

Beoordeling invloed trillingen uit een windturbine op een waterkering

Handreiking



Beoordeling invloed trillingen uit een windturbine op een waterkering

Handreiking

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer G. Harmsen
Referenties	Dit onderzoek is onderdeel van het KPP-programma beschreven in "Plan van aanpak 2022 HV02 – Versterking onderzoek waterveiligheid
Trefwoorden	Veiligheid waterkering, windturbine, trillingen, WBI 2017

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	15-12-2022
Projectnummer	11208034-006
Document ID	11208034-006-ZWS-0003
Pagina's	103
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Paul Holscher	

Samenvatting

Waterkeringen zijn vanwege de locatie aan het water aantrekkelijke plekken om windenergie op te wekken. Daarbij worden vaak windturbines voorzien binnen de invloedsszones van de waterkering. De invloed van de windturbine en de daardoor opgewekte trillingen op de waterkerende functie moet dan kunnen worden beoordeeld. Tot op heden waren de mogelijkheden hiertoe beperkt. Deze handreiking beoogt er aan bij te dragen dat de kennis hieromtrent zo goed mogelijk wordt aangereikt.

Dit rapport beschrijft de invloed van de trillingen uit een windturbine op de faalmechanismen van waterkeringen. De beschrijving is beperkt tot de 'operationele fase' van de windturbine. Het beschrijft eerst de krachten van de windbelasting op de windturbine en fundering, en gaat na hoe die belasting doorwerkt op de spanningen in de ondergrond. Dit aspect wordt verder uitgewerkt op basis van een drietal trillingsmetingen in de bodem nabij een windturbine. Aansluitend worden de consequenties van deze trillingen voor de beoordeling van de veiligheid van de waterkering besproken en mogelijke handelingsperspectieven geschetst. Dit is uitgevoerd voor elk faalmechanisme dat volgens het WBI 2017 moet worden beoordeeld. Getracht is een modelmatige aanpak te schetsen waarmee de uitspraak kan worden onderbouwd.

Eén belangrijke bevinding van dit rapport is dat de invloed van windturbines snel afneemt met de afstand. Daarom wordt het voor nieuw te bouwen windturbines aanbevolen om na te gaan welke bezwijkmechanismen (gegeven de ondergrond en de mogelijke locatie van de windturbine) relevant zijn, en of plaatsing van de windturbine op voldoende afstand van de waterkering mogelijk is zodat een negatieve invloed op deze mechanismen vrijwel uitgesloten kan worden.

De kennis die in deze handreiking geboden wordt, geeft informatie om deze invloed te kwantificeren en ook hoe de afstandsafhankelijkheid verloopt.

Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	7
1.1	Doelstelling van het rapport	7
1.2	Inbedding in de veiligheidsbeschouwing	8
1.3	Achtergrond	9
1.4	Structuur van het rapport	9
2	Belasting uit een windturbine bij windbelasting	11
2.1	De krachten op de fundering als functie van de windsnelheid	11
2.1.1	Modelering	11
2.1.2	Resultaten en interpretatie	12
2.1.3	Gedrag en gevolgen	16
2.2	De invloed van de fundering op krachtoverdracht	17
2.2.1	Aanpak analyse	17
2.2.2	Resultaten en consequenties	18
2.3	Conclusie voor de beoordeling	19
3	De uitbreiding van trillingen in de bodem op basis van metingen	20
3.1	3 MW windturbine Distripark Waddinxveen	20
3.1.1	Opzet van de meting	20
3.1.2	Resultaten	22
3.1.3	Frequentie voor de overgang tussen statisch en dynamisch	23
3.1.4	Gevolgen voor de beoordeling	23
3.2	3 MW windturbine de Krammer	24
3.2.1	Opzet van de meting	24
3.2.2	Resultaten	24
3.2.3	Gevolgen voor de beoordeling	25
3.3	7.5 MW windturbine Windmolenpark Westermeerdijk	25
3.3.1	Opzet van de meting	25
3.3.2	Resultaten	26
3.3.3	Gevolgen voor de beoordeling	27
3.4	Conclusie voor de beoordeling	27
4	Aanpak van de verdere uitwerking	30
4.1	Algemeen	30
4.2	Mogelijke gevolgen van een cyclische belasting	30
4.3	Verskil nieuwbouw en bestaande windturbines	31
5	Macro-stabiliteit, binnenwaarts en buitenwaarts	33
6	Piping	36

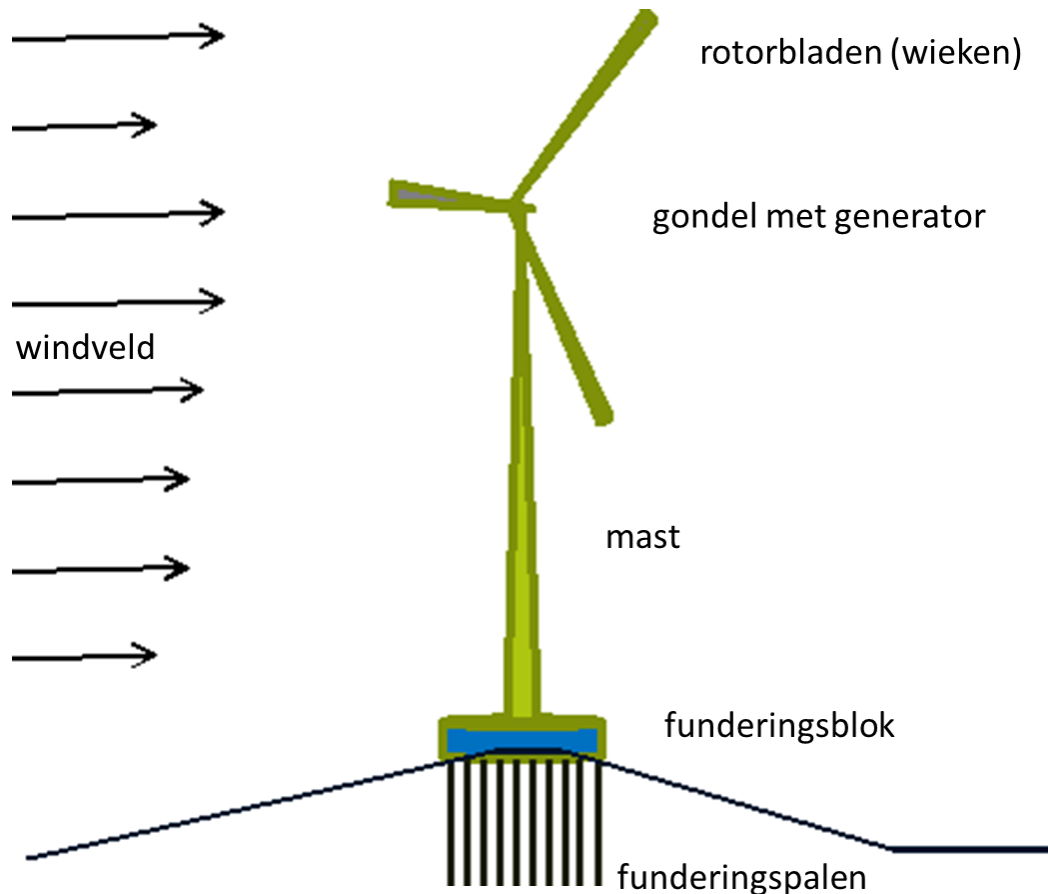
7	Micro-stabiliteit	39
8	Bezwijken bekleding	41
8.1	Asfaltbekleding	41
8.2	Steenzetting	43
8.3	Grasbekleding	46
9	Voorland	48
9.1	Golfafslag	48
9.2	Afschuiving	49
9.3	Zettingsvloeiing	50
10	Stroming langs de fundering van de windturbine	52
11	Conclusies en advies	54
11.1	Conclusie	54
11.2	Resultaten empirische verificaties	55
11.2.1	Conclusies	55
11.2.2	Prioriteit voor de belangrijkste kennisleemtes	56
11.3	Overzicht mogelijke monitoring door beheerder	57
11.4	Praktische implementatie	57
	Referenties	59
A	Basisbegrippen dynamica	62
A.1	Verplaatsing, snelheid en versnelling bij een harmonische beweging	62
A.2	Invloed op de sterkte	62
A.3	Relatie tijdsdomein en frequentiedomein	63
A.4	Enkele relaties voor dynamica	64
A.5	Verschillende soorten belastingen	65
A.6	Vergelijking trillingen van een windturbine en een passerende vrachtwagen	65
A.6.1	Trillingen in het tijdsdomein	69
A.6.2	Trillingen in het frequentiedomein	69
A.6.3	De hogere frequenties	69
B	Faalmechanismes en gebeurtenissenbomen	71
C	Theoretische aspecten van het verdichtingsmodel	72
C.1	Eisen aan het model	72
C.2	Model en analytische oplossing	72
C.3	Implicaties voor model Wichtmann	73
C.4	Toepassing model Wichtmann	74
D	Het meten van trillingen in de grond	75

D.1	Bepaling trillingssterkte	75
D.2	Bepaling golfsnelheid	75
E	Grootte van de variatie in een piping-kanaal	76
E.1	Grootte van de variatie	76
E.2	Invloed op waterbeweging	77
E.2.1	Laagfrequente invloeden	77
E.2.2	Geïntegreerde beschouwing met beide invloeden	79
E.2.3	Relatieve belang van de termen	80
F	Globale schatting vermoeiing	81
G	Resultaten trillingsmeting bij de Krammer	82
G.1	Verwerking van de gegevens	82
G.2	Opnemer 1	83
G.3	Opnemer 2	86
G.4	Opnemer 3	87
G.5	Opnemer 4	90
G.6	Opnemer 5	93
H	Resultaat Trillingsmeting Westermeerdijk	96
H.1	Verwerking van de metingen.	96
H.2	Resultaten	96

1 Inleiding

1.1 Doelstelling van het rapport

Dit rapport geeft een praktische handreiking voor de beoordeling van de veiligheid van een waterkering, in relatie tot de aanwezigheid van windturbines binnen de invloedzone van een waterkering. Daarbij wordt met name aandacht besteed aan de invloed van trillingen van een windturbine¹.



Figuur 1.1 Schets windturbine met de belangrijkste elementen.

De vraag voor het onderzoek luidt “wat zijn de consequenties van de trillingen uit de windturbine voor de sterkte van een waterkering als deze op of nabij de waterkering wordt geplaatst”.

Deze vraag is begrijpelijk vanuit de ontwerpproblematiek van de windturbines, waarbij dynamische aspecten een belangrijke rol spelen. De eigenfrequenties van de windturbine moeten zodanig zijn dat deze niet overeenkomt met de belastingsfrequentie van de wieken. Een windturbine wordt gedurende de levensduur blootgesteld aan een grote cyclische belasting, waarbij het zeer veel cycli betreft. Daardoor is het voorkomen van vermoeiing in de

¹ In de spreektaal wordt in plaats van windturbine vaak windmolen gebruikt. In dit rapport is de windturbine het hele samenstel van mast, gondel en rotorbladen, zie ook Figuur 1.1. Het woord turbine is gereserveerd voor de generator in de gondel die de elektriciteit opwekt.

constructie een belangrijk aandachtspunt tijdens het ontwerp. Een logische vraag die hieruit volgt betreft de invloed van deze dynamische en cyclische belastingen en het grote aantal cycli op de sterkte van een waterkering en op de waterveiligheid.

Een aspect dat hierbij speelt is de grootte van de constructie, zie ook Figuur 1.1. Een moderne windturbine kan een gondelhoogte boven de 120 m hebben, waarbij de bladen 80 m lang zijn. Het funderingsblok heeft een diameter van 20-30 m en staat op lange palen die mogelijk zowel op druk als op trek worden belast.

Dit rapport tracht een praktisch antwoord te geven op de vraag wat de invloed is van windbelasting op de windturbine en trillingen uit de windturbine binnen de invloedszone van de waterkering op de sterkte van een waterkering. Het geeft een inventarisatie van de relevantie van de trillingen voor de verschillende bezwijkmechanismes en besteedt aandacht aan mogelijke modellen om de invloed te beoordelen.

Het rapport is bedoeld voor ontwerpers en constructeurs die betrokken zijn bij ontwerpen van dijken en dijkverbeteringen waarbij windturbines worden voorzien of gewenst, of ingenieurs bij beheerders van waterkeringen die de waterveiligheid van deze waterkeringen moeten beoordelen.

1.2 Inbedding in de veiligheidsbeschouwing

Als er windturbines op of nabij een waterkering worden geplaatst heeft dit volgens het WBI2017 en het OI2014-v4 consequenties voor de verdeling van de faalkansruimte voor de waterkering. Er komen immers gebeurtenissen bij die tot falen van de waterkering kunnen leiden.

Hierbij moet onderscheid worden gemaakt in verschillende soorten mechanismes:

- Mechanismes die worden geïnitieerd door bovengronds falen van de windturbine. Bij bovengronds falen moet worden gedacht aan het losschieten van een rotorblad en afbreken van de gondel, maar ook het naar beneden vallen van ijsafzettingen op de rotorbladen wordt als risico genoemd. Deze aspecten worden in dit rapport niet behandeld. Het Handboek risicozonering windturbines 0 geeft voor het bovengrondse falen kansen voor optreden van gebeurtenissen. Hoofdstuk 12 van 0 geeft geen rekenregels voor de consequenties van dergelijk bovengronds falen.
- Mechanismes die worden beïnvloed door het functioneren van de windturbine. Dit zijn de mechanismes waarbij de waterkering geotechnisch faalt, waarbij de windturbine wel een rol speelt maar gewoon naar behoren functioneert (dus zelf niet faalt). Hoofdstuk 12 van 0 gaat niet in op de mogelijk gevolgen van een goed functionerende windturbine op de waterveiligheid. In dit laatste aspect, met name het effect op de ondergrond en het zogenaamd ondergrondse falen, moet deze handreiking voorzien.

Dit rapport beperkt zich tot de invloed van de windbelasting op de geotechnische aspecten van de waterkering (ondergronds falen). In hoofdstuk 2 zal blijken dat de windbelasting aanleiding geeft tot een statische belasting en een variabele belasting, die trillingen in de waterkering veroorzaakt. Deze beide aspecten moeten in samenhang worden bekeken.

Het gaat hierbij om een windturbine die normaal naar behoren functioneert. Als een deel van een windturbine afbreekt (b.v. een rotorblad) geeft dit mogelijk een grote dynamische belasting op de fundering en de waterkering. Een ander voorbeeld is als de fundering van een windturbine op de kruin van de dijk bezwijkt. Dan is er direct reden tot zorg. Omdat dit niet het normale functioneren betreft wordt dit in dit rapport niet bekeken. Dit soort aspecten horen natuurlijk wel in een veiligheidsbeschouwing te worden opgenomen (conform hoofdstuk 20 van 0).

Omdat uitsluitend de situatie onder normaal functioneren wordt bekeken, kan in dit rapport de windturbine als indirecte invloed worden beschouwd. Bij de beoordeling is dat niet altijd volledig: als de fundering van een windturbine in de kruin van de dijk bezwijkt is er mogelijk direct invloed op de waterkerende functie van de dijk. Dat is dan een faalmechanisme dat in de beoordeling wel moet worden beschouwd. Omdat dit niet het normale functioneren betreft wordt dit in dit rapport niet bekeken.

Een windturbine heeft drie levensfasen: bouw, in bedrijf en ontmanteling. In de Handreiking windturbines en waterkeringen, deel Techniek opgesteld door Stowa 0 worden de trillingen gedurende de gehele life cycle van de windturbine besproken. Het rapport dat u nu leest, beschouwt alleen de invloed van de trillingen op waterveiligheid tijdens de operationele fase. In dit opzicht kan dit rapport ook worden opgevat als een verdieping en onderbouwing van de Stowa Handreiking.

1.3 Achtergrond

In een deelproject binnen het STW-project “Structural assessment of Multi-functional flood defences” is aan de TU-Delft onderzocht wat de consequenties voor de waterveiligheid zijn als een windturbine op de kruin van een waterkering wordt geplaatst. Hierbij heeft de nadruk gelegen op de gevolgen van de trillingen tijdens de gebruiksfase. Trillingen spelen bij het ontwerpen van de windturbines een overheersende rol.

Het onderzoek heeft geresulteerd in een aantal technische rapporten en een samenvattend rapport 0. De toegankelijkheid van deze rapporten voor de praktijk is matig, wat niet onlogisch is vanuit het feit dat voor het STW-project de focus op fundamenteel onderzoek lag. Doel van dit KPP-project is de in het kader van het STW-project opgebouwde kennis zodanig te ontsluiten dat deze in de praktijk beter kan worden toegepast.

Om het oorspronkelijke STW-onderzoek te structureren is bij de aanvang van het project op basis van engineering judgement nagegaan hoe trillingen van de windturbine invloed hebben op de faalmechanismen van de waterkering die bij het ontwerp van de waterkering moeten worden beoordeeld. Dit heeft geresulteerd in een matrix met voor elk faalmechanisme het verwachte belang van de verschillende invloeden. Het onderzoek heeft zich gericht op de statische en dynamische windbelasting die de overheersende invloed hebben. Dat is tevens de grootste kennisleemte waarnaar onderzoek is gedaan.

In de gedachtegang wordt de thans gangbare standaard on-shore funderingswijze verondersteld. Deze bestaat uit een dikke funderingsplaat (blok) die steunt op een paalgroep. De palen staan in een cirkel, onder de rand van het blok. Overigens wordt het blok in de praktijk niet altijd perfect rond gemaakt maar vaak enigszins hoekig (bv. een 8- of 12-hoek).

Een belangrijk aspect hierbij is wel dat bij het onderzoek is verondersteld dat de windturbine op de kruin van de groene waterkering staat. In de praktijk is dat niet altijd mogelijk of wenselijk. In dit rapport wordt daarom een generalisatie uitgevoerd naar een willekeurige plaats van de windturbine in het dwarsprofiel van een waterkering.

1.4 Structuur van het rapport

Hoofdstuk 2 geeft informatie over de grootte van de belastingen en de trillingen in de grond. Dit is een eerste belangrijke stap voor de beoordeling van de belasting die de windturbine uitoefent op een waterkering als gevolg van de windbelasting. Dit is uitgezocht in het STW-project. Er wordt hierbij aandacht besteed aan de resultaten van een berekening, een trillingsmeting en de achterliggende theorie. Hoofdstuk 3 gaat in op een aantal metingen dat is uitgevoerd om de uitbreiding van trillingen in de bodem empirisch vast te stellen en inzicht te krijgen in de invloed van de grootte van de windturbine. Het betreft drie metingen, waarvan de eerste is uitgevoerd in het kader van de TUD-studie, de tweede in het kader van een lopend RWS project en de derde specifiek voor het verbeteren van deze handreiking.

Hoofdstuk 4 beschrijft kort wat basis aspecten over de aanpak van het vervolg van dit rapport. Het WBI2017 is als uitgangspunt genomen. De hoofdstukken 5 tot en met 10 bevatten de analyses voor alle faalmechanismes. Hierbij is zoveel mogelijk het stramien gevolgd dat in hoofdstuk 4 opgesteld is.

Volgens hoofdstuk 20 van 0 moeten voor elk kunstwerk in de waterkering de sterkte en stabiliteit als puntconstructie worden gecontroleerd. Hierbij wordt weer verwezen naar het rapport 0 (hoofdstuk 10) voor de fenomenologische beschrijving. In beginsel worden in dit rapport de geotechnische faalmechanismes besproken, voor zo ver deze door de windkracht via de windturbine worden beïnvloed. De overige mechanismes die in de beide documenten worden benoemd moten natuurlijk ook worden beoordeeld om een volledige veiligheidsbeschouwing te krijgen.

Hoofdstuk 11 vat de belangrijkste conclusies samen en geeft een aantal aspecten en beperkingen die mogelijk verder onderzoek rechtvaardigen.

2 Belasting uit een windturbine bij windbelasting

Dit hoofdstuk heeft tot doel om inzicht te geven in de aard van de belastingen uit de windturbine op de waterkering. Dit gebeurt in drie stappen:

- Eerst worden de krachten op de fundering van de windturbine door de windbelasting bekeken. Er wordt aangegeven dat er een statische en een variabele belasting ontstaat. De sterkte van de trillingen, de frequentie-inhoud en de duur van de trillingen worden bekeken (paragraaf 2.1).
- Daarna worden de krachten op de fundering door de fundering overgebracht naar de ondergrond. Het blijkt dat de fundering invloed heeft op de trillingsoverdracht (paragraaf 2.2).
- Tenslotte wordt de uitstraling van de trillingen in de fundering naar de omliggende bodem beschouwd. Deze is frequentieafhankelijk en voor de lage frequenties beperkt (paragraaf 3).

Dit hoofdstuk zal voor menig praktisch ingenieur theoretisch overkomen. Dit is niet te voorkomen. Enig inzicht in het ontstaan van de trillingen is echter essentieel voor een correcte beoordeling van de situatie.

2.1 De krachten op de fundering als functie van de windsnelheid

Om de invloed van de windturbine te kunnen beoordelen is het van wezenlijk belang om enig inzicht te hebben hoe een windturbine functioneert. In dit rapport wordt uitgegaan van een windturbine op een mast met aan de top een turbine met drie wieken. Deze staat op een stijve plaat die op palen is gefundeerd.

De beschouwde windturbine met een turbine op een slanke mast, een vrijwel horizontale as met (drie) wieken is momenteel het meest gangbare type windturbine in Nederland. Het betreft een 1.5 MW-turbine. Dit type wordt momenteel verder ontwikkeld, waardoor de afmetingen van nieuwgebouwde turbines elk jaar toenemen. Vanuit mechanisch oogpunt hebben deze windturbines vergelijkbaar gedrag. Voor andere types windturbines (bv. met een verticale as) zullen vermoedelijk andere specificaties volgen.

2.1.1 Modelering

Een windturbine is een geavanceerd apparaat dat voortdurend volautomatisch bijstuurt op basis van de veranderende omstandigheden (windsnelheid en windrichting) en de situatie in de windturbine zelf (o.a. draaisnelheid rotor en stroomproductie). In het TUD-onderzoek is hiervoor het standaard programma Fast toegepast. Dit programma is specifiek bedoeld voor het ontwerpen van windturbines.

Het programma Fast bevat de volgende onderdelen:

1. Het genereert een stochastisch windveld. Dit windveld is een functie van de tijd en bevat op elk tijdstip de windsnelheid en windrichting op elk punt ter plaatse van de windturbine. Dit is het gebied dat loopt vanaf het maaiveld tot de hoogste tip van de rotor en de volle breedte van de windturbine (dus tweemaal de lengte van de rotorbladen). Windsnelheid is hierbij een drie-dimensionale vector. Het bevat de toename van de windsnelheid met de hoogte, het optreden van windvlagen en turbulente stroming, zodat de lokale windrichting en snelheid sterk kan afwijken van de overheersende windrichting en snelheid.
2. Berekening van de krachtswerking in de rotorbladen en de mast van de turbine in het windveld. Voor met name de rotorbladen is dit complex want o.a. de hoge draaisnelheid

moet worden beschouwd, de stand van de rotorbladen speelt een rol en de rotorbladen zijn slap en bewegen dus continu op en neer in de windrichting.

3. Het regelregime voor de turbine. Op basis van draaisnelheid en de toelaatbare waarde en variatie van windrichting stelt de windturbine de stand van de gondel en rotorbladen continue bij, zodat de opbrengst van de turbine maximaal is en er geen gevaar voor doorbranden door een te hoog toerental bestaat.

Om inzicht te krijgen in de belastingen die een windturbine op de fundering uitoefent is een serie Fast berekeningen uitgevoerd. Dit is gedaan voor een meegeleverde voorbeeldcase voor een windturbine. Omdat er geen specifieke case voor ogen stond en het verkrijgen van de benodigde gegevens over een windturbine erg lastig is (dit betreft zeer concurrentiegevoelige informatie die door de leveranciers als bedrijfsgeheim wordt behandeld) is dit voor onderzoek een voor de hand liggende optie. Het voorbeeld betreft een 1.5 MW-windturbine met een generatorhoogte van 84 m. De mast is van staal en de fundering is oneindig stijf verondersteld. Dit is toelaatbaar als de fundering voldoende stijf is, wat in de praktijk meestal vertaalt wordt naar een minimaal geëiste statische stijfheid. Paragraaf 2.2 besteedt aandacht aan het dynamisch gedrag van de fundering.

De berekeningen hadden als eindresultaat de horizontale kracht en het buigend moment op de fundering (het funderingsblok). Dit funderingsblok is oneindig stijf verondersteld. De berekeningen zijn steeds uitgevoerd over een tijdsinterval van 10 min., wat standaard is bij het ontwerpen van windturbines. De berekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende windsnelheden van 12 tot 45 m/s. De aangegeven windsnelheid is op het niveau van de gondel. 45 m/s is ongeveer de maximale windsnelheid die in Nederland tot nu toe gemeten is (op standaard hoogte 10 m), zie bijvoorbeeld 0.

Figuur 4.4 van 0 geeft een idee van de windsnelheid nabij de Nederlandse kust. Op de standaard hoogte is de 1/10 000 jaar overschrijding orde 40 m/s. Dit hangt mede af van de windrichting en neemt landinwaarts af. Hierbij moet wel worden aangetekend dat de 45 m/s geldt op gondelhoogte. Daar waait het aanzienlijk harder. Het KNMI heeft daar onderzoek naar gedaan 0. Daaruit blijkt dat op 84 m hoogte de windsnelheid al snel tweemaal groter is. Dan mag worden verwacht dat de in de berekeningen aangenomen windsnelheid vaker dan 1/10 000 jaar voorkomt.

2.1.2 Resultaten en interpretatie

Figuur 2.1 toont de resultaten voor de horizontale kracht en het moment op de fundering, steeds als functie van de gemiddelde windsnelheid op de horizontale as.

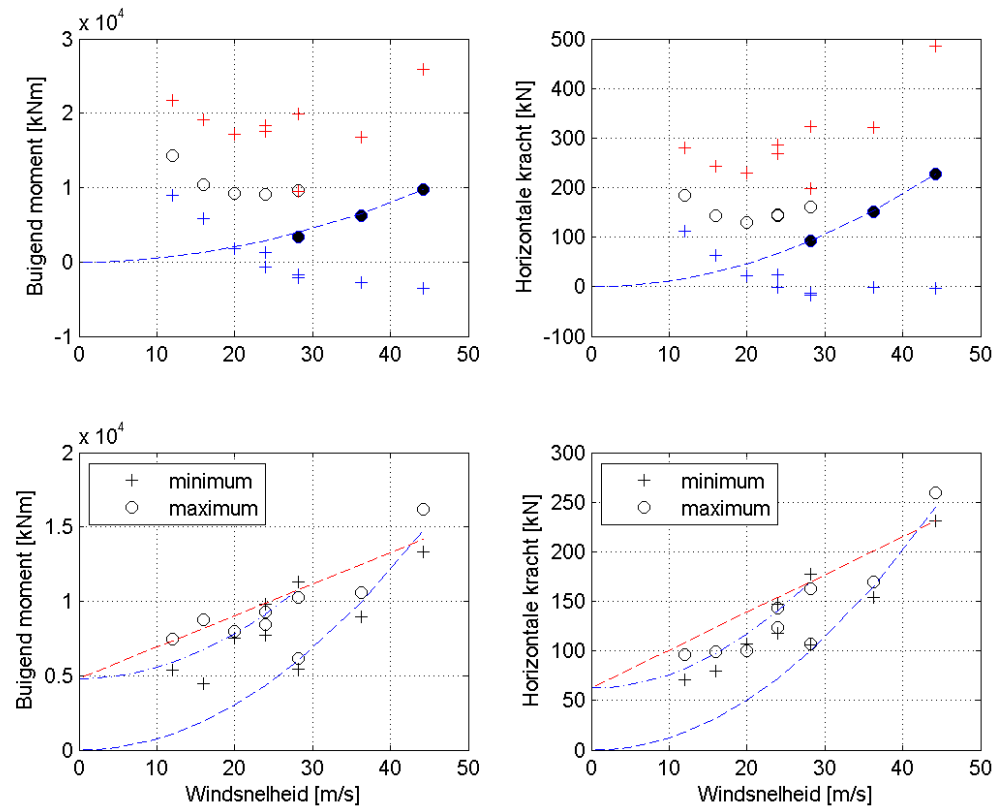
Om deze figuur te bepalen is elk signaal opgevat als de som van een gemiddelde waarde en een variatie daarop, zodat geldt

$$s(t) = \bar{s} + \Delta s(t) \quad (1)$$

met \bar{s} de gemiddelde waarde over het beschouwde tijdsinterval van 10 minuten. Op de horizontale as staat de gemiddelde windsnelheid. De variatie is uit een in het model beschikbare standaard optie bepaald.

In de bovenste rij figuren (van Figuur 2.1) is de invloed van de gemiddelde windsnelheid op het gemiddelde van het buigend moment en het gemiddelde van de horizontale kracht weergegeven (door middel van de rondjes). Bij een windsnelheid tussen de 25 en 28 m/s wordt de turbine uitgeschakeld (geparkeerd). Een gevuld rondje betekent dat het een berekening met een geparkeerde windturbine betreft. Een uitgeschakelde windturbine is een passieve constructie in de wind en hierbij wordt een resultaat verwacht dat evenredig is met

het kwadraat van de windsnelheid. Bij windsnelheden tussen de 10 en 25 m/s zijn het gemiddelde van het buigend moment en de horizontale kracht min of meer constant. Dit wordt verklaard vanuit het idee dat de windturbine het aangewaide oppervlak reduceert bij toenemende windsnelheid. De plusjes in deze rij figuren geven de hoogste en de laagste windsnelheid in het beschouwde 10 minuten interval weer.



Figuur 2.1 Resultaten Fast berekeningen windturbine (uitleg symbolen in de tekst).

In de onderste rij figuren (van Figuur 2.1) is de invloed van de gemiddelde windsnelheid op het variabele deel van het buigend moment en de horizontale kracht weergegeven. De maximale waarde wordt met een open rondje weergegeven en de minimale waarde (in absolute zin) wordt met een plusje weergegeven. Dit is het deel dat de dynamische belasting op de fundering beschrijft en dat leidt tot trillingen in de constructie en de omgeving. Bij een uitgeschakelde windturbine bij hoge windsnelheden is weer een kwadratische relatie met de windsnelheid zichtbaar. Voor de lagere windsnelheden is het beeld minder duidelijk. Een redelijk verband lijkt te bestaan uit een constante term en een kwadratische term

$$s = a + c \left(\frac{v}{v_p} \right)^2 \quad (2)$$

Met:

- s De trillingsamplitude (in bijvoorbeeld mm/s).
- v De windsnelheid [m/s].
- v_p De windsnelheid waarbij de windturbine wordt geparkeerd [m/s].
- a en c Constante waarden.

Voor de horizontale kracht lijkt dit redelijk, voor het buigend moment is mogelijk een lineair verband beter. Daarbij wordt aangetekend dat de constante term a in deze vergelijking in de

berekeningen niet helemaal constant lijkt, maar een zwak minimum heeft bij windsnelheid 20 m/s.

Er zijn drie regimes voor de windsnelheid:

1. Lage en gemiddelde windsnelheid ($0 < v < 12$ m/s). De windturbine tracht zoveel mogelijk energie te oogsten door de bladen zo ver mogelijk uit te zetten.
2. Hoge windsnelheid ($12 < v < 25$ m/s). Om te hoge draaisnelheden van de wieken en generator te voorkomen, worden de bladen van de wieken uit de windrichting gedraaid, zodat de draaisnelheid van de generator constant blijft.
3. Extreme windsnelheid ($v > 25$ m/s). Om schade te voorkomen wordt de turbine uitgeschakeld. De wieken staan stil en de bladen wijzen volledig in de windrichting.

Voor windsnelheid 28 m/s is de berekening uitgevoerd voor zowel een draaiende als een geparkeerde windturbine. Voor windsnelheid 24 m/s is de berekening ook tweemaal gedaan maar beide met draaiende wieken. Uit data van [website KNMI] blijkt dat aan de Nederlandse kust gemiddelde windsnelheden tot 30 m/s voorkomen met uitschieters tot 45 m/s. Het KNMI meet op standaard hoogte 10 m, terwijl de genoemde windsnelheden op gondelhoogte 84 m werken. Omdat het op 84 m harder waait dan op 10 m hoogte, zijn dit realistische waarden voor de windsnelheden en geen overschattingen. Ook moet er rekening worden gehouden met het feit dat per windsnelheid maar één berekening van 10 min is uitgevoerd. Het maximum kan dus aanzienlijk hoger liggen, maar voor het doel van de analyse hier is dat niet van belang.

Bij deze windsnelheden (boven de 25 m/s, wat overeenkomt met windkracht 10 Bft) wordt de turbine uitgeschakeld en in de zogenaamde parkeerstand gezet met een rotorblad precies voor de mast en de flappen wijzend in de windrichting. Berekeningen met Fast bij hogere windsnelheden en draaiende rotors zijn niet mogelijk omdat het programma constateert dat de rotorbladen zover naar achteren buigen dat zij de mast raken. Uitgaande van een kwadratisch verband tussen de uitbuiging van een rotorblad en de windsnelheid lijkt dit geen onrealistische uitkomst. Hierbij wordt aangetekend dat recente ontwikkelingen aanleiding geven tot een ander regime tijdens extreme windsnelheden 0. Dit heeft mogelijk consequenties voor de belastingen tijdens een extreme windsituatie.

De belastingen op de fundering hebben een statische en een dynamische component. Bij lage en gemiddelde windsnelheden neemt de statische belasting op de fundering toe (niet getoond in Figuur 2.1). Bij de hoge windsnelheid neemt de kracht op de fundering af met toenemende windsnelheid ten gevolge van het bijstellen van de bladen. Zodra de turbine uitgezet wordt, neemt de statische component van de belasting af, omdat de windbelasting op de wieken in de geparkeerde stand sterk afneemt. Vanaf die windsnelheid is een min of meer kwadratisch verband tussen de belasting en de windsnelheid zichtbaar, aangegeven met een streeplijn in de bovenste plaatjes van figuur 2. Opgemerkt wordt dat in de literatuur vaak alleen dit laatste verband wordt aangenomen voor het hele windbereik, zie bijvoorbeeld 0 (hun vergelijking 4).

De dynamische component van de belasting verschilt ook in de twee hoogste windregimes. Bij de hoge windsnelheid neemt de amplitude van de (dynamische) windbelasting min of meer lineair met de windsnelheid toe. Er is een terugval van de amplitude te zien als de turbine uitgeschakeld wordt. Voor de extreme windbelasting is in gemiddelde zin een toename met het kwadraat van de windsnelheid zichtbaar.

De amplitude van de dynamische component is in deze berekeningen groter dan de statische component. De grootste trillingen en de grootste statische horizontale kracht worden verwacht tijdens een superstorm, waarbij de windturbine stilstaat. Het draaien van de wind-

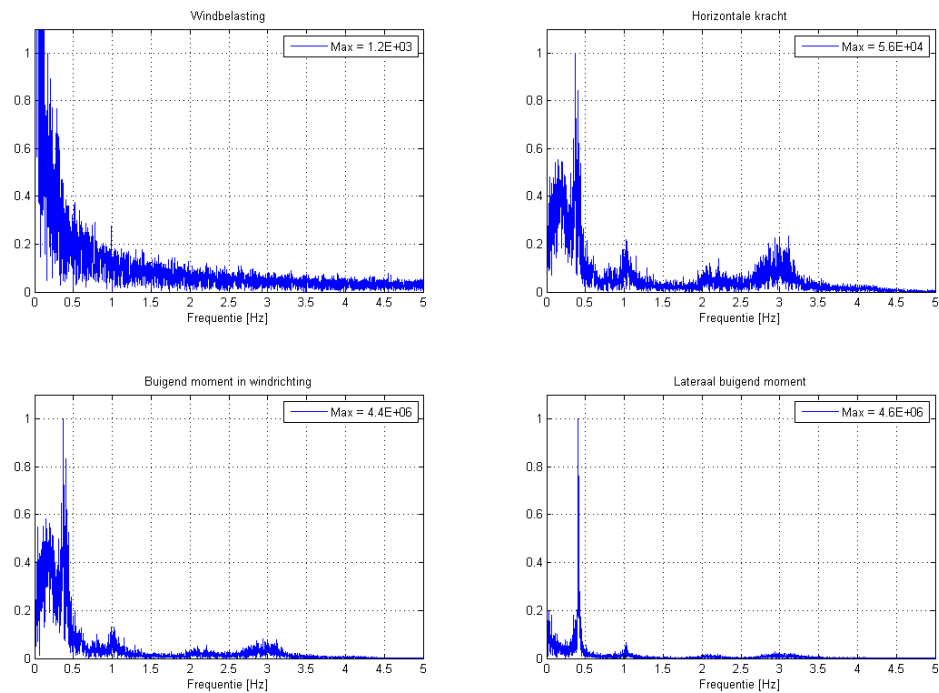
turbine speelt dan geen rol. Het uitschakelen van de windturbine geeft een afname van de krachten op de fundering (zowel statische als dynamische component).

Uit deze figuren blijkt ook dat de krachten en momenten tijdens een periode van 10 minuten sterk kunnen variëren: het laagste moment is negatief. Dit hoeft nog geen trekkracht op de palen te betekenen, want in deze beschouwing is de drukkracht ten gevolge van het gewicht van de windturbine nog niet verdisconteerd. Santos Costa 0 heeft een concept ontwerp gemaakt voor een grote windturbine. Bij dat ontwerp bleek de variabele component van de verticale kracht orde 50% van de gewichtsc component was.

Figuur 2.2 geeft de windbelasting en berekende belastingen op de fundering in het frequentiedomein. Bijlage A.3 geeft extra informatie over het frequentiedomein en de relatie met het tijdsdomein. Bij het beoordelen van deze representaties in het frequentie domein gaat het om de frequentiegebieden waar de amplitude relatief hoog is. Informatie over de frequentie waar dat optreedt geeft informatie over de eigenschappen van het beschouwde systeem.

Figuur 2.2a (links boven) geeft de windbelasting op de windturbine weer. Deze is weliswaar berekend, maar de techniek is gebaseerd op metingen, waaruit blijkt dat de frequentie-inhoud een afnemend verloop heeft bij toenemende frequentie. De overige figuren (b, c en d) geven de frequentie-inhoud van de belasting uit de windturbine op de fundering. De vergelijking met de belasting laat zien wat de windturbine heeft gedaan met elke frequentie component in de belasting. De frequentie figuren zijn op de maximale waarde genormeerd (omdat de absolute waarde lastig te interpreteren is), maar de berekende maximale waarde is wel in elke figuur vermeld.

De overheersende frequenties in de krachten (de hoge waarden in de grafieken b, c en d) worden vrijwel volledig bepaald door de eigenfrequenties van de mast. Voor de beschouwde mast is de eerste eigenfrequentie ongeveer 0.4 Hz en de tweede eigenfrequentie ongeveer 2.9 Hz (dat zijn de pieken in de grafiek). Vooral in het moment in de dwarsrichting is de eigenfrequentie duidelijk zichtbaar bij 0.4 Hz. Dit ontstaat doordat de mast staat te zwaaien loodrecht op de windrichting. De constructie heeft een lage demping, waardoor de piek smal en hoog is. Deze frequentie is ook duidelijk zichtbaar in het moment in windrichting en de horizontale kracht.



Figuur 2.2 Frequentierepresentatie van de resultaten van de berekening bij windsnelheid 20 m/s. Linksboven de windbelasting, rechtsboven de horizontale kracht, linksonder het moment in windrichting, rechtsonder het moment in dwarsrichting.

De rotorfrequentie is 0.34 Hz. Deze veroorzaakt de frequentiepiek bij 1 Hz, omdat de rotor drie bladen heeft is de passagefrequentie van de rotorbladen voor de mast driemaal de rotorfrequentie (dus $3 \cdot 0.34 = 1.02$ Hz). Het draaien van de rotor zelf is nauwelijks zichtbaar in de frequentie figuren.

De componenten in de windbelasting met een frequentie buiten de eigenfrequenties van de constructie worden min of meer één op één overgedragen of zelfs wat gedempt, wat het afnemende karakter van de grafieken verklaart.

Opvallend is dat in de belasting op de fundering boven de 4 Hz er nauwelijks signaal zichtbaar is. Daarom zijn de figuren bij 5 Hz afgekapt. Er moet rekening mee worden gehouden dat dit een reken-technische oorzaak heeft. Mogelijk zijn de trillingen bij deze frequenties voor het ontwerp niet relevant en worden deze actief verwijderd of is het model zodanig dat er geen doorgifte van trillingen is (die er in werkelijkheid wel kan zijn).

2.1.3 Gedrag en gevolgen

Op basis van de analyse van de berekeningen is getoond dat het gedrag van de windturbine een belangrijke rol speelt op de krachten op de fundering en daardoor naar verwachting ook op de spanningen in de ondergrond.

De belasting op de fundering bestaat uit een statische en een dynamische component. De fundering wordt vooral belast met de horizontale windkracht, een moment in de windrichting en een moment in de dwarsrichting.

Er zijn drie windregimes herkenbaar, doordat de windturbine de instellingen continu aanpast aan de situatie. Het gevolg is dat voor de windsnelheid onder de cut-out speed, de statische

componenten vrijwel constant zijn en de variabele componenten relatief groot zijn en slechts beperkt toenemen met de windsnelheid. Bij windsnelheden boven de cut-out speed wordt de windturbine geparkeerd en gaat zich gedragen als een passieve constructie: een slanke constructie met windbelasting. Bij een windsnelheid vlak boven de cut-out speed zijn de krachten iets kleiner dan bij een werkende windturbine (doordat de bladen zo worden gezet dat het aangewaaid oppervlak minimaal is), maar de statische en variabele component nemen kwadratisch toe met de windsnelheid. Bij de maximale windkracht zijn deze weer qua orde van grootte vergelijkbaar met de krachten op een inwerking zijnde windturbine.

Dit geeft twee belangrijke conclusies voor het beoordelen van windturbines op, of nabij, een waterkering:

1. Omdat het vrijwel altijd waait met een kleine windsnelheid wordt geconcludeerd dat de krachten op de fundering vrijwel continu aanwezig zijn. De variabele component geeft dus heel veel cycli gedurende de levensduur van de windturbine.
2. Tijdens een storm wordt de windturbine weliswaar geparkeerd, maar zowel de statische kracht als de variabele kracht blijven aanwezig. De belastingen uit een geparkeerde windturbine zijn wel wat lager dan uit een werkende windturbine, zodat het parkeren wel een reductie van de statische en variabele belasting uit de windturbine geeft.

Het variabele deel van het moment in windrichting en in dwarsrichting wordt gedomineerd door de eigentrillingen van de windturbine. De invloed van de rotorbewegingen zijn relatief beperkt. De belangrijkste frequenties liggen in het lage frequentiegebied van 0 Hz tot 4 Hz.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor één windturbine. Het idee is echter dat dit gedrag voor alle windturbines in essentie vergelijkbaar is. Daarbij zullen de frequenties en grootte van de krachten natuurlijk anders zijn. Een grotere windturbine geeft naar verwachting lagere frequenties en grotere amplitudes. Deze zullen indien nodig moeten worden gemeten of berekend. Hierbij spelen mogelijk allerlei details, zoals het precieze constructieve ontwerp en materiaalgebruik en het regelmechanisme, ook een rol.

2.2 De invloed van de fundering op krachtoverdracht

In slappe bodem bestaat een standaard on-shore fundering voor een windturbine meestal uit een stevige funderingsplaat op een cirkelvormige rij palen, zie ook Figuur 2.3. Dit type fundering heeft een frequentieafhankelijke stijfheid en kan onder een harmonische belasting een behoorlijke versterking van de trillingen geven door resonantie gedrag van de fundering.

2.2.1 Aanpak analyse

Uit de literatuur is bekend dat paalfunderingen sterk frequentieafhankelijk gedrag hebben doordat bij bepaalde frequenties de golven door de grond elkaar kunnen versterken of juist uitdoven. Dit wordt meestal uitgewerkt voor kleine paalgroepen. In deze studie is dit aspect uitgewerkt voor een grote cirkelvormige paalgroep in slappe bodem. Op basis van de theorie van Dobry en Gazetas 0 kan de dynamische stijfheid van de fundering worden berekend. Dobry en Gazetas veronderstellen dat de dynamische paal-grond-paal interactie omgekeerd evenredig is met de wortel van de afstand tussen de palen. De fase-verschuiving wordt bepaald door de onderlinge afstand en de schuifgolfsnelheid in de grond. De belangrijkste parameters zijn de paalconfiguratie en de golfsnelheid in de bodem. Verondersteld wordt dat het ontwerp bestaat uit een aantal palen onder de rand van de funderingsplaat.

De analytische berekeningswijze van Dobry en Gazetas is gegeneraliseerd en vervolgens toegepast op een cirkelvormige paalfundering. Figuur 2.3 toont de beschouwde configuratie van de fundering.

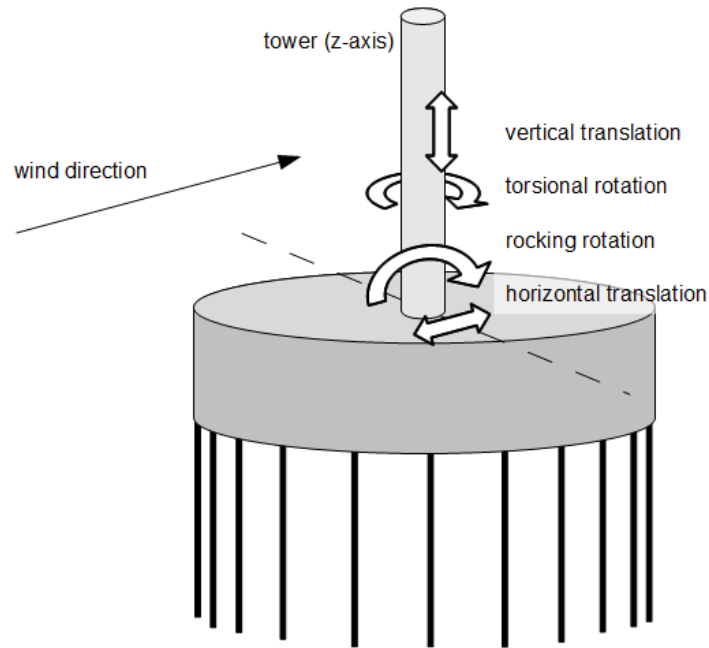
2.2.2 Resultaten en consequenties

Het blijkt dat de resultaten kunnen worden beschreven als functie van de dimensieloze frequentie parameter b die wordt gedefinieerd als

$$b = \frac{D_{foundation}}{\lambda_{shear}} = \frac{D_{foundation} f_{loading}}{c_{shear}} \quad (1.3)$$

met

- b De dimensieloze frequentie [-].
- $D_{foundation}$ De diameter van de fundering [m].
- λ_{shear} De golflengte van de schuifgolf [m].
- $f_{loading}$ De frequentie van de belasting [Hz].
- c_{shear} De golfsnelheid van de schuifgolf [m/s].



Figuur 2.3 Schets van de typische on-shore fundering met de daarop werkende belastingen uit de mast.

Bijlage D.2 geeft enige informatie over het meten van dynamische parameters in de grond.

Deze formule geeft weer dat het gedrag bepaald wordt door de diameter van de fundering en de golflengte van de S-golven in de bodem. Dit is begrijpelijk: als de diameter gelijk is aan één golflengte zullen de golven die een paal aan de ene zijde uitstraalt juist in fase bij de palen aan de andere zijde aankomen. Deze dimensieloze frequentie wijkt enigszins af van de dimensieloze frequentie die in de studie van Dobry en Gazetas wordt gebruikt, daar wordt de frequentie genormeerd op de afstand tussen de palen.

Met name de stijfheid tegen het opgelegde moment is al voor lage frequenties (dus lage waarden van de dimensieloze frequentie b) afhankelijk van de werkelijke frequentie. Dit is mogelijk van belang voor het ontwerp van de windturbine. Omdat de stijfheid van de fundering afneemt met toenemende frequentie, betekent dit dat de bewegingen in de fundering groter zijn dan op basis van de statische stijfheid wordt bepaald en dat de trillingen in de grond ook groter dan berekend zijn.

Opgemerkt wordt dat de werkelijke stijfheid van de fundering invloed heeft op de eigenfrequenties van de windturbine en de grootte van de beweging van de gondel en de fundering. Een slappere fundering leidt tot een lagere eigenfrequentie van de windturbine en meestal tot grotere verplaatsingen van de gondel en de fundering. Voor een windturbine op een monopaal-fundering laat Corciulo et al 0 dit mooi zien (in hun figuren 15 en 16).

De beweging van de fundering is belangrijk, want dit is een maat voor de grootte van de trillingen in de bodem. Voor slappe grond geldt dat een stijvere fundering de krachten over een groter gebied afdraagt, zodat de trillingsamplitude in de grond rondom de fundering kleiner wordt. Dit effect neemt overigens af met de afstand tot de fundering. Daarnaast blijkt dat de fundering verschillende frequenties beter of minder goed doorgeeft.

2.3 Conclusie voor de beoordeling

Op de fundering van een windturbine staat een grote statische en een grote variabele kracht ten gevolge van de windbelasting.

Een aspect hierbij is dat het draaien van de rotor niet de enige en zelfs niet de belangrijkste bron van trillingen is. De variabele windbelasting op de wieken en de mast en de eigenfrequenties van de constructie geven de belangrijkste bijdrage. Dat betekent dat het plaatsen van de windturbine in de parkeerstand het trillingsniveau wel reduceert, maar er blijven trillingen. In een extreme windsituatie zijn deze trillingen vergelijkbaar met de situatie bij normaal bedrijf.

De trillingen worden wel gedurende de hele levensduur gegenereerd. Door het actieve gedrag van de turbine besturing is de invloed van de windsnelheid op de trillingssterkte beperkt. Als het waait is er een behoorlijk trillingsniveau, dat beperkt toeneemt bij een toenemende windsnelheid. Het gevolg is dat de fundering en de grond rondom de fundering door heel veel cycli met vergelijkbare amplitude worden belast.

Er moet hierbij worden benadrukt dat de optredende belasting uit de windbelasting afhangt van de eigenschappen van de windturbine en het regelsysteem.

3 De uitbreiding van trillingen in de bodem op basis van metingen

Op basis van metingen en theorie wordt gevonden dat de meest relevante trillingen niet of weinig voortplanten en dus alleen nabij de windturbine een rol spelen.

Doel van deze studies was na te gaan of de theoretisch gevonden afhankelijkheid van de windsnelheid in de praktijk ook optreedt en welke rol de grootte van de windturbine heeft. Er zijn drie situaties nader geanalyseerd:

- Een trillingsmeting bij een 3 MW windturbine (WT 2) in het Distripark Waddinxveen.
- Een controlemeting voor trillingen bij een 3 MW windturbine (WT 25) bij de Krammer.
- Een trillingsmeting bij een 7.5 MW windturbine (WT 26) in het Windmolenpark Westerveermeerdijk.

Tabel 3.1 geeft de afmetingen van de windturbines, zoals deze in openbare bronnen op internet zijn gevonden.

Tabel 3.1 Afmetingen beoordeelde windturbines [diverse publieke bronnen op internet].

Turbine	Vermogen [MW]	Ashoogte [m]	Diameter [m]	Tiphoogte [m]
Waddinxveen	3		90	
de Krammer	3	122	115	180
Westerveermeerdijk	7.5	135		199

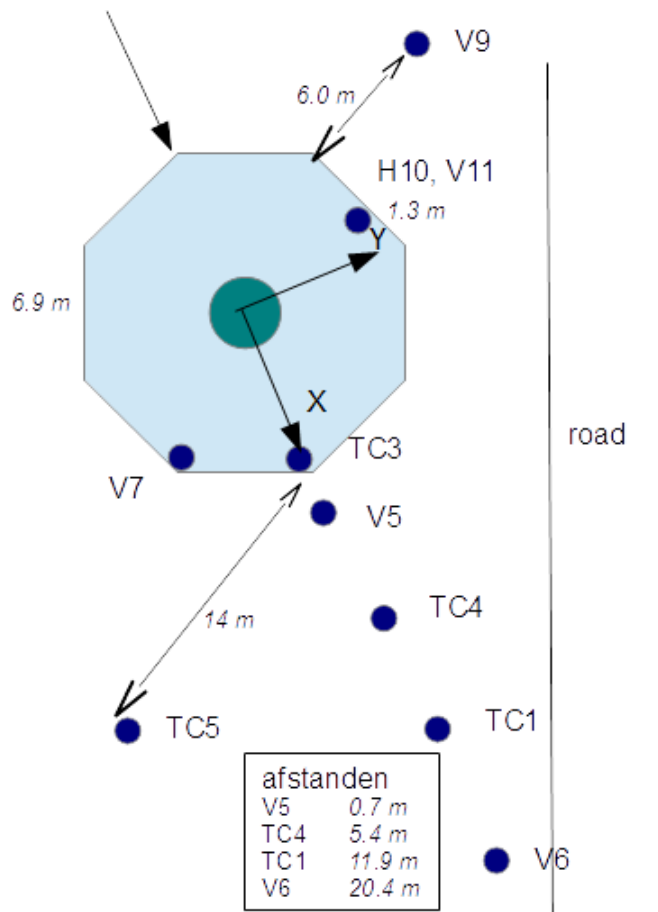
3.1 3 MW windturbine Distripark Waddinxveen

3.1.1 Opzet van de meting

Bij windturbine 2 in het Distripark in Waddinxveen is een trillingsmeting uitgevoerd, zie Foto 3.1. De metingen zijn beschreven en geanalyseerd in rapport 0. Het betreft een 3 MW-turbine op een slanke mast. Op de bovenzijde van het funderingsblok zijn 6 versnellingsopnemers geplaatst, in de grond rondom de windturbine zijn op 6 verschillende locaties in totaal 11 versnellingsopnemers aan maaiveld op pinnen geplaatst, zie Figuur 3.1. Deze opnemers meten versnellingen tot zeer lage frequenties. De metingen zijn uitgevoerd in een periode met een gemiddelde windsnelheid 15 m/s en uitschieters tot 23 m/s.



Foto 3.1 Overzicht van de meetlocatie.



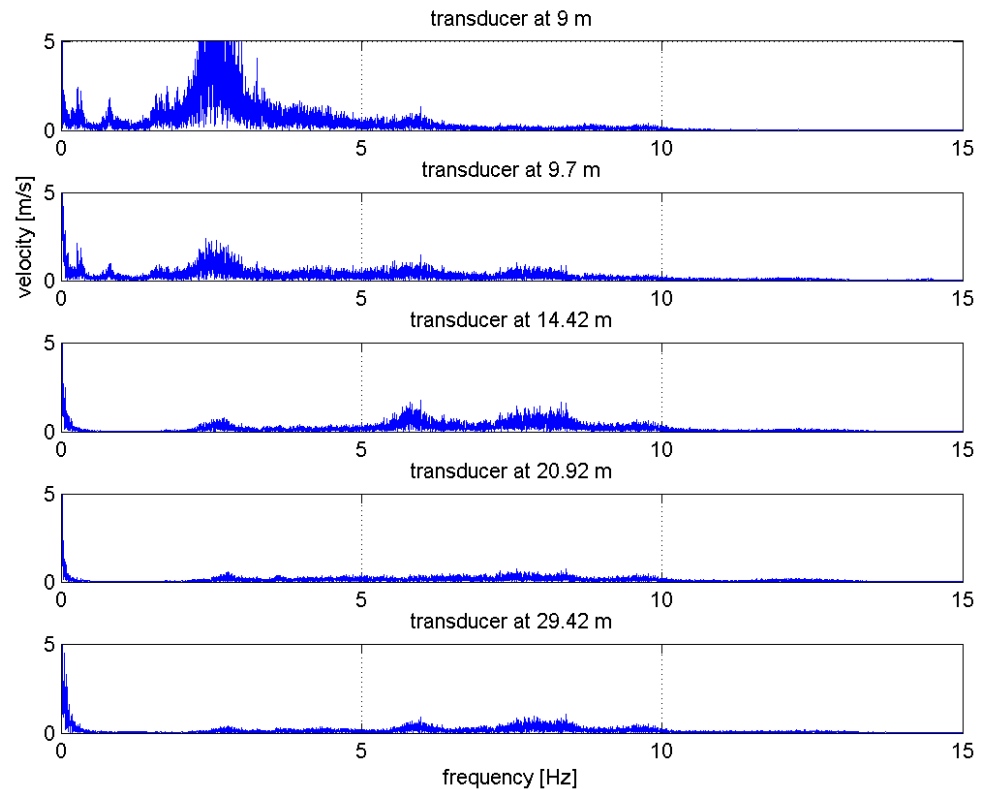
Figuur 3.1 Locatie van de opnemers ten opzichte van de windturbine en de weg.

3.1.2 Resultaten

Figuur 3.2 toont de verticale trillingssnelheid in het frequentiedomein. De trillingssnelheid is verkregen door integratie van de gemeten versnellingen. De bovenste functie in Figuur 3.2 toont de trilling in opnemer op 9 m; deze is geplaatst op de rand van het funderingsblok. De overige vier opnemers zijn in de grond geplaatst. De afstand van de opnemer tot het midden van de windturbine staat boven elke grafiek.

Deze figuur bevat een aantal opvallende resultaten:

- In de opnemers op 9 m (op het blok) overheersen de trillingen tot 6 Hz.
- Op 9.7 m (vlak naast het blok in de grond) zijn de trillingen onder de 5 Hz iets tot veel kleiner, terwijl voor de hogere frequenties de trillingen juist hoger zijn.
- De trillingen onder de 5 Hz nemen snel af met de afstand tot de windturbine.
- De trillingen boven de 5 Hz nemen veel minder snel af met de afstand tot de windturbine.



Figuur 3.2 Verticale snelheid op het blok en in de grond voor verschillende afstanden.

De hoge waarden rondom de frequentie 3 Hz zijn aanzienlijk hoger dan wordt verwacht op basis van het berekende gedrag van een windturbine (zie paragraaf 2.1). Deze hoge waarden worden hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door de eigenfrequentie van het funderingsblok op de paalfundering. Dit is uitgewerkt in 0.

De trillingen bij frequentie 8 Hz hebben nog wel een zichtbare waarde op 29.42 m afstand (dat is driemaal de straal van de fundering). Dit zijn de trillingen die zich via golven uitbreiden. Bij deze meting was de trillingssnelheid op deze afstand orde enkele tienden van mm/s. Dit is kleiner dan wat een passerende vrachtwagen in deze opnemer genereerde.

Er moet nog worden opgemerkt dat bij deze frequentie de berekeningen (paragraaf 2.1) geen noemenswaardige amplitude gaven, zie Figuur 2.2. Blijkbaar ontstaan deze frequenties door verschijnselen die niet in het model zijn opgenomen.

Tabel 3.2 geeft de gemiddelde en maximale windsnelheid weer die in de 10 minuten intervallen in Waddinxveen zijn gemeten. Het betreft een meting over 13 10 minuten intervallen, zodat er geen informatie over de waardes voor verschillende windsnelheden bestaat. De windsnelheid in nabij gelegen KNMI meetstations was ongeveer 14 m/s met maxima van 19 m/s .

Tabel 3.2 Trillingssnelheid op verschillende afstanden tot de windturbine in Waddinxveen 0. Bovenste deel tabel zijn de verticale trillingen, onderste deel tabel zijn de horizontale trillingen in de windrichting.

Opnemer	Kanaal	Afstand	Afstand	v_max	v_max
		tot rand	centrum	gemiddelde	maximum
		m	m	mm/s	mm/s
TC3-Z	11	-0.1	9.9	1.82	2.03
V5-Z	13	0.7	10.7	1.18	1.40
TC4 Z	5	5.4	15.4	0.49	0.55
TC1-Z	2	11.9	21.9	0.40	0.48
V6-Z	14	20.4	30.4	0.35	0.65
TC3-X	10	-0.1	9.9	0.77	1.04
TC4 X	4	5.4	15.4	0.42	0.48
TC1-X	1	11.9	21.9	0.50	0.65

3.1.3 Frequentie voor de overgang tussen statisch en dynamisch

Uit de metingen blijkt dat de laagfrequente trillingen sneller dempen met de afstand dan de hoogfrequente trillingen. Dit effect is in de literatuur ook bekend, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen niet-voortplantende golven ('staande' golven, laagfrequent) en voortplantende golven (hoogfrequent). De niet-voortplantende golven kunnen als statisch worden beschouwd, voor het beschrijven van voortplantende golven is een dynamische analyse vereist.

Aan de hand van analytische oplossingen voor de golfvoortplanting is nagegaan of er een absolute frequentie is die als grens voor de overgang van statisch en dynamisch gedrag kan worden gebruikt. Dit is gedaan voor verschillende geometrische situaties. Het resultaat is dat er formeel altijd een dynamische component in de oplossing aanwezig blijft. De keuze om bij een bepaalde frequentie een probleem als statisch op te vatten is dus altijd een benadering, waarbij geldt dat hoe lager de frequentie is des te lager de invloed van de dynamische component is en des te beter de benadering is.

De vraag bij welke frequentie de overgang ligt is lastig algemeen te beantwoorden omdat deze mede afhangt van de grootte van de fundering en de stijfheid van de bodem. Op basis van analytische oplossingen wordt in 0 gesuggereerd om 1/6 van de golflengte die hoort bij de hoogste frequentie, te gebruiken. De consequenties van deze keuze zijn niet verder beoordeeld.

3.1.4 Gevolgen voor de beoordeling

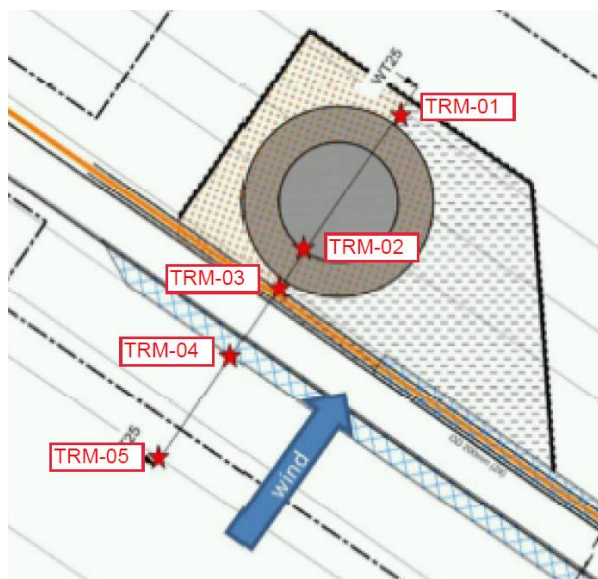
Het grootste aandeel van de trillingen die een windturbine genereert is laagfrequent en zal daardoor niet tot voortplantende golven leiden.

3.2 3 MW windturbine de Krammer

3.2.1 Opzet van de meting

Er is bij de Krammersluizen bij één WT (nummer 25) een controle meting uitgevoerd. De meetgegevens zijn beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat 0. Er is gemeten met 5 opnemers tellend van 1 t/m 5, zie ook Figuur 3.3

- 1 1 m achter de fundering (gezien in de windrichting, 'onderwinds').
- 2 Op de fundering.
- 3 1 m bovenwinds van de fundering.
- 4 10 m bovenwinds van de fundering.
- 5 22 m bovenwinds van de fundering.



Figuur 3.3 Schets van de meetopstelling bij WT25 nabij de Krammersluizen.

De opnemers meten in drie onderling loodrechte richtingen:

- X: Horizontaal parallel aan de waterkering, dus loodrecht op de overheersende windrichting.
- Y: Horizontaal loodrecht aan de waterkering, dus evenwijdig aan de overheersende windrichting.
- Z: Verticaal.

3.2.2 Resultaten

De gemeten variabelen bestaan uit het maximale trillingsniveau per 10 s als functie van de tijd. De windsnelheid is gemeten per 10 minuten interval. Om de resultaten te vergelijken is het hoogste trillingsniveau per 10 minuten bepaald. De resultaten zijn op twee manieren gepresenteerd:

- De windsnelheid en trillingssterkte als functie van de tijd.
- De trillingssterkte als functie van de windsnelheid.

Bijlage G toont de resultaten. De resultaten van het punt op de fundering zijn momenteel digitaal beschikbaar. Voor dit meetpunt is een andere strategie gevolgd om de meting te presenteren, zie Bijlage G.1 voor een korte omschrijving.

De trillingssterkte als functie van de windsnelheid toont duidelijk een opgaande trend met de windsnelheid. Deze is vrijwel lineair. Er is wel veel spreiding in de trillingssterkte.

Er is een globale visuele schatting gemaakt van de gemiddelde trillingsnelheid bij de laagste windsnelheid (7.5 m/s) en hoogste windsnelheid (25.0 m/s). Tabel 3.3 geeft de uitkomsten. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de gebruikte apparatuur een trillingsnelheid onder de 0.1 mm/s niet opslaat. Deze waarde wordt in de dwarsrichting in opnemer 5 blijkaar niet meer overschreden.

Tabel 3.3 Gemiddelde trillingsnelheid bij laagtes en hoogste windsnelheid bij de Krammer.

opnemer	Vx(7.5)	Vx(25.0)	Vy(7.5)	Vy(25.0)	Vz(7.5)	Vz(25.0)
1	0.25	1.5	0.2	1.3	0.25	1.5
2	0.2	1.4	idem	idem	idem	idem
3	0.2	1.1	0.3	1.2	0.25	1.3
4	0.12	0.7	0.15	0.8	0.15	0.75
5	-	-	0.10	0.55	0.15	0.6

3.2.3 Gevolgen voor de beoordeling

Het is belangrijk om op te merken dat deze meting is uitgevoerd met standaard meetapparatuur. Deze apparatuur voert standaard de signaalverwerking uit volgens de SBR-richtlijnen 0. Deze filteren de frequenties onder de 1 Hz met 40 dB per decade. Aangezien deze frequenties op en nabij de fundering een belangrijke rol spelen, leidt dit mogelijk tot een onderschatting van het trillingsniveau.

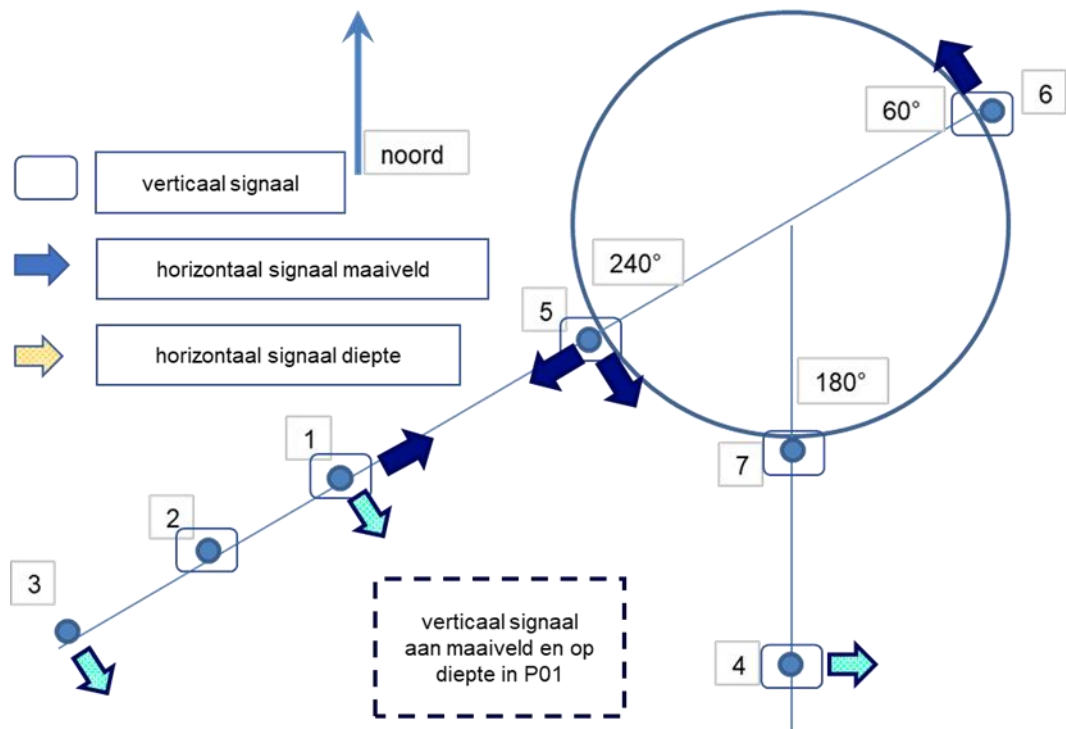
In het beschouwde frequentiedomein is in Tabel 3.3 zichtbaar dat de drie trillingsrichtingen in gemiddelde zin een vergelijkbaar trillingsniveau in de drie richtingen laten zien.

3.3 7.5 MW windturbine Windmolenpark Westermeerdijk

3.3.1 Opzet van de meting

Oorspronkelijk waren er 6 opnemers op het funderingsblok, 4 opnemers aan het maaiveld (verdeeld over 2 meetpunten) en twaalf opnemers op diepte (verdeeld over 4 meetpunten) voorzien, maar door blikseminslag is bijna de helft van de opnemers onherstelbaar beschadigd. Daarnaast zijn er in de gevoelige versnellingsopnemers regelmatig stabiliteitsproblemen op getreden, mogelijk door spanningsvariaties in de aanwezige elektriciteitskabel die de geogste energie van de windturbine afvoert.

Figuur 3.4 geeft het overzicht van de meetpunten en de beschikbare signalen. Een pijltje geeft aan dat het signaal in die richting beschikbaar is, een hokje geeft aan dat het verticale signaal beschikbaar is. Op meetpunt 1 staan twee opnemers: één aan maaiveld en één op diepte. De meetpunten 2, 3 en 4 zitten op diepte, de meetpunten 5, 6 en 7 zijn aan maaiveld.



Figuur 3.4 Meetopstelling bij windturbine 26 Westermeerdijk.

Van deze metingen zijn de volledige signalen in de tijd beschikbaar. Deze zijn verwerkt in intervallen van 10 minuten. Voor elke opnemer is een figuur voor de Power Spectral Density gemaakt, globaal een maat voor de amplitude als functie van de frequentie. Rapport 0 geeft een uitgebreide beschrijving van de verwerking van de metingen.

De windgegevens van het nabij gelegen KNMI station Houtribdijk (258)

3.3.2 Resultaten

De gemeten variabelen bestaan uit het gemiddelde en de maximale windsnelheid per uur als functie van de tijd. De trillingsnelheid is gemeten per 10 minuten interval. Om de resultaten te vergelijken is het hoogste trillingsniveau per uur bepaald. De resultaten zijn gepresenteerd als de trillingssterkte als functie van de windsnelheid. Bijlage H toont de resultaten.

De trillingssterkte als functie van de windsnelheid toont duidelijk een opgaande trend met de windsnelheid. Deze is vrijwel lineair. Er is wel veel spreiding in de trillingssterkte.

In een tussentijds rapport 0 is een andere methode gesuggereerd om de trillingen te vergelijken, gebaseerd op de overdrachtsverhouding (de verhouding tussen trillingssnelheid en windsnelheid). Bij nadere beschouwing is gebleken dat deze methode ongeschikt is om windturbines onderling te vergelijken. Daarom is in deze handreiking de vergelijking beperkt tot het presenteren van de basisgegevens uit de metingen en de trendlijn in deze gegevens.

Tabel 3.4 geeft de gemiddelde (en maximale) trillingssnelheid op basis van de geschatte trend uit de gegevens. Hoewel de resultaten tot 5 m/s bekend zijn, is als ondergrens 7.5 m/s gebruikt om in overeenstemming te zijn met Tabel 3.3. Er is dan een eenvoudigere vergelijking met de resultaten in de Krammer (paragraaf 3.2.2) mogelijk.

Tabel 3.4 Trendlijnen trillingssnelheid voor windsnelheid voor windturbine 26 Westermeerdijk.

Opnemer	Richting	x = 7.5 m	x = 25.0 m
P05Fvrt	verticaal	0.82	1.63
P05F240	evenwijdig	0.36	0.75
P05F150	loodrecht	0.46	0.92
P06Fvrt	verticaal	0.85	1.68
P06F330	loodrecht	0.48	0.95
P07Fvrt	verticaal	0.79	1.52

De figuren voor de trillingen aan het maaiveld geven geen betrouwbaar beeld. Er zijn veel trillingen rond de 0.1 mm/s, met enkele uitschieters tot boven de 0.7 mm/s. Hier is ook geen trend met de windsnelheid zichtbaar. Op basis van de problemen bij de uitvoering van deze meting en de interpretatie, kan geen duidelijke uitspraak worden gedaan.

3.3.3 Gevolgen voor de beoordeling

Ook bij deze meting is het beeld dat de laagfrequente trillingen in de fundering minder goed in de bodem uitstralen, maar het beeld is onbetrouwbaar. Op het eerste gezicht lijkt het effect minder uitgesproken dan bij de meting in Waddinxveen.

De windturbine is bij verschillende windsnelheden geparkeerd geweest. Daaruit blijkt dat het trillingsniveau in de fundering en omgeving afneemt door het parkeren van de windturbine. Dit is in overeenstemming met de resultaten uit het rekenmodel.

3.4 Conclusie voor de beoordeling

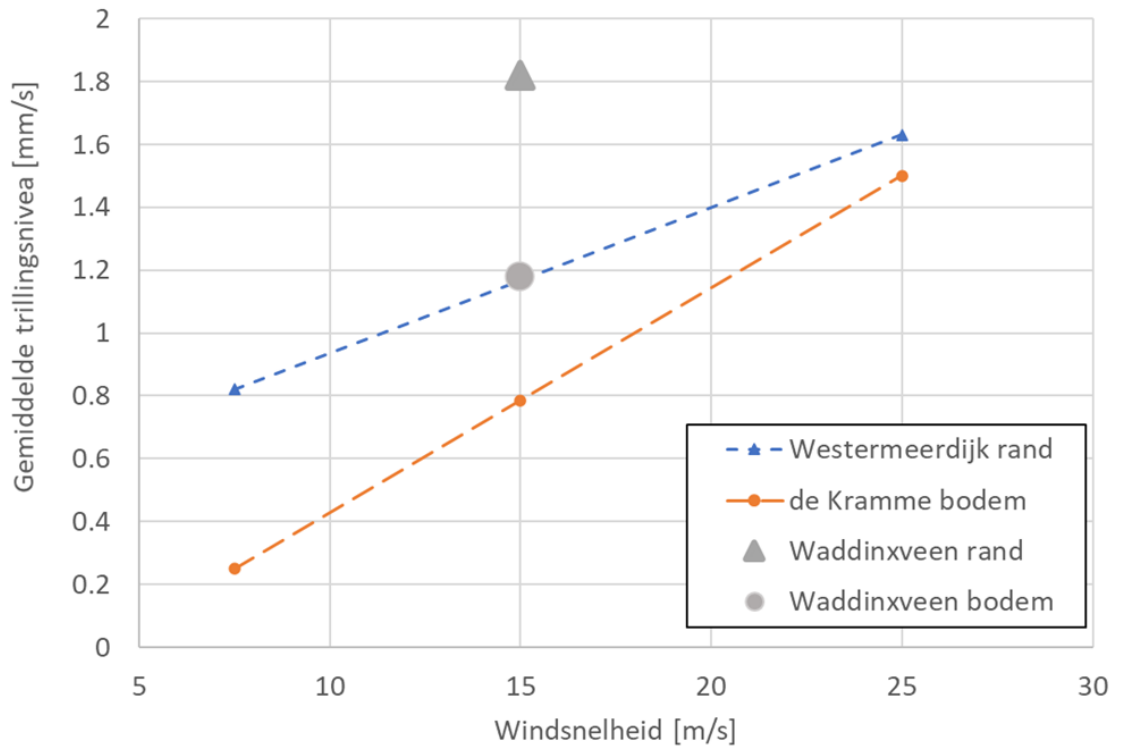
De variabele kracht geeft trillingen die een lage frequentie hebben. Dat betekent dat deze trillingen niet ver uitstralen en dus vooral merkbaar zijn nabij de fundering. Dat geldt ook voor de statische component. In de uitgevoerde meting was op 5 m afstand uit de rand van de fundering alleen nog de trilling zichtbaar die door de resonantie van de fundering ontstaat en de hogere min of meer ruisvormige trillingen. Deze laatste planten zich duidelijk wel voort.

Omdat de trillingen laagfrequent zijn, zijn de bijbehorende trillingssnelheid en versnelling klein. Dat betekent dat verschijnselen die samenhangen met de versnelling naar verwachting geen grote invloed op de veiligheid van de waterkering hebben.

De conclusie uit de metingen bij de windturbine bij de Krammer en de windturbine Westermeerdijk geven beide aan dat er een lineair verband tussen de windsnelheid en de trillingssnelheid bestaat.

Op basis van de metingen kan geen duidelijk verband tussen de grootte of het vermogen van de windturbine en de trillingssterkte worden gelegd. Figuur 3.5 toont een indicatieve vergelijking van de resultaten van de drie windturbines. Voor de windturbines bij de Krammer en Westermeerdijk zijn de gemiddelde trillingengegeven over een periode van een week. Voor de windturbine bij Waddinxveen het gemiddelde over een meting van twee uur. Voor Waddinxveen is ook de extreme waarde gegeven, voor de andere twee windturbines kan dit in de bijlages (Bijlage G en Bijlage H) worden gevonden. Het zijn indicaties, omdat opnemers op verschillende posities worden vergeleken. Maar de posities zijn wel redelijk vergelijkbaar.

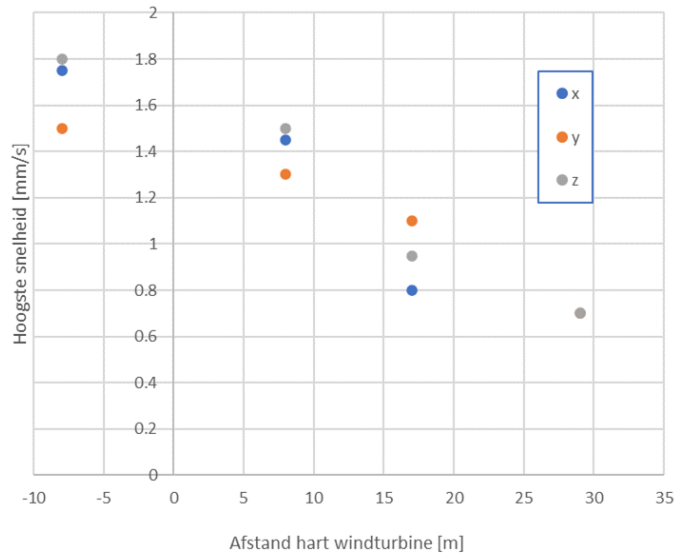
Vergelijking trillingssterkte



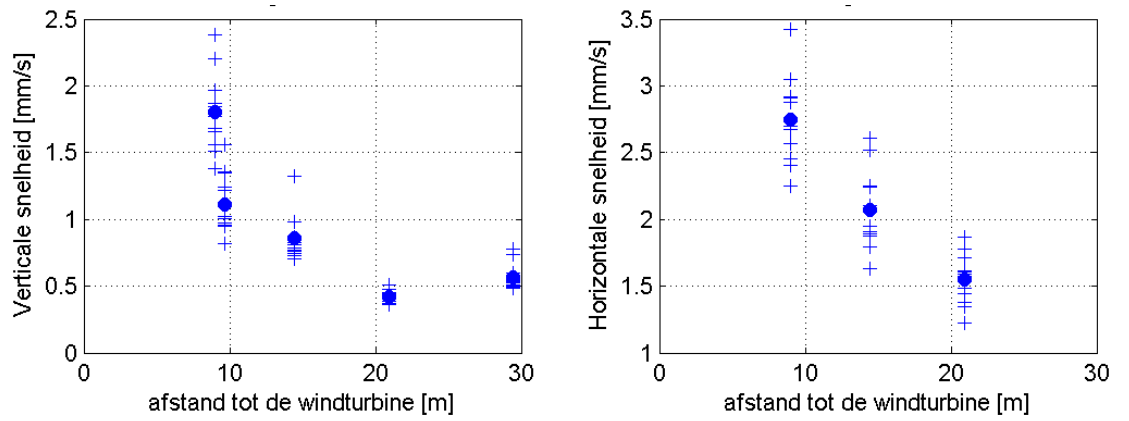
Figuur 3.5 Globale vergelijking resultaten voor de drie windturbines.

De meting bij Waddinxveen suggereert een hoger trillingsniveau dan bij de Krammer bij gelijke windsnelheid. Hierbij moet wel worden aangetekend dat de meting bij de Krammer mogelijk lagere frequenties heeft gefilterd, wat op de fundering wel van belang is, maar verder weg minder belangrijk (deze lage frequenties geven geen lopende golven). Het trillingsniveau bij de aanzienlijk grotere windturbine Westermeerdijk is daarentegen op de fundering nauwelijks hoger dan op de fundering in Waddinxveen.

De afname van de trillingen met de afstand kan op basis van de metingen bij de windturbines bij de Krammer en Waddinxveen worden beschouwd. De meetresultaten zijn samengevat in Figuur 3.6 voor de windturbine bij de Krammer en Figuur 3.7 voor de windturbine bij Waddinxveen. In beide figuren is de as van de windturbine op afstand 0. De afname van het trillingsniveau is zichtbaar. De informatie is te beperkt om een macht voor de afname van de trillingen te bepalen. Omdat de afname sterk frequentie-afhankelijk is (zie paragraaf 3.1) zal deze macht nog afhangen van de afstand.



Figuur 3.6 Gemeten gemiddelde trillingen in de bodem voor windturbine bij de Kramer. Betekenis richtingen, zie paragraaf 3.2.1.



Figuur 3.7 Gemeten trillingen in de bodem voor windturbine bij Waddinxveen. Legenda: symbool + geeft waarde voor 10 minuten interval, symbool o geeft gemiddelde over de dd13 beschikbare intervallen. Links de verticale snelheid, rechts de horizontale snelheid.

4 Aanpak van de verdere uitwerking

4.1 Algemeen

In de volgende hoofdstukken worden de mogelijke consequenties van trillingen op een waterkering besproken. De faalmechanismes uit de huidige regelgeving 0 worden als uitgangspunt gebruikt. Bij elk faalmechanisme wordt de volgende aanpak gevolgd:

1. Het faalmechanisme wordt kort beschreven, mede gebaseerd op 0.
2. Er wordt aangegeven hoe de statische belasting en de variabele belasting uit de windturbine invloed kunnen uitoefenen op het faalmechanisme.
3. Er wordt aangegeven hoe dit modelmatig uitgewerkt kan worden. Hierbij wordt indien nodig aandacht besteed aan de plaats van de windturbine in de waterkering.
4. Op basis van de aangegeven belasting (uit de beschikbare trillingsmeting of de berekeningen) wordt aangegeven in welke gevallen de belasting uit de windturbine een rol zal spelen.
5. Mogelijke handelingsperspectieven worden benoemd.

Elk hoofdstuk of elke paragraaf wordt in vier delen gedeeld: "Beschrijving", "Invloeden", "Modellering" en "Conclusie en handelingsperspectief". Voor elke invloedsfactor benoemd onder het kopje "Beschrijving", wordt in het deel "Modellering" de punten 3 en 4 samen behandeld.

In het algemeen kunnen de meeste mechanismes worden geanalyseerd door de externe belasting, de interne belasting en de sterkte te beschouwen. In de geotechniek moet de invloed van gebeurtenissen (bijvoorbeeld vervorming of belastingen) op de sterkte ook worden beschouwd. Dit resulteert in de vergelijking

$$F_{external} + F_{internal} > R_{static} - R_{reduction} \quad (1.1)$$

Met:

$F_{external}$	De externe belasting op de constructie (bijv. een uitwendige waterdruk).
$F_{internal}$	De interne belasting op de constructie (bijv. de zwaartekracht, een inwendige stromingskracht).
R_{static}	De aanwezige sterkte (statische) sterkte (bijv. een wrijvingshoek).
$R_{reduction}$	de reductie van de sterkte ten gevolge van een gebeurtenis (bijv. een inwendige waterdruk, een trilling).

De volgende hoofdstukken volgen veelal de aanpak om de invloed van de statische spanning en de variabele spanning in de fundering en de bodem op deze vergelijking te beschrijven.

4.2 Mogelijke gevolgen van een cyclische belasting

De belasting uit de windturbine is voor het grondstelsel nauwelijks dynamisch te noemen. Daarom zullen er in de bodem geen hoge versnellingen ontstaan. Ook resonantie zal niet optreden.

Het betreft wel wisselende belastingen, zodat in de bodem ook wisselende belastingen ontstaan. Deze leiden tot een wisselende toename en afname van de spanningen in de grond. Voor granulaire materialen betekent dit een afnemende sterkte als de gemiddelde spanning daalt.

Cyclische belastingen kunnen in zand aanleiding geven tot verdichting. Als het zand met water verzadigd is leidt dit tot waterspanningen die moeten afstromen. Als de afstroming te

lang duurt treden wateroverspanningen op die tot een lagere gemiddelde korrelspanning leiden en dus een lagere sterkte in zand. Waterspanningen die niet kunnen dissiperen omdat de stroming door een kleilaag dit verhindert geven extra waterdruk tegen de kleilaag.

Als het water in een verdichtende zandlaag wel kan afstromen leidt verdichting tot vervorming, waarbij het zand een kleiner volume inneemt. Als dit ongehinderd mogelijk is, is dit zichtbaar aan maaiveldzakkingen. Als de vervorming verhinderd wordt leidt dit tot een lagere (gemiddelde) spanning in zand en dus een lagere sterkte, of tot spleetvorming in het zand.

In de literatuur wordt veelal gemeld dat er bij lage versnellingen geen verdichting kan optreden. In het literatuuronderzoek voor de vernieuwde SBR-richtlijn 'Trillinghinder' 0 is geconstateerd dat dit in het algemeen onjuist is: bij een cyclische triaxiaalproef zijn de versnellingen verwaarloosbaar klein, maar treedt er wel verdichting op. Onder de aanname dat de spanning in de grond maatgevend is voor het optreden van de verdichting, bepaalt het systeem en de frequentie van de belasting of deze samenhangt met de versnelling, snelheid of verplaatsing. Bijlage A.2 geeft hierover meer informatie.

Veel materialen leiden aan vermoeiing onder een cyclische belasting. Bij klei lijkt dit inderdaad het geval. Bij zand is de situatie minder duidelijk. Bij cyclisch belaste palen in zand wordt in het algemeen wel rekening gehouden met een afname van het draagvermogen door cyclische belasting, maar het is onduidelijk of dit samenhangt met een afnemende sterkte door vermoeiing of een afnemende sterkte door verdichting langs de schacht. Als rondom een paal verdichting optreedt neemt de horizontale spanning in de grond af en daardoor neemt de opneembare schuifspanning langs de schacht af. Daarbij komt wel dat zand bij hoge dichtheid in het algemeen sterker is dan bij een lage dichtheid.

De beschikbare modellen voor verdichting van zand zijn niet geschikt om te extrapoleren naar het aantal cycli dat een windturbine in zijn levensduur genereert. Daarbij is weinig informatie beschikbaar het gedrag van zand bij het lagere trillingsniveau dat optreedt rondom een windturbine. Dit aspect is in het STW-onderzoek aangepakt. De resultaten hiervan zijn kort beschreven in Bijlage C. Voor dit onderzoek is het aspect nog wat verder uitgewerkt in de Bijlagen C.3 en C.4.

Ook bij de vraag of er een ondergrens aan de spanning is waarbij verdichting optreedt lijkt het antwoord niet te passen bij de gangbare opinie hierover. Bij halvering van de amplitude van de belasting zijn viermaal zo veel cycli nodig om een waarneembare verdichting te krijgen. Een beproeving duurt dan ook viermaal zo lang. Dit levert verschillende praktische problemen op, terwijl het aantal cycli tot nu toe nooit relevant was. Cyclische belasting is echter een zeer efficiënte manier van verdichting en een groot aantal cycli maakt het mogelijk dat zeer kleine effecten toch merkbaar accumuleren.

4.3 Verschil nieuwbouw en bestaande windturbines

Er is een belangrijk verschil tussen de beoordeling van nieuw te plaatsen windturbines en bestaande windturbines. Bij nieuw te plaatsen windturbines is het mogelijk de ruimte om de exacte locatie van de turbines dusdanig te kiezen dat er geen of aanzienlijk minder invloed op de relevante bezwijkmechanismen van de waterkering is. In verband met de onzekerheid van de invloed van een windturbine op de waterkering is dit in het algemeen een te prefereren optie. Omdat de invloed van de trillingen (en met name de laagfrequente trillingen) afneemt met de afstand is het zeker de moeite waard dit te beschouwen. Op basis van metingen kan een indruk worden gekregen hoe snel de trillingssterkte afneemt.

Bij windturbines die al in de buurt van waterkeringen zijn geplaatst, of als nieuwbouw op afdoende afstand niet mogelijk is, dan komen geavanceerdere beschouwingen zoals in de volgende hoofdstukken aan de orde. Naast het aspect trillingen (dat in deze handreiking wordt uitgewerkt), moet ook aandacht worden besteed aan andere aspecten, waaronder de verstoring van het stromingsveld en de invloed van de constructie op de sterkte van de waterkering. Bij het bepalen van de faalkans van deze situaties moet rekening worden gehouden dat het complexe mechanismes zijn waarover weinig kennis over en ervaring mee is.

5 Macro-stabiliteit, binnenwaarts en buitenwaarts

Beschrijving

Er is sprake van macro-instabiliteit als grote delen van een grondmassief afschuiven langs rechte of gebogen diepe schuifvlakken 0. De binnenwaartse en buitenwaartse macrostabiliteit worden in één hoofdstuk behandeld omdat de situatie voor de eisen in dit rapport identiek zijn. In de praktijk zijn de normen voor buitenwaartse en binnenwaartse stabiliteit wel verschillend.

Invloeden

De belastingen uit de windturbine kunnen hier op verschillende manieren invloed op hebben:

- De versnellingen die veroorzaakt worden door de trillingen, geven een extra inwendige belasting op de afschuivende grondmoot.
- Door het trillen treedt verdichting op die door de waterspanningsgeneratie leidt tot een lagere effectieve spanning en een lagere sterkte van een granulair materiaal.
- Door de aanwezigheid van extra (trek- en schuif-) spanningen is de effectieve spanning lager en is de (rest-) sterkte van een materiaal lager.

De eerste twee mechanismes zijn ook bekend uit de analyse van stabiliteit onder aardbevingsbelasting.

Modellering

Versnellingen

In rapport 0 is door verkennend numeriek onderzoek nagegaan of de trillingen met eindige elementen kunnen worden gemodelleerd en in hoeverre deze invloed hebben op de stabiliteit.

Een versnelling van de ondergrond heeft bij een stabiliteitsberekening verschillende effecten op het evenwicht van de afschuivende grondmoot:

- Als de versnelling een verticale component omhoog heeft, leidt dit tot een lagere verticale spanning en de daarbij horende lagere wrijving.
- Als de versnelling een horizontale component naar buiten gericht heeft leidt dit tot een vergroting van het aandrijvende moment.
- Daarnaast kunnen nog waterspanningen worden gegenereerd, waardoor de sterkte afneemt.

De eerste twee effecten hangen rechtstreeks samen met de maximale versnelling. Bij een gegeven maximale versnelling snelheid van \hat{a} a m/s^2 , kan de dichtheid van de grond ρ_g worden verlaagd met de traagheidskracht bepaald uit de versnelling gedeeld door de versnelling van de zwaartekracht dus verminderd $\hat{a}\rho_g/g$ (met $g = 9.81 m/s^2 \approx 10 m/s^2$).

Uitgaande van een versnelling onder de $0.1 m/s^2$ geeft dit een aanpassing onder de 1%. Dat betekent dat het aandrijvend moment minder dan 1% toeneemt en de weerstand minder dan 1% afneemt. Bij de trillingsmetingen bij de Krammer zijn maximale versnellingen in de orde van $0.2 m/s^2$ gerapporteerd.

Omdat de belastingsfrequenties relatief laag zijn, zijn de versnellingen ook laag en hebben deze weinig invloed op de stabiliteit. De aanwezige paalfundering geeft wel een hogere stabiliteit als de palen de krachten kunnen dragen en de grond de extra belasting daadwerkelijk aan de palen kan overdragen (er moet voldoende wrijving mogelijk zijn). De situatie

dat de fundering juist buiten de glijcirkels (zonder windturbine) staat is daarmee maatgevend. Dan is immers de (beperkte) invloed van de trillingen maximaal maar treedt er geen versterking door de aanwezigheid van de palen op.

Door de lage frequentie van de belasting en de beperkte invloed is het aanvaardbaar om eventuele berekeningen als statisch uit te voeren. De spanningen ten gevolge van de trillingen worden dan verder weg van de windturbine onderschat, maar daar is de invloed ook beperkt.

Generatie waterspanningen uit cyclische belasting

De grootte van de cyclische belasting moet in dit geval worden uitgedrukt in trillingssnelheid of zelfs de verplaatsing (tijdens een trilling). De trillingen zullen in zand mogelijk tot verdichting leiden, maar de verwachting is dat dit proces zo langzaam verloopt dat de waterspanningen die worden gegenereerd in de meeste gevallen zullen afstromen. Alleen in volledig afgesloten zandlichamen kunnen waterspanningen ontstaan. Op lange termijn kan verdichting gunstig uitwerken als de sterkte van het verdichte zand toegenomen is. Daarvoor zijn wel vervormingen noodzakelijk, die op zichzelf nadelig kunnen zijn (bijvoorbeeld door een lagere kruinhoogte, een ongunstigere ligging talud helling of holtes onder een afdeklaag).

Aanwezigheid grotere inwendige spanningen door belasting windturbine

Uit de verkennende numerieke berekeningen bleek dat de invloed van deze krachten op de macro-stabiliteit beperkt is. De belasting hoeft dan ook niet als dynamisch te worden opgevat, de maximaal verwachte kracht als externe statische belasting op de te voeren lijkt voldoende. Als het gebruikte stabiliteitsprogramma hier een bruikbare optie voor heeft kan dit worden ingevoerd, zeker in situaties waarbij de fundering nabij de verwachte maatgevende glijcirkels wordt geplaatst.

Conclusie en handelingsperspectief

De invloed van versnellingen is klein. Zekerheid kan worden verkregen door de geschatte versnelling te delen door de zwaartekracht en de geëiste veiligheidsfactor met dit percentage te verhogen. Dit is werkbaar voor versnellingen onder de 0.1 m/s^2 .

Als uit de analyses blijkt dat opbouw van waterspanningen mogelijk is, dan kan het aanbrengen van drainage een oplossing zijn

De invloed van de statische belasting hoeft alleen te worden meegenomen als de windturbine vlak bij de maatgevende glijcirkel staat. Dan moet de belasting worden opgenomen in de berekening. Als de windturbinefundering de glijcirkels doorsnijdt wordt de waterkering sterker onder de voorwaarde dat de palen en de grond-paal interactie voldoende sterkte heeft.

6 Piping

Beschrijving

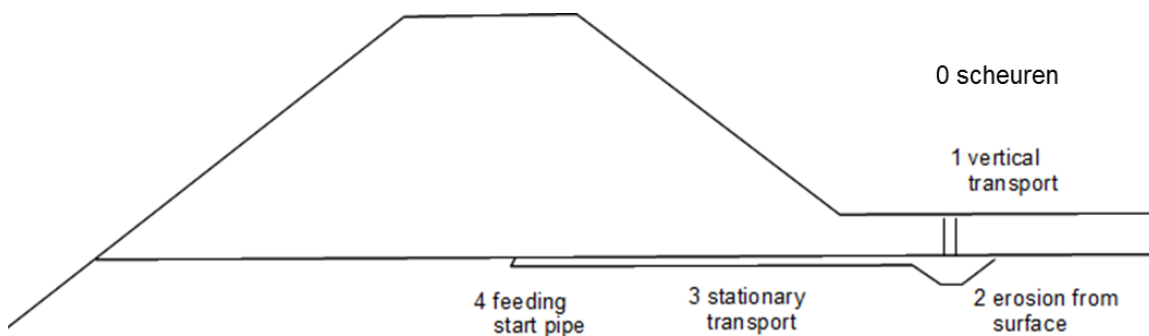
Onder piping wordt in dit rapport verstaan de terugschrijdende interne erosie die wordt veroorzaakt door de stroming van water door de ondergrond ten gevolge van het waterstandsverschil tussen buitenwater enerzijds en maaiveldhoogte dan wel polderpeil binnendijs, zie ook 0. Het proces van interne erosie kan uiteindelijk resulteren in falen van de waterkering. Het proces kan een progressief karakter hebben: de erosie gaat als deze eenmaal begonnen is, vanaf een bepaald punt (een bepaalde ontwikkelde pipelengte) steeds sneller verlopen.

Als de aanwezigheid van een windturbine de kans op piping vergroot is dit met name van belang voor waterkeringen die al een risico hierop lopen, meestal rivierdijken. Maar ook voor zeekeringen, die meestal minder gevoelig zijn voor piping omdat het hoogwater meestal kortdurend is, kan een versnelling van het proces gevolgen hebben.

Het gaat in dit hoofdstuk over de piping die optreedt in een zandlaag onder een afdekkende kleilaag. Een andere vorm van piping is gerelateerd aan de stroming van water door de mogelijke opening die ontstaat tussen de constructie en de bodem. Deze wordt behandeld in hoofdstuk 10.

In het TU Delft onderzoek is de invloed van trillingen en interne krachten op het verschijnsel piping uitgewerkt 0. In deze beschouwing wordt voor de gedachtenvorming steeds één pipe (kanaal) bekeken, waarbij de bodem trilt door een passerende golf. Als de windturbine is geplaatst in de zone waar de piping wordt geïnitieerd, wordt de analyse complexer.

Het proces is in rapport 0 opgesplitst in vijf deelprocessen, zodat voor elk deelproces de invloed via een passend mechanica model kan worden beoordeeld. Figuur 6.1 toont de vijf processen. Het water en het zand stroomt van links naar rechts, de interne erosie begint rechts en beweegt zich naar links toe.



Figuur 6.1 Basisprocessen voor beoordeling piping.

Het proces begint met het scheuren (of aanwezig zijn van scheuren) in de afdeklaag van het zand. Omdat hier geen zandtransport plaatsvindt, heeft dit proces nummer 0 gekregen. Om tot piping te komen moeten de processen 1 t/m 4 alle plaatsvinden, waarbij het begint met proces 1 en dan steeds een volgend proces kan ontstaan. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze complexe modelleringen niet volledig zijn afgerond en tot concrete conclusies hebben geleid.

Invloeden

De belastingen uit de windturbine kunnen hier op verschillende manieren invloed op hebben:

- De versnellingen die veroorzaakt worden door de trillingen, geven mogelijk een extra opwaartse versnelling aan de zandkorrels (zie ook bijlage A.2, het voorbeeld met het glijdende blokje).
- Door de krachten op de bodem gaan de aanwezige scheuren of kanalen verder openstaan (of worden juist dicht gedrukt) en er kan een reductie van de in de grond aanwezige spanningen optreden.
- Door de variërende krachten op de bodem ontstaan er variërende stromingen in de scheuren of kanalen.
- Door verdichting ontstaat er lokaal meer ruimte tussen de afdekkende kleilaag en het zand, waardoor de waterstroming toe kan nemen.

Modellering

Voor deelproces scheuren (nummer 0) is de statische kracht van belang. Als deze een maximale trekkracht in de bodem geeft, is de kans op scheuren het grootst. Omdat de belastingsfrequentie laag is, is in dit geval de verplaatsing maatgevend voor de spanning en niet de deeltjessnelheid. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat voor de meeste materialen geldt dat een cyclische belasting meer schade geeft dan een constante belasting. Dit scheuren kan natuurlijk gebeuren voordat de hoogwatersituatie optreedt, er is een sterke wind uit ongunstige richting voor nodig. Omdat de spanningstoename snel afneemt met de afstand tot de fundering, is dit alleen een risico als de paalfundering dicht bij het potentiële uittredepunt staat.

De overige deelprocessen (1 t/m 4) zijn redelijk vergelijkbaar m.b.t. het belang van de verschillende invloeden.

Verticale versnelling

De versnelling is weer klein ten opzichte van de versnelling van de zwaartekracht en speelt hierdoor een minder belangrijke rol. Ook voor de zandkorrels geldt dat de opgelegde versnellingen maar een paar procent van de versnelling van de zwaartekracht zijn.

Krachten in de bodem

De krachten in de bodem zijn vrijwel statisch en door de relatief lage frequenties zullen de verplaatsingen belangrijker zijn voor de beoordeling dan de snelheid of versnelling. In bijlage E is voor een denkbeeldige situatie de grootte van de variaties door een belasting op een paal nagegaan. Dit leidt tot aanzienlijke invloeden. Met name de spanningsvariaties rondom een kanaal zijn aanzienlijk.

Variërende stroming

Ook dit aspect is in bijlage E kort bekeken. De grootte was orde 10%. Dat is aanzienlijk groter dan de invloed van de versnelling, vergelijkbaar met de invloed van de spanningen.

De conclusie is dat deze krachten de weerstand tegen inwendige erosie rondom een stroomkanaal aanzienlijk kunnen verlagen. Hierbij moet worden aangetekend dat dit alleen in de nabijheid van een belaste paal een rol speelt.

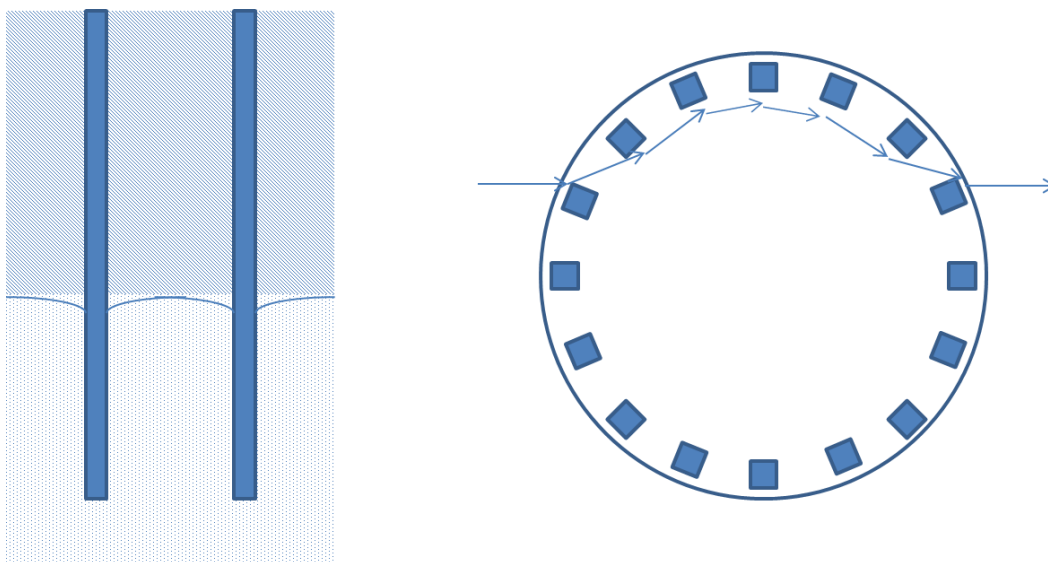
Verwacht mag worden dat de spanningstoename naar de palen toe veroorzaakt dat een kanaal rondom de palen snellere terugschrijdende erosie vertoont en een grotere dikte krijgt. Hierdoor zal het ontstaan van kanalen die aanleiding kunnen geven tot piping worden versneld.

Invloed verdichting

Als de verdichting overal gelijkmatig optreedt is er niets aan de hand, dan zakt de waterkering een stukje. Een zakking door verdichting kan echter aanzienlijk zijn, omdat een verdichting van 1% in een zandlaag van 6 m al een zakking van 6 cm geeft. De verdichting is naar verwachting niet gelijkmatig. De verdichting zal geconcentreerd zijn rondom de palen en in de ruimte zullen er locaties zijn waar meer of minder zakking optreedt door natuurlijke heterogeniteit van de grond. Lokale zakkingsverschillen van 1 mm lijken niet uitgesloten. Dit kan betekenen dat er al kanalen ontstaan voordat er erosie opgetreden is.

Conclusie en handelingsperspectief

Een ontwerpbenadering is aan te nemen dat het gebied onder de windturbinefundering geen bijdrage aan de weerstand tegen piping geeft. De aanname is dan dat als een terugschrijdend kanaal eenmaal een funderingspaal heeft bereikt, dit kanaal vrijwel direct aan de andere zijde van de fundering aankomt. Figuur 6.2 geeft een schets van de situatie waarbij verdichting rondom de palen aanleiding geeft tot mogelijke kanaalvorming onder een kleilaag langs de palen. Hierbij wordt verondersteld dat de klei ondanks de vele cycli niet met het zand mee vervormt. Onder deze aanname kan de diameter van de fundering worden afgetrokken van de kwelweglengte L die in de berekening moet worden toegepast, zie paragraaf 7.1 van 0.



Figuur 6.2 Invloed van verdichting rondom een paal op mogelijke piping. Links geeft aan dat als de palen dicht bij elkaar staan de (cirkelvormige) zakkingsgebieden elkaar kunnen raken. Rechts geeft aan hoe de verbinding tussen de palen een doorlopend kanaal vormen.

Indien de waterkering niet meer aan de eis voor piping voldoet kan worden overwogen een scherm onder of achter de windturbine fundering te plaatsen. De horizontale lengte van dit scherm moet minimaal zodanig worden gekozen dat het scherm alle paden via de fundering die korter zijn dan de kwelweglengte, afsluit.

Stilzetten van de windturbine tijdens een hoogwater lijkt weinig effect te hebben, omdat de kanaalvorming dan al aanwezig is. Stilzetten reduceert wel de invloed van eventuele spanningen in de grond, hoewel de reductie beperkt is (zie paragraaf 2.1).

Het toepassen van een grondverdringende paal heeft mogelijk ook een positieve invloed, omdat tijdens de installatie van de paal de dichtheid van het zand groter zal worden. Naar verwachting is dit echter geen afdoende maatregel.

7 Micro-stabiliteit

Beschrijving

Het mechanisme micro-instabiliteit wordt in 0 expliciet beschreven als het ontstaan van schade aan een ondiepe laag in de constructie ten gevolge van stroming van water door de constructie. Het onderscheid met het mechanisme “Bezwijken bekleding” in hoofdstuk 8 is gemaakt doordat bij dat mechanisme de schade aan een ondiepe laag in de constructie ontstaat ten gevolge van stroming van water over het binnentalud van de waterkering. Dit treedt met name op als er overslag van water is.

Het binnentalud heeft meestal een groene bekleding (gras). Daarin wijkt dit mechanisme ook af van het mechanisme “Bezwijken bekleding”, voor buitentaluds worden naast groene bekleding ook vaak steenzettingen of asfalt toegepast.

Vooraf is het goed op te merken dat de aanwezigheid van de palen en het funderingsblok in de waterkering invloed kan hebben op de waterstroming in de dijk. Deze aspecten worden hier niet bekeken, het rapport beperkt zich tot de invloed van de spanningen die ontstaan door kracht en de trillingen ten gevolge van de windbelasting op de windturbine.

Op basis van o.a. 0 wordt gesteld dat het fenomeen vooral relevant is voor dijken met een zandkern. Daarin kan een voldoende hoge interne waterstand optreden, waardoor de afdeklaag op het binnentalud of omhoog wordt gedrukt (doordat de afdeklaag ondoorlatend is, meestal is dit het geval als deze uit klei opgebouwd is, bij sommige zeedijken uit asfalt) of de uitstroomsnelheid zo groot wordt dat er erosie van de toplaag optreedt. Bij een toplaag van zand bestaat de erosie uit het meevoeren van korrels, bij een toplaag van klei kan dit optreden door het uitschuren van materiaal als water door scheuren stroomt. Stoutjesdijk 0 tekent hierbij aan dat de afdeklaag aan de waterzijde van de waterkering wel zo doorlatend moet zijn dat de hoge waterstand kan optreden en dat het debiet dat nodig is voor erosie in stand kan blijven.

Invloeden

De belastingen uit de windturbine kunnen hier op verschillende manieren invloed op hebben:

- De versnellingen die veroorzaakt worden door de trillingen, geven mogelijk een extra opwaartse versnelling aan de toplaag.
- Door een (trek)kracht in de grond neemt de sterkte van het materiaal in de afdeklaag af.
- Door de krachten op de bodem gaan de aanwezige scheuren of kanalen verder openstaan (of worden juist dicht gedrukt).
- Door de variërende krachten op de bodem ontstaan er variërende stromingen in de scheuren of kanalen.

Modellering

Opwaartse versnelling

De situatie is in dit geval redelijk vergelijkbaar met de situatie bij macro-stabiliteit. De opwaartse versnelling moet in beginsel in mindering worden gebracht op het gewicht van de afdeklaag. De versnellingen zijn door de lage frequenties meestal laag, zodat dit een beperkte correctie betreft.

Afname van de sterkte door een aangebrachte (trek)spanning

Dit effect treedt op in zand en in klei. Als er een extra belasting wordt aangelegd die de horizontale spanning in de grond verlaagt, heeft de grond een lagere reserve tegen bezwijken door de waterdruk die uit het grondlichaam komt. Scheuren zullen sneller

optreden. In een wrijvingsmateriaal als zand neemt de sterkte nog af als er een verlaging van de isotrope spanning optreedt.

Openen van aanwezige (verticale) scheuren

De gevolgen van beweging in scheuren is beoordeeld in bijlage E. Deze benadering kan ook worden toegepast voor een verticale scheur, waarbij wordt verondersteld dat er vloeistof door de scheur stroomt: het betreft dan een doorlopende scheur. Voor een niet doorlopende scheur betekent een trekspanning mogelijk dat de scheur dieper wordt, omdat in de tip van de scheur de treksterkte wordt overschreden.

De grootte van de verplaatsing van het funderingsblok is een eerste indicatie van de extra breedte van aanwezige scheuren vlakbij het funderingsblok. In de meting aan de windturbine is een eerste schatting van de amplitude gemaakt. In de metingen bij de windturbine 0 werd in de bodem naast de windturbine een horizontale amplitude in de orde van enkele tienden van een millimeter bepaald. Omdat dit getal uit dubbele integratie van de versnellingen ontstaan is, moet er voorzichtig mee worden omgegaan. Het is echter wel een getal dat aanzienlijk is, een scheur van 1 mm breedte wordt dan 1.5 maal zo breed, waardoor de stroomsnelheid theoretisch verdubbeld.

Invloed variërende stroming

Door een toename van de scheurbreedte kan het water (aanzienlijk) sneller gaan stromen. Hierdoor kunnen zandkorrels makkelijker door de scheur worden getransporteerd en zal er eerder erosie van de wand van de scheur optreden.

Conclusie en handelingsperspectief

Omdat de lage frequenties slechts een beperkte uitbreiding van trillingen door golfuitbreiding geven, zijn de effecten alleen relevant als het uittredepunt van de freatische lijn voldoende dicht bij de fundering ligt. Dit geldt alleen als de fundering nabij het gebied ligt waar de microstabiliteit van belang is, dus relatief dicht bij de binnentoe van de waterkering. Een windturbine in het binnentalud plaatsen ligt vanuit dit mechanisme niet voor de hand.

Het uitschakelen van de windturbine heeft een beperkte, maar wel positieve invloed op de veiligheid. Deze is momenteel niet gekwantificeerd.

Om de veiligheid tegen de invloed van de versnelling te waarborgen lijkt het eisen van een iets grotere veiligheid de aangewezen weg.

Vooraf onder een kleilaag kan een goede en goed functionerende drainage goed werken, want het faalmechanisme kan pas optreden als de waterstand onder de kleilaag voldoende hoog is.

Opmerkingen

In de schematisering van dit verschijnsel moet wel rekening worden gehouden met de mogelijke invloed van de fundering op de grondwaterstroming en de ligging van de freatische lijn. Dit wordt hier niet verder uitgewerkt aangezien dit onafhankelijk van de windbelasting is.

In bijlage C van de schematiseringshandleiding 0 worden rekenregels gegeven om de microstabiliteit te beoordelen. In deze regels wordt aangenomen dat er geen scheuren in de kleibekleding aanwezig zijn, omdat deze bij inspectie bij droogte zichtbaar moeten zijn. Op basis van de berekeningen (in paragraaf 2.1) wordt verondersteld dat in een storm situatie de belasting op de fundering vergelijkbaar is met de situatie onder normaal gebruik, zouden ook voor de situatie met een windturbine moeten gelden dat er geen scheuren aanwezig zijn.

8 Bezwijken bekleding

Een dijkbekleding is een relatief dunne laag die als primaire taak heeft het dijklichaam te beschermen tegen erosie. Tijdens een stormsituatie kan erosie op het buitentalud ontstaan door de golfklappen en de waterbeweging van de golven. Erosie op het binnentalud kan ontstaan door de stroming over het talud door overslag.

Onder het faalmechanisme “Bezwijken afdeklaag” wordt in dit rapport het verschijnsel bedoeld dat de bekleding (afdeklaag) van de waterkering loskomt van het onderliggende lichaam. Het WBI2017 0 onderscheidt hierbij veel verschillende situaties. Dit mechanisme is lastig te onderscheiden van microstabiliteit. In hoofdstuk 7 is aangegeven dat micro-instabiliteit ontstaat door interne werking van water, terwijl instabiliteit van de bekleding ontstaat door de inwerking van water aan de buitenzijde. Overigens wordt in het mechanismen rapport 0 microstabiliteit expliciet beperkt tot het binnentalud, terwijl het afdrucken van de buitenbekleding door interne waterdruk, dat kan optreden bij een snelle daling van de waterstand, wel wordt behandeld bij stabiliteit bekleding. Dit onderscheid is ook overgenomen in de regelgeving (hoofdstuk 9 en 10 in 0). Voor het fenomeen trillingen is dat niet van belang.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen een asfaltbekleding, steenzetting en grasbekleding.

Bij het onderwerp “bezwijken bekleding” is de plek van de windturbine ten opzichte van de waterkering van belang. Steenzettingen en asfaltbekleding worden alleen als harde bekleding aan de buitenzijde toegepast. Een windturbine aan de binnenzijde heeft hier geen invloed op. Grasbekleding bevindt zich aan de binnenzijde van de bekleding en hoog op het talud aan de buitenzijde. De grasbekleding wordt alleen belast door golfoploop (buitentalud) en golfoverslag (binnentalud). De fundering heeft invloed op de stroming waardoor de stromingsbelasting op de bekleding aanzienlijk hoger kan worden.

Er moet bij deze beschouwing vooraf opgemerkt worden dat aan de buitenzijde van de waterkering vermoedelijk de invloed van de fundering op de waterbeweging een overheersende rol speelt als de fundering boven het maaiveld in de dijk uitsteekt. Door de vorm van het funderingsblok kan mogelijk naast de fundering een veel hogere golfoploop ontstaan, waardoor er bij een lagere golfoploop al overslag kan optreden of een veel grotere oploop en terugloop ontstaan. Water van hoge golven kan over de fundering stromen en (samen met regenwater) aan de achterzijde van de fundering afstromen, mogelijk leidt dit lokaal tot zware belastingen en uitspoeling. Deze worden hier niet besproken (ze ontstaan immers niet door trillingen), maar er moet natuurlijk wel terdege rekening mee worden gehouden. De vraag die in dit rapport moet worden beantwoord luidt: welke invloed heeft de windbelasting op de windturbine op de bekleding.

8.1 Asfaltbekleding

Beschrijving

Bij een asfaltbekleding wordt alleen de zone van het asfalt beoordeeld waar de golfklappen optreden. Hierbij wordt aandacht besteed aan de volgende aspecten:

- Er kan vermoeiing optreden in het materiaal, waardoor de sterkte afneemt.
- De belastingen zijn zo groot dat de (eventueel door vermoeiing gereduceerde) sterkte in het asfalt wordt overschreden.
- De stabiliteit van de ondergrond is ontoereikend.

Hierbij moet opgemerkt worden dat asfalt bestaat uit een mengsel van een bindmiddel (bitumen) en steenachtig materiaal. Dat betekent dat er in de praktijk veel verschillende soorten asfalt bestaan.

Invloeden

De belastingen uit de windturbine kunnen hier op verschillende manieren invloed op hebben:

- Versnellingen kunnen leiden tot lagere weerstand van de afdeklaag.
- De variabele belasting kan invloed hebben op de sterkte van het asfalt doordat zij aanleiding zijn tot vermoeiing.
- Verlaagde spanning in het asfalt geeft dat er minder sterkte is voor het opnemen van de krachten van de golfklappen.
- Verlaagde spanning in de bodem geeft lagere weerstand en lagere sterkte (zand).
- Verdichting van de ondergrond leidt tot holtes onder de bekleding.

Modellering

Opwaartse versnelling

De situatie is in dit geval redelijk vergelijkbaar met de situatie bij macro-stabiliteit. De opwaartse versnelling moet in beginsel in mindering worden gebracht op het gewicht van de afdeklaag. Hierbij moet ook opgemerkt worden dat op het moment van een omlaag gerichte versnelling de spanning op het zand onder het asfalt ook kleiner is. Een golfklap die neerkomt op een asfaltbekleding die omhoog beweegt geeft een grotere belasting op het asfalt. Voor dit aspect is de (trillings)snelheid van de bekleding de maatgevende variabele.

Sterkte asfalt bekleding

De trillingen hebben mogelijk invloed op de lange duur sterkte van asfalt. De sterkte van asfalt neemt af met toenemend aantal cycli. Deze afname neemt af als de amplitude afneemt. Hierbij spelen onder meer belastingsnelheid en spanningstoestand een rol, zie als voorbeeld 0 en 0. Bij een golfbelasting wordt het asfalt met name op buiging belast, terwijl de windturbine het asfalt overwegend op druk en trek belast voor en achter de fundering (gezien in de windrichting) en overwegend op afschuiving naast de fundering. De metingen in 0 geven aan dat er ook trillingen optreden in de richting loodrecht op de overheersende windrichting. De numerieke berekeningen 0 leverde belastingen in dwarsrichting die ongeveer de helft van de trillingen in de windrichting zijn. Met de dwarstrillingen moet rekening worden gehouden.

In Bijlage F is een indicatief voorbeeld uitgewerkt. Dit voorbeeld suggereert dat ten gevolge van het grote aantal cycli een toelaatbare amplitude van slechts orde 1% van de amplitude van de golfklappen toelaatbaar is. Hierbij is mogelijk weinig bekend over het extreem grote aantal trillingen met een relatief kleine amplitude en de vraag of de beschikbare modellen naar het verwachte aantal cycli kan worden geëxtrapoleerd.

Invloed aanwezige extra spanningen

De verplaatsingen van de paalkop ten gevolge van de windbelasting leiden tot verplaatsingen in de bodem. Hierbij moet worden opgemerkt dat de spanningen bij kleine vervormingen meestal voor een belangrijk deel door de paalschacht worden afgedragen. Een aanwezige asfaltlaag heeft door zijn geringe dikte meestal een beperkte invloed op de stijfheid, maar zal door zijn grotere stijfheid wel relatief veel spanning naar zich toetrekken (bij een opgelegde vervorming uit het paal-grond systeem). Dit effect treedt ook op tijdens een storm, zodat de beschikbare reserve (aanwezige sterkte – aanwezige belasting) om een golfklap op te nemen kleiner wordt.

Holtes onder de bekleding

Kleine trillingen kunnen op langere termijn aanleiding geven tot verdichting. Als dit lokaal gebeurt kan dit tot een holte leiden. Omdat de trillingen rondom de fundering het grootste zijn, zal rondom de fundering dit risico het grootst zijn. Als de asfaltbekleding aan de

fundering verbonden is, is de kans aanwezig dat deze geen zichtbare vervorming ondergaat. Maar bij een golfklap op het gebied boven de holte ontbreekt wel de benodigde steun van de ondergrond om de golfklap op te vangen of treedt door een grotere vervorming veel sneller vermoeiing op.

Conclusie en handelingsperspectief

De invloeden van de windturbine zijn beperkt tot een zone rondom de fundering. Een goede maatregel is de plaats van de windturbine zodanig te kiezen of het talud zodanig aan te passen dat de zone waar de golfklappen komen niet nabij de fundering ligt. Dat is aan de waterzijde buiten de waterkering, of aan de landzijde van de waterkering. Het ligt zonder constructieve aanpassingen niet in de verwachting dat de windturbine in het buitentalud of direct in de buitenteen van de waterkering wordt geplaatst.

Het optreden van versnellingen en (met name) laagfrequente statische spanningen moeten in het ontwerpmodel worden verdisconteerd. Hiervoor bestaat momenteel geen empirische informatie, dus dit zal op basis van engineering judgement moeten worden uitgevoerd.

Bij het ontwerp zal rekening moeten worden gehouden met het aspect vermoeiing door de variabele belasting van de asfaltbekleding en de aansluiting tussen het asfalt en de windturbine. Bij inspecties moet op dit aspect extra worden gecontroleerd. De mogelijkheid dat er holtes onder het asfalt zal veel extra aandacht nodig hebben, deze zijn risicovol en lastig detecteerbaar.

8.2 Steenzetting

Een steenzetting raakt beschadigd als een element uit de steenzetting raakt. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een ingegoten (gesloten steenzetting) en een niet-ingegoten steenzetting (open steenzetting). Een open steenzetting kan water doorlaten. De doorlatendheid kan ontstaan doordat er ruimte tussen de elementen bestaat en/of omdat er mogelijk openingen in de elementen zijn aangebracht. De stabiliteit van een gesloten steenzetting wordt beïnvloed door verhoging van de druk tegen een ondoorlatende bekleding. Bij een open steenzetting speelt de stroomsnelheid in de doorlatende bekleding ten gevolge van een hogere druk onder de bekleding een rol omdat deze wrijving krachten geeft op de elementen, een lagere sterkte van het materiaal door waterspanningen of een hogere opwaartse externe belasting doordat de golven anders reflecteren door de aanwezige constructie.

Er zijn zeer veel verschillende type elementen (zie bijvoorbeeld bijlage B van 0). Paragraaf 2 Figuur 2.1 van 0 toont dat onder de eigenlijke steenzetting meestal een uitvulling (filterlaag) aanwezig is en vaak ook een geotextiel en mogelijk een kleilaag.

Een bijkomend aspect is de overgang van de bekleding tegen de fundering (blok of paal). Hier is de constructie zwakker en ook bij een belasting het vervormingspatroon anders, zodat er mogelijk een overgangsconstructie nodig is om erosie te voorkomen. Bij het ontwerpen van dergelijke overgangsconstructies moet wel rekening worden gehouden met de trillingen en bewegingen van de windturbine onder verschillende windrichtingen.

De precieze uitvoering van de constructie bepaalt of de overgangsconstructie tegen de mast komt (als het funderingsblok volledig wordt ingegraven), tegen het blok komt, of tegen de palen (zie ook Figuur 5 in 0). Bij plaatsing in het talud wordt de situatie mogelijk complexer, omdat het (horizontale blok) gedeeltelijk uit het talud kan steken. Dit kan invloed hebben op het risico van erosie.

Beschrijving

Rapport 0 onderscheidt 5 faalmechanismes (zie ook hoofdstuk 15 van 0):

- a. Toplaaginstabiliteit onder golfaanval ZTG (een zetsteen wordt uit de steenzetting gelicht als gevolg van brekende golven op het talud).
- b. Toplaaginstabiliteit onder langsstroming ZTS (een zetsteen wordt uit de steenzetting gelicht als gevolg van sterke stroming langs de dijk).
- c. Afschuiving ZAF (als gevolg van brekende golven op het talud ontstaat er een vervorming van de ondergrond waardoor er een S-profiel ontstaat en het verband in de steenzetting verloren gaat).
- d. Materiaaltransport vanuit de ondergrond ZMO (de waterbeweging in het filter is zodanig dat het onderliggende zand of klei gaat eroderen en uitspoelt, waardoor de toplaag verzakt en zijn samenhang verliest).
- e. Materiaaltransport vanuit de granulaire laag ZMG (de korrels van het filter spoelen uit door de gaten in de toplaag, waardoor de toplaag verzakt en zijn samenhang verliest).

Invloeden

De belastingen uit de windturbine kunnen hier op verschillende manieren invloed op hebben:

- Versnellingen kunnen leiden tot lagere weerstand van de bekleding.
- Verlaagde spanning in de bekleding geeft dat er minder sterkte is voor het opnemen van de krachten van de bekleding.
- Verlaagde spanning in de bodem geeft lagere weerstand en lagere sterkte (zand).
- Er kunnen stromen op treden die extra opwaartse krachten leveren.
- Trillingen kunnen leiden tot verdichting van zandlagen.

Modellering

Versnelling

Voor alle mechanismes speelt de versnelling geen rol omdat deze veel te laag is.

Verlaagde spanningen

Wat wel een rol kan spelen is de statische spanning die ontstaat door de gemiddelde windkracht op de windturbine. Deze verlaagt mogelijk de wrijving tussen de elementen en beïnvloedt mogelijk de stroming tussen de elementen als het een open bekleding betreft. Daarnaast moet rekening worden gehouden met het optreden van verdichting door het grote aantal cycli, terwijl de daarbij behorende holtes bij inspecties niet altijd zichtbaar hoeven te zijn.

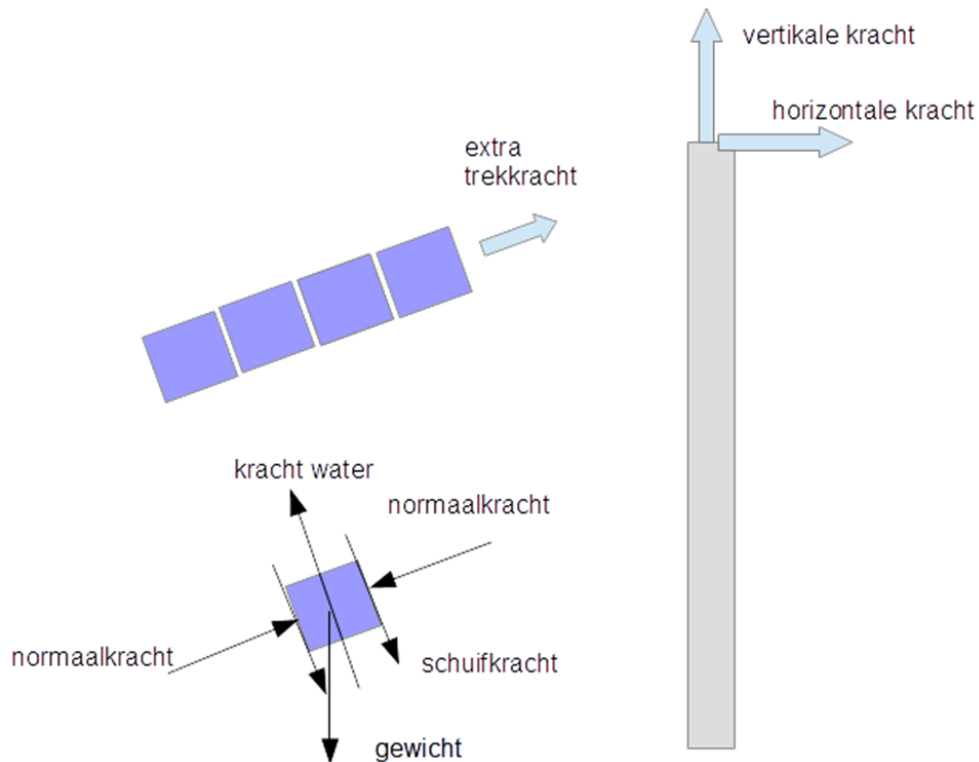
De mechanismes worden in het algemeen beschreven in rapport 0. Voor alle mechanismes is de gemiddelde waterstand in de dijk belangrijk. Deze geeft een belangrijke bijdrage aan de destabilisatie van de elementen. In rapport 0 wordt gesteld dat tijdens een storm situatie de statische waterdruk meer door de neerslag in de voorafgaande periode wordt bepaald dan door de waterhoogte tijdens de storm. Voor het mechanisme "afschuiving (ZAF)" is in meer detail nagegaan hoe de rekenregels tot stand zijn gekomen. Deze blijken een grote empirische component te hebben, waardoor het lastig is deze aan te passen voor het optreden van trillingen en extra spanningen in de grond.

Voor een open steenzetting zijn de optredende trek en drukspanningen ten gevolge van de windbelasting op de fundering en de stromingskrachten van belang.

Het mechanisme Toplaaginstabiliteit onder golfaanval ZTG ontstaat door de sterk variërende water belasting langs het talud, waarbij de golf zowel onderdruk als overdruk op het talud geeft. Dit leidt tot hoge schuifspanningen die in de spleten moet worden overgedragen. Aangezien de windbelasting kan leiden tot grotere stromingskrachten en lagere normaalspanningen (en dus een lagere maximale wrijving) tussen de elementen, werkt de windbelasting negatief.

Waterstroming door de spleten

Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. toont het principe. Bij een open bekleding zal niet snel een grote wateroverspanning ontstaan, behalve als er een ondoorlatende kleilaag onder de bekleding ligt.



Figuur 8.1 Modellering van een steenzetting nabij een paalfundering onder trekbelasting.

Voor een gesloten steenzetting maakt dit niet zoveel uit zolang er geen zichtbare schade aan de bekleding is ontstaan. Dit zou bij reguliere inspectie zichtbaar moeten zijn, hoewel niet kan worden uitgesloten dat de schade tijdens een storm ontstaat. Het optreden van een scheur in een verder gesloten bekleding is een onwenselijke situatie, omdat de opgelegde verplaatsing door de windbelasting zich volledig in deze scheur zal concentreren. Onder een gesloten bekleding kan zich een grotere waterdruk opbouwen, die tot stroming leidt als de scheur ontstaat.

Als de fundering een grote verplaatsing van 2 mm ondergaat en deze verplaatsing moet worden opgevangen in de scheur, kan dit leiden tot behoorlijke variatie in de opening van de scheur. Het model dat in bijlage E.2 wordt uitgewerkt, kan ook hier worden toegepast. De invloed van de continuïteit is niet van belang, want hiermee wordt het water in beginsel naar binnen en buiten evenveel uitgeperst, zodat voor x de waarde 0 mag worden gekozen. Dan blijft de extra term

$$\frac{\hat{q}(x,t)}{q_0} = \frac{\hat{h}}{h_0} \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

De pompwerking volgens vergelijking (1.2) laat zien dat deze door de beweging nog groter kan worden: bij een scheurwijdte van 10 mm en een bewegingsamplitude van 2 mm is dit een toeslag van 20%.

Een vak met een steenzetting op een onderliggende kleilaag (op een zandlichaam) voldoet aan de eis voor afschuiving als wordt voldaan aan de vergelijking (zie rapport 0 voor de afleiding)

$$\frac{H_s}{\left(\Delta_{sz} D_{sz} + \Delta_f d_f (1-n) + \Delta_k d_{klei}\right) \cos \alpha} \leq 3 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{3} \rho_w H_s \leq \left(\left(\rho_{sz} - \rho_w\right) D_{sz} + \left(\rho_f - \rho_w\right) d_f (1-n) + \left(\rho_k - \rho_w\right) d_{klei}\right) \cos \alpha \quad (1.3)$$

Het getal '3' (drie) is een empirische constante, die een veilige grens geeft. Na vermenigvuldiging met de versnelling van de zwaartekracht (g) staat hier een vergelijking in drukken (of kracht per eenheid van oppervlak). Het onderzoek gaat niet uitgebreid in op de reden dat de druk uit het water driemaal zo groot kan zijn als het onderwatergewicht van de constructie. Wel wordt opgemerkt dat dit effect veroorzaakt kan worden door de korte duur van de belasting en speelt de traagheid van de grond een rol. Mogelijk heeft dit te ook maken met het feit dat de diepte van de trog tijdens een golfbelasting lager is dan de significante golfhogte, dat de drukverdeling op het talud niet constant is of dat er meer lengte van de steenzetting meewerkt dan het gebied waarover deze wordt belast. Of een combinatie van deze factoren.

Voor het faalmechanisme dat samenhangt met langsstroming lijkt het optreden van spanningen en trillingen niet veel invloed te hebben, anders dat de spanningen tussen de elementen kan afnemen in een open bekleding of de aanwezige spanning in een gesloten bekleding hoger is. Het hangt in sterke mate af van de ruwheid van de elementen of de sterkte van de spleetvulling hoe groot de invloed hiervan is.

Verdichting

De twee laatste faalmechanismes zijn naar verwachting ook gevoelig voor verdichting. Als er verdichting ontstaat kunnen er holle ruimtes onder de constructieve elementen ontstaan. Daar is de spanning dan heel klein ten gevolge van het ontbreken van boven belasting. Overigens moet er wel rekening worden gehouden met het feit dat bij dit faalmechanisme in de standaard situatie de golfbeweging ook al tot enige verdichting kan leiden en daarmee tot vergelijkbare holtes.

Conclusie en handelingsperspectief

Ook hier geldt dat het aan te bevelen is om de locatie van de windturbine zo te kiezen dat de invloed op de dijkbekleding miniem is. Als dit niet mogelijk is dan moeten er speciale constructieve maatregelen worden genomen, waarbij er naar gestreefd moet worden zone waarin de golfklappen optreden niet nabij de rand van de bekleding ligt. Hiervoor is een specialistische en geavanceerde beoordeling noodzakelijk.

8.3 Grasbekleding

Beschrijving

Bij een grasbekleding is sprake van falen als de grasmat en de onderliggende kleilaag zodanig beschadigd raakt dat de onderliggende zandkern door het water kan eroderen. Aangezien dit erosie van zand veel sneller gaat, is de restlevensduur van de waterkering dan nog maar kort. Om de discussie in dit rapport overzichtelijk te houden wordt de erosie door golfklappen hier niet beschouwd. Meestal zal in deze zone een hardere bekleding worden toegepast.

Voor het overige deel zijn twee soorten bezwijken voorzien:

1. Stabiliteitsverlies door een hogere binnen grondwaterstand dan een hogere buiten grondwaterstand. Dit effect is voor het aspect trillingen identiek aan het mechanisme micro-stabiliteit, en wordt hier niet verder besproken.
2. Erosie door het langsstromende water. Het betreft hier zowel de oploop en neerloop langs het buiten talud als de stroming over de kruin en het binnen talud bij overslag (of overloop).

Invloeden

De belastingen uit de windturbine kunnen hier op verschillende manieren invloed op hebben:

- Versnellingen kunnen leiden tot lagere weerstand van de bekleding.
- Verlaagde spanning in de bekleding geeft dat er minder sterkte is voor het opnemen van de krachten van de bekleding.
- Verlaagde spanning in de bodem geeft lagere weerstand en lagere sterkte (zand).

Daarnaast moet rekening worden gehouden met het feit dat de fundering invloed heeft de stroming. Dit kan tot aanzienlijk hogere stroomsnelheden leiden, die het grootste is langs de aansluiting tussen de bekleding en de fundering. Ook moet rekening worden gehouden met water dat mogelijk van de fundering op de bekleding stroomt.

Modellering

Voor het aspect stabiliteit is er een analogie met de asfaltbekleding. Hierbij is het van belang dat de grasbekleding een lagere stijfheid heeft en een grotere doorlatendheid en mogelijk meer beschadigingen zoals scheuren).

Het aspect erosie is bekeken in 0 en 0. De schadefactor D voor een overslaande golf wordt bekeken met de formule

$$D = \sum_{i=1}^N \left[\alpha_M (\alpha_a U_i)^2 - \alpha_s U_c^2 \right] \quad (1.4)$$

Met:

U_i De snelheid van het waterfront van de overslaande golf op de kruin [m/s].

U_c De kritische stroomsnelheid van de grasbekleding [m/s].

N Het aantal overslaande golven [-].

α_a De versnellingsfactor voor de stroomsnelheid op het binnentalud [-].

α_M De belastingsfactor voor het type constructie bij een overgang [-].

α_s De sterktefactor voor de grasbekleding [-].

In deze berekening worden alleen golven met een positieve bijdrage meegeteld, dus:

$$\alpha_M (\alpha_a U_i)^2 - \alpha_s U_c^2 > 0 \rightarrow U_i > \frac{U_c}{\alpha_a} \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_M}} \quad (5)$$

Conclusie en handelingsperspectief

Bij het ontwerp moeten de dimensieloze factoren voor de ontworpen situatie worden geschat en de stroomsnelheid U_i worden bepaald. Momenteel is hier geen empirische informatie over beschikbaar en specialistische kennis voor nodig.

9 Voorland

Als een vooroever (het onderwatertalud voor een dijk) steil is, kan dit instorten. Er ontstaat dan een veel vlakker talud. Als de waterkering dicht bij de geul staat kan deze gebeurtenis de fundering van de waterkering aantasten. Er worden in 0 drie processen genoemd:

1. Erosie door golfafslag.
2. Afschuiving.
3. Zettingsvloeiing.

Deze worden in 0 in drie afzonderlijke hoofdstukken (22 t/m 24) behandeld.

Dit hoofdstuk is alleen relevant als de windturbine in het voorland staat.

9.1 Golfafslag

Beschrijving

Golfafslag is het proces waarbij tijdens een storm (of een hoogwatergolf) de onbeschermdde vooroever versnelt erodeert. Hierdoor kunnen de faalmechanismes afschuiving en zettingsvloeiing worden getriggerd.

Invloeden

Bij golfinwerking is het niet te verwachten dat de relatief lage en laagfrequente trillingen een significante invloed hebben. Deze zijn te klein ten opzichte van de golfklappen die daarbij kunnen optreden.

Bij stroming vlak langs een windturbinefundering kunnen de cyclische spanningen wel invloed hebben. Het verlagen van de spanningen in een materiaal is ongunstig voor de weerstand van een materiaal. Dat geldt voor een wrijvingsmateriaal extra omdat de sterkte ook nog afneemt. Dit werkt erosie versnellend. Het optreden van een variabele spanning in de grond is waarschijnlijk belangrijk, omdat bij het samendrukken van de grond een verhoging van de wateroverspanning ontstaat. Deze overspanning leidt tot een uitstroming aan de rand van het materiaal, zodat er een extra liftkracht ontstaat. De indringingsdiepte is waarschijnlijk heel gering, maar het gaat hier om het evenwicht van de bovenste korrels.

Modellering

Om tot een model te komen bekijken we een elastische golf die langs het maaiveld loopt met een golfsnelheid $c_R = 140$ m/s en frequentie $f = 0.3$ Hz. De amplitude in horizontale zin is $\hat{u} = 1$ mm. De golflengte van deze golf is $\lambda = 140/0.3 = 467$ m. Als door samendrukking er overdruk ontstaat is het gezien de golflengte billijk te veronderstellen dat het water loodrecht op het maaiveld uitstroomt, zodat een één-dimensionaal systeem kan worden bekeken. De

maximale horizontale rek is $\hat{\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{u} = \frac{2\pi}{467} * 1 * 10^{-3} = 0.013 * 10^{-3}$. Dit geeft een

sinusvormig verlopende druk in de tijd met een maximale waarde

$$p = \frac{1}{n} K_f \varepsilon = \frac{2000 * 10^6}{0.4} 0.013 * 10^6 = 65 \text{ kPa}$$

Dit is een bovengrens, want in werkelijkheid is het water aanzienlijk minder stijf door insluiting van lucht.

De uitstroom wordt beschreven met de 1-D consolidatievergelijking (zie bijvoorbeeld 0). Deze geeft als karakteristieke tijd de formule:

$$\frac{c_v \frac{1}{2} T}{h^2} = \frac{c_v}{2 f h^2} = 1 \quad (1.6)$$

Waarin:

$$c_v \text{ de consolidatie coëfficiënt } c_v \approx \frac{k}{\gamma_w m_v}$$

T De periode van de golf.

h De hoogte van het element dat beschouwd wordt (onderzijde dicht, bovenzijde open).

Uit vergelijking (1.6) kunnen we h oplossen. Voor een stijfheid van 80 MN/m², en doorlatendheid van $10 \cdot 10^{-6}$ m/s volgt $h = 0.13$ m. Dit betekent dat een dieper dan 0.13 m vanaf het maaiveld er geen water omhoog stroomt. Het totale uitstromende volume is dan te benaderen met een driehoekig verloop:

$$Q = \frac{1}{2} h \varepsilon = \frac{1}{2} 0.13 \cdot 0.013 \cdot 10^{-3} = 0.85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{m}^2$$

Het specifieke debiet verloopt sinusvormig

$$q(t) = \hat{q} \sin(\omega t) = \hat{q} \sin(2\pi f t) \quad (1.7)$$

en na integratie over een halve periode moet het uitgestroomde debiet worden teruggevonden. Daarmee volgt $\hat{q} = \pi f Q = \pi \cdot 0.3 \cdot 0.85 \cdot 10^{-6} = 0.80 \cdot 10^{-6} \text{ m} / \text{s}$. Met de aangenomen doorlatendheid geeft dit een verhang van 0.08, en dat is niet groot. Dit geeft aan dat het niet te verwachten is dat de trillingen een significante impact op de golfafslag zal hebben.

Vaak wordt bij een fundering op geheide palen aangenomen dat de trillingen ten gevolge van heien groter zijn geweest dan de trillingen tijdens het functioneren van de windturbine. Dit is om twee redenen een lastige redenering. Ten eerste is het aantal trillingen dat de windturbine genereert, aanzienlijk groter dan het aantal heiklappen. Daardoor is het goed mogelijk dat er ook na de verdichting door het heien nog verdere verdichting optreedt. Ten tweede zijn de processen in de vooroever vermoedelijk erg dynamisch. Daarom mag niet zondermeer worden aangenomen dat het effect van heien gedurende de hele levensduur intact blijft.

Conclusie en handelingsperspectief

De amplitudes op enige afstand zijn zodanig, dat deze geen invloed zullen hebben op de golfafslag. Om dit zeker te stellen moet er wel voldoende afstand tot de vooroever zijn. Indien de windturbine in de vooroever wordt geplaatst moet wel een stabiele afdekking worden gemaakt.

9.2 Afschuiving

Beschrijving

Bij dit faalmechanisme schuift een grondmoot min of meer als klok af langs een cirkelvormig glijvlak. Het lijkt daarmee vrijwel identiek aan het faalmechanisme buitenwaartse macro-stabiliteit. De invloed van de windturbine is dan ook vergelijkbaar. Een belangrijk verschil met macro-stabiliteit is dat de geometrie van de onbeschermdde vooroever minder goed bekend is en het mechanisme de waterkering niet direct aantast.

Conclusie en handelingsperspectief

Het handelingsperspectief komt overeen met het handelingsperspectief bij macro-stabiliteit. Hierbij kan nog toegevoegd worden dat de stabiliteit van de vooroever zelf verbeterd kan worden door bijvoorbeeld het aanbrengen van een bestorting of extra palen voor de windturbine.

9.3 Zettingsvloeiing

Beschrijving

Een zettingsvloeiing is een gebeurtenis waarbij een onderwater zandtalud (soms schijnbaar spontaan) instabiel worden, waarna het zand uitvloeit alsof het een vloeistof is, om pas bij een zeer flauwe helling te sedimenteren (vrij naar 0, paragraaf 11.4). Het wijkt principieel af van macro-instabiliteit, een gebeurtenis waarbij een grondmoot min of meer als eenheid langs een cirkelvormig glijvlak beweegt. Volgens 0 zijn er twee soorten zettingsvloeiingen:

- Bij een zogenaamde verwekingsvloeiing neemt het contact tussen de korrels door het optreden van waterspanningen zodanig af dat het zand zich als vloeistof gaat gedragen. Dit treedt meestal op in losgepakt zand, bij een steil en hoog talud. Een verwekingsvloeiing vindt snel plaats (orde minuten).
- Bij een bresvloeiing treedt een gestaag terugschrijdend lokaal erosieproces dat zichzelf versterkt of althans zichzelf in stand houdt. Vanaf de erosie positie loopt een zand-watermengsel naar beneden, waarbij de erosie positie langzaam omhoogloopt. Bresvloeiingen kunnen ook in dichter gepakt zand voorkomen. Een bresvloeiing treedt veel langzamer op (orde uren).

Beide vloeiingen hebben gemeen dat de configuratie van het onderwatertalud vrijwel kritisch moet zijn en dat er dan een trigger moet optreden die het proces start. Mogelijke triggers zijn een snelle waterstandsverlaging, een trilling van heiwerkzaamheden, lokale erosie.

Invloeden

Een optredende versnelling kan optreden als trigger van een zettingsvloeiing. Door de lage versnellingen speelt dit alleen op kleinere afstand tussen de fundering en het bedreigde gebied. Dit geldt feitelijk ook voor de snelheden, verplaatsingen en spanningen. Maar op korte afstand van de fundering wordt de stabiliteit sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de palen die een versterkende werking kunnen hebben. Een zettingsvloeiing mag immers niet leiden tot bezwijken van de windturbinefundering (en dus de windturbine).

Ook de cyclische langetermijneffecten lijken minder relevant te zijn, zeker in zettingsvloeiing gevoelige gebieden waar de geometrie van de vooroever aan grote variaties in de tijd onderhevig is. Optredende verdichting is bij kleine amplitudes immers een langzaam optredend proces. Voor verwekingsvloeiing is verdichting een gunstige ontwikkeling, voor bresvloeiingen geldt dit niet.

Modellering

Voor het WBI 2017 is een model beschikbaar waarmee een gedetailleerde toets kan worden uitgevoerd 0. Deze methode berust op twee sets van parameters:

- De beschrijving van de geometrie, inclusief de snelheid waarmee deze verandert.
- Een beschrijving van de weerstand van het materiaal.

Op basis van de geometrie wordt een schatting van het profiel aan het einde van de toetsperiode gemaakt. Meestal betekent dit dat het talud steiler wordt en/of de diepte van de geul aan de voet van het talud groter.

De weerstand van het materiaal wordt beschreven met de state parameter ψ , die afhangt van de conusweerstand, de horizontale spanning, de diepte, kleine vervormingsmodulus, en enkele plastische eigenschappen (vier parameters op basis van het NorSand-model). Daarnaast spelen het aantal cohesieve laagjes en de gradatie van de zeefcurve (uitgedrukt met de d_{15} en d_{50}) een rol.

Deze methode geeft aan hoe groot de kans is dat het talud steiler wordt dan het materiaal kan hebben. Dit gebeurt aan de hand van een karakteristieke waarde voor verschillende ondergrond scenario's.

De spanningen en trillingen die een windturbine in de grond brengt hebben invloed op het constitutieve gedrag van de grond. Dit leidt in beginsel tot een lagere karakteristieke waarde van de sterkte.

Conclusie en handelingsperspectief

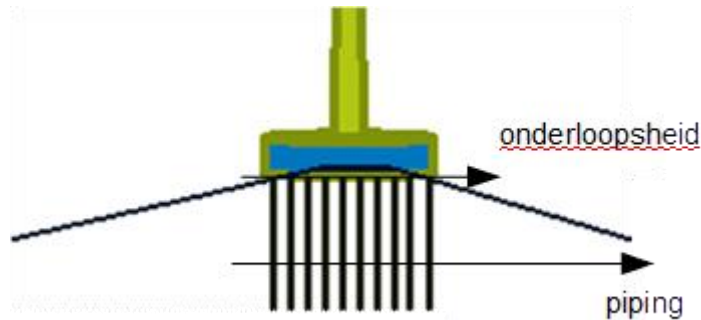
De beste strategie lijkt om een windturbine niet te plaatsen in of nabij een voorland dat zettingsvloeiingsgevoelig is. Afhankelijk van de breedte van het voorland kan de windturbine alleen geplaatst worden op voldoende afstand van de onderwateroever, dusdanig dat er geen invloed van de trillingen op de oever is.

Als er een windturbine op een vooroever wordt geplaatst, moet worden overwogen de vooroever te fixeren door bijvoorbeeld een bestorting aan te brengen of de vooroever goed te monitoren en zo nodig te beschermen. Het verbeteren (verdichten) van het materiaal is geen optie.

10 Strooming langs de fundering van de windturbine

Beschrijving

In dit hoofdstuk wordt nagegaan hoe strooming langs de fundering van de windturbine (onderloopsheid) moet worden beoordeeld. Hierbij is de fundering van de windturbine het kunstwerk, het gaat dus niet over een kunstwerk in de nabijheid van een windturbine. De situatie van piping in het zand onder een kleilaag onder de fundering wordt bekeken in hoofdstuk 6, zie ook Figuur 10.1.



Figuur 10.1 Onderloopsheid en piping onder een fundering.

De vraagstelling is relevant en anders dan bij een 'standaard' kunstwerk, omdat een windturbine een grote statische en variabele windbelasting heeft, die uit verschillende richtingen kan komen. Langs en onder kunstwerken is in beginsel altijd een opening aanwezig die groter is dan tussen aan zand en kleilaag.

Als een kunstwerk vlak bij een windturbine staat is het misschien wel relevant om trillingen van de windturbine bij de beoordeling van dat kunstwerk te betrekken.

In het algemeen wordt in de regelgeving verondersteld dat bij kunstwerken op palen kwelschermen worden toegepast (zie hoofdstuk 19 in 0). Dit hoofdstuk besteedt dan ook specifiek aandacht aan de invloed van de variabele krachten en vervormingen uit de windturbine fundering op een kwelscherm.

Invloeden

De invloeden die genoemd zijn in het hoofdstuk over piping (Hoofdstuk 6) gelden ook voor piping langs het kunstwerk. Zelfs in versterkte mate, want nabij de fundering is de amplitude maximaal.

Modellering

Een kwelscherm kan worden opgevat als een plaat die verticaal in de grond staat. De grond kan bij de lage frequentie als veren worden geschematiseerd. De belasting op het kwelscherm bestaat uit de cyclische bewegingen van de fundering. Deze kunnen afhankelijk van de windrichting en reactie van de constructie in alle richting werken en leiden tot miljoenen cycli gedurende de levensduur van de windturbine.

Wat er nu mechanisch gebeurt hangt af van de verbinding tussen de constructie en het kwelscherm. Als deze verbinding star is, moet het kwelscherm de beweging van de fundering volgen. Hierdoor zal het scherm de neiging hebben zich los te wrikken. Daarbij ontstaat er een spleet tussen het scherm en de grond, die de kans op erosie zal verhogen. Het

loswrikken zal stoppen als de afstand tussen de belaste kop en het einde van de ontstane spleet zo groot is dat de flexibiliteit van de wand zo groot is dat de cyclische spanningen klein zijn. Voor de belastingen in het vlak van de plaat (kwelscherm) zal deze afstand relatief groot zijn, omdat de plaat stijf is in die richting.

Als de verbinding tussen de constructie en het kwelscherm heel flexibel is, is er geen directe krachtsoverdracht tussen de twee delen. Er kan wel een interactie via de grond ontstaan doordat het scherm (met name in de richting van het vlak) stijver is dan de grond en dus niet alle vervormingen zal volgen. De hierbij behorende spanningen zijn wel kleiner dan bij een starre verbinding.

Conclusie en handelingsperspectief

Het plaatsen van een kwelscherm bij een windturbine op palen lijkt onontkoombaar. Ook eventueel afdichtende (klei)lagen in de bodem zullen gedurende lange tijd cyclische belasting ondergaan waardoor spleetvorming langs de constructie kan ontstaan.

Korte kwel schermen die star aan de bewegende constructie verbonden zijn hebben het risico dat deze zich in de loop der tijd loswrikken. Om het kwelscherm goed te laten functioneren heeft een flexibele verbinding met de fundering de voorkeur. Deze verbinding moet naast de normaal te stellen eisen ook in staat zijn gedurende de levensduur de opgelegde vervormingen te weerstaan. Vanuit dit oogpunt lijkt het zinvol het kwelscherm zo te plaatsen dat (visuele) inspectie goed mogelijk is.

11 Conclusies en advies

11.1 Conclusie

De invloed van een windturbine op de geotechnische beoordeling van waterkeringen richt zich op de invloed van de versnelling, de trillingssnelheid en de verplaatsing die ontstaan door de statische en variabele windbelasting en de invloed van het grote aantal cycli dat gedurende de levensduur wordt gegenereerd. De conclusies zijn gebaseerd op numerieke berekeningen aan een 1.5 MW-turbine, een korte trillingsmeting aan een 3 MW-turbine (Waddinxveen), een langere trillingsmeting aan een 3 MW windturbine (de Krammer) en een trillingsmeting aan een 7.5 MW windturbine (Westermeerdijk).

De beoordeling van het risico dat de trillingen uit een windturbine geven voor de waterkering en de waterveiligheid moet worden beoordeeld op basis van de trillingssnelheid en de verplaatsing. De versnelling is voor een beperkt aantal mechanismes van belang. Door de lage frequenties zijn de versnellingen klein en meestal niet maatgevend.

Bij de meting in Waddinxveen plantten de trillingen met frequentie orde 8 Hz zich wel voort. Deze hadden een amplitude van enkele tienden mm/s. Een trilling met frequentie 8 Hz en amplitude 0.5 mm/s geeft een versnelling van $\hat{a} = 2\pi f\hat{v} = 2\pi * 8 * 0.5 * 10^{-3} = 0.025 \text{ m/s}^2$. Dit is inderdaad een kleine versnelling.

Voor bijvoorbeeld het optreden van verdichting is bij hogere frequenties de trillingssnelheid van belang en voor lagere frequenties (zoals optreden bij een windturbinefundering) de verplaatsingsamplitude.

De laag frequente trillingen nemen relatief snel af met de afstand tot de windturbinefundering, vergelijkbaar met de situatie bij statische belasting. Dit betekent dat de meeste effecten zich beperken tot een zone vlakbij de fundering. Dit beeld was duidelijk zichtbaar in Waddinxveen, een vergelijkbaar beeld lijkt ook zichtbaar in de metingen in Westermeerdijk. Trillingen met hogere frequentie nemen minder snel af. Dit betekent dat het vergroten van de afstand van de windturbine tot de locatie van het mechanisme een aantrekkelijke ontwerpstrategie is.

Voor de meeste mechanismes zal een “toets op maat” moeten worden uitgevoerd. Dit kan meestal door een statisch model toe te passen, waarbij de maximale verplaatsing van de windturbinefundering als invloed moet worden aangebracht (in ongunstige zin). Voor enkele aspecten, bijvoorbeeld stroomsnelheid in de grond speelt de trillingssnelheid een rol.

Uitsluitend voor aspecten die samenhangen met de hoogwatersituatie, heeft het uitschakelen van de windturbine een effect. Omdat de trillingen daardoor beperkt afnemen (maar niet volledig verdwijnen) is dit een maatregel met beperkt effect. Dit effect te kwantificeren eist een behoorlijke inspanning met betere modellering.

Mechanisme	Versnelling	Wisselingen	Verdichting	Extra kracht
macro-stabiliteit	klein	geen	geen	klein
pipng	geen	klein	groot	groot
micro-stabiliteit	klein	matig	(geen)	nabij
bekleding				
asfalt	klein	groot	groot	groot
gras	klein	matig	(geen)	matig
steenzzetting	klein	matig	matig	groot
voorland				
golfafslag	klein	klein	(geen)	(matig)
afschuiving	klein	geen	geen	klein
zettingvloeing	klein	klein	geen	geen
pipng langs fundering	(geen)	groot	groot	matig

Tabel 11.1 Overzicht belang van de invloeden per faalmechanisme.

Tabel 11.1 vat de resultaten uit dit rapport samen. In de eerste kolom de besproken faalmechanismes opgenomen. In de kolommen staan de invloeden genoemd. Voor elke faalmechanisme is aangegeven hoe elke invloed een rol speelt in het faalmechanisme. Hierbij is de volgende indeling gevolgd:

- Geen deze invloed hoeft niet worden beschouwd.
- Klein deze invloed moet worden beschouwd, maar het is goed oplosbaar.
- Matig deze invloed speelt een rol, maar eist wat meer uitwerking.
- Groot deze invloed is potentieel van wezenlijke belang voor de waterkering.

Hierbij speelt de afstandsinvloed vaak een belangrijke rol, omdat een aantal invloeden alleen nabij de fundering van belang zijn. De uitkomsten tussen haakjes zijn toegevoegd omdat deze niet expliciet in het rapport opgenomen zijn.

11.2 Resultaten empirische verificaties

11.2.1 Conclusies

Dit rapport is in hoge mate gebaseerd op analytische overwegingen. De oorspronkelijke versie van het rapport is gebaseerd op het berekende dynamisch gedrag van een 1.5 MW-turbine op een stalen mast met gondelhoogte 84 m en op basis van een korte meting bij een windturbine nabij Waddinxveen. Er is verondersteld dat dit gedrag typerend is voor de windturbines die momenteel worden ontworpen. Dit is in 2021/2022 in aanvullend onderzoek verder uitgewerkt. De later voor deze versie van dit rapport geanalyseerde metingen geven binnen de beperkingen van de metingen wel een vergelijkbaar beeld.

In dit aanvullende onderzoek is getracht een aantal vragen te beantwoorden 0:

- Zijn de trillingen bij grote windturbines groter dan bij kleinere windturbines? Uit de metingen is dit nog niet eenduidig te beantwoorden, maar het trillingsniveau dat is gemeten rondom de grote windturbine Westermeerdijk, geeft aan dat dit niet per sé het geval moet zijn.
- Hoe hangen de trillingen samen met de windsnelheid? Er is een lineaire toename met windsnelheid gevonden. Het parkeren van een windturbine geeft tijdens de storm wel een reductie van de trillingssnelheid. Er is wel een grote variatie in gemeten trillingssnelheden bij gegeven gemiddelde windsnelheid.

- Hoe breiden de trillingen zich in de omgeving uit? De laagfrequente trillingen geven geen lopende golven en hebben daardoor een beperkte reikwijdte. De hogere frequenties hebben een grotere reikwijdte en nemen minder snel in sterkte af.
- Zijn de trillingen op de fundering als maatgevend op te vatten? De trillingen op het funderingsblok zijn in de beschikbare metingen steeds de grootste geweest. Het geeft daarbij een bovengrens voor de trillingsamplitude in het tijdsdomein.

11.2.2 **Prioriteit voor de belangrijkste kennisleemtes**

Er is een verschil tussen een normaal functionerende windturbine onder dagelijkse omstandigheden en een geparkeerde windturbine tijdens een storm. Er kan worden overwogen na te gaan hoeveel extra veiligheid het parkeren (stilzetten) van de windturbine voor elk faalmechanisme betekent.

Het optreden van piping wordt als een belangrijk risico ervaren. Experimenteel onderzoek naar het ontstaan van piping rondom palen en de invloed van verdichting op dit proces kan aangeven hoe realistisch dit beeld is.

In de beschouwing is steeds verondersteld dat de bewegingen in bijvoorbeeld scheuren relatief klein zijn en alleen tot een vertraging en versnelling van de stroming leiden. Dit onderwerp leent zich uitstekend om deze veronderstelling in schaaltesten experimenteel te toetsen.

Het optreden van verdichting onder kleine amplitudes is nog een onderwerp van onderzoek. De in de praktijk gebruikte ondergrens voor schuifrek waarbij geen verdichting optreedt, is voor zeer veel lastwisselingen onzeker, waarbij ook de continue spanningsrotatie mogelijk een rol speelt. Experimenteel onderzoek naar de ondergrens voor zeer veel lastwisselingen kan dit verduidelijken en mogelijk kwantificeren. In dit rapport is de focus vooral gericht geweest op zand, maar ook voor klei is hier mogelijk een kennislacune.

Bij de asfaltbekleding is het risico van het ontstaan van holtes door de trillingen van de windturbine als mogelijk mechanisme benoemd. Een lange duur experiment waarbij naast verschillende windturbines asfaltbekleding op een (bewust) los gepakt zandbed wordt aangelegd kan veel informatie opleveren over zowel het risico van verdichting, het risico van het ontstaan van deze holtes en de mogelijkheden en betrouwbaarheid van detectie hiervan (als deze ontstaan). Een dergelijk experiment kan worden uitgevoerd bij een windturbinepark dat bij voorkeur niet op een dijk staat maar op een zanderige ondergrond. Dit lijkt een zinvol experiment, omdat het aanbrengen van een asfalt bekleding rondom een windturbine een goede manier lijkt om de waterkering tegen de invloed van de trillingen te beschermen. In een dergelijk experiment kunnen ook de voegoplossingen en meetmethodes voor het opsporen van holtes worden beproefd.

Bij het uitvoeren van verificatiemetingen moet er rekening mee worden gehouden dat relatief kleine verplaatsingen en snelheden bij relatief lage frequenties moeten worden gemeten. Dit stelt hoge eisen aan de meetapparatuur. De laagste frequenties vallen buiten het bereik van de meetapparatuur conform de SBR-richtlijn 0. Daarnaast moet het aantal opnemers voldoende zijn om een goede indruk van de amplitude afname met afstand te krijgen. De te kiezen afstanden kunnen specifiek worden geselecteerd op basis van de mogelijke bezwijkmechanismes.

Naast het bepalen van de amplitudes van de trillingen in de omgeving moet de toelaatbare amplitude voor elk mechanisme worden vastgesteld. Dan kunnen veilige afstanden worden bepaald, die in een voorontwerp als indicatie kunnen worden gebruikt.

In dit rapport is de situatie onder normaal functioneren beschouwd. Niet-normaal functioneren moet voor de dijkveiligheid wel in de beschouwing worden betrokken. Hierbij kan worden gedacht aan het afbreken van delen van de windturbine (een wijk, de rotor, mastbreuk, bezwijken fundering). Een dergelijke gebeurtenis kan worden geïnitieerd door een fout in het regelsysteem of het niet goed functioneren van een remmechanisme dat nodig is de windturbine in de parkeerstand te zetten aan het begin van de storm. Afvallende delen kunnen aanleiding geven tot schade aan de waterkering door penetratie van het vallende onderdeel. Naast de geotechnische beoordeling van de grootte van de schade en de gevolgen hiervan voor de waterkering speelt de kansberekening hierbij een belangrijke rol, omdat het een aaneenrijging wordt van gebeurtenissen met een relatief beperkte kans van optreden. Er is wel een belangrijk raakvlak met de situatie bij normaal functioneren, omdat de beschadigde windturbine nog steeds op of nabij de waterkering staat. Deze zal trillingen genereren door de windbelasting. Door de andere eigenschappen geeft dit mogelijk trillingen met andere frequenties en grotere amplitudes. Dit aspect hoort thuis in een risicoanalyse. Omdat de trillingen afnemen met de afstand en niet zo heel groot zijn, is de kans groot dat de schade aan de waterkerende constructie optreedt op een plaats waar de trillingen klein zijn. In dat geval spelen de trillingen uit de windturbine in de bodem een kleine rol.

11.3 Overzicht mogelijke monitoring door beheerder

In de voorgaande paragraaf is aangegeven dat de kennis nog niet compleet is. In deze paragraaf wordt een overzicht geven van extra monitoring en inspectie die wenselijk lijkt als een windturbine op of nabij een waterkering wordt geplaatst.

Het lijkt wenselijk om extra aandacht te geven aan de gevolgen van de dynamische belasting op de fundering uit de windturbine en de belangrijkste aannames in de praktijk te verifiëren met een monitoring gedurende het eerste jaar. Deze monitoring bestaat uit het meten van de trillingen van het funderingsblok en een aantal punten in de bodem, specifiek geselecteerd op basis van de relevante bezwijkmechanismes. Deze monitoring moet de aannames die in het ontwerp zijn gedaan verifiëren.

In dit rapport zijn de volgende inspecties gesuggereerd:

- Inspectie van de aansluitingen.
- Ruimte tussen het funderingsblok en de aansluitende bodem.
- Ruimte tussen extra constructies (bv een kwelscherm) en de aansluitende bodem.
- Letten op signalen van materiaalvermoeiing.
- Optreden van holle ruimte onder bekledingen.

Het meten van trillingen in het kader van inspectie (dus regelmatig) lijkt vooralsnog niet zinvol, omdat niet wordt verwacht dat dit tijdens de levensduur wezenlijk verandert. Formeel zou dit natuurlijk wel moeten worden bevestigd door een meting.

11.4 Praktische implementatie

Dit rapport biedt een handreiking voor het ontwerpen en beoordelen van de situatie waarbij een windturbine op of nabij een waterkering staat (gepland). Het biedt informatie en handreikingen, maar het lijkt ons zinvol enkele concrete gevallen te analyseren en daar een ontwerp of beoordeling voor te maken. Door deze activiteit door een geschikt ingenieursbureau te laten uitvoeren zullen verschillende mogelijke onduidelijkheden worden verholpen en zullen de conclusies en aanbevelingen kunnen worden aangescherpt.

Voor een inbedding in de regelgeving vanaf 2023 moet worden overwogen om een (semi-) probabilistische analyse uit te voeren. Dit leidt tot betere mogelijkheden tot inpassing van de aanpak in met name het WBI 2023.

Referenties

- Aniq Gul, M., Irfan, M., *et al*, Modelling and characterising the fatigue behaviour of asphaltic concrete mixtures, *Construction and building materials*, vol. 184, 2018, pp. 723-732.
- Brink, H.W. van den, Caires, S.; Extreme wind statistics for the Dutch primary water defences, Rapport KNMI/Deltares, kenmerk Deltares 1220082-007-HYE-0006, November 2015.
- Dobry, R. en G. Gazetas, Dynamic response of arbitrarily shaped foundations. In: *Journal of Geotechnical engineering division ASCE* 112, (1986), pp. 109-135.
- Corciulo, S., Zanolì, O., Pisanò, F, Transient response of offshore wind turbines on monopiles in sand: role of cyclic hydro-mechanical soil behaviour, *Computers and Geotechnics*, vol. 83 (2017) pp. 221-238.
- Deltares, rapport 'Bodemtrillingen rondom een windturbine, Resultaten monitoring 7.5 MW windturbine Westermeerdijk Urk', kenmerk 11206793-006-ZWS-0002, 10-12-2021
- Deltares, rapport 'Vergelijking trillingen in de bodem rondom windturbines; Invloed windsnelheid en grootte windturbine uit metingen'; kenmerk 11206793-006-ZWS-0005, 10-12-2021
- Geertsema, G.T., Brink, H.W. van den, Windkaart van Nederland op 100 meter hoogte, rapport KNMI kenmerk TR-351, December 2014, download van <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubTR/TR351.pdf>
- Harmsen, G., suggestie per e-mail 18 september 2018
- Hart, R., De Bruijn, H., de Vries, G., Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI, rapport Deltares 1220078-000-GEO-001, februari 2016
- Hoffmans, G.; WTI WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium, Product 5.8 Validatie erosiebestendigheid overgangen; rapport Deltares 1209437-003-HYE-0001, juni 2015
- Hoffmans, G. et al.; Summary of research work about erodibility of grass revetments on dikes; in *Protections 2018, 3rd International conference on protection against overtopping*, 6-8 June 2018, Granges-over-Sands, UK
- Hölscher, P., Geotechnical consequences of a wind turbine on a dike, Final report STW-project MFFD 1.1.2, TU Delft, april 2017.
- Hölscher, P., Failure mechanisms and the consequences for the research, internal report TU Delft, december 2014.
- Hölscher, P., Fast simulation of a wind turbine, research report TU Delft, October 2015
- Hölscher, P., Measurement at wind turbine near Waddinxveen. Tech. rep. Delft University of Technology, 2016.
- Hölscher, P., Piping, application to on-shore wind turbines. Tech. rep. Delft University of Technology, 2016.
- Hölscher, P., Calculations for a wind turbine on a dike. research report. Delft University of Technology, 2017.

- Hölscher, P., From dynamics to statics. Tech. rep. Summary and conclusion of three earlier research documents. Delft University of technology, 2017.
- Hölscher, P., An incremental model for cyclic compaction of sand, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 105, February 2017, pp. 27-36.
- Hölscher, P.; Literatuuronderzoek Verdichting, Rapport Deltares, kenmerk 1220511-000-GEO-0010, november 2016.
- Jonkman, J.M. en M. L. Buhl, FAST Users Guide, Tech. rep. NREL-EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- KNMI website: Zware stormen in Nederland sinds 1910; <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/lijsten/zwarestormen>, bezocht 20 september 2018.
- KNMI website: Uurgegevens van het weer in Nederland; [KNMI - Uurgegevens van het weer in Nederland](#)
- Lv, S, Liu, C., et al, Normalization of fatigue characteristics for asphalt mixtures under different stress states, in: Construction and building materials, vol. 177, 2018, pp. 33-42.
- McGinty, B., website continuum mechanics, bezocht 3 augustus 2018, <http://www.fracturemechanics.org/hole.html> en <http://www.fracturemechanics.org/ellipse.html>
- Meetrapport van Inpijn Blokpoel (02PO12391-MO-01, maart 2020, bestand: 02P012391-RG-01.pdf) inclusief een serie plaatjes met wind- en trillingsniveau (bestand: grafieken Excel totaal.pdf)
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen, September 2007, (bekend als VTV 2006). <https://www.zeeweringenwiki.nl/images/b/bd/Vtv2006.pdf>
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Aanpassing toetsmethodiek Afschuiving bij Steenzettingen, rapport PZDT-R-08300, 1 september 2008, gedownload van [repository.tudelft.nl](https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:e0cf0357-9a0c-4565-bb0e-7cc330d275db/datastream/OBJ/download): <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:e0cf0357-9a0c-4565-bb0e-7cc330d275db/datastream/OBJ/download>.
- Ministerie verkeer en Milieu, Schematiseringshandleiding Zettingsvloeiing WBI 2017, 1 december 2016, gedownload van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132667/18_shzettingsvloeiing_1dec.pdf
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Schematiseringshandleiding steenzetting, rapport 1 december 2016, gedownload van www.helpdeskwater.nl op 28 augustus 2018.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Schematiseringshandleiding microstabiliteit WBI 2017, 1 december 2016, op 23 aug 2018 gedownload van https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132667/07_shmicrostabiliteit_1dec.pdf
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Regeling veiligheid primaire waterkeringen, bijlage III Sterkte en veiligheid, 2017.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), Handboek Risicozonering Windturbines, versie 3.1 september 2014, gedownload van www.rvo.nl : <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/09/Handboek%20Risicozonering%20Windturbines%20versie%20september%202014.pdf>
- Rijkswaterstaat, Eindrapportage projectgroep proefproject dijkverbetering Sliedrecht. Tech. rapport., directie Sluizen & Stuwen, 1986.

Santos Costa, D.J. Rodrigues dos, Dynamic stiffness of a wind turbine foundation". MSc-thesis. New University of Lisbon, Portugal, 2014.

SBRCURnet, SBR Trillingsrichtlijn A:Schade aan bouwwerken:2017, Delft, november 2017

Stoutjesdijk, T.P., Microstabiliteit: overzicht modellering, rapport GeoDelft (thans Deltares) CO-393440/81, augustus 2000.

Stowa, rapport Handreiking windturbines en waterkeringen, deel Techniek, opstellers J. Cools, I. Hergarden, Stowa rapport 53, ISBN 978.90.5773.859.3, Stowa Amersfoort, 2018

Verruijt, A. Grondmechanica, DUM Delft, vierde druk 1993.

Wichtmann, T.; Niemunis, A., Triantafyllidis, Th.; Validation and Calibration of high-cycle accumulation model based on cyclic triaxial tests on eight sands; Soils and foundations, Vol. 49, No. 5, pp. 711-728, Oct. 2009.

Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th.; Inspection of a high-cycle accumulation model for large numbers of cycles (N=2 million); Soil dynamics and earthquake engineering, vol.75, pp. 199-210, 2015.

A Basisbegrippen dynamica

A.1 Verplaatsing, snelheid en versnelling bij een harmonische beweging

Voor een harmonische trilling is het verband tussen verplaatsing, snelheid en versnelling:

$$\begin{aligned}u(t) &= \hat{u} \sin(2\pi f t) \\v(t) &= \frac{du(t)}{dt} = 2\pi f \hat{u} \cos(2\pi f t) = \hat{v} \cos(2\pi f t) \\a(t) &= \frac{dv(t)}{dt} = (2\pi f)^2 \hat{u} \sin(2\pi f t) = \hat{a} \sin(2\pi f t)\end{aligned}\tag{1.8}$$

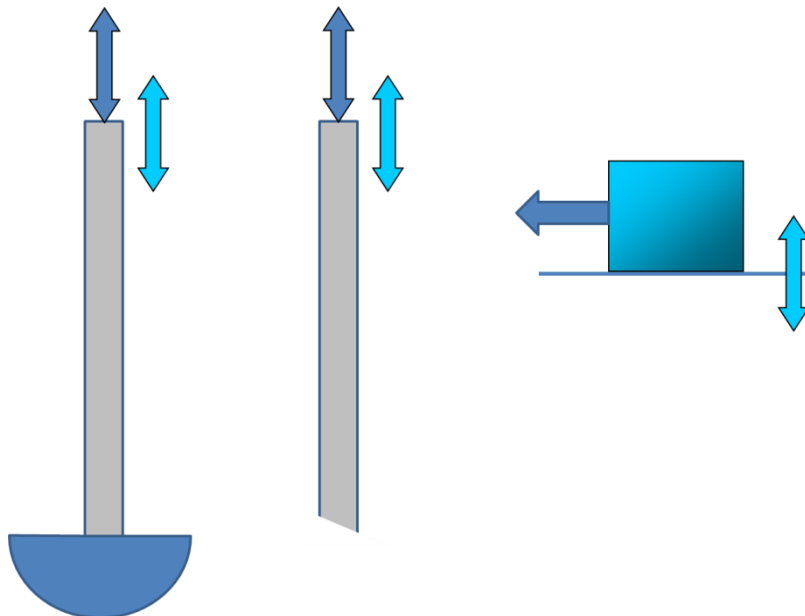
Hierin is:

- u Verplaatsing [m].
- v (Deeltjes)snelheid [m/s].
- a Versnelling [m/s²].
- f Frequentie [Hz].
- t Tijd [s].
- ^ Betekent de amplitude van de grootheid onder het dakje.

A.2 Invloed op de sterkte

Een belangrijke vraag luidt: wat heeft de meeste invloed op de sterkte: de verplaatsing, de snelheid of de versnelling?

Op deze vraag is geen algemeen antwoord te geven. Het hangt van het systeem af welke grootheid maatgevend is voor de sterkte. Een trilling heeft invloed op de sterkte als de trilling invloed heeft op de spanning (of kracht) die bepalend is voor de sterkte. Of dit evenredig is met de verplaatsing, snelheid of de kracht, hangt af van het systeem dat wordt bekeken. Dit wordt aan de hand van een aantal voorbeelden toegelicht.



Figuur A.1 Drie systemen die verschillen in maatgevende grootheid.

Cyclisch belaste drukstaaf

Een drukstaaf wordt cyclisch belast met een langzame (laag frequente) harmonische belasting, zie Figuur A.1. De amplitude van de verplaatsing in de staafkop is evenredig met de amplitude van de kracht. Als de maximale kracht in de staaf bekend is, kan deze worden omgerekend naar een maximaal toelaatbare amplitude van de verplaatsing. De daarbij behorende amplitude van de versnelling is klein. Als de frequentie wijzigt (bijvoorbeeld verdubbelt, maar nog steeds laag blijft) blijft de toelaatbare amplitude van de verplaatsing gelijk, maar verandert te bijbehorende amplitude van de versnelling,

Half oneindige staaf

Een halfoneindige staaf wordt cyclisch belast met een harmonische belasting, Figuur A.1b. In dit geval is de amplitude van de snelheid van de staafkop evenredig met de amplitude van de kracht in de staaf. Als de maximale kracht in de staaf bekend is, kan deze worden omgerekend naar een maximaal toelaatbare amplitude van de snelheid van de staafkop. Bij een andere frequentie verandert de amplitude van de versnelling, ook als de snelheid en de spanning gelijk blijft.

Wel of niet glijden van een blokje

Een blokje ligt op een ruw horizontaal ondergrond, terwijl er aan wordt getrokken, zie Figuur A.1c. Het gewicht van het blokje zorgt voor de verticale spanning tussen het blokje en de ondergrond. De ondergrond beweegt verticaal op en neer. Als de ondergrond zo snel naar beneden gaat dat het blokje loskomt van de ondergrond gaat het bewegen. In dit geval is de versnelling maatgevend voor het al of niet verschuiven van het blokje. Als de frequentie van de verticale beweging verandert blijft de toelaatbare versnelling gelijk, maar verandert de toelaatbare verplaatsing.

Uit de voorbeelden blijkt dat de vraag of de verplaatsing, snelheid of versnelling maatgevend is, probleemafhankelijk is. Voor elk probleem (en dus ook elk faalmechanisme) zal dus moeten worden bekeken welke grootte maatgevend is.

A.3 Relatie tijdsdomein en frequentiedomein

In de dynamica wordt gebruikgemaakt van zowel het tijdsdomein als het frequentie domein. Het tijdsdomein is redelijk eenduidig, maar het frequentie domein is lastiger. Omdat verschillende begrippen vaak door elkaar worden gehaald is het voor buitenstaanders vaak lastig te volgen. In deze bijlage wordt getracht enige duidelijkheid in het begrip frequentie te scheppen.

Het tijdsdomein is bekend. Elke grootte die varieert in de tijd kunnen we schrijven als functie van de tijd. Dat geldt bijvoorbeeld voor de beweging van de fundering of de kracht die de mast op de fundering uitoefent.

Een tijdsignaal kan op twee manieren verbonden zijn aan een frequentie.

- Voor een harmonisch signaal (zoals gegeven in vergelijking (1.8)) kan de tijdsfunctie geschreven worden als een sinus. De constante f voor de tijd t (in de sinusfunctie) is dan de frequentie van het harmonische signaal.
- Met een Fourier transformatie kan een tijdsafhankelijk signaal worden omzet in het frequentiedomein. Het tijdsignaal wordt dan opgevat als de sommatie van een heleboel harmonische signalen, waarbij voor elke frequentie aangegeven wordt hoe groot de amplitude voor elk harmonisch signaal is. Formeel moet ook de fase hoek van de sinus worden beschouwd, maar in de beoordeling wordt hier vaak niets mee gedaan.

De grafiek die na een Fourier voor elke frequentie de amplitude van de harmonische component aangeeft, representeert het signaal in het frequentiedomein. Deze grafiek wordt ook wel

de frequentie inhoud genoemd. Van een harmonisch tijdsignaal kan ook de Fourier getransformeerde worden bepaald. Omdat het signaal harmonisch is, is er maar één frequentie zichtbaar: de frequentie van het harmonische signaal.

Om de eigenschappen van een systeem (bijvoorbeeld de fundering van de windturbine) te beoordelen, zijn in beginsel twee technieken beschikbaar: het gedrag bij het vrij trillen (na bijvoorbeeld een korte klap) en het gedrag onder een harmonische belasting. Bij het vrij trillen wordt vaak een signaal gevonden dat lijkt op een sinus met een afnemende amplitude. De frequentie die hoort bij deze sinus is de natuurlijke frequentie van het systeem. Als een (lineair) systeem harmonisch wordt belast zal de reactie van het systeem na enige tijd ook weer een harmonisch signaal zijn. Door een systeem met verschillende frequenties maar gelijke belastingsamplitude te belasten kan voor elke frequentie de amplitude van de reactie worden bepaald. Voor bepaalde frequenties is de amplitude van de reactie van het systeem groter zijn dan voor andere frequenties. De reactie van het systeem onder een harmonische eenheidsbelasting als functie van de frequentie wordt de overdrachtsfunctie genoemd per definitie in het frequentiedomein).

De frequenties waar de reactie maximaal is worden de eigenfrequenties ook wel resonantiefrequenties genoemd. Deze eigenfrequenties komen vaak overeen met de natuurlijke frequenties. Daardoor worden deze twee begrippen vaak door elkaar gebruikt.

Als we nu de reactie van het systeem op een gegeven tijdsignaal willen bepalen kunnen we de volgende strategie volgen:

- Van het belastingssignaal in de tijd bepalen we de Fourier-getransformeerde. Dit is de belasting in het frequentiedomein.
- Voor elke belastingsfrequentie kunnen we op basis van de overdrachtsfunctie de reactie van het systeem in het frequentiedomein bepalen. Dit is een vermenigvuldiging van de belasting en de overdracht. Hiermee voor elke frequentie de respons in het frequentiedomein bekend is.
- Bij de reactie in het frequentie domein hoort een functie in het tijdsdomein. Het berekenen van de functie in het tijdsdomein op basis van een gegeven functie in het frequentie domein is een inverse Fourier-transformatie.

Deze techniek berust op superpositie en is dus alleen toegestaan voor lineaire systemen.

A.4 Enkele relaties voor dynamica

Het verband tussen de periode (T de duur van één trilling) en de frequentie (f) in een harmonische trilling luidt

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.9)$$

Met:

T Periode [s].
 f Frequentie [Hz].

Er moet onderscheid worden gemaakt tussen de hoekfrequentie ω en frequentie f . Er geldt

$$\omega = 2\pi f \quad (1.10)$$

Met:

ω De hoekfrequentie [rad/s].
 f De frequentie [Hz].

In een lopende harmonische golf met frequentie f en loopsnelheid c wordt de golflengte bepaald uit:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (1.11)$$

Met:

λ Golflengte [m].

c Golfsnelheid [m/s].

T periode [s].

f frequentie [Hz].

Er moet goed onderscheid worden gemaakt tussen de deeltjessnelheid en de golfsnelheid. De deeltjessnelheid geeft de snelheid waarmee een deeltje trilt, meestal aangeduid met de letter v (van velocity). De golfsnelheid geeft aan hoe snel een golf door de grond loopt. Deze wordt meestal aangeduid met de letter c (van celerity). In de geotechniek ligt de deeltjessnelheid in de orde van mm/s (let op eenheid: millimeter per seconde), en de golfsnelheid in de orde 100 m/s (meter per seconde). De golfsnelheid is meer dan een factor 1000 groter dan de deeltjessnelheid.

A.5 Verschillende soorten belastingen

- Een dynamische belasting is een belasting die in de tijd varieert en waarbij de variatie optreedt in een tijdsinterval dat vergelijkbaar of korter is dan de eigentrillingstijd of de looptijd van een systeem.
- Een cyclische belasting is een belasting die zich regelmatig in de tijd herhaalt.
- Een harmonische belasting is een cyclische belasting waarbij de tijdsafhankelijke variatie kan worden geschreven als een enkele sinus in de tijd. Bij een zuivere harmonische trilling is het gemiddelde nul.

Cyclische en harmonische belastingen kunnen een dynamische belasting zijn als de tijd waarin zij optreden voldoende kort is.

A.6 Vergelijking trillingen van een windturbine en een passerende vrachtwagen

De metingen bij de windturbine in Waddinxveen zijn regelmatig verstoord door passerende vrachtauto's 0. Deze bijlage geeft extra informatie zodat het verschil tussen de trillingen van de passerende vrachtauto en de windturbine duidelijker wordt.

De opnemer V6 stond op 29 m afstand van de windturbine vlak langs een weg. Deze weg was gasfalteerd en in goede staat. De maximumsnelheid was 50 km/u, maar de indruk bestond dat deze snelheid wel regelmatig wordt overschreden.

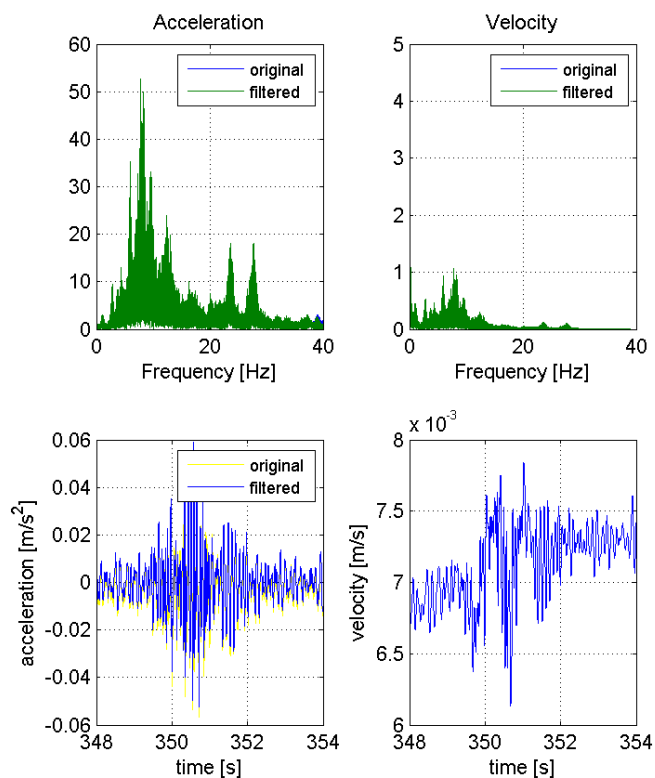
Een ander aspect is de aanwezigheid van de snelweg A12 (op 60 à 70 m afstand), waarvan de voertuigen mogelijk vergelijkbare trillingen als op de parallelweg genereren.

In meting nummer 12 zijn vlak achter elkaar twee vrachtwagens gepasseerd op tijdstippen 350 s en 370 s. Er zijn drie gelijke intervallen van 6 sec verwerkt, twee met een passage en één zonder passage. Bij het beoordelen van de trillingen van de vrachtwagen moet men zich realiseren dat dit een bewegende bron is. De afstand tot van de vrachtwagen als trillingsbron tot een opnemer neemt dus minder toe dan de afstand tot de windturbine fundering afneemt. Figuur 3.1 toont de plaats van de opnemers. .1 geeft voor 5 maaiveld opnemers een schatting van de afstand tot de weg.

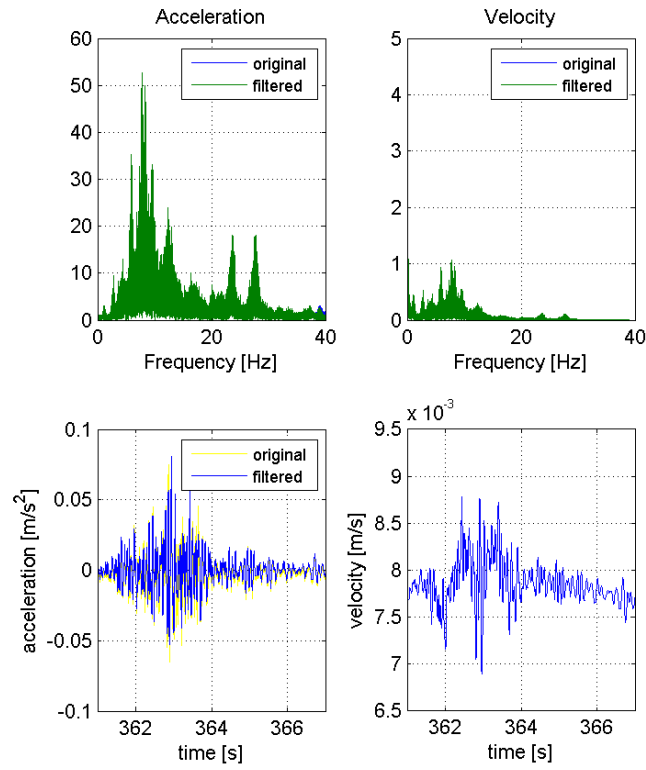
Tabel A.1 Afstand tot windturbine en tot de weg voor vijf maaiveldopnemers.

Opnemer	Afstand tot de windturbine [m]	Geschatte afstand tot de weg [m]
V5	9.7	9
TC4	14.4	6.5
TC1	20.9	4.0
V6	29.4	0.5
TC5	20.2	14

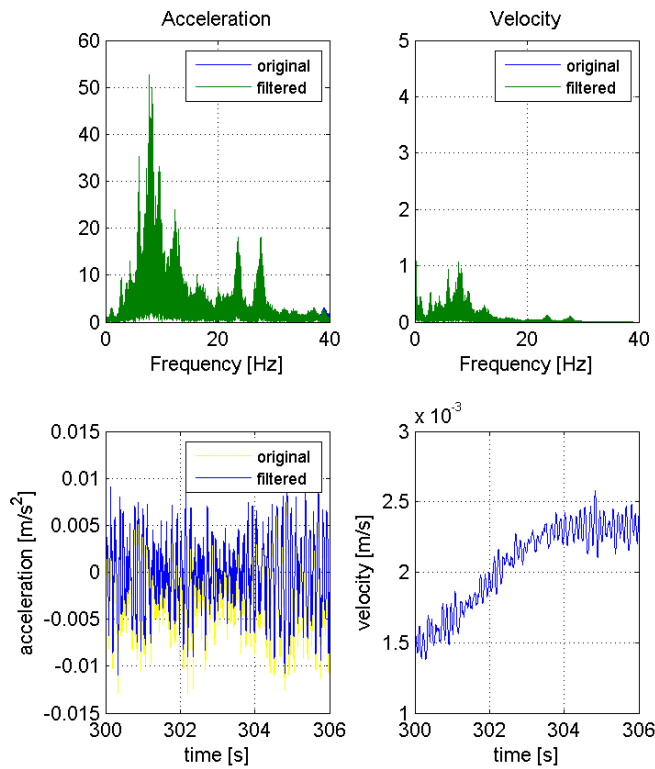
In deze bijlage beoordelen we de volledige signalen, vergelijkbaar met de analyses in het oorspronkelijke rapport 0. In tegenstelling tot de eerdere presentaties wordt in deze figuur het frequentie interval tot 40 Hz beschouwd.



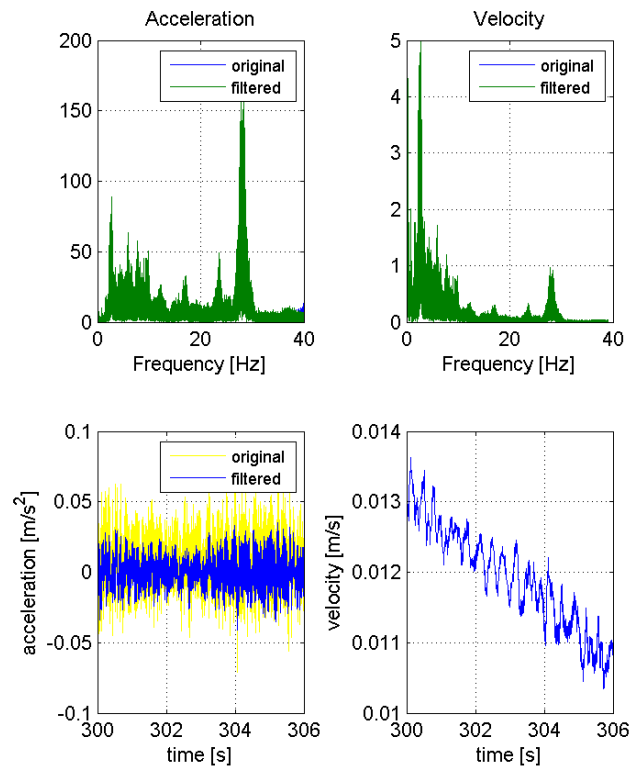
Figuur A.1 Trillingsmeting in opnemer naast de weg (V6 verticaal), passerende vrachtwagen nummer 1.



Figuur A.2 Trillingsmeting in opnemer naast de weg (V6 verticaal), passeren vrachtwagen nummer 2.



Figuur A.3 Trillingsmeting in opnemer naast de weg (V6 verticaal), situatie zonder passerende vrachtwagen.



Figuur A.4 Trillingsmeting in opnemer op de fundering (TC3 verticaal), zonder passerende vrachtwagen.

A.6.1 Trillingen in het tijdsdomein

Figuur A.2 en Figuur A.3 geven de verticale trillingen in opnemer langs de weg (V6) tijdens de passages van de twee vrachtwagens. Het tijdsinterval is 6 sec. De figuren tonen in het bovenste deel het frequentiespectrum en in het onderste deel het tijdsignaal. We gaan eerst de signalen in het tijdsdomein bekijken. Figuur A.3 toont de trillingen in een even lang tijdsinterval van 6 s, waarbij er geen vrachtwagen passeert.

De tijdsfuncties van de situatie met een vrachtwagen passage in de opnemer langs de rijbaan (Figuur A.2 en Figuur A.3 laten in de versnellingen (plaatje links onder) duidelijk een kortdurende toename van de trillingen zien. De versnellingen tijdens de passage zijn 0.07 m/s^2 , terwijl de windturbine ongeveer 0.01 m/s^2 geeft. Dit is ook te zien in Figuur A.4 De snelheid is bepaald uit integratie van de snelheden. Er is voor deze bijlage geen aandacht besteed aan de precieze integratie, waardoor de signalen erg rommelig ogen. De amplitude in de opnemer langs de weg is echter tijdens de passage van de vrachtwagen wel groter: orde 0.8 mm/s terwijl de trillingen ten gevolge van de windturbine ongeveer 0.2 mm/s zijn.

A.6.2 Trillingen in het frequentiedomein

Vervolgens bekijken we de frequentie figuren. Rechtsboven staat de snelheid gepresenteerd, en deze is nagenoeg onafhankelijk van de situatie met of zonder vrachtwagen. De trilling met een frequentie van rond de 8 Hz overheerst. Dit betekent dat er ongeveer $8 \cdot 6 = 48$ trillingen in het tijdsdomein plaatje zichtbaar zou moeten zijn.

A.6.3 De hogere frequenties

In alle figuren (Figuur A.2, Figuur A.3 en Figuur A.4) zijn rond de 24 Hz en 28 Hz twee pieken te zien. Deze zijn niet extreem hoog en bij de snelheid nog lager. Door de hoge frequentie en smalle waarden zijn deze niet zo relevant. Figuur A.4 toont de trillingen gemeten op de fundering van de windturbine in hetzelfde tijdsinterval zonder passage vrachtwagen.

De hoogfrequente pieken in de verticale trillingen zijn op het blok aanzienlijk hoger. Voor de drie opnemers in drie richtingen (TC3 op de fundering, TC1 nabij de weg en TC5 op dezelfde afstand van de fundering maar ook ver weg van de weg) zijn de pieken van de versnellingen in het frequentie domein bij deze twee frequenties globaal vergeleken in Tabel A.2

Tabel A.2 Versnellingen in drie opnemers in drie richtingen voor situaties zonder en met passerende vrachtwagens (tweemaal); globale aflezingen in frequentiedomein figuren.

			Piek 24 Hz			Piek 28 Hz		
locatie	opnemer	richting	none	Lorry 1	Lorry 2	none	Lorry 1	Lorry 2
op fundering	TC3	x	30	20	25	60	60	60
		y	110	110	110	30	30	30
		z	50	50	50	180	170	170
nabij weg	TC1	x	200	200	200	30	30	30
		y	70	70	70	20	20	20
		z	70	70	70	70	70	70
ver van beide	TC5	x	130	130	130	60	60	60
		y	70	70	70	30	30	30
		z	55	55	55	55	55	55

Opvallend hierbij is dat er nauwelijks verschil zichtbaar is tussen de situatie met en zonder passerende vrachtwagens. Daardoor is het aannemelijk dat de hoogfrequente trillingen in de

windturbine worden gegenereerd en niet door de passerende vrachtwagens. Een alternatief is het verkeer op de A12, hoewel deze op 60 à 70 m afstand ligt en dit minder aannemelijk lijkt. Uit deze gegevens kan niet echt goed worden beoordeeld wat de oorzaak van deze trillingen wel is, er is duidelijke afname in enige richting herkenbaar.

Met meer geavanceerde signaal analyses moet het mogelijk zijn om de signalen van de vrachtwagens wel te herkennen. Dat valt buiten het kader van dit rapport. Een herhaling van de meting gedurende een stormachtige nacht waarbij er vrijwel geen verkeer is geeft een mogelijkheid dit empirisch te toetsen.

De pieken in de frequentiegrafiek voor de snelheden bij 8 Hz, 24 Hz en 28 Hz komen in alle drie de verticale signalen voor en ook in de fundering van de windturbine. Uit de meting kan niet eenvoudig worden bepaald wat de oorzaak is. De 8 Hz is mogelijk een andere eigenfrequentie van de fundering. De overige zijn relatief licht gedempt, dit kunnen eigentrillingentrillingen uit de windturbine zijn. In de grond zijn de bijdragen aan de totale trilling zeer beperkt.

B Faalmechanismes en gebeurtenissenbomen

Een gebeurtenissenboom bestaat enkel uit gebeurtenissen en de relaties tussen gebeurtenissen.

Er zijn verschillende soorten gebeurtenissen:

- Basis: deze kunnen gebeuren.
- Gevolg: een gebeurtenis die kan optreden als één of meer andere gebeurtenissen optreden. Er is een oorzakelijk verband.
- Falen: de (gevolg) gebeurtenis waarbij we vinden dat het systeem zijn functie niet naar behoren vervult.

De relaties tussen gebeurtenissen worden beschreven door en-poorten en of-poorten.

Voorbeelden:

- De bekleding van het buitentalud kan bezwijken als deze wordt opgedrukt **of** als deze uitschuurt.
- Opdrukken kan optreden door een (hoge) interne waterstand **en** door (sterke) trillingen (waardoor de effectieve spanning negatief wordt)
- Uitschuring kan optreden door (hoge) stroomsnelheid langs het talud **en** door (sterke) trillingen.

Hierbij wordt opgemerkt dat in de klassieke logica een uitspraak alleen waar of onwaar kan zijn. Het toepassen van een en-poort maakt dat dit inhoudt dat bijvoorbeeld in het laatste alleen waterstroming nooit tot uitschuring kan leiden. Bij toepassing van vage logica kan rekening worden gehouden met de mate waarin een uitspraak waar is. Dan valt dit nadeel weg en kan er wel rekening worden gehouden met het feit dat een sterke stroming alleen uitschuring kan veroorzaken en dat dit sneller gaat wanneer het talud trilt.

In een probabilistische studie wordt de kans op elke gebeurtenis die falen beschrijft berekend. In dat geval is er een model nodig dat aangeeft hoe uitschuring samenhangt met stroomsnelheid en trillingen. In dat model kan ook worden verdisconteerd dat stroming alleen bij hoge stroomsnelheden voldoende is om uitschuring te veroorzaken.

Als we de gebeurtenissenboom voor een dijk met een windturbine vergelijken met de gebeurtenissenboom voor dezelfde dijk zonder windturbine dan zien we twee extra zaken:

- In het normale gebruik leidt de basis gebeurtenis wind /storm tot de gevolggebeurtenis trillingen in de bodem. Deze gevolggebeurtenis kan invloed hebben op verschillende andere gevolggebeurtenissen en dus op het falen.
- Er ontstaan nieuwe basis gebeurtenissen, bijvoorbeeld het losschieten van een rotorblad of het afbreken van de mast. Dit kan overigens ook als een gevolggebeurtenis van de basis gebeurtenis storm worden opgevat.

In dit rapport wordt alleen aan de eerste uitbreiding aandacht besteed. Hierbij is verondersteld dat er geen nieuwe faalgebeurtenissen ontstaan.

C Theoretische aspecten van het verdichtingsmodel

Het model is beschreven in 0.

C.1 Eisen aan het model

Het onderzoek naar verdichting heeft geleid tot de volgende eisen waaraan het (verdichting) model moet voldoen:

1. De spanningsamplitude is de maat door de belasting. Deze eis is vergelijkbaar met de aanname die in eindige elementen theorie wordt gedaan dat het materiaalgedrag kan worden beschreven als de spanningen in het materiaal bekend zijn.
2. Het model is volledig incrementeel. Deze eis hangt samen met de volgende eis, of is daar zelfs een gevolg van.
3. Het model is objectief. In de praktijk kan dit het beste uitgelegd worden aan de hand van een voorbeeldje: Stel dat je een zandmonster belast met twee maal 1000 cycli en de verdichting meet. Na 1000 cycli is de dichtheid veranderd. De tweede helft van de proef (de tweede set van 1000 cycli) kan opgevat worden als een proef met de dichtheid na 1000 cycli als begin situatie. Het model is objectief als deze tweede beschouwing exact dezelfde uitkomst geeft als de eerste beschouwing. Als dit wordt uitgewerkt dan geeft deze eis twee eisen:
 - a. De initiële dichtheid mag niet in de materiaalparameters voorkomen. Opgemerkt wordt dat de initiële dichtheid wel als beginwaarde in het model moet voorkomen.
 - b. Het model moet beschreven worden in de vorm van het holtegetal (void ratio). Het begrip volume rek is niet bruikbaar, omdat dat afhangt van de initiële situatie.
4. Na een heel groot aantal cycli bereikt het materiaal een maximale dichtheid. Deze kan overigens groter zijn dan de maximale dichtheid die in standaard proeven wordt gemeten.
5. De beschrijving bevat naast de dichtheid ten minste nog een tweede statusvariabele. De ultieme consequentie van deze eis is dat twee monsters van hetzelfde materiaal bij dezelfde dichtheid onder dezelfde belasting verschillend gedrag kunnen vertonen, doordat de tweede statusvariabele een andere waarde heeft.

Op het eerste gezicht zal een praktisch ingenieur dit een te theoretisch verhaal vinden. Maar deze ingenieur moet er wel rekening mee houden dat verschillende verschijnselen in de praktijk hiermee kunnen samenhangen. Twee voorbeelden: Als de tweede statusvariabele niet wordt beschouwd kunnen samples die op een verschillende manier gemaakt zijn heel verschillend gedrag vertonen, ondanks dat zij dezelfde dichtheid hadden bij het begin van de proef. Als de materiaal parameters afhangen van de initiële dichtheid zullen bij proeven met veel cycli altijd (grote) afwijkingen ontstaan, die geen fysische achtergrond hebben.

Dergelijke afwijkingen die worden veroorzaakt door een gebrekkige modellering, moeten in het ontwerp worden opgenomen als onzekerheid.

C.2 Model en analytische oplossing

Het model bevat twee statusvariabelen: het holtegetal en de verdichtingscapaciteit. Er zijn ook twee processen zichtbaar: een snel proces en een langzaam proces.

Als een cyclische proef over weinig cycli wordt uitgevoerd ontstaat alleen inzicht in het snelle proces. Dit geeft een grote verdichting per cyclus, maar een lage eindwaarde. Bij een toenemend aantal cycli wordt het langzamere proces zichtbaar, dat bestaat uit het toenemen van de verdichtingscapaciteit. In de literatuur wordt dit wel de lineaire tak genoemd, omdat

als alleen de dichtheid wordt bekeken er geen enkel einde aan de verdichting komt. Pas na een groot aantal cycli bereikt de verdichtingscapaciteit de eindwaarde en komt de verdichting aan de maximale waarde. Pas als dat stadium wordt bereikt in een proef ontstaat inzicht in de maximaal optredende verdichting.

Het model is incrementeel en niet-lineair. Het is opgesteld in de vorm van een stelsel differentiaalvergelijkingen. Het is mij niet gelukt deze analytisch op te lossen, zodat er momenteel geen analytische uitdrukking voor de oplossing beschikbaar is.

Een ander aspect, dat van belang is voor toepassing bij windturbines, is de verdichting bij verschillende amplitudes. Dit treedt in de praktijk bijvoorbeeld op als de wind draait. In 0 is hier op theoretische basis aandacht aan besteed. Dit probleem wordt nog niet eenduidig beschreven door het voorgestelde model. Verder onderzoek (theoretisch in samenhang met extra cyclische proeven) is noodzakelijk.

Het ontwikkelde model geeft aan dat het verschijnsel verdichting complex is. Het gedrag van zand onder een groot aantal cycli met variërende amplitude is niet goed bekend. Wel is duidelijk dat dit type belasting op lange termijn tot grote verdichting aanleiding kan geven. Proeven met een beperkt aantal cycli kan leiden tot onderschatting van de verdichting op langere termijn.

C.3 Implicaties voor model Wichtmann

Wichtmann *et al* (0, 0) hebben het probleem van verdichting uitgebreid bestudeerd en een model voor de invloedsfactoren opgesteld. In 0 worden de belangrijkste in hun Tabel 1 samengevat. De 'cyclic preloading' wordt in dit model vervangen door een tweede state parameter 'compaction capacity'. De drie invloedsfactoren rekamplitude, gemiddelde isotrope spanning en gemiddelde dimensieloze spanning zijn in het nieuwe model (nog) niet expliciet opgenomen, maar de verwachting is dat deze wel een rol blijven spelen.

Uitgaande van een cyclische belasting kunnen de spanningsinvarianten p en q geschreven worden als

$$\begin{aligned} p(t) &= p_{av} + \hat{p} \sin(\omega t) \\ q(t) &= q_{av} + \hat{q} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (1.12)$$

De gemiddelde spanning p_{av} en q_{av} kunnen worden ingesteld met de celdruk en de gemiddelde verticale bovenbelasting. Bij een standaard proef waarin de celdruk constant is en de verticale bovenbelasting harmonisch varieert, zijn de twee amplitudes gekoppeld

$$\begin{aligned} p(t) &= p_{av} + \frac{1}{3} \hat{\sigma}_v \sin(\omega t) \\ q(t) &= \eta p_{av} + \hat{\sigma}_v \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (1.13)$$

Deze notatiewijze suggereert dat er bij een standaard cyclische triaxiaalproef drie parameters een rol spelen:

- De gemiddelde isotrope spanning p_{av} . De verdichtingssnelheid neemt af met toenemende waarde van de gemiddelde isotrope spanning.
- De gemiddelde deviator η . De verdichtingssnelheid neemt af met toenemende waarde van deze deviator. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat bij een toenemende gemiddelde deviator er wel een sterke toename van de deviator rek is, zie hiervoor de figuren 5 en 6 in 0. Naast verdichting treedt er dus ook permanente schuifvervorming op.
- De amplitude van de cyclische belasting $\hat{\sigma}_v$. De verdichtingssnelheid neemt toe met de amplitude. Voor kleine amplitudes is dit kwadratisch, voor grotere amplitudes is het verband veel minder sterk. In 0 suggereren Wichtmann *et al* zelfs een constante (dus geen toename met de amplitude).

C.4 Toepassing model Wichtmann

Welke spanningen en verdichting treden er rondom een cyclisch belaste paal op als er kleine amplitudes zijn.

Om een indicatie te krijgen van de grootte van de rekken en spanningen is een wand met paaleigenschappen bekeken. Dit gaat in een 2D simulatie goed, terwijl bij een axiale symmetrie verschillende problemen aanwezig zijn. De wand is 0.46 m dik, en heeft de eigenschappen van beton. De wand staat in zand. De spanningen zijn op 0.46 m uit de symmetrie as bekeken. Dit is een eerste benadering, bedoeld om de orde van grootte te schatten. In werkelijkheid is de paal minder stijf dan de wand (wat grotere spanningen in de grond geeft) terwijl rondom de paal een grotere afname van de spanningen met afstand wordt verwacht (wat kleinere spanningen geeft). Bij een belasting van 1000 kPa op de wand (op een paal 0.46×0.46 is dit 212 kN) geeft dit een schuifrek van orde 10^{-4} in de grond. Vaak wordt dit als ondergrens voor verdichting beschouwd.

Passen we het model van Wichtmann toe, dan zijn de bijbehorende spanningen hierbij ongeveer 1/5 deel van de laagste spanningen waarbij de proeven zijn uitgevoerd. Dit betekent dat het aantal cycli om dezelfde volume rek te behalen als in de proeven met 25 moet worden vermenigvuldigd. Dit geeft op basis van 0 dat verdichting van 1% wordt gehaald na 2.5×10^6 cycli. Een windturbine haalt dit aantal met gemak. Hierbij moet worden aangetekend dat onder een fundering mogelijk een lagere spanning heerst dan waarmee de proeven zijn uitgevoerd (wat een grotere verdichting per cyclus oplevert) en dat er veelal na enige tijd een versnelling van de verdichting optreedt (wat in het ontwikkelde model ontstaat doordat het trage proces opgang komt).

De conclusie luidt dat het optreden van verdichting op basis van dit onderzoek niet kan worden uitgesloten.

D Het meten van trillingen in de grond

D.1 Bepaling trillingssterkte

Een aantal aspecten moet bij het meten van trillingen in de grond bij een windturbine worden beschouwd.

De meest relevante trillingen die door windturbines worden gegenereerd, hebben een frequentie die lager is dan 1 Hz. De meetapparatuur moet in staat zijn deze laagfrequente trillingen correct te meten. Dit betekent dat geofoons minder geschikt zijn, tenzij er maatregelen worden getroffen om deze lage frequenties wel te meten. Dit betekent ook dat een standaard trillingsmeetset meestal niet voldoet. Een standaard trillingsmeetset voldoet aan de eisen die de SBR richtlijnen voor het meten en beoordelen van trillingen. De SBR richtlijn schrijft het filteren (gedeeltelijk verwijderen) van trillingen onder de 1 Hz voor. Omdat de belangrijkste trillingen onder de 1 Hz liggen, geven dergelijke standaard meetsets een grote onderschatting van het werkelijke trillingsniveau.

Meestal zijn versnellingsopnemers die geschikt zijn om ook laagfrequent te meten de aangewezen oplossing. Deze opnemers zijn herkenbaar doordat zij de richting van de zwaartekracht kunnen bepalen.

Ondanks de lage frequenties moet de sample frequentie voldoende hoog worden gekozen, zodat de snelheid en de verplaatsing voldoende betrouwbaar kunnen worden berekend.

Het uitsluitend weergeven van maximale versnellingen is onvoldoende voor de beoordeling.

D.2 Bepaling golfsnelheid

Een eerste schatting van de golfsnelheid kan worden verkregen uit een correlatie met de conusweerstand voor het aanwezige materiaal. Deze zijn echter zeer onbetrouwbaar.

Het is beter de golfsnelheid direct in het veld te meten. Daarvoor zijn verschillende technieken beschikbaar:

- Vertical seismic profiling (vspt): een conus met twee opnemers in de grond geduwd. De grond wordt belast met een dynamische belasting waarbij het verschil in aankomsttijden in de opnemers de golfsnelheid in het materiaal tussen de opnemers geeft.
- Een down hole test: hierbij wordt de looptijd van een klap aan maaiveld tot een opnemer op diepte gemeten. Dit geeft een indicatie van de golfsnelheid in het materiaal tussen de klap en de opnemer. Meestal wordt deze techniek gecombineerd met een vspt meting.
- Een cross hole test: waarbij een dynamische bron en een ontvanger zich op enige horizontale afstand in dezelfde laag bevinden. De looptijd van de golven van de bron naar de ontvanger geven de golfsnelheid van de laag. Omdat er twee apparaten gelijktijdig moeten worden weggedrukt en de kleine bron relatief kostbaar is, is dit een relatief dure test.
- Multi-channel analysis of seismic waves (masw). In een lange string van maaiveld opnemers wordt de beweging ten gevolge van een bron aan maaiveld gemeten. De proef wordt nagerekend met een model voor gelaagde bodem. Als de berekende trillingen voldoende overeenkomen met de gemeten trillingen zijn de golfsnelheden van de gelaagde bodem bekend. Door de benodigde analyse tijd is dit ook een duurdere methode. Omdat bij deze methode de nadruk ligt op oppervlakte golven is de diepte waarover de parameters kunnen worden bepaald beperkt.

E Grootte van de variatie in een piping-kanaal

De variabele statische kracht leidt tot een variabele hoogte van een piping kanaal. De vraag is of deze variatie zo groot is dat deze wezenlijke invloed op de kans op piping heeft. Dit wordt in deze bijlage verder uitgewerkt, zodat er een kwantitatiever beoordeling mogelijk is.

E.1 Grootte van de variatie

Hiertoe worden o.a. de resultaten van eindige elementen berekening met het eindige elementen programma Plaxis besproken, die tijdens het TU Delft onderzoek zijn gemaakt 0. Vervolgens is een tweede Plaxis som gemaakt om de invloed van de spanningsverhoging op de stabiliteit van een kanaal te kwantificeren.

In paragraaf 6.3.3 van 0 wordt een paal met diameter 0.3 m en lengte 12 m besproken. De paal staat in een bodem met een toplaag van 6 m klei en daaronder zand. De materiaalgedrag is lineair elastisch. De paal wordt aan de kop belast met een axiale kracht. De spanningen en vervormingen op de overgang van klei en zand zijn beoordeeld.

Deze berekeningen laten zien dat ter hoogte van de overgang van klei naar zand er rondom de paal trekspanningen ontstaan. Deze kunnen zo groot zijn, dat aanwezige spanningen door de bovenbelasting grotendeels worden gecompenseerd. Het gebied van de verhoogde spanningen is wel beperkt. In horizontale richting 1 tot 2 m, d.w.z. 3 tot 6 maal de straal van de paal, in verticale richting 2 tot 3 m, d.w.z. 6 tot 9 maal de straal van de paal. Voor andere materiaal eigenschappen worden hoogstwaarschijnlijk andere waarden gevonden.

Vervolgens is een berekening onder plane strain condities gemaakt om de diepte variatie van een kanaal door de optredende spanning te schatten. Het kanaal is aangebracht in het zand en heeft een driehoekige vorm: de breedte is 100 mm, de diepte is 1 mm. In de berekening is symmetrie verondersteld, zodat maar de helft van het probleem is bekeken. Figuur E.1 geeft de incrementele verplaatsingen in verticale richting als de gemiddelde spanning 10 kPa is. De optredende vervorming is orde 40 μm . Bij een aanwezige diepte van het kanaal van 1 mm is dit orde 4%. Deze waarde hangt waarschijnlijk af van de gebruikte parameters, maar als indicatie wel bruikbaar. Het hoger en lager worden van de hoogte van het kanaal heeft twee effecten:

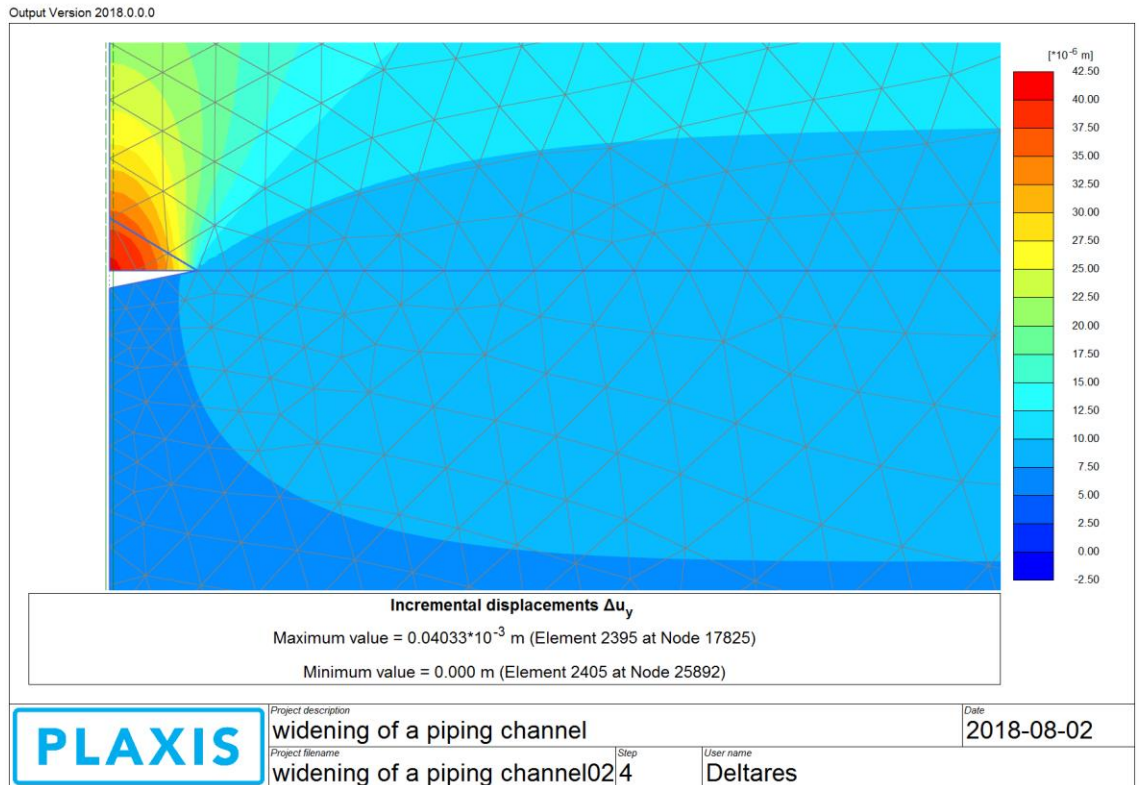
- De stroomsnelheid in het kanaal varieert. Dit gaat kwadratisch met de hoogte van het kanaal, dus een variatie van 4% op de hoogte geeft een variatie van 8% op de stroomsnelheid. Dit geeft een hogere erosie spanning op de korrels door de stroming.
- De druk in het kanaal varieert ook mee, en daardoor zal er een variabele uitstroming uit het zand in het kanaal ontstaan. De hogere uitstroming werkt destabiliserend op de korrels aan de rand.

Deze effecten treden niet op het zelfde tijdstip maximaal op. Vermoedelijk verlopen beide cyclisch met een fase-verschuiving. Door traagheidsaffecten is deze mogelijk niet gelijk aan een kwart periode.

Een ander aspect dat uit de Plaxis berekeningen blijkt is de spanningsconcentratie die (in een elastische) berekening optreedt bij de tip van het kanaal. Hier is veel onderzoek naar gedaan (o.a. i.v.m. vermoeiing in staalconstructies) en bekend is dat dit sterk afhangt van de precieze vorm van het tip einde. Bij een cirkelvormig gat is de verhoging van de spanning een factor 3 (Kirch's oplossing, 1898, zie b.v. 0). Dit komt bij een spanningsverhoging orde 10 kPa neer op 30 kPa. Onder een 6 m dikke kleilaag is de verticale totaalspanning $6 \cdot 16 =$

100 kPa. Bij een elliptisch gat is de spanningsconcentratie aanzienlijk hoger (Inglis oplossing, 1913, zie b.v. 0).

De effectieve spanning in het zand is lager als er een hoge waterspanning heerst. Dat is als piping begint altijd het geval, er moet immers een voldoende groot verhang in de zandlaag zijn. Bij een waterdruk van 40 kPa (4 m waterdiepte) is de effectieve spanning in het zand 60 kPa. De spanning in de bodem die ontstaat door de kracht in de palen is dan orde van 50% van deze waarde. Dit is een significant getal in verband met de verbreden van de kanalen en het verlengen van de kanalen (het wezenlijke onderdeel voor terugschrijdende erosie).



Figuur E.1 Incrementele verplaatsingen rondom een kanaal

E.2 Invloed op waterbeweging

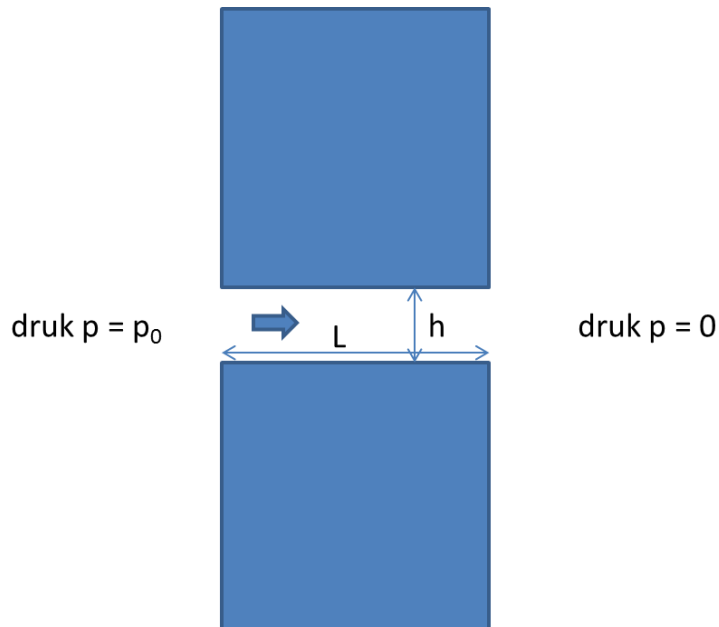
E.2.1 Laagfrequente invloeden

De invloed van een in de tijd variërende dikte van een kanaal kan worden benaderd. Figuur E.2.1 schetst de situatie. De diepte van het stroomkanaal wordt gelijk gesteld aan

$$h(t) = h_0 + \hat{h} \sin(\omega t) \quad (1.14)$$

Met:

ω de hoekfrequentie van de beweging [rad/s]



Figuur E.2.1 Situatieschets stroomkanaal met dikte die varieert in de tijd.

Als de dikte van de spleet niet varieert, treedt er in de spleet Poisseuille stroming in de richting van de spleet (x-richting) op. Het stromingsprofiel is parabolisch onder de aanname dat er geen slip optreedt op de randen van de spleet

$$v(y) = v_0 \left[1 - \left(2 \frac{y}{h_0} \right)^2 \right] \quad (1.15)$$

$$\text{met } v_0 = \frac{1}{8} \frac{\Delta p}{\Delta x} \frac{h_0^2}{\mu} = \frac{1}{8} \frac{p_0}{L} \frac{h_0^2}{\mu}$$

met

μ viscositeit [Pa.s] voor water in de grond geldt orde van grootte $\mu \approx 1.3 \cdot 10^{-3}$ Pa.s

y de richting dwars op de spleet [m]

Het specifieke debiet is dan

$$q_0 = \frac{2}{3} v_0 h_0 = \frac{1}{12} \frac{p_0}{L} \frac{h_0^3}{\mu} \quad (1.16)$$

Onder de aanname dat de (hoek)frequentie zo laag is dat de traagheidstermen geen rol spelen (stroming in dwarsrichting is heel snel, instantaan), zijn er twee benaderingen mogelijk

- Alleen de wet van behoud van volume wordt toegepast.
- De variabele diepte h wordt in de Poisseuille stroming gebruikt.

De eerste benadering berust op de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1.17)$$

Dit leidt tot de amplitude van het specifieke debiet

$$\hat{q} = \omega \hat{h} x \cos(\omega t) \quad (1.18)$$

Het debiet verloopt lineair met de afstand tot het centrum van de spleet. Het debiet is maximaal als de wand de gemiddelde positie passeert (dan is immers de variatie van de spleetdiepte maximaal).

In de tweede benadering kan het specifieke debiet worden berekend uit de oplossing van de Poisseuille vergelijking (1.15) met variabele diepte van de spleet

$$q(t) = \frac{1}{8\mu} \frac{P_0}{L} \int_{-\frac{1}{2}h}^{+\frac{1}{2}h} [h^2 - 4y^2] dy = \frac{1}{8\mu} \frac{P_0}{L} \frac{2}{3} (h_0 + \hat{h} \sin(\omega t))^3 \quad (1.19)$$

Voor een voldoende kleine variatie van de diepte van het kanaal ($\hat{h} \ll h_0$) volgt bij benadering

$$q(t) = \frac{1}{12\mu} \frac{P_0}{L} h_0^3 \left(1 + \frac{\hat{h}}{h_0} \sin(\omega t) \right) \quad (1.20)$$

Er is een verschil tussen de beide uitdrukkingen (1.18) en het amplitude deel van (1.20). De laatste uitdrukking lijkt een redelijke benadering als de dikte verandering extreem langzaam optreedt. De eerste uitdrukking hoort mogelijk bij een snellere variatie te horen.

Vergelijking (1.18) kan worden herschrijven in een vorm die hierover enige informatie geeft

$$q(t) = \frac{1}{12\mu} \frac{P_0}{L} h_0^3 \left(1 + \frac{\hat{h}}{h_0} \left(\frac{\mu\omega}{P_0} \right) \frac{L}{h_0} \frac{x}{h_0} \cos(\omega t) \right) \quad (1.21)$$

Als we eisen dat de afwijking van het gemiddelde niet te groot mag zijn dan betekent dit dat de variatie van de kanaaldiepte h_0 beperkt moet zijn, de frequentie ω laag en de kanaallengte L niet te groot.

E.2.2 Geïntegreerde beschouwing met beide invloeden

Om een uitdrukking te krijgen die over een groter frequentie gebied ω bruikbaar is zal een uitgebreider model moeten worden opgezet, dat met beide aspecten rekening houdt. Dit leidt tot het volgende:

- De continuïteitsvergelijking (zie vergelijking (1.17))

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1.22)$$

- De evenwichtsvergelijking (zie vergelijking (1.19))

$$q(x,t) = \frac{1}{12\mu} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} (h_0 + \hat{h} \sin(\omega t))^3 \quad (1.23)$$

met de randvoorwaarden $p(-L/2) = p_0$ en $p(+L/2) = 0$.

Door het specifieke debiet naar x te differentiëren en dit in te vullen in de continuïteitsvergelijking (1.22) en de voorgeschreven hoogte h uit vergelijking (1.14) volgt de vergelijking:

$$\frac{1}{12\mu} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x} (h_0 + \hat{h} \sin(\omega t))^3 + \omega \hat{h} \cos(\omega t) = 0 \quad (1.24)$$

Door integratie naar de plaats x kan de druk $p(x,t)$ worden gevonden, waarbij rekening moet worden gehouden met het feit dat de integratieconstanten nog een functie van de tijd kunnen zijn.

$$p(x,t) = -6\mu \hat{H} x^2 + C_1(t)x + C_2(t) \quad (1.25)$$

Met:

$$\hat{H} = \hat{H}(t) = \frac{\omega \hat{h} \cos(\omega t)}{(h_0 + \hat{h} \sin(\omega t))^3} \quad (1.26)$$

Vervolgens worden de twee integratieconstanten bepaald uit de randvoorwaarden voor de druk. Het resultaat luidt:

$$p(x,t) = -6\mu\hat{H}(t)\left(\frac{1}{2}L\right)^2 \left[\left(\frac{2x}{L}\right)^2 - 1 \right] + \frac{1}{2}p_0 \left[1 - \left(\frac{2x}{L}\right) \right] \quad (1.27)$$

Het debiet volgt uit differentiatie en substitutie in vergelijking (1.23)

$$q(x,t) = -\omega\hat{h}x \cos(\omega t) - \frac{1}{12\mu} \frac{p_0}{L} \left(h_0 + \hat{h} \sin(\omega t) \right)^3 \quad (1.28)$$

Blijkbaar is de volledige oplossing de som van beide voorafgaande oplossingen.

Genormeerd op het ongestoorde debiet uit vergelijking (1.16)

$$\frac{q(x,t)}{q_0} = +12 \frac{xL}{h_0^2} \frac{\mu\omega}{p_0} \frac{\hat{h}}{h_0} \cos(\omega t) + \left(1 + \frac{\hat{h}}{h_0} \sin(\omega t) \right)^3 \quad (1.29)$$

E.2.3 Relatieve belang van de termen

Het debiet wordt benaderd met een constante en een variabele term

$$q(x,t) = q_0 + \hat{q}(x,t) \quad (1.30)$$

Bij benadering is de variabele term \hat{q} in het debiet voor voldoende kleine waarden van $\frac{\hat{h}}{h_0}$

$$\frac{\hat{q}(x,t)}{q_0} = \left[12 \frac{x}{L} \left(\frac{L}{h_0} \right)^2 \frac{\mu\omega}{p_0} \cos(\omega t) + \sin(\omega t) \right] \frac{\hat{h}}{h_0} \quad (1.31)$$

De amplitude is evenredig met de amplitude van de kanaaldiepte over de gemiddelde kanaaldiepte.

Voor een groot drukverval (p_0 groot) en een korte spleet (xL klein) speelt alleen de sinusterm een rol. In dat geval overheerst de invloed van de kanaaldiepte op de stroming en is de vergroting van het debiet bepaald door de relatieve amplitude van de kanaal diepte. Voor een klein drukverval (p_0 klein) en een lange spleet (x en L groot) kan de cosinus term meegaan spelen.

Dit laatste is het geval bij bijvoorbeeld piping onder een dijk. Hierbij moet gedacht worden aan een situatie waarin in een waterkering een verhang van $i = 0.1$ optreedt en een kanaal van 2 m lengte aan één zijde ($x = 0$) dicht is (het punt van terugschrijdende erosie). In dit geval is $p_0 = i L \rho g = 2 \cdot 10^3$ Pa. De kanaaldiepte is 1 mm en de belastingsfrequentie is $f = 0.3$ Hz, dus de hoekfrequentie $\omega = 2$ rad/s. Midden in het kanaal ($x = 1$ m) is de term voor de cosinusfunctie orde grootte 30. Dit betekent dat een amplitude van 3% (d.w.z. 0.03 mm) een verdubbeling van het debiet geeft. Deze amplitude past bij de orde van grootte van de variatie die in paragraaf E.2.1 is gevonden.

Het is interessant om op te merken dat deze vergelijking twee tijdsafhankelijke termen bevat:

- Een sinusterm: deze is evenredig met de verplaatsing van het funderingsblok.
- Het product van de hoekfrequentie ω en een cosinusterm: deze is evenredig met de snelheid van het funderingsblok.

Voor lage (hoek)frequenties is de verplaatsing maatgevend, voor hogere (hoek)frequenties kan de snelheid maatgevender worden.

F Globale schatting vermoeiing

Om een eerste inzicht te krijgen in de toelaatbare amplitude van de spanningen in het asfalt om de invloed van vermoeiing te schatten, wordt eerst een indicatief getallen voorbeeld uitgewerkt.

Uitgangspunt is de sommatie regel van Miner (zie bv. Wikipedia.org)

$$\sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_j} \quad (1.32)$$

Waarin:

- n_j Het optredend aantal cycli met amplitude u_j .
- N_j Het toelaatbare aantal cycli met amplitude u_j .
- k Het aantal beschouwde amplitudes.

Deze formule is een lineaire sommatie regel, die slechts in eerste benadering waar is. Onder andere de aanname dat vermoeiing onafhankelijk van de volgorde van het aanbrengen van trillingen speelt hierbij een rol.

Er wordt aangenomen dat er twee amplitudes optreden een grote amplitude u_1 tijdens een storm en een kleine amplitude u_2 door het trillen van de windturbine.

Het verwachte aantal cycli:

- 1 20 jaar gemiddeld 3 stormen per jaar van 6 uur met een golfperiode van 6 sec geeft $n_1 = 20 * 3 * 6 * 3600 / 6 = 0.2 * 10^6$ cycli.
- 2 10 jaar productie van een windturbine met een frequentie van 0.3 Hz geeft $n_2 = 10 * 365 * 24 * 0.3 * 3600 = 95 * 10^6$ cycli.

Als we veronderstellen dat de vermoeiing door de windturbine slecht 5% van de invloed van de storm mag zijn, dan kunnen we schrijven

$$\frac{n_2}{N_2} = 0.05 \frac{n_1}{N_1} \Rightarrow N_2 = \frac{n_2}{0.05 n_1} N_1 = 9500 N_1 \quad (1.33)$$

Als laatste kunnen we aannemen dat de vermoeiingssterkte omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de amplitude, dus $N_{failure} \propto \frac{1}{\sigma^2}$. Ook deze aanname moet beter onderbouwd

worden vanuit materiaalkundig oogpunt, waarbij mogelijk rekening moet worden gehouden met het verschil in de spanningssituatie.

Bij dit kwadratisch aangenomen verband is een amplitude van ongeveer 1% van de amplitude van de golfklappen toelaatbaar. Dit grote verschil wordt veroorzaakt door het grote aantal cycli dat de windturbine genereert.

G Resultaten trillingsmeting bij de Krammer

G.1 Verwerking van de gegevens

Deze bijlage toont per onderdeel (G.2, G.4 etc.) drie pagina's met elk twee figuren. Een pagina geeft een richting (X, Y, Z) aan, de richting staat boven de figuur vermeld. Zie paragraaf 3.2.1 voor de definitie van de richtingen. De bovenste figuur per pagina toont de windsnelheid en trillingssnelheid als functie van de tijd, de onderste figuur toont de trillingssnelheid als functie van de windsnelheid.

De gegevens per 10 minuten zijn op de volgende wijze aangepast om een bruikbare presentatie te geven. De gebruikte parameters staan vermeld in Tabel G.1.

- Een aantal fysisch niet realistisch geachte waarden zijn verwijderd. De maximale trillingssnelheid is gegeven in de kolom 'Maximale waarde'.
- Aan het begin en einde van een aantal metingen zijn hoge trillingen geregistreerd, die vermoedelijk een andere bron dan de windturbine hebben. Deze metingen zijn wel getoond in de figuur als functie van de tijd (bovenste figuur), maar zijn niet getoond in de figuur als functie van de windsnelheid. Het aantal verwijderde 10 minuten intervallen staat vermeld in de kolommen start tijd-as en einde tijd-as.

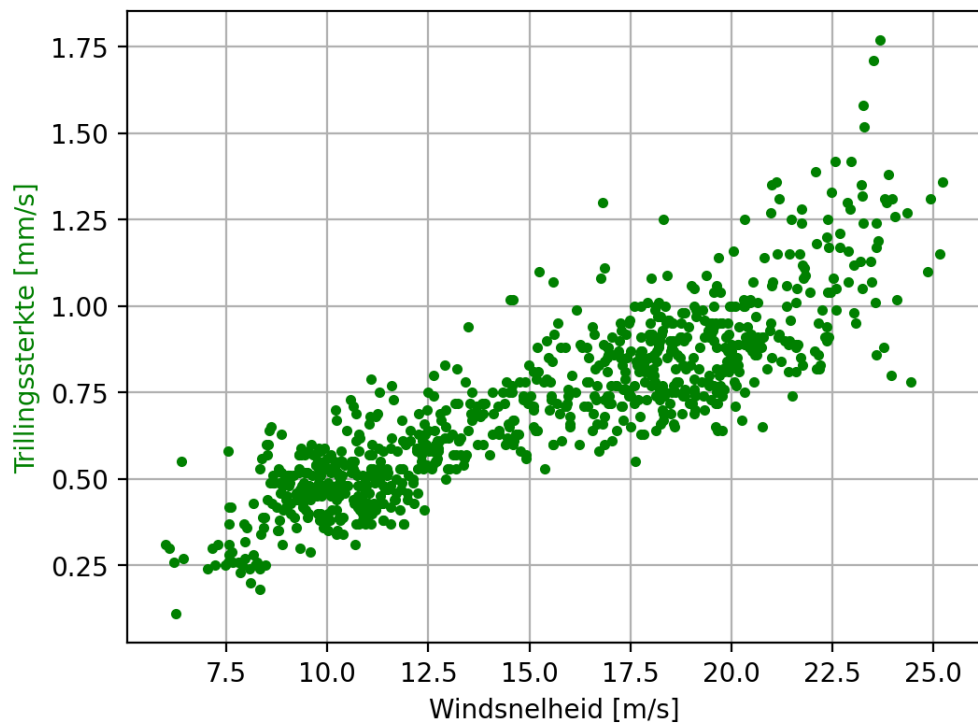
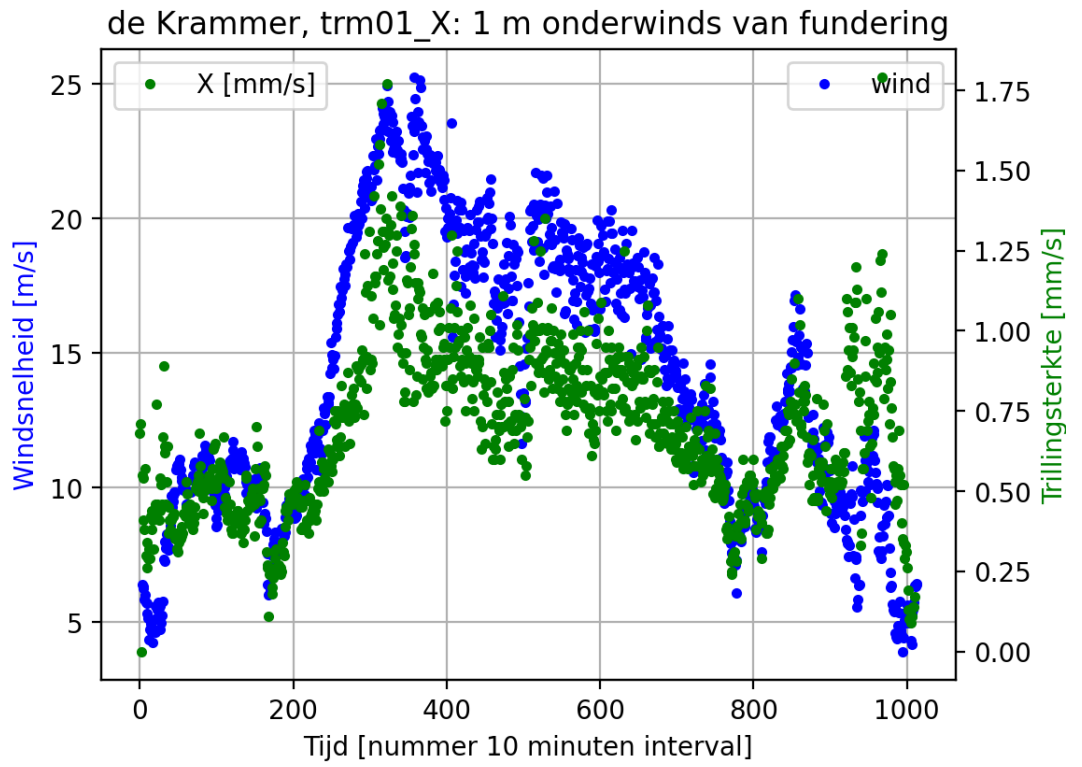
De 10 minutenintervallen van de trillingsmeting en windmeting zijn niet volledig identiek.

De meting op de fundering (opnemer 2) is momenteel niet digitaal beschikbaar. Voor deze opnemer is de beschikbare papieren uitvoer gedigitaliseerd en zijn vergelijkbare figuren uitgewerkt. Deze figuren zullen daardoor minder betrouwbaar zijn. Omdat de lijnen voor de trillingssterkte op de fundering vrijwel samenvallen, is het niet zinvol om onderscheid in trillingsrichting te maken. Omdat bij het digitaliseren van de windsnelheid de delen met de extreme trillingen niet zijn meegenomen, zijn deze extreme trillingen ook niet in de figuur voor trillingssterkte en windsnelheid opgenomen.

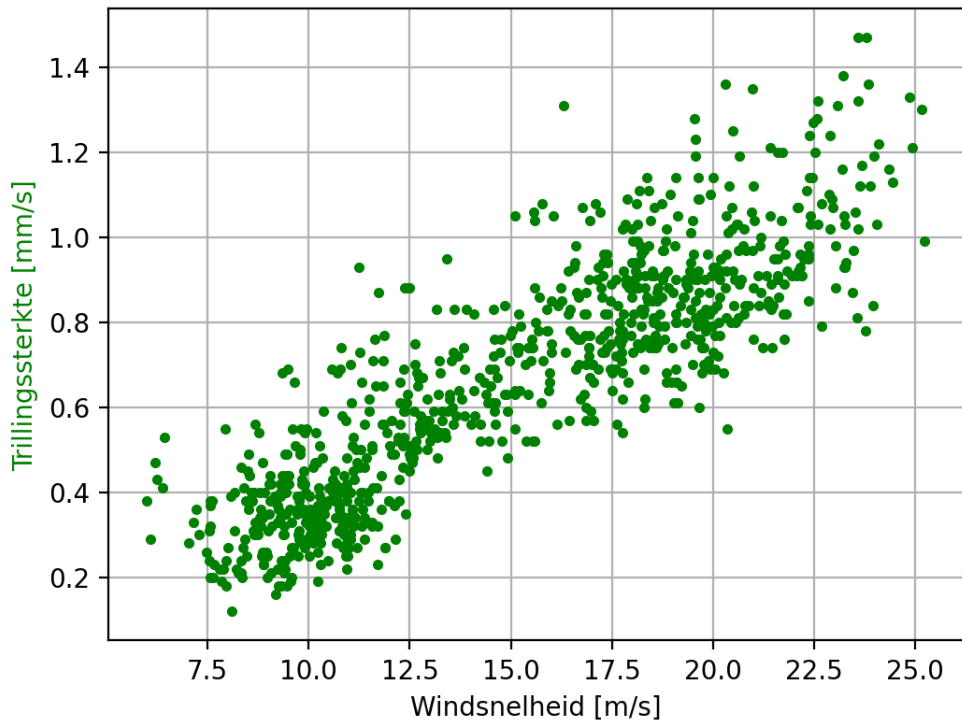
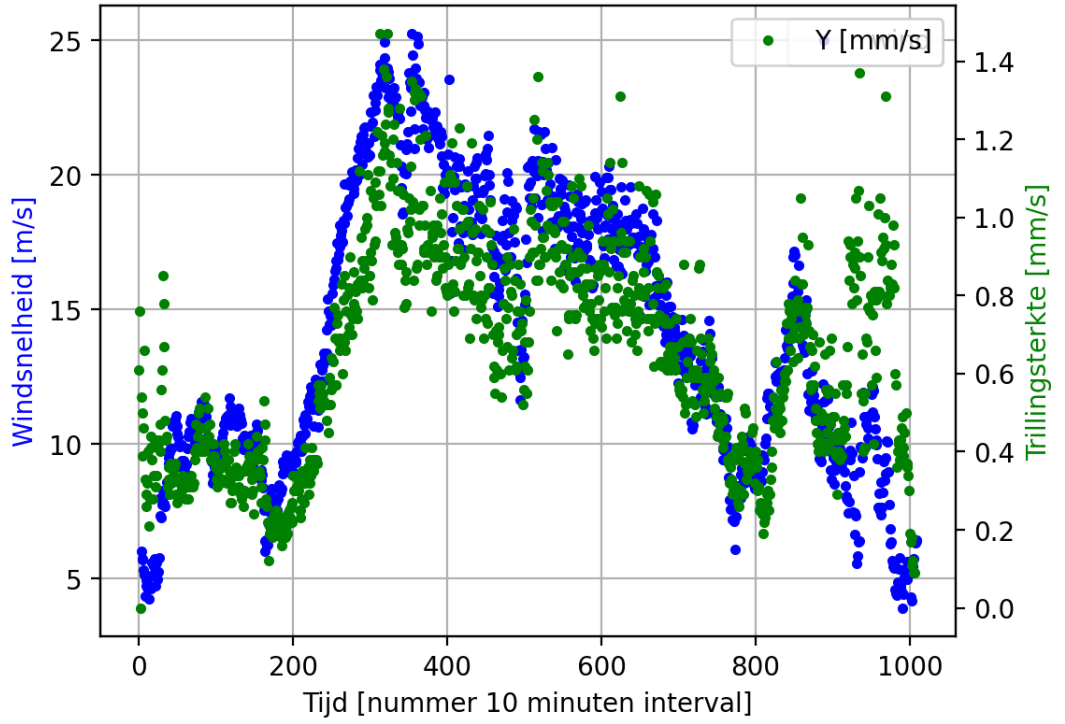
Tabel G.1 Gebruikte parameters voor modificatie van de resultaten voor de presentatie.

Opnemer	Maximale waarde	Start tijd-as	Einde tijd-as
1	100	50	100
2	-	-	-
3	5	50	100
4	100	50	0
4	5		500

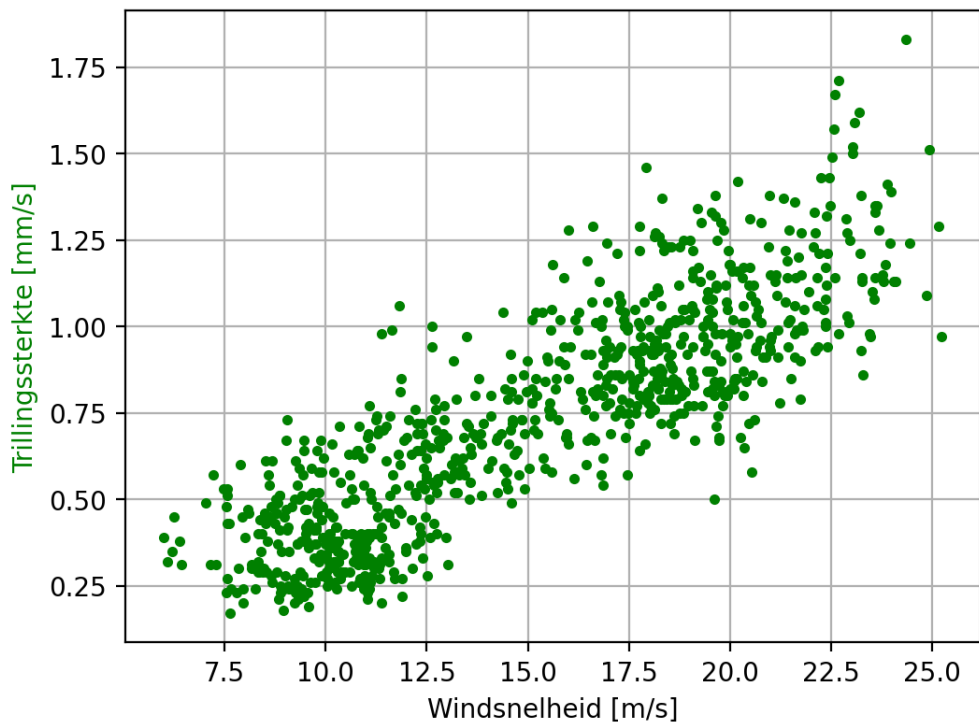
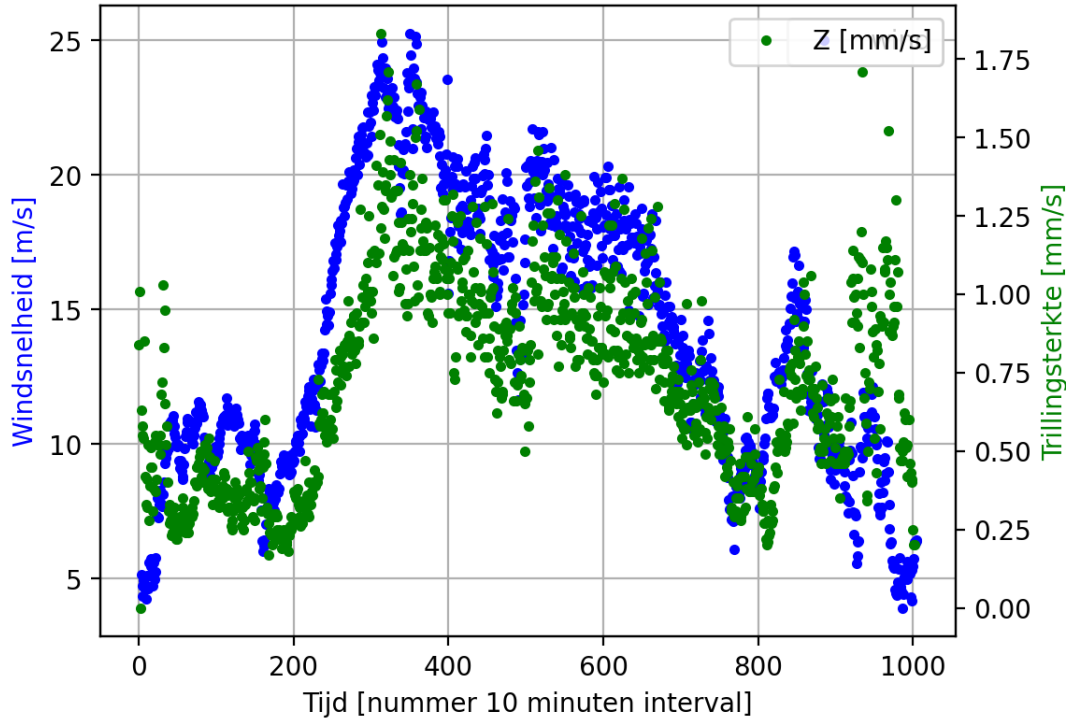
G.2 Opnemer 1



de Krammer, trm01_Y: 1 m onderwinds van fundering

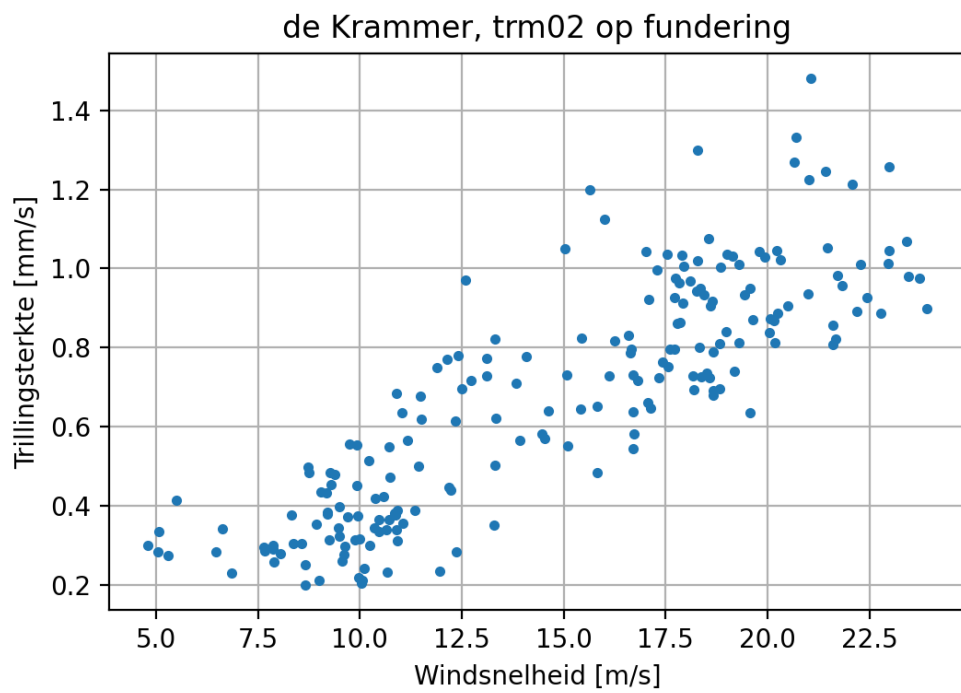
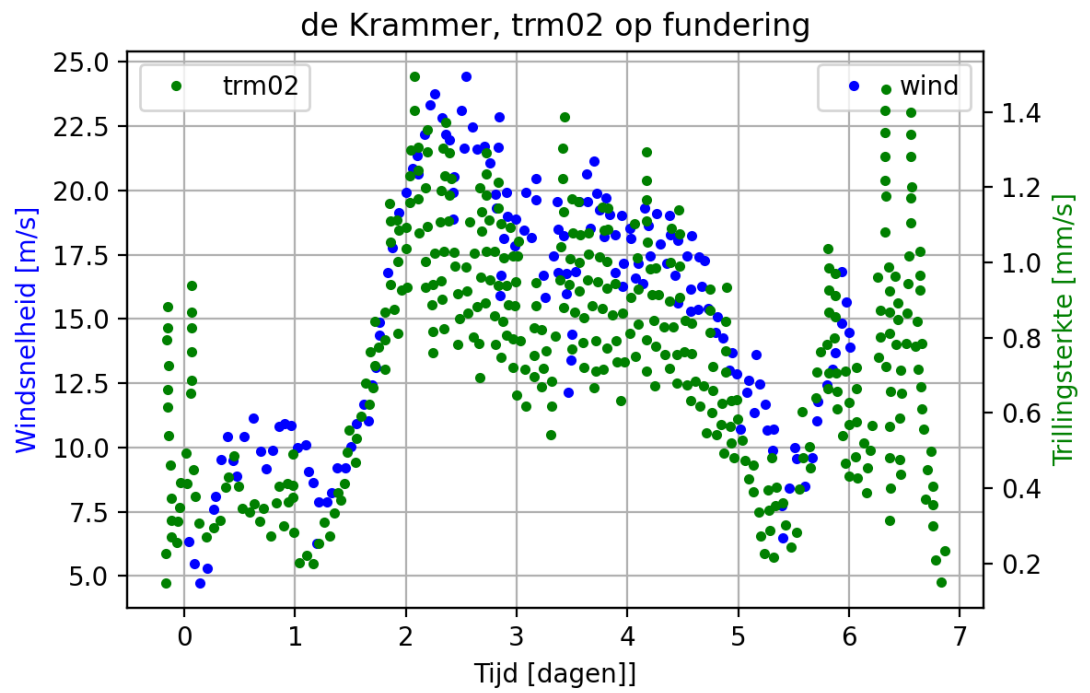


de Krammer, trm01_Z: 1 m onderwinds van fundering

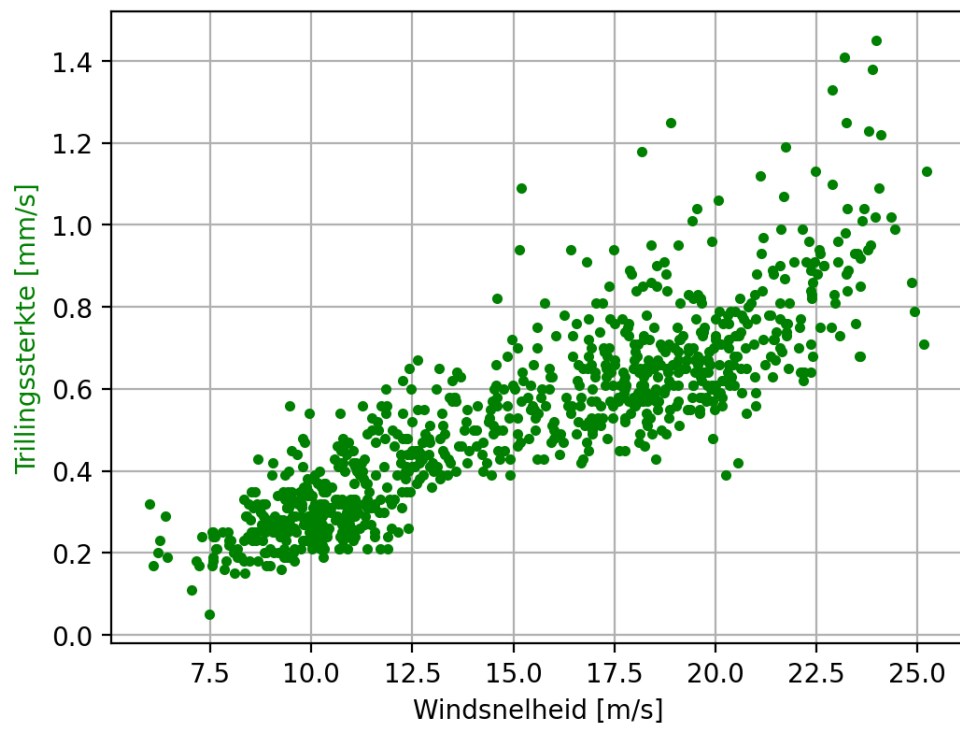
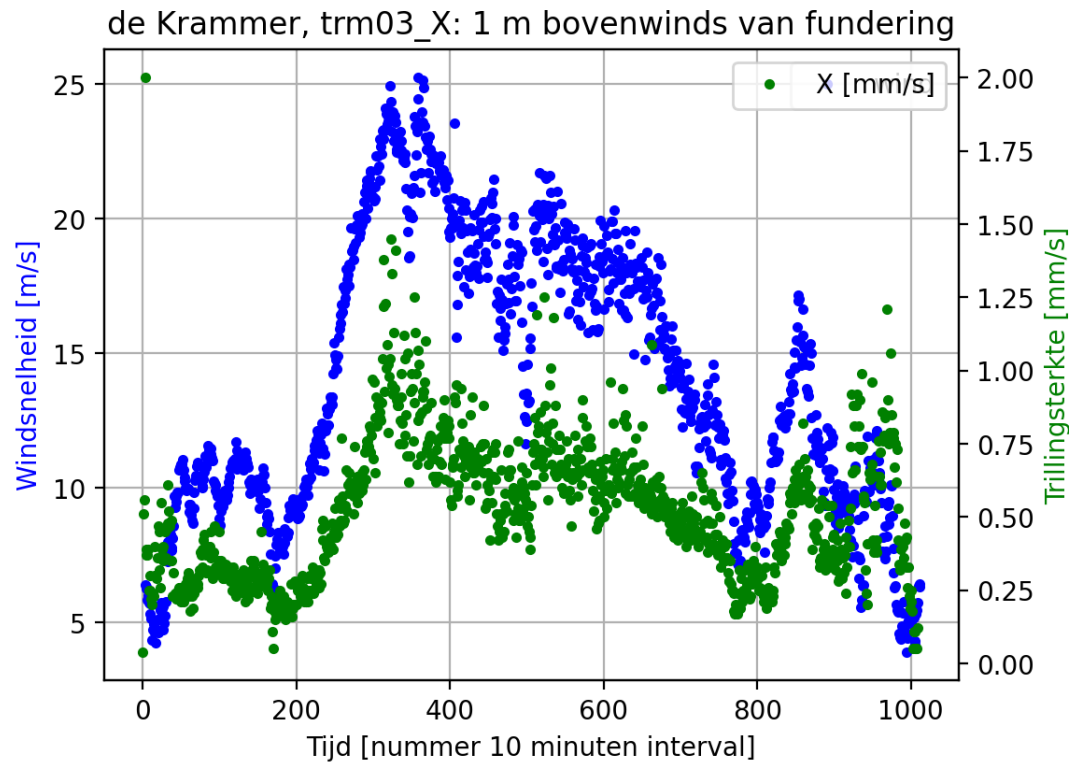


G.3 Opnemer 2

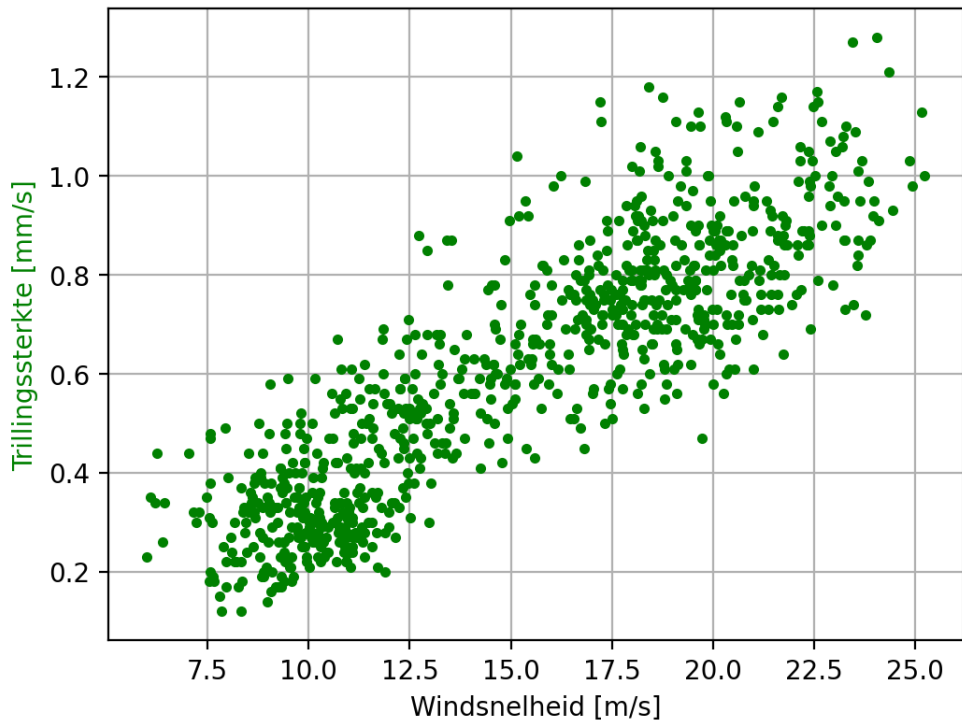
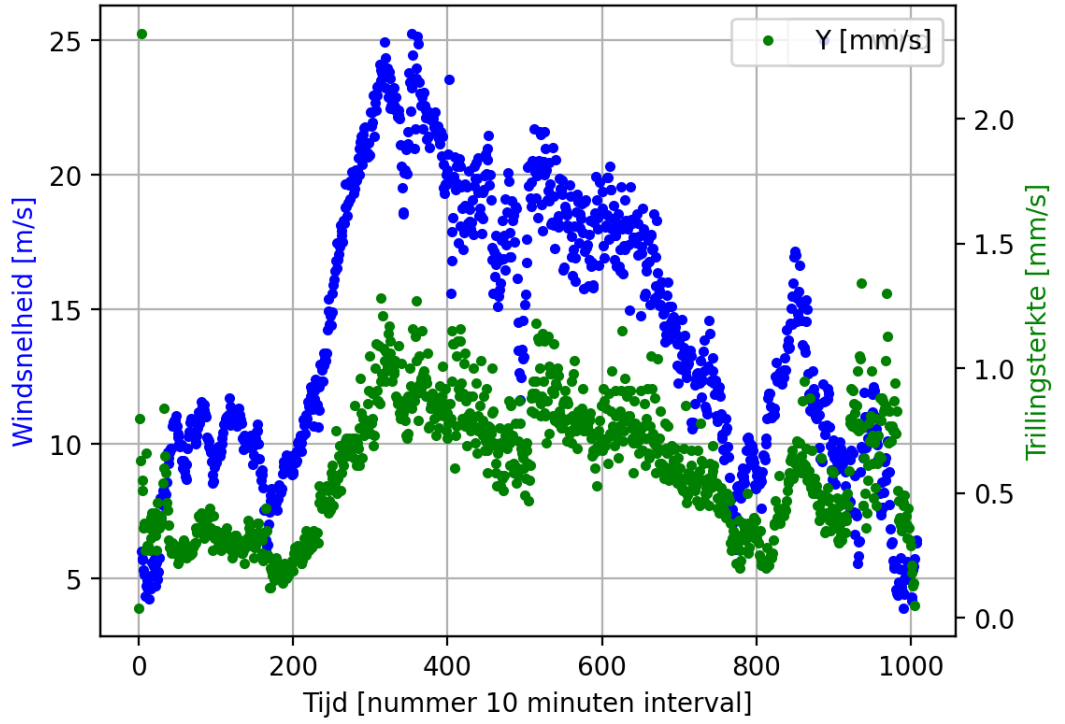
Er is geen onderscheid te maken tussen de trillingsrichtingen.



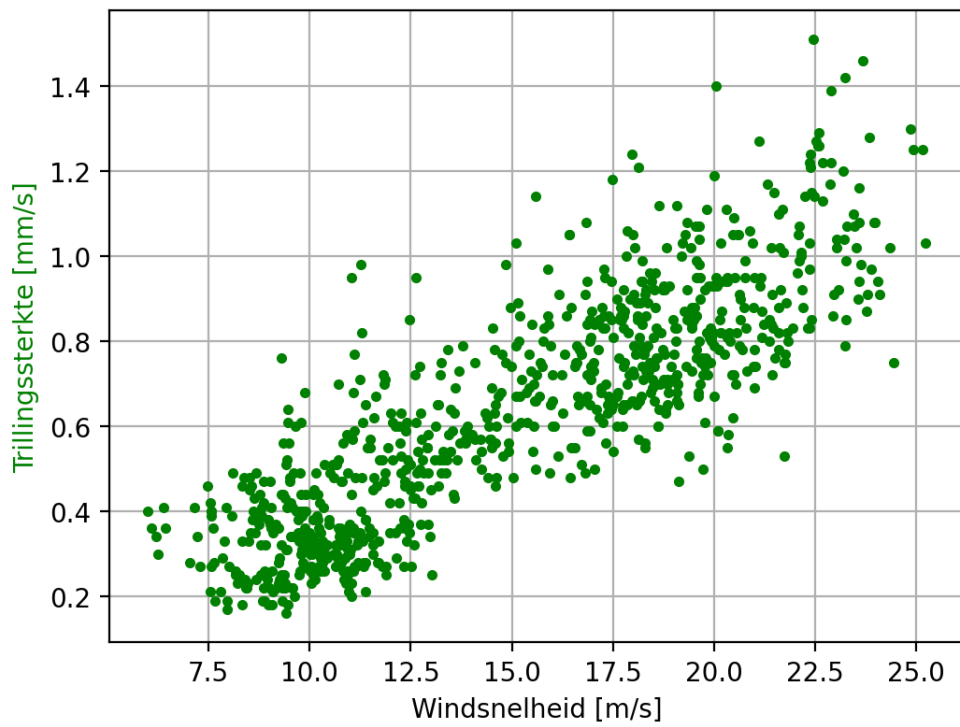
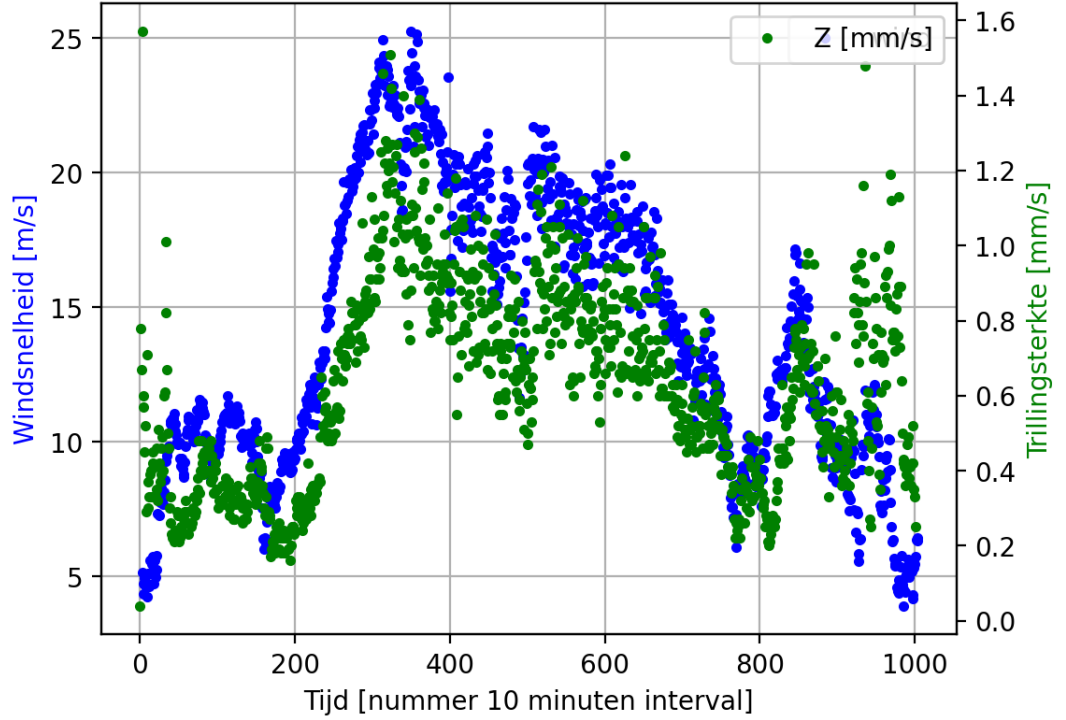
G.4 Opnemer 3

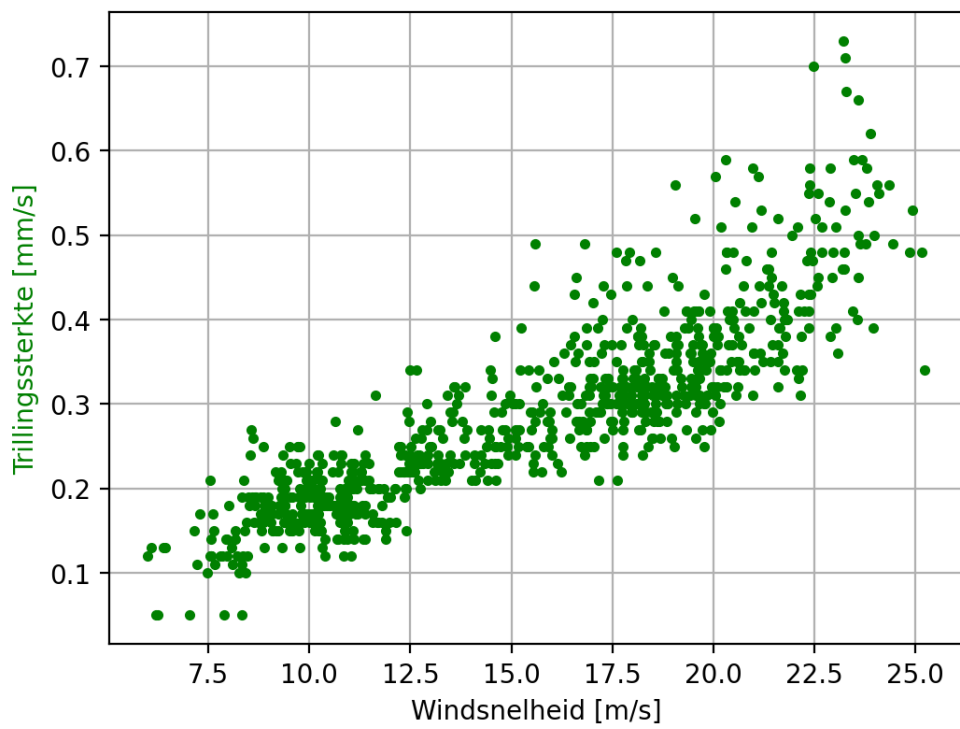
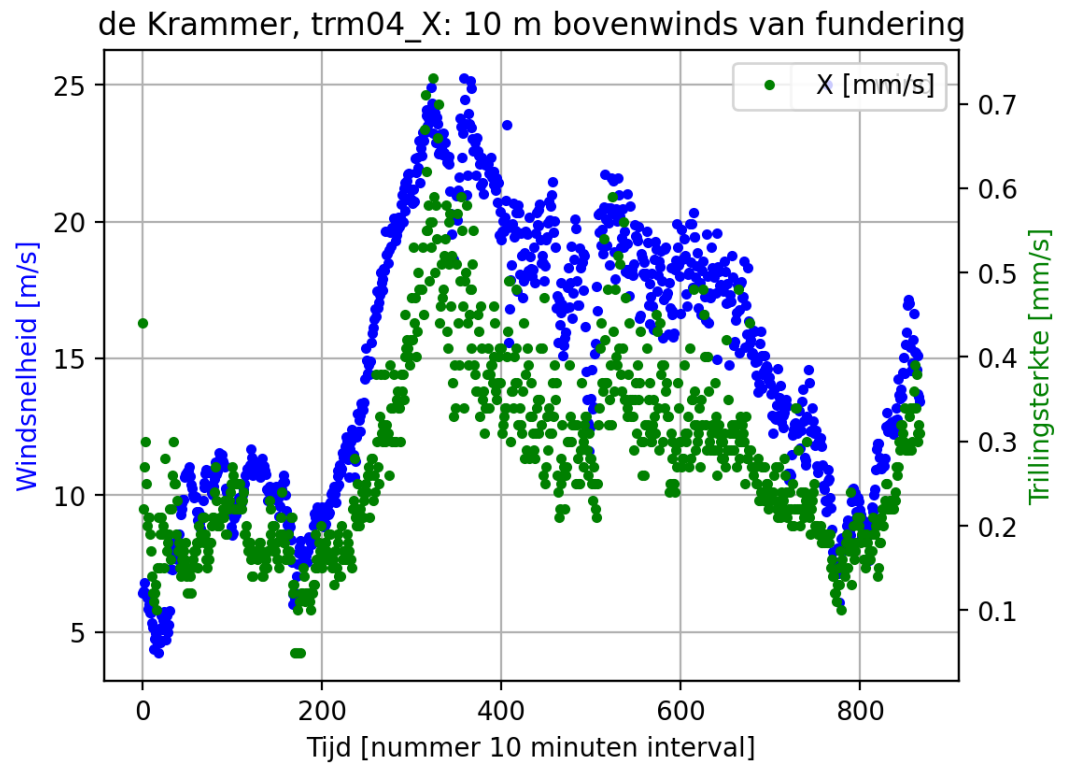


de Krammer, trm03_Y: 1 m bovenwinds van fundering

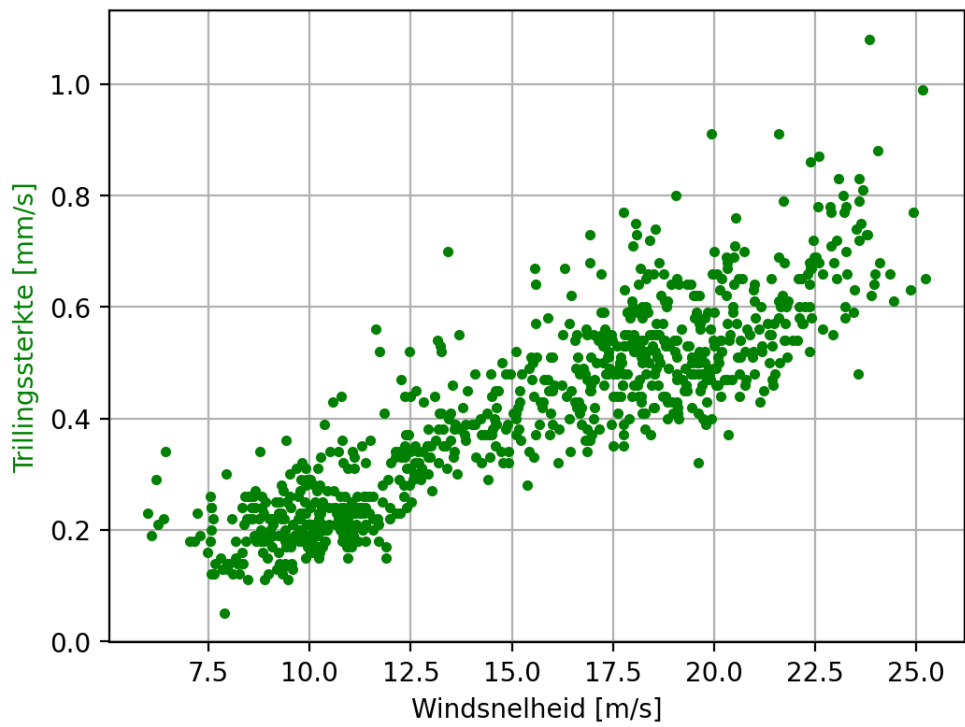
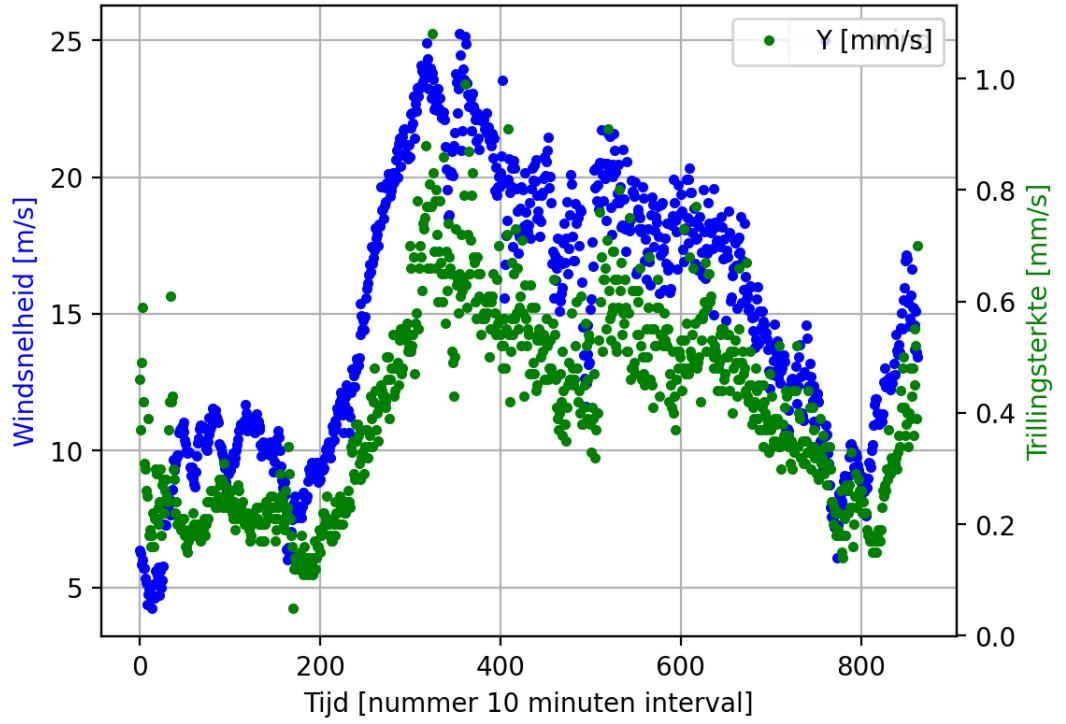


de Krammer, trm03_Z: 1 m bovenwinds van fundering

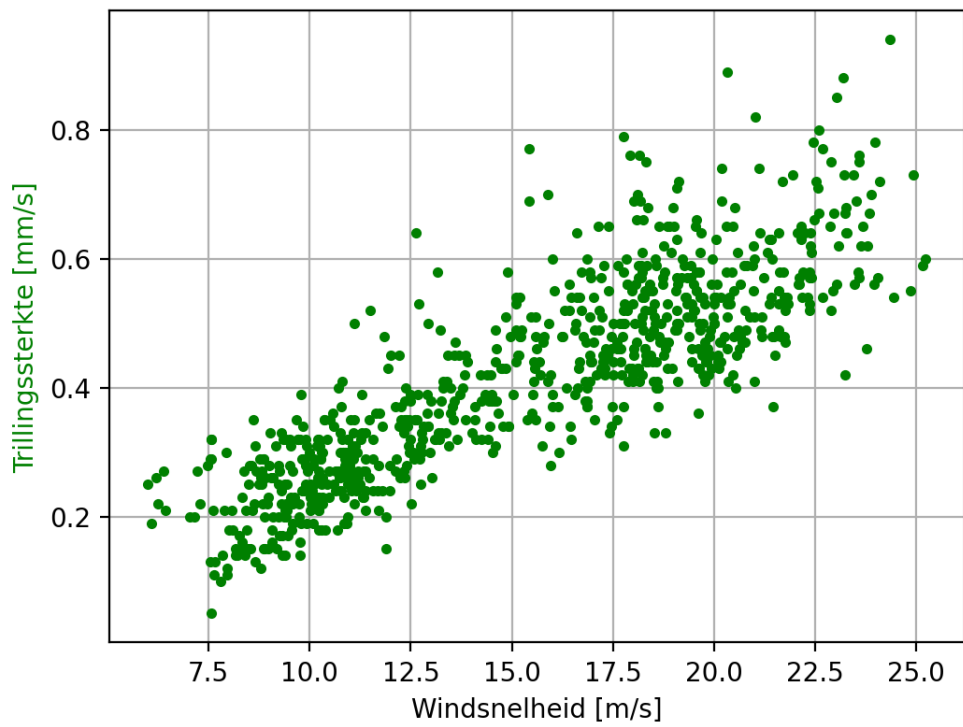
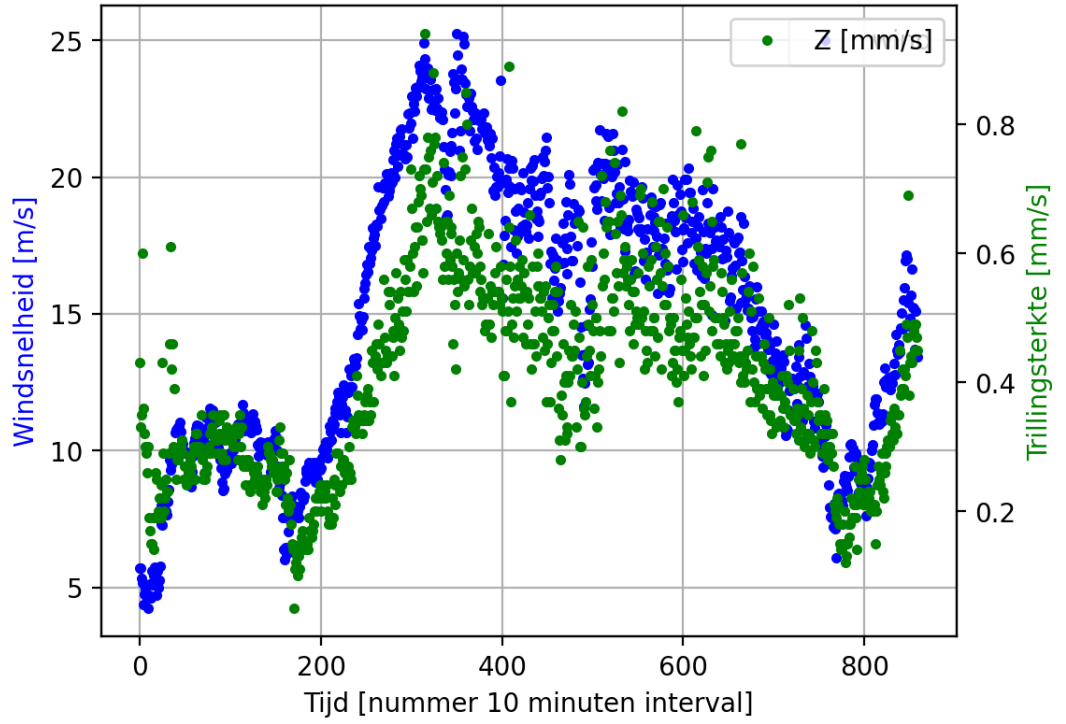




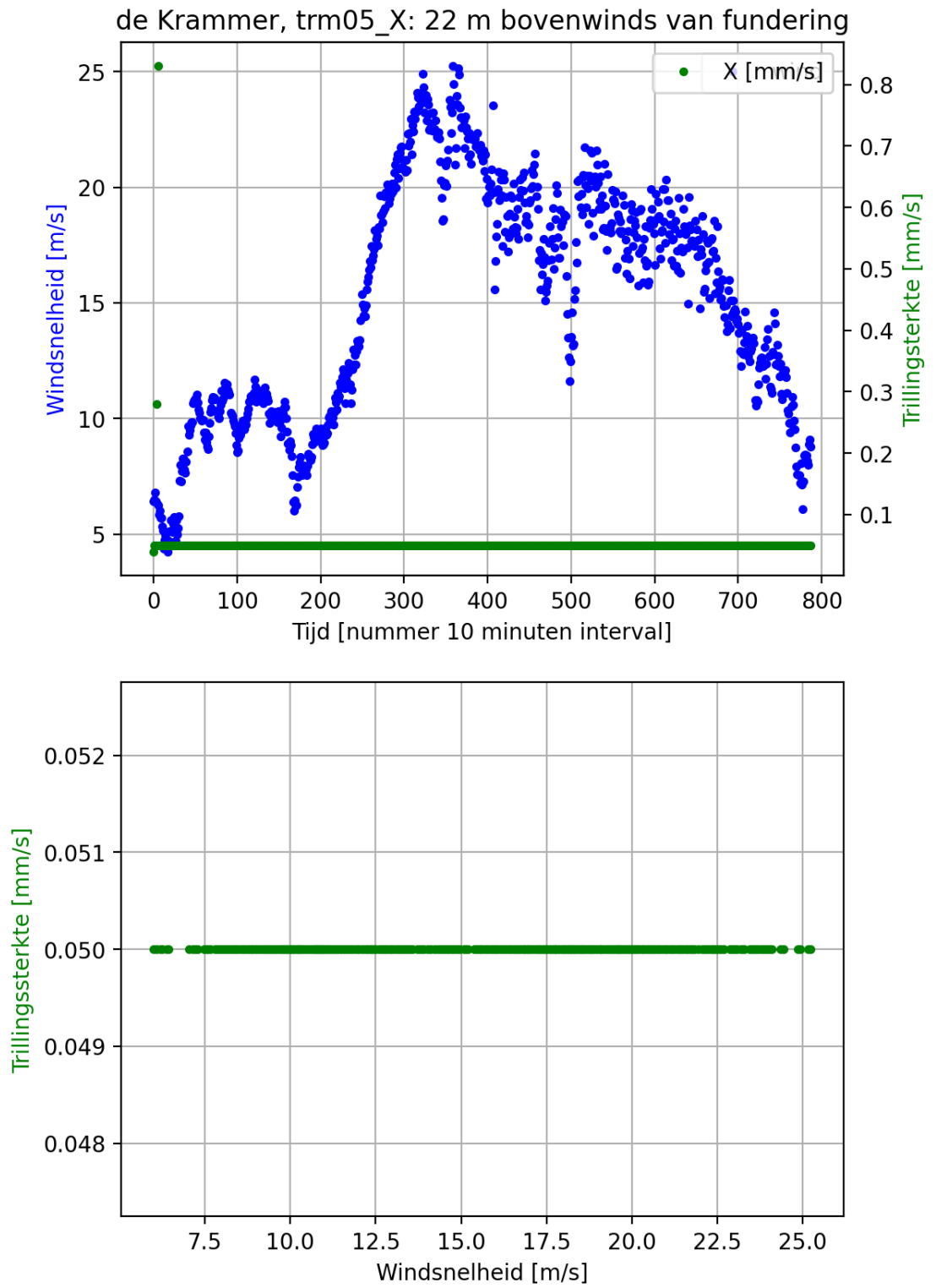
de Krammer, trm04_Y: 10 m bovenwinds van fundering



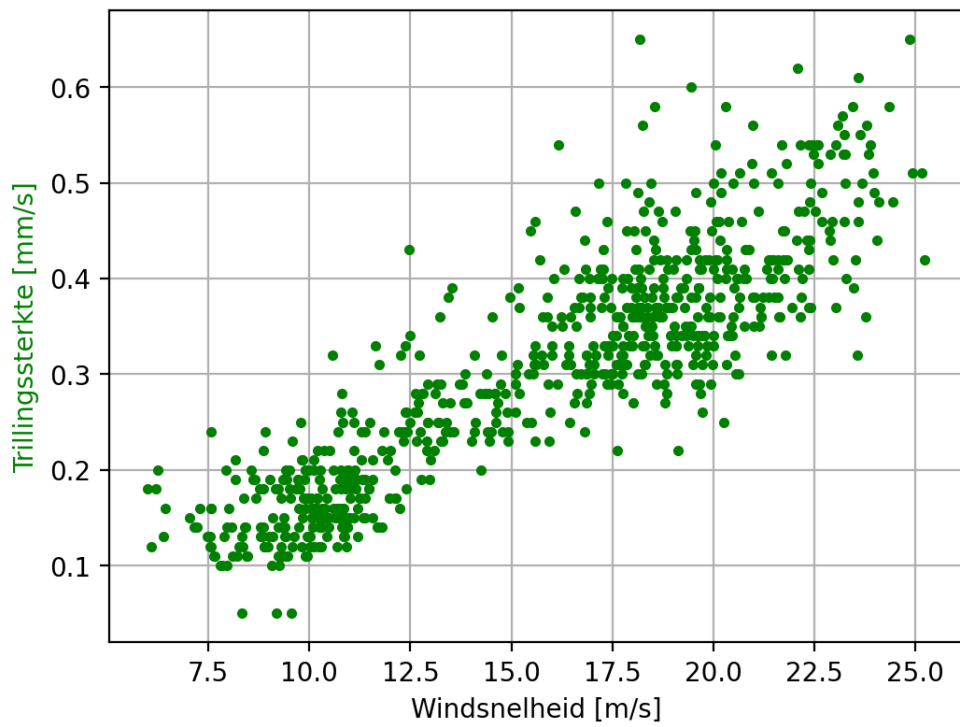
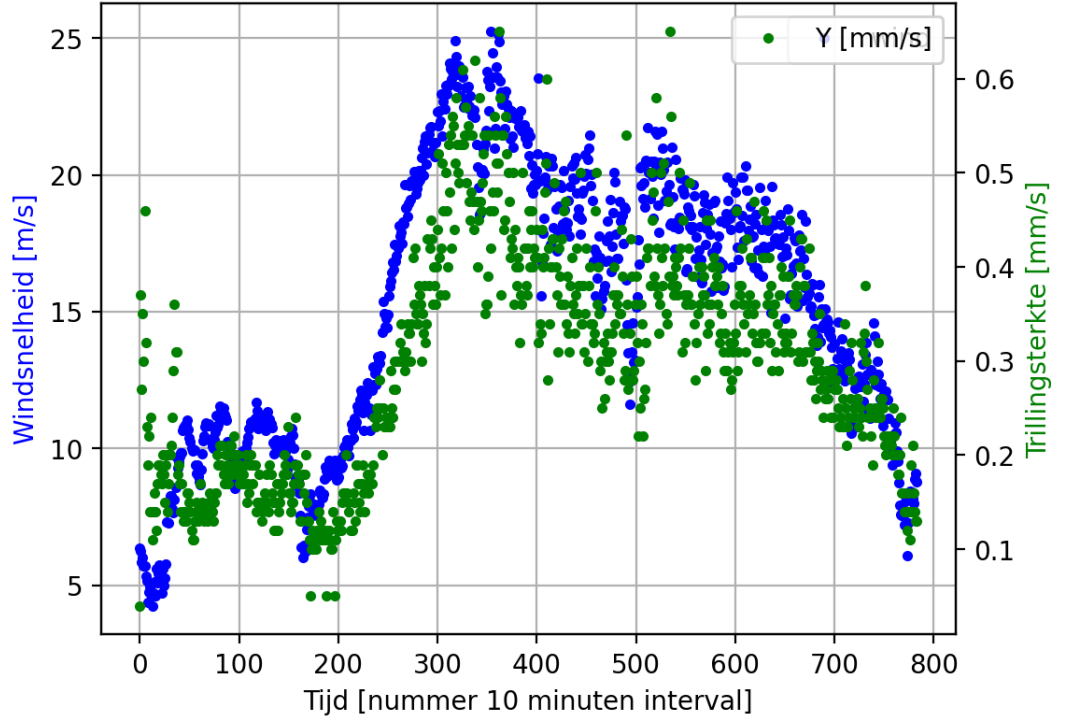
de Krammer, trm04_Z: 10 m bovenwinds van fundering



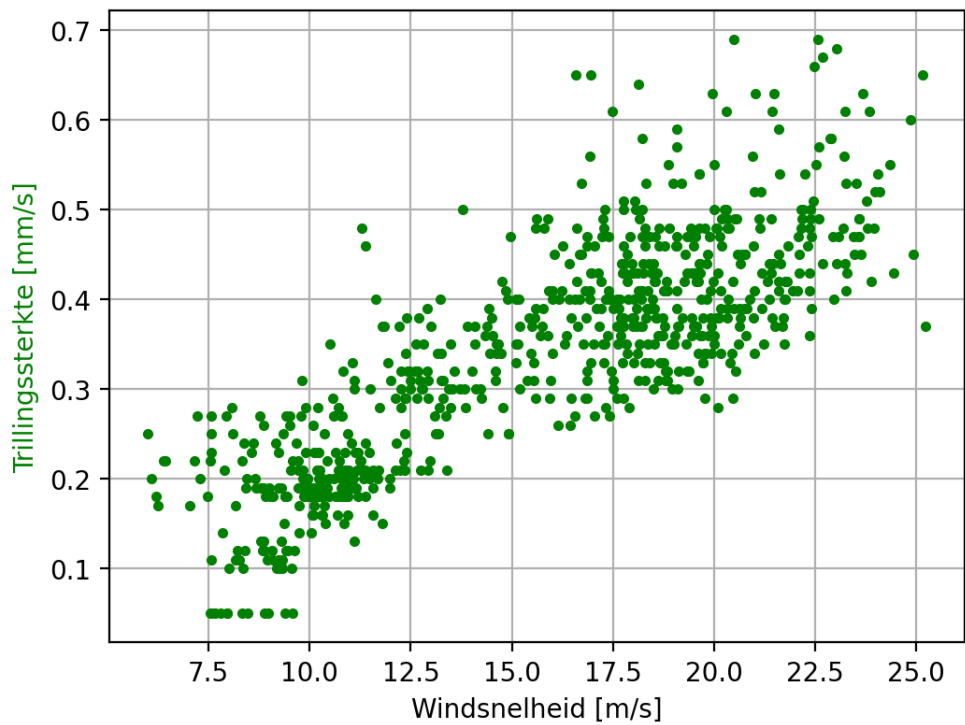
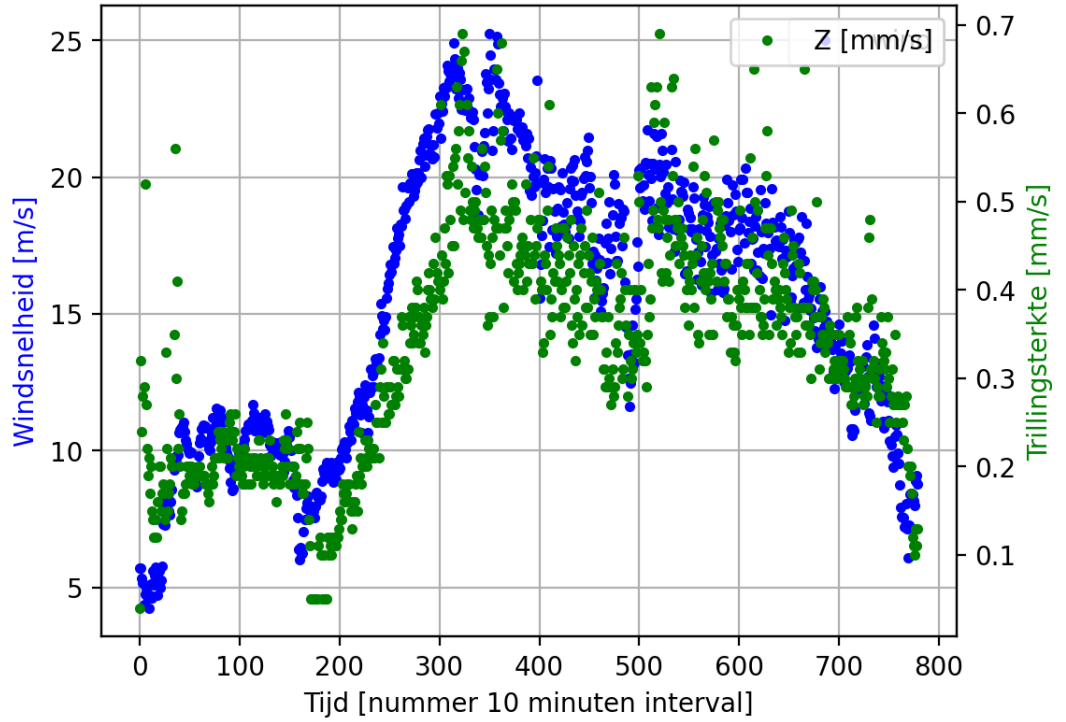
G.6 Opnemer 5



de Krammer, trm05_Y: 22 m bovenwinds van fundering



de Krammer, trm05_Z: 22 m bovenwinds van fundering



H Resultaat Trillingsmeting Westermeerdijk

H.1 Verwerking van de metingen.

De verwerking van de metingen is beschreven in rapport 0. Voor één week in maart zijn grafieken gemaakt voor de trillingssnelheid als functie van de windsnelheid, vergelijkbare met de (onderste grafieken) van de figuren in Bijlage G. Deze week is gekozen omdat op dat moment een hoge windsnelheid is opgetreden.

De windsnelheid is ontleend aan de metingen van het KNMI in station Houtribdijk (stationnummer 258) 0. Dit station ligt op enige afstand van de windturbine. Omdat deze gegevens per uur beschikbaar zijn, worden de resultaten per uur weergegeven.

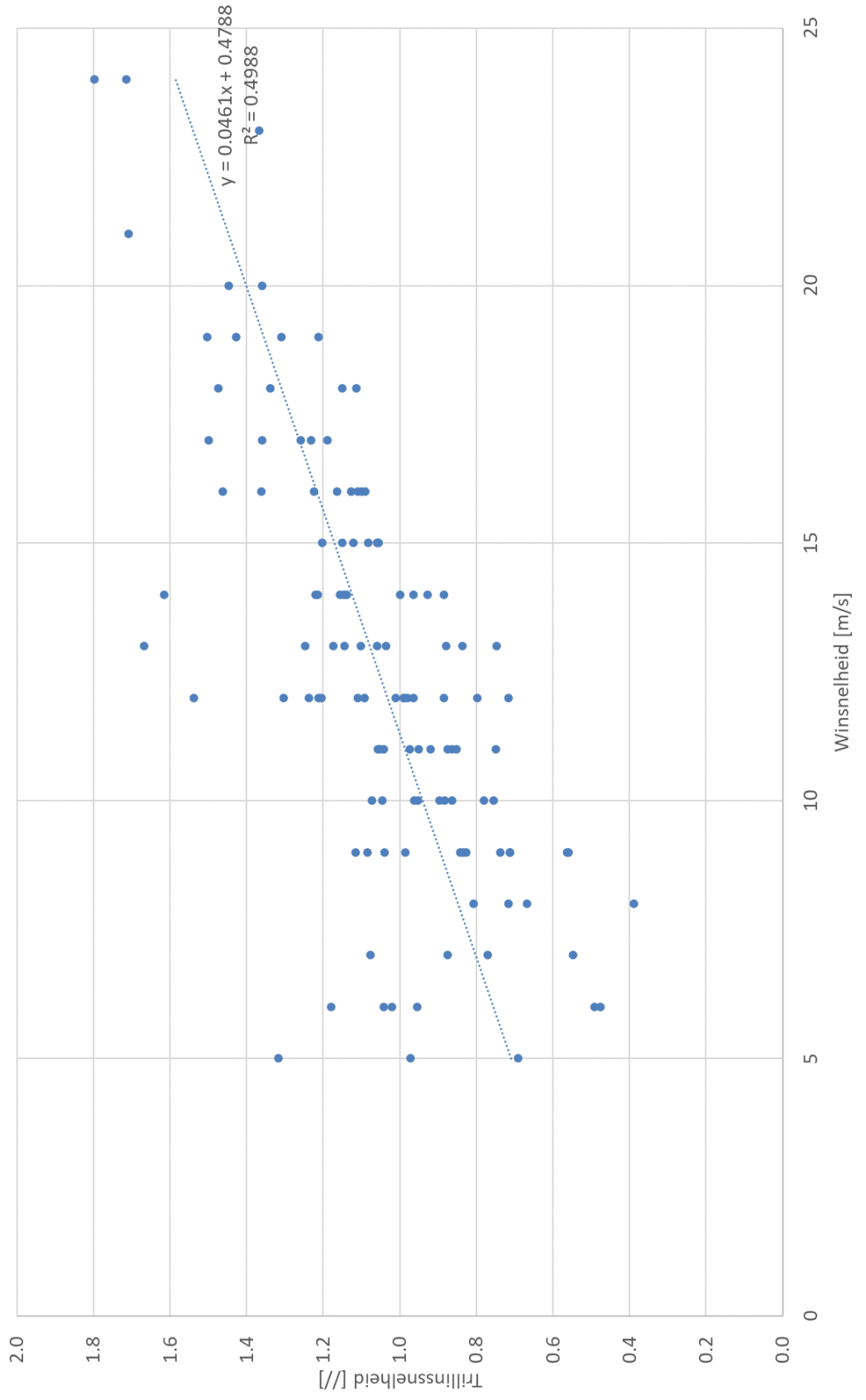
H.2 Resultaten

Deze bijlage toont de resultaten voor de fundering trillingen op de fundering. De positie van de meetpunten is zichtbaar in Figuur 3.4. Boven elke figuur staat het kanaal dat wordt weergegeven. De plaats en meetrichting van elk kanaal staat toegelicht in Tabel H.1.

Tabel H.1 Definitie meetpunten in deze bijlage

Opnemer ID	Punt	Plaats	Richting
P05Fvrt	05	voorzijde fundering	verticaal
P05F240	05	voorzijde fundering	evenwijdig windrichting
P05F150	05	voorzijde fundering	loodrecht windrichting
P06Fvrt	06	achterzijde fundering	verticaal
P06F330	06	achterzijde fundering	loodrecht windrichting
P07Fvrt	07	zijkant (onder 60°)	verticaal

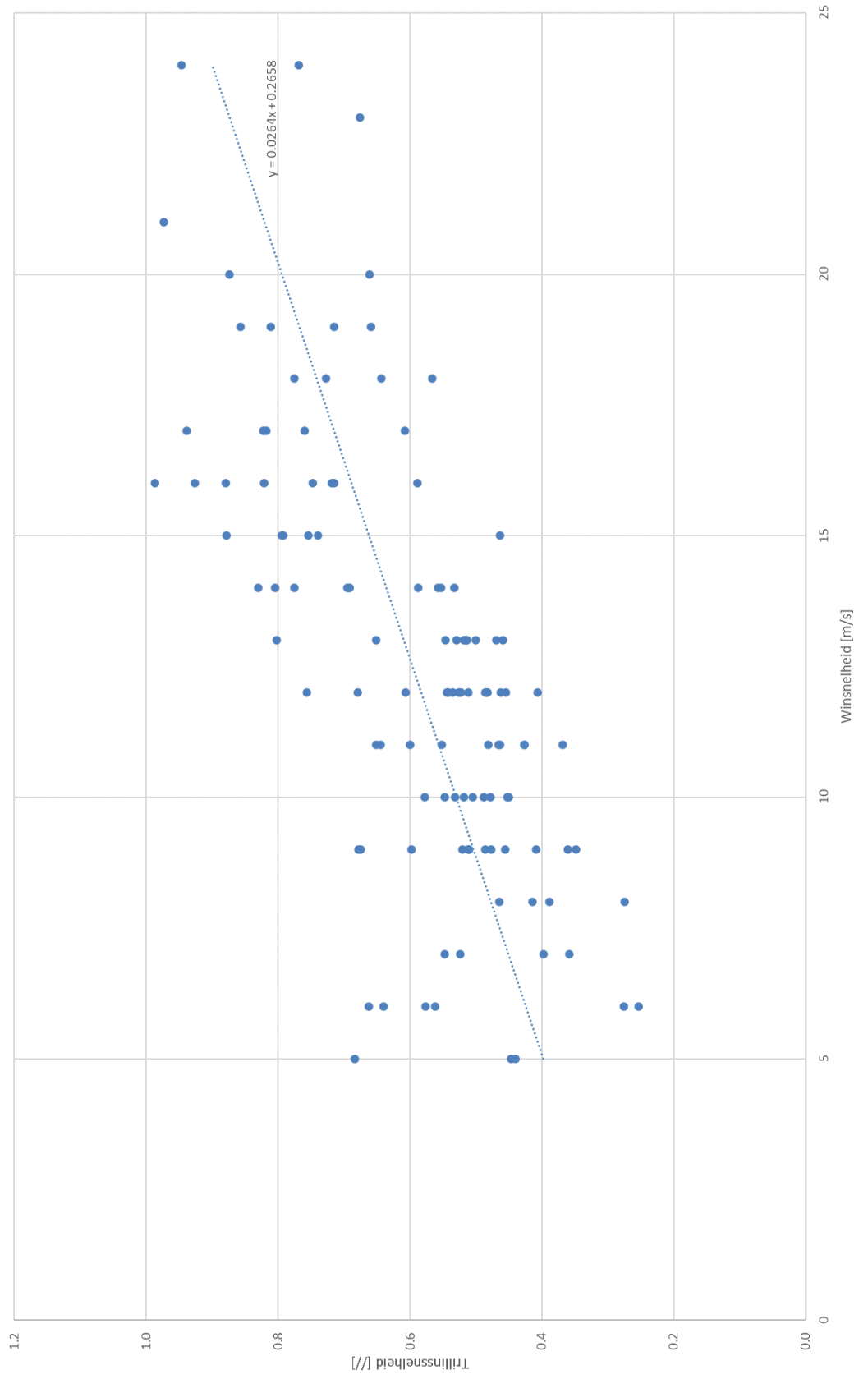
P05Fvrt

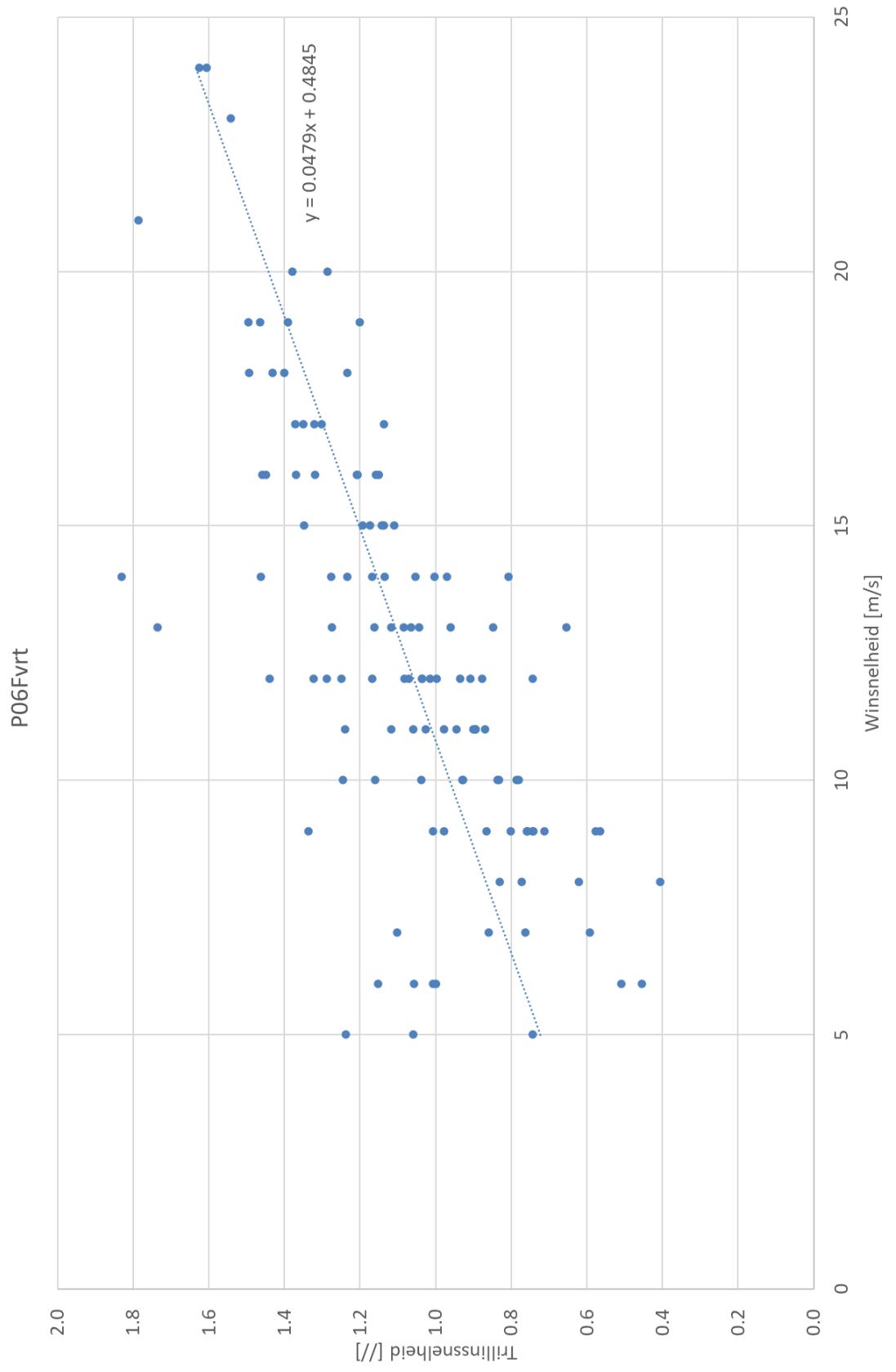


P05F240



P05F150





P06F330



P07Fvrt



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl