

Bijlage

2. Rekenkundige onderbouwing

1 TOETSING WATERVEILIGHEID

1.1 Rekenprofielen

Om aan te tonen dat het verbeterontwerp aan alle gestelde eisen omtrent de waterveiligheid voldoet, zijn er zes representatieve dwarsprofielen opgesteld. Deze dwarsprofielen zijn op basis van de AHN3 [16] gegevens gegenereerd. De lokale AHN3 gegevens zijn in 2017 ingewonnen. Omdat AHN3 alleen het wateroppervlak inmeet, zijn de watergangen aan de hand van leggergegevens [4] en een logische inpassing in het AHN3 profiel geschematiseerd.

1.2 Bodemopbouw

Per dwarsprofiel is een maatgevende bodemopbouw bepaald. Deze bodemopbouw is op basis van het door Fugro opgestelde geotechnisch lengteprofiel voor de kruin en binnenteen van de kering [17] vastgesteld. Een overzicht van de maatgevende bodemopbouw per dwarsprofiel is onder bijlage a toegevoegd.

1.3 Toetsing STBI

Bij het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit wordt het afschuiven van grote delen grond richting de polderzijde van de kering beschouwd. Bij het beoordelen van een regionale waterkering op binnenwaartse macrostabiliteit wordt uitgegaan van maatgevend boezempeil inclusief verkeersbelasting. De stabiliteitsanalyse is uitgevoerd met het programma D-Geo Stability, versie 18.1. Conform de LTVRW [3] is bij de toetsing van de binnenwaartse macrostabiliteit het glijvlakmodel Spencer-Van der Meij gehanteerd.

1.3.1 Resultaten STBI

Allereerst zijn voor het kansrijke alternatief 'Vierkant' zes representatieve rekenprofielen op STBI getoetst. De resultaten van deze toetsing zijn opgenomen in

tabel 1.1. Uit de rekenresultaten blijkt dat dat het standaard profiel met een taludhelling van 1:3 aan de binnenzijde voldoende stabiel is indien wordt opgehoogd met dijkenglei. Enkel binnen dwarsprofiel DWP-2 zorgt de aanwezigheid van de categorie B waterloop aan de binnenzijde er voor dat de kering bij het vierkant ophogen van de kruin niet aan de gestelde stabiliteitseis voldoet. Binnen deze strekking is het niet mogelijk om het binnentalud bij vierkant ophogen te verflauwen. Dit zou er voor zorgen dat de binnendijks gelegen waterloop wordt gedempt. Om het stabiliteitsprobleem op deze strekking op te lossen, is er voor gekozen de kruinlijn 3,00 m in de buitenwaartse richting te verschuiven. In deze situatie voldoet de kering wel aan de gestelde stabiliteitseisen met betrekking tot het toetsspoor STBI.

tabel 1.1: resultaten toetsing STBI

Dijkvak [-]	Dwarsprofiel [-]	F _{berekend} [-]	F _{vereist} [-]	Oordeel [-]
B098c	DWP-1	1,01	0,90	Voldoet
B098d west	DWP-2	1,07	0,90	Voldoet
	DWP-3	1,00	0,90	Voldoet
	DWP-4	1,29	0,90	Voldoet
B098d oost	DWP-5	1,54	0,90	Voldoet

	DWP-6	1,13	0,90	Voldoet
--	-------	------	------	----------------

De hoogte en locatie van de ophoging aan de binnenzijde van de keringen is binnen kansrijk alternatief 2 en 3 exact gelijk. Om deze reden is voor beide varianten één ontwerpberekening per dwarsprofiellocatie voor het toetsspoor STBI opgesteld. Hierin is voor de ophoging met gebiedseigen grond conservatief uitgegaan van de grondsoort Verder is hierbij alleen getoetst op de meest ongunstige dwarsprofiellocaties. Dit zijn de dwarsprofielen waarvan bij de berekeningen van alternatief 1 de laagste stabiliteitsfactor is berekend. De resultaten van de toetsing op STBI voor kansrijk alternatief 2 en 3 zijn in tabel 1.2 weergegeven.

tabel 1.2: resultaten toetsing STBI – Kansrijk Alternatief 'Evenwicht' en 'Afslag'

Dijkvak [-]	Dwarsprofiel [-]	F_{berekend} [-]	F_{vereist} [-]	Oordeel [-]
B098d west	DWP-2	1,37	0,90	Voldoet
	DWP-3	1,42	0,90	Voldoet
B098d oost	DWP-6	1,72	0,90	Voldoet

1.4 Toetsing STBU

Bij het faalmechanisme buitenwaartse macrostabiliteit wordt het afschuiven van grote delen grond richting de boezemzijde van de kering beschouwd. Bij het beoordelen van een regionale waterkering op buitenwaartse macrostabiliteit wordt uitgegaan van een val van het toetspeil naar het streefpeil van de boezem inclusief verkeersbelasting. De gedetailleerde stabiliteitsanalyse is uitgevoerd met het programma D-Geo Stability, versie 18.1. Hierbij zijn de berekeningen uitgevoerd met de methode Bishop.

1.4.1 Resultaten STBU

De toetsing op STBU is uitgevoerd voor twee dwarsprofielen. Deze dwarsprofielen zijn representatief voor de strekkingen waar de meest ongunstige bodemopbouw is aangetroffen. Indien een bepaalde taludhelling in beide dwarsprofielen voldoet, is gesteld dat deze ook binnen de overige dwarsprofielen voldoet. Voor het ontwerp van kansrijk alternatief 2 en 3 is één maatgevend berekening opgesteld, waarbij het buitentalud onder een helling van 1:3 is geschematiseerd. Indien de stabiliteit van het talud aan de gestelde stabiliteitseisen voldoet, mag worden aangenomen dat deze bij een flauwer talud ook voldoet. De rekenresultaten van de toetsing op STBU zijn in tabel 1.3 opgenomen.

tabel 1.3: resultaten toetsing STBU

Dwarsprofiel [-]	Kansrijk alternatief [-]	F_{berekend} [-]	F_{vereist} [-]	Oordeel [-]
DWP-2	1	0,95	0,95	Voldoet
	2 en 3	1,24	0,95	Voldoet
DWP-3	1	1,03	0,95	Voldoet
	2 en 3	0,95	0,95	Voldoet

1.5 Toetsing STPH

Een deel van dijkvak B098d west en heel dijkvak B098d oost zijn binnen de meest recente toetsing op waterveiligheid [7] afgekeurd op het toetsspoor piping (STPH). Omdat de dijkvakken als piping-gevoelig zijn beoordeeld is conform de LTVRW [5] de minimaal benodigde horizontale kwelweglengte berekend. Deze kwelweglengte is aan de hand van de nieuwe rekenregel Sellmeijer zoals beschreven in het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen [15] bepaald. De gebruikte locatiespecifieke grondparameters zijn in tabel 1.4 weergegeven. Deze parameters zijn overgenomen van de gedetailleerde toetsing op STPH uit het rapport ‘Verslag van Toetsing deelgebied Oost’ [7].

tabel 1.4: gehanteerde k- en d_{70} -waarden

Dijkvak [-]	k [m/s]	d_{70} [m]
B098d west	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$
B098d oost	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$

1.5.1 Resultaten STPH

Uit de gedetailleerde berekening op het toetsspoor STPH volgt dat het optreden van piping kan worden uitgesloten indien een minimale horizontale kwelweglengte van 19,00 m aanwezig is. Het ontwerp van de drie kansrijke alternatieven is aan de minimaal benodigde kwelweglengte getoetst. Hierbij is de buitenteen als meest ongunstige locatie van het intredepunt beschouwd en is de teensloot als locatie van het uitredepunt beschouwd. Uit de toetsing van de aanwezige kwelweglengte blijkt dat deze op alle locaties meer dan de minimaal vereiste 19,00 m bedraagt. Dit betekent dat het ontwerp van de kansrijke alternatieven aan de eisen met betrekking tot het toetsspoor piping voldoen en het optreden van piping kan worden uitgesloten.

1.6 Toetsing erosie en afslag

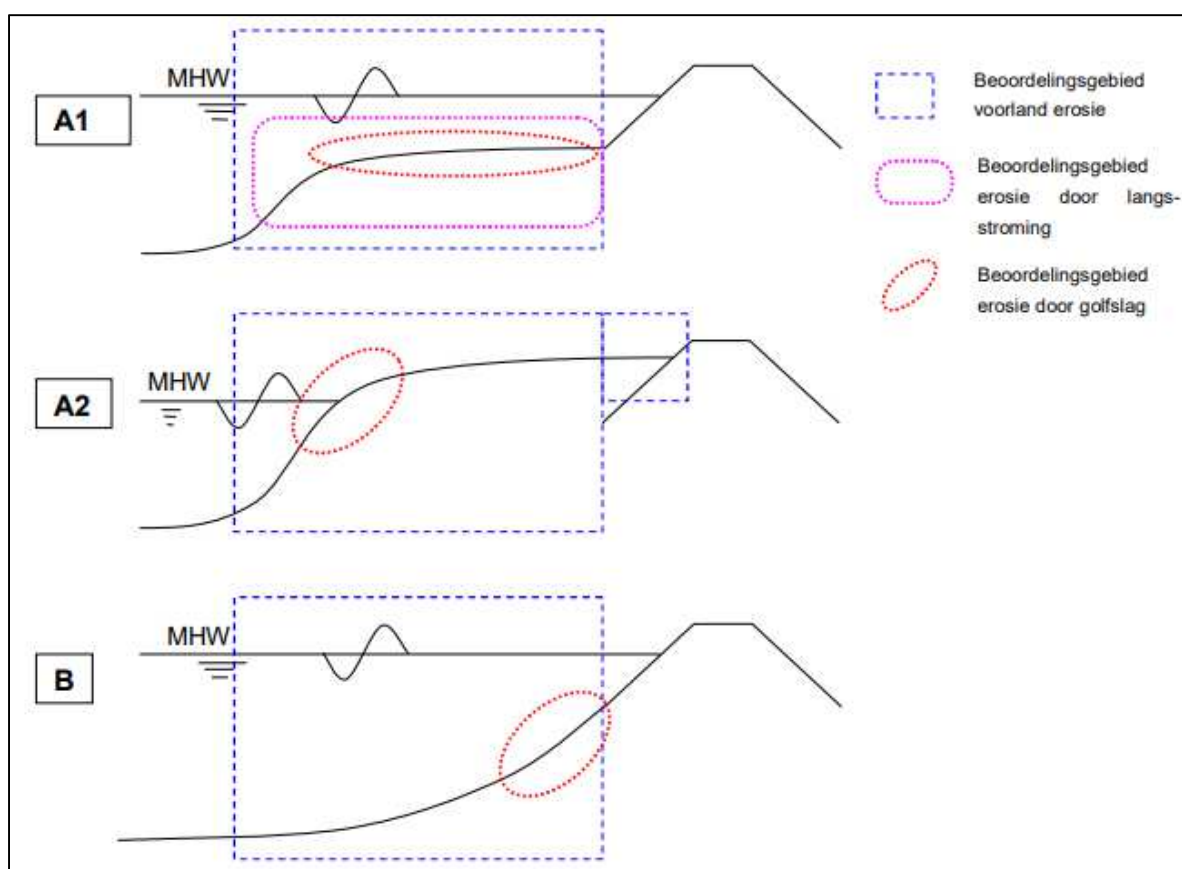
In het ontwerp van de kansrijke alternatieven 2 en 3 is ervan uitgegaan dat de erosiebestendigheid van de aan te brengen grond en de kwaliteit van de grasmat aan de buitenzijde van de kering niet kan worden gegarandeerd. Om te zorgen dat eventueel optredende erosie en afslag de waterveiligheid van de kering niet in gevaar brengt, is het ontwerp van kansrijk alternatief 2 en 3 getoetst en gedimensioneerd conform het rapport ‘SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer’ [11]. De stappen die hiervoor zijn doorlopen, worden in de onderstaande subparagrafen toegelicht.

1.6.1 Bepaling rekenmethode

In de 'SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer' [11] wordt bij het toetsen van het buitendijkse gebied onderscheid gemaakt tussen twee geometrische gevallen, namelijk een:

- A. Dijk met voorland in de vorm van een uiterwaard (A1) of hoogliggend terrein/kwelder (A2), dat periodiek of permanent droog ligt;
- B. Dijk met diep water vlak voor de dijk, zoals bijvoorbeeld een schaaldijk.

De twee geometrische gevallen en de bijbehorende beoordelingsgebied zijn in figuur 1.1 weergegeven. Gezien binnen het ontwerp van kansrijk alternatief 2 en 3 aan de buitenzijde van de kering een voorland wordt aangebracht dat hoger ligt dan MHW valt de geometrische situatie binnen het project verbetering regionale kering traject Weimeren onder situatie A2.



figuur 1.1: beoordelingsgebieden voor geometrische situaties

Conform 'SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer' [11] kan er onderscheidt worden gemaakt tussen de volgende vijf soorten van erosievorming:

- i. Horizontale afslag door golven.
- ii. Erosie door stroming (stabiliteitscriterium).
- iii. Verticale erosie door golven.
- iv. Lokale ontgronding nabij teen van dijken/bijzonder waterkerende constructies.
- v. Lokale ontgronding rondom Niet Waterkerende Objecten (NWO's).

Welk van de bovenstaande vijf soorten van erosievorming getoetst moeten worden, is afhankelijk van het toetsgebied en de geometrie van het voorland. In tabel 1.5 is een overzicht van de te toetsen erosievormen per toetsgebied en voorlandgeometrie weergegeven. Omdat traject Weimeren binnen het benedenrivierengebied ligt, valt het onder de categorie 'overige gebieden'. Dit betekent dat de kansrijke alternatieven aan horizontale afslag door golven en lokale ontgroning nabij de teen van de dijk moeten worden getoetst.

tabel 1.5: te toetsen erosievorming per toetsgebied en voorlandgeometrie

	Bovenrivierengebied					Overige gebieden				
	i	ii	iii	iv	v	i	ii	iii	iv	v
A1	niet	wel	niet	niet	wel	wel	niet	wel	wel	wel
A2	niet	niet	niet	niet	niet	wel	niet	niet	wel	niet

1.6.2 Resultaten horizontale afslag door golven

Conform 'SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer' [11] kan de horizontale afslaglengte ten gevolge van golven met de volgende formule worden bepaald:

$$V_{afslag} = C_E H_s^2 t_{storm}$$

Hierin zijn:

C_E sterkteparameter gras of klei (ms)⁻¹

H_s significante golfhoogte (m)

t_{storm} stormduur (s)

V_{afslag} horizontale afslaglengte (m)

Binnen de berekening van de horizontale afslaglengte is uitgegaan van afslag bij klei met een gestructureerde kwaliteit. De bijbehorende sterkteparameter (C_E) is overgenomen van tabel 5.1 uit 'SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer' [11]. Gezien de kering mogelijk (deels) begraast gaat worden door grote grazers, is het effect van de grasmat binnen de afslagberekening niet beschouwd.

De stormduur en bijbehorende significante golfhoogte zijn overgenomen uit het 'Verslag van Toetsing deelgebied Oost' [7]. Conform de 'Uitgangspuntennotitie Verbetering regionale keringen' is bij de bepaling van de significante golfhoogte rekening gehouden met een T100-afvoer en een T10-windsnelheid. Conservatief is er uitgegaan van een stormduur van 27 uur. Dit is de periode dat er golven groter dan 0,25 m optreden. In werkelijkheid zal de periode waarin een significante golfhoogte van 0,43 m optreedt korter zijn. Een overzicht van de invoerparameters en het rekenresultaat is in tabel 1.6 weergegeven.

tabel 1.6: resultaten berekening horizontale afslag door golven

Materiaal	C_E	H_s	t_{storm}	V_{afslag}
[-]	[ms] ⁻¹	[m]	[s]	[m]
Klei, gestructureerd	1,30E-04	0,43	97200	2,34

Omdat het faalmechanisme STBU een glijcirkel in het voorland genereert, moet een deel van het voorland nabij de teen van het buitentalud gereserveerd worden om de standzekerheid van de waterkering te kunnen blijven garanderen. Om voldoende marge voor afschuivingen van het buitentalud in te bouwen, wordt conform 'SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer' [11] een minimale voorlandbreedte van 10 m gehanteerd. Deze breedte is exclusief de berekende horizontale afslaglengte. Dit betekent dat er binnen het ontwerp van kansrijk alternatief 2 en 3 rekening moet worden gehouden met een minimaal benodigde voorlandbreedte van 12,34 m.

De zomerkade die het peilbeheer van het buitengebied regelt, overstroomt naar verwachting eens in de 10 jaar. Als dit gebeurt, komt het water uit de Mark tegen de kering te staan. Op basis van expert judgement wordt verondersteld dat een dimensionering op één T=100 storm voldoende robuustheid biedt om de waterveiligheid van de kering voor de komende 50 jaar te garanderen. De onderbouwing van dit argument is dat de berekende afslag gebaseerd is op zeer conservatieve uitgangspunten. In de uitgevoerde afslagberekening is de sterkte van de grasmat niet meegenomen in verband met de aanwezigheid van de grote grazers die op de kering lopen. In werkelijkheid zal deze grasmat wel bijdragen aan de erosiebestendigheid van de kering.

1.6.3 Resultaten toetsing lokale ontgroning nabij teen van dijk

Conform de 'SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer' [11] dient bij de toetsing van lokale ontgroning nabij de teen van de dijk rekening te worden gehouden met een maximale ontgrondingskuil welke gelijk is aan de significante golfhoogte (H_s). Voor zowel de boven- als de benedenstroomse steilheid van deze kuil bedraagt 1V:2H.

In paragraaf 1.6.2 is benoemd dat $H_s = 0,43$ m. Dit betekent dat er ter hoogte van bomen nabij de teen van de dijk rekening moet worden gehouden met een ontgrondingskuil van 0,43 m diep en 0,86 m breed. Gezien de zeer ruime afmetingen van het dijkprofiel waar ook een buffer van 10 m breed in is verwerkt om eventuele buitenwaartse afschuivingen op te vangen, wordt het effect van een ontgrondingskuil op de stabiliteit van de kering verwaarloost.

De buitenteen van de dijk bevindt zich in alle gevallen meer dan 19,00 m van de teensloot aan de binnenzijde van de kering. Dit betekent dat het optreden van een ontgrondingskuil geen invloed heeft op het toetsspoor piping, omdat de afstand tussen het in- en uittredepunt te allen tijde aan de in paragraaf 1.5 bepaalde kwelweglengte voldoet.

2 REFERENTIES

- Ref. [1] Nota uitgangspunten technisch ontwerp (VO) – Verbetering regionale keringen, deelgebieden oost en west [Arcadis Nederland, mei 2018]
- Ref. [2] Uitgangspuntennotitie Verbetering regionale keringen, kenmerk 15IT012492
 - a. [WBD, september 2015]
- Ref. [3] Eisen, voorzieningen voor onderhoudbare en bereikbare waterkering of kade – versie 3 [WBD, oktober 2019]
- Ref. [4] Legger – Waterschap Brabantse Delta [Waterschap Brabantse Delta, geraadpleegd op 21 oktober 2019]
- Ref. [5] Leidraad Toetsen Regionale Waterkeringen, BLAUW [STOWA, 2015]
- Ref. [6] Bepaling van toetspeilen voor de regionale keringen langs de Mark-Dintel-Vliet boezem [Douben, K.J. en Majers, J., 2012]
- Ref. [7] Verslag van Toetsing deelgebied Oost – Nadere toetsing deelgebied Oost Waterschap Brabantse Delta [anteagroup, juni 2017]
- Ref. [8] Technisch Rapport Waterspanning bij dijken [Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 2004]
- Ref. [9] Handreiking Ontwerpen en Verbeteren Waterkeringen langs regionale rivieren [STOWA, 2009]
- Ref. [10] Memo WBD Verbetering Regionale Keringen – overgedimensioneerde kering [Arcadis, december 2018]
- Ref. [11] SBW Buitendijkse zones en afslagbeheer [Deltares, 2009]
- Ref. [12] Nota Kansrijke Alternatieven – Verbetering Regionale Keringen Brabantse Delta [Arcadis, oktober 2018]
- Ref. [13] Verordening ruimte Noord-Brabant [Provincie Noord-Brabant, januari 2019]
- Ref. [14] Geofysisch bodemonderzoek polder Weimeren te Prinsenbeek en overige polders project Noordrand Midden [Bodemkwaliteitsbureau Grondslag, mei 2016]
- Ref. [15] Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [Rijkswaterstaat, maart 2012]
- Ref. [16] Actueel Hoogtebestand Nederland [Rijkswaterstaat, geraadpleegd op 12 november 2019 van <https://downloads.pdok.nl/ahn3-downloadpage/>]
- Ref. [17] Lengteprofiel Traject B098 Kruin en Binnenteen [Fugro, juni 2017]
- Ref. [18] Nota van Uitgangspunten – Verbetering regionale keringen traject Weimeren [RPS advies- en ingenieursbureau, 5 februari 2020]
- Ref. [19] Kostennota gemeente Moerdijk, gemeente Steenbergen, gemeente Ettenleur, gemeente Breda – Verbetering Regionale Keringen [Arcadis, september 2019]

Bijlage

a. Schematisering bodemopbouw