Rode draden

Van	Adviesteam Dijkontwerp
Datum	29-11-2024
Versie	RD11-1
Onderwerp	Rode draad # 11: Windturbines op of nabij primaire waterkeringen

Inhoud

1. Inleiding 2

2. Afbakening van deze Rode draad 2

3. Verificatiemethodes 4
   - 3.1 Van grof naar fijn 4
   - 3.2 Overzicht van mogelijke beoordelingsmethodes 4
   - 3.3 Optie A1: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in overstromingskans 5
   - 3.4 Optie A2: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in faalkans per direct mechanisme en beoordeling per direct faalmechanisme 8
   - 3.5 Optie A3: Kans op optreden faalmechanisme en bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen 9
   - 3.6 Optie A4: Kans op schade door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen 11
   - 3.7 Optie B: Kans op overstroming geïnitieerd door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de norm 11

4. Aandachtspunten bij beoordelingen van windturbines 13

5. Referenties 15

Het Adviesteam Dijkontwerp geeft onafhankelijk technisch-inhoudelijk advies aan de alliantie Hoogwaterbescherming over de toepassing van de waterveiligheidsbenadering en de nieuwe kennis die hiermee samenhangt. Meer informatie over de adviezen van het Adviesteam Dijkontwerp vind je op de website www.adviesteamdijkontwerp.nl onder Werkwijze.

1. Inleiding

Het Adviesteam Dijkontwerp analyseert regelmatig de adviezen die het aan projecten geeft rondom het toepassen van overstromingskansbenadering en nieuwe kennis. De Rode draden die hieruit volgen worden gerapporteerd en besproken met stakeholders, waarna ze breed worden gedeeld met geïnteresseerde dijkwerkers. Het voorliggende memo is de elfde Rode draden-rapportage van het Adviesteam. In dit memo wordt ingegaan op de omgang met windturbines op of nabij waterkeringen binnen de context van de overstromingskansbenadering.

Dit memo is een update van het algemene adviesmemo (factsheet) uit 2018 van het Kennisplatform Risicobenadering (KPR), de voorganger van het Adviesteam Dijkontwerp, over windturbines op of nabij waterkeringen [1]. De betreffende factsheet wordt aangehaald in de STOWA-handreiking Windturbines en Waterkeringen [2] en wordt in de praktijk vaak gebruikt. Door het Kennisnetwerk Windturbines en Waterkeringen (KWW) van STOWA en RWS wordt de handreiking geupdate. Tegen die achtergrond is het Adviesteam Dijkontwerp door het KWW gevraagd om de KPR-factsheet te actualiseren. Afgesproken is om dit te doen in de vorm van een Rode draden-rapportage, zodat de inhoud breed gedeeld kan worden.

Op inhoudelijk vlak bleken er geen aanpassingen nodig in de oorspronkelijke KPR-factsheet. Wel zijn er redactionele aanpassingen gedaan, zodat de lezer eenvoudiger de relatie kan leggen met de huidige beoordelings- en ontwerppraktijk.

Deze Rode draad is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 wordt eerst in algemene zin ingegaan op de omgang met de plaatsing van windturbines op of nabij waterkeringen.
- In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op beoordelingsmethodes voor windturbines op of nabij windturbines, inclusief hun voor- en nadelen.
- In hoofdstuk 4 wordt ten slotte ingegaan op enkele aandachtspunten bij het bepalen van de faalkans of overstromingskansbijdrage van een windturbine.

Een woord vooraf over de gebruikte terminologie: wanneer in deze Rode draad wordt gesproken over (de kans op) het bezwijken van een windturbine gaat het over (de gecombineerde kans op) mastbreuk *of* gondelval *of* bladworp *of* funderingsfalen. Dit zijn de vier vormen waarop een windturbine kan bezwijken met potentiële gevolgen voor de waterveiligheid.

Reacties en feedback op deze Rode draden-rapportage zijn van harte welkom. Uiteraard zijn wij ook bereikbaar voor nadere toelichting en ondersteuning bij projecten. U kunt ons bereiken via info@adviesteamdijkontwerp.nl.

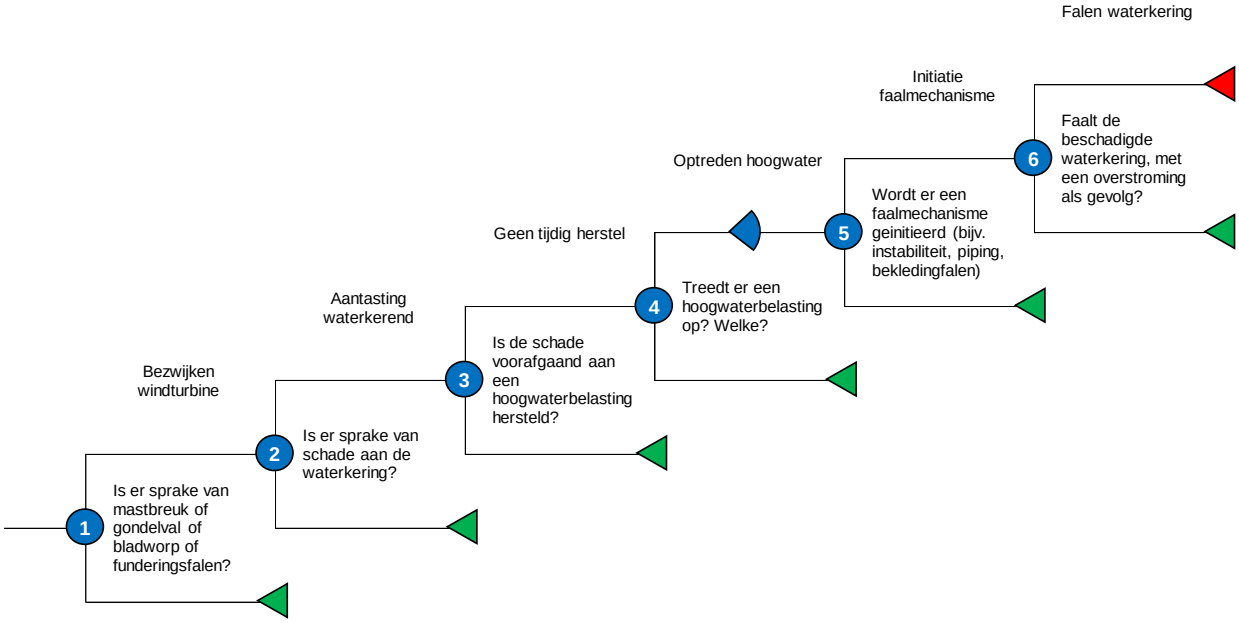
2. Afbakening van deze Rode draad

Als (een onderdeel van) een windturbine op een waterkering valt, dan kan dat schade berokkenen aan de waterkering. Als dit gebeurt tijdens hoogwater of als zich voorafgaand aan (al dan niet provisorisch) herstel een hoogwater voordoet, dan kan dit leiden tot een overstroming.

Andere aspecten die mogelijk van belang zijn voor de waterveiligheid, zijn de door een windturbine opgewekte trillingen in de ondergrond en de overgang tussen de fundering van een windturbine op de grasmat. Deze aspecten zijn wel van belang, maar komen in deze notitie verder niet aan bod. Zwakke plekken bij overgangen zijn te voorkomen door de overgangen zorgvuldig te detailleren. Trillingen zijn vermoedelijk van ondergeschikt belang, tenzij een windturbine op of zeer dicht bij een waterkering wordt geplaatst. In dat geval kunnen trillingen van invloed zijn op de faalmechanismen macrostabiliteit en zettingsvloeiing.

Als de sterkte van de waterkering door de plaatsing van een windturbine verandert, bijvoorbeeld ter plaatse van een overgang, dan kan de waterkering op de bewuste locatie worden beoordeeld zoals een willekeurige andere dijkdoorsnede door de schematisatie van de waterkering af te stemmen op de nieuwe situatie. De modellering van de fysica is wellicht lastig, maar qua inpassing in de overstromingskansbenadering is de situatie niet anders dan anders.

Het wordt lastiger als het gaat over de kans dat de waterkering schade zal oplopen door het bezwijken van een windturbine. In dat geval kan het voor een beoordeling van de waterveiligheid nodig zijn om de aaneenschakeling van gebeurtenissen na het bezwijken van de windturbine tot het optreden van een overstroming (=faalpad) te beschouwen. Een voorbeeld van een faalpad op hoofdlijnen is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1. Faalpad op hoofdlijnen voor het optreden van een overstroming ten gevolge van het bezwijken van een windturbine. De groene driehoekjes betekenen dat de genoemde gebeurtenis niet optreedt, de rode driehoek rechts bovenin betekent 'overstroming'. De waaier tussen knopen 4 en 5 duidt erop dat de kansen op de gebeurtenissen die volgen afhankelijk zijn van de precieze hoogwaterbelasting.

In dit memo staat de vraag centraal of de overstromingskansbijdrage van het bezwijken van (onderdelen van) windturbines voldoende klein is vanuit het oogpunt van de overstromingskansnormen. Iets wat is toegestaan, is echter niet zondermeer verstandig. Soms zijn risico's zonder of tegen een relatief beperkte

inspanning sterk te verkleinen. Het zou dan zonde zijn om dat na te laten. Voorbeelden van praktische maatregelen om de risico's van windturbines zoveel mogelijk te beperken zijn:

1. beperkingen opleggen ten aanzien van de locatiekeuze:
    a. plaatsing buiten de invloedszone van de waterkering,
    b. plaatsing aan de lijzijde van de waterkering,
    c. plaatsing bij minder kwetsbare locaties,
2. beperkingen opleggen ten aanzien de keuze van het type windturbine (hoogte, gewicht), en
3. aanvullende bouwkundige eisen stellen aan de constructieve elementen van een windturbine.

Dergelijke maatregelen zijn het meest kansrijk als zij vroeg in de planvorming ter sprake komen. Dat vereist dat de beoordeling op grond van de waterveiligheidsnorm geen sluitstuk is in het planproces. **Daarom wordt aanbevolen de potentiële effecten van een windturbine op een waterkering al vroeg in het planproces te beschouwen**.

3. Verificatiemethodes

3.1 Van grof naar fijn

In de Omgevingswet (voorheen in de Waterwet) zijn voor elk dijktraject maximaal toelaatbare overstromingskansen of maximaal toelaatbare faalkansen vastgelegd. Voor zover windturbines van invloed zijn op de overstromings- of faalkans van een dijktraject dienen zij te worden meegenomen in betrouwbaarheidsanalyses voor waterkeringen. Dit kan op verschillende manieren worden gedaan, van grof naar fijn. Een betrouwbaarheidsanalyse hoeft lang niet altijd een diepgaande, complexe probabilistische berekening te omvatten.

De complexiteit van een betrouwbaarheidsanalyse moet worden afgestemd op het detailniveau van de informatie die voor besluitvorming benodigd is. Als op grond van een grove beoordeling direct duidelijk is dat de bijdrage van een windturbine aan de overstromingskans verwaarloosbaar klein is dan is een complexe probabilistische berekening onnodig.

3.2 Overzicht van mogelijke beoordelingsmethodes

De kans op het bezwijken van een windturbine kan op verschillende manieren worden gerelateerd aan een maximaal toelaatbare overstromingskans[1]. Deze opties worden in paragrafen 3.3 t/m 3.7 nader toegelicht:

A. Als het bezwijken van een windturbine wordt beschouwd als een **indirect** faalmechanisme:

[1] Bij het beoordelen in LBO2 is het werken met een faalkansbegroting losgelaten. De werkwijzen waarin wordt gewerkt met faalkansbegroting zijn echter nog altijd prima toepasbaar als basis voor de beoordeling van vergunningsaanvragen. Bij het ontwerpen blijft het gebruik van een faalkansbegroting ook als handige werkwijze in gebruik. De beheerder moet dan zelf een passende faalkansbegroting opstellen. De standaard faalkansbegroting is hierbij een prima vertrekpunt.

1. De kans op overstroming moet kleiner zijn dan de norm, rekening houdend met de kans op het bezwijken van de windturbine bij de bepaling van de faalkansbijdragen van de directe faalmechanismen.
2. De kans op overstroming door een direct faalmechanisme moet kleiner zijn dan de faalkanseis voor het betreffende mechanisme, rekening houdend met de kans op het bezwijken van de windturbine.
3. De kans op overstroming door een direct faalmechanisme *en* het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan x% van faalkanseis voor het betreffende mechanisme.
4. De kans op schade aan de dijk door het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan x% van strengste faalkanseis voor de directe faalmechanismen waarop het bezwijken van de windturbine van invloed is.

B. Als het bezwijken van een windturbine wordt beschouwd als een **direct** faalmechanisme:
De kans op een overstroming door het bezwijken van de windturbine moet kleiner zijn dan x% van de norm.

Als het streven is dat windturbines slechts een verwaarloosbare bijdrage aan de overstromingskans van een dijktraject mogen leveren, dan wordt aanbevolen om uit te gaan van x=1%. In dat geval is namelijk zondermeer sprake van een verwaarloosbare bijdrage. Bij de relatief conservatieve beoordelingsmethode A4 zou eventueel ook van een groter percentage uitgegaan kunnen worden. In de rekenvoorbeelden die volgen wordt gemakshalve consequent uitgegaan van x=1%.

In de Bijlage XXXIIb bij artikel 12.2c van de Omgevingsregeling (randvoorwaarden beoordeling primaire keringen) is een lijst directe mechanismen opgenomen. Het optreden van een overstroming door het bezwijken van een windturbine (optie B) staat niet op deze lijst. Wel is aangegeven dat het mogelijk is om een indirect mechanisme als specifiek/direct faalmechanisme te definiëren als dit voldoende wordt onderbouwd. Deze onderbouwing (horend bij optie B) wordt hieronder gegeven:

Een groot voordeel van de behandeling van het bezwijken van een windturbine als een direct mechanisme (optie B) is dat alle gebeurtenissen die kunnen volgen op het bezwijken van een windturbine in één keer en in onderling verband worden bekeken. Dit houdt de beoordeling overzichtelijk en verkleint de kans op fouten. Zeker als het bezwijken van windturbines op verschillende (directe) faalmechanismen van invloed is, is dit een belangrijk voordeel.

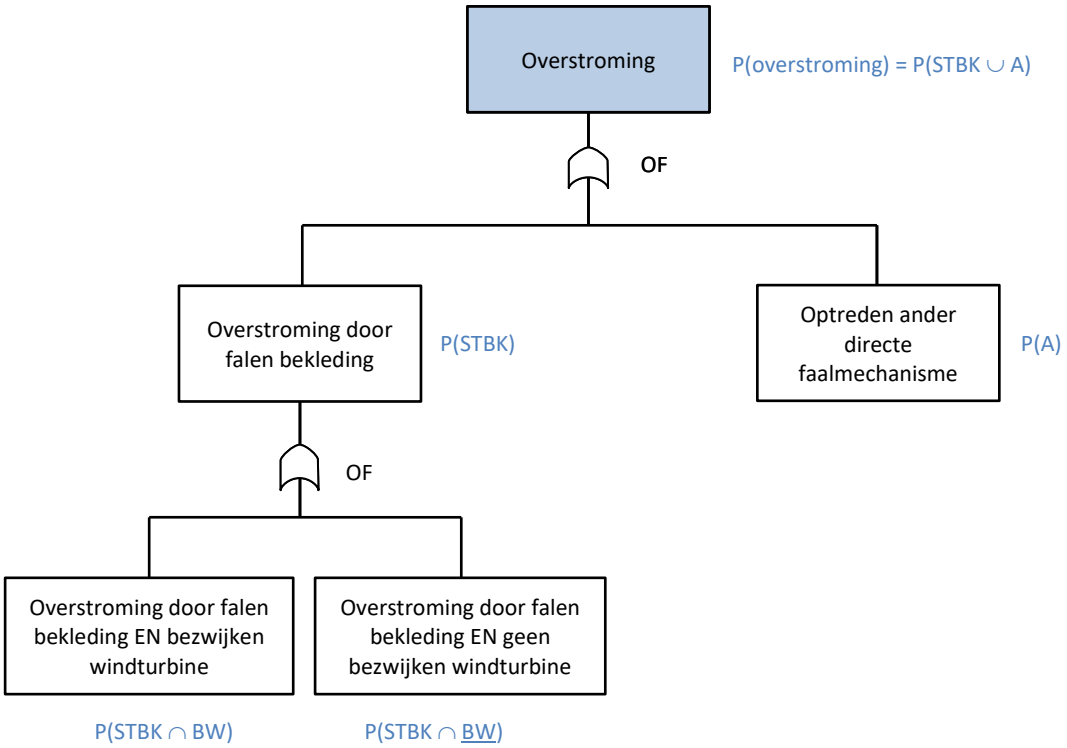
Het is dan ook niet verwonderlijk dat optie B in de praktijk het vaakst wordt toegepast. **Het Adviesteam beveelt aan om optie B te hanteren.**

3.3 Optie A1: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in overstromingskans

De kans op schade aan een dijktraject door het bezwijken van een windturbine kan in theorie via scenario's en scenariokansen worden verwerkt in de kans op een overstroming. De kans op een overstroming kan vervolgens worden vergeleken met de norm. Deze werkwijze is theoretisch zuiver (exact, geen benadering) maar relatief bewerkelijk en met de nu beschikbare instrumenten niet uitvoerbaar. Deze paragraaf dient dan ook vooral voor begripsvorming.

De wijze waarop de betrouwbaarheid van windturbines kan worden verdisconteerd in de overstromingskans van een dijktraject is schematisch weergegeven in de foutenboom in Figuur 2 (met de foutenboom in Figuur 6 uit paragraaf 3.7 zou dit in principe ook kunnen). In de foutenboom zijn alle directe faalmechanismen behalve het falen van de bekleding gemakshalve samengenomen als 'andere directe faalmechanismen'. Aangenomen is dat het bezwijken van een windturbine alleen kan leiden tot schade aan de bekleding.

De kans op een overstroming door het falen van de bekleding valt uiteen in (1) de kans op een overstroming door het falen van de bekleding en het bezwijken van de windturbine plus (2) de kans op een overstroming door het falen van de bekleding en het niet bezwijken van de windturbine.



Figuur 2. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld als de kans op het bezwijken van een windturbine wordt verdisconteerd in de overstromingskans (optie A1).

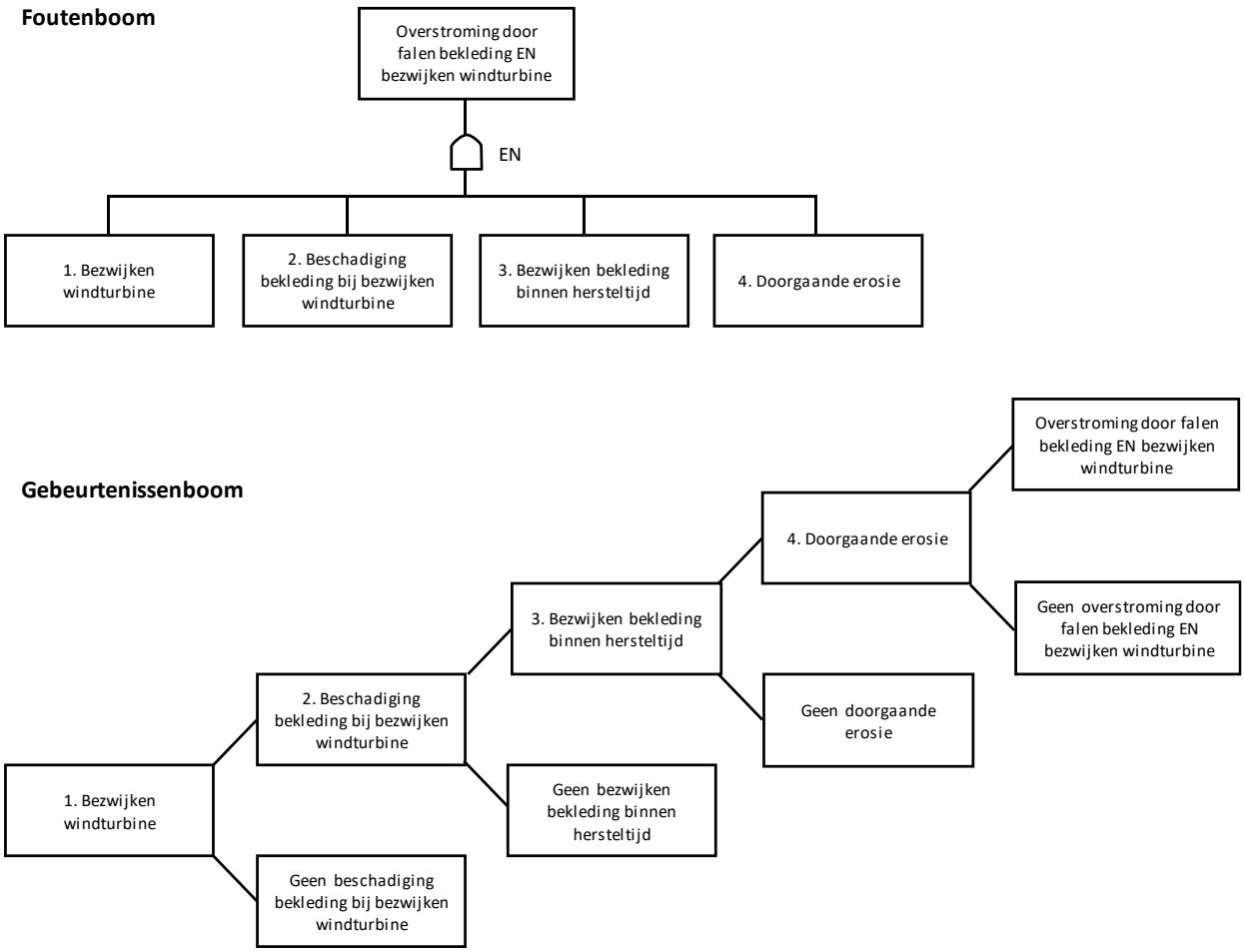
De symbolen (in het blauw) in Figuur 2 *hebben de volgende betekenis:*

P(.)	de kans op een bepaalde gebeurtenis
STBK	het optreden van een overstroming door het falen van de bekleding
BW	het bezwijken van een windturbine
BW	het niet-bezwijken van een windturbine
A	overstroming door een ander direct faalmechanisme dan het falen van de bekleding
∩	'en'-poort. Zo is P(STBK ∩ BW) de kans op een overstroming door het bezwijken van de bekleding en een bezweken windturbine.
∪	'of'-poort. Zo is P(STBK ∪ A) de kans op een overstroming door het bezwijken van de bekleding of een ander direct faalmechanisme. Dit is kans op een overstroming.

Uiteraard kan de foutenboom in Figuur 2 nog verder worden uitgebreid/uitgeklapt. Zo kan pas sprake zijn van een overstroming door het falen van de bekleding en het bezwijken van een windturbine als:

1. de windturbine bezwijkt, en
2. de bekleding beschadigd raakt door het bezwijken van de windturbine, en
3. binnen de hersteltijd of de tijd voor provisorische maatregelen een dusdanige belasting op de bekleding optreedt dat de bekleding faalt, en
4. de dijk doorgaand erodeert zodat een overstroming optreedt.

De bovengenoemde gebeurtenissen (die eventueel ook weer verder uitgesplitst kunnen worden) zijn links onderin de foutenboom in Figuur 2 toe te voegen onder een ‘en’-poort. Ze kunnen desgewenst ook volgtijdelijk worden weergegeven in een gebeurtenissenboom met een enkel faalpad. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3. In het BOI worden de processen tot overstroming vaak weergegeven aan de hand van foutenbomen of faalpaden.



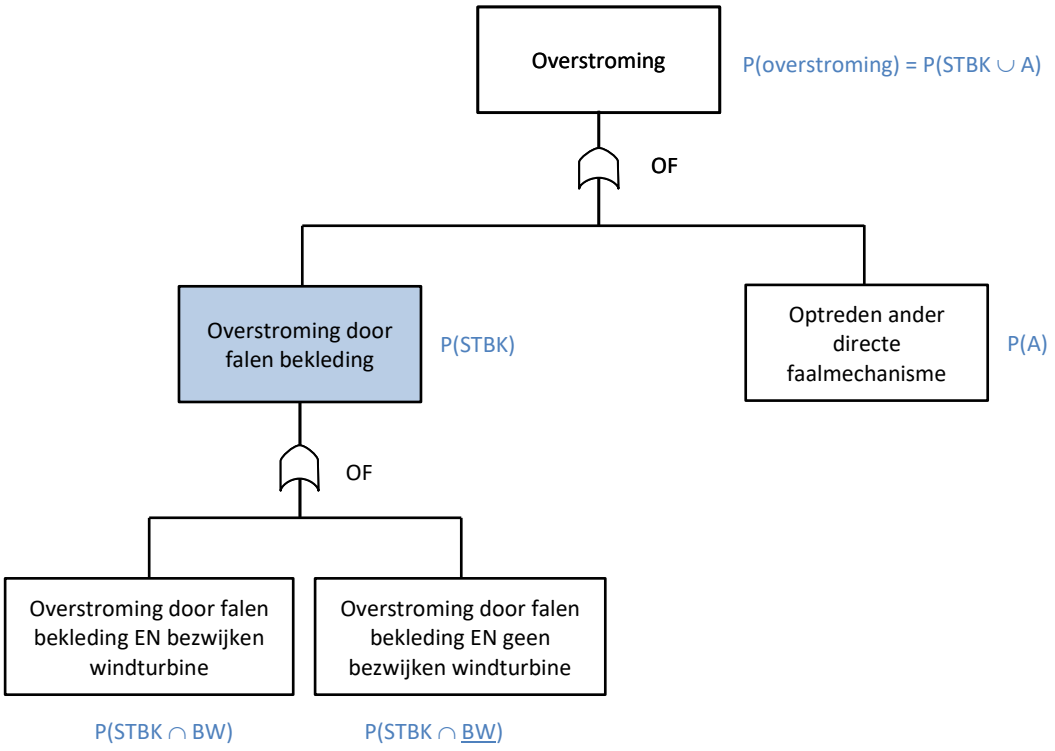
Figuur 3. Foutenboom en corresponderende gebeurtenissenboom van één van de vele mogelijke uitsplitsingen van de stappen tussen het bezwijken van een windturbine en het optreden van een overstroming door het falen van een bekleding en het bezwijken van een windturbine.

Het lengte-effect is in het bovenstaande nog niet expliciet aan bod gekomen. Alle gebeurtenissen in Figuur 2 en Figuur 3 hebben betrekking op een geheel dijktraject. De gebeurtenis ‘bezwijken windturbine’

houdt dan in dat er *ergens in het dijktraject* minimaal één windturbine bezwijkt. De kans op deze gebeurtenis wordt beïnvloed door het lengte-effect. De kans dat er ergens langs een dijktraject een windturbine bezwijkt, is immers grofweg 100x groter wanneer er 100 windturbines langs het dijktraject staan opgesteld, dan wanneer er slechts 1 windturbine staat.

3.4 Optie A2: Verdisconteren betrouwbaarheid windturbine in faalkans per direct mechanisme en beoordeling per direct faalmechanisme

De faalkans kan per faalmechanisme worden beoordeeld door per faalmechanisme faalkanseisen af te leiden van de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit kan worden gedaan met behulp van een faalkansbegroting. In Figuur 4 is weergegeven op welk niveau de betrouwbaarheid van windturbines wordt beschouwd als de beoordeling plaatsvindt per faalmechanisme.



Figuur 4. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld als de kans op het bezwijken van een windturbine wordt verdisconteerd in de faalkans per mechanisme en de faalmechanismen afzonderlijk worden beoordeeld (optie A2).

Getallenvoorbeeld

Beschouw een dijktraject met een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/10.000 per jaar. Uitgaande van de default-faalkansbegroting en de uitsplitsingen daarbinnen is de faalkanseis voor de steenbekleding 0,05 x 10^{-4} per jaar = 5.10^{-6} per jaar op trajectniveau.

Stel dat er 10 identieke windturbines op vergelijkbare wijze langs het dijktraject zijn opgesteld en dat alleen mastbreuk schade aan de bekleding kan opleveren. Stel verder (1) dat de kans op een overstroming door het falen van de steenbekleding zonder windturbines 10^{-6} per jaar zou zijn geweest, (2)

dat de kans op mastbreuk per windturbine $1{,}3.10^{-4}$ per jaar is, (3) dat mastbreuk niet is gecorreleerd met de hydraulische belasting, (4) dat de trefkans 1/5 is en (5) dat de kans op een kritieke hydraulische belastingsituatie binnen de vereiste tijd voor noodreparatie of herstel 1/100 is. Er van uitgaande dat de kans klein is dat er meer dan 1 windturbine gelijktijdig bezwijkt, is de kans op overstroming door het falen van de bekleding EN het bezwijken van een windturbine gelijk aan:

$$P(STBK \cap BW) = P(STBK \mid BW) \times P(BW) = 1/100 \times (1 - (1-1{,}3.10^{-4} \times 1/5)^{10})$$
$$\approx 1/100 \times 10 \times 1{,}3.10^{-4} \times 1/5 = 2{,}6.10^{-6} \text{ per jaar}$$

De kans dat geen enkele windturbine bezwijkt, is $P(\underline{BW}) = (1-1{,}3.10^{-4})^{10} \approx 1{,}00$ per jaar. De kans op een overstroming door het falen van de bekleding EN geen bezwijken van een windturbine is zodoende:

$$P(STBK \cap \underline{BW}) \approx 10^{-6} \times 1{,}00 = 10^{-6} \text{ per jaar}$$

De kans op het falen van de steenbekleding volgt dan uit:

$$P(STBK) = P(STBK \cap BW) + P(STBK \cap \underline{BW}) = 2{,}6.10^{-6} + 10^{-6} = 3.6.10^{-6} \text{ per jaar}$$

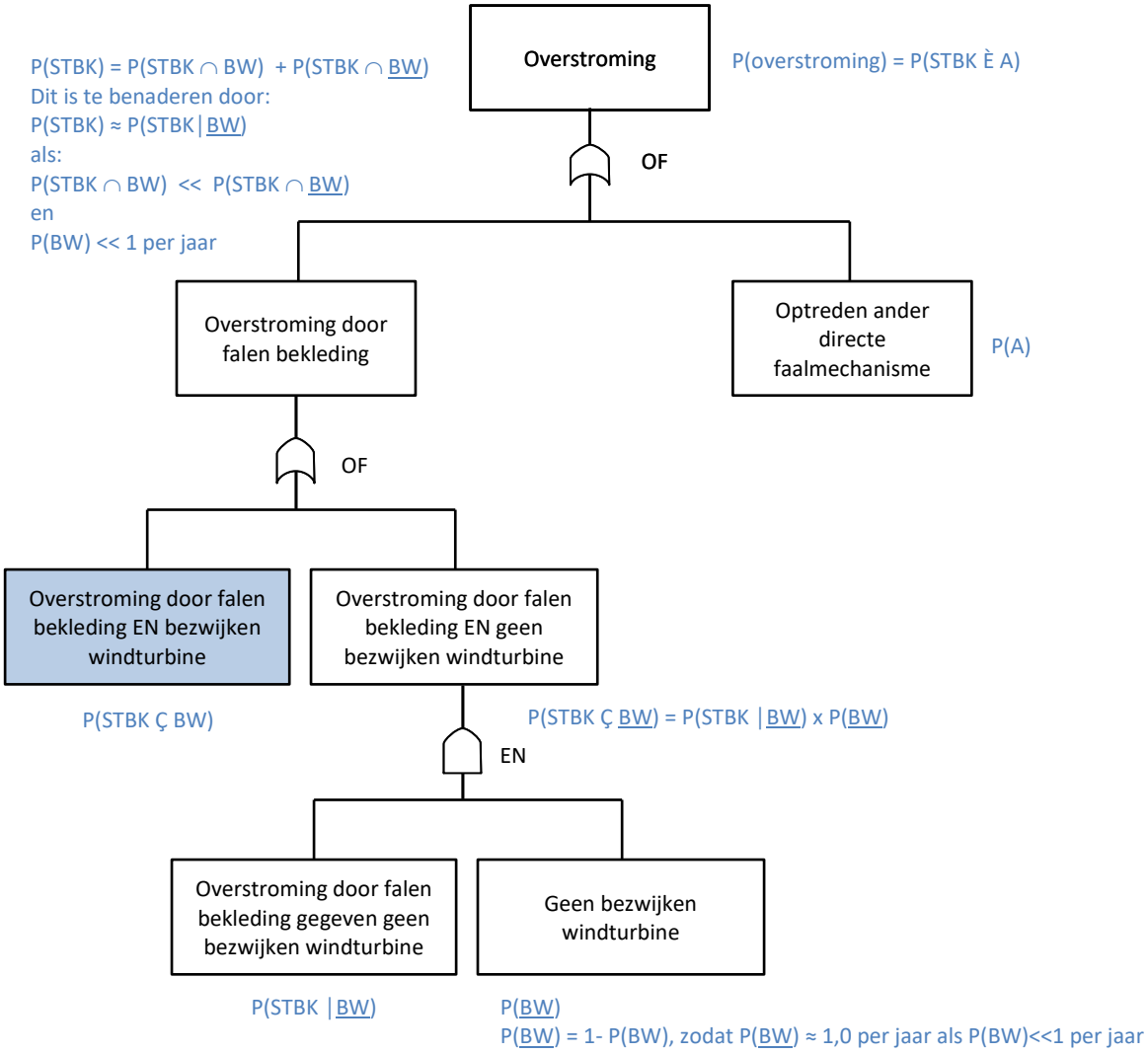
De steenbekleding voldoet dus aan de faalkanseis van 5.10^{-6} per jaar.

3.5 Optie A3: Kans op optreden faalmechanisme en bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen

Bij deze optie wordt alleen gekeken naar de kans op het bezwijken van de windturbine en het optreden van een faalmechanisme. Deze kans moet steeds kleiner zijn dan 1% van de faalkanseis voor het betreffende faalmechanisme. Bij deze optie wordt per faalmechanisme feitelijk een overschrijding van het faalkansbudget met 1% toegestaan. Rekening houdend met de post ‘overig’ in de faalkansbegroting (30%) kan dit maximaal 0,7% extra faalkansruimte op trajectniveau opleveren. Een dusdanig kleine overschrijding heeft geen enkele praktische betekenis.

De kans op het niet-bezwijken van een windturbine in een jaar is vrijwel gelijk aan één. Dit betekent dat de kans op een faalmechanisme EN het niet-bezwijken van een windturbine getalsmatig vrijwel gelijk is aan de kans op het faalmechanisme GEGEVEN het niet-bezwijken van een windturbine. Praktisch betekent dit dat de betrouwbaarheid van de windturbine niet meegenomen hoeft te worden bij de reguliere beoordelingen per faalmechanisme.

In Figuur 5 is weergegeven op welk niveau de betrouwbaarheid van windturbines bij deze optie wordt beschouwd en naar welke gebeurtenissen bij deze optie wordt gekeken. De formules in blauw geven aan waarom het aanvaardbaar is om bij de reguliere beoordeling het bezwijken van windturbines te negeren.



Figuur 5. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld bij optie A3.

Getallenvoorbeeld

Beschouw wederom het hypothetische dijktraject uit paragraaf 3.4. De kans op een overstroming door het falen van de bekleding en het niet-bezwijken van de windturbine is gelijk aan 10^{-6} per jaar. Dit is kleiner dan de faalkanseis aan de steenbekleding van 5.10^{-6} per jaar.

Bij de beoordeling van de betrouwbaarheid van de windturbines wordt nu echter als losse eis gehanteerd dat P(STBK ∩ BW) kleiner moet zijn dan 1% van de faalkanseis voor de steenbekleding, ofwel kleiner dan 0,01 x 5.10^{-6} = 5.10^{-8} per jaar op trajectniveau. Hieraan wordt niet voldaan want P(STBK ∩ BW) = $2,6.10^{-6}$ per jaar. Dit is illustratief voor het feit dat beoordelingsmethode A3 in de praktijk conservatiever zal uitpakken dan optie A2 ook al wordt het faalkansbudget per faalmechanisme bij optie A2 met (slechts) een factor 1,01 (1%) vergroot.

3.6 Optie A4: Kans op schade door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de strengste faalkanseis voor de relevante faalmechanismen

Optie A4 is een conservatieve benadering van optie A3 waarbij niet langer naar de kans op een overstroming wordt gekeken, maar naar de kans op schade aan de kering door het bezwijken van een windturbine. Als voor elk faalmechanisme wordt geëist dat de kans op schade kleiner moet zijn dan 1% voor het betreffende mechanisme, dan komt dit erop neer dat de kans op schade kleiner moet zijn dan 1% van de strengste eis voor de mechanismen waarvoor de schade relevant is.

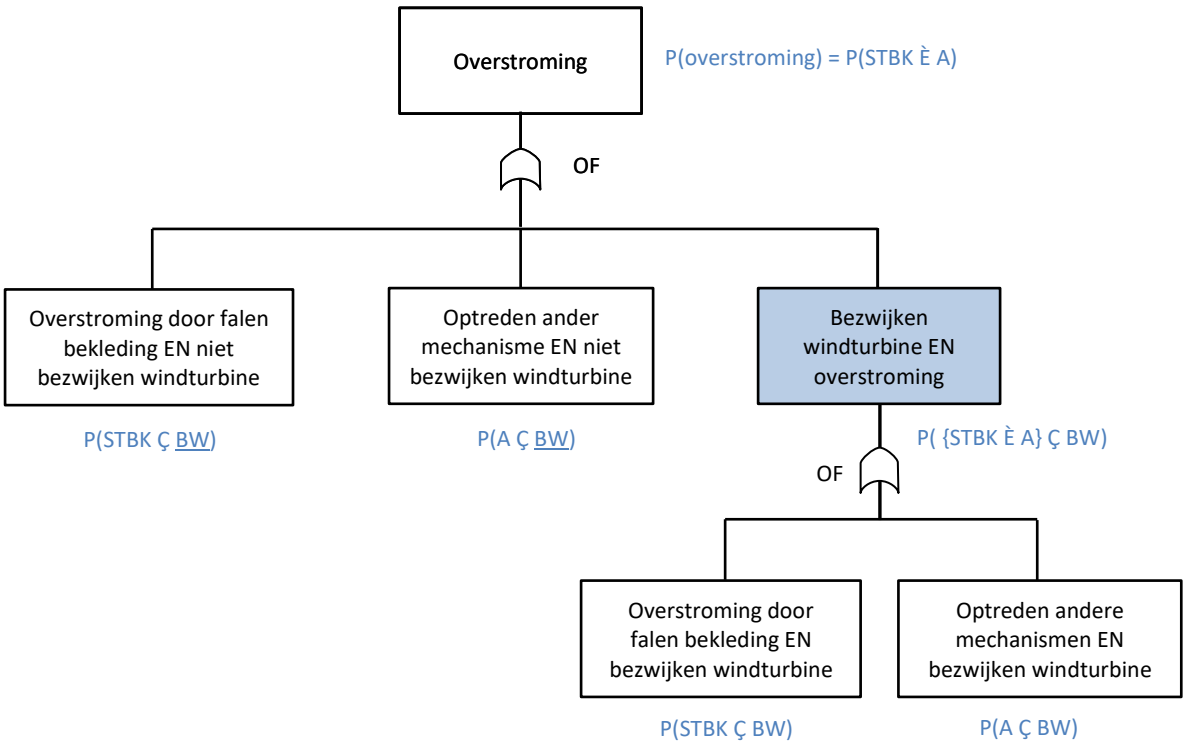
Getallenvoorbeeld

Beschouw wederom het hypothetische dijktraject uit paragraaf 3.4. De kans op mastbreuk is $1{,}3.10^{-4}$ per jaar, er zijn 10 onafhankelijke windturbines en de trefkans is 1/5. De kans op schade aan de bekleding door het bezwijken van een windturbine is zodoende gelijk aan $(1 – (1-1{,}3.10^{-4} \times 1/5)^{10}) \approx 10 \times 1{,}3.10^{-4} \times 1/5 = 2{,}6.10^{-4}$ per jaar. Dit is groter dan $0{,}01 \times 5.10^{-6} = 5.10^{-8}$ per jaar. De beoordeling is (nog) conservatiever dan bij optie A3.

3.7 Optie B: Kans op overstroming geïnitieerd door bezwijken windturbine kleiner dan 1% van de norm

Bij deze optie worden alle (directe) mechanismen die kunnen volgen op het bezwijken van een windturbine samengenomen en behandeld als een (direct) faalmechanisme. Dit betekent dat een overschrijding van het faalkansbudget met 1% wordt toegestaan. Een dusdanig kleine overschrijding is echter van geen enkele praktische betekenis. **Omdat deze optie eenvoudiger en minder foutgevoelig is dan de voorgaande opties, beveelt het Adviesteam aan om deze optie te volgen bij beoordelingen van de impact van windturbines op de overstromingskans.**

In Figuur 6 is weergegeven op welk niveau de betrouwbaarheid van windturbines bij deze optie wordt beoordeeld.



Figuur 6. Foutenboom met daarin in blauw het niveau waarop de faalkans wordt beoordeeld als het optreden van een overstroming en het bezwijken van een windturbine als een los faalmechanisme wordt behandeld (optie B).

Getallenvoorbeeld

Beschouw wederom het hypothetische dijktraject uit paragraaf 3.4. Aangenomen is dat het bezwijken van een windturbine alleen van invloed is op de betrouwbaarheid van de steenbekleding. De kans op een overstroming en het bezwijken van een windturbine is zodoende gelijk aan $2{,}6.10^{-6}$ per jaar. De kans op een overstroming door het bezwijken van een windturbine moet bij deze optie kleiner zijn dan 0,01 x 1/10.000 = 10^{-6} per jaar. Daarmee wordt net niet voldaan aan de eis. Aanpak B pakt duidelijk minder conservatief uit dan A3 en A4, maar is strenger dan A2.

4. Aandachtspunten bij beoordelingen van windturbines

Een verfijnde probabilistische beoordeling van windturbines op en nabij waterkeringen wordt al snel zeer complex. Het verdient dan ook aanbeveling om eventuele betrouwbaarheidsanalyses stapsgewijs op te bouwen (van grof naar fijn) en alleen complexe berekeningen uit te voeren (of te vragen in het kader van vergunningverlening) als dat werkelijk nodig is voor de besluitvorming. Enkele aandachtspunten zijn:

1. Als de kans dat (een onderdeel van) een windturbine bezwijkt vooral wordt bepaald door de kans op hoge windsnelheden, dan is de faalkans van de dijk in geval van een bezweken windturbine niet langer te bepalen met de hydraulische randvoorwaarden zoals die met bijvoorbeeld Hydra-NL berekend kunnen worden. Met Hydra-NL kan de kansverdeling van de hoogste hydraulische belasting in een tijdperiode van een jaar worden bepaald. Een kans in een jaar is echter niet hetzelfde als een kans gegeven een hoge windsnelheid. Zo is de kans op overschrijding van een extreme zeewaterstand in een jaar niet hetzelfde als de kans op overschrijding van deze waterstand gegeven een zeer hoge windsnelheid. Om relatief complexe berekeningen te voorkomen, zou in het kader van ‘van grof naar fijn’ in eerste instantie uitgegaan kunnen worden van de voorzichtige aanname dat bij het bezwijken van de windturbine zeker sprake is van een hoge hydraulische belasting op de waterkering (volledige correlatie).

2. Als de kans dat (een onderdeel van) een windturbine bezwijkt vooral wordt bepaald door de kans op hoge windsnelheden, dan zal sprake zijn van een afhankelijkheid van de windrichting. Deze afhankelijkheid zal van invloed zijn op de trefkans van de waterkering.

3. In hoofdstuk 3 is steeds gekeken naar faalkanseisen op trajectniveau. Het kan echter praktischer zijn om de beoordeling per faalmechanisme op doorsnedeniveau (bij opties A2 t/m A4) of per windturbine (bij optie B) uit te voeren. Het lengte-effect moet dan in de faalkanseis per faalmechanisme worden verwerkt (opties A2 t/m A4) of in de faalkanseis voor overstroming door het bezwijken van een windturbine (optie B). In deze gevallen wordt het lengte-effect dan bepaald door zowel de eigenschappen van het faalmechanisme als door het aantal onafhankelijke, equivalente windturbines. Dit lengte-effect kan (1) worden verwerkt in de faalkanseis op doorsnedeniveau of per windturbine of (2) in de schatting van de faalkans die met de reguliere faalkanseis op doorsnedeniveau vergeleken wordt. Het tweede is praktischer, zeker bij optie B. Ter illustratie:
    a. Een faalkanseis op doorsnedeniveau geldt steeds voor een aaneengesloten, identieke bekleding met eenzelfde oriëntatie. Als er langs een dergelijke strekking meerdere windturbines staan, dan is het aantal windturbines van invloed op de faalkans van de strekking. Dit aanvullende lengte-effect kan tot uitdrukking worden gebracht in een strengere faalkanseis of in de kans dat er binnen de strekking ergens een windturbine bezwijkt.
    b. Een faalkanseis op doorsnedeniveau voor een faalmechanisme zoals macroinstabiliteit geldt al voor een relatief kleine lengte. Het aantal windturbines langs een dijktraject is dan ook niet van invloed op de faalkanseis voor macroinstabiliteit en het bezwijken van een windturbine bij opties A2 t/m A4.

4. Voor de bepaling van de faalkansen van onderdelen van windturbines wordt veelal gebruik gemaakt van de faalfrequenties uit het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV [4]. De hierin genoemde faalfrequenties zijn 95%-waarden. Dit zijn veilige waarden: de kans dat de faalfrequentie lager is, is 95%. In de overstromingskansbenadering wordt idealiter met de verwachtingswaarden van faalfrequenties gerekend omdat er anders sprake is van verborgen veiligheden.

5. De faalfrequenties voor o.a. mastbreuk uit het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV [4] zijn enkele ordegroottes groter dan wat men zou mogen verwachten op grond van de betrouwbaarheidseisen die aan bouwwerken worden gesteld door de NEN-EN1990, zie Tabel 1.

Tabel 1. Faalkanseisen volgens de bouwvoorschriften en faalfrequentie voor mastbreuk volgens Handboek Risicozonering Windturbines.

Betrouwbaarheidseisen nieuwbouw volgens NEN-EN1990		Faalfrequentie mastbreuk (P95) uit Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV, tabel 6.1 [4]
Gevolgklasse 2	β_{50jr} = 3,8 Dit correspondeert met gemiddeld $1{,}4.10^{-6}$ per jaar	$1{,}3.10^{-4}$ per turbine per jaar
Gevolgklasse 3	β_{50jr} = 4,3 Dit correspondeert met gemiddeld $1{,}7.10^{-7}$ per jaar	

Het verdient aanbeveling om deze discrepantie nader te bekijken en de bouwvoorschriften en/of de faalfrequenties uit het Rekenvoorschrift [4] aan te passen. Wanneer windturbines zijn ontworpen volgens Gevolgklasse 2 of 3 zou mastbreuk nauwelijks nog relevant moeten zijn voor de kans op overstroming. Dit zou dan vermoedelijk ook moeten gelden voor het bezwijken van andere constructieve onderdelen/verbindingen (wiek, gondel). Als de kans op het bezwijken van (een onderdeel van) een windturbine zeer klein is, zou dit betrouwbaarheidsanalyses voor waterkeringen sterk vereenvoudigen. Vooralsnog wordt aanbevolen om uit te gaan van de faalfrequenties uit het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV [4] en niet voetstoots aan te nemen dat het voldoen aan de bouwvoorschriften voor bijvoorbeeld CC2 of CC3 betekent dat de kans op het bezwijken van een constructieonderdeel van een windturbine ordegroottes kleiner zal zijn.

5. Referenties

[1] Kennisplatform Risicobenadering (KPR), Windturbines op of nabij primaire waterkeringen, KPR, memo nr. 473, 19 juli 2018.

[2] STOWA, 2018. Handreiking Windturbines en Waterkeringen, Techniek, rapport 53.

[3] KPR. Factsheet post “overig” in de faalkansbegroting en indirecte mechanismen. Kennisplatform Risicobenadering, 09-11-2016.

[4] Rijksdienst voor Volksgezondheid en Milieu, Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV – Windturbines, versie oktober 2020.