



1.2 Aanpak per faalttype

Bladworp

De trefkans van objecten door afgeworpen rotorbladen wordt bepaald met behulp van een door NRG ontwikkelde Excel-tool. De tool maakt gebruik van een kogelbaanmodel, waarbij voor een groot aantal werphoeken de werpafstand wordt bepaald waar het zwaartepunt van het afgeworpen blad de grond raakt. Dit wordt vervolgens voor een groot aantal oriëntaties van (het draaivlak van) de windturbine gedaan, waarmee X-/Y-coördinaten van de trefpunten van het zwaartepunt van het blad verkregen worden. De relatieve kans op een bepaalde oriëntatie van de windturbine hangt af van de windverdeling op de betreffende locatie. In dit geval is een uniforme windverdeling gehanteerd. De berekeningen leiden tot een groot aantal trefcoördinaten van zwaartepunten van afgeworpen bladen in een raster.

Vervolgens wordt in de tool voor elke trefcoördinaat het gehele blad ingetekend rondom het zwaartepunt, en wordt voor het te onderzoeken object (ook gedefinieerd door middel van X-/Y-coördinaten, en eventueel met inachtneming van de hoogte ervan) bepaald of het object door het blad wordt geraakt. Dit wordt vervolgens voor een groot aantal oriëntaties van het blad gedaan, waarbij het blad telkens in een andere hoek rondom het trefcoördinaat van het zwaartepunt wordt geroteerd. De berekeningen leiden zodoende tot een fractie (%) van het totale aantal worpen dat leidt tot treffen van het object. Deze fractie wordt ten slotte vermenigvuldigd met de bladworfrequentie om de treffrequentie van het object te verkrijgen.

Conform het HRW [2] worden voor bladworp twee situaties beschouwd:

- *Bladworp nominaal*
Hierbij wordt gerekend met het nominale toerental van de windturbine. De bijbehorende faalfrequentie is $8.4E-4$ per jaar [2].
- *Bladworp overtoeren*
Hierbij wordt gerekend met tweemaal het nominale toerental van de windturbine. De bijbehorende faalfrequentie is $5.0E-6$ per jaar [2].

Mastbreuk

De trefkans van objecten ten gevolge van mastbreuk wordt bepaald met behulp van een door NRG ontwikkelde Excel-tool. In de tool wordt (conform het HRW [2]) uitgegaan van een uniforme verdeling voor de richting waarin een windturbine valt. Voor een groot aantal valhoeken wordt daarbij telkens de windturbine (mast, gondel en rotor) ingetekend zoals deze neerkomt op de grond, en wordt voor het te onderzoeken object (ook gedefinieerd door middel van X-/Y-coördinaten) bepaald of het object door een van de windturbine-onderdelen wordt geraakt. Specifiek voor treffen door de rotor worden bij elke valhoek tevens een groot aantal mogelijk standen van de rotorbladen beschouwd. De berekeningen leiden zodoende tot een fractie (%) van het totale aantal mogelijke situaties dat leidt tot treffen van het object. Deze fractie wordt ten slotte vermenigvuldigd met de faalfrequentie voor mastbreuk om een treffrequentie van het object te verkrijgen. De faalfrequentie voor mastbreuk is $1.3E-4$ per jaar [2].

Rotor-/gondelval

Voor rotor-/gondelval wordt dezelfde methodiek gehanteerd als voor mastbreuk, waarbij de masthoogte conform het HRW [2] gelijk aan nul wordt verondersteld. De faalfrequentie voor rotor-/gondelval is $4.0E-5$ per jaar [2].

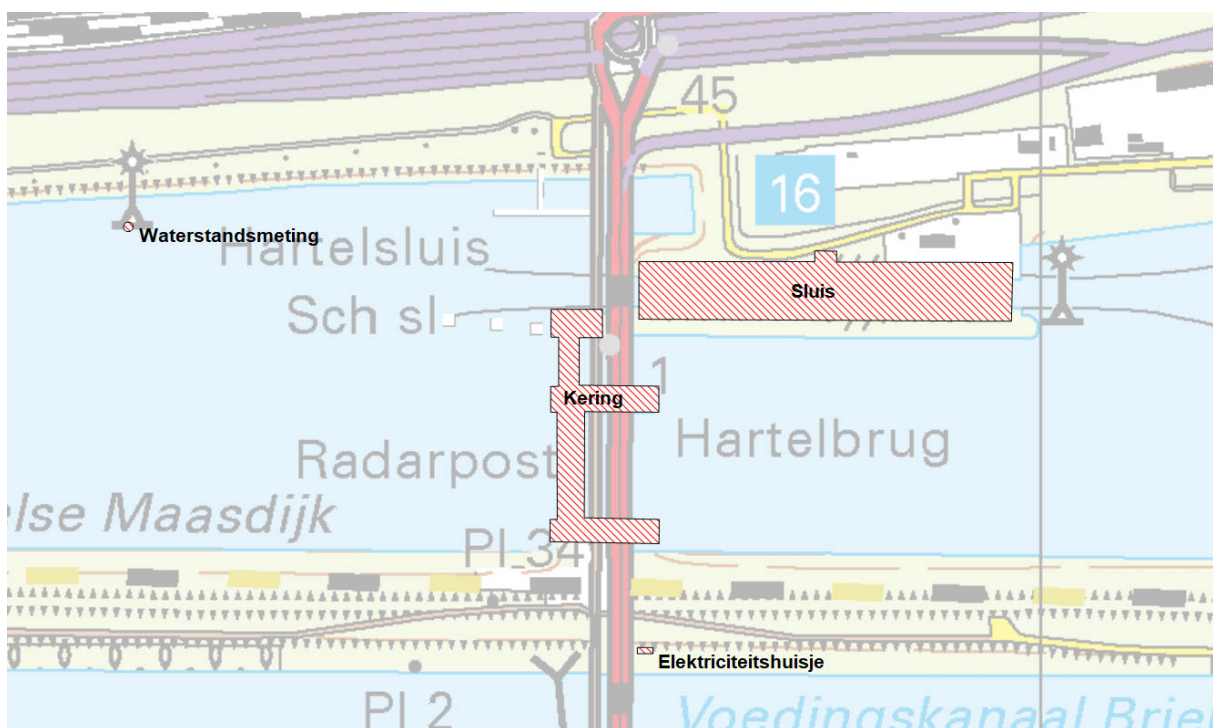
2 Resultaten

Onderstaande toelichting betreft een toelichting op de eerder aangeleverde trefkansresultaten [1] voor geplande windturbines nabij de Hartelkering.

2.1 Beschouwde onderdelen van de Hartelkering

De volgende onderdelen van de Hartelkering zijn beschouwd (zie Figuur 1):

- De kering
- Sluis inclusief bedieningshuis
- Elektriciteitshuisje
- Waterstandsmeting



Figuur 1. Beschouwde onderdelen van de Hartelkering.



2.2 Toelichting resultatenbestanden

De Excel-bestanden met de resultaten [1] bevatten:

- per windturbine een tabblad met resultaten
- een tabblad waarin deze in een grafiek zijn verwerkt
- een tabblad met RD-coördinaten van de 75 berekende windturbineposities

Onderstaand een toelichting van de informatie in kolommen A t/m J van de eerstgenoemde tabbladen:

- A) De codering van de windturbine (WTHK1 t/m WTHK75, zie voor bijbehorende coördinaten het tabblad 'posities').
- B) Het beschouwde windturbintype.
- C) Het beschouwde object (hier: alle onderdelen van de Hartelkering).
- D) Het beschouwde faalttype van de windturbine. (Voor mastbreuk en rotor-/gondelval worden in de Excel-tool standaard ook trefkansen van afzonderlijke onderdelen van de windturbine doorgerekend, hier wordt voor die faaltypen echter direct gerekend met de resultaten 'totaal'.)
- E) Informatie over:
 - Raakhoeken, oftewel valhoeken waarbij de windturbine het object raakt (enkel voor mastbreuk en rotor-/gondelval), met valrichting: 0/360=noord, 90=oost, 180=zuid, 270=west.
 - Objecthoogtes: objecthoogtes zijn nu niet beschouwd, behalve als check voor het effect op de resultaten voor windturbintype MAX A (zie tabblad 'MAX A (h)') (enkel voor bladworp).
- F) Diverse analyseparameters waarmee in de Excel-tool is gerekend.
- G) Percentage treffers object van totaal.
- H) Treffrequentie van het object per jaar (=percentage treffers vermenigvuldigd met de faalfrequentie per jaar voor het betreffende faalttype).
- I) Tijdstempel analyse.
- J) Duur analyse in seconden.

Referenties

[1] E-mail met bijlagen van [REDACTED] "excelsheets met resultaten en toelichting", 13 januari 2021.

[2] Rijkswaterstaat Water, Verkeer & Leefomgeving, Handreiking Risicozonering Windturbines (HRW 2020), 20 mei 2020 (specifiek: Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV – Windturbines)).



Bijlage A Voorbeeld-uitwerking voor één windturbinepositie

In deze bijlage wordt een nadere uitwerking gegeven voor één van de windturbine-posities die is doorgerekend in de aangeleverde resultaten [1].

Inputgegevens

De uitwerking betreft de volgende situatie:

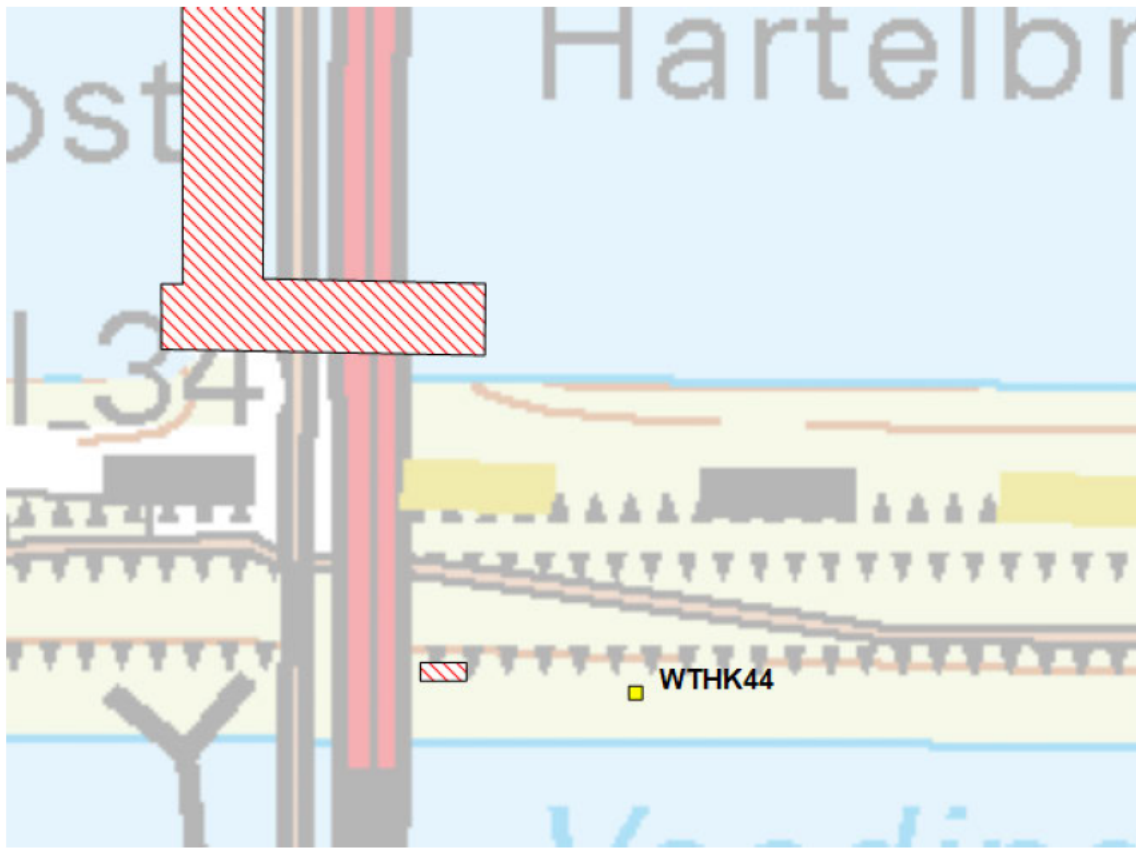
- windturbinepositie WTHK44 (RD-coördinaten: $x=80710,0$ $y=431139,7$)
- windturbinetype L136.

Tabel 1 toont de gehanteerde inputgegevens voor dit windturbinetype.

Tabel 1. Inputgegevens L136

Parameter	Waarde	Eenheid
Diameter mast (onder)	11	m
Diameter mast (boven)	3,2	m
Diameter rotor	136	m
Masthoogte	132	m
Hoogte mastvoet	1,5	m
Lengte blad	66,5	m
Ligging zwaartepunt*	20,67	m
Nominaal toerental	11,1	/min
Max. lengte gondel	11,7	m
Hoogte gondel	5,5	m
Oppervlakte blad	200	m ²
* afstand bladvoet tot zwaartepunt blad		

De locatie van WTHK44 op de kaart is getoond in Figuur 2.



Figuur 2. Locatie van voorbeeld-turbinepositie WTHK44 (gele vierkantje).

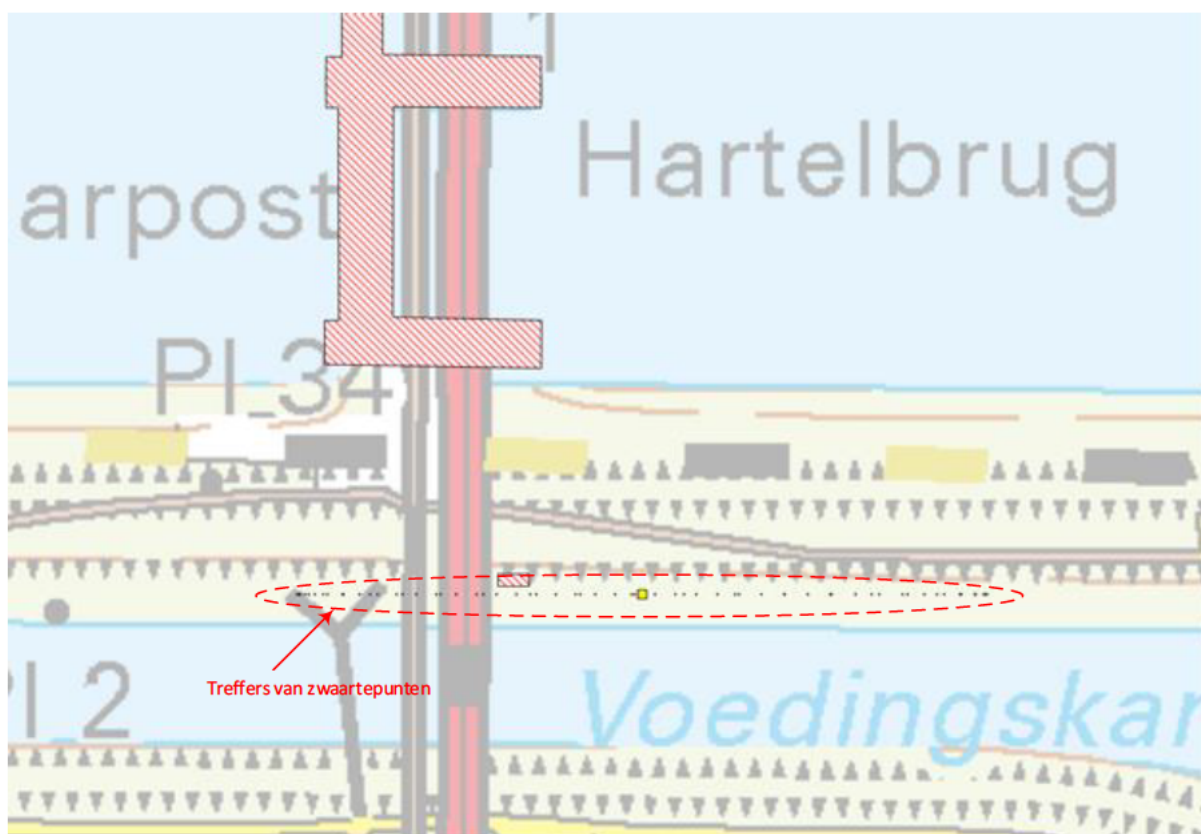
Uitwerking per faalmodus

Bladworp

Nominaal toerental

Stap 1. *Voor een groot aantal werphoeken wordt de werpafstand bepaald waar het zwaartepunt van het afgeworpen blad de grond raakt.*

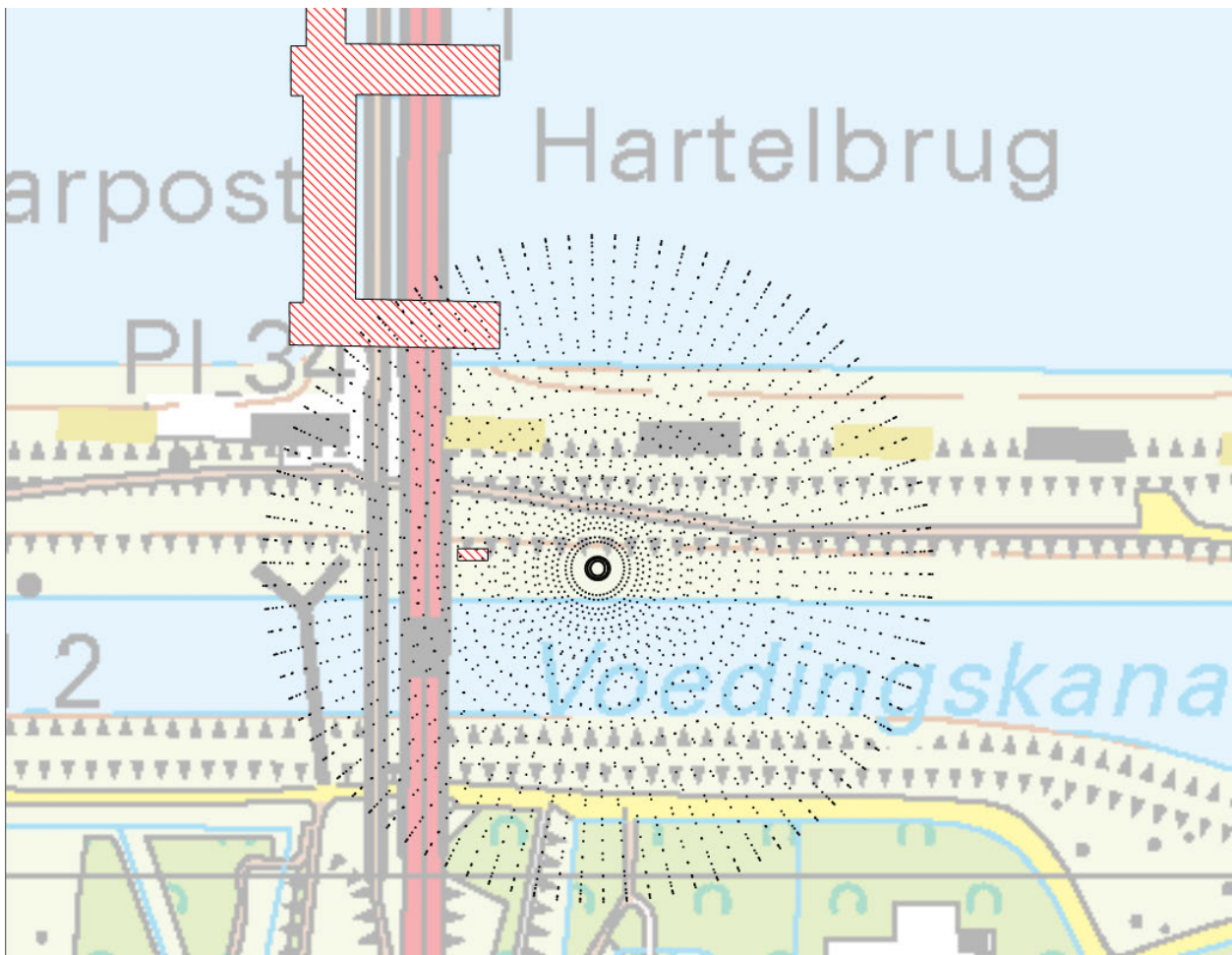
Een weergave van deze stap is getoond in Figuur 3. Elk puntje in de figuur stelt een trefcoördinaat voor van het zwaartepunt van het afgeworpen blad bij een bepaalde afworphoek (uitgaande van het volgen van een kogelbaantraject). Voor het beschouwde turbintype ligt het verst afgeworpen zwaartepunt bij bladworp nominaal op een afstand van 152 meter van de windturbinepositie. In deze stap wordt uitgegaan van een windrichting noord, zodat het draaivlak van de windturbine van bovenaf gezien in de oost-west richting ligt. Figuur 3 betreft een versimpelde weergave: in de berekeningen wordt in werkelijkheid met een hogere resolutie (meer trefcoördinaten) gewerkt.



Figuur 3. Weergave van treffers van het zwaartepunt van het blad in één werprichting (versimpeld).

Stap 2. De trefcoördinaten uit stap 1 worden uitgebreid naar alle werprichtingen.

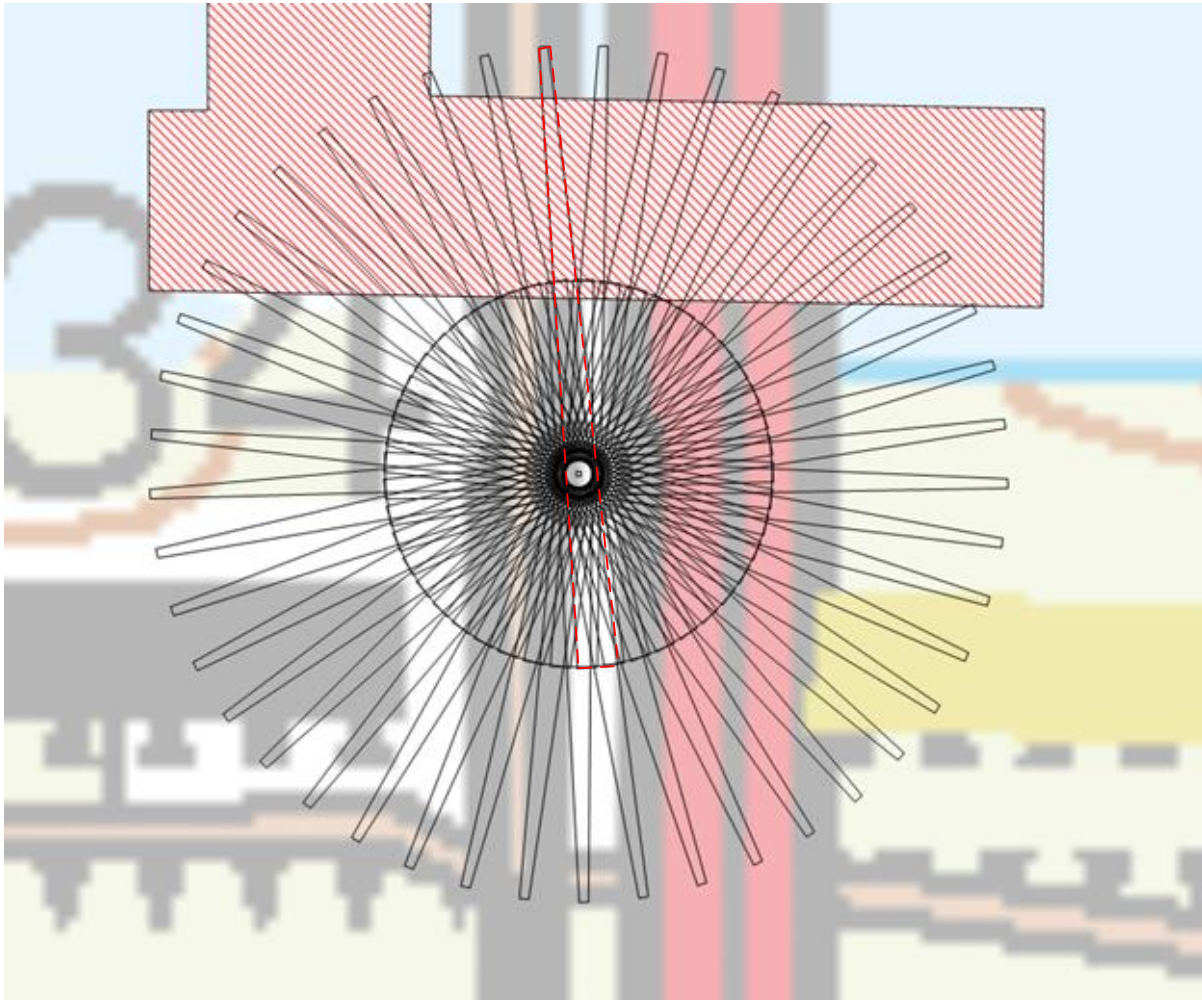
Een weergave van deze stap is getoond in Figuur 4. Het resultaat van deze stap is een raster van trefcoördinaten in alle richtingen. De werprichting is direct gekoppeld aan de oriëntatie van (het draaivlak van) de windturbine op het moment van afwerpen, welke afhangt van de op dat moment geldende windrichting. In dit geval is een uniforme verdeling van windrichtingen gehanteerd, waardoor voor elke trefcoördinaat eenzelfde kans van optreden geldt. Figuur 4 betreft een versimpelde weergave: in de berekeningen wordt in werkelijkheid met een hogere resolutie (meer trefcoördinaten) gewerkt.



Figuur 4. Weergave van treffers van het zwaartepunt van het blad in alle werprichtingen (versimpeld).

Stap 3. Voor elke trefcoördinaat wordt het gehele blad ingetekend rondom het zwaartepunt en wordt voor een groot aantal oriëntaties van het blad bepaald of het object wordt geraakt.

Een weergave van deze stap is getoond in Figuur 5. In dit voorbeeld wordt het object (de kering) getroffen door 56% van de mogelijke bladoriëntaties.



Figuur 5. Weergave van treffers van het zwaartepunt van het blad in alle werprichtingen.

Stap 4. Berekening van de treffrequentie van het object (bladworp nominaal).

De in stap 3 bepaalde treffractie voor elk trefcoördinaat (waarden tussen of gelijk aan 0 en 1) worden gemiddeld, waarmee de fractie van het totale aantal worpen wordt verkregen dat leidt tot treffen van het object. Deze fractie wordt vermenigvuldigd met de bladworfrequentie (nominaal) om de treffrequentie van het object ten gevolge van bladworp nominaal te verkrijgen.

Overtoeren

De methodiek voor bladworp overtoeren is identiek aan die voor bladworp nominaal, zoals hierboven beschreven. Het enige verschil is dat voor bladworp overtoeren met tweemaal het nominale toerental van de windturbine wordt gerekend in het bepalen van trefcoördinaten van het zwaartepunt van het blad. Dit leidt tot

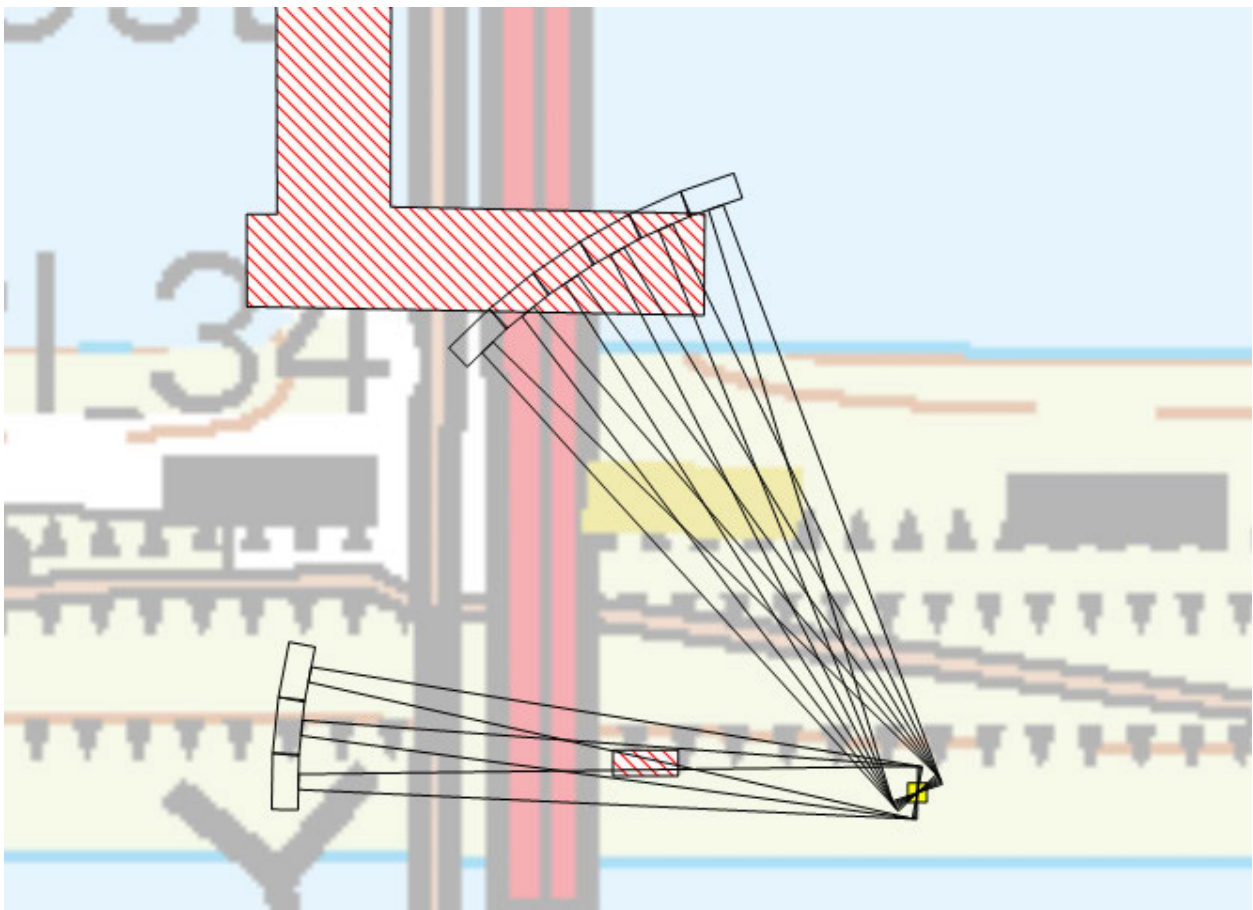
een raster van treffers over een grotere afstand dan bij bladworp nominaal. De maximale worpafstand bij overtoeren voor het beschouwde windturbinetype is gelijk aan 382 meter.

Mastbreuk

Bij het omvallen van de mast in een bepaalde richting kunnen drie situaties worden onderscheiden:

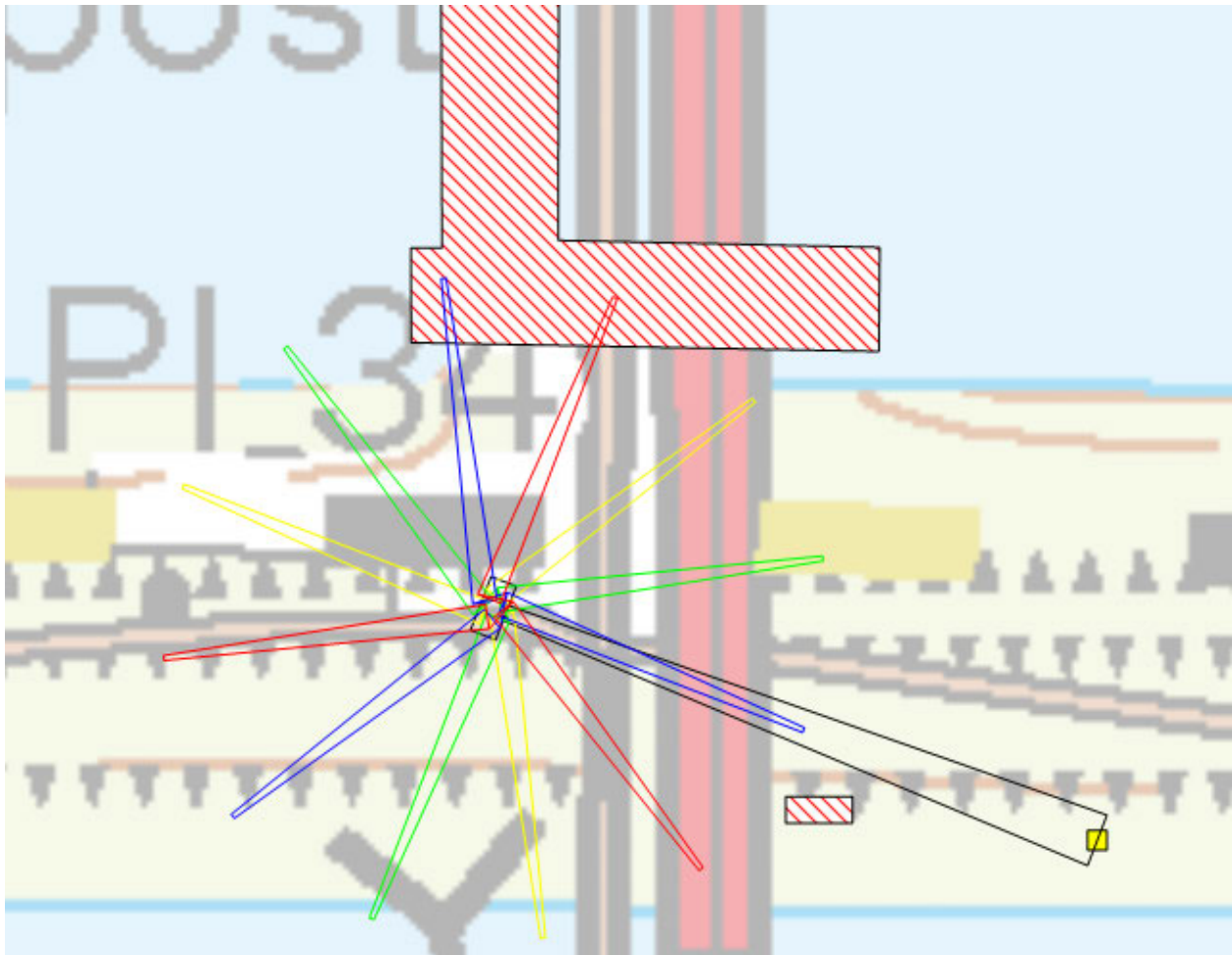
1. Het object wordt niet getroffen (treffractie = 0);
2. Het object wordt getroffen door de mast en/of gondel (treffractie = 1);
3. Het object wordt niet getroffen door de mast of gondel, maar kan afhankelijk van de stand van de rotorbladen mogelijk worden getroffen door de rotor (treffractie tussen 0 en 1).

Ad 2. Situatie 2 wordt getoond in Figuur 6. In de figuur zijn de mast en gondel ingetekend voor die valhoeken waarbij het object (hier: kering of elektriciteitshuisje) door mast en/of gondel wordt getroffen. Figuur 6 betreft een versimpelde weergave: in de berekeningen wordt in werkelijkheid met een hogere resolutie (meer valhoeken) gewerkt.



Figuur 6. Weergave van treffers door mast en/of gondel bij het omvallen van de mast (versimpeld).

Ad 3. Een voorbeeld van situatie 3 wordt getoond in Figuur 7. In dit voorbeeld wordt het object (de kering) getroffen door 50% van de mogelijke rotorstanden. Figuur 7 betreft een versimpelde weergave: in de berekeningen wordt in werkelijkheid met een hogere resolutie (meer rotorstanden) gewerkt.



Figuur 7. Weergave van treffers door de rotor bij het omvallen van de mast (versimpeld).

De treffracties per valhoek worden gemiddeld, waarmee de fractie van het totale aantal mastbreuken wordt verkregen dat leidt tot treffen van het object. Deze fractie wordt vermenigvuldigd met de mastbreukfrequentie om de treffrequentie van het object ten gevolge van mastbreuk te verkrijgen.

Rotor-/gondelval

De methodiek voor rotor-/gondel is identiek aan die voor mastbreuk, zoals hierboven beschreven. Het enige verschil is dat voor rotor-/gondelval met een masthoogte gelijk aan nul wordt gerekend.