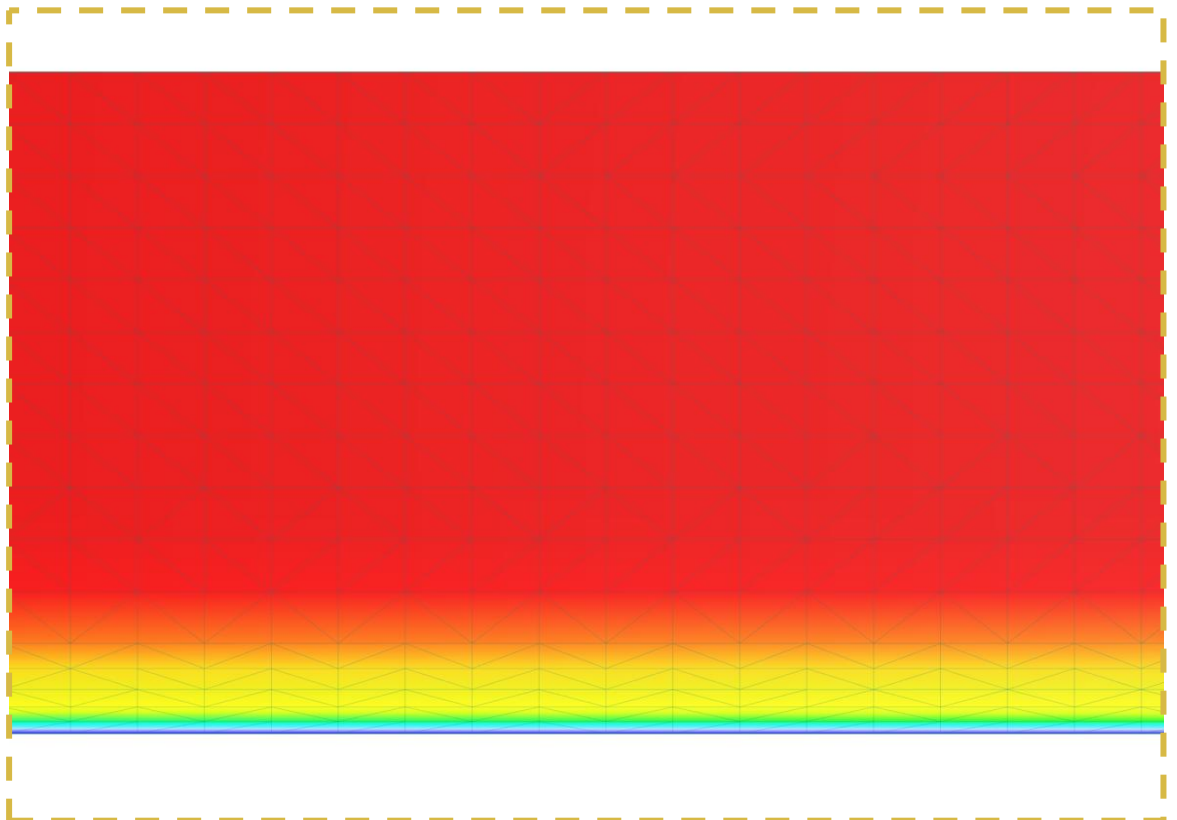




BOEZEMMOLEN NO.6 | HAASTRECHT

WINDVANGONDERZOEK | HUIDIGE SITUATIE

Projectnummer: 2024_71

Datum: 12 augustus 2024

WINDVANGONDERZOEK

HUIDIGE SITUATIE

"BOEZEMMOLEN NO.6"

OOST VLISTERDIJK 1

2851 ET HAASTRECHT

Opdrachtgever:

Samen Thuis Vastgoedontwikkeling

| info@rapgebiedsontwikkeling.nl

Onderzoeker en auteur:

EAGM te Montfoort

Datum:

12 augustus 2024 | versie 1.0

Status: concept

Copyright:

© EAGM B.V., projectnummer: 2024_71

Montfoort, augustus 2024

Disclaimer:

De inhoud van dit rapport is met uiterste zorg samengesteld. De informatie in dit document wordt aangeboden zonder enige garantie. EAGM sluit alle aansprakelijkheid uit voor enigerlei directe of indirecte schade, van welke aard dan ook, die voortvloeit uit of verband houdt met het gebruik van dit document. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd of openbaar gemaakt door middel van drukwerk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder schriftelijke toestemming van EAGM en de opdrachtgever, noch zonder toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd.

Inhoud

1. INLEIDING.....	3
1.1 Het onderzoek	3
1.2 De molen	3
1.3 Biotoop versus windvang.....	3
1.4 Gebruikte software	3
1.5 Bronnen.....	4
1.6 Overzicht van de locatie	4
2. PARAMETERS, AANNAMES EN OVERWEGINGEN.....	5
2.1 De molen	5
2.1.1 Parameters	5
2.2 Simulaties	5
2.2.1 Steady flow en Transient Flow	5
2.2.2 Parameters	6
2.2.2 Gemeten waarden	9
2.2.3 Windrichtingen.....	9
3. RESULTATEN.....	10
3.1 De molen	10
3.2 Windregime	12
3.2.1 Data bron	12
3.2.2 Frequentie	12
3.2.3 Weibull-verdeling	13
3.3 Simulaties	14
3.3.1 Overzicht.....	14
3.3.2 Berekeningswijze.....	15
3.3.3 Weegfactoren	15
3.3.4 Windvangcijfer per onderzoeksrichting	16
3.4 Simulatiedata in relatie tot windregime	18
4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	19
4.1 Windregime	19
4.2 Huidige windvang	19
4.3 Beperkingen van het onderzoek en aannames.....	19
4.4 De molen(biotoop) en het vervolg	20
4.4.1 Vervolg onderzoek.....	20
4.5.2 De molen	20
4.4.3 Cumulatieve verslechtering	21

1. INLEIDING

1.1 Het onderzoek

SamenThuis Vastgoedontwikkeling voert, in samenwerking met de gemeente Krimpenerwaard, een onderzoek uit naar de mogelijkheden voor woningbouwontwikkeling aan de zuidzijde van het dorp Haastrecht (tussen ca. 255°-330° t.o.v. van de molen, hierna 'onderzoeksrichting', zie 1.6 en 2.2.3). Een belangrijk onderdeel van dit onderzoek is het in kaart brengen van het functioneren van de molenbiotoop rondom Boezemmolen No. 6. Het doel is om te bepalen in hoeverre de molenbiotoop nog intact is, en waar en in welke mate deze al verstoord is. Daarnaast wordt advies gevraagd over hoe bij de verdere stedenbouwkundige en architectonische uitwerking van het plan rekening gehouden kan worden met de molenbiotoop, om verdere aantasting te voorkomen.

1.2 De molen

Boezemmolen No. 6, gelegen in Haastrecht, Zuid-Holland, is een historische ronde stenen grondzeiler, oorspronkelijk gebouwd in 1873 en herbouwd in 2010. Met een wiekenkruis van ruim 30 meter, het grootste van Nederland, speelt deze molen een cruciale rol in het waterbeheer door het waterschap. De molen bemaalt tijdens hoge waterstanden de Hooge Boezem, wat essentieel is voor het behoud van het juiste polderpeil. Naast zijn functionele bijdrage aan het waterbeheer, is de molen een belangrijk historisch en educatief monument. Voor het voortbestaan en de effectieve werking van de molen is de bescherming van de windvang van cruciaal belang, zodat de molen zijn rol in het waterbeheer en het behoud van cultureel erfgoed in de regio kan blijven vervullen.

1.3 Biotoop versus windvang

Het is van belang om het onderscheid tussen een windvangonderzoek en een biotooponderzoek goed te begrijpen. Een windvangonderzoek richt zich uitsluitend op de capaciteit van de molen om wind te vangen en deze om te zetten in mechanische energie. Dit type onderzoek analyseert het effect van obstakels of veranderingen in de directe omgeving van de molen op deze capaciteit.

Een biotooponderzoek daarentegen heeft een breder perspectief en richt zich op de gehele omgeving rondom de molen. Hierbij worden niet alleen de technische aspecten van de windvang meegenomen, maar ook factoren zoals flora, fauna en landschapselementen die van invloed zijn op de beleving, esthetiek en functionaliteit van de molen. Daarnaast omvat een biotooponderzoek ook aspecten zoals het zicht op de molen, de cultuurhistorische waarde en het ambachtelijke malen. Deze bredere context kan worden geëvalueerd in relatie tot het bestemmingsplan, waarbij eventuele inbreuken op de molenbiotoop eerst door belanghebbenden worden besproken en, indien nodig, aan een rechter worden voorgelegd.

In dit rapport ligt de focus op een windvangonderzoek.

1.4 Gebruikte software

- OpenFOAM [GUI: RWIND Pro]
- ParaView
- QGIS [OSM, AHN, PDOK] en Google Earth
- Sketchup
- Blender
- VScode [numpy, scipy, matplotlib]
- Excel en Word

- KNMI
- AHN
- 3DBAG
- Google Earth
- CADMapper
- 'Windmills in England'; Rex Wailes
- 'Aerodynamics of Wind Turbines'; Martin O. L. Hansen
- International Journal of Historical Engineering and Technology
- 'Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications'; John D. Anderson
- 'Turbulence Modeling for CFD'; David C. Wilcox
- 'An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method'; H.K. Versteeg en W. Malalasekera
- 'Aerodynamic Roughness of Urban Areas'; Grimmond en Oke
- 'Numerical Simulations of Wind Flow in Urban Forests'; Gromke en Ruck
- 'Technische Strömungslehre'; Willi Bohl
- 'CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture'; A. Melese Endalew e.a.
- OpenFOAM/RWIND handleiding

1.6 Overzicht van de locatie



4

2. PARAMETERS, AANNAMES EN OVERWEGINGEN

2.1 De molen

2.1.1 Parameters

Hieronder een overzicht van de gebruikte parameters die gebruikt zijn in dit onderzoek. De waarden in *cursieve* tekst in dit rapport/onderstaande tabel zijn aannames (zie 4.3).

Gevlucht diameter	30,00 m1
Hellingshoek bovenas	11°
'Sweep' oppervlakte gevlucht (A_{gevlucht})	$(30,00/2)^2 \cdot \pi = 706,86 \text{ m}^2$
Verticale hoogte gevlucht (Z)	$\sin(90-11) \cdot 30,00 = 29,45 \text{ m1}$
Aerodynamische efficiëntie wiekenkruis (η_1)	0,12
Efficiëntie gangwerk (η_2)	0,50
Luchtdichtheid (ρ)	1,25 kg/m ³
Opvoerhoogte scheprad	2,10 m1
Valversnelling	9,81 m/s ²
Soortelijke massa water	1000 kg/m ³
Maaiveld hoogte rondom de molen	-0,44 NAP
'Berg' (de molen is een grondzeiler op een kleine verhoging t.o.v. omliggend gebied)	+0,65 NAP
Diameter scheprad	6,20 m1
Breedte scheprad	0,60 m1
Kuub (m³) per end	1,00 m ³
Mol massa lucht	0.0288 kg/mol
Algemene gas constante	8,31 JK-1mol-1
P gas	0,0034657

2.2 Simulaties

De simulaties zijn uitgevoerd met CFD software op basis van OpenFOAM.

CFD is een geschikte methode voor dit onderzoek, omdat het, mits correct toegepast, gedetailleerde simulaties van windstromen en hun interactie met de omgeving biedt, wat essentieel is voor het beoordelen van de impact op de windvang.

2.2.1 Steady flow en Transient Flow

Steady flow simulaties bieden slechts een statische momentopname van de windstroom, wat betekent dat ze geen rekening houden met tijdsafhankelijke fluctuaties in windsnelheid en -richting. Dit kan leiden tot een onvolledig beeld van de dynamische effecten van wind, vooral in situaties waar turbulentie en windvariabiliteit een grote rol spelen. Bovendien kunnen steady flow simulaties de impact van plotselinge windveranderingen, zoals windvlagen, niet nauwkeurig modelleren, wat kan resulteren in een onderschatting van belastingen en energieverliezen op een windmolen.

Transient flow simulaties bieden daarentegen de mogelijkheid om tijdsafhankelijke veranderingen in windstromen te modelleren, waardoor een veel nauwkeuriger beeld ontstaat van de dynamische interacties tussen de wind en de omgeving. Dit is met name belangrijk bij het analyseren van turbulente stromingen en de effecten daarvan op molens. Transient simulaties kunnen variaties in windsnelheid en -richting over tijd simuleren, wat leidt tot een beter begrip van de impact van windvlagen en andere dynamische effecten op de prestaties en levensduur van een molen.

Bij de analyse van de windvang van de Boezemmolen #6 is gekozen voor steady flow simulaties om de lokale invloed van terrein, vegetatie en bebouwing op windstromen te onderzoeken. Het doel is om te begrijpen hoe deze factoren de windsnelheid en -richting rond de molen beïnvloeden.

Hoewel transient flow simulaties gedetailleerde tijdsafhankelijke fluctuaties kunnen weergeven, biedt de steady flow benadering in dit geval voldoende nauwkeurigheid vanwege de volgende redenen:

- Proportionaliteit van windsnelheidseffecten: De effecten van omgevingsfactoren op windsnelheid schalen proportioneel, waardoor de resultaten toepasbaar zijn op verschillende windsnelheden, zoals bepaald door de Weibull-verdeling.
- Langetermijn windregime: De Weibull-verdeling wordt gebruikt om de meest waarschijnlijke windsnelheden (kansdichtheid) te identificeren, die vervolgens worden gecombineerd met steady flow resultaten voor een efficiënte schatting van de effectieve windsnelheid.
- Efficiëntie in rekenkracht: Steady flow simulaties bieden een praktische balans tussen nauwkeurigheid en rekenkracht, wat essentieel is voor een analyse van het windgedrag zonder de zware vraag aan rekencapaciteit van transient flow simulaties.
- Nauwkeurigheid in modellering: De simulaties zijn uitgevoerd met bepaalde parameters om de realiteit zo goed mogelijk te benaderen, wat zorgt voor betrouwbare en bruikbare inzichten in de operationele omgeving van de molen.

Er is ervoor gekozen om de turbulentie-intensiteit (TI), die normaal gesproken wordt berekend in een transient flow simulatie, rekenkundig te bepalen op basis van de gemeten windsnelheid per meetpunt (U) en de turbulente kinetische energie (k), twee van de waarden die worden verkregen uit een steady flow simulatie. Hoewel de waarde van TI in dit geval een benadering is, wordt dit beschouwd als een bruikbare schatting die voldoende nauwkeurigheid biedt voor de analyse in deze context.

De nadruk is gelegd op nauwkeurige modellering en het correct instellen van parameters voor steady-flow simulaties.

2.2.2 Parameters

STEADY FLOW

Inlaatsnelheid	5 m/s op 10 meter hoogte
Kinematische viscositeit	$1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Luchtdichtheid	$1,25 \text{ kg/m}^3$
Mesh density algemeen	40%, celgrootte minimaal = 0,94 m
Boundary layers	5
Residuele streefwaarde	0.001 tot 0.0008
Windprofiel	Logaritmisch
Turbulentiemodel	K-omega
Inlaatturbulentie	1%; $0.00375 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (polder)

Terrein(ruwheid):

- $K_s = 0.02206 \text{ m}$
- $C_s = 0,54$
- Ca. 500 x 500 meter

Voor dit onderzoek is gekozen om een gebied van 500 x 500 meter rondom de molen te modelleren. Deze omvang biedt een goede balans tussen detailniveau en rekenkracht. Binnen deze straal kan de invloed van omgevingsfactoren zoals gebouwen en terreinvarianties op de windstromen die de molen bereiken, worden bepaald. Daarnaast houdt deze modellering rekening met de turbulentie en windvariabiliteit binnen dit gebied.

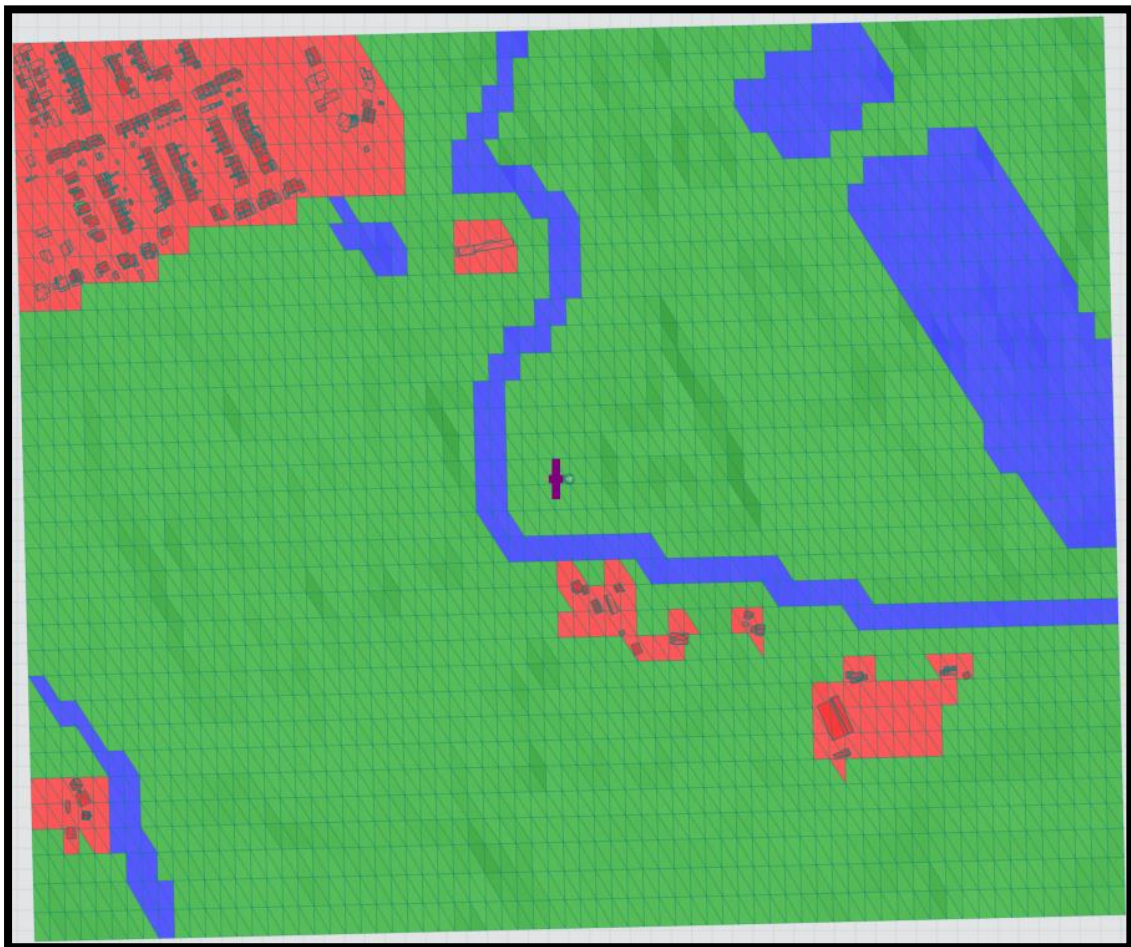
Belangrijk is ook dat de wind, nadat deze door obstakels is verstoord, over een bepaalde afstand herstelt naar een meer gestabiliseerde stroom. Dit herstel vindt vaak plaats binnen een straal van enkele honderden meters, waardoor een gebied van 500 x 500 meter voldoende is om een representatief beeld te krijgen van de windcondities die de molen beïnvloeden.

Gezien het beperkte aantal bomen en de nadruk op de bebouwde omgeving in dit onderzoek, is ervoor gekozen om losse bomen niet afzonderlijk te modelleren. Het terrein is in zijn geheel beschouwd als agrarisch polderlandschap.

Het oppervlak van het terrein en de natuurlijke variaties in maaiveldhoogte volgens de AHN-data speelt dus een rol in iedere windrichting.

Materiaal- en oppervlakteruwheid (Ks/Cs):

- Gebouwen = 0.03 m; 0,5 (rood)
- Molen = 0,04 m; 0,5
- Water = 0,0002; 0,5 (blauw)



De 'zonekaart' van het simulatiemodel.

Zones:

- Terrain, groen: Mesh refinement = 0,5 m
- Residentieel, rood: Mesh refinement = 2 m. Gebouwen LOD 2.2. 3DBAG.
- Water, blauw: Mesh refinement = 0,5

Windtunnel parameters:

Lower boundary condition = terrein ($K_s = 0.02206$; $C_s = 0.54$), met verschillen in maaiveld hoogte, volgens CADMapper en Google data. Geverifieerd aan de hand van AHN data met gebruik van QGIS.

- Afmetingen (m):
 - $X = -2500, 2500$
 - $Y = -1000, 1000$
 - $Z = -3, 360$ (minimaal 6x hoogste Z-waarde in het model)

Meetpunten¹:

In meters.

Hartlijn molen = $[x,y]$ $[0,0]$

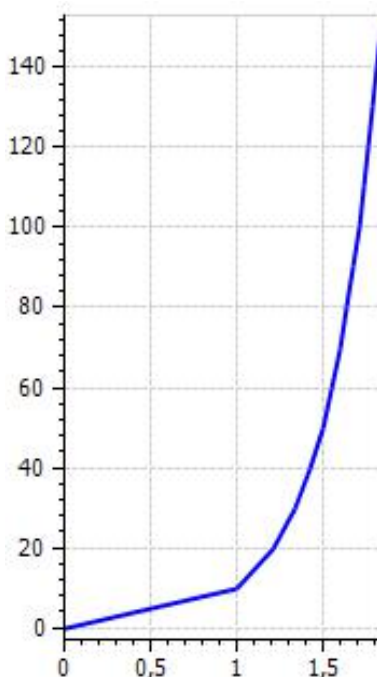
[X] Inlaatzijde = -

[X] Uitlaatzijde = +

[Y] Weerzijde = -

[Y] Keerzijde = +

x	y	z
-15	0	1.49
-13.75	0	7.9
-12.51	0	14.31
-12.14	0	16.21
-11.77	0	18.11
-10.52	0	24.53
-9.28	0	30.94
-12.14	14.72	16.21
-12.14	8.31	16.21
-12.14	1.9	16.21
-12.14	0	16.21
-12.14	-1.9	16.21
-12.14	-8.31	16.21
-12.14	-14.72	16.21
-13.35	0	10



x	y	z
-15	0	0
-15	0	10
-15	0	20
-15	0	30
-15	0	40
-15	0	50
-15	0	60
-15	0	70
-15	0	80
-15	0	90
-15	0	100
-15	0	110
-15	0	120
-15	0	130
-15	0	140
-15	0	150

Boven: referentiemeetpunten inlaatsnelheid en het windprofiel van de inlaat (hoogte versus factor snelheid).

Links: meetpunten voor de molen, op -15 meter van het wiekenkruis op van een hellingshoek van 11° .

¹ In de windtunnel zijn ook meetpunten geplaatst die overeenkomen met de referentiehoogtes van de inlaatsnelheidparameters. Deze kunnen eventueel worden gebruikt om de impact van een wijziging te bepalen bij het vergelijken van twee scenario's, over een hoogte van 150 meter in plaats van alleen over de hoogte van het wiekenkruis.

2.2.2 Gemeten waardes

P = druk in Pascal (Pa)

U = windsnelheid in meters per seconde (m/s)

k = Turbulente kinetische energie (m^2/s^2)

ω = Dissipatie snelheid

2.2.3 Windrichtingen

Om een integraal beeld van de windvang te verkrijgen, zijn de acht hoofdrichtingen gesimuleerd. Daarnaast is het onderzoeksgebied, dat gebaseerd is op het ontwikkelingsplan, verder onderverdeeld in zes segmenten binnen de twee hoofdrichtingen waarin het gebied zich bevindt om een nauwkeuriger beeld te verkrijgen. Er is gekozen voor een onderverdeling van 15° voor praktische redenen: $45^\circ/15^\circ = 3$

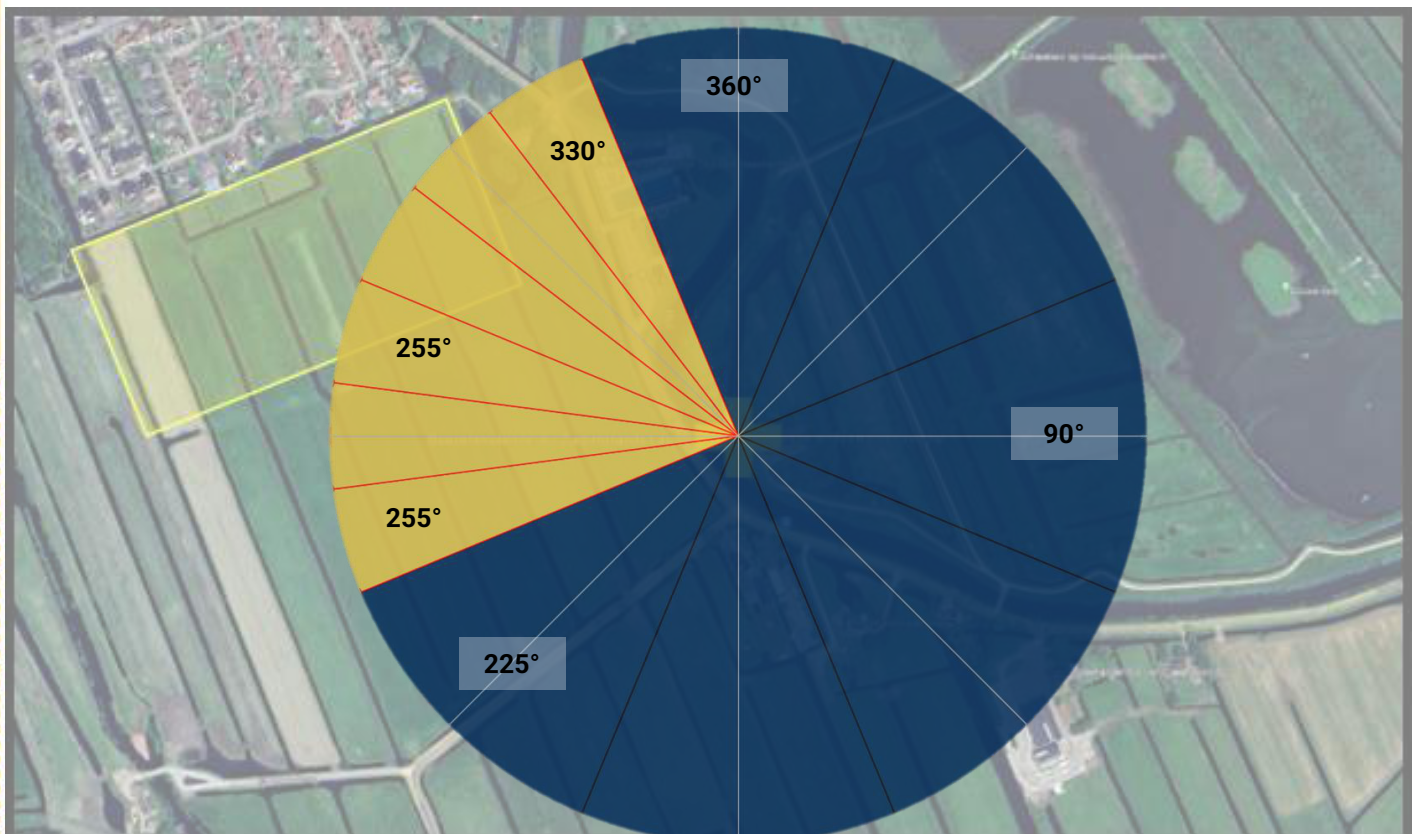
Hoofdrichtingen:

[0,45,90,135,180,225,270,315]

Onderverdeling:

[255,270,285,300,315,330]

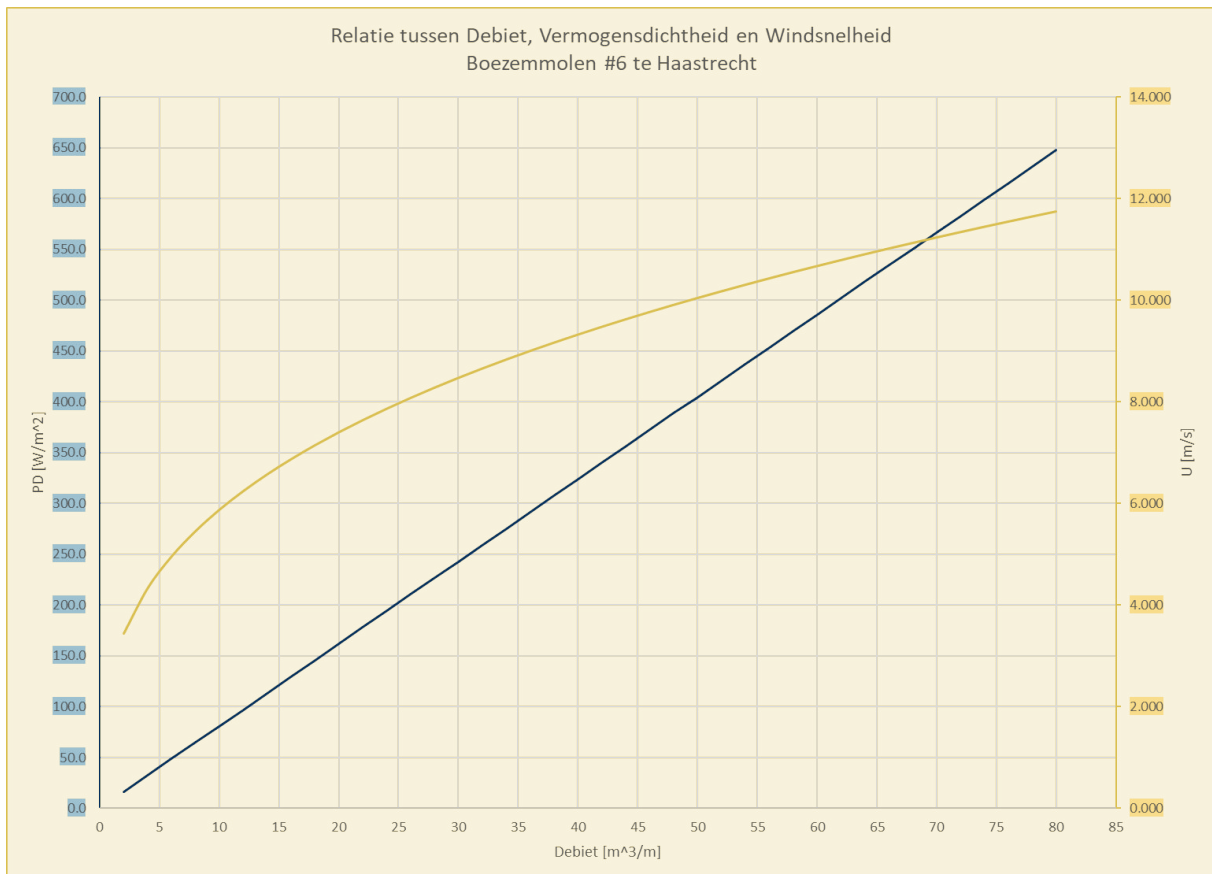
In totaal zijn er 12 simulaties uitgevoerd:



3. RESULTATEN

3.1 De molen

Om een goed beeld te krijgen van de relatie tussen het debiet van de molen (hoeveel water de poldermolen kan verzetten), is de relatie tussen het debiet, de vermogensdichtheid van de wind op het wiekenkruis (gemiddeld) en de windsnelheid berekend. Dit toont de niet-lineaire relatie tussen windsnelheid en vermogen, evenals de lineaire relatie tussen debiet en vermogen. De windsnelheid is hierbij als een gemiddelde genomen.



Debiet in m³/minuut [2 – 80 m³/minuut]. Windsnelheid op de secundaire Y-as in m/s.
Vermogensdichtheid in W/m² op de primaire Y-as.

Berekeningswijze:

1. Zet de volumestroom om naar seconden:

$$(\text{Volume Stroom (m}^3/\text{min)}) / 60 \text{ s} = \text{Volumestroom (m}^3/\text{s)}$$

2. Bereken de massastroom:

$$\text{Massastroom} = \text{Volumestroom (m}^3/\text{s)} \times 1000 \text{ kg/m}^3 = \text{Massastroom (kg/s)}$$

3. Bereken energie (Joules):

$$\text{Energie (J)} = \text{Massastroom (kg/s)} \times 9,81 \times \text{Opvoerhoogte (2,10 m)}$$

4. Zet energie om naar vermogen (Watt):

$$\text{Vermogen (W)} = \text{Energie (J)} / \text{Tijd (s)}$$

5. Zet vermogen om naar kilowatt:

Vermogen (kW) = Vermogen (W) / 1000 (kW benodigd voor het scheprad)

6. Bereken asvermogen:

Asvermogen (kW) = Vermogen (kW) × η₂

7. Bereken vermogensdichtheid:

Vermogensdichtheid (W/m²) = (Asvermogen (kW) × 1000) / (η₁ × Oppervlakte van de vlucht)

8. Bepaal nodige windsnelheid:

$U = ((W/m^2)/(0,5 \times \rho))^{1/3}$

m3/m	m3/s	kg	J	W	kW _{sc}	kW _{as}	W/m ²	U
2	0.0	33.3	686.7	686.7	0.7	1.4	16.2	3.434
4	0.1	66.7	1373.4	1373.4	1.4	2.7	32.4	4.326
6	0.1	100.0	2060.1	2060.1	2.1	4.1	48.6	4.952
8	0.1	133.3	2746.8	2746.8	2.7	5.5	64.8	5.450
10	0.2	166.7	3433.5	3433.5	3.4	6.9	81.0	5.871
12	0.2	200.0	4120.2	4120.2	4.1	8.2	97.1	6.239
14	0.2	233.3	4806.9	4806.9	4.8	9.6	113.3	6.568
16	0.3	266.7	5493.6	5493.6	5.5	11.0	129.5	6.867
18	0.3	300.0	6180.3	6180.3	6.2	12.4	145.7	7.142
20	0.3	333.3	6867.0	6867.0	6.9	13.7	161.9	7.397
22	0.4	366.7	7553.7	7553.7	7.6	15.1	178.1	7.636
24	0.4	400.0	8240.4	8240.4	8.2	16.5	194.3	7.861
26	0.4	433.3	8927.1	8927.1	8.9	17.9	210.5	8.073
28	0.5	466.7	9613.8	9613.8	9.6	19.2	226.7	8.275
30	0.5	500.0	10300.5	10300.5	10.3	20.6	242.9	8.468
32	0.5	533.3	10987.2	10987.2	11.0	22.0	259.1	8.652
34	0.6	566.7	11673.9	11673.9	11.7	23.3	275.3	8.829
36	0.6	600.0	12360.6	12360.6	12.4	24.7	291.4	8.998
38	0.6	633.3	13047.3	13047.3	13.0	26.1	307.6	9.162
40	0.7	666.7	13734.0	13734.0	13.7	27.5	323.8	9.320
42	0.7	700.0	14420.7	14420.7	14.4	28.8	340.0	9.473
44	0.7	733.3	15107.4	15107.4	15.1	30.2	356.2	9.621
46	0.8	766.7	15794.1	15794.1	15.8	31.6	372.4	9.765
48	0.8	800.0	16480.8	16480.8	16.5	33.0	388.6	9.904
50	0.8	833.3	17167.5	17167.5	17.2	34.3	404.8	10.040
52	0.9	866.7	17854.2	17854.2	17.9	35.7	421.0	10.172
54	0.9	900.0	18540.9	18540.9	18.5	37.1	437.2	10.301
56	0.9	933.3	19227.6	19227.6	19.2	38.5	453.4	10.426
58	1.0	966.7	19914.3	19914.3	19.9	39.8	469.5	10.549
60	1.0	1000.0	20601.0	20601.0	20.6	41.2	485.7	10.669
62	1.0	1033.3	21287.7	21287.7	21.3	42.6	501.9	10.786
64	1.1	1066.7	21974.4	21974.4	22.0	43.9	518.1	10.901
66	1.1	1100.0	22661.1	22661.1	22.7	45.3	534.3	11.013
68	1.1	1133.3	23347.8	23347.8	23.3	46.7	550.5	11.123
70	1.2	1166.7	24034.5	24034.5	24.0	48.1	566.7	11.231
72	1.2	1200.0	24721.2	24721.2	24.7	49.4	582.9	11.337
74	1.2	1233.3	25407.9	25407.9	25.4	50.8	599.1	11.441
76	1.3	1266.7	26094.6	26094.6	26.1	52.2	615.3	11.543
78	1.3	1300.0	26781.3	26781.3	26.8	53.6	631.5	11.644
80	1.3	1333.3	27468.0	27468.0	27.5	54.9	647.7	11.743

3.2 Windregime

3.2.1 Data bron

KNMI, Cabauw, uur gegevens, 2011-2020. 24 uur. Meethoogte 10 meter boven maaiveld.²

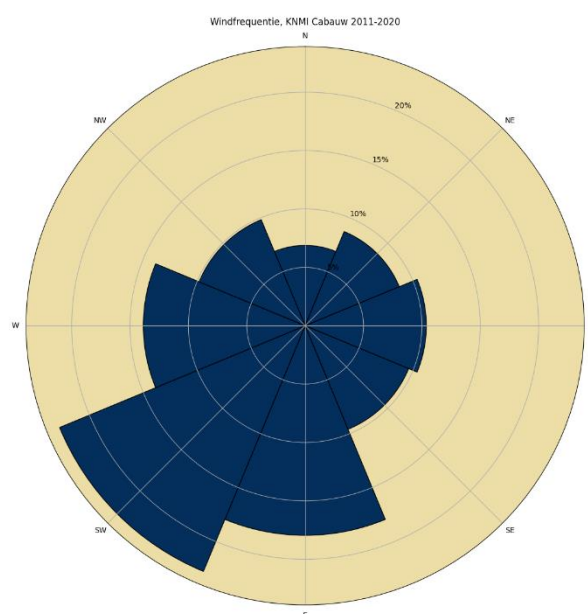
- Datum
- Uur³
- Windrichting
- Uurgemiddelde windsnelheid
- Temperatuur (voor het bepalen van de luchtdichtheid)
- Luchtdruk (voor het bepalen van de luchtdichtheid)

De windrichtingsgegevens zijn oorspronkelijk ingedeeld in segmenten van 10 graden. Om deze gegevens nauwkeurig toe te wijzen aan de hoofdwindrichtingen van de kompasroos, die geen veelvouden van 10 graden beslaan, is een gewogen verdelingsmethode toegepast. Hierbij wordt de waarde van elk 10-graden segment verdeeld over de relevante 5-graden segmenten, op basis van de overlap met de hoofdwindrichtingen.

Neem bijvoorbeeld een windrichting van 22,5°. Dit punt ligt precies op de grens van de NO-richting (22,5° - 67,5°). In dit geval wordt de waarde voor de windrichting 22,5° evenredig verdeeld over de NO-richting en de voorgaande richting (N). Dit betekent dat elke dag binnen het 10-graden segment proportioneel wordt verdeeld over de twee betrokken richtingen, waarbij de meeste dagen worden toegewezen aan NO vanwege de grotere overlap.

3.2.2 Frequentie

RICHTING	BEGIN	EIND	FREQUENTIE
	<i>graden</i>	<i>graden</i>	<i>%</i>
0	337.5	22.5	6.88%
45	22.5	67.5	8.73%
90	67.5	112.5	10.38%
135	112.5	157.5	9.60%
180	157.5	202.5	17.95%
225	202.5	247.5	22.77%
270	247.5	292.5	13.86%
315	292.5	337.5	9.83%



Frequentie van de windrichtingen per hoofdrichting [N, NO, O, ZO, Z, ZW, W, NW] over een periode van 10 jaar. Dit betreft de frequentie op basis van het aantal uurmetingen en is verder niet gecorrigeerd voor (effectieve) windsnelheid.

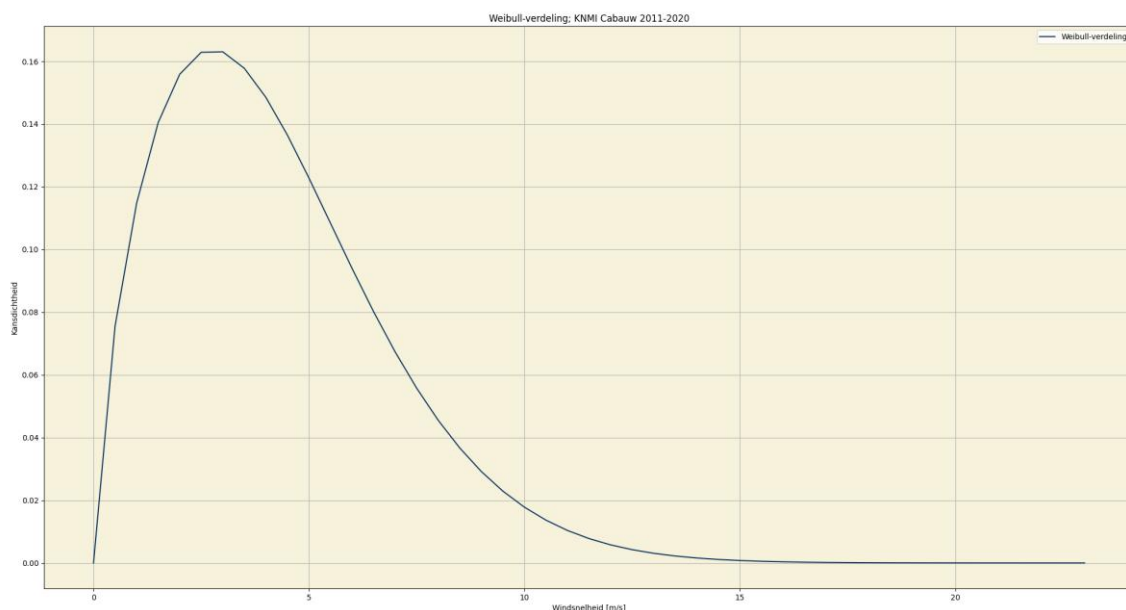
² uurgeg_348_2011-2020

³ Er is geen onderscheid gemaakt tussen dag en nacht omdat een poldermolen in theorie 24-uur per dag moeten kunnen draaien.

3.2.3 Weibull-verdeling

Vanwege de omvang van dit onderzoek is de Weibull-verdeling (PDF, Probability Density Function⁴) berekend zonder onderscheid te maken tussen de verschillende windrichtingen, en beschouwt dus alle windrichtingen als één enkele groep. De Weibull-verdeling wordt gebruikt om de verdeling van windsnelheden op de locatie weer te geven en geeft een statistisch beeld van de frequentie en variatie van de windsnelheden. Hoewel deze verdeling niet bedoeld is om een directe vergelijkingswaarde te bieden voor de verschillende windrichtingen in dit onderzoek, biedt het wel waardevolle informatie over de algemene beschikbaarheid van windenergie op deze locatie.

U_{gem}	4.23	m/s
σ	2.43	
k (vormparameter)	1.675	$=((\sigma/U_{gem})^{-1.086})/1.086$
c (schaalparameter)	4.740	$=U_{gem}/\Gamma(1+(1/k))$
Hoogte	10	m
Minimum snelheid	0	m/s
Maximum snelheid	22	m/s
Bereik	0-23	m/s



Op basis van de data is de gemiddelde vermogensdichtheid op de locatie van dit meetstation berekend doormiddel van de volgende formule:

$$PD = \frac{1}{2} \rho * c^3 \exp \left(\ln \left(\Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \right) \right)$$

$$= 109.9 \text{ W/m}^2 \text{ op 10 meter hoogte}$$

⁴ Bij de Weibull-verdeling toont de PDF hoe vaak verschillende windsnelheden op een locatie voorkomen (dichtheid), waarbij een hogere PDF-waarde betekent dat die windsnelheid waarschijnlijk vaker voorkomt.

3.3 Simulaties⁵

3.3.1 Overzicht

- Inlaatsnelheid = 5 m/s op 10 meter, log.profiel.
- Inlaatturbulentie-intensiteit = 1%

BOEZEMMOLEN_NR6_HUIDIGESITUATIE_2024								
	ψ_{W_Vert}	ψ_{W_hor}	$\int U_{dh_vert}$	$\int U_{db_hor}$	TI_max	TI_x	U'	PD
°	ψ	ψ	m ² /s	m ² /s	%	%	m/s	W/m ²
REF	1.23	1.00	179.10	272.06	6.78%	4.92%	5.83	126.41
45	1.37	1.00	162.81	254.20	6.33%	4.90%	5.38	102.02
90	1.38	1.02	158.48	245.75	6.87%	5.66%	5.16	90.35
135	1.35	0.98	168.22	257.72	5.30%	4.08%	5.56	112.30
180	1.43	0.97	158.80	250.48	8.96%	5.65%	5.23	95.28
225	1.46	0.99	158.65	250.22	8.33%	6.30%	5.21	94.71
255	1.40	1.00	158.78	248.27	7.72%	6.24%	5.17	91.06
270	1.47	1.00	156.72	247.97	8.28%	6.36%	5.14	91.10
285	1.34	0.99	167.91	261.70	6.46%	4.67%	5.55	111.63
300	1.44	0.94	144.73	225.89	7.21%	5.68%	4.76	72.07
315	1.40	1.04	152.01	238.18	6.36%	4.81%	5.02	83.19
330	1.32	0.98	165.02	259.47	6.03%	4.04%	5.50	108.13
360	1.32	1.02	164.01	257.00	6.85%	5.50%	5.39	101.74

- ψ_{w_vert} = de verhouding tussen de gemiddelde windsnelheid op het bovenste end versus het onderste end.
- ψ_{w_hor} = de verhouding tussen de gemiddelde windsnelheid op het weerszijde end versus het keerzijde end.
- $\int U_{db_vert}$ = geïntegreerde waarde van de windsnelheid over de hoogte van de molen, uitgedrukt in m²/s. Dit geeft het totale windenergiepotentieel over de verticale hoogte aan.
- $\int U_{db_hor}$ = geïntegreerde waarde van de windsnelheid over de hoogte van de molen, uitgedrukt in m²/s. Dit geeft het totale windenergiepotentieel over de horizontale breedte aan (askophoogte).
- **TI_max** = Maximale turbulentie-intensiteit gemeten over alle meetpunten van het wiekenkruis, uitgedrukt als een percentage.
- **TI_x** = gemiddelde turbulentie-intensiteit gemeten over alle meetpunten van het wiekenkruis, uitgedrukt als een percentage.
- **U'** = gecorrigeerde gemiddelde windsnelheid, rekening houdend met turbulentie-intensiteit.
- **PD** = vermogensdichtheid, uitgedrukt in W/m², wat een maat is voor de beschikbare energie in de windstromen gezien over het totaaloppervlak (sweep) van het wiekenkruis.
- **REF** = referentie simulatie, alle parameters komen overeen met de andere simulaties, alleen er is geen rekening gehouden met obstakels of terrein. De lower boundary condition van de windtunnel is wel ingesteld op $K_s = 0.02206$; $C_s = 0.54$, gelijk aan het terreinmodel.

⁵ Indien gewenst, kan alle meetdata worden aangeleverd. In de onderstaande resultaten zijn de individuele meetwaarden al omgerekend naar vergelijkingswaarden. De term "resultaten" moet hier dus worden geïnterpreteerd als bewerkte gegevens, aangepast voor de leesbaarheid en het doel van dit onderzoeksrapport.

3.3.2 Berekeningswijze

In de onderstaande tabel wordt de berekeningsmethodiek voor de simulatieresultaten toegelicht. Deze methoden vormen de basis voor de interpretatie van de resultaten en maken het mogelijk om verschillende scenario's effectief met elkaar te vergelijken.

Simulatieresultaten	Formule	Omschrijving
Ψ_{W_Vert}	$= \frac{\bar{X} [U_{boven}]}{\bar{X} [U_{onder}]}$	Verhouding tussen de gemiddelde windsnelheid op het bovenste end en het onderste end. Meetpunten gelijk verdeeld.
Ψ_{W_Hor}	$= \frac{\bar{X} [U_{keer}]}{\bar{X} [U_{weer}]}$	Verhouding tussen de gemiddelde windsnelheid op het keerzijde end en het weerzijde end. Meetpunten gelijk verdeeld.
$\int U \, dh_{vert}$	$\int U \, dh$	Geïntegreerde waarde van de windsnelheid over de hoogte van de molen, uitgedrukt in m^2/s .
$\int U \, db_{hor}$	$\int U \, db$	Geïntegreerde waarde van de windsnelheid over de breedte van de molen, uitgedrukt in m^2/s .
TI_max	$TI = \frac{\sqrt{2k/3}}{U}$	Maximale turbulentie-intensiteit gemeten over alle meetpunten van het wiekenkruis, uitgedrukt als een percentage.
TI_x	$TI = \frac{\sqrt{2k/3}}{U}$	Gemiddelde turbulentie-intensiteit gemeten over alle meetpunten van het wiekenkruis, uitgedrukt als een percentage.
U'	$= U^*(1-TI)$	Gecorrigeerde gemiddelde windsnelheid, rekening houdend met de turbulentie-intensiteit. ⁶
PD	$= \frac{1}{2} * \rho * U'^3$	Vermogensdichtheid, uitgedrukt in W/m^2 . Maat voor de beschikbare energie in de windstroom.

3.3.3 Weegfactoren

Simulatieresultaat	Weegfactor ⁷
Ψ_{W_Vert}	20%
Ψ_{W_Hor}	15%
$\int U \, dh_{vert}$	10%
$\int U \, db_{hor}$	5%
TI_max	5%
TI_x	5%
U'	0%
PD	40%

⁶ Het berekenen van de effectieve windsnelheid door de turbulentie-intensiteit (TI) af te trekken, zoals in de formule $U' = U^*(1-TI)$, is een heuristische benadering. Dit is geen standaardpraktijk in windenergiemodellering of CFD-analyse. Deze methode veronderstelt dat hogere turbulentie de bruikbare windsnelheid effectief vermindert, maar vereenvoudigt de complexe interacties tussen windsnelheid en turbulentie. Echter, voor de scope en context van dit onderzoek geeft dit een conservatieve schatting van de effectieve windsnelheid. Deze vereenvoudiging weerspiegelt mogelijk niet nauwkeurig de werkelijke dynamiek van de windvang.

⁷ Weegfactoren bepaald door EAGM, eveneens een heuristische benadering.

3.3.4 Windvangcijfer per onderzoeksrichting

De windvangcijfer wordt berekend door de referentiemeting als norm te stellen op 1 (100). Vervolgens worden alle simulatieresultaten vergeleken met deze norm en gewogen op basis van de weegfactoren per onderdeel. De som van alle onderdelen is vervolgens de windvangcijfer.

De totaalscore wordt berekend door de score per hoofdrichting [45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360] te middelen. Deze windvangcijfer is volledig onafhankelijk van het windregime en houdt nog geen rekening met de frequentie of de effectieve wind uit verschillende windrichtingen.

Om te voorkomen dat de factoren van de windsnelheid op het wiekenkruis een vertekend beeld geven, zijn deze gecorrigeerd op basis van de afwijking ten opzichte van de norm.

Voorbeeld: stel dat de genormaliseerde waarde voor ψ_{W_Vert} 1,47 is en de referentiewaarde 1,23. De afwijking is dan $|1,47 / 1,23 - 1| = 0,195$. De gecorrigeerde score zou dan $1 - 0,195 = 0,805$ zijn.⁸

	ψ_{W_Vert}	ψ_{W_hor}	$\int U_{dh_vert}$	$\int U_{db_hor}$	TI_max	TI_x	U'	PD
weegfactor	20%	15%	10%	5%	5%	5%	0%	40%
ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
45	0.89	1.00	0.91	0.93	0.93	1.00	0.92	0.81
90	0.88	0.98	0.88	0.90	1.01	1.15	0.89	0.71
135	0.91	0.98	0.94	0.95	0.78	0.83	0.95	0.89
180	0.84	0.97	0.89	0.92	1.32	1.15	0.90	0.75
225	0.81	0.99	0.89	0.92	1.23	1.28	0.89	0.75
255	0.86	1.00	0.89	0.91	1.14	1.27	0.89	0.72
270	0.80	1.00	0.88	0.91	1.22	1.29	0.88	0.72
285	0.92	0.99	0.94	0.96	0.95	0.95	0.95	0.88
300	0.83	0.94	0.81	0.83	1.06	1.15	0.82	0.57
315	0.86	0.96	0.85	0.88	0.94	0.98	0.86	0.66
330	0.93	0.98	0.92	0.95	0.89	0.82	0.94	0.86
360	0.93	0.98	0.92	0.94	1.01	1.12	0.92	0.80
ref	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05	0.00	0.40
45	0.18	0.15	0.09	0.05	0.05	0.05	0.00	0.32
90	0.18	0.15	0.09	0.05	0.05	0.06	0.00	0.29
135	0.18	0.15	0.09	0.05	0.04	0.04	0.00	0.36
180	0.17	0.15	0.09	0.05	0.07	0.06	0.00	0.30
225	0.16	0.15	0.09	0.05	0.06	0.06	0.00	0.30
255	0.17	0.15	0.09	0.05	0.06	0.06	0.00	0.29
270	0.16	0.15	0.09	0.05	0.06	0.06	0.00	0.29
285	0.18	0.15	0.09	0.05	0.05	0.05	0.00	0.35
300	0.17	0.14	0.08	0.04	0.05	0.06	0.00	0.23
315	0.17	0.14	0.08	0.04	0.05	0.05	0.00	0.26
330	0.19	0.15	0.09	0.05	0.04	0.04	0.00	0.34
360	0.19	0.15	0.09	0.05	0.05	0.06	0.00	0.32

⁸ Alle data kan als .CSV worden aangeleverd.

WINDVANGSCHAAL VOLGENS EAGM	
100	Utopie
90-99	Uitstekend
80-89	Zeer goed
75-79	Goed
70-74	Redelijk
60-69	Matig
50-60	Slecht
40-50	Zeer slecht
<40	Onaanvaardbaar

HUIDIGE SITUATIE 2024 - BOEZEMMOLEN #6			
WINDRICHTING	WINDVANGCIJFER	HOOFDWINDRICHTING	ONDERZOEKSRICHTING
REFERENTIE	100		
45	88	X	
90	85	X	
135	91	X	
180	87	X	
225	87	X	
255	86		X
270	86	X	X
285	92		X
300	77		X
315	80	X	X
330	90		X
360	90	X	

Windvangcijfers, niet gecorrigeerd aan de hand van het windregime, dat wil zeggen dat de windrichtingen niet zijn gewogen op basis van frequentie of effectieve windsnelheid:

Windvangcijfer hoofdwindrichtingen: **87/100**

Windvangcijfer onderzoeksrichting: **85/100**

3.4 Simulatiedata in relatie tot windregime

Om de simulatiedata te contextualiseren binnen het huidige windregime, wordt in dit stadium uitsluitend gekeken naar de frequentie van de wind uit de hoofdwindrichtingen. De weegfactor voor deze berekening is relatief eenvoudig: de frequentie (f) gedeeld door 100, vermenigvuldigd met de ongewogen score (WV₁). Dit resulteert in een gewogen windvangcijfer per windrichting (WV₂). Vervolgens wordt de som van deze getallen berekend om een totaalscore te genereren (WV_{2totaal}). Deze score is uitsluitend van toepassing op de hoofdwindrichtingen, vanwege de interpretatie van de windregimegegevens.

$$WV_2 = WV_1 * (\frac{f}{100})$$

$$WV_{2totaal} = \text{som van alle } WV_2 \text{ scores}$$

HUIDIGE SITUATIE 2024 - BOEZEMMOLEN #6 - WINDREGIME			
WINDRICHTING	WINDVANGCIJFER	WEEGFACTOR (F)	CIJFER
REFERENTIE	100		
45	88	6.88%	6.07
90	85	8.73%	7.42
135	91	10.38%	9.39
180	87	9.60%	8.37
225	87	17.95%	15.64
270	86	22.77%	19.53
315	80	13.86%	11.16
360	90	9.83%	8.86
		SOM=	86.43

Windvangcijfer voor de hoofdwindrichtingen gecorrigeerd aan de hand van windfrequentie:

Gecorrigeerde windvangcijfer hoofdwindrichtingen: 86/100

4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

4.1 Windregime

Uit de analyse van de Weibull-verdeling en de windrichtingsfrequenties blijkt dat het windregime op deze locatie wordt gedomineerd door wind uit het zuiden, zuidwesten en het westen, met de hoogste frequentie uit het zuidwesten (22,77%). De meest voorkomende windsnelheden liggen tussen 3 en 5 m/s (10 meter boven maaiveld), wat wijst op matige, maar consistente windomstandigheden. Dit biedt een goed windvangpotentieel voor de molen.

4.2 Huidige windvang

Om de huidige windvang te definiëren, is gebruikgemaakt van het gecorrigeerde windvangcijfer (zie 3.4), waarbij rekening is gehouden met de frequentie van de wind uit de verschillende hoofdrichtingen [N, NO, O, ZO, Z, ZW, W, NW]. Dit windvangcijfer vertegenwoordigt een totaalscore voor de gehele molenbiotoop, oftewel een volledige cirkel van 360°.

Windvangcijfer, Boezemmolen #6, huidige situatie 2024 =

86/100

De windvang van de molen in huidige situatie is aan te merken als zeer goed volgens de onderstaande schaal:

WINDVANGSCHAAL VOLGENS EAGM	
100	Utopie
90-99	Uitstekend
80-89	Zeer goed
75-79	Goed
70-74	Redelijk
60-69	Matig
50-60	Slecht
40-50	Zeer slecht
<40	Onaanvaardbaar

4.3 Beperkingen van het onderzoek en aannames

Dit onderzoek biedt een uitgebreide analyse van de windvang rondom Boezemmolen No. 6, met een bewuste focus op de balans tussen technische nauwkeurigheid en praktische toepasbaarheid. Bij elk wetenschappelijk onderzoek worden aannames gedaan, en ook bij dit onderzoek is dat het geval. Deze aannames zijn echter zorgvuldig gekozen om zo dicht mogelijk aan te sluiten op de realiteit, binnen de grenzen van de beschikbare kennis en middelen.

De gekozen methoden, waaronder steady flow simulaties en de toepassing van de Weibull-verdeling, zijn geselecteerd om relevante en betrouwbare inzichten te bieden, terwijl tegelijkertijd rekening is gehouden met de tijds- en middelenverdeling van het project. Hoewel het onderzoek geen technieken zoals transient flow simulaties omvat—die bijvoorbeeld de Kármán-vortexstraat en andere complexe stromingspatronen gedetailleerd zouden kunnen weergeven—is bewust gekozen voor een methodologie die een goede balans biedt tussen nauwkeurigheid en efficiëntie. Transient flow simulaties, die tijdsafhankelijke fluctuaties zoals turbulentie en windvlagen modelleren, zouden aanzienlijk meer tijd en middelen vergen. De gekozen aanpak biedt echter voldoende nauwkeurigheid

voor het doel van dit onderzoek: het in kaart brengen van de invloed van de omgeving op de windvang van de molen.

Daarnaast werd de Weibull-verdeling toegepast op alle windrichtingen als één enkele groep. Dit levert een nuttig algemeen beeld van de windomstandigheden op deze locatie, hoewel specifieke variaties per windrichting minder gedetailleerd zijn uitgewerkt. Dit besluit is genomen om de efficiëntie van het onderzoek te waarborgen, zonder dat dit ten koste gaat van de doelmatigheid van de resultaten.

Een ander punt van aandacht is de simplificatie van omgevingsfactoren zoals bomen in de directe omgeving van de molen. Hoewel individuele bomen niet afzonderlijk zijn gemodelleerd, is het terrein in zijn geheel wel beschouwd als een agrarisch polderlandschap, wat voldoende representatief wordt geacht voor de context van dit onderzoek.

Kortom, dit onderzoek is niet beperkt, maar biedt een analyse binnen de praktische beperkingen van tijd en middelen. De gemaakte keuzes in methodologie en modellering zijn erop gericht om een evenwicht te vinden tussen gedetailleerde technische inzichten en de toepasbaarheid van de resultaten voor de bescherming en optimalisatie van de molenbiotoop. Hoewel verdere verfijning en diepere technische analyses mogelijk zijn, biedt de huidige benadering een solide basis voor de praktische toepassing van de onderzoeksresultaten.

4.4 De molen(biotoop) en het vervolg

4.4.1 Vervolg onderzoek

De resultaten van dit onderzoek kunnen worden gebruikt om meerdere scenario's met elkaar te vergelijken en te beoordelen in hoeverre een nieuwbouwwijk invloed heeft op de windvang van Boezemmolen No. 6, gebaseerd op de windvangcijfer. Bij het beoordelen van de mogelijke impact van een windvangreductie dient de gemeente verschillende factoren in overweging te nemen.

4.5.2 De molen

De molen heeft een belangrijke functie als cultureel en historisch erfgoed. Deze functie draagt bij aan het behoud van de identiteit van de gemeenschap en heeft tevens toeristische en educatieve waarde. Daarnaast vervult de molen een rol in het lokale waterbeheer. Een adequate windvang is cruciaal om de molen operationeel te houden, wat noodzakelijk is voor het reguleren van het waterpeil in de omgeving. Beperkingen in de windvang kunnen deze functie in gevaar brengen, met mogelijk nadelige gevolgen voor het polderbeheer.

Bovendien draagt de molen bij aan het behoud van ambachtelijke kennis en vakmanschap, wat van zowel historisch als maatschappelijk belang is. Deze functies versterken de lokale identiteit en bieden waardevolle educatieve mogelijkheden voor de gemeenschap.

Bij het maken van afwegingen dient de gemeente ook rekening te houden met stedelijke ontwikkelingen in de omgeving. Het is van belang om een balans te vinden tussen nieuwe bouwplannen en het behoud van de molenbiotoop, waarbij de open ruimte en de functionele capaciteit van de molen beschermd blijven.

In een vervolgonderzoek zou kunnen worden berekend hoeveel water de molen in theorie zou kunnen verplaatsen, gebaseerd op het windregime, door de steady flow-resultaten proportioneel te schalen en de vermogenscurve van de molen te gebruiken. Voor een nauwkeurigere inschatting zou het noodzakelijk zijn om de relatieve reducties in windsnelheid per windrichting te berekenen en deze te wegen op basis van de windfrequentie per richting. Dit zou een indicatie kunnen geven van de hoeveelheid water die de molen kan verplaatsen op basis van het beschikbare windaanbod.

4.4.3 Cumulatieve verslechtering

Een ander belangrijk aandachtspunt is de stapelwerking van verschillende ontwikkelingen over de jaren heen. Cumulatieve effecten van eerdere veranderingen in de omgeving kunnen de windvang van de molen geleidelijk verminderen, waardoor de huidige situatie in een breder perspectief moet worden gezien.

Dit rapport benadrukt het belang van een weloverwogen besluitvorming, waarbij de erfgoedwaarde, de functionele rol in het waterbeheer, de maatschappelijke bijdrage van de molen, en de mogelijke cumulatieve effecten zorgvuldig worden afgewogen in relatie tot andere maatschappelijke belangen zoals woningbouw. Een analyse van deze factoren is essentieel om tot een verantwoord besluit te komen over de toekomstige ontwikkelingen rondom Boezemmolen No. 6.

De uiteindelijke beoordeling of een windvangreductie acceptabel of onacceptabel is, vereist een zorgvuldige belangenafweging door de gemeente.