

**B I D O C**

(bibliotheek en documentatie)



Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT  
Tel. 015 - 2518 363/364





# Windmolens en Waterkeringen

**Technische eisen voor het plaatsen  
van windmolens op of nabij  
waterkeringen**

**november 2000**



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat



Dienst Weg- en Waterbouwkunde





# Windmolens en Waterkeringen

Technische eisen voor het plaatsen van windmolens op  
of nabij waterkeringen

november 2000

*Publikatienummer*  
W-DWW-2000-081

*Opdrachtgever*  
Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directie IJsselmeergebied  
Postbus 600  
8200 AP Lelystad



06 APR. 2001

*Opgesteld door*  
A.L.T.C.M. Bizzarri  
A.P. de Looff

*Met medewerking van*  
J. Lindenberg  
B.H.P.A.M. The

*Foto's:*  
Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Meetkundige Dienst Afdeling Grafische Technieken

---

# Samenvatting

---

Door de beperkte ruimtecapaciteit voor windmolens op het vasteland en het feit dat kustlocaties het meest gunstig zijn vanuit het oogpunt van windintensiteit is er een groeiende vraag ontstaan naar locaties voor windmolens op of in de nabijheid van een waterkering. Bij de overweging of tot plaatsing wordt overgegaan is het raadzaam eerst te bezien of plaatsing nabij de waterkering mogelijk is (buiten de in de keur gedefinieerde invloedszone). Een fysieke scheiding van de waterkering en de windmolens betekent immers minder strenge eisen en procedures. Wanneer echter plaatsing van windmolens in de invloedszone van de waterkering overwogen wordt, dient in het besluitvormingsproces een afweging gemaakt te worden tussen alle positieve en negatieve effecten van deze plaatsing.

Het doel van deze notitie is om de beheerder van waterkeringen handvatten te bieden in bovengenoemd besluitvormingsproces. Daartoe zijn de technische aspecten die de veiligheid van een waterkering kunnen aantasten alsmede de beheersaspecten geïnventariseerd. Ook is geadviseerd ten aanzien van technische eisen en randvoorwaarden voor het plaatsen van windmolens op dijken (en dammen).

Op **technisch** gebied heeft de aanwezigheid van de windmolens in beginsel een negatieve invloed op de mechanismen die tot falen van de waterkering kunnen leiden. De invloed op de individuele faalmechanismen kan in alle gevallen kwalitatief beschreven worden. Meestal is ook een kwantitatieve beschouwing mogelijk. Meestal is de negatieve invloed te minimaliseren; per faalmechanisme is geadviseerd ten aanzien van te nemen maatregelen.

Vanuit het oogpunt van **beheer** kunnen de gevolgen van de aanwezigheid van windmolens alleen kwalitatief beschreven worden. Windmolens kunnen een vermindering van de toegankelijkheid veroorzaken waardoor het onderhoud van de waterkering en het snel ingrijpen bij calamiteiten wordt bemoeilijkt. Ook kunnen de windmolens (inclusief de bekabeling) een belemmering vormen voor toekomstige aanpassingen (verhoging of versterking) van de waterkeringen.

Om inzicht te krijgen in de wijze waarop het optreden van een bepaalde toestand invloed heeft op de veiligheid van de waterkering in het geheel, zijn de diverse faalmechanismen in een foutenboom verwerkt volgens de (vigerende) overbelastingsbenadering. De aanwezigheid van windmolens op een waterkering is als een extra gebeurtenis in de foutenboom van het falen van de waterkering toegevoegd. Een concrete eis is dat de veiligheid van de waterkering door aanwezigheid van de windmolens niet wezenlijk mag verminderen ten opzichte van de waterkering zonder windmolens. Een praktische aanbeveling is om de eis te stellen dat de aanwezigheid van windmolens de veiligheid slechts marginaal (orde 1 %) beïnvloedt. In de praktijk blijkt dit kwantitatief moeilijk uit te werken. Op basis van de beschikbare kennis en praktijkervaring is het verstandig om strenge eisen te stellen aan de windmolens, zodanig dat er een zo groot mogelijke garantie is dat de veiligheid nauwelijks wordt aangetast.



---

Dit betreft zowel eisen ten aanzien van de veiligheidsfactoren en normen als de locatie van de windmolens in het dwarsprofiel van de waterkering. In dit rapport zijn zowel voor de locatie als voor de technische eisen aanbevelingen opgesteld.

In figuur 1 is het standaard dwarsprofiel van een dijk en een dam verdeeld in verschillende zones aan de hand van relevante faalmechanismen. In tabel 1 zijn de faalmechanismen in de bouw- en gebruiksfase alsmede de beheersaspecten weergegeven die relevant zijn voor elke specifieke zone. De relatief belangrijke aspecten zijn vet weergegeven.

Op basis van het uitgangspunt dat de veiligheid van de waterkering met windmolens in beginsel niet lager mag worden ten opzichte van de situatie zonder windmolens en dat het beheer van de waterkering geen ontoelaatbare beperkingen mag ondergaan, worden de verschillende zones verdeeld in drie categorieën waarin plaatsing 'zeer ongewenst', 'ongewenst' of 'mogelijk onder voorwaarden' beschouwd wordt. De categorie 'zeer ongewenst' bevat een aantal zones (beschermd voor- en achterland en beschermd binnen- en buitentalud) waarin de consequenties voor de veiligheid van de waterkering zeer moeilijk te voorspellen zijn.

Plaatsing in zones zoals op de kruin en onbeschermd binnen- en buiten talud behoren tot de categorie 'ongewenst', voornamelijk vanwege het hinderen van het beheer. De afname van de beschikbare ruimte en van de begaanbaarheid van de waterkering door de aanwezigheid van windmolens kan het uitvoeren van inspecties, het plegen van onderhoud en het snel ingrijpen bij calamiteiten bemoeilijken. Bovendien kunnen eventuele toekomstige versterkingen van de waterkering gehinderd worden.

In de overige zones (voorland, achterland\binnenvoorland) is plaatsing in principe mogelijk, mits de veiligheid van de waterkering niet significant wordt aangetast. Als handvat kunnen de in deze studie geformuleerde technische maatregelen worden gebruikt.

In de laatste kolom van tabel 1 zijn de technische maatregelen opgesomd die aanbevolen worden als na zorgvuldige afweging plaatsing overwogen wordt. Het betreft concrete eisen te stellen aan de fundering van de windmolens, aan de stabiliteit van de waterkering, aan de sterkte van de bekleding, aan de veiligheid ten opzichte van faalmechanismen als piping en zettingsvloeiing en aan de ligging van de kabels.

Op juridisch gebied wordt aanbevolen de bevoegdheden en plichten van alle betrokken partijen (zoals beheerder van de waterkering en windmolenexploitant) in een vooraf opgestelde overeenkomst vast te leggen. Hierbij kan gedacht worden aan:

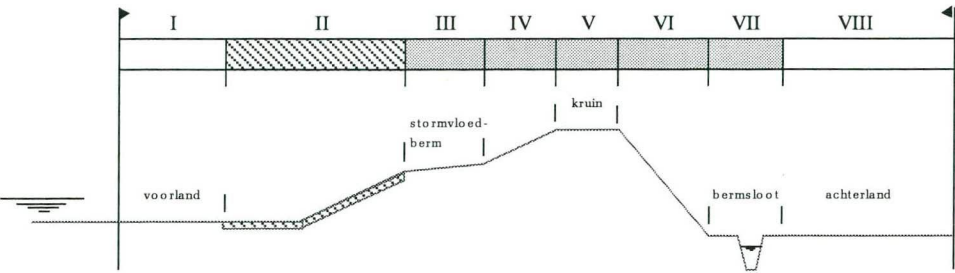
- eigendoms- en gebruiksrechten.
- sloopplicht en oplevering overeenkomsten.

#### **Afsluitend.**

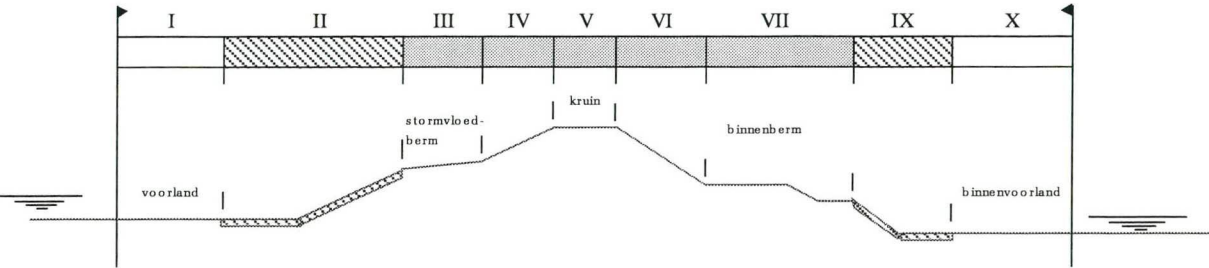
Deze studie biedt de beheerder van waterkeringen technische en beheersmatige aangrijpingspunten om te beoordelen of plaatsing van windmolens op of nabij de waterkering al dan niet gewenst is. Benadrukt wordt dat het de verantwoordelijkheid is van de beheerder om te besluiten windmolens te plaatsen. De in deze notitie verwoorde maatregelen en uitgangspunten kunnen hierbij als hulpmiddel c.q. handvat gebruikt worden en hebben verder geen status van leidraad, technisch rapport of dergelijke.

**Figuur 1**  
**Mogelijke locaties in het dwarsprofiel**  
**van een dijk en een dam voor het**  
**plaatsen van windmolens**

Dijk:



Dam:





plaatsing zeer ongewenst



plaatsing ongewenst



plaatsing mogelijk onder voorwaarden

DIJK- EN DAMLOCATIES

- I : Voorland
- II : Beschermd voorland en buitentalud
- II : Stormvloedberm
- IV : Buitentalud boven de stormvloedberm
- V : Kruin
- VI : Binnentalud
- VII : Bermsloot (dijk) of binnenberm (dam)
- VIII : Achterland (dijk)
- IX : Beschermd binnentalud (dam)
- X : Binnenvoorland (dam)



**Tabel 1**  
**Mogelijke faaloorzaken per zone/locatie**  
**en technische maatregelen bij plaatsing**

ZONE	LOCATIE	BOUWFASE	GEBRUIKSFASE	BEHEER	TECHNISCHE MAATREGELEN BIJ PLAATSING
I	Voorland	<b>zettingsvloeiing</b>	<b>lokale erosie</b> zettingsvloeiing piping	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud	<ul style="list-style-type: none"> <li>– aanbrengen van een bekleding rondom de funderingsconstructie</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> </ul>
II	Beschermde voorland en buitentalud	lokale erosie zettingsvloeiing afschuiven	<b>lokale erosie</b> <b>piping</b> zettingsvloeiing afschuiven <b>calamiteit</b>	<b>extra inspectie en</b> <b>onderhoud</b> <b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing zeer ongewenst)</i>
III	Stormvloedberm	<b>zettingsvloeiing</b> <b>afschuiven</b> <b>lokale erosie</b> zetting	<b>afschuiven</b> <b>piping</b> <b>lokale erosie</b> zettingsvloeiing <b>calamiteit</b>	<b>extra inspectie en</b> <b>onderhoud</b> <b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing ongewenst)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>– erosiesterkte bekleding vergroten</li> <li>– zettingscompensatie</li> <li>– verhoogde norm voor stabiliteitsfactor</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> </ul>
IV	Buitentalud boven de stormvloedberm	<b>zettingsvloeiing</b> <b>afschuiven</b> <b>zetting</b> <b>lokale erosie</b>	<b>afschuiven</b> lokale erosie piping zetting zettingsvloeiing <b>calamiteit</b>	<b>extra inspectie en</b> <b>onderhoud</b> <b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing ongewenst)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>– erosiesterkte bekleding vergroten</li> <li>– zettingscompensatie</li> <li>– verhoogde norm voor stabiliteitsfactor</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> </ul>
V	Kruin	<b>lokale erosie</b> <b>zetting</b> <b>zettingsvloeiing</b> <b>afschuiven</b>	<b>zetting</b> <b>afschuiven</b> lokale erosie piping zettingsvloeiing <b>calamiteit</b>	<b>extra inspectie en</b> <b>onderhoud</b> <b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing ongewenst)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>– erosiesterkte bekleding vergroten</li> <li>– zettingscompensatie</li> <li>– verhoogde norm voor stabiliteitsfactor</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> </ul>
VI	Binnentalud	<b>zetting</b> <b>zettingsvloeiing</b> <b>afschuiven</b> lokale erosie	<b>zetting</b> zettingsvloeiing afschuiven lokale erosie piping <b>calamiteit</b>	<b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing ongewenst)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>– erosiesterkte bekleding vergroten</li> <li>– zettingscompensatie</li> <li>– verhoogde norm voor stabiliteitsfactor</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> <li>– vaststellen van een schrikafstand</li> </ul>
VII	Binnenberm (dam) of bermsloot (dijk)	<b>zettingsvloeiing</b> lokale erosie afschuiven	<b>piping</b> lokale erosie zettingsvloeiing afschuiven <b>calamiteit</b>	<b>extra inspectie en</b> <b>onderhoud</b> <b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing ongewenst)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>– erosiesterkte bekleding vergroten</li> <li>– verhoogde norm voor stabiliteitsfactor</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> <li>– vaststellen van een schrikafstand</li> </ul>
VIII	Achterland (dijk)	afschuiven	piping afschuiven <b>calamiteit</b>	<b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> </ul>
IX	Beschermde binnentalud (dam)	<b>zettingsvloeiing</b> afschuiven	<b>lokale erosie</b> <b>piping</b> zettingsvloeiing afschuiven <b>calamiteit</b>	<b>extra inspectie en</b> <b>onderhoud</b> <b>moeilijker onderhoud</b> <b>toekomstige</b> <b>aanpassing</b>	<i>(plaatsing zeer ongewenst)</i>
X	Binnenvoorland (dam)	<b>zettingsvloeiing</b>	<b>lokale erosie</b> piping zettingsvloeiing <b>calamiteit</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>– aanbrengen van een bekleding rondom de funderingsconstructie</li> <li>– eisen aan de ligging van de kabels</li> </ul>

---

# Inhoudsopgave

---

<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
<b>Inhoudsopgave</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Achtergrond van de studie en opbouw van deze notitie	7
1.2 Probleemstelling en afbakening	9
<b>2 Beschouwing van relevante aspecten</b>	<b>11</b>
2.1 Technische aspecten	11
2.2 Beheer- en onderhoudsaspecten	13
2.3 Calamiteiten	13
2.4 Juridische aspecten	14
<b>3 Veiligheidsbeschouwing</b>	<b>15</b>
3.1 Veiligheid tegen overstroming	15
<b>4 Handreiking voor algemene voorwaarden en technische eisen</b>	<b>17</b>
4.1 Inleiding	17
4.2 Algemene uitgangspunten en handreikingen	17
4.3 Locaties in het dwarsprofiel	18
4.4 Technische eisen	23
4.4.1 Fundering	23
4.4.2 Stabiliteit	24
4.4.3 Bekleding	25
4.4.4 Piping	26
4.4.5 Zettingsvloeiing (bij een zettingsvloeiingsgevoelig voorland)	26
4.4.6 Kabels	27
<b>5 Conclusies</b>	<b>29</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>31</b>
<b>7 Bijlagen</b>	<b>33</b>





---

# 1 Inleiding

---

## 1.1 Achtergrond van de studie en opbouw van deze notitie

De overheid streeft naar een aandeel van 10% duurzame energiebronnen aan het totale energiegebruik in het jaar 2020, waarvan 2% door windenergie moet worden geleverd. Door de beperkte ruimtecapaciteit voor windmolens op het vaste land en het feit dat kustlocaties het meest gunstig zijn vanuit het oogpunt van windintensiteit, is er een groeiende vraag ontstaan naar locaties voor windenergie op of in de nabijheid van waterkeringen langs de Noordzee kust en het IJsselmeer. In het bijzonder is in de afgelopen 2 jaar de discussie over de Afsluitdijk als mogelijke windmolenlocatie actueel geweest. Op verzoek van de Regionale Directie IJsselmeergebied (brief ir. A.J. Kolvoort, dd. 15-01-1998) heeft de DWW de technische aspecten (in relatie tot de veiligheid van de waterkering) en overige aspecten geïnventarieerd. Deze studie heeft geleid tot het formuleren van concrete eisen en randvoorwaarden voor het plaatsen van windmolens op of in de nabijheid van dijken (en dammen). Het resultaat van dit onderzoek sluit zich aan bij de voor waterkeringen gebruikelijke veiligheidsfilosofie/ veiligheidsfactoren en is in deze notitie gepresenteerd.

De opbouw van deze notitie is als volgt:

Allereerst wordt een overzicht gegeven van de probleemstelling. De problematiek van het plaatsen van windmolens op waterkeringen en de houding van de betrokken beheerders wordt geplaatst in het kader van de voorschriften voor "niet-waterkerende objecten" volgens de huidige leidraden.

---

**Windmolenpark langs het IJsselmeer  
nabij Enkhuizen (Hoornsche Gat)**





---

In hoofdstuk 2 worden de diverse technische-, beheer- en overige aspecten die invloed kunnen hebben op de primaire functie van een waterkering geïnterpreteerd.

In hoofdstuk 3 wordt de veiligheidsbeschouwing gepresenteerd. De verschillende technische- en beheersaspecten worden in diverse foutenbomen weergegeven. Vervolgens wordt de mogelijke invloed van windmolens op de veiligheid tegen overstroming beoordeeld in het licht van de in de wet gestelde veiligheidsnorm.

In hoofdstuk 4 worden aanbevelingen gedaan voor te stellen eisen aan het plaatsen van windmolens op of in de nabijheid van waterkeringen. Deze concrete voorwaarden hebben betrekking op de mogelijke locaties in het dwarsprofiel van een waterkering, de fundering van de windmolens, de stabiliteit van de waterkering, de sterkte van de bekleding en bekabeling van de windturbines.

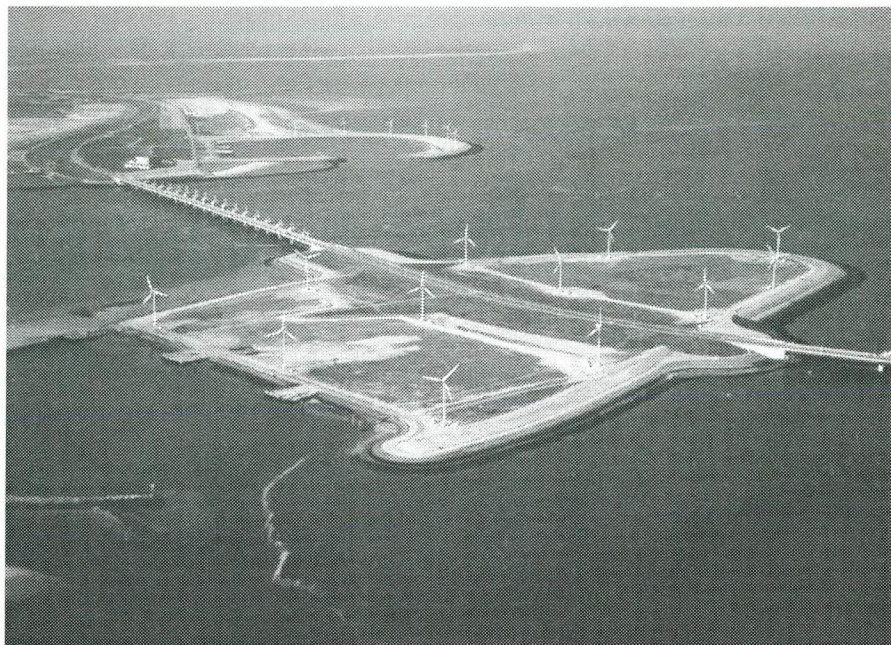
In hoofdstuk 5 zijn de belangrijkste conclusies in het kort weergegeven

---

## Windmolens bij Eemsmond







### 1.2 Probleemstelling en afbakening

Windmolens kunnen worden beschouwd als “niet-waterkerende objecten” op of in een waterkering. Onder “niet-waterkerende objecten” worden alle objecten verstaan die zich op de waterkering bevinden, maar geen bijdrage leveren aan de waterkerende functie en onder bepaalde condities het functioneren van de waterkering ongunstig kunnen beïnvloeden. Gezien de mogelijke nadelen van de aanwezigheid van een niet-waterkerend object op een waterkering, wordt in de Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructies en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen [1] geadviseerd om het plaatsen ervan op of nabij waterkeringen zo min mogelijk toe te laten. Ook in de meer recente Leidraad zee- en meerdijken [2] wordt geconcludeerd dat, naar aanleiding van een aantal met name genoemde technische en beheersaspecten, “de plaatsing van windmolens binnen de waterkeringzone zoveel mogelijk moet worden voorkomen. Alleen bij uitzondering kan plaatsing op, of binnen de stabiliteitzone (cq invloedzone) van de waterkering in beeld komen”. De conclusie in de Leidraden is gebaseerd op de gewenste situatie vanuit waterkeringstechnisch oogpunt.

Onlangs is het rapport “Windenergie bij waterkeringen” [3] verschenen. Dit rapport is het resultaat van een onderzoek uitgevoerd door het onderzoeksbureau Ecofys en het adviesbureau E-Connection in opdracht van de Nederlandse onderneming voor energie en milieu (Novem), met tevens de betrokkenheid van het Ministerie van Economische Zaken. De doelstellingen van het onderzoek waren:

1. In kaart brengen van de kennis, ervaring en bedenkingen van de waterkeringbeheerders ten aanzien van windmolens bij waterkeringen.
2. Inventariseren van mogelijke locaties voor windenergie.

Uit de analyse van de afgenomen interviews en een schriftelijke enquête gehouden onder de meer betrokken waterschappen en dienstkringen, kunnen twee uiterste houdingen van de waterkeringsbeheerders onderscheiden worden: een terughoudende houding, gebaseerd op de in de verschillende



leidraden beschreven filosofie betreffende 'vreemde objecten' op waterkeringen, en een in het algemeen positievere houding van beheerders die, als het technisch mogelijk is, open staan voor medegebruik van hun beheersobjecten voor andere 'maatschappelijk relevante' doelen. Wat men technisch mogelijk acht verschilt per waterschap/dienstkring die vervolgens verschillende richtlijnen hanteren voor het plaatsen van windmolens. Van de gerealiseerde projecten is de locatie van de windmolens in de meeste gevallen in het achterland op 30-60 m uit het binnentalud, één maal op het binnentalud en één maal net buiten de teen aan de van de dijk [3].

In het kader van de "Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterking" [4](Commissie Boertien), zijn er nieuwe inzichten ontwikkeld op het gebied van constructief ontwerpen die, bij een gegeven normstelling voor de veiligheid, tot een optimaler dijkontwerp kunnen leiden in relatie met een meer integraal gebruik van de waterkering [5]. Vanuit deze zienswijze is het niet mogelijk om een verzoek tot medegebruik van de waterkering af te wijzen door alleen naar de leidraad te verwijzen, zonder aanvullende argumenten.

Hierbij is het van belang dat de nieuwe, niet waterkerende objecten op of nabij een waterkering (in het bijzonder windmolens), geen afname van het veiligheidsniveau tot gevolg mag hebben. Geheel in de lijn van "Boertien" moeten aanvullende maatregelen op technisch en beheersgebied genomen worden om de eventuele negatieve effecten voor de veiligheid te compenseren. In het besluitvormingsproces zal een afweging gemaakt moeten worden tussen alle positieve en negatieve effecten van het plaatsen van windmolens op waterkeringen. Deze kunnen o.a. betrekking hebben op techniek, beheer, LNC aspecten en economische overwegingen. In deze nota wordt alleen ingegaan op de veiligheids- en beheersaspecten wat betreft de relatie tussen waterkeren en windmolens. Landschappelijke en milieuaspecten zijn o.a. in [6] en [7] beschreven.

---

#### **Windmolens op de Westerscheldedijk bij Vlissingen-Oost.**



---

## 2 Beschouwing van relevante aspecten

---

### 2.1 Technische aspecten

De laatste jaren zijn er verschillende studies uitgevoerd naar met name de technische aspecten in relatie tot veiligheid van windmolens op of nabij waterkeringen [6-10]. Onder andere in een uitgebreid rapport van Fugro [10] worden de factoren die invloed kunnen hebben op de primaire functie van een waterkering beschreven. De beschreven technische aspecten zijn voornamelijk geotechnisch en hydraulisch van aard.

Het plaatsen van windmolens heeft een direct effect op de ondergrond. Zowel in de gebruiksfase als in de bouwphase is er sprake van dynamische en statische belastingen die het functioneren van de waterkering nadelig kunnen beïnvloeden. De aanwezigheid van de windmolens (met fundering) kan een negatieve invloed hebben op de mechanismen die tot falen van de waterkering kunnen leiden (figuur 2.1).

Door trillingen kunnen dynamische belastingen in de ondergrond worden opgewekt:

- heitruïlingen (met name in het talud) kunnen grondmechanische instabiliteiten veroorzaken. [Bouwphase]
- de windbelasting op een windmolen wordt via de fundering afgedragen aan de ondergrond. Trillingen kunnen de wrijvings- en/of de puntweerstand van de grond reduceren. Dit kan invloed hebben op het draagvermogen van een funderingspaal. Verticale versnellingen leiden tot een afname van de schuifsterkte van de grond. Horizontale versnellingen veroorzaken extra schuifspanningen in de ondergrond. Beide kunnen in het extreme geval leiden tot instabiliteiten. Trillingen kunnen extra waterspanningen opwekken die leiden tot een afname van de schuifsterkte van de grond. [Bouwphase en gebruiksfase].

Statische belastingen die een directe invloed op de veiligheid kunnen hebben, zijn:

- gewicht van het materieel (bv. de heistelling). [Bouwphase]
- horizontale belasting geleverd door de windmolens. [Gebruiksfase]
- lokaal vergrote sterkte veroorzaakt door de palen. [Gebruiksfase]
- mogelijke vergroting van de hydraulische belasting op de bekleding (bv. hogere ligging van de freatische lijn in het grondlichaam). [Gebruiksfase]

De volgende faalmechanismen kunnen door de plaatsing van windmolens ongunstig worden beïnvloed:

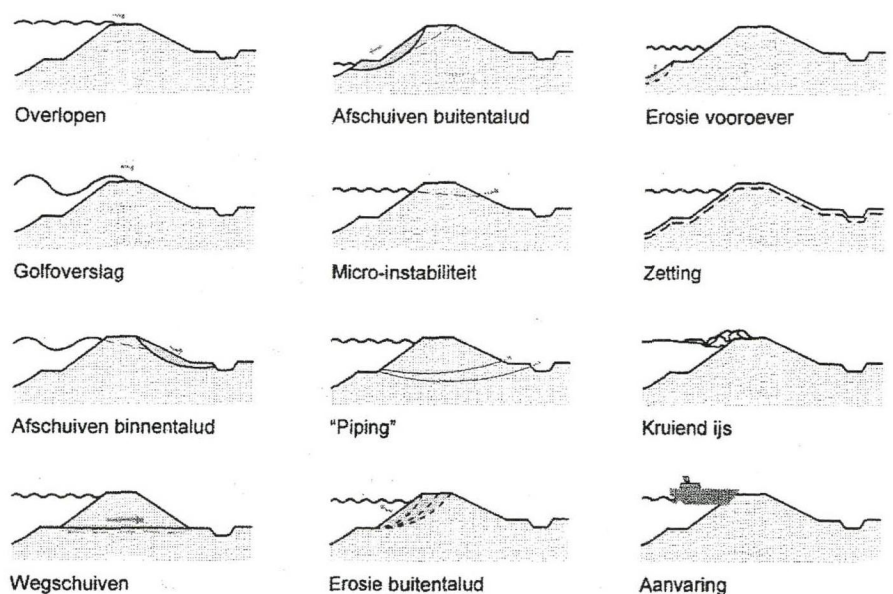
- lokale erosie ten gevolgen van een grotere aanval door golven en door stroming. Extra erosie van de kruin en van het binnentalud kan worden veroorzaakt door een grotere overloop van water en golfoverslag o.a. ten gevolge van mogelijke extra zettingen. De penetratie van afsluitende lagen langs de fundering kan leiden tot een hogere ligging van de freatische lijn in



het grondlichaam, waardoor de kans op erosie door grondwaterstroming groter wordt. Een verminderde weerstand tegen grondwaterstroming langs de bekabeling of het funderingsblok kan optreden indien deze onder de freatische lijn liggen. [Bouwphase en gebruiksfase]

- interne erosie of piping door een afname van de kwelengte ten gevolgen van het doorsteken van een slecht waterdoorlatende laag met de funderingspalen. De kans op piping kan toenemen door een afname van de weerstand tegen grondwaterstroming langs de bekabeling die in dwarsrichting van de waterkering is gelegen. [Gebruiksfase]
- zetting. Door trillingen kunnen losgepakte zandlagen worden verdicht met als gevolg extra zettingen. Tijdens de bouwphase kunnen heitrillingen leiden tot verdichting van dieper gelegen zandlagen. Omdat de fundering van de windmolens de deformaties van de ondergrond niet goed kan volgen, kunnen verschildeformaties ontstaan zowel in het verticale als in het horizontale vlak. [Bouwphase en gebruiksfase]
- afschuiven van het talud door afname van de schuifweerstand en toename van de belasting op het talud. [Bouwphase en gebruiksfase]
- verweking (zettingsvloeiing). Trillingen kunnen extra belastingen op een onbeschermde geulrand veroorzaken waardoor een verweking van zand kan worden ingeleid.
- Het plaatsen en het onderhoud van windmolens op een waterkering betekent ook het aanleggen van een weg. De mogelijke invloed van een weg op het waterkerend vermogen van een dijk betreft de invloed van de verkeerbelasting op de stabiliteit van de dijk, de erosiegevoeligheid van de aansluiting van de wegdek op de grasmat en het mogelijk optreden van kwel door de fundatie van de weg.

**Figuur 2.1**  
Belangrijkste faalmechanismen  
van een dijk



---

## 2.2 Beheer- en onderhoudsaspecten

Onder beheer wordt verstaan alle activiteiten zoals inspectie en onderhoud die noodzakelijk zijn om op korte en lange termijn de functie van een waterkering te kunnen blijven vervullen. Het niet optimaal onderhouden van de waterkering kan indirect een bijdrage leveren aan de in hoofdstuk 3 uitgewerkte veiligheidsaspecten en daarmee het functioneren van de waterkering beïnvloeden.

Door de aanwezigheid van windmolens, kunnen de volgende beheeraspecten van belang zijn:

- Vermindering van de toegankelijkheid waardoor het onderhoud van de waterkering kan worden bemoeilijkt.
- Extra inspectie en extra onderhoudsmaatregelen zijn nodig wegens mogelijke schade aan onderdelen van de waterkering ten gevolge van de bouw, het gebruik, het onderhoud en de sloop van de windmolens.
- De levensduur van de bekabeling en van de windmolens is korter (10 à 20 jaar) dan die van de fundering (40 jaar). Bij het ontwerpen van de fundering dient rekening gehouden te worden met een tweede generatie, van grotere omvang, windmolens. Als geen herplaatsing op de funderingsconstructie zal plaatsvinden, moet er rekening worden gehouden met het mogelijk verwijderen van de fundering en met hervullen van de overgebleven gaten met geschikt materiaal.
- De windmolens (inclusief de bekabeling) kunnen een belemmering vormen voor toekomstige aanpassingen (verhoging of versterking) van de waterkeringen.
- Het organiseren van het onderhoud kan bemoeilijkt worden door het feit dat meerdere partijen gebruik maken van de waterkering.

## 2.3 Calamiteiten

In de categorie “calamiteiten” worden de gebeurtenissen ingedeeld die vrijwel onafhankelijk van een hoogwater optreden. Mogelijke calamiteiten zijn wiekbreuk, mastbreuk en het uit de grond trekken van een gedeelte van of zelfs de gehele funderingsconstructie. Het optreden van een van deze gebeurtenissen kan een lokale verzwakking van de waterkering veroorzaken die invloed kan hebben op de individuele faalmechanismen, bij een kort daarna optredend hoogwater. In het ernstigste geval kan dit tot het falen van de waterkering leiden. Om deze reden is deze categorie ook verwerkt in de foutenboom van het falen van een waterkering (zie hoofdstuk 3).

Het optreden van een van de gebeurtenissen in de categorie “calamiteiten” kan ook veiligheidsrisico's met zich mee brengen die geen direct verband hebben met de waterkerende functie van de waterkering. Het betreft risico's voor individuen of groepen mensen, die zich om beroeps- of recreatieve redenen in de nabijheid van de windmolens bevinden. Deze risico's zijn verder geen onderwerp van deze nota. De kans op wiekbreuk gedurende de levensduur van de windturbine is zeker niet verwaarloosbaar. In het rapport “Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen” [9] wordt een veiligheidsfilosofie beschreven en een praktische beslisregel voorgesteld voor



---

het plaatsen van windmolens vanuit het oogpunt van rotorbladbreek. De veiligheidsfilosofie sluit aan op de individuele en maatschappelijke beleving en is gebaseerd op de keuze van de risicomaat *Individueel Passanten Risico* (IPR) voor de individuele beleving en de *het verwachte aantal doden per jaar* voor het maatschappelijke risico.

## **2.4 Juridische aspecten**

Juridische aspecten zijn alle niet-technische zaken waarover afspraken moeten worden gemaakt, tussen de eigenaar/beheerder van de waterkering en de exploitant van de windmolens, voor het verlenen van een vergunning. Hoewel de gebeurtenissen van deze categorie geen directe relatie hebben met de veiligheid van de waterkering, kunnen het ontbreken van heldere afspraken tussen de betrokkene partijen invloed hebben op het beheer van de waterkering en dus op de veiligheid.

Op juridisch gebied is het raadzaam de volgende zaken vast te leggen:

- eigendoms- en gebruiksrechten.
- sloopplicht en oplevering.
- eventueel bankgarantie voor de kosten van verwijdering van de fundering.

## 3 Veiligheidsbeschouwing

---

### 3.1 Veiligheid tegen overstroming

Het ontwerp van een primaire waterkering moet in Nederland voldoen aan in de Wet op de Waterkering gestelde veiligheidsnormen. De beschouwingen van de Deltacommissie en de uitwerkingen daarvan vormen de grondslag van de veiligheidseisen. Er wordt uitgegaan van een overbelastingsbenadering die gebaseerd is op de door de Deltacommissie geformuleerde eis dat een waterstand met een bepaalde overschrijdingskans per jaar (het ontwerppeil of MHW) nog 'volledig veilig' gekeerd moet worden. Het begrip 'volledig veilig' is vervolgens vertaald in ontwerpregels die rekening moeten houden met alle mogelijke onzekerheden zoals waterstand, golfaanval, materiaaleigenschappen enz. In de overbelastingsbenadering wordt de veiligheid gekoppeld aan de kans op overschrijding van een toelaatbaar geachte hydraulische belasting voor het mechanisme overloop/overslag in relatie tot de dijkhoogte. Er worden twee voorwaarden gesteld [2,12]:

norm

1. De kans dat het voor het betreffende dijkvak vastgestelde toelaatbare overslagdebiet  $q_t$  wordt overschreden mag niet groter zijn dan de norm die in de Wet op de waterkering voor het betreffende dijkkringgebied is genoemd. Daarbij wordt meestal uitgegaan van een ontwerpwaterstand (MHW), waarbij een golf hoort, waaruit een golfoploop c.q. golfoverslagdebiet volgt. Deze voorwaarde leidt tot de benodigde dijkhoogte.

0.1 x norm

2. Bij waterstanden gelijk aan of lager dan MHW mag de kans op falen door andere oorzaken dan overloop/overslag (dus bijv. door stabiliteitsverlies van het binnentalud of door piping), tezamen niet meer dan 10% van de bij voorwaarde 1 genoemde norm bedragen.

*Intermezzo: foutenboom.*

*Een foutenboom geeft inzicht in de mate waarin een bepaalde gebeurtenis bijdraagt aan de veiligheid van de waterkering in het geheel. Hierin komt ook de onderlinge samenhang tussen de diverse gebeurtenissen en faalmechanismen in beeld. Een foutenboom is een schematische weergave van de logische opeenvolging van alle gebeurtenissen, die leiden tot een ongewenste reactie van het systeem (b.v. falen). Deze ongewenste reactie staat boven aan de boom en wordt "topgebeurtenis" genoemd [11].*

In bijlage 1 en 2 is een foutenboom uitgewerkt voor het systeem 'waterkering + windmolens', uitgaande van de vigerende veiligheidsbenadering. Twee gevallen zijn beschreven, namelijk voor de bouwfase en voor de gebruiksfase van de windmolens. Alleen de gebeurtenissen t.g.v. windmolens zijn volledig uitgewerkt, aangegeven is waar de windmolens invloed hebben op de hiervoor beschreven voorwaarden 1 en 2.

Een concrete eis is dat de veiligheid van de waterkering door aanwezigheid van de windmolens niet wezenlijk mag verminderen ten opzichte van de



---

waterkering zonder windmolens. Dit betekent dit dat het systeem 'waterkering + windmolens' in beginsel aan dezelfde voorwaarden (1 en 2) moet voldoen als het systeem zonder windmolens. In de praktijk wordt een verhoging van 10% geaccepteerd.

Een pragmatische invulling hiervan is met de volgende redenering op te bouwen (zie ook de bijlagen 1 en 2):

- Windmolens op een waterkering kunnen voorwaarde 1 beïnvloeden doordat ze bijdragen aan een vergroting van de zettingen. Een benadering is dat de gebeurtenis 'zettingen te groot' maximaal 10% bedraagt van de totale faalkans. Het toevoegen van windmolens mag deze kans ten hoogste met 10% doen stijgen. Voor 'zetting te groot t.g.v. windmolens' resteert dan 1% van de norm.
- Voorwaarde 2 kan direct beïnvloed worden door windmolens op de waterkering. Derhalve volgens bovenstaande redenering een faalkans van maximaal 10% van de faalkans van voorwaarde 2. Aangezien de faalkans van voorwaarde 2 maximaal 10% bedraagt van de totale faalkans, bedraagt de faalkans van windmolens via het spoor van voorwaarde 2 eveneens 1% van de totale faalkans.
- Aanbeveling: stel zowel voor zettingen als de overige mechanismen de eis dat de aanwezigheid van windmolens de veiligheid slechts marginaal (orde 1%) beïnvloedt. In de praktijk blijkt dit kwantitatief moeilijk uit te werken. Op basis van de beschikbare kennis en praktijkervaring is het verstandig om strenge eisen te stellen aan de windmolens, zodanig dat er een zo groot mogelijke garantie is dat de veiligheid nauwelijks wordt aangetast. Aanbevelingen hiervoor worden uitgewerkt in het volgende hoofdstuk.

---

## 4 Handreiking voor algemene voorwaarden en technische eisen

---

### 4.1 Inleiding

Uit eerder uitgevoerde studies [6-10] blijkt dat de invloed op de individuele faalmechanismen zowel kwalitatief als ook in meer of minder mate kwantitatief beschreven kan worden. Ook blijkt dat er per faalmechanisme maatregelen genomen kunnen worden om de betreffende afname van de veiligheid van de waterkering te compenseren. Daar waar mogelijk is per faalmechanisme een advies opgesteld ten aanzien van technische eisen die gesteld kunnen worden voor windmolens op of nabij een waterkering.

In het algemeen moeten windmolens voldoen aan de eisen die in Nederland aan constructies worden gesteld. In de geotechnische norm NEN 6740 worden alle geotechnische constructies ingedeeld in een drietal geotechnische categorieën (CG1, CG2 en CG3). De indeling is afhankelijk van het type van de constructie, de belastingen en de afmetingen van de constructie, de grondgesteldheid, de grondwaterstand en de invloed vanuit de omgeving zoals hydrologische en hydraulische factoren, grond dalingen, verkeer enz. . Constructies met dynamische belastingen zoals windmolens behoren tot de hoogste categorie GC3. Deze categorie betreft bouwconstructies waaraan bijzondere eisen worden gesteld. Funderingen die tot deze categorie behoren moeten getoetst worden volgens de methode zoals omschreven in de normen NEN 6743 en NEN 6744. Ook waterkeringen vallen onder categorie CG3.

De combinatie van windmolens en een waterkering, beide afzonderlijk behorend tot categorie CG3 volgens de NEN6740, en de in het vorige hoofdstuk behandelde veiligheidsbeschouwing zijn de basis te adviseren om technische eisen te stellen t.a.v. veiligheidsfactoren en normen. Ook met betrekking tot de locatie van de windmolens in het dwarsprofiel van de waterkering worden zones onderscheiden waarin plaatsing als 'zeer ongewenst', 'ongewenst' en 'mogelijk onder voorwaarden' wordt betiteld.

### 4.2 Algemene uitgangspunten en handreikingen

Bij de beoordeling of plaatsing op of nabij de waterkering gewenst is, staan de beheerder de volgende algemene uitgangspunten ter beschikking:

- De veiligheid van de waterkering in de gebruiksfase van de windmolens mag niet verminderen ten opzichte van de waterkering zonder windmolens.
- De bouw- en verwijderingswerkzaamheden dienen bij voorkeur in het open seizoen uitgevoerd te worden. Als gevolg van de werkzaamheden mag geen schade ontstaan die de veiligheid van de waterkering blijvend vermindert. Alle schaden dienen hersteld te worden voor het begin van het gesloten seizoen.



- Tijdens de werkzaamheden moeten noodvoorzieningen aanwezig zijn om te kunnen garanderen dat eventuele negatieve gevolgen (lokale erosie, instabiliteit etc.) van een onverwachte verandering in de belastingomstandigheden worden voorkomen.
- Zettingen die tijdens of na de bouwfase zijn opgetreden ten gevolge van de bouwfase van de windmolens dienen te worden gecompenseerd.
- Het beheer van de waterkering (op korte en lange termijn) mag niet ontoelaatbaar beperkingen ondergaan. Zo is het bijvoorbeeld wenselijk dat de toegankelijkheid van de waterkering gewaarborgd blijft.
- Een aaneenschakeling van objecten, die afzonderlijk allemaal voldoen aan de eisen ten aanzien van ontwerp en beheer, kan een onoverzichtelijke situatie creëren. Voor deze reden moet een windmolen in de nabijheid van een waterkering niet alleen afzonderlijk beoordeeld worden maar als geheel van objecten, met name vanuit het beheerdersoogpunt.
- Een goede staat van onderhoud van de windmolen is belangrijk om de kans op calamiteiten tot een minimum te beperken. Geadviseerd wordt om hiervoor afspraken met de eigenaar/beheerder van de windmolens vooraf vast te leggen.
- Wat betref de veiligheidsrisico's voor passanten op een nabij infrastructuur (auto-, spoor- of vaarwegen) wordt aanbevolen een schrikafstand (minimum afstand) vast te stellen met betrekking tot rotorbreuk. In [9] wordt een methode gegeven om deze te bepalen.
- Het is raadzaam in een vooraf opgesteld overeenkomst de bevoegdheden en plichten van alle betrokken partijen (zoals beheerder van de waterkering en windmolensexploitant) te regelen. Deze hebben betrekking op:

#### 4.3 Locaties in het dwarsprofiel

Wanneer de mogelijkheid van het plaatsen van windmolens op of nabij waterkeringen bekeken wordt, is het raadzaam de betreffende strekking van de waterkering te screenen op de volgende aspecten. Inventariseer waar sprake is van een breed voorland, overgedimensioneerde (brede) kernzone en waar ruimte is voor plaatsing in het achterland.

Uit deze selectie blijkt of er locaties zijn aan te wijzen waar het mogelijk is de windmolens dusdanig te plaatsen dat de waterkerende functie er niet door wordt beïnvloedt, simpelweg omdat ze niet in de kernzone of de binnenbeschermingszone liggen. Termen als kern- en invloedszone zijn afkomstig uit de keur, zie figuur 4.1 ter verduidelijking. Er kunnen drie zones worden onderscheiden:

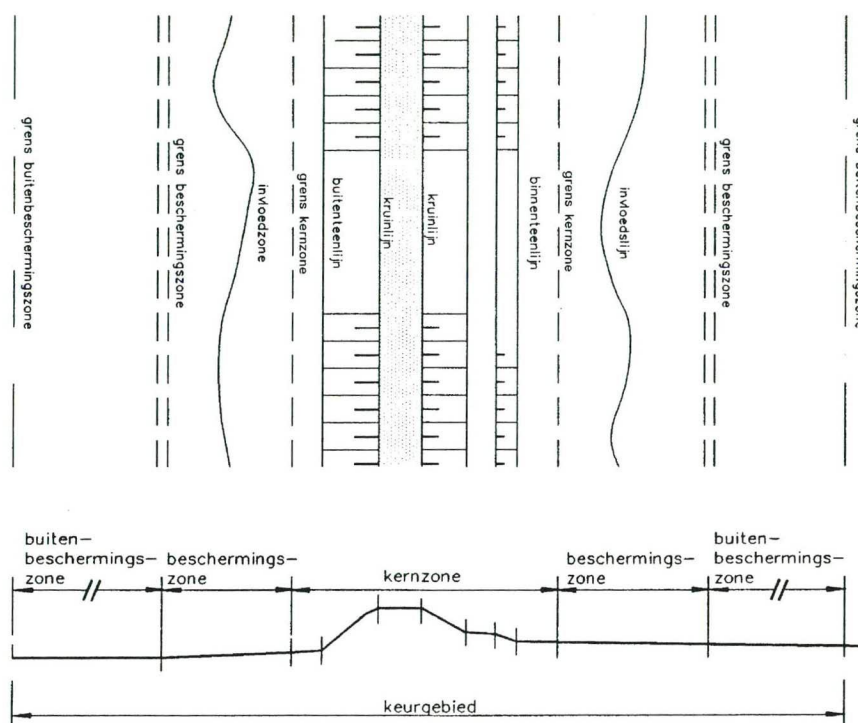
- de kernzone
- de beschermingszone
- de buitenbeschermingszone

De kernzone is het gebied met het strengste gebodsregime.

De buitenbeschermingszone is het gebied met het minste strenge gebodsregime.

Wanneer blijkt dat plaatsing in kern- of binnenbeschermingszone niet tot de mogelijkheden behoort moeten de technische (on)mogelijkheden van plaatsing op een rijtje gezet worden.

**Figuur 4.1**  
**Begrenzing van het standaard profiel**  
**van een dijk, zoals aangegeven in de keur**



De mate waarin een bepaald faalmechanisme ongunstig kan worden beïnvloed door het plaatsen van windmolens is afhankelijk van de locatie van de windmolens in het dijkprofiel. In [10] wordt een dijkprofiel gedefinieerd voor het plaatsen van windmolens op dijken en dammen, die loopt van 30 m buitendijs van de buitenteen tot 30 m binnendijs van de binnenteen. Dit profiel heeft niet dezelfde afmetingen als het profiel van kern- en binnenbeschermingszone uit de keur. In de meeste gevallen strekt het laatste zich verder uit. In [2] wordt in verband met het plaatsen van windmolens in de nabijheid van een waterkering over de stabiliteitszone gesproken. De breedte van de stabiliteitszone is viermaal de hoogte van de waterkering boven het maaiveld, gemeten vanaf de teenlijn van de waterkering. Daarnaast kan opdrijven een invloed op de breedte van de stabiliteitszone hebben.

In het algemeen kan er een aantal locaties worden onderscheiden voor mogelijke plaatsing van windmolens. In figuur 4.2 is het standaard dwarsprofiel van een dijk en een dam verdeeld in verschillende zones aan de hand van relevante faalmechanismen.

In tabel 4.1 zijn de faalmechanismen in de bouw- en de gebruiksfase en beheersaspecten weergegeven die relevant zijn voor elke specifieke zone. De relatief belangrijke aspecten zijn in vet aangegeven.

Het plaatsen van windmolens in bepaalde zones brengt moeilijk te kwantificeren extra risico met zich mee. Daarom worden de verschillende zones



---

in drie categorieën verdeeld waarin plaatsing 'zeer ongewenst', 'ongewenst' of 'mogelijk onder voorwaarden' beschouwd wordt. De eerste categorie 'plaatsing zeer ongewenst' bevat de zones die onderworpen zijn aan een langdurige belasting door golven en stroming. De consequenties voor de veiligheid van de waterkering van een grote discontinuïteit in de taludbekleding en van de door de windmolenconstructie opgewekte extra turbulentie zijn moeilijk te voorspellen en dus zijn de risico's van plaatsing in deze zones niet kwantificeerbaar. Tot de categorie 'plaatsing zeer ongewenst' behoren de zones:

⇒ zone II : Beschermd voorland en buitentalud

⇒ zone IX (dam) : Beschermd binnentalud

Het plaatsen van windmolens in de zones die behoren tot de categorie 'ongewenst' is met name gebeurd vanwege het hinderen van het beheer. De afname van de beschikbare ruimte en van de begaanbaarheid van de waterkering door de aanwezigheid van windmolens kan het uitvoeren van inspecties, het plegen van onderhoud en het snel ingrijpen bij calamiteiten bemoeilijken. Bovendien kunnen toekomstige versterkingen van de waterkering verhinderd worden. Plaatsing binnen het gebied van een eventuele toekomstige versterking is af te raden. Tot de categorie 'plaatsing ongewenst' behoren de zones:

⇒ zones III en IV: Stormvloedberm en buitentalud

⇒ zone V: Kruin

⇒ zone VI: Binnentalud

⇒ zone VII: Bermsloot (dijk) en Binnenberm (dam):

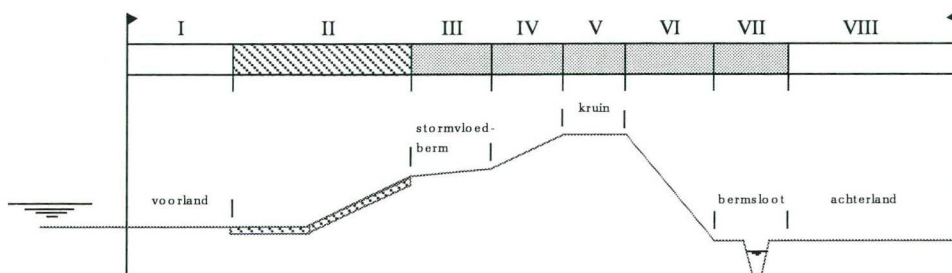
Als plaatsing door de beheerder van de waterkering toch wordt overwogen, wordt aanbevolen om van de ontwerper/exploitant van de windmolens te vragen welke constructieve maatregelen hij gaat treffen om de veiligheid tegen overstromen op minimaal hetzelfde niveau te houden. Als handvat voor de beoordeling hiervan kunnen de aanbevelingen voor technische eisen uit het volgende hoofdstuk worden gebruikt

Het uitsluiten van de bovengenoemde zones voor het plaatsen van windmolens is in overeenstemming met de eis gesteld in de Handreiking Constructief ontwerpen [5] en in de Leidraad Toetsen op Veiligheid [14], dat het beoordelingsprofiel in principe niet door niet-waterkerende objecten mag worden doorsneden. In deze publikaties wordt een uitzondering gemaakt voor de funderingspalen. Deze zijn toegestaan mits ze geen aanleiding tot het ontstaan van piping kunnen geven.

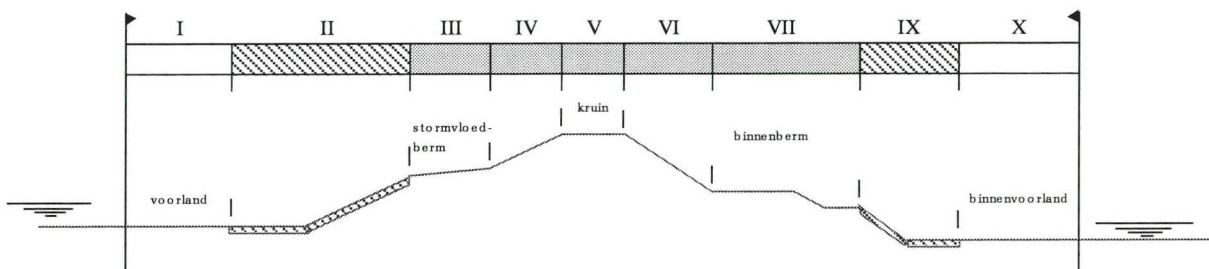
In de overige zones I, VIII en X (voorland, achterland en binnenvoorland) is plaatsing mogelijk, mits aan de aanbevolen technische eisen wordt voldaan.

**Figuur 4.2**  
**Mogelijke locaties in het dwarsprofiel**  
**van een dijk en een dam voor het**  
**plaatsen van windmolens**

**Dijk:**



**Dam:**



 plaatsing zeer ongewenst   
  plaatsing ongewenst   
  plaatsing mogelijk onder voorwaarden

#### DIJK- EN DAMLOCATIES

- I : Voorland
- II : Beschermd voorland en buitentalud
- II : Stormvloedberm
- IV : Buitentalud boven de stormvloedberm
- V : Kruin
- VI : Binnentalud
- VII : Bermsloot (dijk) of binnenberm (dam)
- VIII : Achterland (dijk)
- IX : Beschermd binnentalud (dam)
- X : Binnenvoorland (dam)



**Tabel 4.1**  
**Mogelijke faaloorzaken per zone/locatie**  
**en technische maatregelen bij plaatsing**

ZONE	LOCATIE	BOUWFASE	GEBRUIKSFASE	BEHEER
I	Voorland	zettingsvloeiing	lokale erosie zettingsvloeiing piping	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud
II	Beschermde voorland en buitentalud	lokale erosie zettingsvloeiing afschuiven	lokale erosie piping zettingsvloeiing afschuiven calamiteit	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
III	Stormvloedberm	zettingsvloeiing afschuiven lokale erosie zetting	afschuiven piping lokale erosie zettingsvloeiing calamiteit	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
IV	Buitentalud boven de stormvloedberm	zettingsvloeiing afschuiven zetting lokale erosie	afschuiven lokale erosie piping zetting zettingsvloeiing calamiteit	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
V	Kruin	lokale erosie zetting zettingsvloeiing afschuiven	zetting afschuiven lokale erosie piping zettingsvloeiing calamiteit	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
VI	Binnentalud	zetting zettingsvloeiing afschuiven lokale erosie	zetting zettingsvloeiing afschuiven lokale erosie piping calamiteit	moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
VII	Binnenberm (dam) of bermsloot (dijk)	zettingsvloeiing lokale erosie afschuiven	piping lokale erosie zettingsvloeiing afschuiven calamiteit	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
VIII	Achterland (dijk)	afschuiven	piping afschuiven calamiteit	toekomstige aanpassing
IX	Beschermde binnentalud (dam)	zettingsvloeiing afschuiven	lokale erosie piping zettingsvloeiing afschuiven calamiteit	extra inspectie en onderhoud moeilijker onderhoud toekomstige aanpassing
X	Binnenvoorland (dam)	zettingsvloeiing	lokale erosie piping zettingsvloeiing calamiteit	

---

#### 4.4 Technische eisen

In deze paragraaf worden de technische maatregelen opgesomd die relevant zijn als na zorgvuldige afweging plaatsing van windmolens overwogen wordt. Het betreft hier een aanbeveling voor mogelijk te stellen eisen. De eisen zijn te stellen aan de fundering van de windmolens, aan de stabiliteit van de waterkering, aan de sterkte van de bekleding, aan de veiligheid ten opzichte van faalmechanismen als piping en zettingsvloeiing en aan de ligging van de kabels.

##### 4.4.1 Fundering

Van de initiatiefnemer/exploitant van de windmolens kan verlangd worden dat hij een ontwerpplan indient waaruit blijkt dat de fundering van de windmolens aan de hieronder gestelde eisen voldoet:

- Aangeraden wordt de funderingsconstructie niet alleen te dimensioneren op 'standaard' belastingen, maar ook op alle belastingen uitgeoefend door de waterkering op de fundering van de windmolen ten gevolge van extra zettingen, horizontale grondverplaatsing in de waterkering en door een eventuele toekomstige dijkverhoging. Dit zowel onder dagelijkse als extreme omstandigheden.
- Bij extreme belastingomstandigheden voor de windmolens mag de fundering niet uit de waterkering worden getrokken. Dit betekent dat de funderingsconstructie zwaarder gedimensioneerd dient te worden tegen kantelen en/of uittrekken ten opzichte van de turbine-mast tegen mastbreuk (zwakste punt van de constructie vlak boven de fundering)
- Bij dimensionering van de funderingsconstructie is het raadzaam om rekening te houden met een eventueel toekomstige ophoging van de waterkering en met een grotere tweede generatie windturbine, die mogelijk op de oude fundering moet worden geplaatst.
- Reeds bij het ontwerp is het aan te bevelen om de methode van verwijdering van het funderingsblok bij opheffing van de windmolen te beschrijven
- Het paalpuntniveau moet op voldoende grote diepte onder het maatgevende glijvlak liggen. Bijvoorbeeld op een niveau waar de stabiliteitsfactor 20% hoger is dan op het kritische glijvlak. Beide stabiliteitsfactoren worden berekend zonder invloed van de windmolens. Als hieraan voldaan wordt:
  - kunnen palen bijdragen aan de sterkte tegen afschuiven [10]
  - worden optredende verticale belastingen tijdens de gebruiksfase door de palen naar de ondergrond overgebracht

Bij windmolens is er mogelijk sprake van een hogere ligging van de freatische lijn in het grondlichaam. Hierdoor kan een extra belasting op de bekleding ontstaan. Om dit te voorkomen:

- Wordt een vergrote paalvoet niet toegestaan bij doorsnijding van onder de waterkering aanwezige afsluitende lagen.



- Moet het funderingsblok bij voorkeur een waterdichte aansluiting met de naastliggende bekleding hebben (bij plaatsing aan de buitenzijde van het talud).

Bij verwijdering van de windmolen, als geen hergebruik van de funderingsconstructie zal plaatsvinden, moet de fundering verwijderd worden zonder dat de veiligheid van de waterkering (blijvend) wordt aangetast. Hierbij kan gedacht worden om de gaten met geschikt materiaal (bijv. bentoniet) te vullen.

Indien de palen in een laagliggende draagkrachtige ondergrond zijn geheid, dient alleen het funderingsblok, inclusief het bovenste gedeelte van de funderingspalen tot een niveau van minimaal 2 m onder de bovenkant van de bekleding, verwijderd te worden [10].

#### 4.4.2 Stabiliteit

Windmolens mogen geen negatief effect hebben op de stabiliteit van de waterkering. Indien plaatsing in of nabij het dijktaalud wordt overwogen dient een stabiliteitsanalyse uitgevoerd te worden. Voor het bepalen van de stabiliteit dient men ook rekening te houden met het effect van trillingen die door de turbine aan het dijklichaam worden afgegeven zowel tijdens de bouwphase als tijdens de gebruiksfase.

Om de invloed van een windmolen op de stabiliteit van de waterkering te kunnen beoordelen dient het kritieke glijvlak en de behorende stabiliteitsfactor te worden bepaald in de situaties zonder windmolens en met windmolens. De uitkomst van deze berekening dient te voldoen aan de hierna gegeven voorwaarden.

In [10] wordt een methode gegeven om de stabiliteitsfactor inclusief het effect van windmolens te kunnen bepalen (een aangepaste Simplified Bishop methode). In de berekening 'met windmolens' wordt zowel de afname van de schuifsterkte ten gevolge van wateroverspanningen verwerkt als de afname van de schuifsterkte ten gevolge van versnellingen (dynamische belastingen) ingevoerd. De extra schuifsterkte die door de paal wordt geleverd is ook meegerekend.

In het geval van een niet cirkelvormig glijvlak of in het geval van opdrukken van een slappe laag achter de waterkering moeten andere aangepaste methoden toegepast worden. Als grote stijfheidsverschillen tussen de grondlagen bestaan moet een Eindig Element Model met een elasto-plastisch grondmodel gebruikt worden.

Ten aanzien van de stabiliteit wordt aanbevolen de volgende aspecten kritisch te beschouwen. Hierbij is onderscheid gemaakt naar bouw- en gebruiksfase.

Eisen tijdens de bouwphase:

- De door trillingen opgewekte extra waterspanningen mogen de maximaal toelaatbare waarden niet overschrijden. Indien dit niet mogelijk is, dienen de waterspanningen tijdens de uitvoering gemeten te worden en de heiwerkzaamheden daarop af te stemmen. Bij voorkeur dient deze procedure beschreven te zijn in een vooraf ingediend heiplan. De invloed van de geïnduceerd extra waterspanning op de schuifsterkte van de grond (en dus de maximale toelaatbare waarde) kan bepaald

---

worden door voor het betreffende gebied te rekenen met een aangepaste hoek van inwendige wrijving [10].

- De freatische lijn kan in de nabijheid van windmolens hoger liggen dan normaal. Aanbevolen wordt om bij stabiliteitsberekeningen hiermee zoveel mogelijk rekening te houden.
- De dynamische belasting ten gevolge van heitrillingen mag geen afname van de stabiliteit veroorzaken. De verplaatsing langs het glijvlak ten gevolge van dynamische belasting moet kleiner zijn dan de maximale elastische verplaatsing [10].

Eisen tijdens de gebruiksfase:

- Om de stabiliteit te kunnen waarborgen moeten de in de gebruiksfase uitgeoefende trillingen een verwaarloosbaar klein effect hebben op de schuifsterkte van de grond. Een indicatie hiervoor is: amplitude van de versnelling < 1 % versnelling van de zwaartekracht.
- Aanbevolen wordt om de stabiliteitsfactor resulterende uit de stabiliteitsberekening in de situatie met windmolens te laten voldoen aan de hieronder gestelde verhoogde normwaarde. Uitgaande van de eis dat het paalpuntniveau zich op voldoende grote diepte onder het maatgevende glijvlak bevindt, kan een statische stabiliteitscontrole uitgevoerd worden waarin de horizontale kracht uitgeoefend door de windmolensfundering op de ondergrond als extra belasting wordt beschouwd [10].

$$F \geq 1 + 1.5 (F_n - 1)$$

met

$F$  = stabiliteitsfactor tijdens de gebruiksfase van de windmolens

$F_n$  = normwaarde zonder windmolens (bij dijken  $\geq 1.3$ , zie [13])

#### **4.4.3 Bekleding**

De eisen die aan de bekleding van de waterkering gesteld kunnen worden om het plaatsen van windmolens toe te laten, zijn afhankelijk van de locatie van de windmolens in het dwarsprofiel van de waterkering.

Bij plaatsing op het voorland (zone I):

- Rondom de funderingsconstructie moet een beschermingsconstructie (bv bekleding) aangebracht worden om te voorkomen dat het voorland om de voet erodeert. Deze bescherming moet gedimensioneerd worden volgens de hiervoor gebruikelijke methoden waarbij aanbevolen wordt de hydraulische belasting te verhogen met een factor in de orde van 1,5 om de effecten van turbulentie rondom de paal op te vangen.
- De breedte van de strook rondom de constructie dient volgens ontgrondingsvoorspelling bepaald te worden. (Een indicatie is: 100 keer het oppervlak van de funderingsplaat).

Als plaatsing in de overige zones op het talud wordt overwogen:



- De bekleding rond de funderingsconstructie ontwerpen met een verhoogde hydraulische belasting. Een indicatie is een factor in de orde van 1,5.
- De grootte van de zone rondom de funderingsconstructie waar de bekleding extra sterkte heeft kan bepaald worden aan de hand van de volgende indicaties:

op het buitentalud : rondom de constructie tot een afstand gelijk aan de diameter van het funderingsblok met een minimum van 1 m;

op het binnentalud en kruin: rondom de constructie tot een afstand gelijk aan de helft van de diameter van het funderingsblok met een minimum van 1 m;

- Aangeraden wordt de aansluiting van de bekleding op het funderingsblok flexibel uit te voeren om de mogelijk optredende horizontale en verticale deformaties te kunnen opnemen.
- Er moet rekening gehouden worden met het feit dat het ongeveer 4 jaren duurt voordat mogelijke schade aan de grasmat hersteld is.

Bij verwijdering van de windmolen dient de bekleding minimaal op de oorspronkelijke sterkte te worden teruggebracht.

#### 4.4.4 Piping

Weerstand tegen piping wordt bepaald door de doorlatendheid, de korrelvorm, de dikte van de watervoerende laag, de kwellingte onder het grondlichaam en door doorbreking of opbarsten van een aanwezig slecht waterdoorlatende laag.

Het mechanisme piping dient gecontroleerd te worden en er moet aangetoond worden dat dit niet optreedt. Om de gebruikelijke ontwerpregels toe te kunnen passen, moet de weerstand tegen grondwaterstroming langs de paalschacht bepaald te worden. In een veilige benadering kan deze gelijkgesteld worden aan de weerstand tegen grondwaterstroming in het watervoerend pakket.

#### 4.4.5 Zettingsvloeiing (bij een zettingsvloeiingsgevoelig voorland)

Bij een zettingsvloeiingsgevoelig voorland kunnen trillingen extra belastingen op een onbeschermde geulrand veroorzaken waardoor verweking van zand kan worden ingeleid.

Bij een zettingsvloeiingsgevoelig voorland is het raadzaam de windmolen op veilige afstand van de geulrand te plaatsen. Een indicatie hiervoor is een afstand van minimaal 1,5  $\ell$  ( $\ell$  = inscharringsgebied) van de geulrand [10].

In geval van een zettingsgevoelig voorland is het niet aan te bevelen om heiwerkzaamheden tijdens laag water uit te voeren.

---

#### 4.4.6 Kabels

Eisen aan de ligging van kabels in een waterkering zijn vast gelegd in [5]. Hierin wordt onderscheid gemaakt in kabels die de waterkering kruisen en die parallel aan de waterkering lopen:

- Kabels kruisen de waterkering. Bij kruisende kabels is geen kwelscherm benodigd als de kabels over een bepaalde lengte (aanbevolen 3 m) boven het ontwerppeil ligt. De zettingen die optreden gedurende de levensduur van de windmolens moeten hierbij in ogenschouw worden genomen. Indien de kabels hieraan niet voldoen is een kwelscherm noodzakelijk.
- Kabels liggen parallel aan het dijklichaam. In verband met mogelijk optreden van kwel moeten de kabels (inclusief sleuf bij aanleg) meer dan 3 meter van de buitenkruinlijn zijn gelegen. Bovendien moeten de kabels niet worden aangelegd op het buitentalud. Als hieraan niet wordt voldaan moeten de kabels als kruisende kabels worden beschouwd en dienen aspecten zoals kwel en erosie worden beoordeeld.

Het is raadzaam bij aanleg van de kabels in het voorland de invloed op de waterspanningen bij maatgevende omstandigheden, als gevolg van doorsnijding van slecht doorlatende lagen, te onderzoeken.

In het achterland, de berm, het binnentalud en het deel van de kruin dat meer dan 2 tot 3m van de buitenkruinlijn is verwijderd mogen de kabels worden aangelegd mits is voldaan aan de juiste uitvoering. Dit betekent dat tijdens de aanwezigheid van een sleuf de waterkering voldoende stabiel moet zijn en dat de veiligheid tegen opdrijving en piping is gewaarborgd.

Tijdens de uitvoering van de graaf- en aanvulwerkzaamheden moet ervoor te worden gezorgd dat de grond goed wordt verdicht, goed aanvulmateriaal wordt gebruikt en de profielopbouw zoveel mogelijk wordt hersteld.

Het aanleggen van de kabels is maatwerk: in de verschillende gevallen zal een afweging gemaakt moeten worden tussen de consequenties van het bundelen van alle kabels van meerdere windmolens in een grote pijp of het aanleggen van meerdere kleine bundels.

Aanleg en onderhoud van kabels wordt geregeld via een vergunningenbeleid. Aanbevolen wordt hierbij moet rekening te houden met mogelijke toekomstige ophoging van de waterkering.





---

## 5 Conclusies

---

Bij de overweging of tot plaatsing van windmolens wordt overgegaan is het raadzaam eerst te bezien of plaatsing nabij de waterkering mogelijk is (buiten de in de keur gedefinieerde invloedzone). Een fysieke scheiding van de waterkering en de windmolens betekent immers minder strenge eisen en procedures. Wanneer echter plaatsing van windmolens in de invloedzone van de waterkering overwogen wordt, dient in het besluitvormingsproces een afweging gemaakt te worden tussen alle positieve en negatieve effecten van deze plaatsing.

Op **technisch** gebied heeft de aanwezigheid van de windmolens in beginsel een negatieve invloed op de mechanismen die tot falen van de waterkering kunnen leiden. De invloed op de individuele faalmechanismen kan in alle gevallen kwalitatief beschreven worden. Meestal is ook een kwantitatieve beschouwing mogelijk. Meestal is de negatieve invloed te minimaliseren; per faalmechanisme is geadviseerd ten aanzien van te nemen maatregelen.

Vanuit het oogpunt van **beheer** kunnen de gevolgen van de aanwezigheid van windmolens alleen kwalitatief beschreven worden. Windmolens kunnen een vermindering van de toegankelijkheid veroorzaken waardoor het onderhoud van de waterkering en het snel ingrijpen bij calamiteiten wordt bemoeilijkt. Ook kunnen de windmolens (inclusief de bekabeling) een belemmering vormen voor toekomstige aanpassingen (verhoging of versterking) van de waterkeringen.

Een concrete eis is dat de veiligheid van de waterkering door aanwezigheid van de windmolens niet wezenlijk mag verminderen ten opzichte van de waterkering zonder windmolens. Een praktische aanbeveling is om per faalmechanisme de eis te stellen dat de aanwezigheid van windmolens de veiligheid slechts marginaal (orde 1 %) beïnvloedt. In de praktijk blijkt dit kwantitatief moeilijk uit te werken. Op basis van de beschikbare kennis en praktijkervaring is het verstandig om strenge eisen te stellen aan de windmolens, zodanig dat er een zo groot mogelijke garantie is dat de veiligheid nauwelijks wordt aangetast.

Een indeling in zones met classificaties plaatsing 'zeer ongewenst', 'ongewenst' of 'mogelijk onder voorwaarden' is te maken op basis van zowel technische- als beheersaspecten. Het blijkt vanuit meerdere optiek ongewenst te zijn om globaal in de volgens de keur gedefinieerde 'kernzone' tot plaatsing van windmolens over te gaan. In de 'beschermingszone' is plaatsing onder voorwaarden mogelijk.



---

## 6 Referenties

---

- [1] TAW  
"Leidraad voor ontwerp, beheer en onderhoud van constructie en vreemde objecten in, op en nabij waterkeringen"  
Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1976.
  - [2] TAW  
"Leidraad zee- en meerdijken"  
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft 1998.
  - [3] Folkerts, L. en Den Boon, H.  
"Windenergie bij waterkeringen"  
Ecofys en E-Connection 1999 (concept).
  - [4] Ministerie van Veerkeer en Waterstaat  
"Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen"  
Eindrapport van de Commissie Boertien, 1993.
  - [5] TAW  
"Handreiking Constructief ontwerpen"  
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 1994.
  - [6] Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
"Windmolens langs autosnelwegen en de waterkeringen Houtribdijk en Afsluitdijk"  
Rapport 93.264, Delft 1993.
  - [7] Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat - Directie Zeeland  
"Landschappelijke beoordeling van plaatsing van windmolens op Rijkswaterstaatterreinen in Zeeland"  
Middelburg 1994.
  - [8] Fugro Geotechniek B.V.  
"Plaatsing windturbine op de Oostelijke kanaaldijk te Tiel"  
Rapport M-0272 in opdracht van Stichting Betuwind, Tiel 1995.
  - [9] Bouwdienst Rijkswaterstaat, NS Railinfrabeheer.  
"Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen. Beoordeling van veiligheidsrisico's"  
Rapport VRWP-99004, 1999.
  - [10] Fugro Geotechniek B.V.  
"Veiligheidsbeoordeling van plaatsing van windturbines op dijken en dammen"  
Rapport M-0014 in opdracht van NOVEM, Utrecht 1989.
  - [11] Vrouwenvelder, A.CW.M. en Vrijling, J. K  
"Probabilistisch ontwerpen"  
Collegedictaat, TU Delft, Civiele Techniek, 1986.
-

---

[12] TAW  
"Grondslagen voor waterkeren"  
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft 1998.

[13] TAW  
"Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken; deel 1 – boven-  
rivierengebied"  
Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1985.

"Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken; deel 2 – beneden-  
rivierengebied"  
Uitgeverij Waltman, Delft 1989.

[14] TAW  
"Leidraad Toetsen op Veiligheid"  
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft 1999.

---



---

# 7 Bijlagen

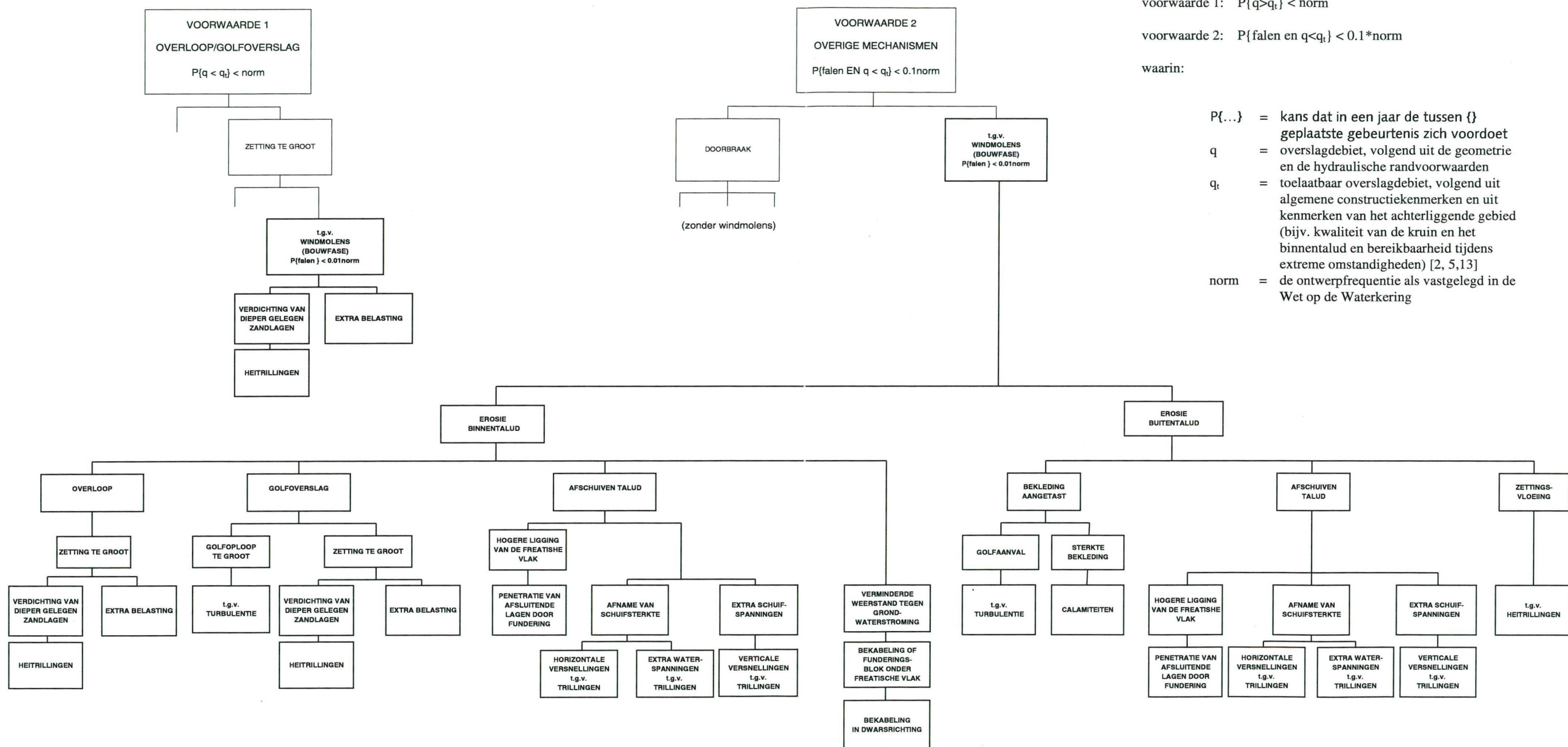
---

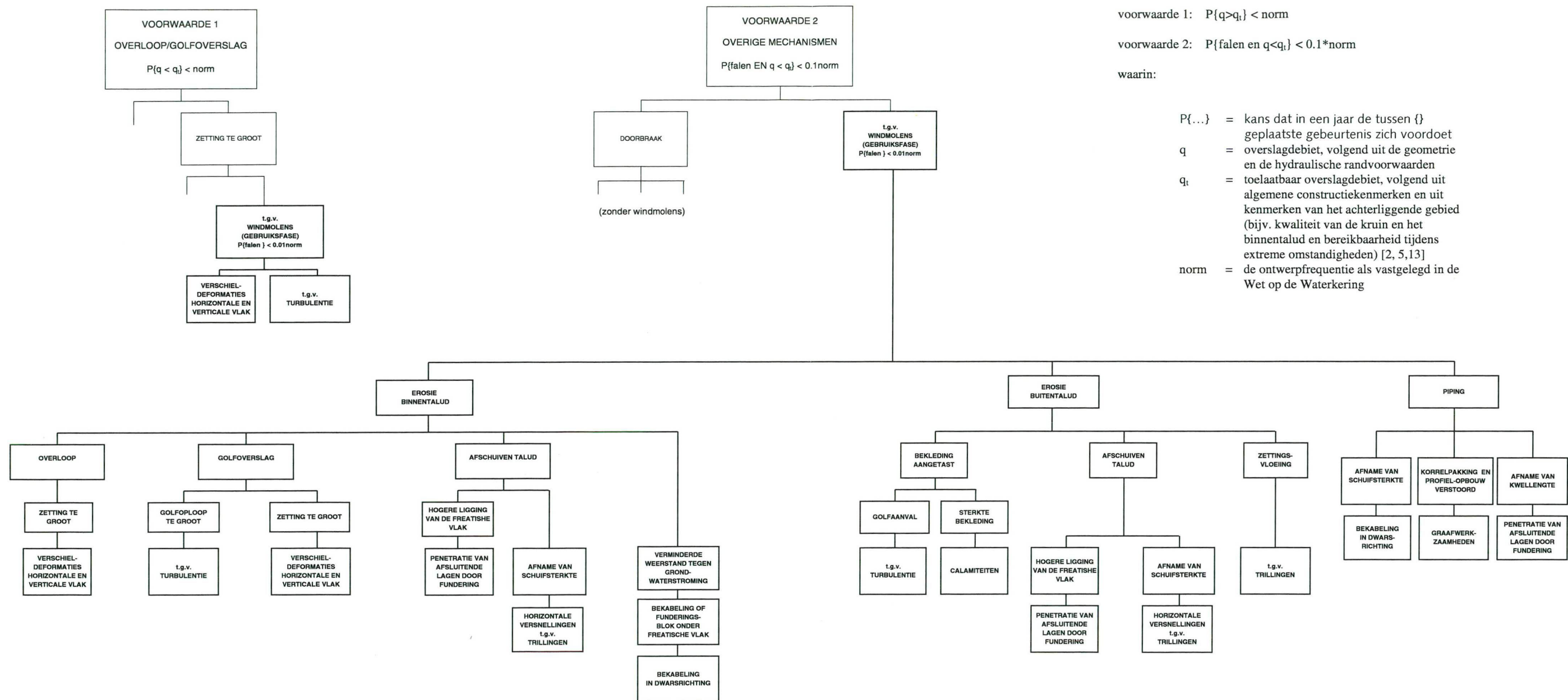
.....

---

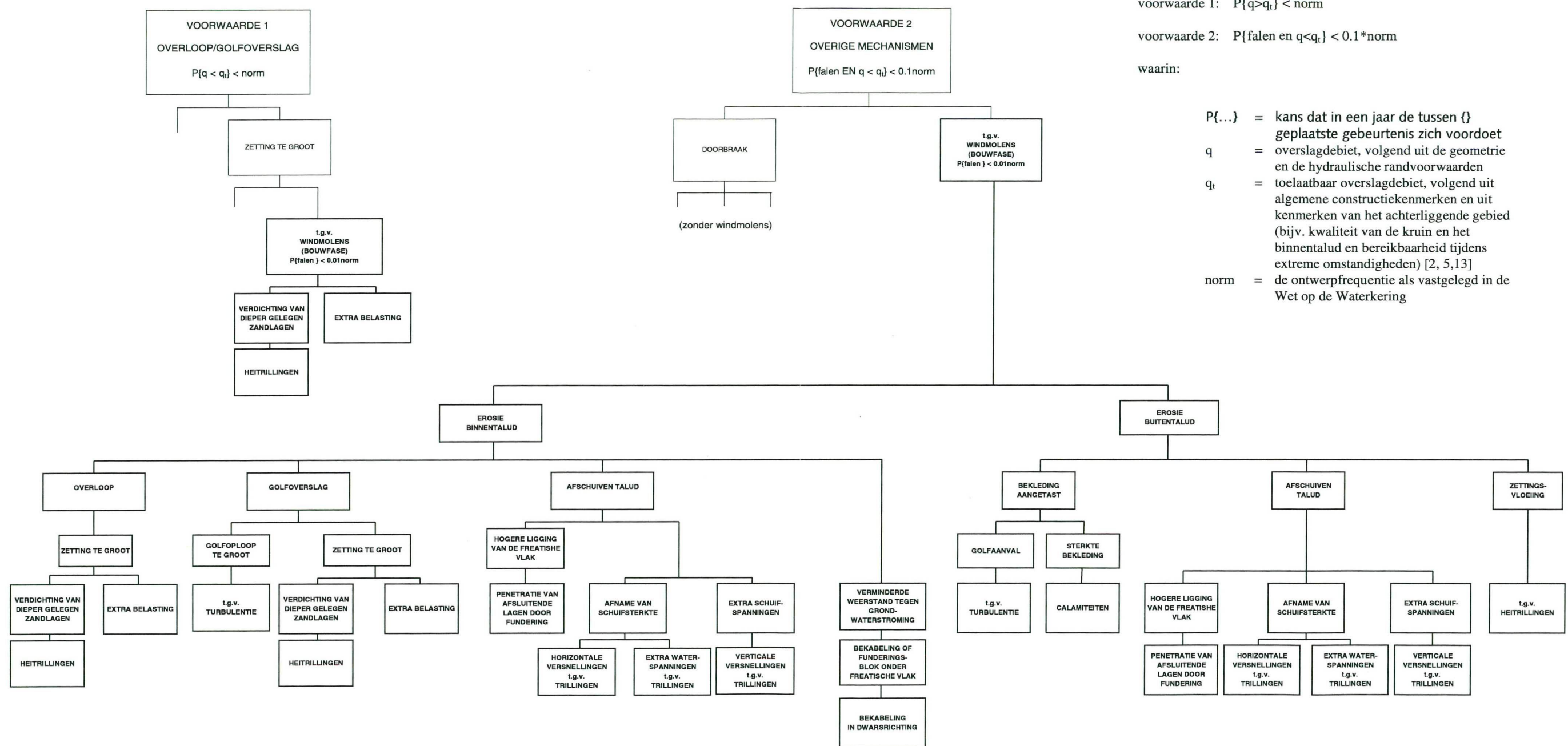
---

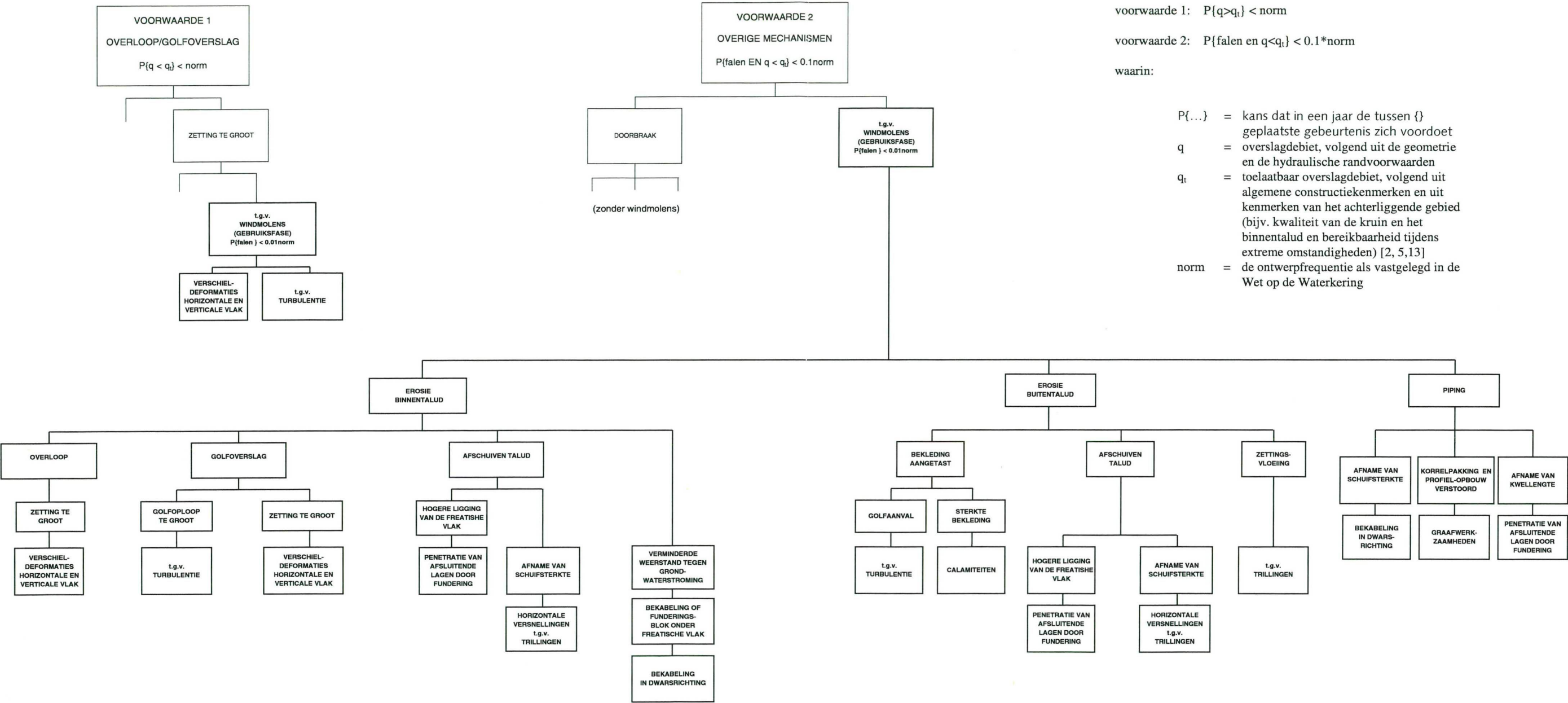












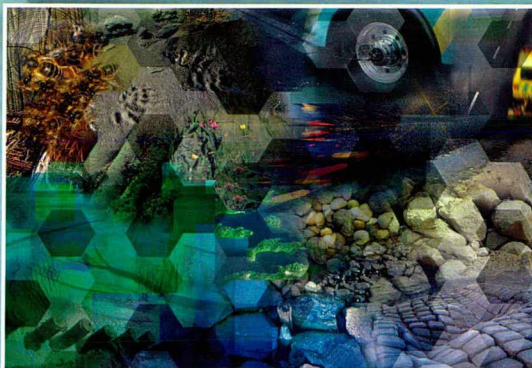
voorwaarde 1:  $P\{q > q_t\} < \text{norm}$

voorwaarde 2:  $P\{\text{falen en } q < q_t\} < 0.1 * \text{norm}$

waarin:

- $P\{\dots\}$  = kans dat in een jaar de tussen  $\{\}$  geplaatste gebeurtenis zich voordoet
- $q$  = overslagdebiet, volgend uit de geometrie en de hydraulische randvoorwaarden
- $q_t$  = toelaatbaar overslagdebiet, volgend uit algemene constructiekenmerken en uit kenmerken van het achterliggende gebied (bijv. kwaliteit van de kruin en het binnentalud en bereikbaarheid tijdens extreme omstandigheden) [2, 5, 13]
- norm = de ontwerprequentie als vastgelegd in de Wet op de Waterkering





De Dienst Weg- en Waterbouwkunde is de adviesdienst van Rijkswaterstaat voor techniek en milieu voor de weg- en waterbouw.

De dienst adviseert, onderzoekt en draagt kennis over in de constructieve weg- en waterbouw, de natuur- en milieutechniek van fysieke infrastructuur, waterkeringen en watersystemen, en de grondstoffenvoorziening voor de bouw, inclusief de milieu-aspecten.

Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat,

Postadres: Postbus 5044  
2600 GA Delft

Bezoekadres: Van der Burghweg 1  
2628 CS Delft,

telefoon (015) 251 83 08

Telefax: (015) 251 85 55

E-mail: [postmaster@dww.rws.minvenw.nl](mailto:postmaster@dww.rws.minvenw.nl)

Internet: [www.minvenw.nl/rws/dww/home/](http://www.minvenw.nl/rws/dww/home/)

Dww publicatienummer:  
W-DWW-2000-081

DWW/AG/12/2000