

Deze twee opties zijn in weergegeven in Figuur 3-19.



Figuur 3-19: Ligging van de verschoven en gedraaide baan.

Door het verplaatsen van de baan worden ook de vertrek- en aanliegroutes mee verplaatst. Dit is weergegeven in Figuur 3-20. Hieruit blijkt dat door het verschuiven van de baan de nominale route nog marginaal binnen een afstand van vier diameters van de windturbine komt. Hierdoor mag verwacht worden dat interferentie met tipwervels nauwelijks nog een risico vormt. De nominale route blijft nog wel significant binnen vijf diameters van de windturbine. Daarom is nog wel blootstelling aan 'minor' windhinder en turbulentie mogelijk. De kans op blootstelling neemt echter wel af, tot ruimschoots minder dan eens per maand. In deze situatie wordt de kans als 'remote' gekwalificeerd. Hierdoor neemt de (H2a en H2b) risico-index (M3a) af naar **3D**. Hiermee is het risico echter nog niet zonder meer acceptabel (in het gele gebied).



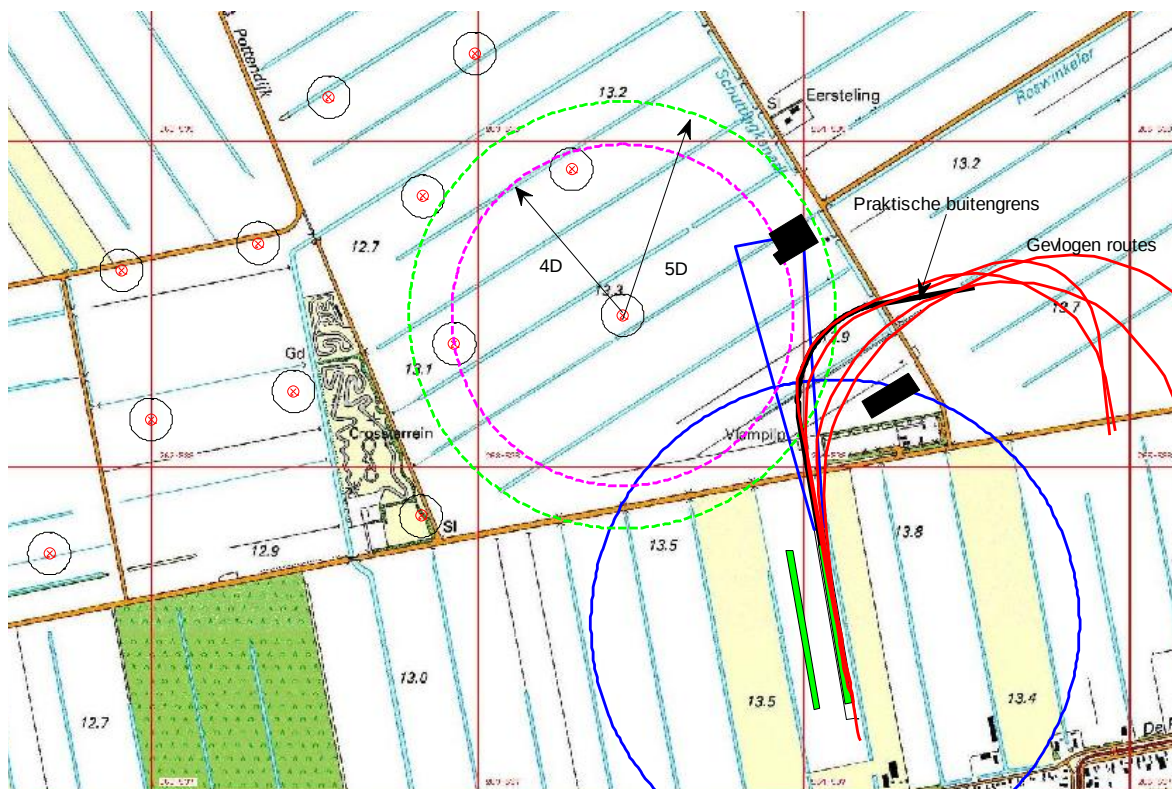
Figuur 3-20: Interferentie met het invloedsgebied van de windturbine met de route bij een verschoven baan (lichtblauwe lijn) en bij een gedraaide baan (oranje lijn).

Door het verschuiven en verdraaien van de baan komt de nominale route volledig buiten vijf diameters van de windturbine (WT14) te liggen. Dit betekent dat interferentie verwaarloosbaar ('negligible') mag worden geacht. Hierdoor neemt de (H2a en H2b) risico-index (M3b) af naar **3E**. Hiermee wordt het risico zonder meer aanvaardbaar.

M4. Combinatie van baan verschuiven (M3a) en kort indraaien (M2)

Hoewel het draaien van de baan (M3b) een aanvaardbaar niveau van risico oplevert, kan deze oplossing mogelijk op praktische bezwaren kan stuiten. Om deze reden kan ook overwogen worden twee mitigerende maatregelen te combineren om een gelijkwaardige vermindering van het risico te realiseren. Hierbij wordt gedacht aan het verschuiven van de baan (M3a) en tegelijkertijd alleen nog verkort in te draaien (M2). Afzonderlijk reduceren deze mitigerende maatregelen de risico-index naar **3D**. Hiermee leidt dit in beide gevallen niet tot een zonder meer acceptabele veiligheidssituatie. Door beide maatregelen in combinatie uit te voeren wordt het risico reducerend effect versterkt. Deze situatie wordt geschetst in Figuur 3-21. Hierbij zijn de gevlogen routes (zoals door de exploitant vastgelegd) mee verschoven met de baan. Bij het verschuiven van de baan, kunnen de eerder genoemde visuele referenties nog steeds gebruikt worden als referentiepunten voor het indraaien bij de nadering of het uitdraaien na

vertrek. Er mag dan ook verwacht worden dat de spreiding in de banen niet zal veranderen door het verschuiven van de baan. Uit de figuur blijkt dat de routes meer dan 4 diameters verwijderd blijven van de meest nabij gelegen windturbine. Hiermee wordt het risico van tipwervels verwaarloosbaar ("negligible"). Verder laat de figuur zien dat een aantal van de gevlogen routes verder verwijderd zijn dan 5 diameters van de meest nabij gelegen windturbine. Ook in die gevallen wordt het risico verwaarloosbaar. Echter ook een gedeelte van de gevlogen routes bevindt zich nog binnen 5 diameters afstand. Deze kunnen dus nog blootgesteld worden aan een "minor" verstoring, wanneer het zog van de windturbine ongeveer op ashoogte wordt gepasseerd. In de figuur is op basis van de beschikbare gegevens een praktische buitengrens aangegeven van de spreiding in de vliegroutes.



Figuur 3-21: Combinatie van baan verschuiven en kort indraaien.

Wanneer een vliegtuig deze praktische buitengrens van het verkorte circuit zou volgen kan blootstelling aan het "minor" effect ten gevolge van windhinder nog plaatsvinden wanneer de windrichting zich in de sector 280°-300° bevindt.

Op dezelfde manier als in paragraaf 3.4.1.3 kan de feitelijke blootstelling worden bepaald op basis van het windklimaat en het maximaal aantal toegestane en realistisch te verwachten bewegingen. Het resultaat is weergegeven in Tabel 3-3. Hieruit blijkt dat jaarlijks nog ongeveer 1 vlucht blootgesteld zou kunnen worden aan een "minor" effect in het realistische scenario. Bij het maximum toegestane bewegingen zou dit toe kunnen nemen tot 2 á 3 vluchten per jaar.

Tabel 3-3: Risico blootstelling EHEM bij verschoven baan en verkort circuit

Risico blootstelling	Vertrek baan 36			Landen baan 18		
	Percentage [%]	Aantal bewegingen/jaar Maximum	Realistisch	Percentage [%]	Aantal bewegingen/jaar Maximum	Realistisch
Langs praktische buitengrens						
Major	0	0	0	0	0	0
Minor	3.1	3	1	1.8	2	1

Omdat niet alle bewegingen langs de praktische buitengrens zullen verlopen, maar voor een belangrijk deel ruim daar binnen (zie Figuur 3-21), zal de blootstelling in de praktijk nog lager zijn. Geschat wordt dat hierdoor de feitelijke blootstelling dan ook ruim minder zal zijn dan eens per jaar.

In termen van frequentie wordt dit geclassificeerd als “improbable” (2). Dit leidt in dit geval tot een risico-index **2D**.

Effectiviteit van de mitigerende maatregelen

De effectiviteit van de mitigerende maatregelen wordt samengevat in de onderstaande tabel.

Tabel 3-4: Overzicht effectiviteit mitigerende maatregelen.

Mitigerende maatregel	Effect op hazard H2a (“minor” verstoring)	Effect op hazard H2b (“major” verstoring)
M1. Operationele maatregel	4D ⇒ 2E	3C ⇒ 2E
M2. Aanpassen route	4D ⇒ 3D	3C ⇒ 3D
M3a. Baan verschuiven	4D ⇒ 3D	3C ⇒ 3D
M3b. Baan draaien	4D ⇒ 3E	3C ⇒ 3E
M4. Verkorte route en baan verschuiven	4D ⇒ 2D	3C ⇒ 2D

Het effect van de mitigerende maatregelen wordt geïllustreerd met onderstaande risico-matrix.

		Risk severity				
		Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
Risk probability	Frequent 5					
	Occasional 4				H2a	Gedraaide baan
	Remote 3		Verschoven baan of verkorte route	H2b	H2a/b	H2a/b
	Improbable 2		Verschoven baan en verkorte route		H2a/b	H2a/b
	Extremely improbable 1	H1	H2c		Operationele maatregel	

Figuur 3-22: Risico-matrix met effect van mitigerende maatregelen: in oranje; effect van M1 (operationele maatregel), in zwart; effect van M2/M3a (verschuiven baan of verkorte route), in blauw; effect M3b (gedraaide baan), in paars; effect M4 (verschoven baan en verkorte route).

Hieruit blijkt dat er drie maatregelen zijn die het risico zonder meer aanvaardbaar maken:

- M1: het invoeren van de operationele maatregel (niet vliegen bij bepaalde windrichtingen en –sterkte);
- M3b: het verschuiven en draaien van de baan;
- M4: een combinatie van het verschuiven van de baan en het standaard korter indraaien.

Deze maatregelen brengen het risico in het groene gebied.

De meest krachtige mitigatie is de operationele maatregel (M1), omdat het risico daarmee vrijwel wordt weggenomen. Uiteraard is het mogelijk, dat tijdens een vlucht de windsterkte en –richting onverwachts verandert. In dat geval blijft er een kans op blootstelling aan enige (“minor”) windhinder bestaan. Dit wordt gezien als een aanvaardbaar rest-risico. Het nadeel van deze mitigatie is echter dat de exploitant wordt geconfronteerd met een operationele beperking, waar vóór de realisatie van het windpark geen sprake van was.

Het verschuiven en draaien van de baan (M3b) geeft een gewenste vermindering van het risico. De haalbaarheid en wenselijkheid van deze optie zou echter nader onderzocht moeten worden, omdat een gedraaide baan op het betreffende perceel nadelig zou kunnen uitwerken voor het onderhouden en bewerken van dit perceel, en de agrarische opbrengst daarvan.

Vanuit haalbaarheid en operationele gevolgen lijkt mitigatie M4 de meest gunstige oplossing. Het parallel verschuiven van de baan binnen het bestaande perceel zal geen grote gevolgen hebben voor het onderhoud en bewerking van het perceel. Daarnaast lijkt het kort indraaien reeds de gangbare praktijk. In de beoordeling van de effectiviteit van deze oplossing is echter gebruik gemaakt van een beperkte set aan vluchtgegevens. Het is niet met zekerheid te zeggen dat deze vluchtgegevens volledig representatief zijn voor de gevlogen routes. Het zou kunnen zijn dat bij kort indraaien er soms een grotere afwijking ontstaat dan hier als praktische buitengrens is gepresenteerd. Bij de kritische windrichting en –sterkte zou daardoor toch enige blootstelling aan “minor” windhinder kunnen ontstaan.

Gezien de goede visuele grondreferenties waarop genavigeerd wordt, lijkt de kans op significante afwijkingen echter klein, en blijft een eventueel rest-risico dus zeer beperkt.

Hiermee lijkt maatregel M4 het meest aanbevelenswaardig.

4 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is een analyse verricht met betrekking tot de risico's die het realiseren van het windpark Pottendijk kan hebben voor het vliegverkeer van en naar de vliegstrip EHEM bij Emmer-Compasuum.

Hierbij is vooral aandacht besteed aan het botsingsrisico en het risico van het doorkruisen van het zog van de windturbines bij vertrek van baan 36 of landen op baan 18.

Hieruit komt naar voren dat het botsingsrisico extreem laag is en als aanvaardbaar wordt beoordeeld.

Met betrekking tot windturbinezog spelen drie fenomenen een rol, te weten tipwervels, windhinder en turbulentie. De effecten hiervan zijn zoveel mogelijk kwantitatief in kaart gebracht, rekening houdend met een representatief windklimaat op EHEM.

De tipwervels die door de windturbines gegenereerd kunnen worden blijken het grootste risico voor het vliegverkeer op te leveren. Het leidt echter niet tot een onacceptabel risico. Wel kan het leiden tot een significante ('major') verstoring voor een MLA die op tiphoogte het zog doorkruist. De kans op blootstelling is niet zeer klein ('remote') en daarmee wordt het risico als "medium" gekwalificeerd en is daarom niet zonder meer acceptabel.

Ook bestaat er een risico van verstoring door windhinder, wanneer het vliegtuig op ashoogte achter de windturbine passeert. Dit kan leiden tot een 'minor' verstoring, maar wel met een redelijke kans van optreden. Ook dit risico zit in het "medium" risicogebied.

Om de risico's te verlagen zijn een aantal mitigerende maatregelen voorgesteld. Deze maatregelen betreffen: het nemen van operationele maatregelen (niet vliegen bij bepaalde windsterkte en -richting), korter indraaien, en verschuiven en/of draaien van de baan of een combinatie daarvan.

Aanbevolen wordt om maatregelen te overwegen die het risico zoveel terugbrengen tot een acceptabel niveau (het groene gebied). Maatregelen die dit bewerkstelligen zijn de volgende:

1. Operationele maatregel: niet vliegen bij windsnelheid van 10 knopen of meer bij windrichting tussen 240° en 300°;
2. Draaien en verschuiven van de baan: 6° draaien en baandrempel 18 verschuiven over 210 meter oost;
3. Verschuiven van de baan en het vliegen van een verkort circuit: de baan parallel verschuiven over 100 meter oost en tegelijkertijd zo kort mogelijk indraaien bij de nadering naar baan 18 en zo snel mogelijk wegdraaien na vertrek van baan 36.

Vanuit het oogpunt van haalbaarheid en operationele gevolgen heeft de laatst genoemde maatregel de voorkeur, omdat het niet tot operationele beperkingen leidt voor de exploitant (zoals wel uit maatregel 1 zou voortvloeien) en de verschoven baan waarschijnlijk redelijk eenvoudig op het bestaande perceel gerealiseerd kan worden.

5 Referenties

1. Luchtvaartverordening Drenthe, decentrale.regelgeving.overheid.nl
2. ICAO Annex 14, Aerodromes, Vol I, Aerodrome Design and Operations, 7th Edition, July 2016
3. Regeling veilig gebruik luchthavens en andere terreinen, wetten.overheid.nl, geldend van 21-10-2017 t/m heden
4. ICAO Annex 19, Safety Management, Second Edition, 2016
5. Safety Management Manual (SMM), ICAO Doc 9859, Third Edition, 2013
6. Procedures for Air Navigation Services – Aerodromes, ICAO Doc 9981, First Edition, 2015
7. FAA Order 5200.11 FAA Airports (ARP) Safety Management System (SMS) (includes Changes 1, 2, and 3)
8. ICAO Doc 9137, Airport Services Manual, Part 6, Control of Obstacles, Second Edition, 1983
9. A.M.H. Nieuwpoort, e.a, Wind criteria due to obstacles at and around airports, NLR-TP-2010-312, July 2010
10. CAP 764, CAA Policy and Guidelines on Wind Turbines, 2016
11. CAA Information Notice IN-2015/038, Wind Turbine Wake Encounter Study, May 2015
12. P.J. van der Geest, NLR, Universal Atmospheric Hazard Criteria, UFO Safety Case - Part 1, NLR-CR-2016-557, 2016
13. Gunner C. Larsen, Helge Aagaard Madsen, and Niels N. Sørensen. Mean wake deficit in the near field. In European Wind Energy Conference and exhibition 2003, Madrid, Spain, 2003
14. D. Renkema. DUT, Validation of wind turbine wake models Using wind farm data and wind tunnel measurements, June 2007
15. REGULATION (EC) No 216/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 February 2008 on common rules in the field of civil aviation and establishing a European Aviation Safety Agency, and repealing Council Directive 91/670/EEC, Regulation (EC) No 1592/2002 and Directive 2004/36/EC
16. ICAO Annex 2, Rules of the Air, Tenth Edition, July 2005
17. B.G. van der Wall, DLR, Impact of wind energy rotor wakes on fixed-wing aircraft and helicopters, DLR
18. Y. Wang, University of Liverpool, Wind Turbine Wake Encounter Study, March 2015.
19. Burnham, D. C. and Hallock, J. N., "Wake Vortex Separation Standards: Analysis Methods," DOT/FAA/ND-97-4, May 1997, DOT Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA.
20. Luckner, R., Höhne, G., and Fuhrmann, M., "Hazard Criteria for Wake Vortex Encounters during Approach", Aerospace Science and Technology, Vol. 8, No. 8 (673–687), 2004, DOI: 10.1016/j.ast.2004.06.008

Appendix A Risicoclassificatietabellen

ICAO Risico-matrix (Doc 9859)

Risk probability	Risk severity				
	Catastrophic A	Hazardous B	Major C	Minor D	Negligible E
	Frequent 5				
	Occasional 4				
	Remote 3				
	Improbable 2				
	Extremely improbable 1				

Risico acceptatie (ICAO Doc 9859)

Tolerability description	Assessed risk index	Suggested criteria
Intolerable region	5A, 5B, 5C, 4A, 4B, 3A	Unacceptable under the existing circumstances
Tolerable region	5D, 5E, 4C, 4D, 4E, 3B, 3C, 3D, 2A, 2B, 2C, 1A	Acceptable based on risk mitigation. It may require management decision.
Acceptable region	3E, 2D, 2E, 1B, 1C, 1D, 1E	Acceptable

ICAO Safety risk severity table.

Severity	Meaning	Value
Catastrophic	— Equipment destroyed — Multiple deaths	A
Hazardous	— A large reduction in safety margins, physical distress or a workload such that the operators cannot be relied upon to perform their tasks accurately or completely — Serious injury — Major equipment damage	B
Major	— A significant reduction in safety margins, a reduction in the ability of the operators to cope with adverse operating conditions as a result of an increase in workload or as a result of conditions impairing their efficiency — Serious incident — Injury to persons	C
Minor	— Nuisance — Operating limitations — Use of emergency procedures — Minor incident	D
Negligible	— Few consequences	E

ICAO Safety risk probability table.

Probability	Meaning	Value
Frequent	Likely to occur many times (has occurred frequently)	5
Occasional	Likely to occur sometimes (has occurred infrequently)	4
Remote	Unlikely to occur, but possible (has occurred rarely)	3
Improbable	Very unlikely to occur (not known to have occurred)	2
Extremely improbable	Almost inconceivable that the event will occur	1

Mapping of risk ICAO probability and severity tables to FAA definitions

FAA Safety risk severity table.

Severity	FAA definition for airport operations	Value
Catastrophic	-Complete loss of aircraft and/or facilities or fatal injury in passenger(s)/worker(s); or -Complete unplanned airport closure and destruction of critical facilities; or -Airport facilities and equipment destroyed	A
Hazardous	-Severe damage to aircraft and/or serious injury to passenger(s)/worker(s); or -Complete unplanned airport closure, or -Major unplanned operations limitations (i.e.. runway closure), or -Major airport damage to equipment and facilities	B
Major	-Major damage to aircraft and/or minor injury to passenger(s)/worker(s), or -Major unplanned disruption to airport operations, or -Serious incident, or -Deduction on the airport's ability to deal with adverse conditions	C
Minor	-Minimal damage to aircraft, or -Minor injury to passengers, or -Minimal unplanned airport operations limitations (i.e. taxiway closure), or -Minor incident involving the use of airport emergency Procedures	D
Negligible	No damage to aircraft but minimal injury or discomfort of little consequence to passenger(s) or workers.	E

FAA Safety risk probability table.

Probability	FAA definition for airport operations	Value
Frequent	Expected to occur more than once per week or every 2500 departures/landings, whichever occurs sooner	5
Occasional	Expected to occur about once every month or 250,000 departures/landings, whichever occurs sooner	4
Remote	Expected to occur about once every year or 2.5 million departures/landings, whichever occurs sooner	3
Improbable	Expected to occur once every 10-100 years or 25 million departures/landings, whichever occurs sooner	2
Extremely improbable	Expected to occur less than every 100 years	1

Appendix B Wiskundige modellering

Berekening van de windsnelheid in een tipwervel (Burnham-Hallock model) [19]:

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{r}{r_c^2 + r^2}$$

Waarin:

- v : tangentiële geïnduceerde snelheid (m/s)
- r : afstand tot het centrum van de wervel (m)
- r_c : core diameter van de wervel (m)
- Γ : wervelsterkte (m^2/s)

In de huidige studie is de core diameter bepaald als 5% van de koorde van rotorblad op 93% spanwijdte

Berekening van de initiële wervelsterkte [17]:

$$\Gamma_0 = \frac{\pi}{N_b} \frac{V_w^2}{\Omega_{WT}} C_t$$

Waarin:

- N_b : aantal bladen van de turbine
- V_w : snelheid van de niet verstoorde stroming (m/s)
- Ω_{WT} : toerental (rad/s)
- C_t : trekkrachtscoëfficiënt van de turbine

Berekening van de demping van de wervelsterkte als functie van de tijd [18]:

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0}(t) = e^{-Ct(\varepsilon\Gamma_0)^{1/4}/(.956b_0\pi^{1/4})}$$

Waarin:

- Γ_0 : initiële wervelsterkte
- b_0 : effectieve vortex spanwijdte
- t : tijd (s)
- C : Constante (0.45)

Berekening van de groei van de wervel core diameter als functie van de afstand achter de turbine [18]:

$$r_c = r_{c_0} \sqrt{1 + \frac{4\alpha\delta v\psi_w}{r_{c_0}^2 \Omega_{WT}}}$$

Waarin:

ψ_w : afgelegde weg van de tip (rad)

r_{c_0} : initiële core diameter (m)

δ : effectieve turbulentie viscositeit coëfficiënt

α : Constante (1.25643)

