

Contactpersoon:

Rijkswaterstaat Zee en Delta
T.a.v. [REDACTED]
Lange Kleiweg 34
2288 GK Rijswijk

Ons Kenmerk:
WP1412

Datum:
02/03/2026

Vergunningaanvraag Omgevingsregeling Plaatsing meetframe Noordzee

Geachte heer [REDACTED],

WaterProof heeft vanuit RWS opdracht gekregen voor het uitvoeren van het project 'Hydrodynamische metingen in windmolenparken op zee' met zaaknummer 31204910. Dit project is erop gericht om inzicht te krijgen in het effect van de interactie van windturbines met de zeestromingen, waardoor veranderingen in stroming, spatio-temporele patronen en stratificatie op kan treden. Deze effecten hebben vervolgens weer invloed op de dynamiek van fijn sediment en de primaire productie. Dit project wordt uitgevoerd onder het Raamovereenkomst Fysische metingen Perceel 7 Specialistisch Advies, Innovatie en Methodeontwikkeling, met zaaknummer 31188162.

Op 14/07/2025 ontvingen wij de beschikking (RWS-2025/19272) voor de eerste meetcampagne in en rondom het OWF Gemini. Het tweede deel van het project bestaat uit een meetcampagne in en rondom het OWF HKZ in 2026.

Voor het plaatsen van 4 meetframes gedurende twee maanden (eind maart tot begin juni 2026) in en rondom OWF HKZ is er wederom een vergunning in het kader van de Omgevingsregeling nodig.

Hierbij zouden wij - WaterProof Marine Consultancy & Services BV. (hierna WaterProof) - als uitvoerder van het project een vergunning in het kader van de omgevingsregeling willen aanvragen voor de werkzaamheden.

In het voorliggende document beschrijven wij ten behoeve van de aanvraag het project in meer detail. Hierin beschrijven wij de volgende onderdelen:

- 1) Werkwijze en veiligheidsmaatregelen
- 2) Plaatsing en ophalen meetopstelling
- 3) Meetopstelling
- 4) Zeewaardigheid
- 5) Locaties
- 6) Planning en looptijd
- 7) Maatschappelijke functies van het waterstaatswerk
- 8) Contactgegevens betrokken partijen.

1.1 WERKWIJZE EN VEILIGHEIDSMATREGELEN

De metingen worden verricht op 4 specifiek gekozen locaties op de zeebodem van het NCP in en rondom het HKZ windpark.

De gegevens die worden verzameld tijdens de meetcampagnes dienen ter verdere validatie van de numerieke modellen die zijn ontwikkeld in het Wind op Zee Ecologisch Programma (Wozep), om de kwaliteit van de voorspellingen te verbeteren. Daarnaast bieden deze metingen en analyses (naast de resultaten verzameld tijdens de OWF Gemini meetcampagne) waardevolle inzichten in de effecten van offshore windparken (OWF's) op fysieke en ecologische processen in de Noordzee.

Om deze doelstellingen te bereiken plaatsen wij 4 bodemframes (met verschillende meetinstrumenten) op twee locaties naast het OWF HKZ en twee binnen de grenzen van OWF HKZ, rondom een turbine.

Deze metingen worden uitgevoerd met meetframes die gedurende 2 maanden op de zeebodem blijven staan in de periode eind maart - begin juni 2026.

De plaatsing en het ophalen van de meetstations worden uitgevoerd met een betonningsschip van de Rijksrederij. Na afronding van het project worden alle meetstations uit het water gehaald en blijven er geen delen achter op de zeebodem.

1.2 PLAATSING EN OPHALEN MEETOPSTELLING

De gehele opstelling wordt geplaatst door gebruik te maken van de kraan van het schip, zie ook sectie 1.3 over de meetopstelling voor een overzicht van de onderdelen. Het meetframe wordt als eerste geplaatst door gebruik te maken van de zwaartekrachthaak in de kraan. Deze haak gaat open zo gauw het frame op de bodem staat.

Het schip verhaalt vervolgens 10-20 m, waarbij de zinkende lijn wordt uitgevierd. De ankersteen van 560kg wordt vervolgens op de bodem geplaatst met de kraan, terwijl de meetopstelling met de CTD-Divers en de onderwaterdrijvers voorzichtig mee het water in wordt begeleid.

Het schip verhaalt vervolgens 50 m, waarbij de ketting tussen beide ankerstenen wordt uitgevierd. De 4T ankersteen wordt met de kraan op de bodem geplaatst, terwijl de ketting tussen 4T steen en de sparboei wordt uitgevierd. Als laatste word de spar boei overboord gezet.

Op de locaties met een tweede markeringsobject plaatst het schip de 4T ankersteen, met ketting en spar op een afstand van ong 70m van het meetstation.

De opstelling kan in omgekeerde volgorde ook weer van de zeebodem verwijderd worden. Er zijn geen duikers nodig voor het plaatsen, onderhoud, of verwijderen van de meetopstelling.

Deze opstelling en plaatsingsmethode is aangepast t.o.v. de Gemini campagne (2025) die met de MS Terschelling is uitgevoerd. Op 26/01/2026 is de technische meetopzet en plaatsingsmethode besproken met met [REDACTED] (Afdeling Mobiel Meten, RWS CIV), [REDACTED] (Afdeling Mobiel Meten, RWS CIV) en [REDACTED] (Adviseur Operationele Contact Centrum Rijksrederij, RWS ZD). Naar aanleiding van dit overleg is op basis van hun adviezen de meetopzet aangepast naar onderliggende opstelling.

1.2.1 Veiligheidseisen

WaterProof is gespecialiseerd in het uitvoeren van metingen op zee en heeft een uitgebreide track-record van succesvol en veilig uitgevoerde projecten op zee. Veiligheid en gezondheid staat in de uitvoering van projecten voorop. Doorgaans werkt WaterProof met grote offshore aannemers, die op het gebied van veiligheid en gezondheid uitgebreide eisen stellen.

Allereerst is WaterProof ISO 9001:2015 (kwaliteit), ISO 14001:2015 (milieu) en ISO 45001:2023 (veiligheid en gezond werken) gecertificeerd en worden in de projectuitvoering vaste procedures gevolgd om de kwaliteit en veiligheid te borgen.

Voor de start van de werkzaamheden worden een *Project Management Plan (PMP)* en *Hazard Assessment Risk Control (HARC)* opgesteld waarin de werkzaamheden nauwkeurig worden beschreven en een uitgebreide risico-assessment wordt opgesteld. Het *Uitvoeringsplan* (onderdeel van het PMP) en HARC worden gedeeld met de Kustwacht, Rijksrederij en het MCC van HKZ.

Daarnaast vragen wij een NSA aan en delen wij ons werkplan met de Kustwacht.

Zoals standaard bij offshore werkzaamheden, wordt voorafgaand aan daadwerkelijke werkzaamheden een Toolbox meeting gehouden aan boord met de bemanning om de procedures door te nemen en het gebruik van de verplichte persoonlijke beschermingsmiddelen te benadrukken. Ook worden de verwachte weersomstandigheden besproken, zodat de werkzaamheden enkel in goedweerscondities worden uitgevoerd.

1.3 MEETOPSTELLING

De instrumenten bestaan uit hydrodynamische sensoren die verschillende parameters meten:

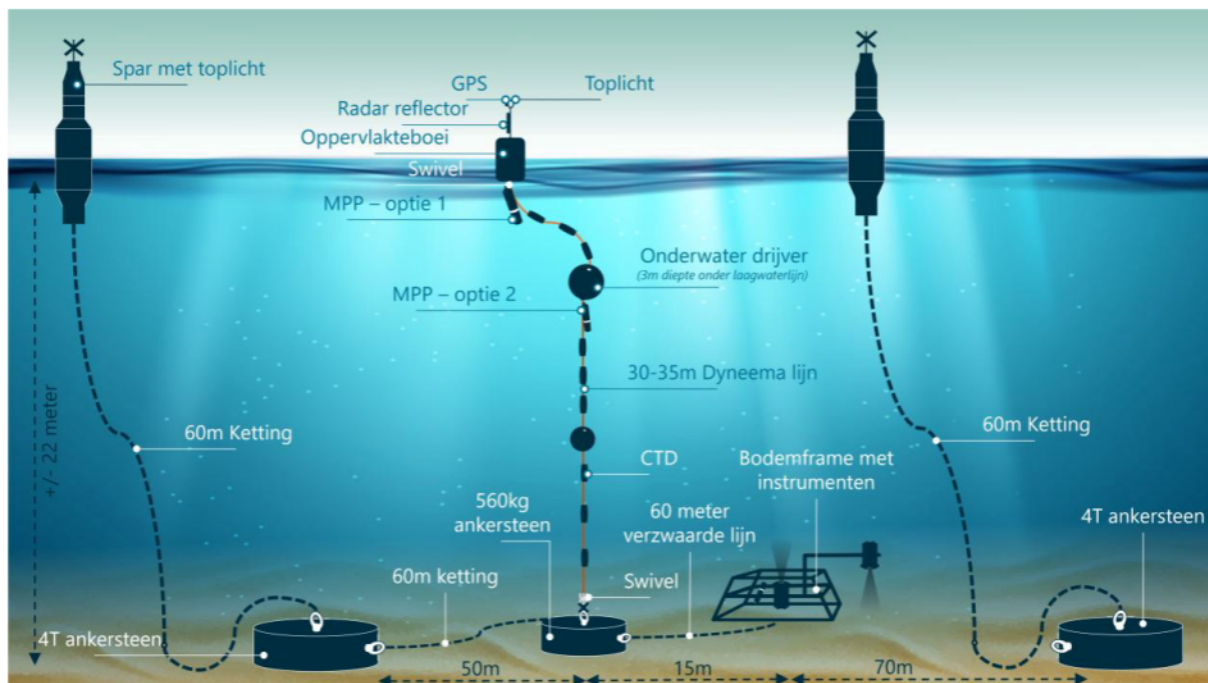
- Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)
- Multiparameter Probe (MPP)
- Conductivity, temperature, and depth sensor (CTD).

De ADCP's zijn actieve akoestische sensoren die signalen van 500 en 1000 kHz gebruiken, deze frequenties zijn ruim boven de frequenties die hoorbaar zijn voor bruinvissen (tot 160 KHz) en impact kan dus worden uitgesloten.

De ADCP's worden geplaatst op meetframes, die via een verzwaarde lijn van 60m op 10-20m afstand van een 560kg meetsteen met een oppervlakteboei worden geplaatst. Langs de lijn worden CTD Divers en onderwaterdrijvers geplaatst. De oppervlakteboei heeft een radarreflector, verlichting, een GPS tracker en is voorzien van contactgevens. In Figuur 1 hieronder geven we een idee van hoe de opstelling eruit komt te zien. Deze opstelling wordt op vier locaties geplaatst.

De markeringsobjecten (Spar, ketting en ankerstenen) worden geleverd door de markeringsdienst van RWS.

Het CIV Offshore & Shipping adviseert ons op basis van meer dan 50 jaar praktijkervaring bij het ontwerp van de verankeringsofstelling van de meetsteen. Dit bedrijf is een specialist in het ontwerpen en levering van verankeringsmateriaal.



Figuur 1. Schematische weergave van de meetopstelling (niet op schaal).

1.3.1 Bodemframe

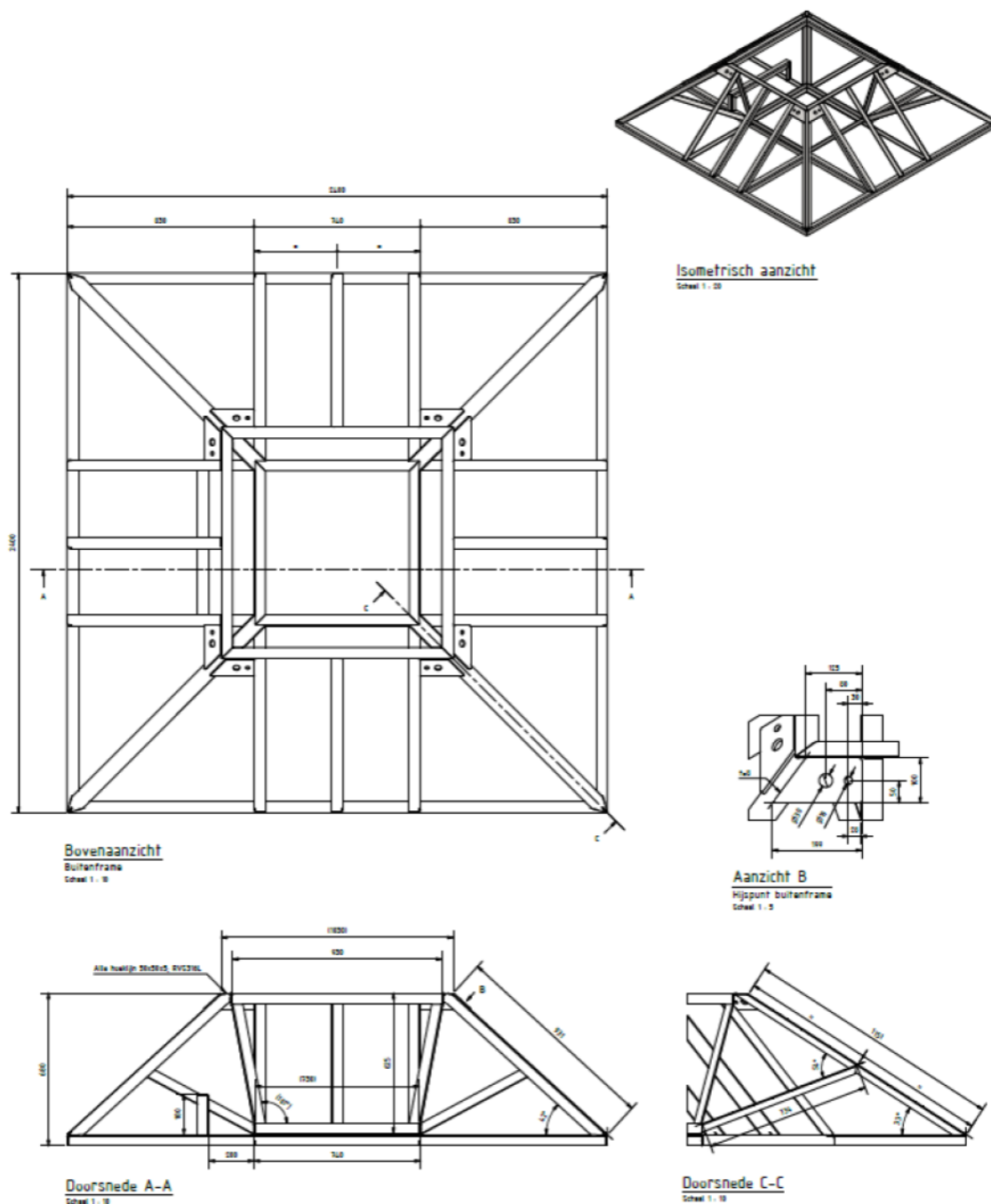
Het frame waarin de ADCP's en MPP bevestigd worden, is een open constructie met stalen L-vormige beugels. Door dit ontwerp is het frame bestand tegen hydrodynamische krachten tijdens stormen met een terugkeertijd van 1/50 jaar.

Om succesvolle metingen te garanderen, werden structurele ontwerpcriteria en risico's geïdentificeerd. Een sterk en stabiel, maar lichtgewicht piramidevormig; transporteerbaar frame werd geoptimaliseerd voor de meetopstelling. Dit frame is succesvol ingezet in de Gemini campagne (2025) en wordt tevens meer dan een jaar op 14 locaties in HKW geplaatst.

Door dit ontwerp is het frame bestand tegen hydrodynamische krachten tijdens stormen met een terugkeertijd van 1/50 jaar. Het frame bestaat uit L-vormige balken, waarbij de balken die op de zeebodem rusten in een L-vorm zijn geplaatst om het oppervlak tussen het frame en de zeebodem zo groot mogelijk te maken en zo zijdelingse beweging te voorkomen.

Het frame heeft een afmeting van 2.4x2.4x1.0m. Het frame is afgebeeld in Figuur 2. Het totale gewicht van het frame is 500 kg. Het frame is ontworpen door WaterProof en is geproduceerd door Galesloot Constructiebedrijf.

Het frame is gemaakt uit RVS316L en daarnaast uitgerust met Aluminium anodes (ipv zink anodes) om corrosie waar mogelijk te mitigeren. Daarnaast zijn ze zo ontworpen dat deze goed aan te haken zijn met een ROV indien nodig.



Figuur 2. 3D tekening van het bodemframe

1.3.2 Verzwaarde anker(bodem)lijn

Het bodemframe en de 560kg meetsteen zijn aan elkaar verbonden door middel van een 60 meter verzwaarde anker(bodem)lijn. Deze lijn is een Hercules touw van 18mm in RVS versie.

In deze lijn worden d.m.v. persklemmen ogen in de lange draad gemaakt. Aan deze ogen/lussen wordt het bodemframe opgehaald. Het sterkteverlies door toevoeging van de lussen bedraagt ca. 20%.



Figuur 3 Specificaties verzwaarde anker(bodem)lijn met extra lussen.

1.3.3 Meetsteen

De meetsteen bestaat uit een:

- 560kg ankersteen
- meetlijn
- oppervlakte boei.

A. 560kg ankersteen

De 560kg ankersteen wordt geleverd door markeringsdienst van RWS.

B. Ankerlijn

De ankerlijn bestaat uit een 30-35m Dyneema lijn welke de verbinding vormen tussen de 560kg ankersteen en de oppervlakte boei (Figuur 4). Aan deze ankerlijn zijn CTD-Divers bevestigd voor het verzamelen van data over de gehele waterkolom.

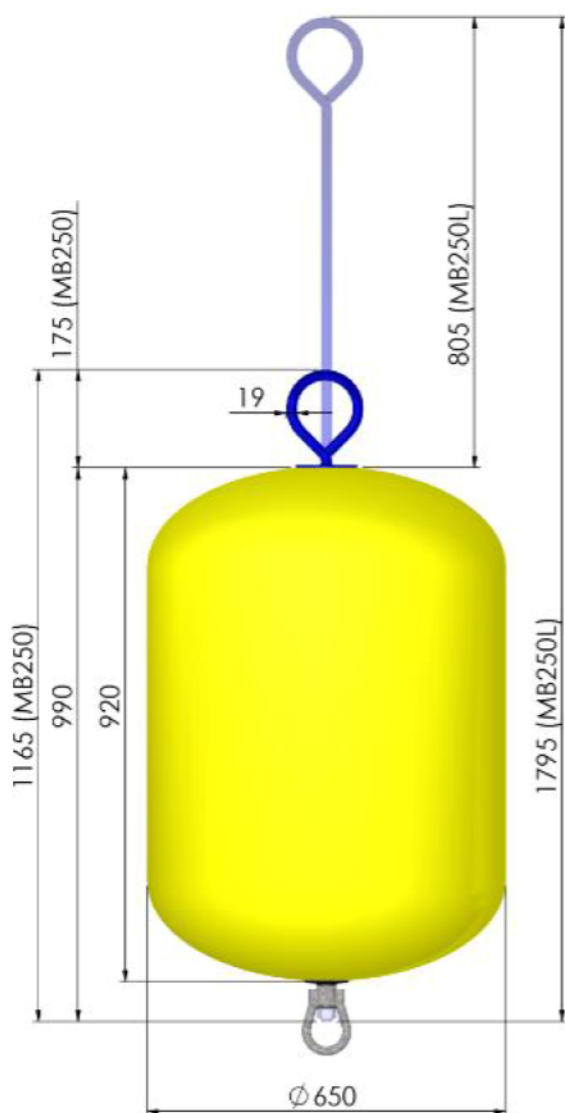
De lijn wordt strak naar boven gehouden door onderwaterdrijvers die tot ongeveer 3m onder de laagwaterlijn aan de lijn bevestigd zitten.

Aan deze lijn wordt niet gehesen.

De Dyneema lijn is verbonden met de 560kg ankersteen en de oppervlakte boei via een schakel en een wartel met buslager. De wartel zorgt ervoor dat de lijn zo min mogelijk in draait en helpt daarmee ook tegen slijtage. De verbinding tussen de schakel en de Dyneema lijn is versterkt door een gesloten kous met bescherm 'sok' tegen slijtage.

C. Oppervlakte boei

De oppervlakte boei is een Polyform MBL 250L boei met lange staak (Figuur 4). De boei dient alleen voor het bovenwater houden van de meetlijn. Aan de boei wordt niet gehesen.



Figuur 4 Specificatie van de oppervlakteboei MBL 250L.

D. Verankering

De verankering, bestaande uit de onderstaande onderdelen, wordt geleverd door de markeringsdienst van RWS.

- 560kg ankersteen
- Bodem ketting
- 4T ankersteen

- Ankerketting
- Sparboei.

E. Sparboei

De sparboei dient als markering voor de scheepvaart en om de opstelling weer uit het water te kunnen halen. Voor deze markeringsboei wordt er gebruik gemaakt van de sparboei 1200 met een geel kruis als topteken, gele verlichting en radarreflector.

De markeringsdienst van Rijkswaterstaat levert deze sparboeien. Deze spar is geschikt bevonden voor de hydrodynamische condities op de plaatsingslocatie. De boei voldoet aan de IALA-richtlijn voor boeien in paragraaf 2.5 voor speciale markering.

1.4 ZEewaardigheid

Voor het aantonen van de zeewaardigheid van de meetopstelling hebben wij de stabliteitsberekening voor de verankeringsopstelling doorerekend met ons Blue Anchor model, zie hiervoor bijlage 1.

1.4.1 Work Load Limit

Tabel 0.1 geeft de specificaties van de onderdelen. Alle onderdelen van de apparatuur zijn (zeer) conservatief gekozen met voldoende kracht, ook in niet-ideale opstellingen of hoeken.

De vetgedrukte onderdelen worden gebruikt voor het hijsen van de 4T ankersteen. Deze onderdelen hebben daarom een hogere WLL met een veiligheidsfactor van minimaal factor 5.

Tabel 0.1 Workig Load Limit (WLL) van de hijsonderdelen aan de meetopzet.

Onderdeel	Diameter (mm)	Lengte (m)	Breeksterkte	WLL	Veiligheidsfactor
Hijsoog Sparboei	1200	4.70m			
Ankerketting (bovenste deel)	25mm	20m	40.2T	8T	5.0
Ankerketting (onderste deel)	32mm	40m	65.7T	13T	5.0
Hijsoog 4T ankersteen					
Bodem ketting	22mm				
Hijsoog 560kg ankersteen					
Ankerlijn (Dyneema)	20mm	30-35m	34.7T	3T	11.6
Verzwaarde anker(bodem)lijn	18mm	60m	9.4T	1.8T	5.2
Bodemframe	-	-	-	6.0T	5.0
Rondstrop (aan bodemframe)	-	4m	42T (2x21T door U-bevestiging)	6.0T (2x3.0T door U-bevestiging)	7.0

1.5 LOCATIES

Tabel 1 en Figuur 5 geven de beoogde coördinaten en kaart van de meetlocaties weer.

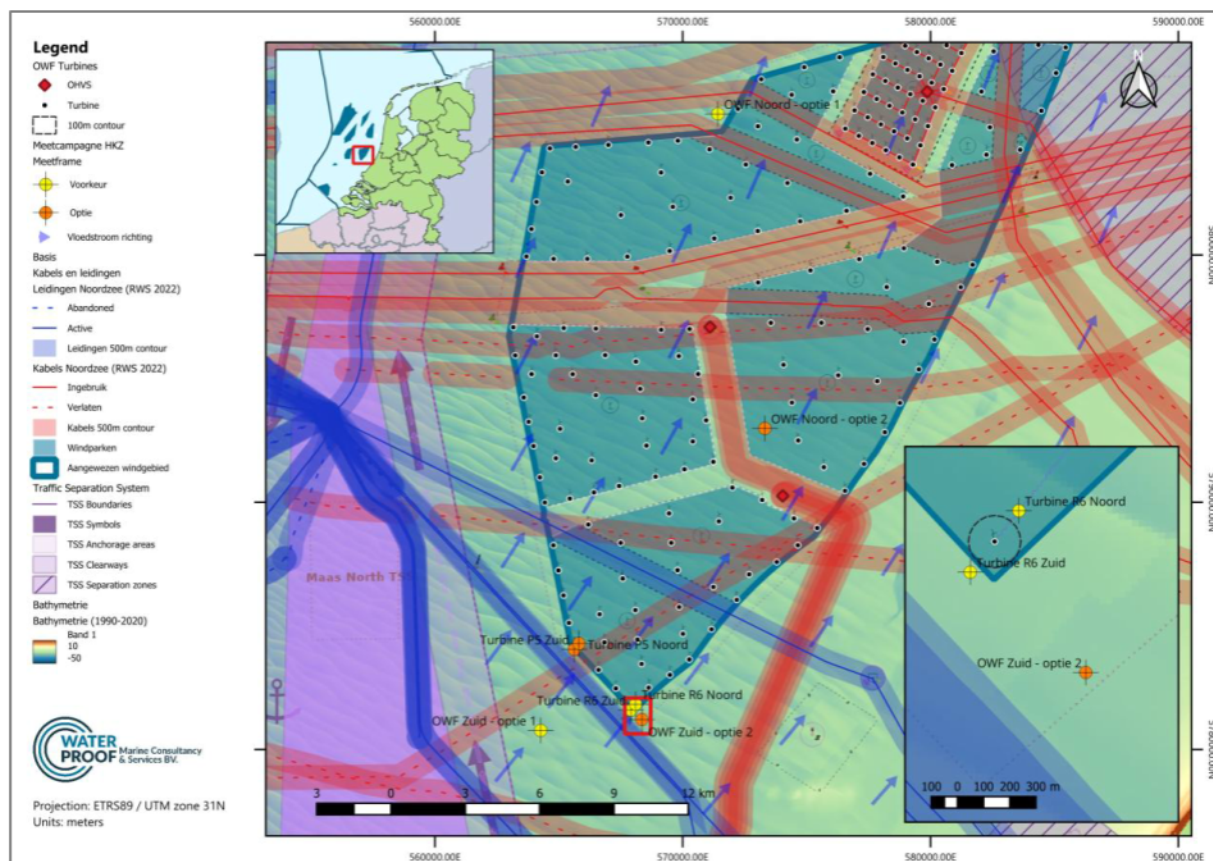
Naast de twee locaties bij turbine R6, plannen wij back-up locaties bij de turbines P5. Wanneer blijkt dat er tijdens de meetperiode onderhoud aan turbine R6 benodigd is, plaatsen wij de meetframes op de back-up locaties P5.

De locaties van de meetframes bij de turbines liggen binnen de 500m veiligheidszone. Deze locaties zijn in afstemming met Vattenfall [REDACTED] gepland. In Bijlage 2 is de schriftelijke toestemming hiervoor bijgevoegd.

Bij station OWF Zuid hebben we de voorkeur voor plaatsing op 3km van het OWF (optie 1) maar wordt bij negatief advies van de Kustwacht gepland op locatie OWF Zuid - optie 2.

Tabel 1 Coördinaten van meetlocaties bij OWF Gemini

HKZ		ETRS89 UTM31N (EPSG:25831)		ETRS89 (EPSG: 4258)	
Meetstations	Voorkeur/optie	X	Y	Long	Lat
OWF Noord - optie 1	Voorkeur	571413	5805706	4.049567226	52.39693443
OWF Noord - optie 2	Optie	573311	5792987	4.074683862	52.28234938
OWF Zuid - optie 1	Voorkeur	564262	5780774	3.939728323	52.17369405
OWF Zuid - optie 2	Optie	568349	5781214	3.999566565	52.17716329
Turbine R6 Noord	Voorkeur	568093	5781834	3.995947564	52.18276559
Turbine R6 Zuid	Voorkeur	567907	5781598	3.993187095	52.18067206
Turbine P5 Noord	Optie	565806	5784286	3.962976377	52.20509102
Turbine P5 Zuid	Optie	565620	5784051	3.96021605	52.20299673



Figuur 5 Kaart van de meetlocaties op de Noordzee bij het OWF HKZ, met de te plaatsen meetframes als de gele (en oranje als back-up) ronde cirkels.

Deze meetlocaties zijn gekozen op basis van de volgende factoren:

- Niet in de scheepvaartroutes
- Niet binnen ankergebieden
- Binnen de 500m veiligheidszone van het windpark
- Niet binnen de veiligheidszones (500m) van platformen
- Bij voorkeur niet in de buurt van kabels en leidingen
- Niet in militaire zone
- Geen archeologische objecten in de nabijheid
- Meetframes rondom de turbine op 150m van de turbine
- Niet binnen de 50m NO GO zone van een turbine.

1.6 PLANNING EN LOOPTIJD

De metingen bij OWF HKZ vinden plaats in 2026 gedurende een aaneengesloten periode van 2 maanden. De planning is weergegeven in Tabel 2.

De meetstations worden zo uitgerust dat de instrumenten tussentijds geen onderhoud nodig hebben. Er wordt gezorgd voor voldoende dataopslag, batterij capaciteit en bescherming tegen aangroei.

Het ophalen van de meetopstellingen en daarbij het einde van de eerste meetcampagne zal plaatsvinden begin juni 2026.

Tabel 2 Planning project.

Activiteit	Wanneer
Plaatsing meetopstelling	Week 14 (30/03/2026)
Ophalen meetopstelling	Week 23 (02/06/2026)

1.7 MILIEU GEVAARLIJKE STOFFEN

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de milieu gevaarlijke stoffen die zich in de meetopstelling kunnen bevinden.

De eerste voorgestelde Zink anodes vervangen we door Aluminium anodes om de impact op het milieu te verkleinen.

Tabel 2. Overzicht van milieugevaarlijke stoffen

Installatie / apparaat	Gevaarlijke stoffen	Vorm	Relevantie
CTD-Diver	Lithium (gesealde batterij), fluorpolymeren, kunststoffen Koper, POM en Viton (Anti bio-fouling shield)	Ingesloten	Alleen risico bij afval of schade
Wimo MPP	Kaliumhydroxide, zink, mangaan (Alkaline batterijen) Epoxy, kunststoffen, edelmetalen	Ingesloten	Zeer beperkt
ADCP Signature	Kaliumhydroxide, zink, mangaan (Alkaline batterijen) Lood (PZT) (in piezo-elektrische transducers) Elektronica (WEEE categorie) Kunststoffen en epoxy	Ingesloten	Relevant bij afval
Aluminium anodes	Aluminium, zink, indium	Emissie tijdens gebruik	Direct milieurelevant
RVS frame	Chroom, nikkel	Vast	Beperkt

1.8 MAATSCHAPPELIJKE FUNCTIES VAN HET WATERSTAATSWERK

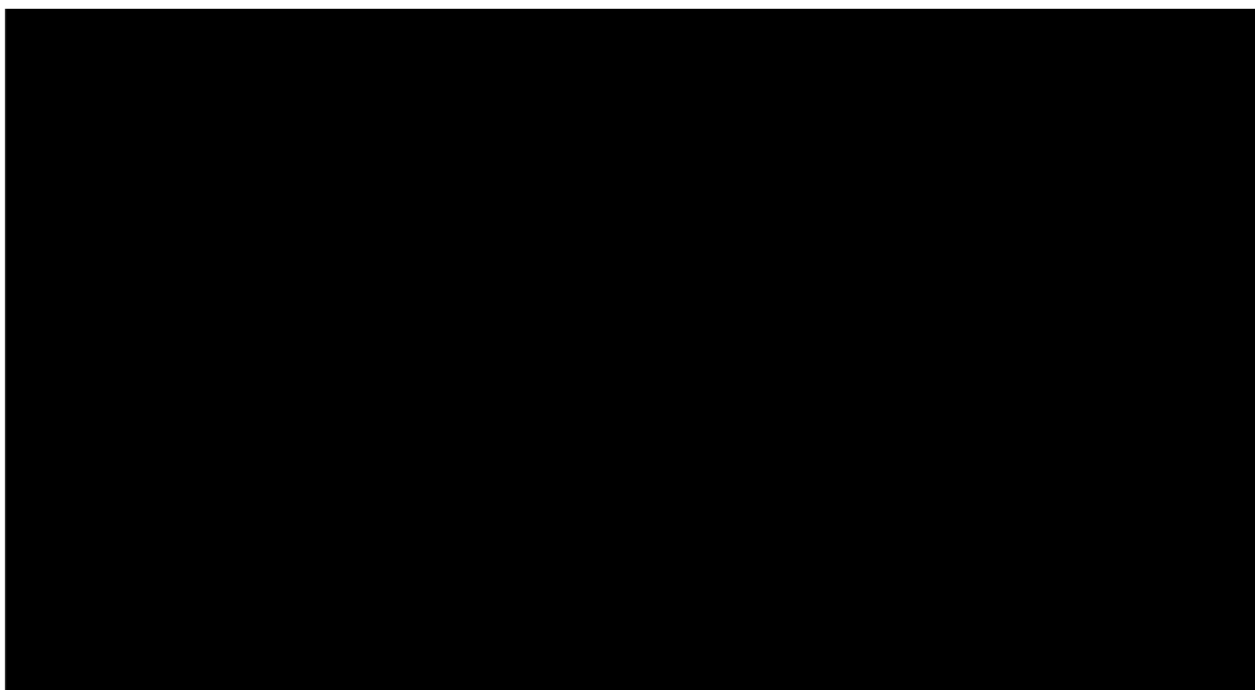
De sparboei en de verankering wordt geleverd door de markeringsdienst van RWS (contact [REDACTED]), is zeewaardig en geschikt bevonden voor de plaatsingslocaties. De sparboeien zijn uitgerust met geel kruis als topteken, gele verlichting en radarreflector. Hiermee voldoet de Spar1200 boei aan de eisen die gelden voor verlichting en markering volgens de IALA-richtlijn voor boeien. De activiteit vormt geen gevaar voor andere gebruiksfuncties (o.a. scheepvaartveiligheid) van de Noordzee op de gekozen locatie.

Bij plaatsing zal een aanvraag voor NSA (North Sea Activity) formulier worden ingediend bij de kustwacht, zodat de locaties van de frames kunnen worden opgenomen in een Bericht aan Zeevarenden (BaZ).

1.9 CONTACTGEGEVENS BETROKKEN PARTIJEN

De betrokken personen staan weergegeven in de contact matrix in Tabel 3. Daarnaast zijn alle onderdelen van de meetset-up gemarkeerd met contactgegevens zodat ze te herleiden zijn naar WaterProof.

Tabel 3 Contactmatrix van alle betrokken personen.



Wij hopen u hiermee voldoende informatie te hebben verschaft met betrekking tot de uitvoering van deze werkzaamheden en zien uw beslissing over de vergunning graag tegemoet.

Mocht u aanvullende vragen hebben naar aanleiding van onze aanvraag, neem dan gerust contact op.



WaterProof Marine Consultancy & Services BV.
IJsselmeerdijk 2
8221 RC Lelystad
Nederland
www.waterproofbv.nl

I



BIJLAGE 1A

Stabiliteitsberekeningen

BUOY DIMENSIONS AND ANCHOR STABILITY CALCULATIONS

1.1 INTRODUCTION

This memo outlines the method for calculating the stability of a buoy anchor system. A buoy anchor system is considered stable if the anchor does not move under normative conditions. The considered mooring system consists of a spar buoy (SP1200), a 20 m steel chain (25 mm steel, 40t breaking load, 11 kg/m), a 40 m (20 kg/m) chain and a 4t reinforced concrete anchor stone (Figure 1).

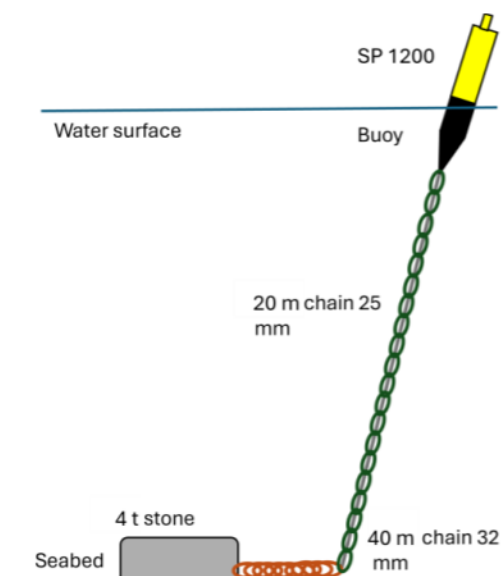


Figure 1. Schematic buoy setup (not to scale)

The stability of the total setup is determined by the environmental conditions and the dimensional details of the buoy setup.

1.2 ENVIRONMENTAL CONDITIONS

In this memo we will show examples of a 1 in 1 year storm (see Table 1). This storm duration is chosen as the setup will be deployed for only two months (the calmer months of April and May). Three extreme parameters may occur: extreme wave heights, extreme currents and extreme winds. To determine the normative condition, all three need to be considered. The local depth does not exceed 25m. Conservatively, the 25m depth case is discussed in detail in the results section.

Table 1. Details of parameters for 1 in so many years storm, taken from Metocean Study Hollandse Kust (west) Wind Farm Zone Version December 2020.*

Table 9.22 Associated parameters to extreme H_{m0} , CS and U_{10} at HKW2019

Associated parameters to extreme H_{m0}							
Parameter	T_R [years]						
	1	2	5	10	50	100	1000
Extreme H_{m0} [m]	5.6	6.0	6.5	6.8	7.5	7.7	8.5
Depth-Averaged CS [m/s]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Wind speed at 10mMSL [m/s]	20.0	21.5	22.3	22.4	23.7	23.6	24.6

Associated parameters to extreme depth-averaged Total Current Speed							
Parameter	T_R [years]						
	1	2	5	10	50	100	1000
Extreme depth-averaged total current speed [m/s]	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.5
Significant wave height [m]	3.2	3.8	3.8	3.9	4.7	4.7	5.2
Wind speed at 10mMSL [m/s]	16.7	18.9	17.9	19.1	22.5	22.7	25.1

Associated parameters to extreme wind speed at 10mMSL							
Parameter	T_R [years]						
	1	2	5	10	50	100	1000
Extreme 10-minute wind speed at 10mMSL [m/s]	27.5	28.9	30.6	31.6	34.3	35.3	38.5
Significant wave height [m]	4.8	5.1	5.5	5.7	6.1	6.2	6.4
Depth-Averaged CS [m/s]	0.6	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

According to the Le Méhauté diagram (Figure 2) these parameters are captured with sufficient accuracy by third order Stokes theory. Although higher order Stokes waves would hardly improve the resulting wave description, 5th order Stokes theory will be used, as higher order Stokes waves may be necessary for future calculations. In the diagram H represents the wave height, g represents the gravitational acceleration, T represents the wave period and d represents the local depth.

* This dataset is used as it is the closest to the considered wind farm.

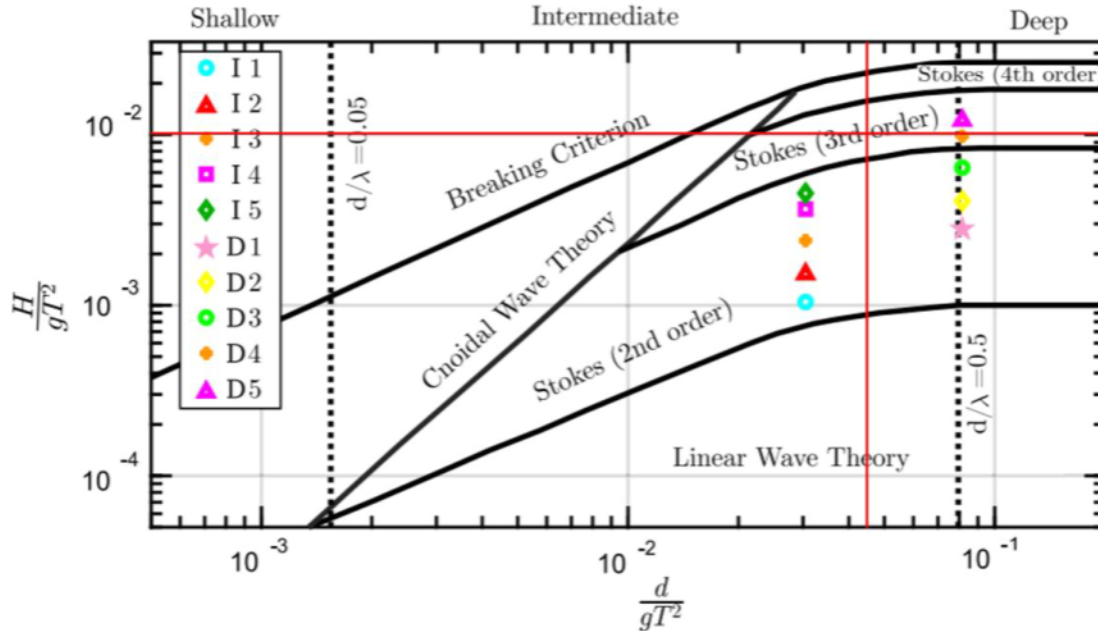


Figure 2. Le Mehaute diagram with red lines showing considered case. Taken from: *Assessing the validity of regular wave theory in a short physical wave flume using particle image velocimetry*.

The Raschii package in Python (<https://pypi.org/project/raschii/>) has readily implemented 5th order Stokes wave theory. This package requires the wave height, the local depth and the period to determine the wave characteristics. It returns the local velocities and the water surface elevation. Since a Jonswap spectrum is used, 5th order waves are used for all wave components.

1.3 SETUP CHARACTERISTICS

The setup consists of a buoy, a 20m chain of 25mm (11kg/m), a 40m chain of 32 mm (20kg/m) and a 4t anchor stone. All components can move; their movement is determined using the standard method of equations of motion based on a force balance.

The calculation considers the length and the stiffness of the steel wire, as well as the stiffness of the chain. The length of the 25mm chain is $L_{c25} = 20m$. The stiffness of the chain k_{c25} is defined as

$$k_{c25} = 500 \text{ kN/m}$$

The stiffness of the 32 mm chain is

$$k_{c32} = 500 \text{ kN/m}$$

And the length is $L_{c32} = 40m$

The stiffness of the different chains does not differ as it is an irrelevant parameter in terms of dampening the peak forces. Therefore, the stiffness is chosen as high as numerically feasible as to not underestimate the forces acting on the system. Increasing the stiffness even more would require very small time steps to resolve the equations of motion.

The length of the buoy $L_b = 4.7m$ and the maximum diameter is 1.2 m (Figure 3).

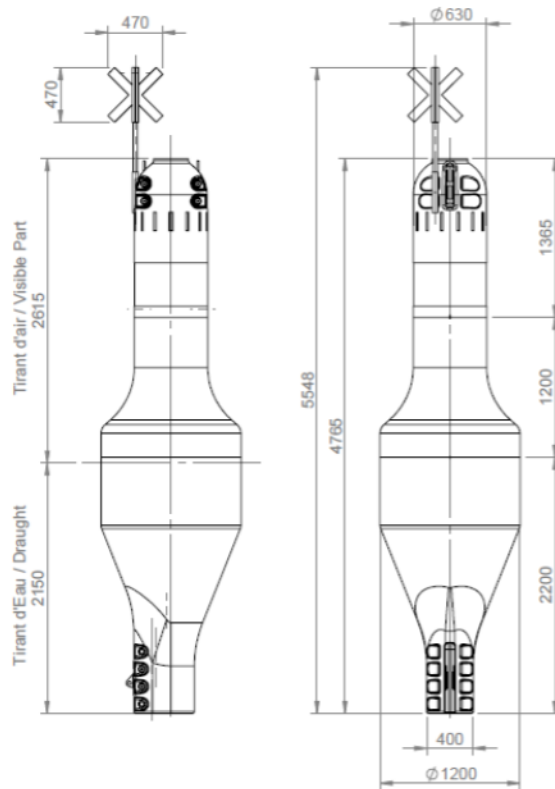


Figure 3. Buoy characteristics SP1200

The buoy has a ballast weight to ensure its vertical position in quiescent water. The buoy's axis of rotation is close to the location of the ballast weight. The axis of rotation, however, depends on the added mass around the buoy. This entails that the wetted part of the buoy effectively weighs more. In equilibrium, about 1.6m of the buoy is below the water surface. A reasonable estimate of the height of the centre of mass is $H_{cm}=1.8m$. A more precise estimate is given by

$$H_{cm} = \frac{\int_{L_b} (dm_b + dm_w) L' dL'}{\int_{L_b} (dm_b + dm_w) dL'}$$

Here dm_b represents a portion of the buoy's weight, while dm_w represents the portion of the mass contributed by the water over height dL' . In this definition the height of the centre of mass depends on the depth of the buoy in the water. For ease of calculation the centre of mass is taken as constant. In the presented cases $H_{cm}=1.8m$ is the average height of the centre of mass. The centre of mass shifts between 1.6m and 2.1m, in other words, taking the average does not lead to significant deviations.

1.4 STABILITY CALCULATIONS

The in-house developed BlueAnchor tool is applied to conduct these calculations, more details on this tool are added as an appendix. The BlueAnchor software is developed to determine the stability of structures at sea. This is done for a 2D sea state, which can be adjusted to the local relevant conditions. The software generates an irregular wave field e.g. based on the Jonswap spectrum combined with 5th

order Stokes waves. The structure is then subjected to the given flow field. For each component of the evaluated structure, the force balance (and if applicable the torque balance) is set up. The force balance is then integrated in time so that the system of equations can be solved. The output of the calculations are the positions of the different components of the structure, and the forces in the connections between the different components. The calculations are here run three times for a wave series of 1 hour.

More details on the BlueAnchor tool is provided as an appendix.

2 RESULTS

2.1 PRE-PROCESSING RESULTS

The shape of the buoy is simplified to a rotationally symmetric shape. The buoy's weight distribution depends on the wetted length. Figure 4a shows an example of the weight distribution for a ~1/3 wetted buoy. The water taken into account is consistent with an added mass coefficient of 0.5. The total mass of the buoy shown in this figure is 950 kg, excluding the water layer. The buoy shape and the double walled nature of the buoy along with its ballast weight is also included in Figure 4a.

The buoy moment of inertia depends on the wetted length of the buoy (Figure 4b) and can be calculated once the mass distribution and centre of mass are known.

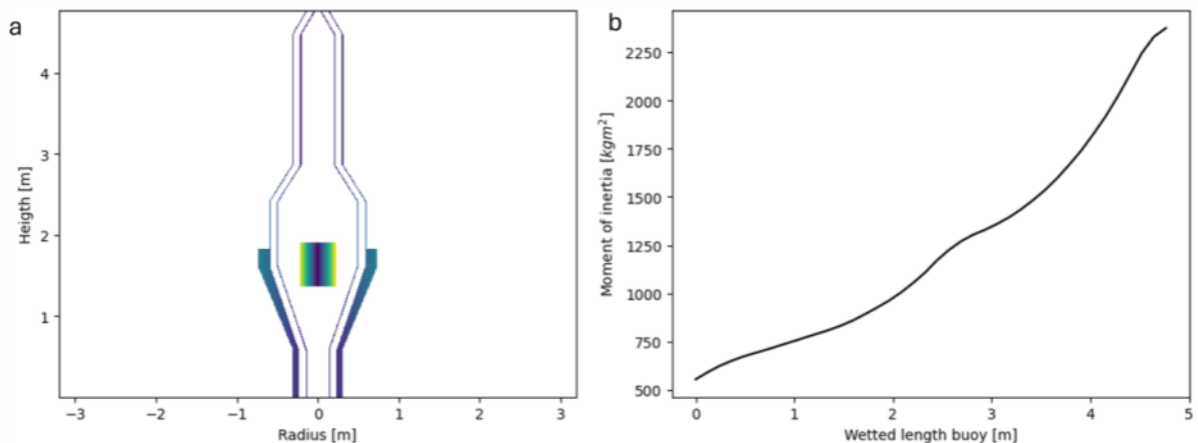


Figure 4. a) Rotational weight distribution of the buoy. The coloured bar has been omitted since values depend on the resolution of the image. b) Moment of inertia of wetted buoy

The immersed length of the buoy typically results in a moment of inertia of around 1000 kgm².

The conditions provided in Table 1 are evaluated in the following sections.

2.2 MAXIMUM WAVE HEIGHT

The conditions defining the max wave height scenario are:

- Significant wave height: 5.6 m
- Wave period: 10.3 s
- Tidal current: 0.6 m/s
- Max wind velocity: 20.0 m/s

The 10.3 second wave period is included in table 9.5 of *Metocean Study Hollandse Kust (west) Wind Farm Zone* Version December 2020.

In order to reduce computational time 3 times 1 hour has been computed in stead of 1 time 3 hours. In the figures below the worst case of these 3 times 1 hour will be shown.

The location of the centre of mass of the buoy is restricted by the length of the chain combination (Figure 5a) and depends on the wave height (Figure 5b).

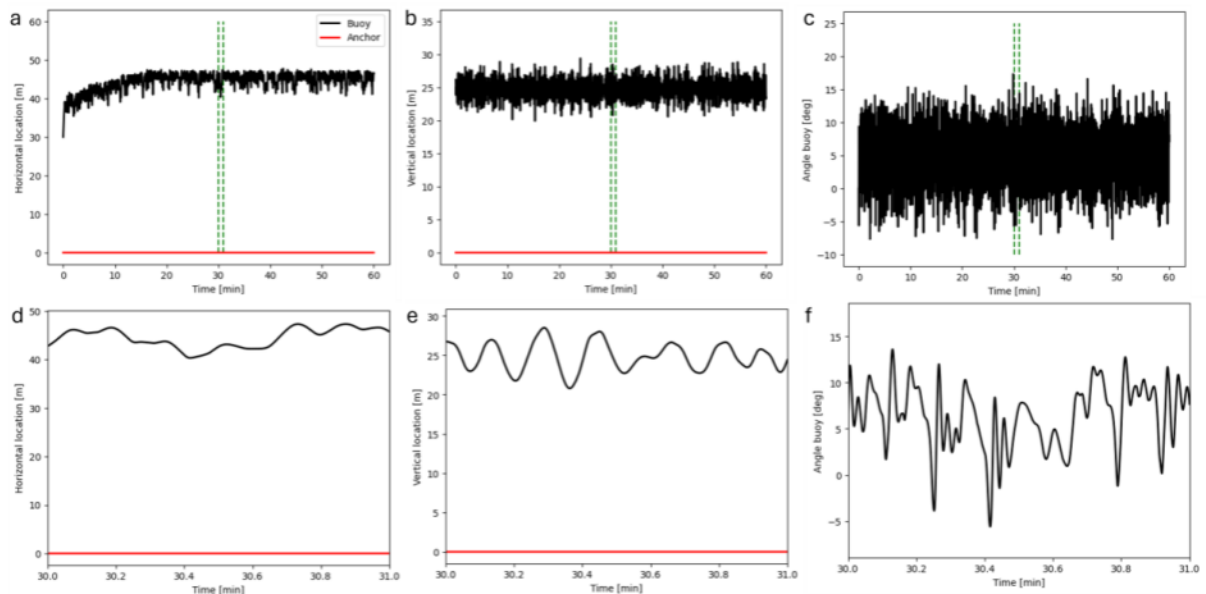


Figure 5. Time series for one of the one hour conditions that represent a 1 in 1 year storm. a) Horizontal location of the buoy and anchor. b) Vertical location of the buoy and anchor. c) Rotational angle of buoy. The green dotted lines represent the time period that is enlarged in figures d, e and f below.

The buoy angle does not tend towards 0 degrees as both the tension force and the wind force continuously push/pull the buoy skew (Figure 5c).

Three checks are performed:

- Does the buoy remain above water level? If the buoy gets below the water for a few seconds in extreme conditions this is not considered detrimental (>99% of time >1.3m above surface).
- Does the tension in the 25 mm chain remain below the breaking load? The 32 mm chain will then also be below the breaking load.
- Does the tension in the connection between the chain and the anchor remains below the threshold at which the anchor moves?

The stability of the anchor is already illustrated in Figure 5; safety factors are also determined in the following sections.

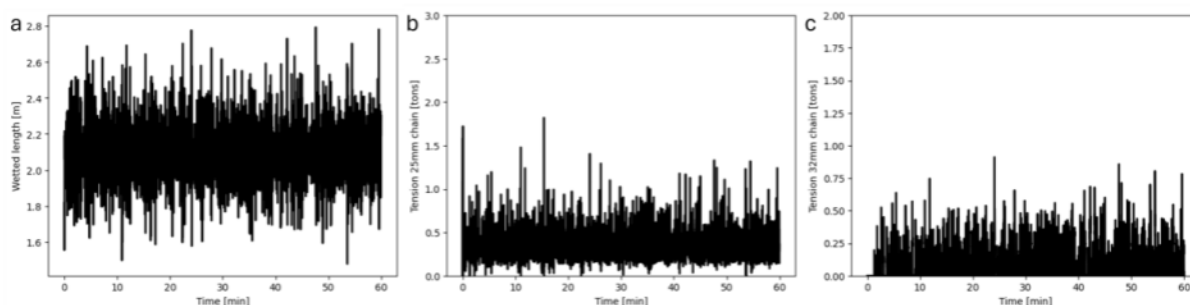


Figure 6. a) Wetted length of the buoy. b) Tension in the 25mm chain. c) Tension on the connection between the 32 mm chain and the anchor.

The buoy remains above water because its wetted length never exceeds 3.0m, i.e. at least 2 m of the buoy always remains above the water surface (Figure 6a). The tension in the 25 mm chain is close to 2t representing a safety factor of 20 compared to the breaking load (Figure 6b, Table 2). Finally, the maximum tension over the 3 times 1h storm is approximately 1t at the connection point with the anchor, this tension acts only in the horizontal direction. The maximum allowable tension in the last part of the chain is, in line with *G1066 THE DESIGN OF FLOATING AID TO NAVIGATION MOORINGS*:

$$T_{max} = gW_a\mu_s$$

With g denoting the gravitational acceleration, W_a denoting the weight of the anchor in water (2.3 tons) and $\mu_s = 1$ denoting the friction coefficient between the seabed and the anchor stone. In this case the safety factor thus exceeds 2.3 (Table 2), which is well above the 1.5 as used in *G1066 THE DESIGN OF FLOATING AID TO NAVIGATION MOORINGS*. Note that effects such as burial of the anchor stone, or the rock stopping effect are not included.

Table 2. Summary of results for 1 in 50 year storm with max wave heights. Green means pass.

Check	Result	Max allowable	Safety factor
Buoy remains above water	yes	-	-
Tension in 25 mm chain	3.2 tons	40 tons	~20
Horizontal force in chain	1 tons	2.3 tons	~2.3

The buoy and its accompanying setup will be visually inspected every 6 months. The buoy will be cleaned, the components inspected and if needed replaced. This ensures the durability of the setup.

2.3 MAXIMUM TIDAL CURRENT

The conditions defining the max tidal current scenario are:

- Significant wave height: 3.2 m
- Wave period: 7.0 s
- Tidal current: 1.0 m/s
- Max wind velocity: 16.7 m/s

Table 3 summarizes the results. The anchor did not move for these calculations. The high current, combined with the smaller waves, results in a safety factor of 1.3 for the horizontal force in the chain.

Table 3. Summary of results for 1 in 1 year storm with max current. Green means pass.

Check	Result	Max allowable	Safety factor
Buoy remains above water	yes	-	-
Tension in 25 mm chain	2 tons	40 tons	~20
Horizontal force in chain	1.0 tons	2.3 tons	~2.3

2.4 MAXIMUM WIND SPEED

The conditions defining the max wind speed scenario are:

- Significant wave height: 4.8 m
- Wave period: 8.9 s
- Tidal current: 0.6 m/s
- Max wind velocity: 27.5 m/s

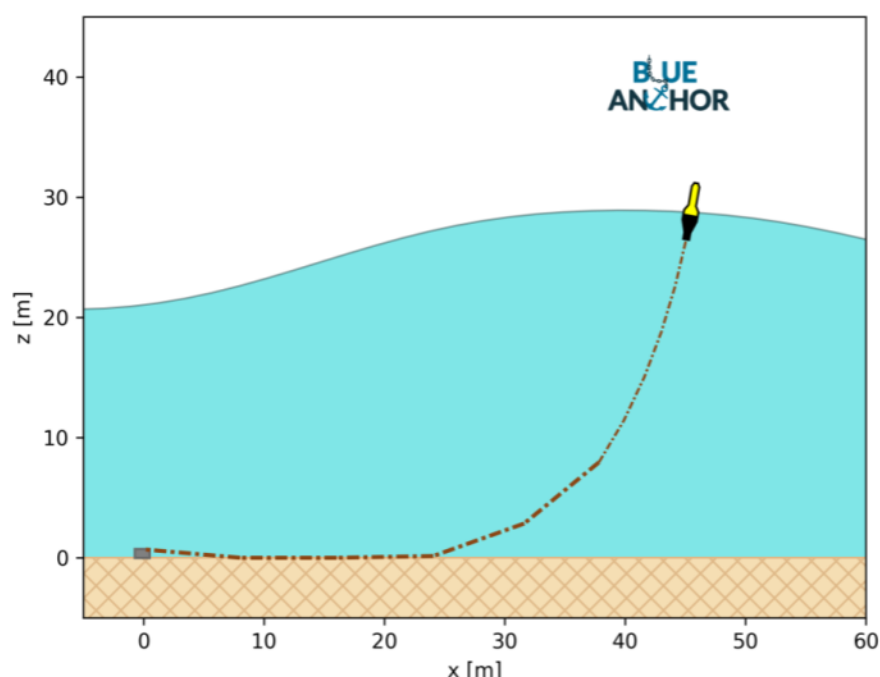


Figure 7. Snapshot of the results in the BlueAnchor model

Interestingly the maximum wind speed case is normative. A closer look into the data shows that it is normative due to one wave occurring in the generated wave spectrum. A snapshot of this wave is shown in Figure 7. The occurrence of this wave is a result of the random generation of the waves. And although

chances are slim for such a wave to occur in a 1 in 1 year storm the random wave field did turn out to generate this wave.

Table 4. Summary of results for 1 in 1 year storm with max wind speed. Green means pass.

Check	Result	Max allowable	Safety factor
Buoy remains above water	yes	-	-
Tension in 25 mm chain	1.7 tons	40 tons	~23
Horizontal force in 32 mm chain	1.3 tons	2.3 tons	~1.7

3 CONCLUSION

Three conditions have been considered for a 1 in 1 year storm: One with maximum wave heights; one with maximum current; and one with maximum wind speed. The maximum wind case results in the highest load on the system and is thus normative. Under these conditions the setup remains stable. With the lowest safety factor being 1.7. The calculations are conservative in the following ways:

- High drag coefficient
- (Slight) overestimation of frontal area of the buoy
- No burial of anchor taken into account
- No rock-stopping effect of the anchor (it rotates while part of it is pressed in the seabed)
- No 'escape' from large waves, nor any alleviating effects of a slight change in direction between different waves.

This demonstrates that the proposed buoy setup remains stable for extreme conditions with a 1 in 1 year recurrence interval, i.e. the anchor does not move. In this memo, the conditions provided by *Metocean Study Hollandse Kust (west) Wind Farm Zone* Version December 2020, were used. These conditions comply with the IALA standard for the design of moorings *G1066 THE DESIGN OF FLOATING AID TO NAVIGATION MOORINGS*. The force balances use the parameters described in this standard. While the force balance contains all the forces described in the standard, implementation is customised to the designed setup.

BIJLAGE 1B

BlueAnchor model

BLUEANCHOR TOOL

This document outlines the working principles of the in-house developed software BlueAnchor. The BlueAnchor software is developed to determine the stability of structures at sea. This is done for a 2D sea state, which can be adjusted to the local relevant conditions. The software generates a wave field e.g. based on the Jonswap spectrum combined with 5th order Stokes waves. In essence, any spectrum and up to 5th order Stokes waves can be used. The structure is then subjected to the given flow field. For each component of the evaluated structure, the force balance (and if applicable the torque balance) is set up. The force balance is then integrated in time so that the system of equations can be solved. The output of the calculations are the positions of the different components of the structure, and the forces in the connections between the different components.

GENERATING THE WAVE FIELD

The generation of the wave field is in accordance with e.g. Tabeshpour & Belvasi (2023)¹. The wave field is constructed based on a JONSWAP spectrum (Hasselmann et. al., 1980)². The spectrum, S , is given in a simplified form by:

$$S(\omega_{wave}) = \frac{320H_s^2}{T_p^4} \omega_{wave}^{-5} \exp\left(-\frac{1950\omega_{wave}^{-4}}{T_p^4}\right) \gamma^{A_A}$$

Where ω_{wave} is the wave frequency in rad/s, H_s is the significant wave height, T_p the associated wave period, and γ and $A_A = \exp\left(\frac{\left(\frac{\omega_{wave}}{f_p} - 1\right)^2}{\sigma\sqrt{2}}\right)$, with $f_p = \frac{2\pi}{T_p}$ and $\sigma = 0.07$ if $\omega_{wave} < f_p$ and $\sigma = 0.09$ if $\omega_{wave} > f_p$, are effectively fitting parameters to the local wave conditions. For North Sea conditions $\gamma = 3.3$ is often used. In Figure 1 the spectrum (of Tabeshpour & Belvasi, 2023) is given, with $H_s = 6.5m$ and $T_p = 10.8 s$ and $\gamma = 3.3$.

¹ Tabeshpour, M. R., & Belvasi, N. (2023). Ocean waves time-series generation: minimum required artificial wave time-series for wave energy converter analysis. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(6), 273-283.

² Hasselmann, D. E., Dunckel, M., & Ewing, J. A. (1980). Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973. *Journal of physical oceanography*, 10(8), 1264-1280.

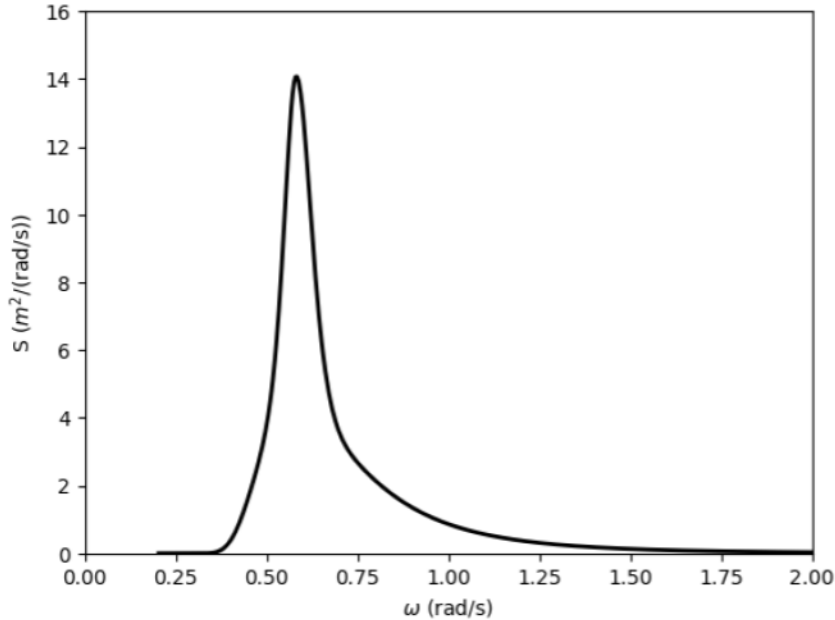


Figure 1. Jonswap spectrum, in line with Tabeshpour & Belvasi (2023).

The wave components are described by the spectrum, and the amplitudes of the waves are given by

$$A_{wave} = \sqrt{2Sd\omega}$$

With $d\omega$ the step size of the spectrum, the default setting is 1/25 rad/s. The wave height of the wave is $H_{wave} = 2A_{wave}$. Each of the waves is assumed to have a random phase shift:

$$\phi = 2\pi(rand - 0.5)$$

With rand a random number between 0 and 1. The phase shift in time is given by $T_\phi = \phi/\omega$. Similarly, the wave period is given by $T_{wave} = 2\pi/\omega$.

Once the wave height, the wave period and the local depth have been determined, each wave is constructed using Stokes wave theory. The default option is 5th order Stokes waves. The local wave field and elevation is determined using the Raschii package, this package generates waves based on these three parameters for arbitrary Stokes theory. Since this theory is based on potential flow theory, the flow fields are added. In Tabeshpour & Belvasi (2023) this process is depicted illustratively (Figure 2).

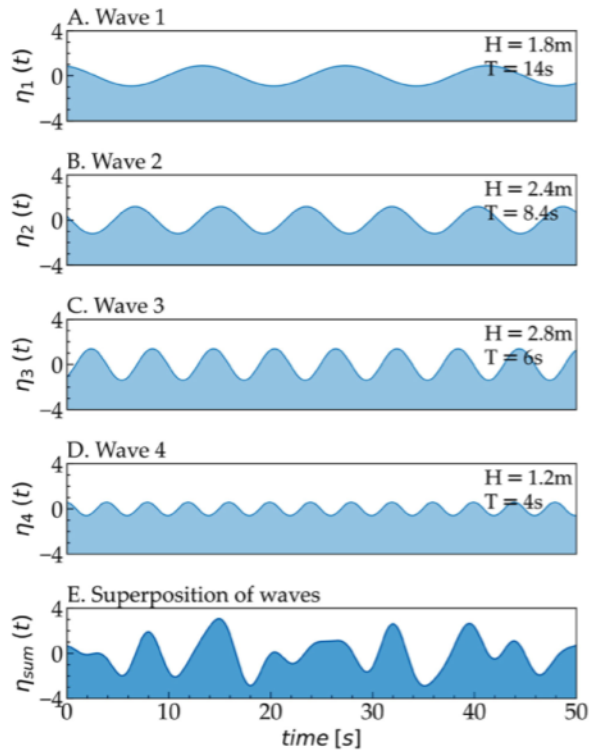


Figure 2. Adding wave components to get a wave field, taken from Tabeshpour & Belvasi (2023).

The local velocity is known for each of the wave components; these flow fields are simply added together. The spectrum has 50 values if $d\omega = 1/25$ rad/s, indicating 50 wave types. However, not all waves contribute significantly to the wave field. To limit computational time only waves with amplitudes exceeding $A_{\text{wave}} > \frac{1}{5} \max(A_{\text{waves}})$ are taken into account.

FORCE AND TORQUE BALANCE ON COMPONENTS OF THE SETUP

Force and torque balance on components with rotational movement

The first component considered is a buoy. This illustrates the force and torque balance on a component subject to waves, and it includes most of the principal forces. The buoy will be considered in a 2D setting. The buoy therefore has three degrees of freedom: in the horizontal direction (x), the vertical direction (z) and rotational (θ).

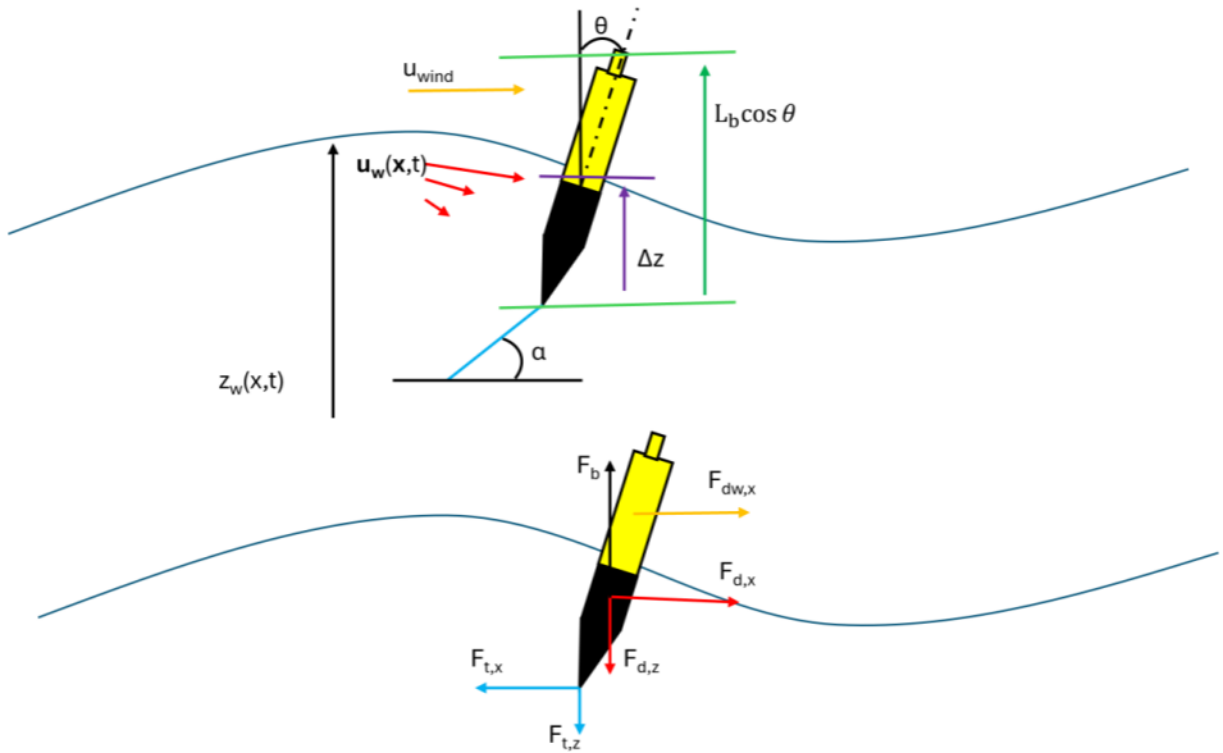


Figure 3. Sketch of buoy force balance.

x-direction

In the x-direction we have the drag force of the water:

$$F_{d,x} = \int_{\Delta z} \frac{1}{2} \rho_w C_{d,x} D_b (z' / \cos(\theta)) u_{rel}(z') |u_{rel}(z')| dz' = \int_{\Delta z} f_{d,x} dz'$$

With $\rho_w = 1024 \text{ kg/m}^3$ the density of sea water. $C_{d,x} = 0.55$ (simplification and overestimation, see G1066 THE DESIGN OF FLOATING AID TO NAVIGATION MOORINGS) the horizontal drag coefficient, D_b is the diameter of the buoy. $u_{rel} = u_w - u - \omega(z' - H_{cm}) |\cos \theta|$ is the relative velocity of the buoy to the water, $u = \dot{x}$ is the velocity of the buoy, $\omega = \dot{\theta}$ is the rotational velocity of the buoy and z' is the local coordinate running from the lowest point of the buoy upward. θ is the angle of the buoy. Δz is the

submerged height of the buoy measured from the lowest point on the buoy. The latter description is for future convenience.

The drag force in the x direction takes the local current conditions into account and integrates over the shape of the buoy. The factor $z'/\cos(\theta)$ ensures that the thickest part of the buoy is used as a reference area (unless it is very far under water, which does not happen in practice).

The drag force acting on the buoy due to the wind is given by:

$$F_{dw,x} = \int_{\Delta z}^{L_b \cos \theta} \frac{1}{2} \rho_a C_{d,x} D_b(z'/\cos(\theta)) u_{wind}^2 dz' = \int_{\Delta z}^{L_b \cos \theta} f_{dw,x} dz'$$

The integral runs over the non-wetted height of the buoy. $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ is the density of air, and u_{wind} is the wind velocity. The rotational velocity of the buoy is neglected since the wind velocity is dominant under the given wind conditions.

The force in the wire is given by:

$$F_t = k_r \left(\sqrt{(x_{lp} - x_t)^2 + (z_{lp} - z_t)^2} - L_t \right)$$

With k_r denoting the spring constant of the component directly below the buoy. x_{lp}, z_{lp} denote the coordinates of the lowest point on the buoy, x_t, z_t denoting the locations of the start point of the component directly below the buoy and L_r denoting the length of the connecting component. x_{lp} relates to the location of the centre of mass of the buoy by $x_{lp} = x - H_{cm} \sin(\theta)$ and $z_{lp} = z - H_{cm} \cos(\theta)$. H_{cm} is the height of the centre of mass. If a combination of wire and chain or any other hybrid solution is used, the force in the wire is considered for the part connected to the buoy. The components are connected via their stiffness.

The effect of added mass cannot be neglected in this case, since the mass of the buoy is on the same order as the added mass. The total force balance reads:

$$\left(m_b + C_a \rho_w \int_{\Delta z}^{\pi} \frac{D_b^2(z')}{4} dz' \right) a_x = F_{d,x} + F_{dw,x} - F_{t,x}$$

With $m_b = 700 \text{ kg}$ the mass of the buoy, $C_a = 0.5$ the added mass coefficient (similar as that of a sphere). $\rho_w \int_{\Delta z}^{\pi} \frac{D_b^2(z')}{4} dz'$ the weight of the water moved by the buoy. $a_x = \ddot{x}$ is the acceleration of the buoy. $F_{t,x} = \cos(\alpha) F_t$ and $\alpha = \sin^{-1}(\frac{z_{lp}}{L_r})$ is the angle of the rope to the seabed.

z-direction

In the z-direction the drag force and the tension force reappear:

$$F_{d,z} = \frac{1}{2} \rho_w C_{d,z} \left(\frac{\pi}{4} \max(D_b^2(z')) + \sin(\theta) \Delta z \max(D_b(z')) \right) w_{rel} \left(\frac{\Delta z}{2} \right) \left| w_{rel} \left(\frac{\Delta z}{2} \right) \right|$$

$C_{d,z} = 1$ is the vertical drag coefficient. $\left(\frac{\pi}{4} \max(D_b^2(z')) + \sin(\theta) \Delta z \max(D_b(z')) \right)$ is the projected area of the buoy in the vertical direction and $w_{rel} \left(\frac{\Delta z}{2} \right) = w_w - w - \omega(z' - H_{cm}) |\sin \theta|$ is the relative velocity of the buoy halfway the wetted area.

And:

$$F_{t,z} = \sin(\alpha) F_t$$

In the vertical direction buoyancy plays a role, the buoyancy force is given by:

$$F_b = \rho_w g \int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b \left(\frac{z'}{\cos \theta} \right)^2 dz' - m_b g$$

With $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ the gravitational acceleration and $\int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b \left(\frac{z'}{\cos \theta} \right)^2 dz'$ the volume of the buoy. m_b is the mass of the buoy. The resulting equation governing the movement in the z-direction is given by:

$$\left(m_b + C_a \rho_w \int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b^2(z') dz' \right) a_z = F_{d,z} - F_{t,z} + F_b$$

Rotational movement

The rotational movement of the buoy depends on the moment of inertia of the buoy, I_b . The moment of inertia has, just like the mass has an added mass component. The mass moment of inertia is principally given by:

$$I_b = \int_{V_b} \rho_{I_b} r^2 dV_b$$

Where ρ_{I_b} denotes the density of the volume element dV_b and r the distance of the volume element to the axis of rotation. The inertia of the buoy changes when the added mass is considered. ρ_{I_b} can be set to the density of water at a given distance from the buoy. It also entails, as mentioned, that the moment of inertia depends on the depth of the buoy in the water. The integral is evaluated in advance and the result are interpolated at each time step when solving the equations.

The average arm of the different forces acting on the buoy are needed to get the torque. The average arm $r_{F_{d,x}}$ of the horizontal drag force can be found using:

$$r_{F_{d,x}} = \cos(\theta) H_{cm} - z_{F_{d,x}}$$

And

$$z_{F_{d,x}} = \int_{\Delta z} f_{d,x} z' dz' / F_{d,x}$$

The torque as a consequence of the horizontal drag force is thus:

$$t_{F_{d,x}} = r_{F_{d,x}} F_{d,x}$$

The torque due to the wind force is given by:

$$r_{F_{dw,x}} = \cos(\theta) H_{cm} - z_{F_{dw,x}}$$

$$z_{F_{dw,x}} = \int_{\Delta z}^{L_b \cos \theta} f_{dw,x} z' dz' / F_{dw,x}$$

$$t_{F_{dw,x}} = r_{F_{dw,x}} F_{dw,x}$$

The torque as a consequence of the vertical drag force is neglected, since both the force and the arm are much smaller if the buoy remains somewhat vertical. If the buoy is not vertical, the tension force

generally dominates the torque balance by far. The torque resulting from buoyancy is found by splitting the buoy into a part that is below(1) and above(2) the centre of mass.

$$F_{b,1} = \rho_w g \int_0^{H_{cm}} \frac{\pi}{4} D_b^2 dH' = \rho_w g \int_0^{H_{cm}} f_{b,1} dH'$$

$$F_{b,2} = \rho_w g \int_{H_{cm}}^{L_b} \frac{\pi}{4} D_b^2 dH' = \rho_w g \int_{H_{cm}}^{L_b} f_{b,2} dH'$$

The arms (i= 1 or 2) are found by:

$$r_{F_{b,i}} = (H_{cm} - z_{F_{b,i}}) \sin \theta$$

With:

$$z_{F_{b,1}} = \int_0^{H_{cm}} f_{b,1} H' dH' / F_{b,1}$$

$$z_{F_{b,2}} = \int_{H_{cm}}^{L_b} f_{b,2} H' dH' / F_{b,2}$$

The torque as a consequence of the buoyancy force is:

$$t_{F_b} = F_{b,1} r_{F_{b,1}} - F_{b,2} r_{F_{b,2}}$$

Finally, the torque as a consequence of the tension force in the rope is

$$t_{F_t} = \cos \theta H_{cm} F_{t,x} - \sin \theta H_{cm} F_{t,z}$$

The torque balance reads:

$$I_b \dot{\omega} = t_{F_t} - t_{F_b} - t_{F_{d,x}} - t_{F_{dw,x}}$$

Components without rotational movement

For each component added to the mooring, such as rope/wire, weights or a chain or an anchor, the components are assumed to behave as point masses without rotation. A wire or rope of a given weight is considered as a point mass halfway along its the length. The point mass has the frontal area of the rope and the local flow conditions are taken from the wave field. For chain components or an anchor, seabed friction is taken into account. We expand on how a single chain component is considered since other components are very similar or contain similar forces.

On the chain component the horizontal drag force is given as:

$$F_{dcx} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dc} A_c u_{c,rel} |u_{c,rel}|$$

With C_{dc} the drag coefficient of the component, A_c the projected frontal area of the component and $u_{c,rel}$ the relative velocity of the component.

The horizontal components of the tension forces are:

$$F_{txc} = F_{tc} \cos(\alpha_c) \text{ and } F_{txc+1} = F_{tc+1} \cos(\alpha_{c+1})$$

The tension force in each component is given as:

$$F_{tc} = k_c \sqrt{(x_{c+1} - x_c)^2 + (z_{c+1} - z_c)^2}$$

With subscript +1 noting the next component in the construction. k_c is the stiffness of the component. α_c is the local angle of the considered component. Finally, the frictional force with the bottom is included:

$$F_{bot,xc} = W_c g \mu_d u_c / |u_c|$$

With W_c the in water weight of the component, μ_d the dynamic friction coefficient (note that this is an underestimation if the component is not yet moving, i.e. no static friction is considered). u_c is the horizontal velocity of the component. No correction for vertical tension is used, since the weight of each component is taken at its length. The weight of the first component after the anchor is located one component's length away from the anchor.

The force balance reads

$$W_c a_{cx} = F_{txc+1} - F_{txc} + F_{dcx} - F_{bot,cx}$$

In the vertical direction we get very similar terms, the vertical drag force

$$F_{dcz} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dc} A_{cz} w_{c,rel} |w_{c,rel}|$$

The tension forces:

$$F_{tzc} = F_{tc} \sin(\alpha_c) \text{ and } F_{tzc+1} = F_{tc+1} \sin(\alpha_{c+1})$$

Buoyancy force:

$$F_{cb} = W_c g$$

And a normal force of the bottom if the component hits the bottom:

$$F_n = c_{bot} \min(0, w_c) / |w_c|$$

Once the component hits the bottom, the normal force can be seen as a damping force of the bottom. The damping constant is $c_{bot} = -10000N$. This is more convenient than implementing a hard bottom condition. The normal force is zero if the velocity of the component is upward. The bottom is therefore modelled as a large puddle of thick mud.

The force balance in the z direction reads:

$$W_c a_{cz} = F_{tzc+1} - F_{tzc} + F_{dcz} - F_{cb} + F_n$$

In both cases the added mass is disregarded since these components generally consist of steel, with a significantly higher density than water.

The anchor

The anchor is considered the endpoint of the setup. The equations are very similar to that of an individual component. However, the vertical tension in the last component is subtracted from the weight of the anchor mass. The x force balance reads:

$$(W_a + AM_a) a_{ax} = F_{txc1} + F_{dxa} - F_{botax}$$

With F_{txc1} denoting the horizontal tension in the last component connecting to the anchor. F_{dxa} is the horizontal drag force, similar to the drag force on a component only with the projected area of the anchor.

$$F_{botax} = \mu_d(W_a g - F_{tzc1})$$

Is the bottom friction force of the anchor. W_a is the in water weight of the anchor and F_{tzc1} is the vertical tension in the component connected to the anchor. AM_a is the added mass of the anchor.

In the vertical direction we get:

$$(W_a + AM_a)a_{az} = F_{tzc1} - F_{ba}$$

With F_{ba} the buoyancy force of the anchor.

Set of equations

The set of equations governing the movement of the buoy are listed once more, however, rearranged.

$$a_x = \ddot{x} = (F_{d,x} + F_{dw,x} - F_{t,x}) / \left(m_b + C_a \rho_w \int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b(z') dz' \right)$$

$$a_z = \ddot{z} = (F_{d,z} - F_{t,z} + F_b) / \left(m_b + C_a \rho_w \int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b(z') dz' \right)$$

$$\dot{\omega} = \ddot{\theta} = (t_{F_t} - t_{F_b} - t_{F_{d,x}} - t_{F_{dw,x}}) / I_b$$

These equations are supplemented by the 2n equations governing the movement of the n components, e.g (with $1 < i \leq n$).

$$a_{cx,i} = (F_{txc+1,i} - F_{txc,i} + F_{dcx,i} - F_{bot,cx,i}) / W_{c,i}$$

$$a_{cz,i} = (F_{tzc,i+1} - F_{tzc,i} + F_{dcz,i} - F_{cb,i} + F_{n,i}) / W_{c,i}$$

Finally, the anchor equations are added.

$$a_{ax} = (F_{txc1} + F_{dxa} - F_{botax}) / (W_a + AM_a)$$

$$a_{az} = (F_{tzc1} - F_{ba}) / (W_a + AM_a)$$

The equations are non-linear, coupled second order differential equations in time.

SOLVING PROCEDURE

To solve the set of equations, a numerical scheme and initial conditions is required.

Numerical scheme

The described system of equations cannot be solved by hand. Numerical integration is therefore the only suitable tool. Second order differential equations are most easily solved if order reduction is applied first. The set of equations can be simplified to:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{b}$$

Where $\mathbf{q}$ contains the left-hand side of the sets of equation and $\mathbf{b}$ contains the right-hand side of the same set of equations. We would prefer the following form for ease of solving:



$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{b}$$

The following set of equations are therefor solved:

$$\dot{x} = u$$

$$\dot{u} = (F_{d,x} + F_{dw,x} - F_{t,x}) / \left(m_b + C_a \rho_w \int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b(z') dz' \right)$$

$$\dot{z} = w$$

$$\dot{w} = (F_{d,z} - F_{t,z} + F_b) / \left(m_b + C_a \rho_w \int_{\Delta z} \frac{\pi}{4} D_b(z') dz' \right)$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = (t_{F_t} - t_{F_b} - t_{F_{d,x}} - t_{F_{dw,x}}) / I_b$$

$$\dot{x}_{c,i} = u_{c,i}$$

$$\dot{u}_{c,i} = (F_{txc,i+1} - F_{txc,i} + F_{dcx,i} - F_{bot,cx,i}) / W_{c,i}$$

$$\dot{z}_{c,i} = w_{c,i}$$

$$\dot{w}_{c,i} = (F_{tzc,i+1} - F_{tzc,i} + F_{dcz,i} - F_{cb,i} + F_{n,i}) / W_{c,i}$$

$$\dot{x}_a = u_a$$

$$\dot{u}_a = (F_{txc1} + F_{dxa} - F_{botax}) / (W_a + AM_a)$$

$$\dot{z}_a = w_a$$

$$\dot{w}_a = (F_{tzc1} - F_{ba}) / (W_a + AM_a)$$

$\mathbf{q} = [x, u, z, w, \theta, \omega, x_{c,i}, u_{c,i}, z_{c,i}, w_{c,i}, x_a, u_a, z_a, w_a]^T$ has been reduced in order but doubled in size. A 4th order Runge Kutta scheme has been used to solve the set of equations.

The 4th order Runge Kutta scheme is given as:

$$\mathbf{q}^{t+dt} = \mathbf{q}^t + \frac{dt}{6} (RK_1 + 2RK_2 + 2RK_3 + RK_4)$$

With dt the time step size and

$$RK_1 = f(t, \mathbf{q}^t)$$

$$RK_2 = f\left(t + \frac{dt}{2}, \mathbf{q}^t + \frac{dt}{2} RK_1\right)$$

$$RK_3 = f\left(t + \frac{dt}{2}, \mathbf{q}^t + \frac{dt}{2} RK_2\right)$$

$$RK_4 = f(t + dt, \mathbf{q}^t + dt RK_3)$$

f is the function that is being evaluated every time step, i.e. the force balance in this case.

Initial conditions

The initial conditions of the buoy are, $\mathbf{q}_0$, are: $x_0 = 40 \text{ m}$, $u_0 = 0 \text{ m/s}$, $z_0 = z_{w,0} + H_{cm} - H_{eq}$, $w_0 = 0 \text{ m/s}$, $\theta_0 = 0$, $\omega_0 = 0 \text{ s}^{-1}$. H_{eq} is the equilibrium depth of the buoy. The buoy is thus initially at rest. The initial conditions of the components depend on the initial location of the buoy. All initial velocities are zero and the initial locations form a smooth connection to the buoy. The initial location of the anchor is $x_a, z_a = 0, 0$.

BIJLAGE 1C

BlueAnchor brochure

WaterProof

Marine Consultancy & Services BV.

Blue Anchor | Grip op stabiliteit. Zekerheid op zee

Met BlueAnchor controleert u snel en betrouwbaar of uw offshore opstelling stabiel op de zeebodem blijft staan. Of het nu gaat om een boeiverankering, meetframe of andere constructie, het model geeft direct inzicht of uw verankering bestand is tegen extreme omstandigheden.

BlueAnchor kan verschillende verankeringsmethodes doorrekenen, zoals kettingen, staaldraad en touw. In een helder overzicht ziet u of het toegepaste gewicht en de gekozen configuratie voldoen aan de eisen. Dankzij een gekoppelde set bewegingsvergelijkingen worden de spanningen in de verankering nauwkeurig bepaald.

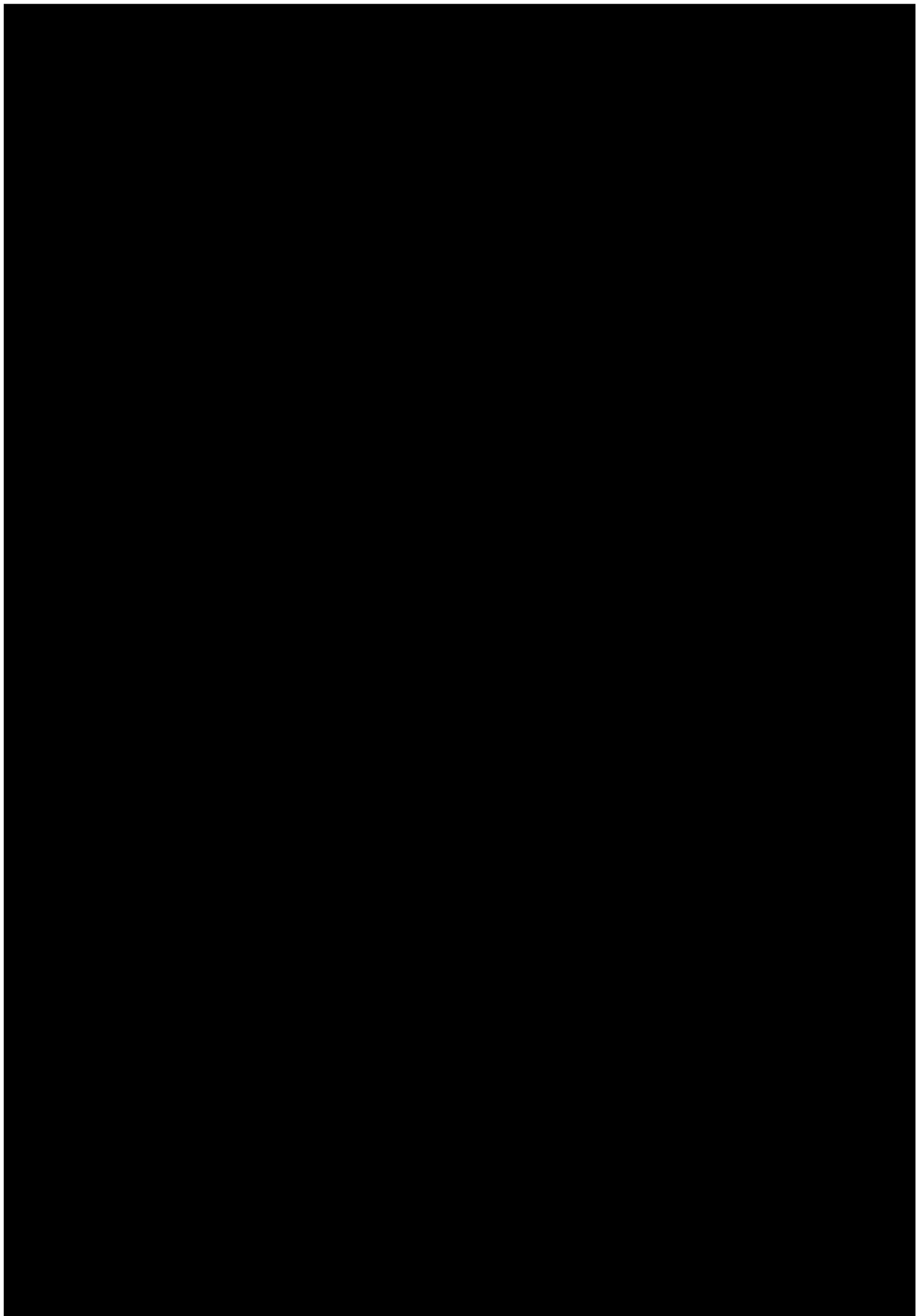


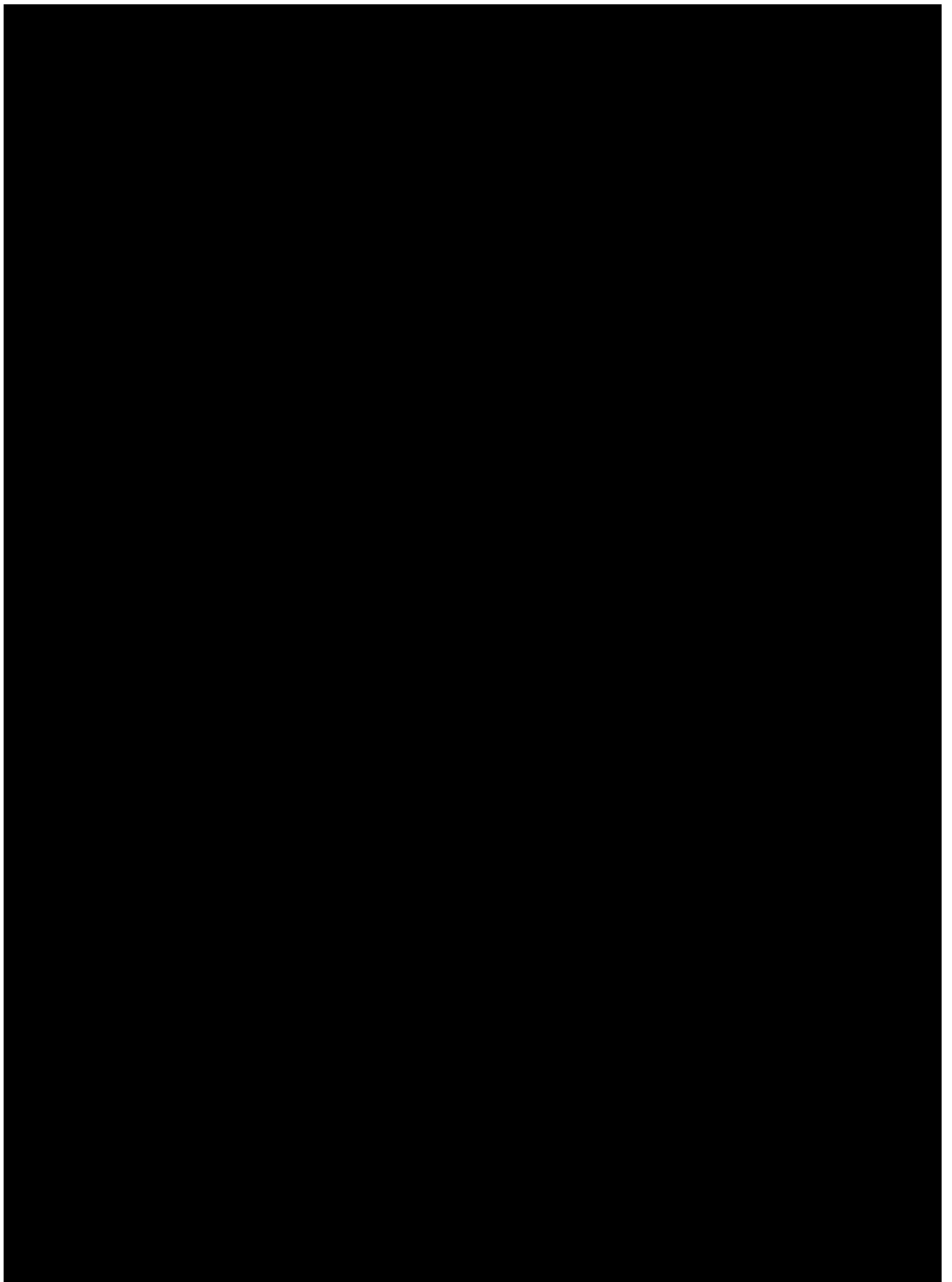
Uw systeem wordt getest onder realistische en extreme omstandigheden: een zware storm met een willekeurig JONSWAP-golfveld gedurende drie uur. Zo krijgt u zekerheid over de stabiliteit van uw ontwerp, nog vóór installatie.

Wilt u weten wat BlueAnchor voor uw project kan betekenen? Neem contact met ons op.

BIJLAGE 2

Toestemming Vattenfall (HKZ)





[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]