Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Mobility & Infrastructure

Aan:	Projectteam Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well
Van:	Martin de Kant
Datum:	05 juli 2024
Kopie:	-
Ons kenmerk:	20240705_BJ1000_W3420-3.12_Kasteel risico analyse windworp_C01
Classificatie:	Concept
Gecontroleerd door	Albert Wiggers

Onderwerp: **Kasteel Well – risico analyse windworp**

---

1 Inleiding

Deze notitie maakt onderdeel uit van het voorontwerp Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well, en is een bijlage bij het technisch ontwerp waterkering kasteel (VO) **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**ref 1].

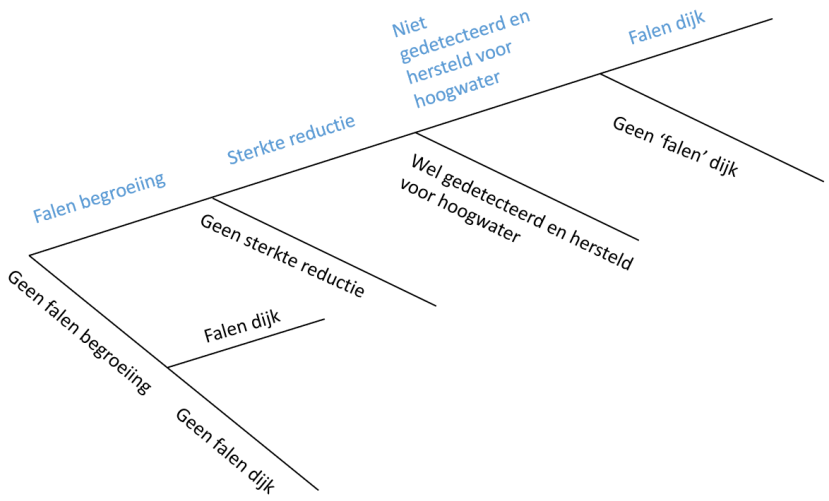
Op de omwalling van kasteel Well staan veel bomen. Deze zijn gezichtsbepalend en van landschappelijke en cultuurhistorische waarde. Een belangrijk uitgangspunt voor het VO maatwerk kasteel Well is dat gezonde en beeldbepalende bomen behouden blijven. Hiermee wordt een risico voor de waterveiligheid geïntroduceerd: bij storm kunnen bomen omwaaien en ontwortelen (windworp) waardoor er ook een kluit grond wordt meegenomen. Dit kan een risico vormen voor de stabiliteit van de waterkering rondom het kasteel. In deze notitie wordt de kans op overstromen bepaald als gevolg van windworp. Deze kans wordt getoetst aan de hiervoor beschikbare faalkansruimte.

Voor de toets op windworp is in eerste instantie de “eenvoudige toets” van het toetsspoor NWO (WBI2017, appendix III) gevolgd met de beoordeling van de invloed van niet waterkerende objecten op de mechanismen die leiden tot falen van de waterkering. Bij deze eenvoudige toets is de aanname dat het object bezwijkt. Omdat (een groot deel van) de begroeiing bestaat uit grote bomen (stamdiameter groter dan 15cm, hoogte groter dan 5m), en het verstoringsprofiel (ontgrondingskuil) binnen het beoordelingsprofiel van de waterkering valt wordt niet aan de eenvoudige toets voldaan, en is een gedetailleerde analyse nodig (toets op maat).
Bij de toets op maat is de ontgrondingskuil als scenario meegenomen in de modelschematiseringen voor de verschillende directe mechanismen [**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** appendix III). Het WBI geeft hiervoor geen stappenplan of regenregels maar verwijst naar verschillende documenten.

2 Systematiek

De beoordeling van de begroeiing is uitgevoerd volgens de systematiek van het “WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen” [ref 9]. Dit raamwerk werkt de algemene werkwijze in het WBI uit door falen expliciet als scenario (direct mechanisme) te beschouwen. De kansen op falen, de sterktereductie en de kans op hoogwater tijdens de herstelperiode geven dan invulling aan de totale scenariokans.

De generieke gebeurtenissenboom (‘faalpaden’) in [ref 9]. dient als basis voor alle verdere beschouwingen en vormt hiermee de basis van het voorgestelde veiligheidsraamwerk.



Figuur 2-1:: Generieke gebeurtenissenboom voor het beoordelen van een waterkering met invloed van een ontwortelde boom en beschouwing van de gelijktijdigheid van windworp en hoogwater (bron: Veiligheidsraamwerk [ref 9]. en aangepast voor begroeiing)

De kans op een overstroming is het product van de kans op het falen van de begroeiing (windworp), de conditionele vervolgkans op hoogwater vóórdat de schade door windworp hersteld is en de conditionele vervolgkans op falen van de dijk ten tijde van dit hoogwater met een overstroming als gevolg. In formulevorm:

$$P_{overstromen\ door\ windworp} = P_{f;windworp} \cdot P_{geen\ herstel} \cdot P_{f;hoogwater} \cdot P_{f;dijk}$$

Waarin

$P_{\text{overstroming door windworp}}$	de overstromingskans door windworp,
$P_{f;\text{windworp}}$	de kans op windworp.
$P_{f;\text{geen herstel}}$	de kans dat de schade niet hersteld is vóór hoogwater
$P_{f;\text{hoogwater}}$	de kans op een hoogwatersituatie waarbij de dijk faalt
$P_{f;\text{dijk}}$	de kans op een overstroming gegeven niet herstelde schade door windworp en gegeven een hoogwatersituatie

De genoemde kansen worden in de navolgende paragrafen uitgewerkt.

3 Uitwerking faalkansen

3.1 Faalkanseis begroeiing (NWO)

De waterveiligheidsnormen zijn wettelijk vastgelegd en gedefinieerd als toelaatbare overstromingskansen per dijktraject per jaar. Het dijkversterkingstraject kasteel Well heeft een maximaal toelaatbare faalkans van 1/100 per jaar (ondergrens norm). De toelaatbare faalkans heeft betrekking op het hele dijktraject en alle mogelijke faaloorzaken. Om de veiligheid van de waterkering met de aanwezigheid van de bomen te kunnen verifiëren zijn er verschillende mogelijkheden. Twee opties zijn beschreven in de KPR factsheet ‘Post overig en indirecte mechanismen’ *[ref 10]*:

1. falen NWO behandelen als ‘direct faalmechanisme’

2. falen NWO behandelen als ‘verzwarende omstandigheid voor het directe faalmechanisme’

In deze analyse wordt uitgegaan van de toelaatbare faalkans op basis van optie 1. De faalkanseis bij optie 1 heeft betrekking op het falen van de waterkering (leidend tot overstroming) als gevolg van het falen van het beschouwde niet waterkerende object, in dit geval het falen van een van de of meerdere bomen.
Als eerste benadering wordt ervan uitgegaan dat een faalkansruimte van 1% voor alle bomen past binnen de beschikbare faalkansruimte van 30% voor "Overige mechanismen" van de toelaatbare kans op overstroming van het dijktraject.
Bij het bepalen van de faalkanseis moet nog rekening worden gehouden met het lengte-effect. Het lengte-effect houdt in dat de faalkans van de dijkring groter is dan faalkans van een doorsnede met de maximale faalkans, omdat belasting en sterkte langs de waterkering kunnen variëren waardoor de belasting als het ware vaker de gelegenheid heeft de sterkte te overtreffen. De formule voor het lengte effect per vak is als volgt:

$$N_{\square} = 1 + \frac{a \cdot L}{b} = 1 + \frac{0{,}8 \cdot 350}{10} = 29$$

Waarin:

N	Factor voor het lengte-effect: op te vatten als het aantal equivalente, onafhankelijke (fictieve) vakken waar het betreffende faalmechanisme een rol speelt.
L	Lengte van het traject (m)
a	Fractie van de trajectlengte die gevoelig is voor het beschouwde faalmechanisme (-). De delen met een harde kering (circa 70m) zijn niet gevoelig voor windworp. Factor a is daarmee 1-70/350 = 0,8.
b	Lengtemaat die de grootte van het lengte-effect binnen de mechanismegevoelige lengte weergeeft (m). Hiervoor wordt 10m aangenomen; het bezwijken van een boom zal naar verwachting een lokaal mechanisme met een breedte van 10m introduceren.

De resulterende faalkanseis voor begroeiing op de omwalling van het kasteel is dan:

$$P_{eis;NWO} = w \cdot \frac{P_{max}}{N_{\square}} = 0{,}01 \frac{0{,}01}{29} = 3{,}5e^{-6}\ per\ jaar$$

Opmerking: De post overige mechanismen is gereserveerd voor faalkansbijdragen die onbekend zijn of niet kunnen worden gekwantificeerd [ref 10]. Als het bovenstaande niet voldoet zou het aandeel van windworp uit deze post kunnen worden vergroot. De vraag is echter tot welke mate dit gerechtvaardigd is. Gunstig is hier dat de dijkring voor het kasteel heel klein is; bij het ontwerp wordt ingezoomd op details die je bij een grote dijkring waarschijnlijk niet zou beschouwen. Het aantal onbekende of niet onderkende mechanismen is daardoor wellicht kleiner dan bij een grote dijkring. Aan de andere kant is het een atypische dijkring. Het gemiddeld aantal bomen per strekkende meter dijk is veel hoger dan gemiddeld. Hetzelfde geldt wellicht voor het aantal (onbekende) historische ondergrondse objecten waarvan de effecten en faalkansbijdragen niet goed kunnen worden gekwantificeerd. Ook moet in de post overig ruimte worden gereserveerd voor dierlijke graverijen en duikers en afsluiters.

3.2 Faalkans windworp

Bomen kunnen omwaaien om vanaf 10 Beaufort, ofwel vanaf circa 24 m/s. De kans dat een boom dan omwaait hangt af van de soort boom, de afmetingen, de ouderdom, het gepleegde onderhoud en van de

vraag of de beplanting gezond is en de groeiomstandigheden voor met name het wortelstelsel gunstig. Het bepalen van deze kans is complex en bevat veel onzekerheden. Uitgangspunt voor de analyse is dat ongezonde en scheefstaande bomen worden verwijderd. In het kader van grof naar fijn wordt er in deze fase nog geen onderscheid gemaakt naar het soort boom, de afmetingen en de locatie van de boom in het dwarsprofiel. Een ander uitgangspunt is dat omwaaien gelijkgesteld wordt aan ontwortelen waarbij een kluit wordt meegenomen. Veel bomen breken eerst voordat ze ontwortelen en dus is dit een veilig uitgangspunt.

Tabel 37-1. Overzicht van verschillende gradaties in stormwinden en de daarmee gepaard gaande effecten op het bos (zie tekst voor nadere toelichting).

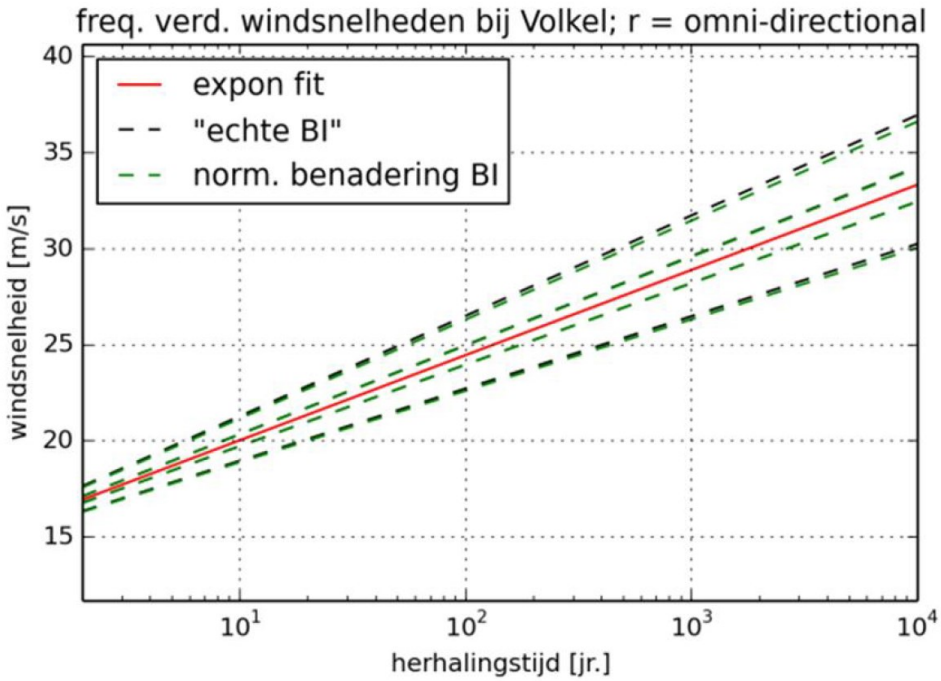
Windkracht [Beaufort]	Windsnelheid [km u^{-1}]	Benaming	Effecten op het bos
8	62 – 74	Stormachtig	Twijgbreuk
9	75 – 88	Storm	Takbreuk / kroonschade
10	89 – 102	Zware storm	Wortelbreuk / lichten / windworp
11	103 – 117	Zeer zware storm	Stambreuk / windworp
12	>117	Orkaan	Stambreuk (torsie) / massale windworp

Figuur 3-1: Uit In hoofdstuk 37 van het boek bosbescherming, ook opgenomen in doc WL

Windkracht [Beaufort]	Omschrijving KNMI	Gem. wind-snelheid	Kenmerken
6	krachtig	10,8 – 13,8 m/s	grote takken bewegen
7	hard	13,9 – 17,1 m/s	bomen bewegen
8	stormachtig	17,2 – 20,7 m/s	twijgen breken af
9	storm	20,8 – 24,4 m/s	takken breken af
10	zware storm	24,5 – 28,4 m/s	bomen ontwortelen
11	zeer zware storm	28,5 – 32,6 m/s	uitgebreide schade aan bossen
12	orkaan	> 32,6 m/s	niets blijft overeind

Figuur 3-2:: uit Stowa rapport [ref 7].

Globaal gezien hebben de bossen in de Nederland ongeveer eens in de 10 jaar een situatie te verduren waarbij schade op kan treden. Vrijwel alle stormen (95% van de stormen tussen 1910 en 2010) deden zich voor in de periode september-maart [ref 11].
De kans op storm op de projectlocatie is kleiner dan de kans op storm ergens in Nederland. De kans op storm in Well is bepaald aan de hand van de rapportage Basisstochasten WBI-2017 van Deltares [ref 12]. Het dichtstbijzijnde meetstation is Volkel. Uitgaande van een Gumbel verdeling is de herhalingstijd van een storm van windkracht 10 op deze locatie ongeveer 100 jaar. Er wordt in deze analyse nog geen rekening gehouden met de windrichting en de locatie van de bomen in relatie tot de windrichting (beschutting).



Figuur 3-3:: Herhalingstijd windsnelheid meetstation Volkel [ref 12]

Het aantal bomen dat bij een maatgevende storm zal omwaaien bij de maatgevende storm is niet bekend. In [ref 7] wordt een kans van 1 á 5% per jaar gegeven. Dit getal wordt dan opgevat alsof er ongeveer eens per jaar (ergens in Nederland) een storm optreedt en daarbij waait dan 1 tot 5 % van de bomen om. De herkomst en onderbouwing van deze percentages is niet bekend. De stormen van 1972, 1973 en 1990 (beide windkracht 11 met extreem zware windstoten) velden in Nederland 1,0 en 0,6 miljoen m^3 hout, respectievelijk circa 1,1% tot 1,9% van de toenmalige totale staande houtvoorraad [ref 11]. Aangenomen wordt dat deze percentages te hoog zijn voor de bomen op de omwalling aangezien zieke en instabiele bomen zullen worden verwijderd. Bovendien gaat het in deze getallen waarschijnlijk om ontwortelen én afbreken van de stam. Het laatste heeft op de veiligheid van de dijk minder impact. Vooralsnog gaan we in de analyse uit dat 1% van de bomen omwaait (ontworteld) tijdens een maatgevende storm van windkracht 10. De kans op windworp $P_{f;windworp}$ per boom per jaar is daarmee:

$$P_{f;windworp} = \frac{1}{100} \cdot 0{,}01 = 1e^{-4}\ per\ jaar$$

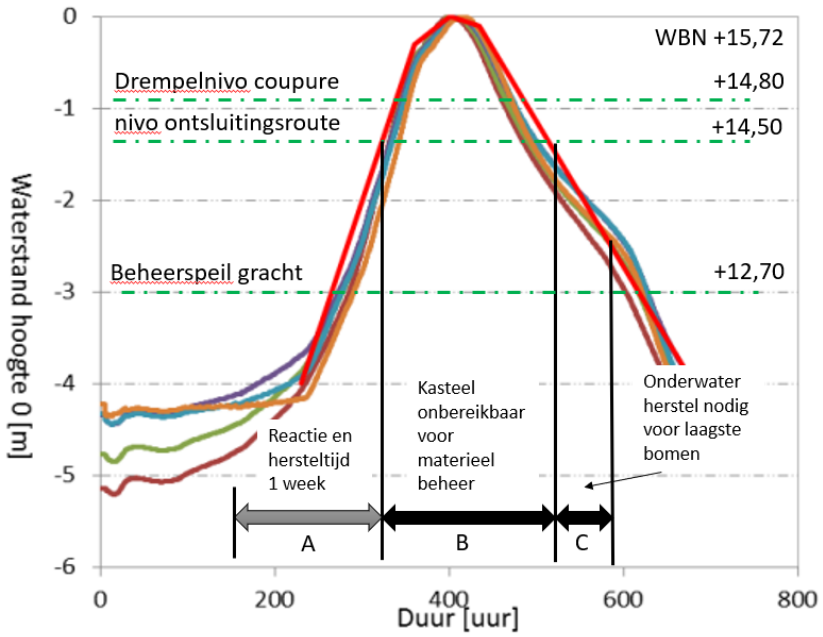
Bij sommige doorsneden staan er meerdere bomen op verschillende locaties in het dwarsprofiel. Dit speelt vooral aan de westzijde van de omwalling. De kans moet dan nog vermenigvuldigd worden met het aantal bomen. Uitgaande van 5 bomen per doorsnede geldt

$$P_{f;windworp} = 5 \cdot \frac{1}{100} \cdot 0{,}01 = 5e^{-4}\ per\ jaar$$

3.3 Faalkans van herstelwerkzaamheden

Als de schade door windworp niet tijdig wordt hersteld, en er treedt vervolgens hoogwater op, dan is de niet-herstelde schade een specifiek risico. Uitgangspunt is dat er geen correlatie is tussen het optreden van een storm en hoogwater in het Maasdal [stowa]. Wel valt de stormperiode (overwegend september tot maart) samen met de hoogwaterperiode. De kans dat storm en hoogwater overlappen is daarmee

groter dan 1/365. Om de analyse eenvoudig te houden wordt dit vooralsnog in rekening gebracht met een factor op de referentieperiode.



Figuur 3-4:: Hoogwatergolf projectlocatie met de periodes waarin geen herstel kan plaatsvinden

(zie bovenstaande figuur). Er is uitgegaan van een duur van het hoogwater van 8,5 dagen waarin het kasteel niet kan worden bereikt omdat de toegangsweg inundeert (boven NAP+14,50) plus 2,5 dag na het hoogwater waarbij herstel niet goed kan plaatsvinden omdat de ontgrondingskuil (van de laagste bomen) zich nog onder water bevindt. Voor de ontdek- en hersteltijd is 7 dagen aangehouden. Uitgaande van gemiddeld één relevante hoogwatergebeurtenis per jaar is de kans op geen tijdig herstel, c.q. geen herstel vóór de hoogwatergebeurtenis, gelijk aan 9,8e-02 per faalgeval.

$$P_{geen\ tijdig\ herstel} = \frac{t_{hoogwater} + t_{herstel}}{f \cdot t_{referentie}} = \frac{(8{,}5 + 2{,}5) + 7}{0{,}5 \cdot 365} \approx 0{,}1\ per\ jaar$$

In de vergelijking is:

$t$herstel	de ontdek- en hersteltijd van de schade door windworp;
$t$hoogwater	de duur van een hoogwatergebeurtenis waarin het kasteel niet kan worden bereikt en/of herstel niet goed kan plaatsvinden;
$t$referentie	de referentieperiode waarin gemiddelde één hoogwatergebeurtenis plaatsvindt (één jaar ofwel 365 dagen);
f	een factor op de referentieperiode voor het aantal maanden met grotere kans dat storm en hoogwater samen optreden. Deze is gesteld op 0,5.

3.4 Kans op hoogwater

Op het moment van schrijven van dit rapport zijn de herhalingstijden van rivierwaterstanden op de locatie van het kasteel, en met de inrichting van de groene rivier nog niet definitief bepaald. Onderstaande

relatie tussen waterstanden en herhalingstijden zijn indicatief maar voldoende nauwkeurig voor deze fase van het ontwerp.

Tabel 3-1:Indicatie van herhalingstijden rivierwaterstanden bij kasteel Well

Herhalingstijd van de topafvoer [jaren]	Waterstand [m..NAP]
2 a 3	13,80
5	14,44
10	14,95
20	15,27
30	15,41
50	15,57
100	15,78

Vanaf waterstanden hoger dan NAP +13,80m (het vloerniveau van de kelder) kan er schade optreden als de dijk bezwijkt. Deze waterstand heeft een kans van optreden van 0,33 á 0,5 per jaar.
Bij hogere waterstanden is de kans dat de dijk bezwijkt door windworp groter omdat een groter deel van het zandlichaam dan verzadigd is. De kans van optreden van deze waterstanden is echter kleiner. Er zijn navolgend 2 situaties beschouwd in de faalkansanalyse:

A. Waterstand NAP +13,80m $P_{f;hoogwater} = 0,5$
B. Waterstand NAP +14,94m $P_{f;hoogwater} = 0,1$

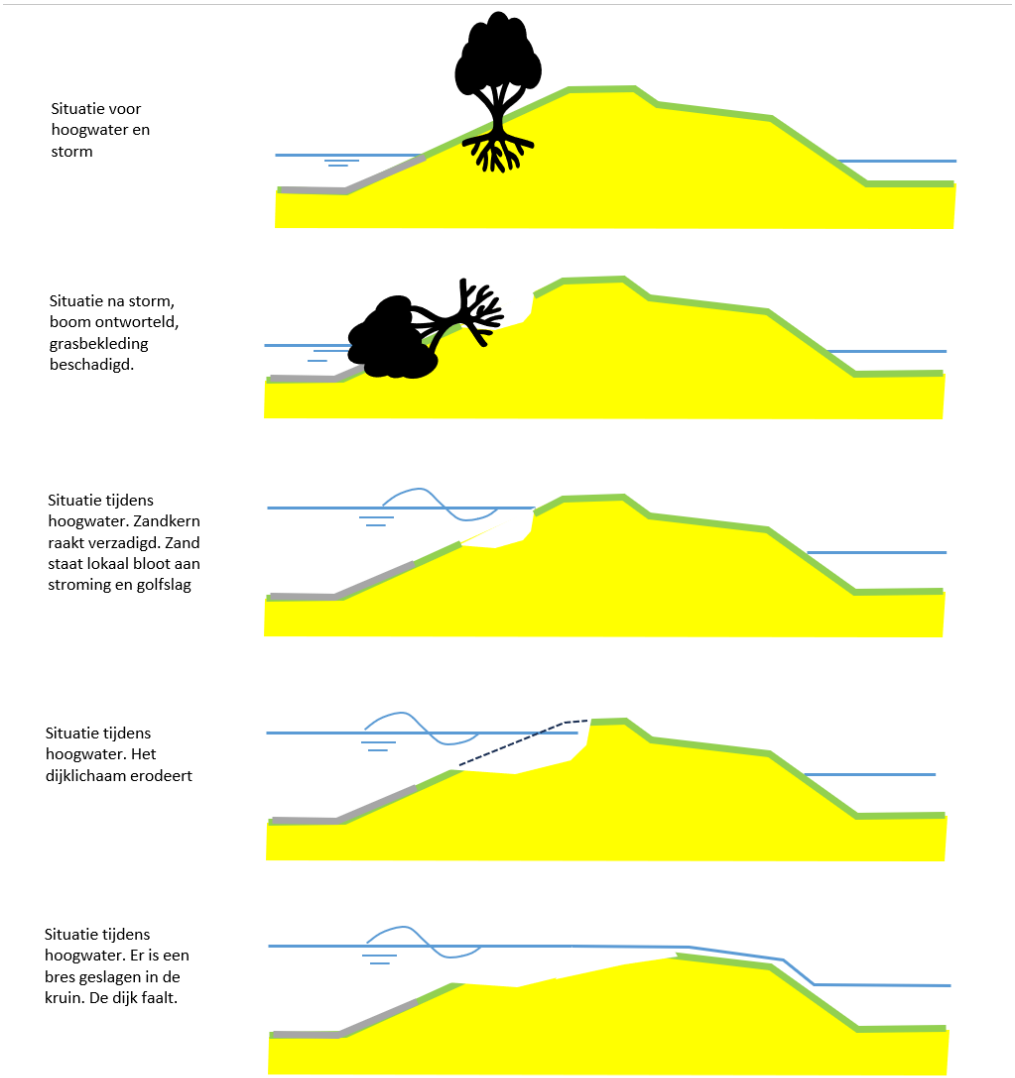
3.5 Kans op falen van de dijk

In de situatie van het kasteel Well is er vooral sprake van bomen op het buitentalud en op en nabij de kruin. Bomen op het binnentalud zullen worden verwijderd zodat een duurzame filterconstructie kan worden aangebracht. In het gedeelte van de omwalling waar piping kan optreden zullen bomen op de binnenberm worden verwijderd. Om deze reden kan de impact van windworp op de macrostabiliteit binnenwaarts, op microstabiliteit en op piping of heave worden uitgesloten. De te beschouwen faalmechanismen zijn:

- Overslag en erosie (GEKB);
- Macrostabiliteit binnenwaarts (STBu);

De beoordeling is uitgewerkt in onderstaande paragrafen.

Overslag en erosie (GEKB)
De dijk is opgebouwd uit zand. Windworp van begroeiing op het buitentalud zorgt voor een ontgrondingskuil. Bij hoge en dikke bomen kan dit een aanzienlijk gat zijn waar de grasbekleding is weggeslagen, de zandkern komt bloot te liggen en wind en golven hebben vrij spel. Dit hoeft nog niet per definitie tot falen van de waterkering te leiden. Bij een lage rivierwaterstand (geval A) is de dijk nog niet verzadigd en heeft het onbeschermde deel nog wat sterkte. De kans op falen wordt hier gesteld op 0,1 ($P_{f;dijk} = 0,1$). Bij hoge waterstanden (geval B) wordt wel aangenomen dat windworp direct tot falen leidt ($P_{f;dijk} = 1,0$).



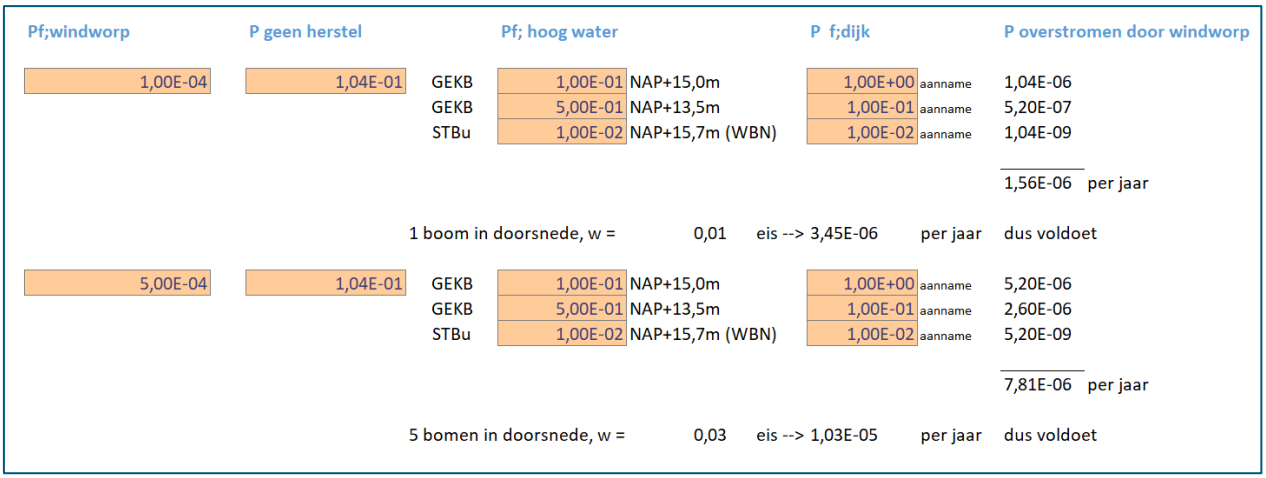
Figuur 3-5: Schetsmatige weergave faaltraject veroorzaakt door windworp op het buitentalud. Windworp initieert GEKB.

Macrostabiliteit buitenwaarts (STBU)
Tenzij bomen helemaal onder in het talud staan heeft een ontgronding in het buitentalud op zich geen ongunstige invloed op de buitenwaartse macrostabiliteit. Er wordt gewicht weggenomen uit het aandrijvende deel van de glijcirkel [ref 7]. Het is echter de vraag of er na de ontgronding een nieuw, voldoende stabiel buitentalud aanwezig is, of dat er opvolgende kleinschalige instabiliteiten op kunnen treden. De kans dat dit uiteindelijk tot falen leidt is echter niet heel groot en dus niet maatgevend voor de analyse.

3.6 Toetsing

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**paragraaf 3.5 zijn de kans op windworp, kans op geen herstel, en faalkans van de dijk per faalmechanisme gecombineerd tot de gebeurtenissenboom voor het falen van de dijk als gevolg van windworp. Uitgaande van één boom per doorsnede is kans op overstromen ten gevolge van windworp ongeveer 1,56 e-6 per jaar. Deze kans is kleiner dan de faalkanseis van 3,5E-06, waarmee de begroeiing voldoet aan de norm. Als er meer bomen in een doorsnede staan zal de

doorsnede rekenkundig al snel niet voldoen. Door echter iets meer faalkansruimte voor het mechanisme windworp te reserveren (3% in plaats van 1%), wordt ook in dat geval wel voldaan.



Pf;windworp	P geen herstel		Pf; hoog water		P f;dijk		P overstromen door windworp
1,00E-04	1,04E-01	GEKB	1,00E-01	NAP+15,0m	1,00E+00	aanname	1,04E-06
		GEKB	5,00E-01	NAP+13,5m	1,00E-01	aanname	5,20E-07
		STBu	1,00E-02	NAP+15,7m (WBN)	1,00E-02	aanname	1,04E-09
							1,56E-06 per jaar
		1 boom in doorsnede, w =		0,01	eis --> 3,45E-06	per jaar	dus voldoet
5,00E-04	1,04E-01	GEKB	1,00E-01	NAP+15,0m	1,00E+00	aanname	5,20E-06
		GEKB	5,00E-01	NAP+13,5m	1,00E-01	aanname	2,60E-06
		STBu	1,00E-02	NAP+15,7m (WBN)	1,00E-02	aanname	5,20E-09
							7,81E-06 per jaar
		5 bomen in doorsnede, w =		0,03	eis --> 1,03E-05	per jaar	dus voldoet

Figuur 3-6: faalkansanalyse windworp voor een situatie met 1 boom in een dwarsprofiel en w=1%, en voor een situatie met 5 bomen in een dwarsprofiel en w=3%.

Met bovenstaande deels kwantitatieve en deels kwalitatieve analyse is aangetoond dat het risico op het falen van de dijk als gevolg van windworp kan worden beheerst. De analyse bevat een aantal aannamen maar deze zijn over het algemeen conservatief ingeschat. Een belangrijke conclusie is dat er een groot dat van het risico kan worden beheerst als er een goed beheersplan is waarbij zieke en instabiele bomen worden verwijderd, en schade als gevolg van ontwortelde bomen snel wordt opgemerkt en tijdig wordt hersteld. De inrichting van de omwalling dient hiervoor de faciliteiten te bieden.

4 Referenties

ref 1. Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well, RoyalHaskoningDHV, BJ1000_W3420-3_Technisch ontwerp waterkering kasteel VO
ref 2. Gebiedsontwikkeling Groene Rivier Well, RoyalHaskoningDHV, BJ1000_W3210-2_TUN Waterkeringen
ref 3. Groenwacht, Inspectierapport kasteel Well, objectnummer GWN11070, 2019
ref 4. Verslag bomenronde kasteel Well, 16 oktober 2023
ref 5. OI2014
ref 6. Veiligheidsraamwerk dierlijke graverijen in waterkeringen, Deltares 2022
ref 7. Stoha 2000
ref 8. BomenT
ref 9. WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen" (Deltares, mei 2018)
ref 10. KPR factsheet 'Post overig en indirecte mechanismen' (KPR, 5 oktober 2016)
ref 11. Invloed van storm op bos MART-JAN SCHELHAAS, BRUNO DE VOS
ref 12. Basisstochasten WBI-2017 Statistiek en statistische onzekerheid, Deltares