

Veiligheidsbeoordeling Lauwersmeerdijk

Concept

Opdrachtgever



Veiligheidsbeoordeling Lauwersmeerdijk

Concept



Concept rapport



Auteurs

G. Pleijter
M. Huis in 't Veld
M. van Montfoort
R. Mom
J. Tigchelaar
G. Dupuits
R. Daggenvoorde
J. Stenfert
J.W. Stijnen



PR3524.40

juni 2018

Samenvatting

Normtraject 6-5 is gelegen langs de Waddenzee en ten noorden van het Lauwersmeer. In de derde toetsronde is het asfalt op het buitentalud van de Lauwersmeerdijk afgekeurd, daarom is de Lauwersmeerdijk geprogrammeerd in het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

Per 1 januari 2017 zijn de nieuwe waterveiligheidsnormen van kracht. In voorliggende studie wordt de waterveiligheidsstatus van de Lauwersmeerdijk (9 km) beoordeeld op basis van deze nieuwe waterveiligheidseisen. Gezien het asfalt op het buitentalud in de derde toetsronde is afgekeurd is dit niet opnieuw beoordeeld. Ook gezien de huidige staat van het asfalt is het overduidelijk dat dit niet voldoet aan de gestelde eisen. De Cleverlingsluizen en de Robbengatsluis zijn daarnaast ook niet beoordeeld in voorliggende veiligheidsbeoordeling (de veiligheid is beoordeeld in een aanvullende analyse).

*Figuur 1
Lauwersmeerdijk
(traject 6-5). Het
deel in het
beheergebied van
Noorderzijlvest loop
van dijkpaal 91.0
t/m 82.0. Het deel
ten westen van
dijkpaal 91.0 wordt
beheerd door
Wetterskip Fryslân*



De veiligheidsbeoordeling laat zien dat:

- Voor de huidige situatie (peildatum 1 jan. 2023) is vooral sprake van een veiligheidsopgave op het buitentalud. Naast het asfalt voldoen de koperslabblokken onder op het buitentalud (ZST) langs het hele traject niet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit geldt ook voor het grootste deel van de betonblokken en klinkers en de buitenwaartse stabiliteit. Als laatste voldoet de Lauwersmeerdijk bij het Vierhuizergat niet voor piping (STPH). Dit omdat door het Vierhuizergat het voorland en de dus beschikbare kwelwel minder groot is.
- Langs het oostelijke deel van de Lauwersmeerdijk en in de haven is de huidige veiligheidsopgave niet beperkt tot het buitentalud. Op het meest oostelijk deel van het traject, tussen dijkpaal 82.0 en 83.5 voldoet de grasbekleding op het binnen- en buitentalud (GEKB en GEBU) niet aan de maximaal toelaatbare kans. Bij de haven van Lauwersoog ontbreekt de kleibekleding op het binnentalud, daarom is bij de haven ook sprake van een opgave voor GEKB. Ook als wel sprake zou zijn van een kleilaag is er

een opgave aanwezig voor GEKB. Als laatste voldoet de binnenwaartse stabiliteit in de haven (STBI) bij dijkpaal 89.9 niet aan de faalkanseis.

- Als klimaatverandering wordt beschouwd, wordt de veiligheidsopgave groter. De opgave voor de grasbekleding op het binnen- en buitentalud (GEKB en GEBU) is het meest gevoelig voor klimaatverandering. In de huidige situatie voldoet het grootste deel (tussen dijkpaal 89.9 en 84.0) van de Lauwersmeerdijk nog wel aan de maximaal toelaatbare kans. In 2075 voldoet het grootste deel van de Lauwersmeerdijk echter niet meer aan de maximaal toelaatbare kans.
- De voorlanden voor de Lauwersmeerdijk zijn stabiel. De kans op afschuiving (VLAF), golfafslag (VLGA) en zettingsvloeiing (VLZV) is verwaarloosbaar.

*Figuur 2
Ligging van de
westelijke
havendam, het
werelderfgoed
centrum en de
binnenhaven aan het
Lauwersmeer*



Werelderfgoed centrum

Voor het huidige zichtjaar voldoet de Lauwersmeerdijk ter plaatste van het (toekomstige) werelderfgoed centrum alleen niet voor buitenwaartse stabiliteit (STBU), de steenbekleding is niet stabiel bij golfaanval (ZST) en er is sprake van een erosie van het binnentalud door golfoverslag (opgave voor GEKB).

Vierhuizergat

Het Vierhuizergat is een getijdengeul net ten oosten van de kop van de Lauwersmeerdijk. De stabiliteit van het Vierhuizergat is beoordeeld omdat deze dienst doet als voorland van de Lauwersmeerdijk. Bij falen van het voorland kan de standzekerheid van de Lauwersmeerdijk zelf mogelijk in gevaar komen. Het Vierhuizergat voldoet in ieder geval tot 2075 aan de maximaal toelaatbare overstromingskans voor golfafslag (VLGA), afschuiving (VLAF) en zettingsvloeiing (VLZV). De faalkans is verwaarloosbaar klein. Langs de Lauwersmeerdijk ter plaatse van het Vierhuizergat voldoen de kopslablokken (ZST) op het benedentalud en de betonblokken en klinkers

boven het asfalt (ZST) in de huidige situatie niet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. Ditzelfde geldt voor buitenwaartse stabiliteit (STBU). Door de ligging van de geul ontbreekt het voorland en is de beschikbare kwelwel minder groot. Daarom is ter plaatse van het Vierhuizergat ook sprake van een opgave voor piping (STPH).

Westelijke havendam

De westelijke havendam reduceert de golfhoogte in de haven en levert daarom een bijdrage aan de waterveiligheidsstatus van de Lauwersmeerdijk. De westelijke havendam is opgenomen in de legger van Waterschap Noorderzijlvest, maar is geen primaire waterkering (bij doorbraak volgt immers geen overstroming).

De beoordeling van de havendam laat zien dat de faalkans van de havendam relatief groot is, tussen de 1/30 tot 1/100 per jaar. Deze faalkans is significant groter dan de faalkans van de achterliggende primaire kering. Tijdens maatgevende omstandigheden voor de primaire kering is falen van (of significante schade aan) de havendam daarom waarschijnlijk.

De havendam heeft invloed op de hydraulische belasting op de primaire kering. De faalkans voor GEKB is zonder de havendam een factor 3 groter. Voor GEBU is de resulterende beoordelingscategorie gemiddeld een klasse hoger. In de huidige situatie heeft de havendam geen invloed op het beoordelingsresultaat van de klinkers (ZST). Dit omdat met havendam al sprake is van de slecht mogelijke score (voor ZST).

Het wordt aangeraden de havendam op te nemen in de scope van het HWBP project Lauwersmeerdijk - Vierhuizergat. Dit vanwege de directe relatie tussen de hydraulische belasting op de Lauwersmeerdijk en de havendam. Dit komt het sterkste tot uiting bij het faalmechanisme GEKB (de hoogteopgave). Verbetering van de havendam kan daarom worden gezien een mogelijk oplossingsrichting in het traject VKA. Indien verbetering van de havendam geen onderdeel uitmaakt van het VKA (en de huidige faalkans van de havendam representatief blijft) raden we in het ontwerp geen rekening te houden met het golf remmend effect van de havendam, maar wel met het golf remmend effect van de haventerreinen. De kans dat de havendam én de hooggelegen haventerreinen volledig wegslaan is als verwaarloosbaar klein verondersteld.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Leeswijzer	2
2	Basiselementen	3
2.1	Overstromingskans in de Waterwet	3
2.2	Hydraulische belastingen	6
2.3	Ondergrondschematisatie	21
3	Veiligheidsbeoordeling	28
3.1	Macrostabiliteit binnenwaarts - STBI	28
3.2	Macrostabiliteit buitenwaarts - STBU	46
3.3	Piping, opbarsten & heave - STPH	53
3.4	Stabiliteit steenzetting - ZST	65
3.5	Grasbekleding erosie kruin binnentalud - GEKB	73
3.6	Grasbekleding erosie buitentalud - GEBU	79
3.7	Grasbekleding afschuiven binnentalud - GABI	89
3.8	Grasbekleding afschuiven buitentalud - GABU	98
3.9	Micro instabiliteit - STMI	104
3.10	Golfafslag voorland - VLGA	104
3.11	Afschuiving voorland - VLAf	109
3.12	Zettingsvloeiing voorland - VLZV	112
3.13	Niet waterkerende objecten - NWO	118
4	Veiligheidsoordeel	143
4.1	Werelderfgoed centrum	144
4.2	Vierhuizergat	144
4.3	Conclusies per beoordelingsspoor	145
5	Reflecties en aanbevelingen	150
6	Referenties	152
A	Afkortingen	155
B	Beoordelingsstrategie	157
C	Schematisering havenprofielen	159
D	Duiding HBN traject 6-5	163
E	Hydraulische belastingen bij de signaalwaarde	167
F	Faalkans en HBN per dijkspaal	171
G	Grondparameters STBI / STBU	173
H	Relevantie van piping (STPH) langs de Lauwersmeerdijk	175
I	Vakindeling geotechnische sporen (STBI, STBU, STPH)	177

J	STBI	179
L	STPH	215
M	Parameterlijst ZST	227
N	Beoordeling Voorlanden (VLGA, VLAF, VLZV)	229
O	Verzadiging van het dijklichaam bij golfoverslag	259
P	Stijghoogte binnenteen bij de waterstand bij de norm	262

1 Inleiding

1.1

Aanleiding

Normtraject 6-5 is gelegen langs de Waddenzee en ten noorden van het Lauwersmeer. De dijk werd in 1969 aangelegd om de Lauwerszee mee af te sluiten. Het westelijk deel van de Lauwersmeerdijk valt binnen het beheergebied van Wetterskip Fryslan en loopt tot aan de Cleveringsluizen. Het oostelijk deel valt binnen het beheergebied van waterschap Noorderzijlvest (NZV) en omvat zowel de groene dijk als de Cleveringsluizen. Direct ten oosten van de Cleveringsluizen ligt de haven van Lauwersoog. Het buitentalud van de Lauwersmeerdijk is bekleed met koperslakblokken en asfalt. Boven de asfaltbekleding ligt een strook betonblokken en klinkers, waarna de grasbekleding begint. Ook de kruin en het binnentalud zijn bekleed met gras.

In de derde toetsronde is het asfalt op het buitentalud van de Lauwersmeerdijk afgekeurd, daarom is de Lauwersmeerdijk geprogrammeerd in het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Per 1 januari 2017 zijn de nieuwe waterveiligheidsnormen van kracht. In voorliggende studie wordt de veiligheid van de Lauwersmeerdijk (9 km) binnen het beheergebied van waterschap Noorderzijlvest beoordeeld op basis van deze nieuwe waterveiligheidseisen (m.u.v. de Cleveringsluizen – zie Figuur 3). Hierbij wordt niet opnieuw gekeken naar het asfalt op het buitentalud, maar naar alle andere mechanismen die tot falen van de waterkering kunnen leiden. De faalmechanismen die betrekking hebben op het asfalt op de buitenzijde worden daarom niet meegenomen in deze beoordeling. Daarnaast wordt de veiligheidssituatie van de Cleveringsluizen in een aanvullende analyse beoordeeld.

*Figuur 3:
Normtraject 6-5
(rode lijn). De scope
van de veiligheids-
beoordeling is
weergegeven met de
groene lijn.*



De veiligheidsbeoordeling vindt plaats in de scope van de voorverkenning van het HWBP project Lauwersmeerdijk. In de veiligheidsbeoordeling is daarom niet alleen gekeken naar de huidige veiligheidssituatie, maar ook hoe deze zich in de toekomst ontwikkelt. Dit om een solide veiligheidsscope te bepalen voor de verkenningssfase van het HWBP project.

Voorliggende rapportage beschrijft de veiligheidsbeoordeling van de Lauwermeersdijk in het beheergebied van waterschap Noorderzijlvest. Hoofdstuk 2 beschrijft de basiselementen in de beoordeling; de norm is toegelicht in paragraaf 2.1, de hydraulische belastingen in paragraaf 0 en de ondergrond schematisatie in paragraaf 2.3.

Hoofdstuk 3 beschrijft de totstandkoming en resultaten van de veiligheidsbeoordeling en de restlevensduur analyse. De beoordeling van de verschillende faalmechanismen is uitgewerkt in de verschillende paragrafen van hoofdstuk 3. In hoofdstuk 5 is het veiligheidsoordeel van de Lauwersmeersdijk beschreven. Hoofdstuk 6 bevat reflecties en aanbevelingen.

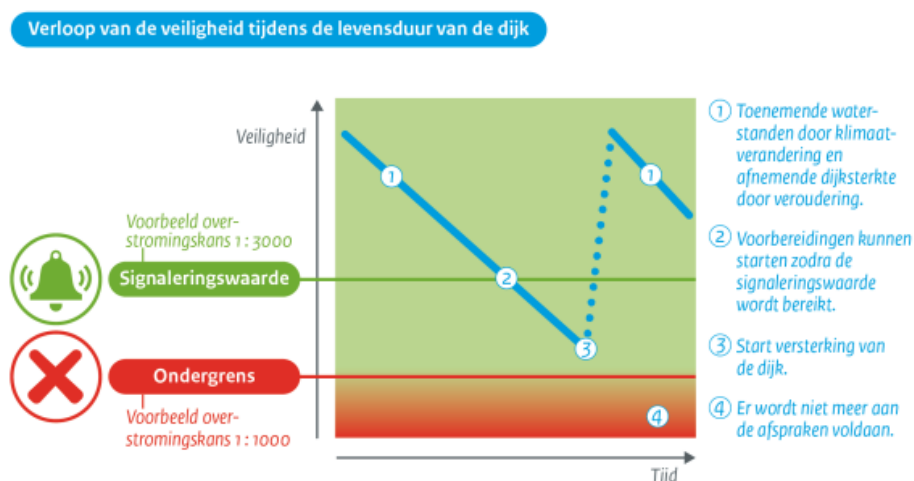
2 Basiselementen

2.1

Overstromingskansen in de Waterwet

Per 1 januari 2017 beoordelen we de veiligheid van de primaire waterkeringen op basis van de overstromingskansenbenadering. Per normtraject zijn twee normgetallen vastgesteld in de Waterwet (Bijlage II en Bijlage III – [RWS – WVL, 2017a]). Dit zijn de signaleringswaarde van de norm en de maximaal toelaatbare kans. De signaalwaarde van de norm stelt waterkering-beheerders in staat de waterkering te 'signaleren' wanneer de waterkering in de nabije toekomst niet meer aan de norm dreigt te voldoen. Hierdoor is voldoende tijd de waterkering te verbeteren voordat de maximaal toelaatbare overstromingskansen wordt overschreden. Deze maximaal toelaatbare overstromingskansen (of ondergrenswaarde) is de norm waar de waterkering altijd aan moet voldoen (Figuur 4).

Figuur 4
Verloop levensduur van de dijk met de signalerings- en ondergrenswaarde (overgenomen van presentatie Min IenM; normering waterveiligheid)



De wettelijke norm voor traject 6-5 is gedefinieerd als een signaleringswaarde van 1/3.000 per jaar en een max. toelaatbare kans van 1/1.000 per jaar (maximaal toelaatbare overstromingskansen). Deze norm is met de voorschriften (Bijlage III van de ministeriële regeling) vertaald naar de faalkanseisen per faalmechanisme op trajectniveau door gebruik te maken van de standaard faalkans-begroting (zie paragraaf 2.1.1). Vervolgens zijn de faalkanseisen per traject (en per faalmechanisme) vertaald naar faalkanseisen per vak of doorsnede, door het lengte-effect in rekening te brengen (zie paragraaf 2.1.2). De signaleringswaarde en max. toelaatbare kans voor normtraject 6-5 zijn in Tabel 1 opgenomen.

Tabel 1
Signalerings- en max. toelaatbare kans voor normtraject 6-5

Normtraject	Signaleringswaarde [per jaar]	Max. toelaatbare kans [per jaar]	Totale lengte	Te beoordelen lengte
6-5	1/3.000	1/1.000	13,4 km	9,0 km

2.1.1

Faalkanseisen per beoordelingsspoor

De faalkansbegroting is de verdeling van de totale faalkansruimte over de verschillende beoordelingssporen. Voor de gedetailleerde beoordeling per vak is de faalkansbegroting voorgeschreven in de Ministeriële Regeling (Tabel 2). Deze standaardfaalkansbegroting is het uitgangspunt voor de veiligheidsbeoordeling in dit project. Bij de beoordeling op maat is het mogelijk deze faalkansbegroting voor een traject te optimaliseren. Deze optimalisatie valt buiten de scope van dit project.

Tabel 2
Standaard
faalkansbegroting

Beoordelingsspoor	Faalkansruimtefactor ω dijken en dammen
Hoogte kunstwerk (HTKW) of Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	24%
Piping (STPH)	24%
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	4%
Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	5%
Overige bekledingen buitentalud	5%
Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)	4%
Piping bij kunstwerk (PKW)	2%
Sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)	2%
Overige beoordelingssporen	30%
Totaal	100%

De faalkanseis per traject $P_{eis,traject}$ [1/jaar] voor het betreffende beoordelingsspoor wordt berekend door de norm van het traject P_{eis} [1/jaar] te vermenigvuldigen met de toegestane bijdrage aan faalkans ofwel de faalkansruimtefactor ω [%] voor het betreffende beoordelingsspoor:

$$P_{eis,traject} = \omega \cdot P_{eis} \quad [I]$$

2.1.2

Faalkanseisen per vak of doorsnede

De faalkanseisen per vak of doorsnede $P_{eis,dsn}$ [1/jaar] worden met de volgende formule bepaald:

$$P_{eis,dsn} = \frac{\omega \cdot P_{eis}}{N_{dsn}} \quad [II]$$

waarbij N_{dsn} [-] de lengte-effectfactor is die de variabiliteit van de dijk beschrijft. Tabel 3 presenteert de waarden van de lengte-effectfactor per beoordelingsspoor voor dijktraject 6-5 (zoals afkomstig uit de assemblagetool).

Tabel 3
Waarden van de
lengte-effectfactor
per beoordelings-
spoor voor
dijktraject 6-5

Beoordelingsspoor	Lengte-effectfactor [-]
STBI	9.8
STBU	9.8
STPH	18.9
STMI	n.v.t.
GEBU	3.0
GABU	n.v.t.
GEKB	3.0
GABI	n.v.t.
ZST	4.0
VLGA	n.v.t.
VLAF	n.v.t.
VLZV	n.v.t.

2.1.3

Uitvoering van de veiligheidsbeoordeling

De veiligheidsbeoordeling van de Lauwersmeerdijk is uitgevoerd om de veiligheidsscope van het HWBP project Lauwersmeerdijk – Vierhuizergat vast te stellen. In deze veiligheidsbeoordeling is niet alleen gekeken naar de huidige veiligheidssituatie, maar ook hoe deze zich in de toekomst ontwikkelt. Dit betekent dat voor de faalmechanismen die op dit moment voldoen aan de maximaal toelaatbare overstromingskans de restlevensduur is bepaald. De restlevensduur is gedefinieerd als de tijd vanaf 2023 totdat de faalkanseis op doorsnedeniveau voor een bepaald faalmechanisme wordt overschreden. Als de faalkanseis op doorsnedeniveau voor het faalmechanisme piping bijvoorbeeld in 2050 wordt overschreden, is de restlevensduur dus 27 jaar. In de veiligheidsbeoordeling is zowel de restlevensduur tot overschrijding van de signaalwaarde van de norm als tot overschrijding van de maximaal toelaatbare overstromingskans bepaald.

Bij het bepalen van het toekomstig veiligheidsoordeel is met twee wijzigingen rekening gehouden ten opzichte van de huidige situatie: (1) klimaatverandering in de vorm van zeespiegelstijging en (2) bodemdaling. De geometrie (bijv. de kruinhoogte, de ligging van de berm of de bekledingsovergangen) zijn verlaagd met de bodemdaling. De inschatting van het waterschap is dat in 2080 sprake is van ongeveer 10 cm bodemdaling (Tabel 4). Dit is een combinatie van autonome bodemdaling en bodemdaling door gaswinning [NZV, 2018a].

Tabel 4
Bodemdaling en
zeespiegelstijging
voor de zichtjaren
2023, 2050 en 2100

Zichtjaar	Bodemdaling [m]	Zeespiegelstijging [m]
2023	0	0
2050	0,05	0,27
2075	0,1	0,52
2100	0,1	0,77

Voor de geotechnische faalmechanismen is bodemdaling verwaarloosd en is alleen rekening gehouden met zeespiegelstijging. Dit is gedaan omdat de onzekerheden over de ligging van de verschillende grondlagen dusdanig groot zijn, dat deze in het niet vallen ten opzichte van de te verwachten bodemdaling van 10 cm tot 2080.

2.2 Hydraulische belastingen

2.2.1 Inleiding

Deze paragraaf beschrijft de bepaling van de hydraulische belastingen voor de proefbeoordeling van de Lauwersmeerdijk. Per dijkpaal zijn voor de zichtjaren 2023, 2050, 2075 en 2100 de volgende grootheden afgeleid:

- Waterstand bij de norm (maximaal toelaatbare overstromingskans of de signaalwaarde van de norm);
- Hydraulische belastingniveaus (HBN) bij $q = 0.1, 1, 5, 10, 20, 50 \text{ l/s/m}$;
- Golfcondities voor bekledingen (gras, blokken en asfalt) per waterstands-niveau.

De hydraulische belastingen langs de Lauwersmeerdijk zijn afgeleid voor dijkpalen 82.0 t/m 90.9 (Figuur 5). Dit is vanaf de 90 graden bocht bij het dijkopslag (Figuur 5) tot aan de Cleverlingsluizen van het Lauwersmeer. Deze spuisluis is geen onderdeel van deze beoordeling. Dijkpalen 89.2 t/m 90.8 bevinden zich in de haven van Lauwersoog. De afleiding van de hydraulische randvoorwaarden voor dit havengebied is nader toegelicht in paragraaf 2.2.6. In de gepresenteerde resultaten is voor de haven uitgegaan van de volledige aanwezigheid van de haventerreinen, inclusief dammen (schematisatie "variant01"). In paragraaf 2.2.6 zijn aanvullende twee alternatieve schematisaties beschouwd. Meer over de schematisatie van de haven is te vinden in paragraaf 2.2.6.

*Figuur 5
Gebieds-
schematisatie*



In Figuur 5 zijn de volgende elementen te zien:

- Het te beoordelen normtraject (rode lijn);
- De haven (oranjegekleurde vlak);
- HR-uitvoerlocaties (blauwe punten);
- Dijkpalen per halve kilometer (groene punten);
- Enkele belangrijke locaties (zwarte punten);

- a. Haven (Lauwershaven)
- b. Vierhuizergat, geul voor de dijk die tot -15,0 m+NAP loopt.
- c. Militair oefenterrein
- d. Dijkopslag
- e. Werelderfgoedcentrum, geplande ontwikkeling
- De gele lijn toont de grens van deze beoordeling, het traject ten oosten van deze lijn hoort bij de beoordeling.

2.2.2

Uitgangspunten

De uitgangspunten voor het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden zijn beschreven in de beoordelingsstrategie (zie Bijlage B). Deze is afgestemd met waterschap Noorderzijlvest. De belangrijkste uitgangspunten zijn getoond in de onderstaande tabellen (Tabel 5, Tabel 6 en Tabel 7).

*Tabel 5
Gebruikte software*

Software	Versie
Ringtoets (Riskeer) t.b.v. GEKB berekening – zie ook paragraaf 3.1.	17.2.1.13333
Hydra-NL (gebruik van de testmodus)	2.3.5

*Tabel 6
Basisgegevens*

Gegevens	Versie
Database fysica	WBI2017_Waddenzee_Oost_6-5_v03

*Tabel 7
Uitgangspunten*

Instelling	Waarde
Zichtjaren, met corresponderende zeespiegelstijging (m)	2017 (-); 2050 (0.27); 2075 (0.52); 2100 (0.77)
Deterministisch overslagdebiet HBN berekeningen	0.1, 1, 5, 10, 20, 50 (l/s/m)
Waterstandsniveaus bekledingen	NAP +0 m tot de maatgevende waterstand behorend bij een overschrijdingsfrequentie getalsmatig gelijk aan de doorsnede-eis (gras / GEBU) of de norm (overige bekledingsmechanismen). Stapgrootte is 0,5 m.
Terugkeertijden (jaren)	10, 30, 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 12.500, 24.610, 30.000, 37.500, 60.000, 66.667, 73830, 79.000, 90.000, 100.000, 180.000, 200.000, 246.000, 300.000, 738.000, 1.000.000
Statistiek	WBI2017-statistiek (zoals standaard opgenomen in Hydra-NL en Riskeer), inclusief statistische onzekerheid
Onzekerheden	Statistiek inclusief statistische onzekerheden (zie bovenstaand) ten toepassing van modelonzekerheden. Dit bij alle HB (waterstand, HBN, H _s , T _{m-1,0} , T _p , golfcondities voor bekleding)
Voorlanden/dammen	Buiten de haven niet relevant
Verhouding T _{m-1,0} / T _p	T _{m-1,0} = T _p / 1,1

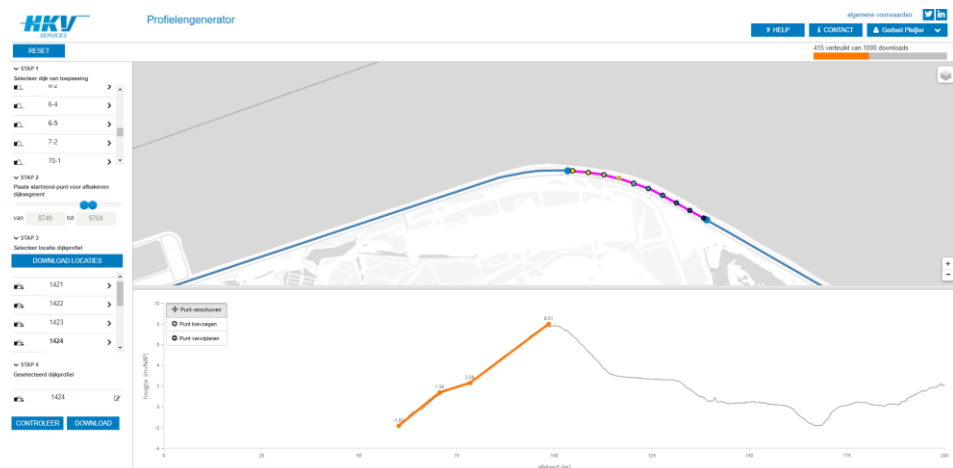
2.2.3

Profielschematisatie

De profielen zijn om de 100 m geschematiseerd conform de schematiseringhandleiding op basis van het AHN2. Hiervoor is ter hoogte van de dijkpaal een doorsnede van de waterkering gegenereerd. Gezien de lage ruimtelijke variatie langs de Lauwersmeerdijk zijn geen aanvullende doorsnedes gecreëerd. Het profiel uit het AHN2 (grijze lijn in Figuur 6) is de basis voor het geschematiseerde profiel. Het geschematiseerde profiel (oranje lijn in Figuur 6) is automatisch gegenereerd conform de schematiseringhandleidingen en vervolgens handmatig gecontroleerd op inconsistenties. Zo nodig zijn de profielen handmatig aangepast.

De kruinhoogte is bepaald op basis van de toegeleverde DTM-data. Per 1 meter is langs de kering een dwarsprofiel bepaald, waarvan het hoogste punt is genomen (de waterkerende hoogte). Van deze hoogste punten van de dwarsprofielen binnen één dijkvak is vervolgens de laagste kruinhoogte binnen elk dijkvak (binnen 100 m) bepaald.

*Figuur 6
Afleiding van
profielen o.b.v. het
AHN2*



Aan de profielschematisatie in de haven is extra aandacht besteedt in verband met de aanwezige haventerreinen. De schematisatie van deze profielen is te vinden in Bijlage C. Voorlanden zijn meegenomen conform de schematiseringshandleiding hydraulische condities bij dijkteen [RWS – WVL, 2016g]. Op basis hiervan zijn de oostelijke kwelders niet als voorland geschematiseerd. Dit omdat de dijkteen niet significant hoger ligt dan de uitvoerlocaties van de database. De golfreductie is meegenomen in de database fysica.

2.2.4

Resultaten

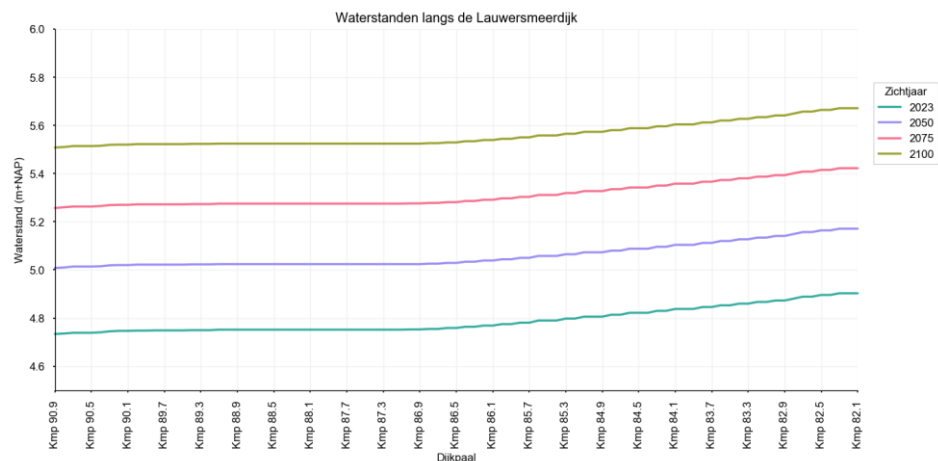
In deze paragraaf zijn de hydraulische belastingen bij de maximaal toelaatbare overstromingskans (ondergrens) beschreven per faalmechanisme. Ook de hydraulische belastingen bij de signaalwaarde van de norm zijn bepaald. In paragraaf 2.2.6 is specifiek gekeken naar het effect van de haven op de hydraulische belastingen. Er zijn verschillende varianten beschouwd: met beide havendammen, zonder oostelijke havendam en helemaal zonder haven. De haven bevindt zich tussen dijklocaties kmp 89.2 en kmp 90.8. In de resultaten in deze paragraaf zijn de hydraulische

randvoorwaarden inclusief beide havendammen gepresenteerd (variant 1 in paragraaf 2.2.6). Deze variant beschrijft de huidige situatie.

Waterstanden

De waterstanden langs traject 6-5 bij de maximale toelaatbare overstromingskans (1/1.000 per jaar) zijn weergegeven in Figuur 7. De waterstanden variëren tussen NAP +4,75 m en NAP +4,9 m voor zichtjaar 2023 en tussen NAP +5,50 m en NAP +5,70 m voor zichtjaar 2100. De waterstandsstijging voor zichtjaren 2050, 2075 en 2100 ten opzichte van 2023 komt overeen met de zeespiegelstijging voor de verschillende zichtjaren.

Figuur 7
Waterstand bij de
max. toelaatbare
overstromingskans
(1/1.000 per jaar)



Hydraulische belastingniveaus

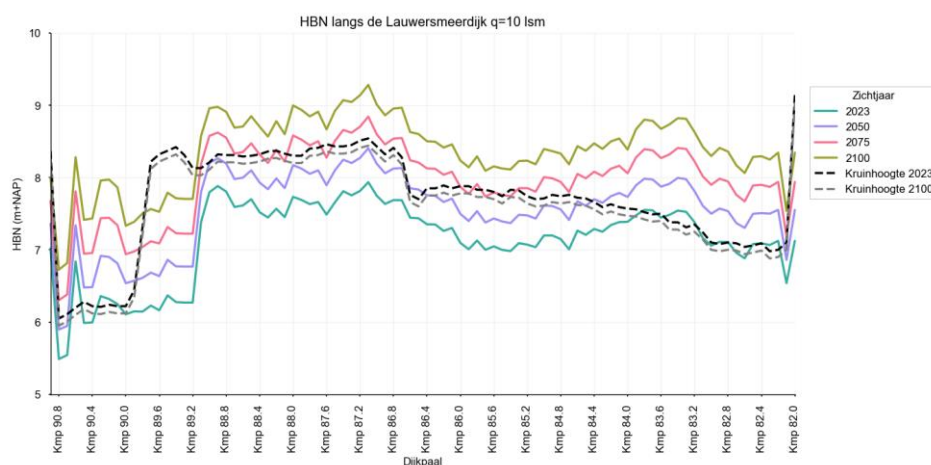
De hydraulische belastingniveaus zijn afgeleid voor een doorsnede-eis van 1/12.500 per jaar voor zes verschillende waarden van het kritiek overslagdebiet (0.1, 1, 5, 10, 20 en 50 l/s/m) en voor de zichtjaren 2023, 2050, 2075 en 2100.

Figuur 8 geeft de hydraulische belastingniveaus bij een kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m weer. Ook zijn de huidige en verwachte toekomstige kruinhoogte in 2100 (door zetting) weergegeven. Het HBN varieert langs het traject tussen circa NAP +5,50 m en NAP +8,00 m voor zichtjaar 2023 en tussen NAP +6,75 m en NAP +9,25 m voor zichtjaar 2100 (bij $q = 10$ l/s/m). Ter plaatse van de haven, waar havendammen en haventerreinen aanwezig zijn, neemt het HBN sterk af. Dit is duidelijk zichtbaar aan de linkerzijde van de figuur. Hier is één piek te zien in het HBN, die overeenkomt met de sluis in de haven. Daar is het voorland veel korter dan de omliggende locaties (zie Bijlage C met een overzicht van de gehanteerde profielen).

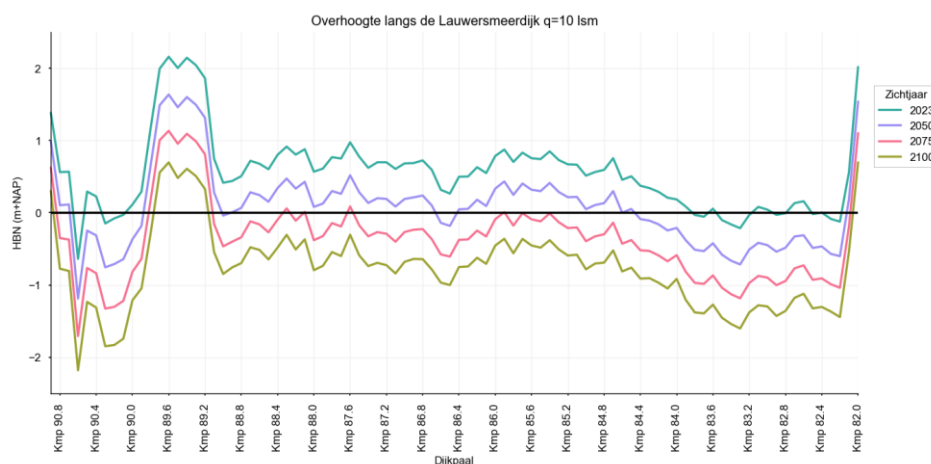
Figuur 9 laat de overhoogte zien (het verschil tussen het HBN en de huidige kruinhoogte; een negatieve waarde betekent dat sprake is van een hoogteopgave). In zichtjaar 2023 ligt het HBN op enkele plaatsen al onder de kruinhoogte. Het betreft vooral de oostelijke kant van het traject en enkele locaties in de haven. Voor zichtjaren 2050 is sprake van een opgave over grofweg de helft van het traject, en in 2075 en 2100 is vrijwel overal langs

het traject sprake van een hoogteopgave. De enige uitzondering is een klein stuk binnen de haven waar sprake is van een hoogteoverschot. Dit wordt veroorzaakt door de hooggelegen haventerreinen die de golfbelasting op de dijk flink reduceren. Het HBN en de maatgevende omstandigheden die leiden tot de weergegeven benodigde kruinhoogtes zijn in meer detail geduid in Bijlage C. Met name op het oostelijk deel van het traject hebben de golven een kleine hoek van golfval. Hier is in meer detail naar gekeken en er is geconcludeerd dat dit valide resultaten zijn. (zie Bijlage D voor meer achtergrond hierover).

*Figuur 8
HBN bij de max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/12.500 per jaar)
bij $q = 10$ l/s/m voor
verschillende
zichtjaren*

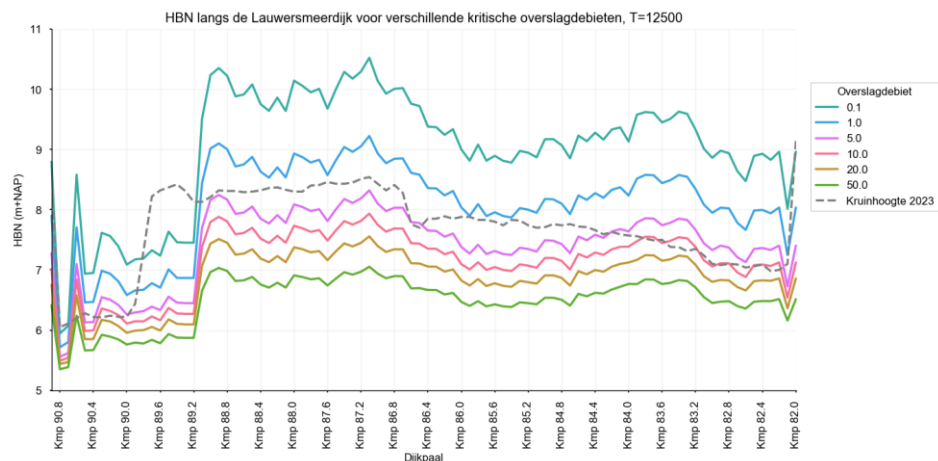


*Figuur 9
Overhoogte bij de
max. toelaatbare
overstromingskans
(1/12.500 per jaar)
bij $q = 10$ l/s/m voor
verschillende
zichtjaren*



Figuur 10 geeft de hydraulische belastingniveaus weer bij verschillende waarden van het kritiek overslagdebiet voor respectievelijk zichtjaar 2023. Het HBN is hoger bij een lager kritiek overslagdebiet, wat overeenkomt met de verwachting. Het verloop van de verschillende overslagdebieten is, zoals verwacht, vergelijkbaar, maar komt steeds dichter bij elkaar te liggen naarmate het kritieke overslagdebiet groter wordt. Met andere woorden het verschil tussen 0.1 en 1 l/s/m is groter dan het verschil tussen 5 en 10 l/s/m.

*Figuur 10
HBN bij de max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/12.500 per jaar)
in 2023 voor
verschillende
overslagdebieten*



Golfrandvoorwaarden voor bekleding

De golfcondities voor bekledingen (asfalt, basalt, blokken en gras) zijn met Hydra-NL bepaald. Hiervoor is in overleg met het waterschap gekozen, om consistentie over de verschillende zichtjaren te behouden (in Riskeer is het nog niet mogelijk om andere zichtjaren dan 2023 door te rekenen). Hierbij zijn per doorgerkend waterstandsniveau de volgende grootheden berekend:

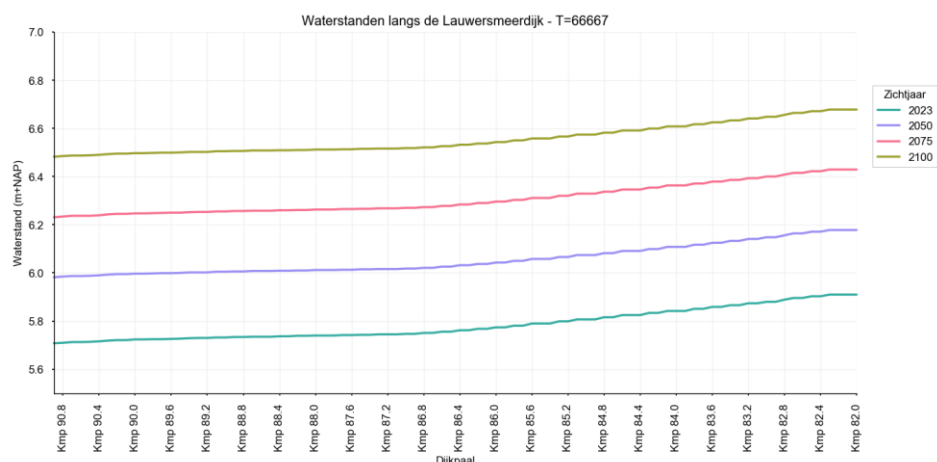
- Significante golfhoogte H_s [m];
- Piekperiode T_p [s];
- Golfrichting [° Noord];
- Hoek van golfinval [°].

In deze paragraaf zijn gepresenteerd:

- Significante golfhoogte en piekperiode voor asfalt, basalt, blokken en gras; bij de maximaal toelaatbare overstromingskans;
- Significante golfhoogte en piekperiode voor gras: faalkanseis op doorsnedeniveau die volgt uit de maximaal toelaatbare overstromingskans (1/66.667 per jaar);
- Het waterstandsverloop in bekledingsmechanismen.

De waterstanden die de overgang van de golfklap naar de golfploopzone van grasbekledingen aangeven zijn weergegeven in Figuur 11. Deze waterstanden zijn afgeleid bij een doorsnede-eis van het mechanisme GEBU van 1/66.667 per jaar. Voor zichtjaar 2023 variëren de waterstanden tussen NAP +5,70 m en NAP +5,90 m en tussen NAP +6,50 m en NAP +6,70 m voor zichtjaar 2100. De waterstandsstijging voor zichtjaren 2050, 2075 en 2100 ten opzichte van 2023 correspondeert met de zeespiegelstijging voor de verschillende zichtjaren.

Figuur 11
Waterstand bij de doorsnede-eis voor GEBU bij de max. toelaatbare overstromingskans (1/66.667 per jaar)

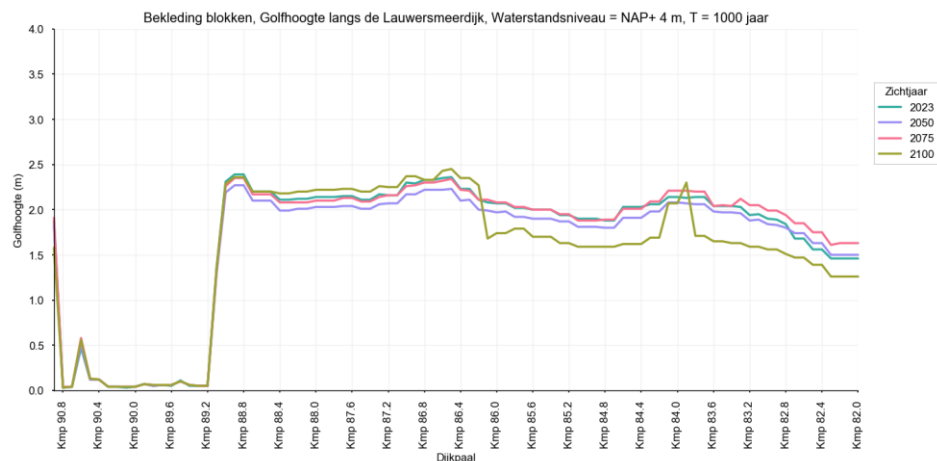


Blokken

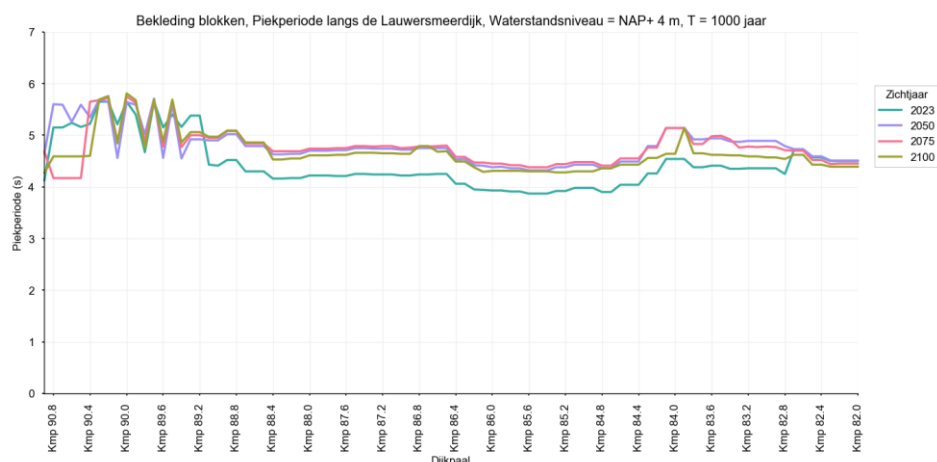
De significante golfhoogten en piekperioden voor betonblokken bij een terugkeertijd van $T = 1.000$ jaar en een waterstandsniveau van NAP +4,0 m zijn weergegeven in Figuur 12 en Figuur 13. De significante golfhoogte bij een waterstandsniveau van NAP +4,0 m en een terugkeertijd van $T = 1.000$ jaar is maximaal ca. 2,0 m. Op locaties met een voorland (in de haven) is een sterke reductie van de golfhoogten zichtbaar.

Figuur 12 en Figuur 13 vertonen een aantal sprongen tussen verschillende dijkpalen, bijvoorbeeld de golfhoogte bij Kmp 86.0 (Figuur 12, zichtjaar 2100, groene lijn). Deze sprongen worden veroorzaakt door de gevoeligheid voor de windrichting van de bekledingsberekeningen. Hydra-NL bepaalt de maximale golfbelasting 'S'. Deze golfbelasting is opgebouwd uit de golfrichting, golfhoogte en golfperiode. Andere omstandigheden (ander zichtjaar, andere dijknormaal, andere randvoorwaarden locatie) kan leiden tot een andere combinatie die leidt tot de maximale golfbelasting. Figuur 12 en Figuur 13 vertonen springerig verloop, dit wordt veroorzaakt doordat een andere combinatie leidt tot de maximale golfbelasting. Om de resultaten te valideren is ook gekeken naar parameter 'S' zelf, deze vertoont wel een vloeiender verloop langs de dijk en neemt altijd toe in de tijd.

Figuur 12
Significante golfhoogten voor betonblokken bij waterstandsniveau NAP +4,0 m en max. toelaatbare overstromingskans (1/1.000 per jaar)



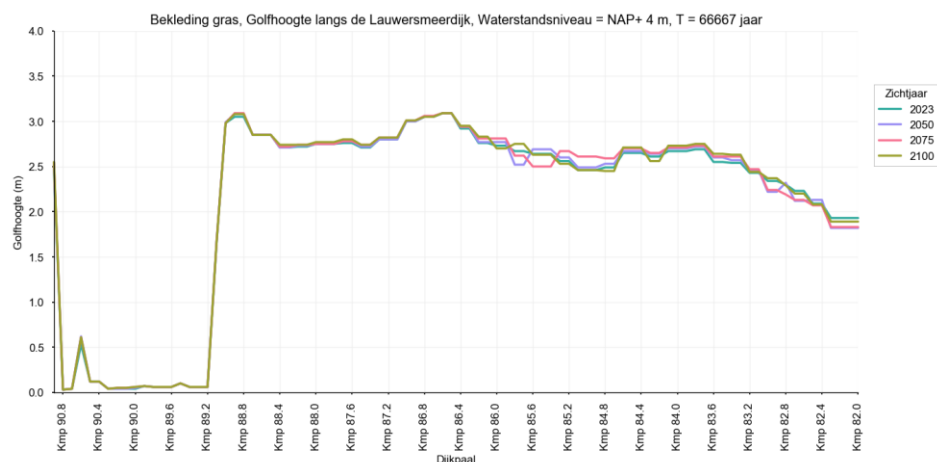
Figuur 13
Piekperioden voor
betonblokken bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/1.000 per jaar)



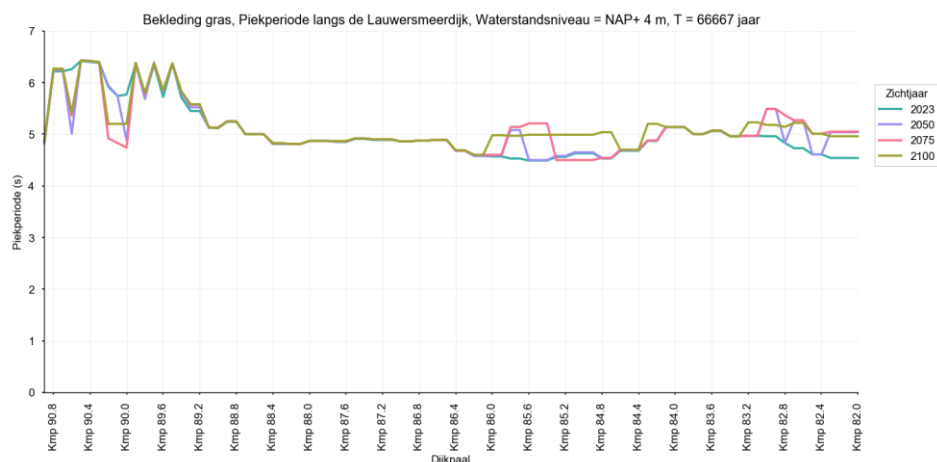
Grasbekleding

De significante golfhoogten en piekperioden voor gras bij een terugkeertijd van $T = 66.667$ jaar (de doorsnede eis) en een waterstandsniveau van NAP +4,0 m zijn terug te vinden in Figuur 14 en Figuur 15. De significante golfhoogte is maximaal 3.2 m. De piekperioden variëren tussen 4,5 en 6,5 s. De haven zorgt wederom voor een sterke reductie van de significante golfhoogten.

Figuur 14
Significante
golfhoogten voor
grasbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en bij
de doorsnede eis
o.b.v. de max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/66.667 per jaar)



Figuur 15
Piekperioden voor
grasbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en bij
de doorsnede eis
o.b.v. de max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/66.667 per jaar)

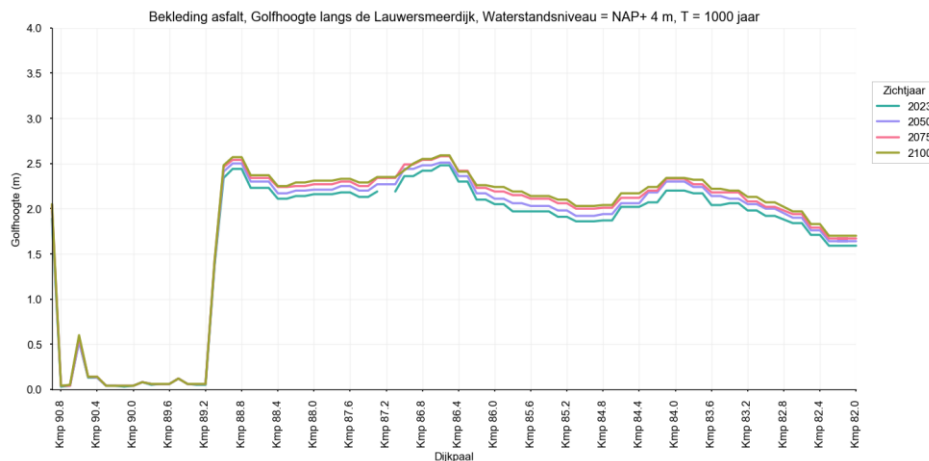


Asfalt

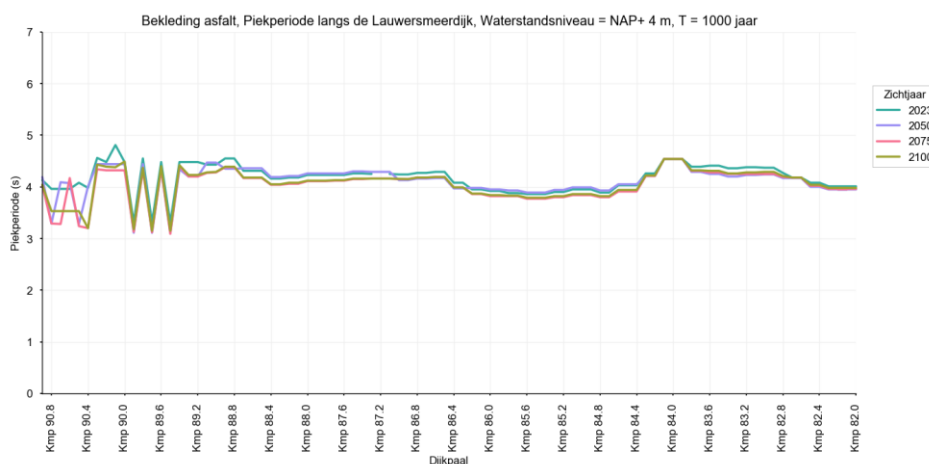
De significante golfhoogten en piekperioden voor asfalt bij een terugkeertijd van 66.667 jaar en een waterstandsniveau van NAP +4,5 m zijn in Figuur 16 en Figuur 17 weergegeven. De significante golfhoogte bij een waterstandsniveau van NAP +4,0 m en een terugkeertijd van 1.000 jaar is maximaal ca. 3,5 m. Op locaties met een voorland (in de haven) is er sterke reductie van de golfhoogten.

Wederom zitten er sprongen en kruisende lijnen in de golfhoogten en piekperioden. Om te controleren of de resultaten valide zijn is er wederom gekeken naar de golfbelasting 'S'. Deze parameter neemt consequent toe voor toenemende zichtjaren, wat er op duidt dat de golfbelasting inderdaad toeneemt. Dat betekent dat een combinatie van golfrichting, piekperiode en golfhoogte dus altijd zorgt voor een toename van de belasting op de bekleding, zelfs als het verloop van een individuele parameter wat springerig oogt.

Figuur 16
Significante
golfhoogten voor
asfaltbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/1.000 per jaar)



Figuur 17
Piekperioden voor
asfaltbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/1.000 per jaar)

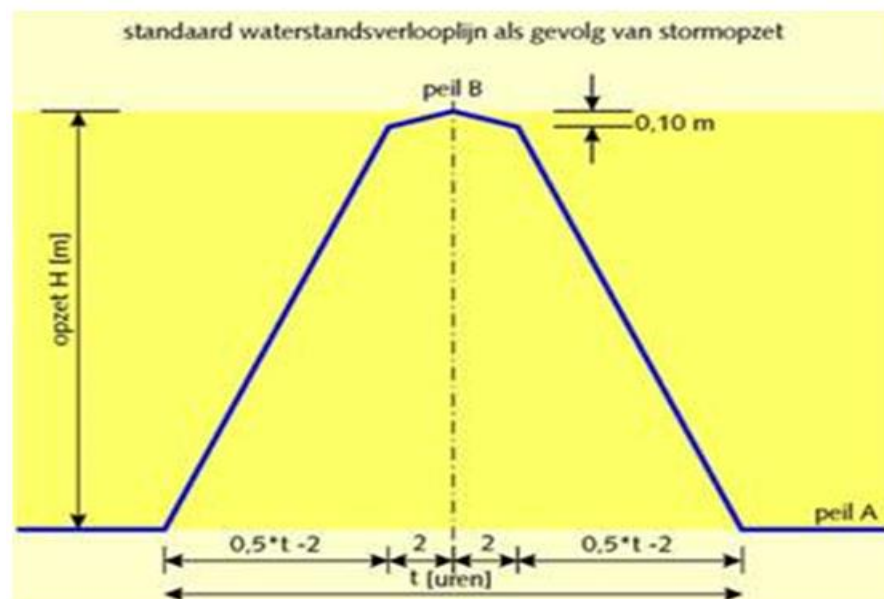


Waterstandsverlopen voor bekleding

Voor het beoordelingsspoor GEBU is het waterstandsverloop afgeleid¹. Het waterstandsverloop bestaat uit de gemiddelde buitenwaterstand en het verloop van de stormopzet. De gemiddelde buitenwaterstand vormt de basis van het waterstandsverloop waarop het stormopzetverloop is gesuperponeerd. Voor de Waddenzee is conform de Schematiseringshandleiding grasbekleding een standaardverloop van de stormopzet gehanteerd. Dit verloop bestaat uit 4 lineaire op elkaar aansluitende stukken (zie onderstaande figuur):

- van de gemiddelde buitenwaterstand (peil A) aan het begin van de storm tot de maximale opzet -0,1 m op 2 uur vóór het tijdstip halverwege de storm;
- van de maximale opzet -0,1 m vóór het tijdstip halverwege de storm tot de maximale opzet op het tijdstip halverwege storm;
- van de maximale opzet op het tijdstip halverwege storm tot de maximale opzet -0,1 m op 2 uur ná het tijdstip halverwege de storm;
- van de maximale opzet -0,1 m op 1 uur ná het tijdstip halverwege de storm tot 0 aan het eind van de storm;

Figuur 18:
Schematische
weergave
waterstandsverloop.



In de figuur zijn de volgende parameters gehanteerd:

- Peil A = gemiddelde buitenwaterstand [NAP+m];
- Peil B = maximale opzet + getijde amplitude [m] = waterstand bij doorsnede-eis (GEBU);
- t = stormopzetduur = 45 uur;

Het waterstandsverloop voor het beoordelingsspoor ZST is geïmplementeerd in de voor de gedetailleerde beoordeling per vak te gebruiken software.

¹ Het waterstandsverloop conform de 'waterstandsverloop tool' zoals beschikbaar is Helpdesk Water (ftp-server van het WBI2017) is niet correct.

2.2.5

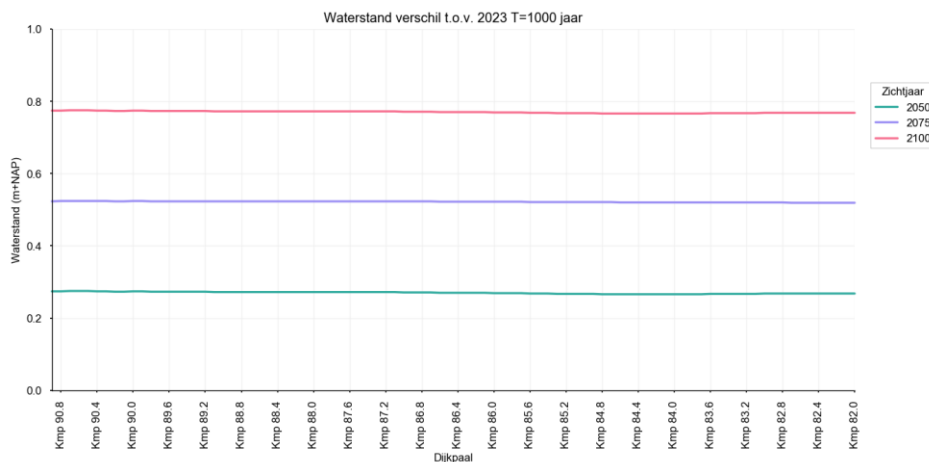
Verschilanalyse

In de verschilanalyse is het waterstandsverschil en het verschil in hydraulisch belastingniveau (HBN) beschouwd ten opzichte van het referentiejaar 2023.

Waterstandsverschillen

Door klimaatverandering neemt de zeewaterstand toe. Conform de uitgangspunten is dit 0,27 m in 2050, 0,52 m in 2075 en 0,77 m in 2100. We zien dat de zeespiegelstijging direct doorwerkt in de waterstandsverschillen t.o.v. van zichtjaar 2023 (Figuur 19).

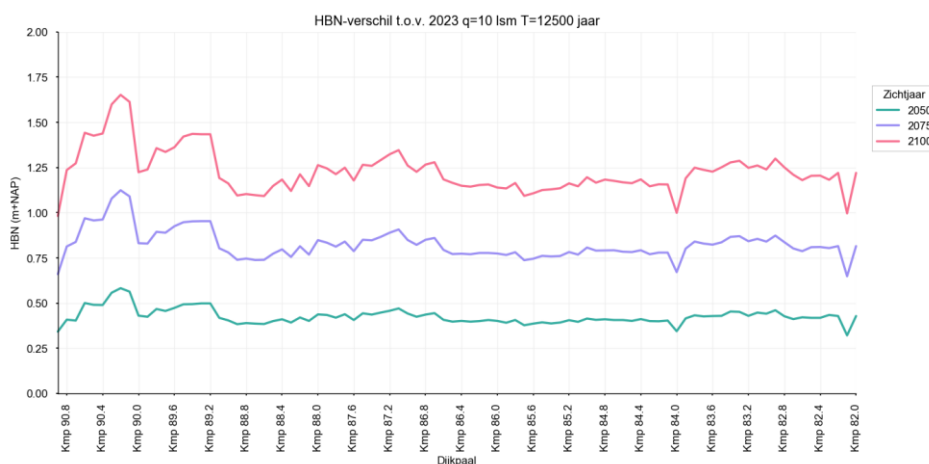
*Figuur 19
Waterstands-
verschillen t.o.v.
2023 bij de max.
toelaatbare
overstromingskans
(1/1.000 per jaar)*



HBN verschillen

De HBN verschillen t.o.v. van het zichtjaar 2023 zijn weergegeven in Figuur 20. De stijging van het HBN in toekomstige zichtjaren is groter dan de zeespiegelstijging. Dit komt omdat bij hogere waterstanden sprake is van minder golfbreking en dus hogere golven. Hierdoor neemt het HBN wat meer toe ten opzichte van de waterstand c.q. zeespiegelstijging.

*Figuur 20
HBN verschillen bij
een overslagdebiët
van 10 l/s/m t.o.v.
2023 bij de
doorsnede-eis o.b.v.
de max. toelaatbare
overstromingskans
(1/12.500 per jaar)*

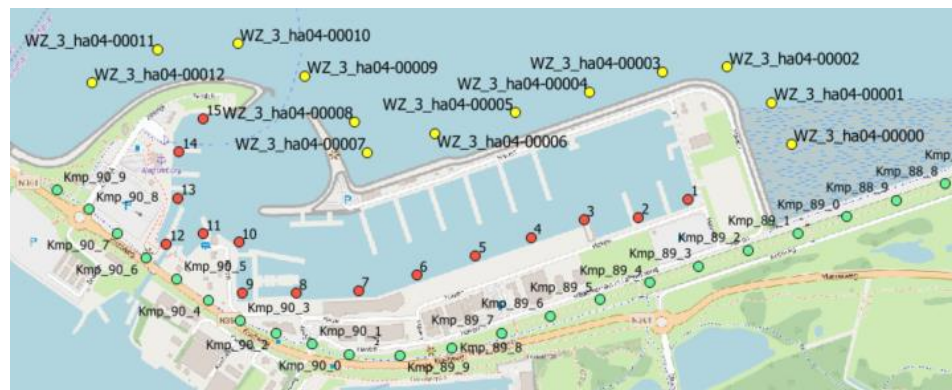


2.2.6

Gevoeligheidsanalyse HR-Haven

De hydraulische randvoorwaarden in de haven van Lauwersoog zijn nader geanalyseerd. Dit omdat het gedrag van golven in havens meer detail vereist dan op dit moment mogelijk is met de bestaande databases vanuit het WBI2017. De golven in de haven zijn geanalyseerd met behulp van de HB-Haventool die door RWS hiervoor is vrijgegeven [HKV, 2017]. Met dit softwarepakket is een vertaling gemaakt van de WBI-uitvoerlocaties rondom de haven (gele punten) naar nieuwe uitvoerlocaties in de haven (rode punten) conform de rekenregels uit het technisch rapport golfbelastingen in havenbekkens [RWS – WVL, 2004]. Figuur 21 toont de ligging van de oorspronkelijke en de nieuwe uitvoerlocaties die zijn bepaald met behulp van de haventool. Deze zijn gedefinieerd aan de teen van het haventerrein, met tussenliggende afstanden van 100 meter. Het golfreducerende effect van het haventerrein is meegenomen door dit te schematiseren in het dwarsprofiel van deze locaties. Merk op dat de tool alleen de effecten bepaalt van de havendammen op de golven, de waterstanden worden niet aangepast.

*Figuur 21
Dijkpalen (groen),
WBI-locaties (geel)
en nieuwe locaties
(rood)*



Om de gevoeligheid van de schematisatie van de haven en de bijbehorende rekenmethode te evalueren, zijn voor drie verschillende varianten de waterstanden, HBN's en bekledingsrandvoorwaarden afgeleid. In de volgende paragrafen zijn de resulterende waterstanden en het HBN weergegeven. Op basis van deze analyse is een keuze gemaakt welke schematisatie van de haven gebruikt moet worden voor het verdere project. Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24 laten de verschillende onderzochte varianten zien. Deze varianten zijn vastgesteld in overleg met het waterschap en vastgelegd in de beoordelingsstrategie (zie Bijlage B):

- Variant 1: huidige situatie. In de schematisatie is de westelijke en een oostelijke havendam meegenomen (Figuur 22). Deze situatie is gelijk aan de huidige situatie.
- Variant 2: geen haven. Dit is een situatie zonder haven waarbij het dijkprofiel een berm van 5 m breed bevat op de hoogte van het huidige haventerrein (Figuur 23).
- Variant 3: geen oostelijk havendam. In deze situatie is alleen de westelijke havendam aanwezig en geen oostelijke havendam (Figuur 24). Dit omdat de standzekerheid van deze oostelijke havendam niet gegarandeerd kan worden, hij is namelijk niet opgenomen in de legger van het waterschap. De haventerreinen zijn geschematiseerd als voorland

per dijkprofiel. Aan de oostkant in variant 3 is het haventerrein korter gemaakt door het net zo lang te maken als de rest van het gebied binnen de oostelijke haven.

De HB-haventool is gebruikt voor varianten 1 en 3 (Figuur 27). In variant 2 wordt golfbreking door de havendammen niet meegenomen, daarom zijn de uitvoerlocaties buiten de haven gebruikt (Figuur 28).

De profielen bij de verschillende varianten (ter plaatse van Kmp 89.2) is weergegeven in Figuur 25. Overige schematiseringskeuzes voor de dwarsprofielen zijn te vinden in Bijlage C "Profielschematisatie haven".

*Figuur 22
Havenvariant 1,
huidige situatie*



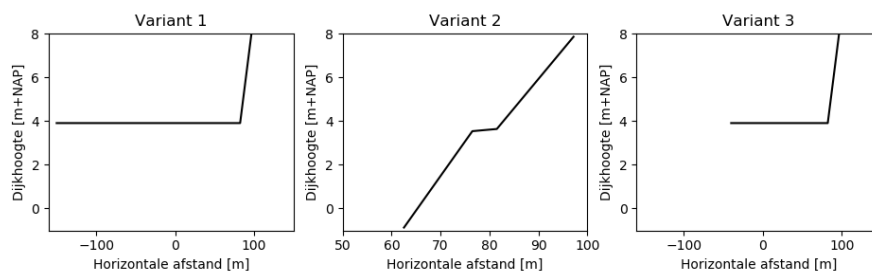
*Figuur 23
Havenvariant 2,
situatie zonder
haven*



*Figuur 24
Havenvariant 3,
situatie met
haventerrein en een
westelijke havendam*



*Figuur 25
Schematisering van
dijkprofielen bij Kmp
89.2 voor 3
verschillende
varianten.*

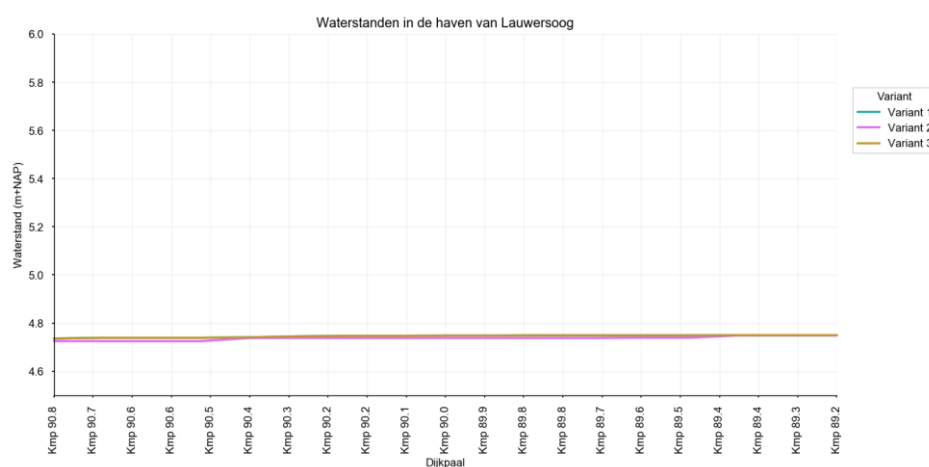


Resultaten

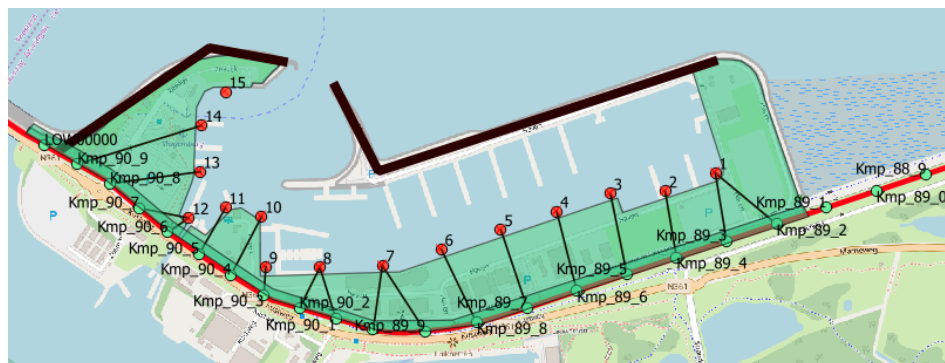
Figuur 26 laat de waterstanden in de verschillende varianten zien voor zichtjaar 2023. Het minieme verschil in waterstand tussen de varianten komt door de koppeling van de dijkpalen aan de HR-locaties. Deze verschillen zijn niet significant.

Ter illustratie: bij de dijkspaal bij Kmp 90.6 in variant 1 gekoppeld aan HR-locatie 12, die tevens is gekoppeld aan HR-locatie WZ_3_ha04-00009 (Figuur 27 en roodomcirkeld in Figuur 28). In variant 2 is diezelfde dijkspaal Kmp 90.6 op basis van kortste afstand gekoppeld aan HR-locatie WZ_3_ha04-00012 (rood omcirkeld in Figuur 28). Beide "WZ_3"-locaties bevatten net andere waterstanden, waardoor een klein verschil in waterstanden ontstaat tussen variant 2 en de andere twee varianten (als de koppeling net anders is).

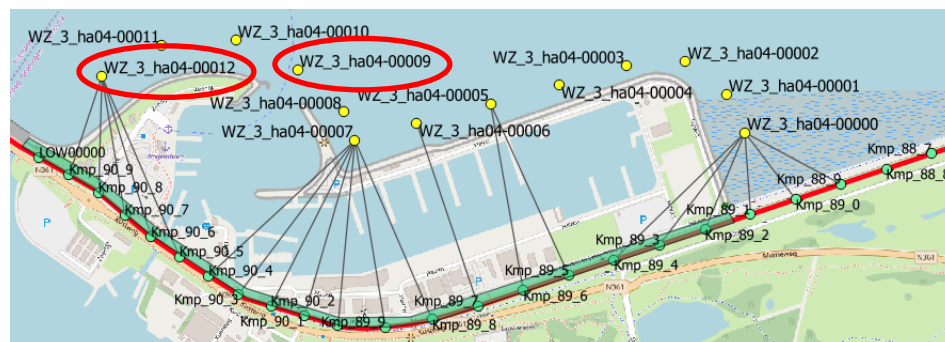
*Figuur 26
Waterstanden voor 3
varianten in 2023 bij
de max. toelaatbare
overstromingskans
(1/1.000 per jaar)*



*Figuur 27
Kortste afstanden
tussen dijklocaties
(groen) en
uitvoerlocaties
vanuit de haventool
(rood) voor variant 1
en 3.*



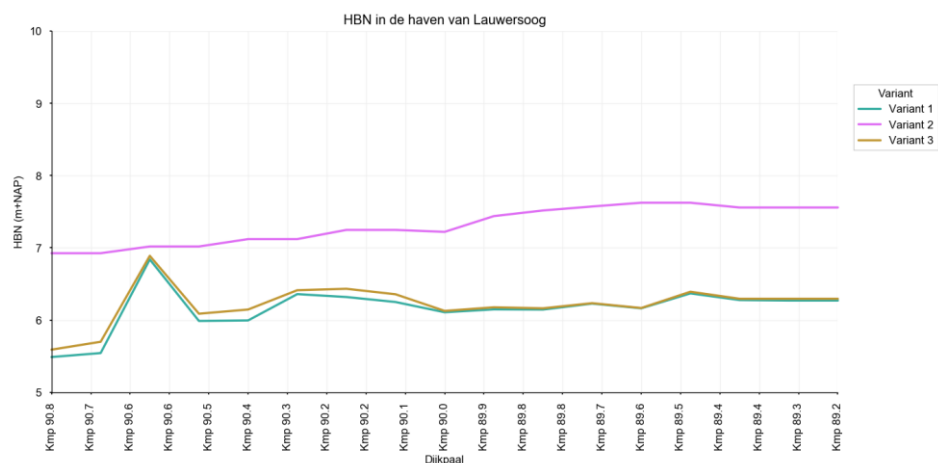
*Figuur 28
Kortste afstanden
tussen dijklocaties
(groen) en uitvoer-
locaties (geel) voor
variant 2.*



Figuur 29 toont de hydraulische belastingniveaus (HBN) voor zichtjaar 2023 voor de drie verschillende situaties. Variant 2 laat duidelijk hogere HBN's zien. Het meenemen van het haventerrein en de havendammen zorgt voor lagere golfcondities, en daarmee lagere hydraulische belastingen (conform verwachting). Het valt op dat het HBN op basis van de varianten 1 en 3 nauwelijks van elkaar verschillen. Dit betekent dat de reductie van de golven in een HBN berekening vooral wordt veroorzaakt door de westelijke havendam (strekdam) en de hooggelegen haventerreinen.

Bij dijkpaal Kmp 90.5 is een piek te zien in variant 1 en 3. Op deze locatie is het haventerrein wat korter in vergelijking met de andere locaties (de eerder genoemde sluis is hier gelegen), waardoor minder golfreductie plaatsvindt.

*Figuur 29
HBN voor 3 haven-
varianten in 2023 bij
de max. toelaatbare
overstromingskans
(1/12.500 per jaar)*



2.2.7

Keuze havenschematisatie

Havenvariant 1, waarin de oostelijke en westelijke havendam en de verhoogde ligging van de voorlanden is meegenomen, is in deze veiligheidsbeoordeling als basis verondersteld²:

1. De schematisatie van variant 1 sluit het beste aan bij de huidige situatie.
2. In het WBI wordt de waterveiligheidssituatie aan het eind van de toetsperiode beoordeeld (de peildatum) – bijlage 1 van de ministeriële regeling [RWS – WVL, 2017b]. Gezien het waterschap niet voornemens is om de havendammen te verwijderen wordt in het WBI de huidige situatie geschematiseerd (variant 1).
3. De oostelijke havendam is niet in de legger opgenomen en het is niet duidelijk of deze standzeker is onder maatgevende omstandigheden. Het effect van deze havendam op de hydraulische belastingen is echter klein. Gezien de kleine verschillen en het niet duidelijk is of de situatie zonder oostelijke havendam (variant 2) relevant is, is de situatie zonder oostelijke havendam niet als maatgevend verondersteld.
4. In hoofdstuk 4 is nader ingegaan op de waterkerende functie van de havendam en de relatie met de veiligheidsbeoordeling in beeld gebracht.

² Dit is in overleg met het waterschap vastgesteld

2.2.8

Getijdeninformatie

De getijdeninformatie is weergegeven in Figuur 30. Dit zijn de kenmerkende waarden zoals vrijgegeven door RWS – WVL.

*Figuur 30:
Kenmerkende
waarden
Lauwersoog [RWS –
WVL, 2013]*

Standen in cm t.o.v. NAP

Getijtype cq grootheid	Slotgemiddelden			Waarden maansverloop	
	HW- stand	LW- stand	tijverschil	HW	LW
Gem. springtij	119	-142	261	9:33	15:47
Gem. tij	106	-126	232	9:29	15:39
Gem. doortij	87	-102	189	9:22	15:28
Gem. duur rijzing				6:15	
Gem. duur daling				6:10	
Gem. waterstand		4			

Gemiddelde over- en onderschrijdingsfrequenties		
Frequentie	Overschrijding hoogwaterstanden	Onderschrijding laagwaterstanden
1x per 10.000 jaar	520	
1x per 5.000 jaar	510	
1x per 4.000 jaar	500	
1x per 2.000 jaar	490	
1x per 1.000 jaar	470	
1x per 500 jaar	460	
1x per 200 jaar	440	
1x per 100 jaar	420	
1x per 50 jaar	400	
1x per 20 jaar	375	-270
1x per 10 jaar	355	-260
1x per 5 jaar	340	-250
1x per 2 jaar	315	-235
1x per jaar	280	-225
2x per jaar	255	-215
5x per jaar	230	-200
LAT		-175

Hoogst bekende waarde 375 cm 3 jan 1976 Periode 1970-2010
Laagst bekende waarde -290 cm 2 mrt 1987 Periode 1970-2010

Bijzonderheden:

- 21 mei 1965 Aanvang waarnemingen
- 23 mei 1969 Afsluiting Lauwerszee
- 1 jan 1988 DNM geplaatst

2.3

Ondergrondschematisatie

De schematisatie van de ondergrond is de basis voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts. Voor de ondergrond is een lokale ondergrondschematisatie opgesteld. Hiervoor is de werkwijze toegepast in de 'Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS' [Deltares, 2015].

De Stochastische Ondergrond Schematisatie (WBI-SOS) is gebruikt als vertrekpunt. Op basis van de werkwijze in de handleiding is de schematisatie met lokaal grondonderzoek verder aangescherpt. Conform de handleiding

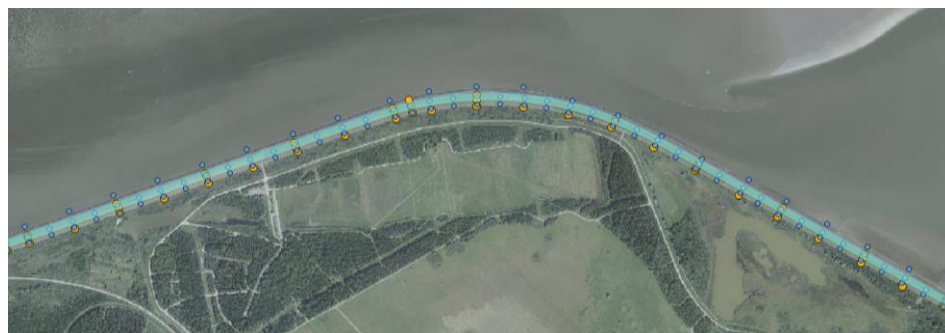
lokaal schematiseren met WBI-SOS [Deltares, 2015], zijn hierin vijf stappen te nemen:

1. Verzamelen gegevens;
2. Ordenen gegevens;
3. Eerste analyse grondopbouw met WBI-SOS;
4. Nadere detaillering van de WBI-SOS scenario's;
5. Vaststellen te beoordelen scenario's.

Verzamelen (stap 1) en ordenen gegevens (stap 2)

De beschikbare boringen en sonderingen [Wiertsema & Partners, 2018] zijn gekoppeld aan GIS, waardoor overzichtelijk de beschikbare informatie ter plaatse van de buitenteen, kruin en binnenteen getoond kan worden per SOS segment. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 31. Verder is een geotechnisch langsprofiel [Wiertsema & Partners, 2018] beschikbaar, dat parallel aan de GIS-visualisatie is gebruikt.

*Figuur 31
GIS screenshot met
daarin een overzicht
van het beschikbare
grondonderzoek. De
blauwe cirkels zijn
sonderingen, de
oranje cirkels zijn
boringen*



Eerste analyse grondopbouw met WBI-SOS (stap 3)

In de eerste analyse van de grondopbouw wordt bestudeerd hoe SOS de ondergrond beschrijft. Onderstaande tabellen tonen de verschillende ondergrondscenario's die zijn opgenomen in SOS.

*Tabel 8
Ondergrondscenario's
segment 6027
volgens SOS*

Scenario	Laag-nummer	SOS eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]
6027_1D1	1	WTISOS_ 456_H_Mg_zk	-0,75
	2	WTISOS_ 457_H_Mkw_z&k	-6,5
	3	WTISOS_ 458_H_Mp_k	-9,5
	4	WTISOS_ 459_P_Ova_sd	-12
	5	WTISOS_ 460_P_Rg_zm	-39,5

*Tabel 9
Ondergrondscenario's
segment 6026
volgens SOS*

Scenario	Laag-nummer	SOS eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]
6026_1D1	1	WTISOS_ 447_H_Mg_zk	-0,75
	2	WTISOS_ 448_H_Mkw_z&k	-6,5
	3	WTISOS_ 449_H_Vbv_v	-13
	4	WTISOS_ 450_P_Wdz_zf	-13,5
	5	WTISOS_ 451_P_Ova_sd	-15,5
	6	WTISOS_ 452_P_Rg_zm	-20

6026_1D2	1	WTISOS_ 447_H_Mg_zk	-0,75
	2	WTISOS_ 448_H_Mkw_z&k	-6,5
	3	WTISOS_ 449_H_Vbv_v	-13
	4	WTISOS_ 450_P_Wdz_zf	-13,5
	5	WTISOS_ 453_P_Rg_zm	-15,5

Tabel 10
Ondergrondscenario's
segment 6025
volgens SOS

Scenario	Laag- nummer	SOS eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]
6025_1D1	1	WTISOS_ 441_H_Mkw_z&k	-0,5
	2	WTISOS_ 443_H_Mg_zk	-11,5
	3	WTISOS_ 444_P_Om_zf	-30
6025_1D2	1	WTISOS_ 442_H_Mg_zk	-0,5
	2	WTISOS_ 443_H_Mg_zk	-11,5
	3	WTISOS_ 444_P_Om_zf	-30

Tabel 11
Ondergrondscenario's
segment 6024
volgens SOS

Scenario	Laag- nummer	SOS eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]
6024_1D1	1	WTISOS_ 434_H_Mg_zk	1,25
	2	WTISOS_ 436_H_Mg_zk	-3
	3	WTISOS_ 437_P_Ova_sd	-26
6024_1D2	1	WTISOS_ 435_H_Mp_k	1,25
	2	WTISOS_ 436_H_Mg_zk	-3
	3	WTISOS_ 437_P_Ova_sd	-26
6024_1D3	1	WTISOS_ 434_H_Mg_zk	1,25
	2	WTISOS_ 436_H_Mg_zk	-3
	3	WTISOS_ 438_P_Mg_zk	-26
6024_1D4	1	WTISOS_ 435_H_Mp_k	1,25
	2	WTISOS_ 436_H_Mg_zk	-3
	3	WTISOS_ 438_P_Mg_zk	-26

Nadere detaillering en vaststellen te beoordelen scenario's (stap 4)

Hieronder is een vergelijking gemaakt tussen de basisinformatie uit SOS (zie bovenstaande tabellen) en het beschikbare grondonderzoek, bestaande uit het geotechnisch lengteprofiel [Wiertsema & Partners, 2018]:

- **SOS segment 6027:** Scenario 6027_1D1 (Tabel 9) komt in het GTLP vooral terug in het oostelijke deel van dit segment. Het GTLP geeft geen aanwezigheid van een laag H_Mp_k (klei) aan en maakt geen onderscheid binnen de kleiachtige lagen (H_Mkw_z&k en H_Mp_k uit het SOS worden

in het GTLP weergegeven als één laag). Op basis van de afzonderlijke sonderingen lijkt het onderste deel van deze laag wel kleiiger te zijn dan de laag erboven, wat kan duiden op de aanwezigheid van H_Mp_k. Aangezien H_Mp_k een lagere sterkte heeft dan H_Mkw_z&k, is aangenomen dat een dunne laag H_Mp_k aanwezig is, zoals aangegeven door het SOS. De uiteindelijke ondergrondopbouw 6027_1b1 is weergegeven in Tabel 12.

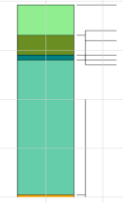
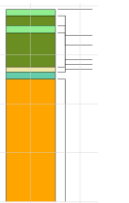
In het westelijke deel van het segment komt volgens het GTLP een andere grondopbouw voor, met een Pleistocene zandlaag in plaats van de kleilaag H_Mp_k en een laag H_Mkw_z&k die relatief hoog in de ondergrond voorkomt. Deze grondopbouw komt niet voor in SOS, dus is er een extra scenario aangemaakt: 6027_1b2 (Tabel 12).

- **SOS segment 6026:** Het enige verschil tussen de segmenten 6026_1D1 en 6026_1D2 (Tabel 9) is het wel of niet aanwezig zijn van potklei (P_Ova_sd). Omdat deze laag diep voorkomt (-15,5m+NAP), zal deze niet relevant zijn voor macro-stabiliteit. Voor macro-stabiliteit zijn er daarom geen relevante verschillen tussen beide scenario's, en kunnen ze worden gezien als één. De grondopbouw van dit scenario wordt volgens het GTLP vooral teruggevonden in het oostelijke deel van het segment. Volgens het GTLP komt er echter boven het basisveen (H_Vbv_v) een zandlaag voor (H_Mg_zk), die niet is opgenomen in SOS. Deze laag is aan het scenario toegevoegd. Dit leidt tot scenario 6026_1b1 (Tabel 13) In het westelijke deel van het segment komt volgens het GTLP nog een andere grondopbouw voor, met een kleilaag (H_Mp_k) boven het basisveen. Deze grondopbouw is als extra scenario toegevoegd: scenario 6026_1b2 (Tabel 13)
- **SOS segment 6025:** Het enige verschil tussen de scenario's 6025_1D1 en 6025_1D2 (Tabel 10) volgens SOS is het wel of niet voorkomen van H_Mkw_z&k in het Holoceen. Ook het GTLP laat weinig variatie zien in het Holoceen pakket. Globaal kunnen er in het GTLP 3 samenstellingen van het Holoceen worden onderscheiden: alleen aanwezigheid van H_Mg_zk (overeenkomstig met 6025_1D2 uit SOS; een basis van H_Mg_zk met een relatief hoge laag H_Mkw_z&k (overeenkomstig met 6025_1D1 uit SOS); en een basis van H_Mg_zk met een diepe laag H_Mkw_z&k, waarvoor een nieuw scenario is aangemaakt. Daarnaast is er enige variatie in het Pleistoceen. In het westelijke deel van het segment is het Pleistoceen volgens het GTLP overeenkomstig met SOS (P_Om_zf). Deze samenstelling van het Pleistoceen in combinatie met de drie verschillende samenstellingen van het Holoceen leiden tot scenario's 6025_1b1 t/m 6025_1b3 (Tabel 14). In het oostelijke deel bestaat het Pleistoceen volgens het GTLP uit P_Mg_zk. Deze laag komt niet voor in het SOS. Volgens het GTLP komt deze samenstelling van het Pleistoceen voor met twee verschillende samenstellingen van het Holoceen: alleen H_Mg_zk en een basis van H_Mg_zk met een hoge laag H_Mkw_z&k. Dit leidt tot respectievelijk scenario 6025_1b4 en 6025_1b5 (Tabel 14).

- **SOS segment 6024:** De verschillen tussen de vier scenario's 6024_1D1 t/m 6024_1D4 (Tabel 11) zijn de samenstelling van de top laag (H_Mp_k of H_Mg_zk) en het Pleistoceen (P_Mg_zk of P_Ova_sd). Volgens het GTLP bestaat het Pleistoceen zowel uit potklei als zand, dus uit een combinatie van de SOS scenario's. Daarnaast lijkt op basis van het GTLP en de sonderingen de laag H_Mp_k niet voor te komen. Dit lijkt H_Mkw_z&k te zijn, zoals ook terug te vinden in de overige segmenten. Deze laag is daarom aangepast in de SOS scenario's. Globaal kunnen er op basis van het GTLP drie verschillende samenstellingen van het Holoceen worden onderscheiden: alleen aanwezigheid van H_Mg_zk; een basis van H_Mg_zk met een relatief hoge laag H_Mkw_z&k; en een basis van H_Mg_zk met een relatief hoge laag H_Mkw_z&k en een diepe laag H_Mkw_z&k. Deze drie samenstellingen van het Holoceen leiden tot drie verschillende scenario's: 6024_1b1 t/m 6024_1b3 (Tabel 15).

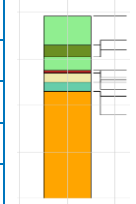
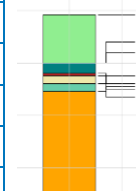
De vergelijking van het SOS met lokaal grondonderzoek leidt tot een nieuwe set ondergrondscenario's, die worden gebruikt voor de beoordeling. Voor het te beoordelen dijktraject is vrij gedetailleerd grondonderzoek uitgevoerd. Daarnaast bestaat er twijfel over de nauwkeurigheid van SOS voor dit traject. Daarom is over het algemeen het GTLP als leidend beschouwd voor de definitie van de nieuwe ondergrondscenario's. De nieuwe te beoordelen scenario's zijn weergegeven in Tabel 12 t/m Tabel 15.

Tabel 12
Te beoordelen
ondergrond
scenario's segment
6027

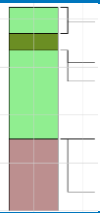
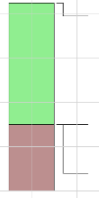
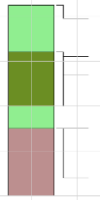
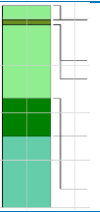
Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6027_1b1	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mp_k	-11	
	4	P_Ova_sd	-12	
	5	P_Rg_zm	-39,5	
6027_1b2	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-2	
	3	H_Mg_zk	-4	
	4	H_Mkw_z&k	-5,5	
	5	P_Wdz_zf	-12,5	
	6	P_Ova_sd	-13,5	
	7	P_Rg_zm	-15	

Tabel 13
Te beoordelen
ondergrond
scenario's segment
6026

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6026_1b1	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-7	

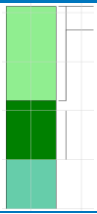
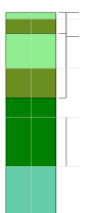
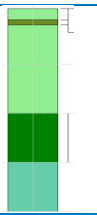
	3	H_Mg_zk	-9,5	
	4	H_Vbv_v	-12,5	
	5	P_Wdz_zf	-13	
	6	P_Ova_sd	-15	
	7	P_Rg_zm	-17	
6026_1b2	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mp_k	-10	
	3	H_Vbv_v	-12	
	4	P_Wdz_zf	-12,5	
	5	P_Ova_sd	-14	
	6	P_Rg_zm	-15,5	

Tabel 14
Te beoordelen
ondergrond
scenario's segment
6025

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b1	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-3	
	3	H_Mg_zk	-6	
	4	P_Om_zf	-25	
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mg_zk	-20	
	4	P_Om_zf	-25	
6025_1b4	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-0,5	
	3	H_Mg_zk	-1,5	
	4	P_Mg_zk	-17	
	5	P_Ova_sd	-21	
6025_1b5	1	H_Mg_zk	2,5	

	2	P_Mg_zk	-17	
	3	P_Ova_sd	-30	

Tabel 15
Te beoordelen
ondergrond
scenario's segment
6024

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b1	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	P_Mg_zk	-18	
	3	P_Ova_sd	-30	
6024_1b2	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	-1	
	3	H_Mg_zk	-3	
	4	H_Mkw_z&k	-10	
	5	P_Mg_zk	-16	
	6	P_Ova_sd	-30	
6024_1b3	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	-1	
	3	H_Mg_zk	-2,5	
	4	P_Mg_zk	-20	
	5	P_Ova_sd	-30	

Vaststellen te beoordelen scenario's (stap 5)

Deze stap is uitgevoerd binnen de beoordelingssporen. Zie hiervoor Hoofdstuk 3.

3 Veiligheidsbeoordeling

In dit hoofdstuk is de veiligheidsbeoordeling per faalmechanisme beschreven. Elke paragraaf beschrijft een relevant faalmechanisme. Per faalmechanisme is aan het eind van de paragraaf het veiligheidsoordeel samengevat en zijn (als relevant) de specifieke aanbevelingen voor het faalmechanisme gepresenteerd.

3.1 Macrostabiliteit binnenwaarts - STBI

3.1.1 Algemeen

Deze paragraaf beschrijft de totstandkoming van het eindoordeel van de beoordeling voor het beoordelingsspoor macrostabiliteit binnenwaarts (STBI). De beoordeling is begonnen met een eenvoudige beoordeling. Indien deze eenvoudige beoordeling tot het oordeel 'verder beoordelen' leidt, is een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd.

3.1.2 Specifieke uitgangspunten

Faalkanseis

De faalkanseis voor STBI is bepaald conform Bijlage III op de Toelichting bij de Ministeriële Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2017 [RWS, 2017a]. De faalkanseis voor STBI is opgenomen in Tabel 16. De veiligheidsfactoren zijn opgenomen in Tabel 17. De minimaal benodigde stabiliteitsfactor in D-GeoStability is 1,18.

Tabel 16
Faalkanseis STBI.

Faalmechanisme	Norm [per jaar]	Lengte [km]	Faalkanseis op doorsnedeniveau [per jaar]
STBI	1/3.000	13,4	$1,4 \cdot 10^{-6}$
STBI	1/1.000	13,4	$4,1 \cdot 10^{-6}$

Tabel 17
Veiligheidsfactoren macrostabiliteit binnenwaarts.

Norm [per jaar]	Schadefactor [-]	Materiaalfactor [-]	Modelfactor Uplift-Van [-]	Vereiste SF D-GeoStability [-]
Signaalwaarde (1/3.000)	1,11	1,00	1,06	1,18
Max. toelaatbare kans (1/1.000)	1,08	1,00	1,06	1,14

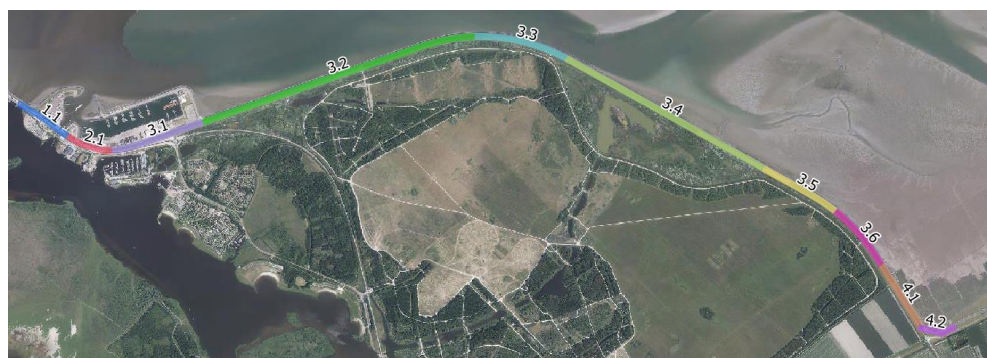
Vakindeling

De vakindelingen voor faalmechanismen STBI, STBU en STPH is opgesteld conform de schematiseringhandleidingen van het WBI2017 (zie ook Bijlage I). De lokale ondergrondschematisatie, zoals beschreven in paragraaf 2.3, vormt de gemeenschappelijke basis voor de vakindeling voor alle geotechnische faalmechanismen (STBI, STBU en STPH). Vervolgens is deze vakindeling per faalmechanisme verfijnd. In Tabel 18 is de vakindeling voor STBI beschreven, inclusief de duiding waarom de vakken op die manier zijn gedefinieerd. De vakindeling voor STBI is ook te zien in Figuur 32. De totstandkoming van de vakindeling is in meer detail beschreven in Bijlage I.

Tabel 18
Vakindeling STBI
inclusief uitleg

Vak	Dijkpalen	Uitleg
1.1	90.9 - 90.4	SOS segment 6027
2.1	90.4 - 89.9	SOS segment 6026
3.1	89.9 - 89.2	SOS segment 6025; haven, minder overslag dan rest van 6025
3.2	89.2 - 86.7	SOS segment 6025; ten oosten van haven, meer overslag
3.3	86.7 - 85.9	SOS segment 6025; verandering oriëntatie tov 3.1 en 3.2 (verandering overslag)
3.4	85.9 - 84.0	SOS segment 6025 plaatselijk hoger polderpeil dan 3.3 en 3.5
3.5	84.0 - 83.3	SOS segment 6025; polderpeil vergelijkbaar met 3.3 (lager dan in 3.4)
3.6	83.3 - 82.7	SOS segment 6025; verandering oriëntatie tov 3.3 t/m 3.5 (verandering overslag)
4.1	82.7 - 82.1	SOS segment 6024;
4.2	82.1 - 81.8	SOS segment 6024; verandering oriëntatie en geometrie tov 4.1

Figuur 32
Vakindeling STBI



Hydraulische belastingen

De hydraulische randvoorwaarden zijn beschreven in hoofdstuk 2. De stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd bij een buitenwaterstand (MHW) met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de signaleringswaarde van het traject. Voor elk vak is de waterstand bij de weergegeven in Tabel 19. De buitenwaterstand bij GHW is 1.06m+NAP (zie ook paragraaf 2.2.8). De

- Afhankelijk van de doorlatendheid van de grondlagen (B_q - waarden), zijn deze gedraineerd of ongedraineerd doorgerekend;
- Voor de grondlaag H_Mkw_z&k is de sterkte bepaald op basis van laboratorium proeven. Voor andere lagen zijn standaardwaarden gebruikt (geen / te weinig proeven beschikbaar). De sterkte van deze lagen is bepaald o.b.v. de schematiseringshandleiding macrostabiliteit [RWS – WVL, 2016d]. Zie ook Tabel 21 en Bijlage G;
- Onderscheid in volumiek gewicht van de ondergrond op basis de ligging van het glijvlak;

In Tabel 20 zijn de gebruikte waarden voor het nat volumiek gewicht weergegeven. Conform de beschreven werkwijze in Bijlage G is in het actieve deel een hoog volumiek gewicht aangehouden (bovengrens) en in het passieve deel een laag gewicht (ondergrens). De grens is gelegd op de overgang tussen het binnentalud en de binnenberm. Op deze manier heeft het dijklichaam, dat voor het aandrijvend gewicht zorgt, een hoog gewicht. Vanaf de binnenberm, waar de ondergrond voor de meeste weerstand zorgt, is met lage gewichten gerekend. Dit is een veilige benadering.

Tabel 20
Waarden nat
volumiek gewicht

Grondlaag	Type	Ondergrens γ_n [kN/m ³]	Bovengrens γ_n [kN/m ³]
H_Mg_zk		18	21
H_Mkw_z&k		16	21
H_Mp_k		13	16
H_Vbv_v		10	12
P_Mg_zk		18	21
P_Ova_sd	Klei	13	16
P_Rg_zm		18	21
P_Wdz_zf		18	21
Zand dijksmateriaal	Zand	18	21

In Tabel 21 zijn de sterkteparameters van de grondlagen weergegeven, voor gedraineerde grondlagen. Over het grootste deel van het traject hebben de grondlagen een zandig karakter (H_Mkw_z&k en H_Mk_zk). Deze lagen mogen volgens de schematiserings-handleiding [RWS, 2016d] als gedraineerd doorgerekend worden met een representatieve waarde van de hoek van inwendige wrijving als onder andere de B_q waarde onder de 0,10 blijft. Dit is geverifieerd door een aantal sonderingen in de CPT-tool te laden, waaruit bleek dat deze lagen inderdaad als gedraineerd beschouwd mogen worden. Daarom zijn de grondsterkteparameters voor gedraineerd rekenen aangehouden. De toegepaste rekenwaarden zijn weergegeven in Tabel 21. De berekende parameters uit laboratoriumproeven (voor klei) zijn toegewezen aan de grondsoort H_mkw_z&k, omdat deze grondsoort het meeste klei bevat. Voor H_mg_zk en dijksmateriaal zijn standaardwaarden gebruikt uit de schematiseringshandleiding [RWS, 2016d].

Tabel 21
Rekenwaardes
grondparameters
gedraineerde
grondlagen

Grondlaag	Karakteristieke hoek van inwendige wrijving [graden]
Zand dijksmateriaal	28,8
H_mg_zk	29,8
H_mkw_z&k	33,4
P_Wdz_zf	28,5

Grondlaag	Karakteristieke hoek van inwendige wrijving [graden]
P_Rg_zm	32,3
P_Mg_zk	29,8

In Tabel 22 zijn de sterkteparameters van de ongedraineerde grondlagen weergegeven. Deze lagen hebben geen zandig karakter, en dus moet de sterkte ongedraineerd worden berekend. Conform de memo grondparameters (Bijlage G) zijn standaardwaarden uit de schematiseringshandleiding gebruikt. De POP waarden zijn gebruikt om grensspanningen uit te rekenen. Deze grensspanningen zijn berekend door de POP op te tellen bij de effectieve spanning in een grondlaag gedurende dagelijkse omstandigheden.

We merken op dat de schematiseringshandleiding geen standaardwaarde geeft voor de POP van P_Ova_sd. Hiervoor is een waarde van 15 kN/m² aangenomen.

Tabel 22
Rekenwaardes
grondparameters
ongedraineerde
grondlagen

Grondlaag	S [-]	m [-]	POP[kN/m ²]
H_Mp_k	0,22	0,8	15
H_Vbv_v	0,3	0,8	15
P_Ova_sd	0,22	0,8	15

Grondopbouw (per vak)

De verschillende ondergrondscenario's die voorkomen langs het te beoordelen traject zijn beschouwd in paragraaf 2.3. Als volgende stap is per dijkvak bepaald welke van deze ondergrondscenario's voorkomen en over welk deel van het vak. Op deze manier is per vak een percentage van voorkomen toegekend aan de verschillende ondergrondscenario's (op basis van de lengte waarover het scenario voorkomt t.o.v. de lengte van het vak). Omdat uitgebreid grondonderzoek aanwezig is, kunnen de ondergrondscenario's op basis van het GTLP voldoende betrouwbaar worden toegekend aan specifieke delen.

Daarnaast worden, indien nodig, de laagliggingen van de scenario's uit Paragraaf 2.3 verder aangescherpt per vak. De laagliggingen in Paragraaf 2.3 zijn namelijk gemiddeld genomen voor het hele traject. Op vakniveau kunnen deze nog gedetailleerder worden geschematiseerd op basis van het lokaal grondonderzoek.

De ondergrondscenario's die zijn gebruikt voor de stabiliteitsberekeningen zijn weergegeven in Tabel 23. Een uitgebreide opsomming van alle ondergrondscenario's per vak en motivatie voor de scenario's die gebruikt worden voor de berekeningen is te vinden in Bijlage J.2.

Tabel 23
Te berekenen
ondergrond
scenario's

Naam berekening	Vak	Scenario
1.1_1b1	Vak 1.1	Scenario 6027_1b1
1.1_1b2	Vak 1.1	Scenario 6027_1b2
2.1_1b1	Vak 2.1	Scenario 6026_1b1
2.1_1b2	Vak 2.1	Scenario 6026_1b2
3.1_1b2	Vak 3.1	Scenario 6025_1b2

Naam berekening	Vak	Scenario
3.2_1b1	Vak 3.2	Scenario 6025_1b1
3.2_1b2	Vak 3.2	Scenario 6025_1b2
3.3_1b1	Vak 3.3	Scenario 6025_1b1
3.4_1b1	Vak 3.4	Scenario 6025_1b1
3.4_1b2	Vak 3.4	Scenario 6025_1b2
3.5_1b2	Vak 3.5	Scenario 6025_1b2
3.5_1b4	Vak 3.5	Scenario 6025_1b4
3.6_1b4	Vak 3.6	Scenario 6025_1b4
3.6_1b5	Vak 3.6	Scenario 6025_1b5
4.1_1b1	Vak 4.1	Scenario 6024_1b1
4.1_1b2	Vak 4.1	Scenario 6024_1b2
4.1_1b3	Vak 4.1	Scenario 6024_1b3
4.2_1b3	Vak 4.2	Scenario 6024_1b3

Freatische lijn

De freatische lijn is geschematiseerd volgens TRWD [TAW, 2004]. Het betreft een zanddijk met open bekleding (asfalt), dus de freatische lijn verloopt lineair vanaf de buitenwaterstand naar het uittredepunt op een hoogte van $\frac{1}{4} \cdot H$ boven binnendijks maaiveld. Hierin is H gelijk aan de waterhoogte voor de dijk (niveau buitenwaterstand minus niveau bodem buitendijks). Vanaf het uittrede punt loopt de freatische lijn langs het binnentalud naar de binnenteen. Vanaf de binnenteen loopt de freatische lijn naar polderpeil ter plaatse van de teensloot (indien aanwezig). Als geen teensloot aanwezig is, is het polderpeil op maaiveldhoogte aangenomen.

Schematisatie waterspanningen

Voor berekeningen zonder deklaag, waar de ondergrond volledig uit zand bestaat, verlopen de waterspanningen in de ondergrond hydrostatisch (volgens de freatische lijn).

Voor berekeningen met deklaag wordt ook de stijghoogte in het watervoerend pakket geschematiseerd. Voor de stijghoogte in de watervoerende zandlagen (PL3) wordt 100% respons aangenomen. Dit betekent dat de stijghoogte overal in de zandlagen gelijk is aan de buitenwaterstand, onder de aanname dat de zandlagen tot aan het buitenwater reiken (vrije intrede) en er geen demping optreedt.

De scenario's met een deklaag zijn gecontroleerd op opbarsten. Opbarsten vindt plaats wanneer de opbarstveiligheid (ratio van neerwaartse druk door gewicht en opwaartse druk door stijghoogte onder deklaag) kleiner is dan 1,2. Voor de profielen met deklaag zijn de berekende veiligheidsfactoren weergegeven in Tabel 24, zowel ter plaatse van de binnenteen als ter plaatse van de berm. Uit de resultaten blijkt dat opbarsten zowel op kan treden bij de binnenteen als bij de berm. Echter zijn de veiligheidsfactoren bij de teen dusdanig veel lager, dat gesteld mag worden dat opbarsten daar eerst plaats zal vinden. PL3 wordt aldaar gereduceerd tot de grenspotential. Vanaf de grenspotential loopt PL3 dan lineair naar de buitenwaterstand. In een nieuwe opbarstberekening ter plaatse van de berm wordt gecontroleerd of opbarsten op kan treden volgens de nieuwe waarde van de stijghoogte (die

lineair verloopt van grenspotentiaal bij binnenteen naar buitenwaterstand). Dit blijkt nergens het geval te zijn, zoals te zien in Tabel 25. In de opbarstzone, waar PL3 gereduceerd is naar grenspotentiaal, wordt de sterkte van de deklagen gereduceerd tot 0. Conform schematiseringshandleiding macrostabiliteit is voor de lengte van de opbarstzone 4 maal de dikte van de deklaag aangehouden. We merken op dat bij berekening 1.1_1b2 opbarsten plaatsvindt op een afstand van ongeveer 60m van de kruin. Een glijvlak zal in dit geval niet door de opbarstzone gaan, omdat dit te ver van de dijk ligt. Daarom is bij deze berekening aangenomen dat er geen opbarsten plaats vindt. De PL3 lijn wordt dus niet verlaagd tot een grenspotentiaal, maar blijft op 100% respons. Dit is een veilige benadering.

De zandlagen die liggen boven de potklei zijn aan de buitenzijde afgesloten door de damwand in de haven (t.b.v. de aanlegkades). Daarom is in deze zandlagen geen respons op het buitenwater verondersteld. In de diepte zandlaag is in eerste instantie een respons van 100% op het buitenwater aangenomen. Met deze respons is een opbarstveiligheid bij vak 2.1_1b2 gelijk aan 1,14 t.p.v. de binnenteen. Gezien de dikte van het totale pakket boven de potklei en de aanname van 100% respons, is aangenomen dat geen sprake is van opbarsten. Daarnaast is bij vak 2.1 aangenomen dat de waterdruk over de potklei verloopt van MHW (onderaan de laag potklei) tot GHW (bovenaan de laag potklei).

*Tabel 24
Opbarstveiligheid ter
plaats van
binnenteen en ter
plaats van berm bij
100% in het
watervoerend
pakket*

Vak	Opbarstveiligheid binnenteen [-]	Opbarstveiligheid berm [-]
1.1_1b1	1,17	1,39
1.1_1b2	0,82	1,23
2.1_1b2	1,33	-
2.1_1b1	1,14	-
3.2_1b1	0,78	1,23
3.4_1b1	1,00	1,32
3.5_1b4	0,67	1,07
3.6_1b4	0,60	1,08
4.1_1b2	0,73	1,16
4.1_1b3	0,58	1,07
4.2_1b3	0,50	0,95

*Tabel 25
Opbarstveiligheid ter
plaats van berm na
instellen
grenspotentiaal bij
binnenteen*

Vak	Opbarstveiligheid berm [-]
1.1_1b1	1,39
1.1_1b2	1,23
3.2_1b1	1,30
3.4_1b1	1,32
3.5_1b4	1,47
3.6_1b4	1,47
4.1_1b2	1,39
4.1_1b3	1,45
4.2_1b3	1,47

Naast de stijghoogte in het watervoerend pakket is een indringingsdiepte voor de deklaag gedefinieerd. De indringingsdiepte geeft de diepte van de deklaag aan waarin fluctuaties in de PL3 worden gevoeld.

Schematiseringshandleiding macrostabiliteit [RWS – WVL, 2016d] geeft voor verschillende materialen van de deklaag standaardwaarden voor de indringingslengte. Voor het te beoordelen traject bestaat de deklaag voor een groot deel uit H_Mkw_z&K, waarin relatief veel zand aanwezig is. De schematiseringshandleiding geeft dan standaardwaarden voor indringingslengte groter dan 6m. Dit is groter dan de helft van de dikte van de deklaag. In dat geval geeft de schematiseringshandleiding aan dat er geen indringingslengte geschematiseerd moet worden. De waterspanningen verlopen daarom lineair van de bovenkant van de deklaag naar de onderkant van de deklaag.

Verkeersbelasting

In de veiligheidsbeoordeling van STBI is geen rekening gehouden met verkeer op de dijk [RWS – WVL, 2016d]. Het is namelijk niet reëel te veronderstellen dat tijdens stormcondities verkeer aanwezig is op de dijk. Daarnaast is niet vereist dat zwaar verkeer op de dijk moet kunnen tijdens hoogwateromstandigheden. Echter, in het westelijke deel van het te beoordelen traject loopt er een N-weg over de kruin van de dijk. Deze weg wordt door het waterschap niet afgesloten. Het is daarom niet uit te sluiten dat er tijdens extreme omstandigheden verkeer op deze weg aanwezig is. Daarom is voor dit deel wel gerekend met een verkeersbelasting van 13kN/m^2 op de kruin.

Maatgevend glijvlak (faaldefinitie)

Als maatgevend glijvlak zijn alle glijvlakken met een intredepunt in de kruin als relevant beschouwd. Dit in lijn met [RWS – WVL, 2016d]. Glijvlakken met een intredepunt in de kruin leiden namelijk vaak direct tot een overstroming. Deze keuze keuze binnen de overstromingskansbenadering. Daar waar de N361 op de kruin van de dijk ligt is verondersteld dat het glijvlak de weg niet mag beschadigen. Dit omdat de provinciale weg een belangrijke (verbindende) functie heeft bij een hoogwatersituatie. Bij de analyse macrostabiliteit in combinatie met significante golfoverslag moet het glijvlak de kleilaag op het talud doorsnijden. Doorsnijding van de kleilaag kan het resterende profiel wegspoelen door golfoverslag en zo tot falen leiden (vervolgmechanisme).

3.1.3

Resultaten eenvoudige beoordeling

De eenvoudige beoordeling van dit faalmechanisme bestaat uit onderstaande stappen:

- **E.1:** Waterkering is dijk of een dam.
- **E.2:** Constructieve elementen zijn aanwezig.
- **E.3:** De waterkering voldoet aan de eenvoudige toets op basis van algemene kenmerken.

Met als resultaat:

- **E.1:** De waterkering is langs het gehele beschouwde traject een dijk of dam.
- **E.2:** Er zijn geen constructies aanwezig die samen met de (onder-)grond de stabiliteit borgen.
- **E.3:** Het traject exclusief het havengedeelte mag op basis van stappen E.1 en E.2 getoetst worden op basis van algemene kenmerken. In toets E.3 voldoet geen van de vakken op basis van algemene kenmerken Bijlage J.3. De faalkans is op basis hiervan daarom niet verwaarloosbaar en alle vakken dienen verder beoordeeld te worden. In de volgende paragraaf is deze verdere beoordeling (de gedetailleerde beoordeling) nader beschreven.

3.1.4

Resultaten gedetailleerde beoordeling

Resultaten per vak

De resulterende stabiliteitsfactoren uit de D-GeoStability berekeningen zijn weergegeven in Tabel 26. De maatgevende glijvlakken zijn terug te vinden in Bijlage J.4.

Tabel 26
Resultaten D-
GeoStability
berekeningen

Naam berekening	Stabiliteitsfactor	Stabiliteitsfactor vereist o.b.v. signaalwaarde
1.1_1b1	1,26	1,18
1.1_1b2	1,18	1,18
2.1_1b1	1,18	1,18
2.1_1b2	0,97	1,18
3.1_1b2	1,61	1,18
3.2_1b1	1,27	1,18
3.2_1b2	1,52	1,18
3.3_1b1	1,31	1,18
3.4_1b1	1,19	1,18
3.4_1b2	1,30	1,18
3.5_1b2	1,23	1,18
3.5_1b4	1,19	1,18
3.6_1b4	1,35	1,18
3.6_1b5	1,36	1,18
4.1_1b1	1,37	1,18
4.1_1b2	1,32	1,18
4.1_1b3	1,34	1,18
4.2_1b3	1,43	1,18

Aan de hand van de stabiliteitsfactoren uit Tabel 26 worden de faalkansen bepaald conform schematiseringshandleiding macrostabiliteit [RWS – WVL, 2016d]:

$$\beta = \frac{\frac{SF}{\gamma_d} - 0,41}{0,15} \quad P_f = \Phi(-\beta)$$

In Tabel 27 is de faalkans per scenario weergegeven (P_f |scenario). Deze is vervolgens wordt vermenigvuldigd met de kans van optreden van het scenario (P_{scenario}). De resultaten van dit product (P_f |scenario * P_{scenario}) worden

per vak bij elkaar opgeteld, resulterend in een faalkans voor elk vak. De resulterende faalkansen zijn weergegeven in Tabel 28.

*Tabel 27
Faalkansen STBI per
scenario.*

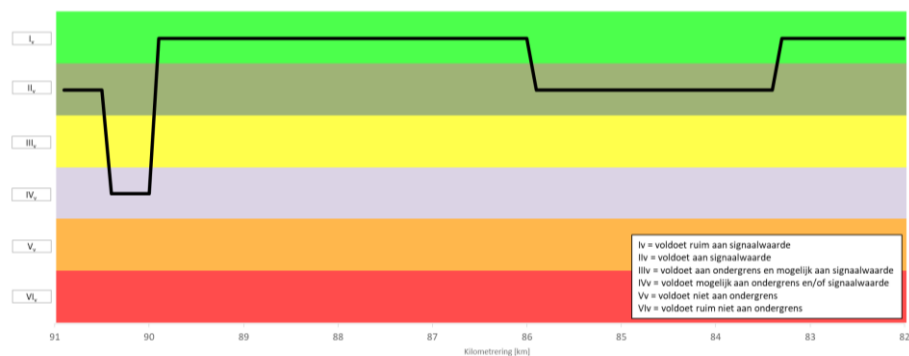
Vak	Scenario	P _{scenario}	SF	P _{f scenario}	P _{f scenario} * P _{scenario}
1.1	6027_1b1	0,65	1,26	1,04E-07	6,79E-08
	6027_1b2	0,35	1,18	1,38E-06	4,83E-07
2.1	6026_1b1	0,38	1,18	1,38E-06	5,24E-07
	6026_1b2	0,62	0,97	3,80E-04	2,35E-04
3.1	6025_1b2	0,72	1,61	7,21E-14	5,19E-14
	6025_1b3*	0,28	1,61	7,21E-14	2,02E-14
3.2	6025_1b1	0,14	1,27	7,44E-08	1,04E-08
	6025_1b2	0,70	1,52	4,35E-12	3,05E-12
	6025_1b3*	0,16	1,52	4,35E-12	6,97E-13
3.3	6025_1b2	0,22	1,31	1,84E-08	4,05E-09
	6025_1b3*	0,78	1,31	1,84E-08	1,43E-08
3.4	6025_1b1	0,26	1,19	1,01E-06	2,63E-07
	6025_1b2	0,74	1,30	2,62E-08	1,94E-08
3.5	6025_1b2	0,35	1,23	2,83E-07	9,90E-08
	6025_1b4	0,65	1,19	1,01E-06	6,58E-07
3.6	6025_1b4	0,71	1,35	4,28E-09	3,04E-09
	6025_1b5	0,29	1,36	2,94E-09	8,53E-10
4.1	6024_1b1	0,25	1,37	2,01E-09	5,04E-10
	6024_1b2	0,50	1,32	1,28E-08	6,42E-09
	6024_1b3	0,25	1,34	6,19E-09	1,55E-09
4.2	6024_1b3	1,00	1,43	1,92E-10	1,92E-11

*Tabel 28
Faalkansen STBI per
vak*

Vak	Faalkans [1/jaar]	Faalkanseis op doorsnede niveau	
		Signaalwaarde (1,36e-6)	Max. toelaatbare kans (4,07e-6)
1.1	5,5 E-07	Voldoet	Voldoet
2.1	2,4 E-04	Voldoet niet	Voldoet niet
3.1	7,2 E-14	Voldoet	Voldoet
3.2	1,0 E-08	Voldoet	Voldoet
3.3	1,8 E-08	Voldoet	Voldoet
3.4	2,8 E-07	Voldoet	Voldoet
3.5	6,7 E-07	Voldoet	Voldoet
3.6	3,9 E-09	Voldoet	Voldoet
4.1	8,5 E-09	Voldoet	Voldoet
4.2	1,9 E-11	Voldoet	Voldoet

Op basis van de berekende faalkansen voor STBI kunnen de verschillende vakken in verschillende categorieën worden geplaatst, elk met bijbehorend veiligheidsoordeel. Deze indeling in categorieën is conform Bijlage III Sterkte en Veiligheid [RWS – WVL, 2017a]. De veiligheidsoordelen zijn weergegeven in Tabel 29. Daarnaast zijn de oordelen langs het traject grafisch weergegeven in Figuur 34.

*Figuur 34
Resultaat
beoordeling STBI
(uitgedrukt in
beoordelingsklasse)*



*Tabel 29
Veiligheidsoordeel
voor STBI conform
de categorieën van
het WBI*

Vak	Categorie	Oordeel
1.1	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
2.1	IV _v	Voldoet mogelijk aan maximaal toelaatbare kans (ondergrens) en/of signaalwaarde
3.1	I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde
3.2	I _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
3.3	I _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
3.4	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
3.5	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
3.6	I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde
4.1	I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde
4.2	I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde

Bij de resultaten merken wij het volgende op:

- Vak 2.1 voldoet niet aan de faalkanseis bij signaleringswaarde. De overige vakken voldoen wel. Dat dit vak niet voldoen wordt vooral veroorzaakt door de geometrie. Bij vak 2.1 is namelijk sprake van een steil binnentalud en laag achterland door de haven van het Lauwersmeer.
- Voor de ondergrondscenario's 6025_1b3 (vak 3.1, 3.2 en 3.3) zijn geen berekeningen gemaakt, omdat dit scenario een lagere faalkans zal geven. Bijlage J.2. Dit ondergrondscenario is vrijwel gelijk aan 6025_1b2, met uitzondering van een diepe laag H_Mkw_z&k (met een relatief hoge sterkte), die bij 6025_1b3 voorkomt onderin het Holocene en bij 6025_1b2 niet. Aangezien de glijvlakken die leiden tot een overstroming bij scenario 6025_1b2 relatief ondiep zijn, is het wel of niet voorkomen van de laag H_Mkw_z&k niet relevant (zie Bijlage J.4). De stabiliteitsfactoren voor scenario 6025_1b3 zijn daarom gelijk aangenomen als die voor 6025_1b2. De scenario's waarvoor dit geldt zijn in Tabel 27 aangegeven met een asterisk (*).
- Voor berekening 3.4_1b1 is de stijghoogte in het watervoerend pakket (PL3) uitgebreider geschematiseerd dan beschreven in de uitgangspunten (zie paragraaf 3.1.2). In het profiel horende bij deze berekening is het maaiveld binnendijs nog een meter lager dan bij de binnenteen, waardoor de grenspotential ook lager is dan bij de binnenteen. Er is aangenomen dat PL3 tussen de binnenteen en het eerste opbarst punt lineair verloopt tussen beide grenspotentialen.

3.1.5

Nadere veiligheidsbeschouwing binnenhaven Lauwersmeer

Uit de gedetailleerde beoordeling blijkt dat het dijkvak bij de binnenhaven van het Lauwersmeer niet voldoet aan de gestelde eisen. In een nadere analyse is de initiële vakindeling bij de binnenhaven, op basis van het SOS, verder aangescherpt. De vakken 2.1 en 3.1 zijn daarom in twee delen opgedeeld (Figuur 35), namelijk een deel ter plaatse van de binnenhaven en een tweede deel buiten de binnenhaven:

- Vak 2.1.1. Vak 2.1 in gedetailleerde beoordeling – SOS Segment 6026, gelegen westelijk van de binnenhaven;
- Vak 2.1.2. Vak 2.1 in gedetailleerde beoordeling – SOS Segment 6026, gelegen ter plaatse van de binnenhaven;
- Vak 3.1.1. Vak 3.1 in gedetailleerde beoordeling – SOS Segment 6025, gelegen westelijk van de binnenhaven;
- Vak 3.1.2. Vak 3.1 in gedetailleerde beoordeling – SOS Segment 6025, gelegen westelijk van de binnenhaven;

*Figuur 35
Aanscherping
vakindeling bij de
binnenhaven*



Per nieuw vak is geanalyseerd welke ondergrond scenario's voorkomen in de vakken. Deze zijn weergegeven in Tabel 30.

*Tabel 30
Scenario's per vak*

Naam berekening	Vak	Scenario
2.1.1_1b1	Vak 2.1.1	Scenario 6026_1b1
2.1.1_1b2	Vak 2.1.1	Scenario 6026_1b2
2.1.2_1b2	Vak 2.1.2	Scenario 6026_1b2
3.1.1_1b2	Vak 3.1.1	Scenario 6025_1b2
3.1.2_1b2	Vak 3.1.2	Scenario 6025_1b2

In de nadere analyse zijn dezelfde uitgangspunten gehanteerd als bij de gedetailleerde beoordeling. Voor vak 2.1.2. zijn de uitgangspunten aangescherpt op de volgende drie punten:

1. In de nadere analyse zijn extra grensspanningszones gehanteerd om de verloop van grensspanningen beter te beschrijven.
2. De stijghoogte in de watervoerende zandlaag verloopt van MHW (100 m voor de kruin) naar GHW (in de binnenhaven, 100 m achter de kruin).
3. Het gemiddeld volumiek is voor alle grondlagen aangehouden (zowel voor het passieve als het actieve deel van de cirkel).

De resultaten van deze beoordeling zijn weergegeven in Tabel 31 en Tabel 32.

Tabel 31
Faalkansen STBI per
scenario.

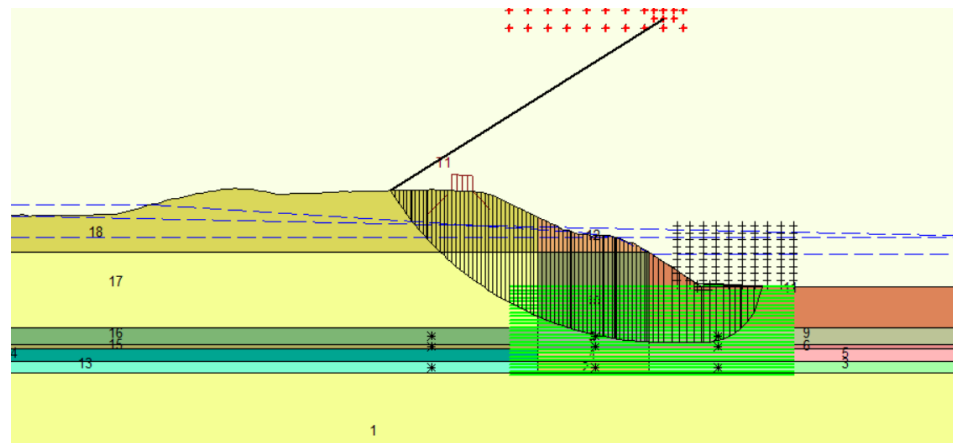
Vak	Scenario	P _{scenario}	SF	P _{f scenario}	P _{f scenario} * P _{scenario}
2.1.1	6026_1b1	0,8	1,47	3,7 E-11	3,0 E-11
	6026_1b2	0,2	1,47	3,7 E-11	7,4 E-12
2.1.2	6026_1b2	1,0	1,02	1,2 E-04	1,2 E-04
3.1.1	6025_1b2	1,0	1,66	6,4 E-15	6,4 E-15
3.1.2	6025_1b2	1,0	1,59	1,8 E-13	1,8 E-13

Tabel 32
Faalkansen STBI per
vak

Vak	Faalkans [1/jaar]	Faalkanseis op doorsnede niveau	
		Signaalwaarde (1,36e-6)	Max. toelaatbare kans (4,07e-6)
2.1.1	3,7 E-11	Voldoet	Voldoet
2.1.2	1,2 E-04	Voldoet niet	Voldoet niet
3.1.1	6,4 E-15	Voldoet	Voldoet
3.1.2	1,8 E-13	Voldoet	Voldoet

Op basis van de nadere analyse blijkt dijkvak 2.1.1 in de huidige situatie niet voldoet aan de maximaal toelaatbare kans. Dit omdat over een lengte van 100 – 200 m de binnenhaven van het Lauwersmeer zodanig dicht bij de waterkering ligt dat onvoldoende weerstand aanwezig is tegen afschuiven. Het glijvlak van dijkvak 2.1.1 is weergegeven in Figuur 36. De minimale insteek van het glijvlak is opgelegd op 10m achter de middenkruin.

Figuur 36
Glijvlak voor dijkvak
2.1.1 – SF = 1,02



3.1.6

Restlevensduur

In de restlevensduuranalyse is voor de vakken die momenteel voldoen aan de ondergrens onderzocht of het oordeel in de komende jaren (tot 2075, einde levensduur) voldoende blijft. Hiertoe worden de D-GeoStability schematisaties aangepast naar de toekomstige hydraulische randvoorwaarden. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 33, zowel voor de huidige situatie (2023) als voor 2075.

De restlevensduur is bepaald door lineaire interpolatie tussen de β -waarden bij 2023 en 2075. De β -eis en faalkanseis horende bij:

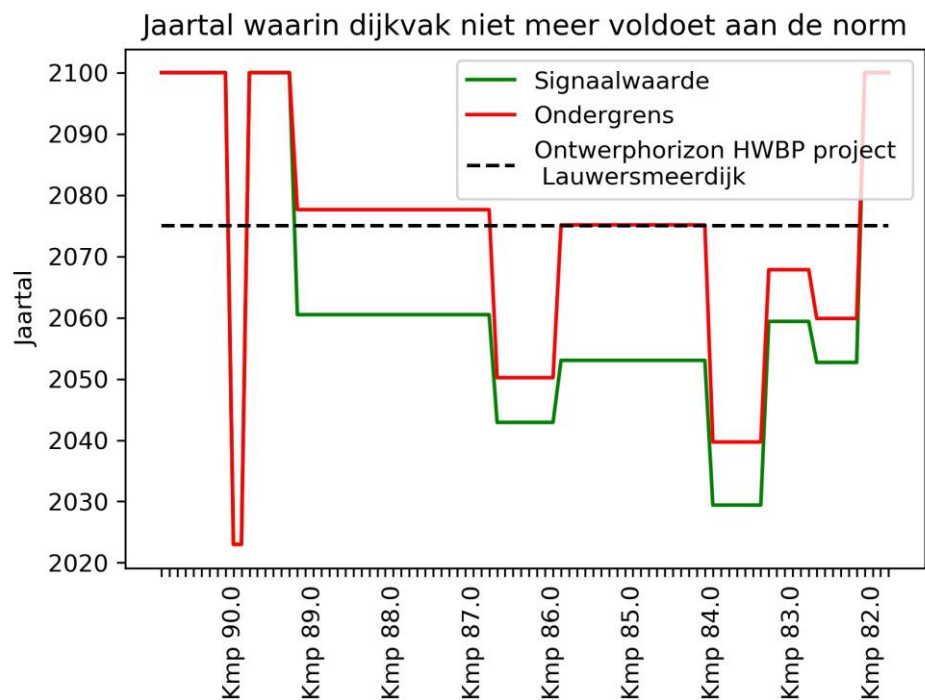
- Maximaal toelaatbare kans (ondergrens): $\beta_{eis} = 4,46$, $P_{f_{eis}} = 4,1 \text{ E-6}$;
- Signaalwaarde: $\beta_{eis} = 4,69$, $P_{f_{eis}} = 1,4 \text{ E-6}$;

De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 37.

Tabel 33
Analyse
restlevensduur STBI

Vak	2023 P_f	2075 P_f	Afkeuren (signaalwaarde)	Afkeuren (ondergrens)
1.1	6,2 E-07	8,4 E-07	Later dan 2100	Later dan 2100
2.1.1	3,7 E-11	3,7 E-11	Later dan 2100	Later dan 2100
2.1.2	-	-	Huidige situatie	Huidige situatie
3.1.1	6,4 E-15	6,4 E-15	Later dan 2100	Later dan 2100
3.1.2	1,8 E-13	1,8 E-13	Later dan 2100	Later dan 2100
3.2	1,0 E-08	3,5 E-06	Later dan 2100	Later dan 2100
3.3	1,8 E-08	1,2 E-04	2084	Later dan 2100
3.4	2,8 E-07	4,0 E-06	2075	Later dan 2100
3.5	6,7 E-07	1,2 E-04	2038	2068
3.6	3,9 E-09	9,9 E-06	2096	Later dan 2100
4.1	8,5 E-09	3,5 E-05	2079	2093
4.2	1,9 E-10	1,28 E-10	Later dan 2100	Later dan 2100

Figuur 37
Overzicht
restlevensduur STBI



We merken op dat de faalkans is bepaald op basis van de waterstand bij de signaalwaarde. Omdat bij de restlevensduur ook in kaart wordt gebracht wanneer niet meer wordt voldaan aan de ondergrens, moeten in dit geval strikt genomen een berekening worden uitgevoerd met de waterstand bij de ondergrens. Door uit te gaan van de waterstand bij de signaalwaarde van de norm worden de faalkansen die ordegrrootte gelijk zijn aan de maximaal toelaatbare kans of groter mogelijk iets overschat. Het is de verwachting dat dit niet leidt tot significant andere resultaten en zeker niet tot een ander veiligheidsoordeel.

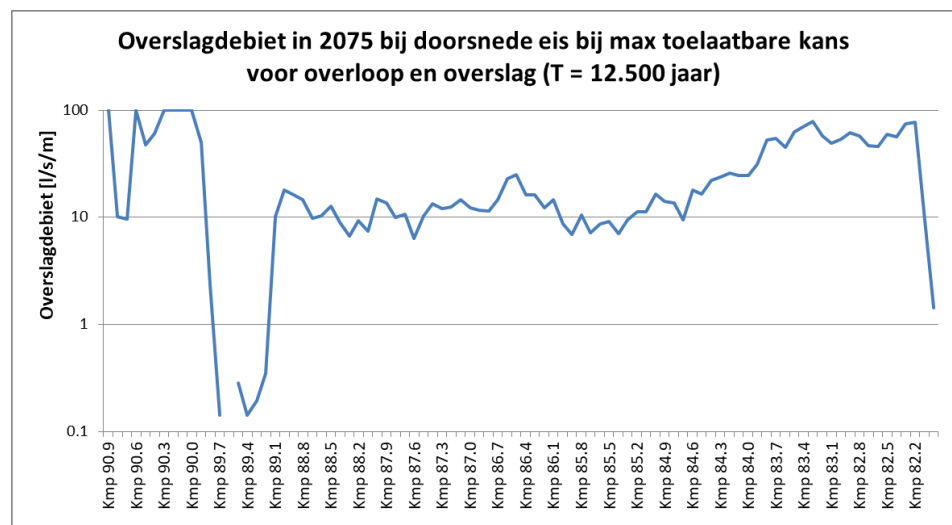
3.1.7

Analyse combinatie macro-stabiliteit met golfoverslag

Indien er sprake is van significante golfoverslag (meer dan 1 l/s/m bij een terugkeertijd gelijk aan de norm voor overloop en overslag) en de beoordeling voor STBI voldoet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans, dient naast de standaard stabiliteitsberekening een aanvullende berekening gemaakt voor de combinatie golfoverslag en macrostabiliteit [KPR, 2017]. Deze analyse dient alleen uitgevoerd te worden voor de vakken die in de situatie zonder overslag voldoen aan de gestelde veiligheidseisen. Langs het beoordeelde traject is nagenoeg overal sprake van significante golfoverslag.

Deze aanvullende beoordeling is voor één vak uitgevoerd. Hiervoor wordt de maatgevende schematisatie uitgezocht. Figuur 38 geeft de hoeveelheid golfoverslag langs het traject weer bij de huidige kruinhoogte en een terugkeertijd van 12.500 jaar (doorsnede eis voor overloop en overslag op basis van de max. toelaatbare overstromingskans – voor de huidige kruinhoogte zie ook paragraaf 2.2.3). Dit geeft een beeld op welke delen van het traject veel golfoverslag voorkomt. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er vooral bij dijkvakken 1.1 t/m 3.2 en bij dijkvakken 3.5 t/m 4.1 veel sprake is van overslag. Van deze dijkvakken leidt vak 3.5 tot de laagste stabiliteit in de standaard beoordeling. Voor dit dijkvak wordt de aanvullende beoordeling uitgevoerd.

*Figuur 38
Overslagdebiet langs
traject bij
terugkeertijd van
12.500 jaar in 2075*



Standaard werkwijze [KPR, 2017] – volledig verzadigde dijk

Voor de beoordeling bij golfoverslag is in eerste instantie uitgegaan van een volledig verzadigde dijk door het water dat over de dijk slaat en infiltreerd bij golfoverslag. Daarnaast kan worden gerekend met een lagere faalkanseis (schadefactor). De te halen faalkanseis wordt bepaald door de normale faalkanseis te delen door de kans op 1l/s/m overslagdebiet (KPR, 2017):

$$P_{f,eis,overslag,dsn} = P_{f,eis,dsn} * P(Q > 1l/s/m)$$

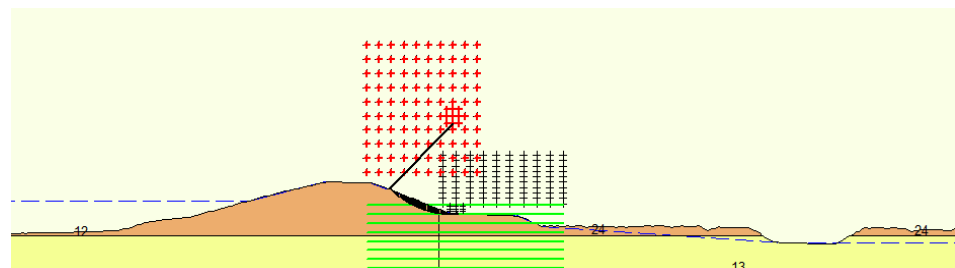
De kans op 1 l/s/m overslag is bepaald bij dijkpaal 83.3, waar de overslag in vak 3.5 het hoogst is. De bijbehorende kans is $8,37E-04$ voor het zichtjaar 2023. De faalkanseis bij de aanvullende beoordeling is dan $1,56E-03$ bij de signaalwaarde (conform [KPR,2017]). Bij de max. toelaatbare faalkans is deze $4,66E-03$. De vereiste stabiliteitsfactoren in D-GeoStability zijn respectievelijk 0,90 en 0,85.

*Tabel 34
Veiligheidsfactoren
macrostabiliteit
binnenwaarts
aanvullende
beoordeling*

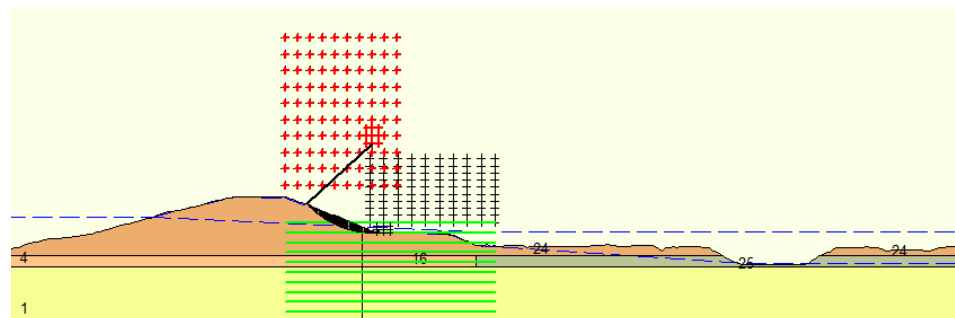
Norm [per jaar]	Faalkanseis aanvullende beoordeling	Schade-factor [-]	Materiaalfactor [-]	Model-factor (UpliftVan)	Vereiste SF D-Geo Stability
Signaalwaarde	$1,56E-03$	0,85	1,00	1,06	0,90
Max. toelaatbare kans	$4,66E-03$	0,80	1,00	1,06	0,85

In Figuur 39 is de het maatgevende glijvlak voor berekening 3.5_1b2 in de aanvullende beoordeling weergegeven. De resulterende stabiliteitsfactor is 0,65. In Figuur 40 is het maatgevende glijvlak voor berekening 3.5_1b4 weergegeven. De twee glijvlakken zijn gelijk aan elkaar, net als de stabiliteitsfactoren. De benodigde stabiliteitsfactor wordt voor beide scenario's niet gehaald. Dit betekent dat vak 3.5 niet voldoet aan de gestelde eisen, zowel voor de signaalwaarde als voor de max. toelaatbare faalkans.

*Figuur 39
Maatgevend glijvlak
3.5_1b2 met
golfoverslag*

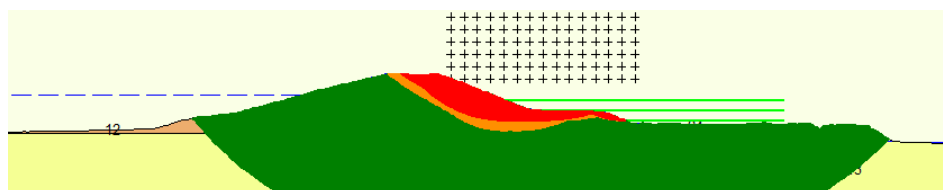


*Figuur 40
Maatgevend glijvlak
3.5_1b4 met
golfoverslag*



Ter controle is voor berekening 3.5_1b2 een Bishop berekening gemaakt. Het bijbehorende safety overview is weergegeven in Figuur 70 Rood betekent dat niet wordt voldaan aan de vereiste stabiliteitsfactor van 0,90 (bij signaalwaarde). Hieruit kan worden geconcludeerd dat er flinke afschuivingen kunnen plaatsvinden die niet voldoen aan de stabiliteitsfactor. Dit bevestigt de conclusie dat vak 3.5 niet voldoet voor macrostabiliteit bij significante golfoverslag als de default werkwijze uit KPR [2017] gevolgd wordt.

*Figuur 41
Safety overview
Bishop 3.5_1b2 met
golfoverslag*



Aanscherping schematisatie macrostabiliteit en golfoverslag

Bij de hierboven beschreven berekening van de stabiliteit bij overslag is conform KPR [2017] uitgegaan van een volledig verzadigde dijk. Dit is een conservatieve benadering omdat de dijk een zandkern heeft en kleibekleding aan binnenzijde. Het is niet onwaarschijnlijk dat een verhoogde freatische lijn, veroorzaakt door overslag, snel kan draineren. Daarom is een nadere analyse onderzocht wat een realistische ligging van de freatische lijn is.

Om meer gevoel bij te krijgen bij de realistische ligging van de freatische lijn zijn enkele gevoeligheidsberekeningen met D-Geo-Flow gemaakt waarin het verloop van de buitenwaterstand en de golfoverslag is gemodelleerd in combinatie met de geohydrologische eigenschappen van de dijk. Ondanks de afhankelijkheid van de gevoelige geohydrologische parameters volgt dat de dijk bij overslag snel volloopt (ook als de ondergrond volledig bestaat uit zand). Als gevolg hiervan zal de freatische lijn bij de binnenteen stijgen. In die situatie zal de druk op de binnendijkse kleibekleding dermate hoog worden, dat deze wordt afgedrukt en de freatische lijn weer zal dalen. Feitelijk treedt dan het GABI mechanisme op. Vanuit de eisen uit het GABI spoor is de maximale stijghoogte van de freatische lijn in de zandkern bepaald (de waterstand net voor falen van de kleibekleding). Met die stijghoogte is de stabiliteit bij overslag bepaald en getoetst aan de benodigde stabiliteitsfactor.

In het GABI spoor is op basis van een Mohr-coulomb benadering de maximale waterstand bij de binnenteen af te leiden waarbij de kleibekleding wordt afgedrukt. Deze is gelijk aan NAP +4,42 m, waarbij is aangenomen dat er geen molshopen of andere graverij aanwezig is waardoor uitspoelen van zand mogelijk is voordat de kleibekleding is gefaald³. Een waterstand van NAP +4,42 m bij de binnenteen, is dus maximaal mogelijk voor macrostabiliteit in combinatie met golfoverslag. Dit vormt de input voor de schematisatie van de freatische lijn bij overslag. Deze verloopt lineair van de buitenwaterstand (5,14m+NAP) tot aan de kleibekleding (dikte 0,8m) op een hoogte van 4,42m+NAP, leidend tot een bijna horizontaal verlopende freatische lijn. Dit is in overeenstemming met de resultaten uit de D-Geo-Flow berekeningen, waar ook een min of meer horizontale freatische lijn werd gevonden (zie Bijlage O).

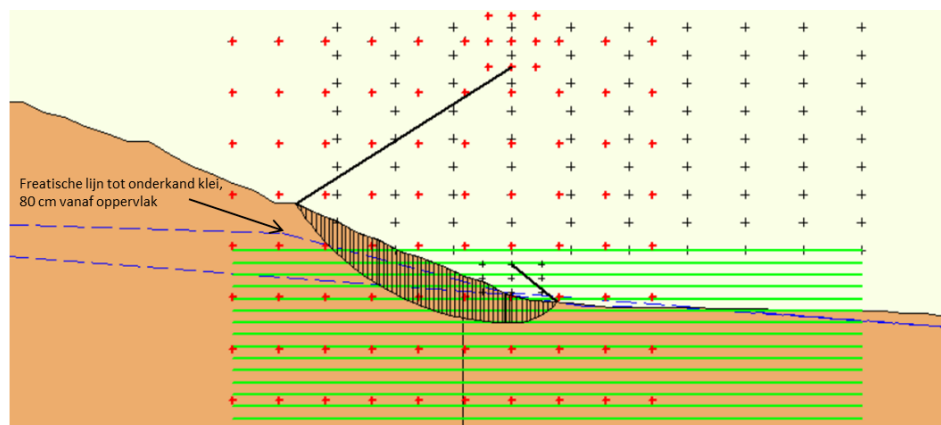
De stabiliteit van vak 3.5 is, voor beide ondergrondscenario's, berekend met de hierboven beschreven schematisatie van de freatische lijn. De resultaten

³ In geval wel sprake is van graverij is de maximaal te keren waterstand NAP +3,86 m.

zijn weergegeven in onderstaande figuren. Beide ondergrondscenario's hebben een stabiliteitsfactor van 0,95, dus vak 3.5 voldoet aan de signaalwaarde ($SF > 0,90$) in deze situatie. Wanneer de dijk meer verzadigd raakt zal de waterstand bij de binnenteen verder stijgen en zal de kleibekleding worden afgedrukt. Hierdoor kan het water makkelijk uit het dijklichaam stromen en zal de freatische lijn weer dalen. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de stabiliteitsfactor niet beneden de 0,90 zal komen.

*Figuur 42
Glijvlak bij freatische
lijn o.b.v.
waterstand bij
binnentalud van
NAP+4,42 m (vak
3.5).*

*Veiligheidsfactor =
0.92*



De GABI beoordeling dient volgens de norm uitgevoerd te worden bij een waterstand bij de binnenteen van NAP 4,2 m (bij de max. toelaatbare kans in 2075, hierbij is rekening gehouden met verhoging van de freatische lijn door golfoverslag). De bovenstaande schematisatie met een waterstand van NAP +4,42 m is dus een bovenmaatgevende situatie voor GABI. Gezien de ligging van de freatische lijn bij STBI en golfoverslag voor GABI bovenmaatgevend is, heeft falen van de grasbekleding aan de binnenzijde van de waterkering in deze situatie daarom geen invloed op het veiligheidsoordeel voor GABI.

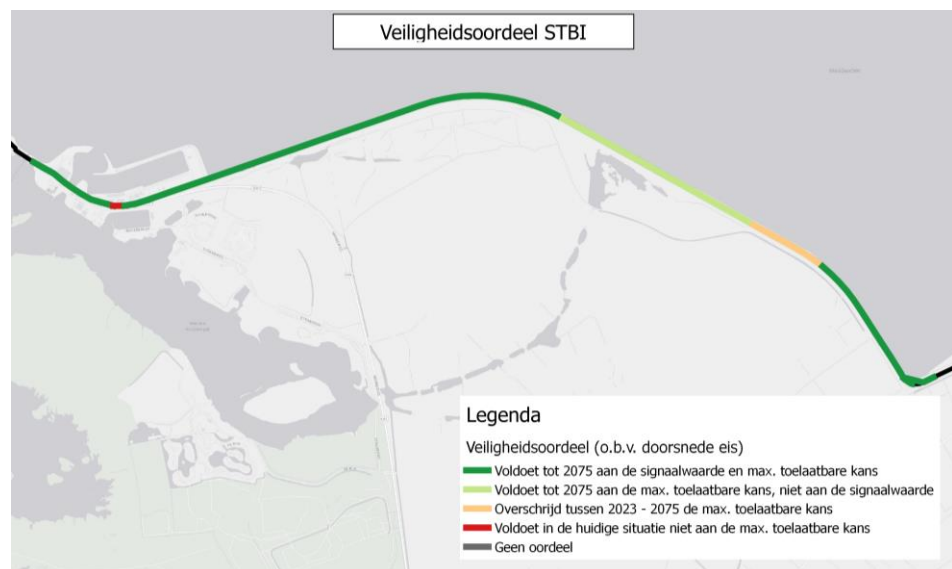
3.1.8

Veiligheidsoordeel

In de huidige situatie (peildatum 1 jan. 2023) voldoet de Lauwersmeerdijk alleen bij de binnenhaven voor STBI niet aan de maximaal toelaatbare kans. Dit omdat hier is sprake van een steil binnentalud en laag achterland. Dit is een zeer lokale opgave. Bij het oostelijke deel van de binnenhaven is de afstand tussen de binnenteen en kade van de binnenhaven groter (dijkvak 3.1.1.), hier is geen sprake meer van een opgave.

Op het oostelijke deel van het traject, van dijkpaal 83.3 – 84.0, wordt de max. toelaatbare kans rond 2070 overschreven (doorsnede eis – zie Figuur 43). De overige delen van de Lauwersmeerdijk voldoen in ieder geval tot 2075 aan de max. toelaatbare faalkans.

*Figuur 43
Veiligheidsoordeel
STBI*



Langs het grootste deel van het traject vindt (bij de huidige kruinhoogte) significante golfoverslag plaats. Bij dijkpaal 83.5 is de controle op macrostabiliteit in combinatie met significante golfoverslag uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de stijghoogte onder de kleibekleding niet hoger kan worden dan NAP +4,42 m. Bij hoger waterstanden gaat de kleibekleding namelijk opbarsten en zal deze opgebarsten zone als drainage fungeren. Bij deze maximale waterstand wordt voldaan aan de gestelde eisen voor macrostabiliteit en golfoverslag. Bij hogere waterstanden zal de kleibekleding dus opbarsten. Gezien de waterstand van NAP +4,42 m een bovenmaatgevende situatie is voor het faalmechanisme GABI leidt dit niet tot afkeuren van de dijk.

3.1.9

Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

- We raden het veiligheidsoordeel van de 700 m die naar verwachting rond 2070 wordt afgekeurd niet verder aan te scherpen (dijkvak 3.5, zie Figuur 43 en in Tabel 33). In geval mee gekoppeld kan worden met (geplande) werkzaamheden aan de binnenzijde van de waterkering raden we een verbetering voor STBI uit te voeren.
- We raden aan de veiligheidsbeoordeling op macrostabiliteit in combinatie met significante overslag uit te voeren voor de hele Lauwersmeerdijk. Dit om zeker te zijn dat dit nergens op het traject speelt.

3.2

Macrostabiliteit buitenwaarts – STBU

3.2.1

Algemeen

Deze paragraaf beschrijft de totstandkoming van het eindoordeel van de beoordeling voor het beoordelingsspoor macrostabiliteit buitenwaarts (STBU).

De beoordeling is begonnen met een eenvoudige beoordeling. Indien deze eenvoudige beoordeling tot het oordeel 'verder beoordelen' leidt, is een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd.

De beoordeling en uitgangspunten van het beoordelingsspoor STBU vertoont grote overeenkomsten met de beoordeling voor STBI. Indien mogelijk wordt verwezen naar de uitgangspunten bij STBI.

3.2.2

Specifieke uitgangspunten

Faalkanseis

De faalkanseis voor STBU is bepaald conform Bijlage III op de Toelichting bij de Ministeriële Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2017 [RWS, 2017a]. De faalkanseis voor STBU is opgenomen in Tabel 35. De bijbehorende factoren zijn opgenomen in Tabel 36.

Tabel 35
Faalkanseis STBU.

Faalmechanisme	Trajectnorm jaarlijkse faalkans [-]	Lengte [km]	Eis jaarlijkse faalkans op doorsnedeniveau [-]
STBU	1/3.000	13,4	$1,4 \cdot 10^{-5}$
STBU	1/1.000	13,4	$4,1 \cdot 10^{-5}$

Tabel 36
Veiligheidsfactoren
macrostabiliteit
buitenwaarts.

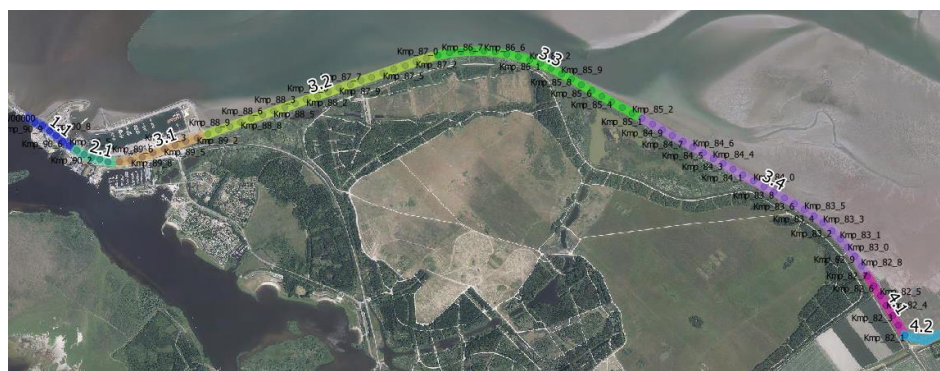
Trajectnorm jaarlijkse faalkans [-]	Schadefactor [-]	Materiaalfactor [-]	Modelfactor Bishop [-]	Vereiste SF D-Geo [-]
Signaalwaarde (1/3.000)	1,04	1,00	1,11	1,15
Max. toelaatbare kans (1/1.000)	1,00	1,00	1,11	1,11

Vakindeling

De basisvakindeling in paragraaf 2.3 bevat de SOS segmenten met de bijbehorende ondergrondscenario's. Voor de STBU beoordeling zijn op basis van de criteria uit de schematiseringshandleiding [RWS-WVL, 2016d.] de vakken (waar nodig) verder verfijnd. In het algemeen is de werkwijze voor STBU gelijk aan de voor STBI (paragraaf 3.1).

In tegenstelling tot de criteria voor STBI, is de oriëntatie van de dijk geen reden voor een vakgrens voor STBU, want overslag wordt niet meegenomen in de beoordeling van STBU. Daarnaast is het voorland wél een mogelijke reden voor een vakgrens voor STBU (dit in tegenstelling tot STBI). De gemaakte vakindeling is te zien in Figuur 44 en Tabel 37.

Figuur 44
Vakindeling voor het
faalmechanisme
STBU.



Tabel 37
Vakindeling STBU
inclusief uitleg.
Vakgroottes zijn
gemeten in GIS en
afgerond de
tientallen meters.

Vak	Dijkpalen	Vakgrootte [m]	Waterstand bij de norm [m +NAP]	Uitleg
1-1 ⁴	90.9 - 90.4	490	5.00	SOS segment 6027
2-1	90.4 - 89.9	390	5.01	SOS segment 6026
3-1	89.9 - 89.1	800	5.01	SOS segment 6025; haven
3-2	89.1 - 87.0	2070	5.02	SOS segment 6025; ten oosten van haven, ten westen van Vierhuizergat
3-3	87.0 - 85.1	1910	5.13	SOS segment 6025; Vierhuizergat
3-4	85.1 - 82.7	2400	5.16	SOS segment 6025 Ten oosten van Vierhuizergat
4-1	82.7 - 82.1	600	5.17	SOS segment 6024;
4-2	82.1 - 81.8	280	5.17	SOS segment 6024; verandering geometrie t.o.v. 4.1

Het eerste cijfer van een vak correspondeert met het bijbehorende basisvak SOS segment: vak 1 is SOS segment 6027, vak 2 is SOS segment 6026, vak 3 is SOS segment 6025 en vak 4 is SOS segment 6024. Een verdere verdeling in vakken van een SOS segment is aangegeven met het tweede cijfer. Vakken 4-1 en 4-2 bijvoorbeeld zijn twee vakken als gevolg van een verdere verdeling van basisvak 4 (SOS segment 6024).

De overwegingen voor de gekozen vakindeling staan beschreven in Bijlage K. In deze bijlage zijn daarnaast de maatgevende profielen per vak beschreven, alsook de ondergrondscenario's per vak.

⁴ De sluizen in vak 1-1 (tussen dijkpaal 90-5 tot 90-6) zijn als kunstwerk beschouwd voor het faalmechanisme STBU.

Waterstand bij de norm

Het verloop van de waterstand bij de norm over de dijkvakken is gering. Zie Tabel 37 voor de aangehouden waterstanden.

Geometrie

De geometrie is samengesteld op lodingen (de wadenzeebodem in het voorland) en het AHN2 (de dijkprofielen en het achterland). De geometrie op basis van het AHN2 is geverifieerd aan het DTM. Per vak is een maatgevend profiel gekozen. Indien er in een vak twee mogelijk maatgevende profielen zijn geïdentificeerd, zijn deze beiden beschouwd.

Dijkopbouw

Identiek aan het beoordelingsspoor STBI, zie paragraaf 3.1.2.

Grondparameters

Identiek aan het beoordelingsspoor STBI, zie paragraaf 3.1.2.

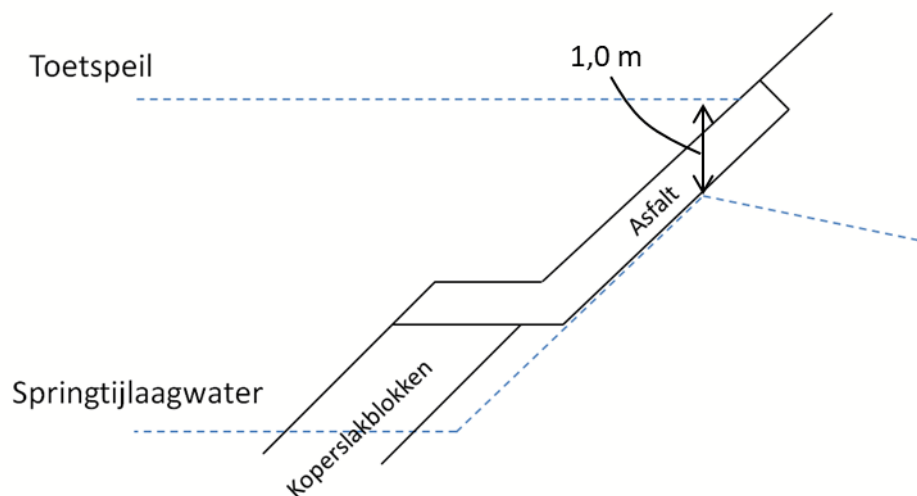
Waterspanningen

Bij STBU is vooral de val van het buitenwater van belang is. Hierbij zal het springtijlaagwater (-1,42 meter NAP) in combinatie met de normwaterstand (zie paragraaf en Tabel 37) als val worden aangenomen. De buitenwaterstand is gelijk aan springtijlaagwater.

Vanwege de goede doorlatendheid van het zandige dijklichaam is de freatische lijn in de dijk 1 meter lager ligt dan de waterstand bij de norm. Verder loopt de freatische lijn aan de buitentaludzijde onder de asfaltlaag. De verdere schematisering volgt dezelfde aanpak als voor het beoordelingsspoor STBI, conform het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRWD). Zie ook Figuur 45.

De stijghoogte in de watervoerende zandlaag over het hele profiel is gelijk aan de gemiddelde hoogwaterstand (NAP +1.06 meter).

*Figuur 45
Geschematiseerde
freatische lijn bij val
buitenwater voor
STBU.*



Verkeersbelasting

Bij STBU is sprake van een verkeersbelasting van 6 kN/m², welke over het hele buitentalud kan plaatsvinden (bijv. als gevolg van inspecties na hoogwater). Deze verkeersbelasting is zo ongunstig mogelijk geplaatst met betrekking tot het gevonden maatgevende glijvlak, met inachtneming van plekken die als niet bereikbaar worden geacht (steile taluds met een helling van 1:2, bestortingen).

Maatgevend glijvlak (faaldefinitie)

Omdat STBU een indirect faalmechanisme is, kan ieder glijvlak in het dijklichaam leiden tot falen van de dijk. Desalniettemin zijn maatgevende glijvlakken die klein en ondiep zijn nader beschouwd (zie hiervoor de resultaten in paragraaf 3.1.4). In geval de glijvlakken de bekleding doorsnijden is aangenomen dat dit leidt tot falen van de waterkering.

3.2.3

Resultaten eenvoudige beoordeling

De eenvoudige beoordeling van dit faalmechanisme bestaat uit onderstaande stappen:

- **E.1:** Waterkering is dijk of een dam.
- **E.2:** Constructieve elementen zijn aanwezig.
- **E.3:** De waterkering voldoet aan de eenvoudige toets op basis van algemene kenmerken.

Met als resultaat:

- **E.1:** De waterkering is langs het gehele beschouwde traject een dijk of dam.
- **E.2:** Er zijn geen constructies aanwezig die samen met de (onder-)grond de stabiliteit borgen.
- **E.3:** Het traject exclusief het havengedeelte mag op basis van stappen E.1 en E.2 getoetst worden op basis van algemene kenmerken. Hieruit blijkt dat alle vakken verder beoordeelt moeten worden. Dit oordeel is voor de meeste vakken geveld omdat de verhouding tussen waterhoogte en dijkhoogte groter is dan 2/3. Voor de enkele vakken die hier wel aan voldeden zijn geen veilige punten op de contourplots voor zanddijken gevonden (conform figuur 5.4 in Bijlage III van de wettelijke regeling [RWS, 2017a]). Zie ook Bijlage K.

De faalkans is op basis van bovenstaande geometrische kenmerken daarom niet verwaarloosbaar en het dijktraject dient verder beoordeeld te worden. In de volgende paragraaf is deze verdere beoordeling (de gedetailleerde beoordeling) nader beschreven.

3.2.4

Resultaten gedetailleerde beoordeling

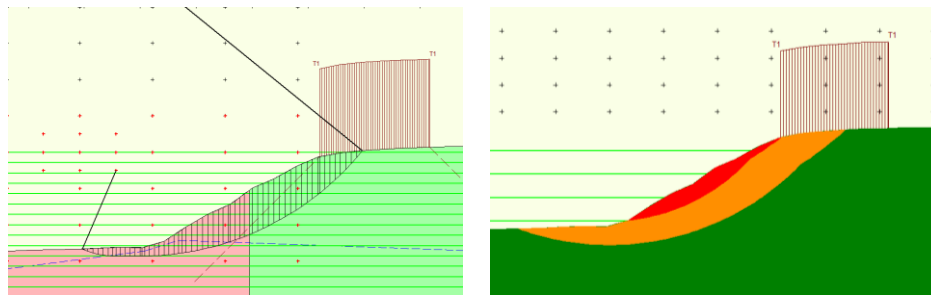
De gedetailleerde beoordeling is uitgevoerd met de software D-GeoStability versie 18.1. Binnen het WBI is het glijvlak model van LiftVan

voorgeschreven. In voorliggende beoordeling zijn zowel berekeningen met het glijvlakmodel van LiftVan als van Bishop uitgevoerd.

Vanwege de zandige dijklichamen worden relatief kleine, cirkelvormige, maatgevende glijvlakken verwacht. Met het LiftVan glijvlakmodel wordt mogelijk niet het maatgevende glijvlak gevonden. Het glijvlakmodel van Bishop geeft een beter inzicht in deze kleine glijvlakken. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 46 (vak 2.1). Met het LiftVan model wordt hier een groot glijvlak en een hoge stabiliteitsfactor gevonden. Het Bishop model beschrijft een klein glijvlak en een lage veiligheidsfactor.

Om de kleine glijvlakken, conform de faaldefinitie, goed in beeld te krijgen zijn de resultaten in voorliggende veiligheidsbeoordeling gepresenteerd op basis van het Bishop glijvlakmodel. Daarnaast kan in D-GeoStability meer inzicht worden verkregen in de maatgevende glijcirkels met behulp van de 'Safety Overview' als gebruikt wordt gemaakt van het Bishop model (Safety Overview is niet mogelijk bij het glijvlakmodel van LiftVan).

*Figuur 46
Links een LiftVan
berekening met een
SF (stabiliteitsfactor)
van 1,11. Rechts
een Bishop
berekening in
'Safety Overview'
modus (rood= SF
kleiner dan 1,0,
oranje= SF tussen
1,0 en 1,15).*



Resultaten per vak

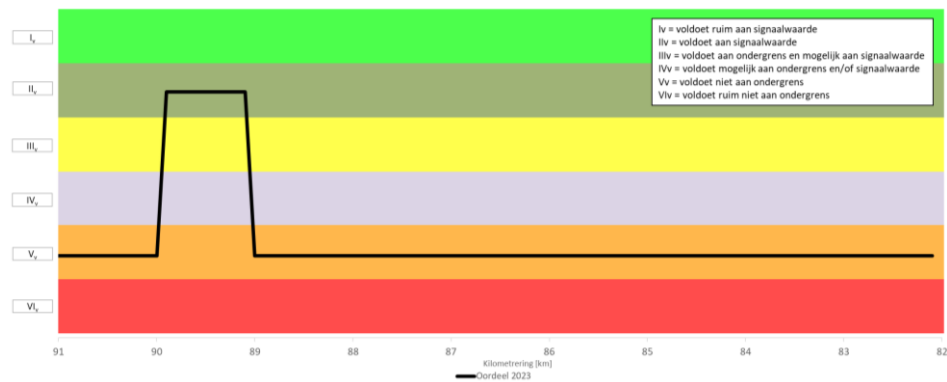
De resultaten van de gedetailleerde beoordeling voor STBU zijn per vak weergegeven in Tabel 38 en Figuur 47. Alle vakken voldoen niet aan de doorsnede-eis. Vak 3-1 is op basis van expert judgement alsnog goedgekeurd omdat het maatgevende glijvlak dusdanig klein en ondiep is dat het als niet relevant is beschouwd (zie ook Figuur 48 en Bijlage K).

De hoge faalkansen worden voornamelijk veroorzaakt door de combinatie van een grotendeels verzadigde zanddijk en kleine maatgevende glijvlakken.

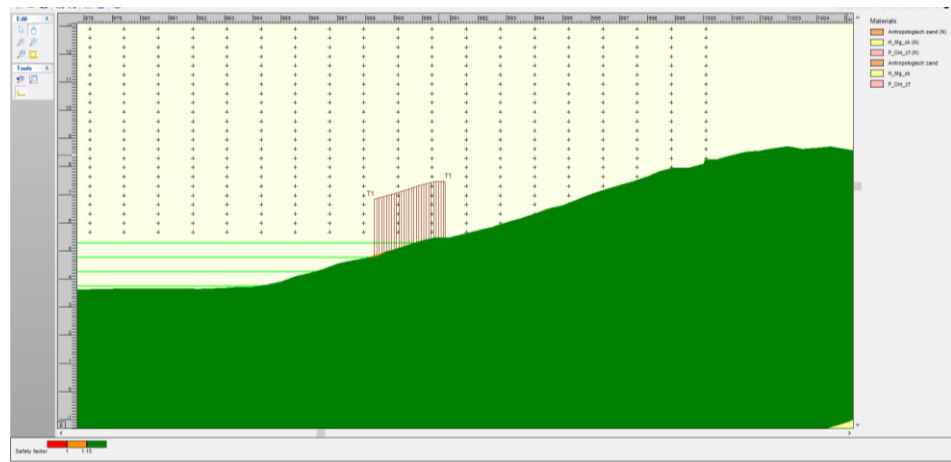
*Tabel 38
Faalkansen STBU.*

Vak	Faalkans [-]	Faalkanseis signaalwaarde ($1,4 \cdot 10^{-5}$)	Faalkanseis max. toelaatbare kans ($4,1 \cdot 10^{-5}$)
1-1	$3,2 \cdot 10^{-3}$	Voldoet niet	Voldoet niet
2-1	$7,1 \cdot 10^{-2}$	Voldoet niet	Voldoet niet
3-1	$2,8 \cdot 10^{-4}$	Voldoet niet	Voldoet niet
3-2	$2,2 \cdot 10^{-4}$	Voldoet niet	Voldoet niet
3-3	$1,8 \cdot 10^{-4}$	Voldoet niet	Voldoet niet
3-4	$1,7 \cdot 10^{-2}$	Voldoet niet	Voldoet niet
4-1	$1,1 \cdot 10^{-4}$	Voldoet niet	Voldoet niet
4-2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Voldoet niet	Voldoet niet

Figuur 47
STBU oordeel 2023
langs dijktraject.



Figuur 48
Safety overview
voor vak 3-1. De
groene delen
voldoen aan de
minimaal te halen
veiligheidsfactor van
1,11 (voor Bishop).

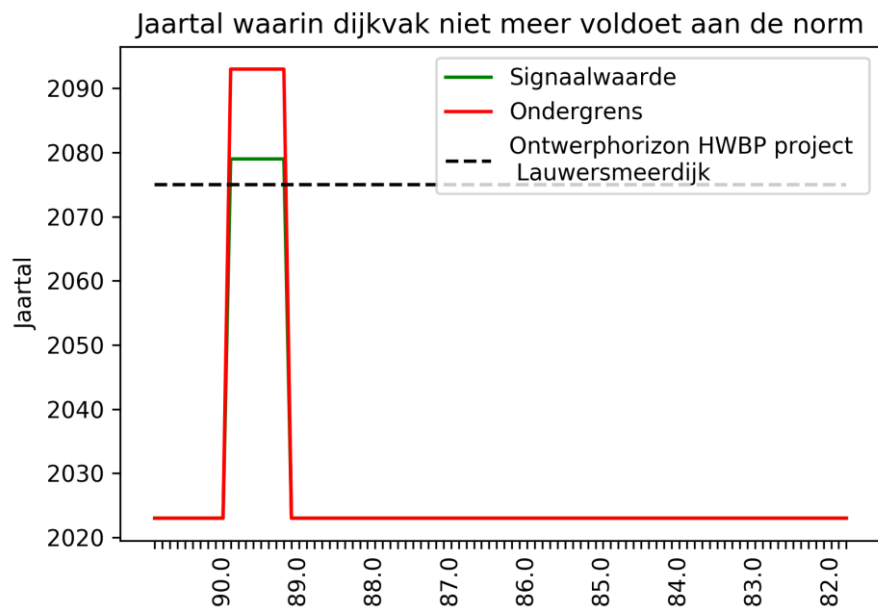


3.2.5

Restlevensduur

Vak 3-1 is het enige vak wat als voldoende is beoordeeld, en is daarmee ook het enige vak wat voor de restlevensduuranalyse is beschouwd. Tot en met 2075 voldoet vak 3-1 aan de signaalwaarde, maar in 2100 voldoet vak 3-1 niet meer aan de signaalwaarde en ook niet aan de ondergrens.

Figuur 49
STBU restlevensduur
langs dijktraject.

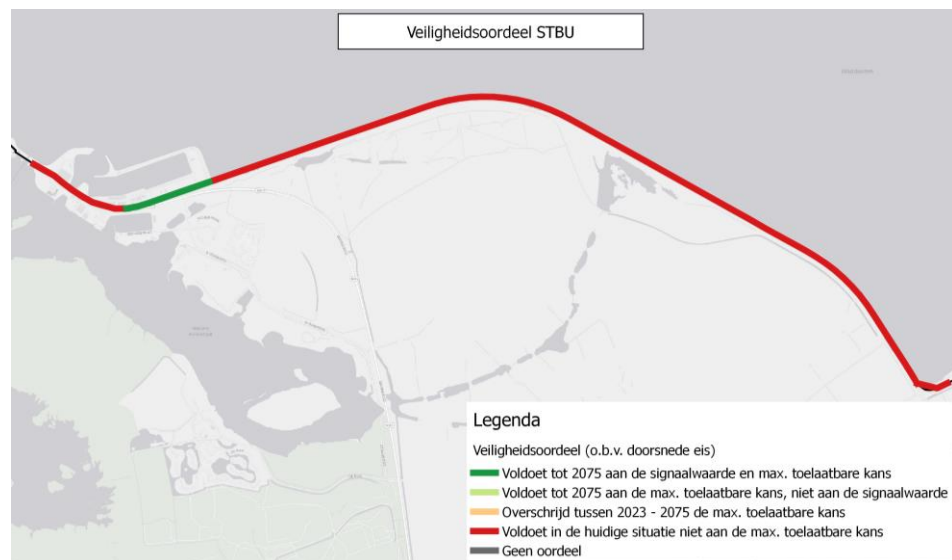


3.2.6

Veiligheidsoordeel

In de huidige situatie voldoet de Lauwersmeerdijk alleen aan de gestelde eisen voor STBU tussen dijkpaal 89.1 - 89.9. Dit is in het oostelijk deel in de haven van Lauwersoog. Hier deel voldoet de Lauwersmeerdijk tot na 2075 aan de maximaal toelaatbare kans (en de signaalwaarde). Alle overige delen van de Lauwersmeerdijk voldoen in de huidige situatie niet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans.

*Figuur 50
Veiligheidsoordeel
STBU*



3.2.7

Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

Het veiligheidsoordeel is (conform het WBI) tot stand gekomen op basis van een streng criterium voor het maatgevend glijvlak en een zanddijk die grotendeels verzadigd is. De berekende faalkansen zijn dusdanig groot dat tekenen van schade waargenomen zouden kunnen worden tijdens historische zware stormen.

We raden aan de verzadiging van de dijk verder aan te scherpen. Dit door peilbuizen te plaatsen en extra informatie over de val naar laagwater te verzamelen. Het beoordelingsresultaat is namelijk erg gevoelig voor de ligging van de freatische lijn. Daarnaast raden we aan de opgave voor STBU integraal te bekijken met de opgave voor de bekleding van het buitentalud. De fundering van een steenbekleding kan namelijk extra sterkte toevoegen.

3.3

Piping, opbarsten & heave – STPH

3.3.1 Algemeen

Deze paragraaf beschrijft de totstandkoming van het eindoordeel van de beoordeling voor het beoordelingsspoor piping (STPH). De beoordeling is begonnen met een eenvoudige beoordeling. Indien deze eenvoudige beoordeling tot het oordeel 'verder beoordelen' leidt, is een gedetailleerde

beoordeling uitgevoerd. De gedetailleerde beoordeling is uitgevoerd met Ringtoets versie 17.3.1.

3.3.2 Specifieke uitgangspunten

Faalkanseis

De faalkanseis voor STPH is bepaald conform Bijlage III op de Toelichting bij de Ministeriële Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2017 [RWS, 2017a]. De faalkanseis voor STPH is opgenomen in Tabel 39.

Tabel 39
Faalkanseis STBI.

Faalmechanisme	Norm [per jaar]	Lengte [km]	Faalkanseis op doorsnedeniveau [per jaar]
STPH	1/3.000	13,4	$4,2 \cdot 10^{-6}$
STPH	1/1.000	13,4	$1,3 \cdot 10^{-5}$

Vakindeling

De vakindelingen voor faalmechanismen STBI, STBU en STPH is opgesteld conform de schematiseringhandleidingen van het WBI2017 (zie ook Bijlage I). De lokale ondergrondschematisatie, zoals beschreven in paragraaf 2.3, vormt de gemeenschappelijke basis voor de vakindeling voor alle geotechnische faalmechanismen (STBI, STBU en STPH). Vervolgens is deze vakindeling per faalmechanisme verfijnd. In Tabel 40 is de vakindeling voor STPH beschreven, inclusief de duiding waarom de vakken op die manier zijn gedefinieerd. De vakindeling voor STPH is ook te zien in Figuur 51. De totstandkoming van de vakindeling is in meer detail beschreven in Bijlage I.

Tabel 40
Vakindeling STPH
inclusief uitleg

Vak	Dijkpalen	Uitleg
1.1	90.9 - 90.4	SOS segment 6027
2.1	90.4 - 89.9	SOS segment 6026
3.1	89.9 - 86.5	SOS segment 6025; Ten westen van het Vierhuizergat
3.2	86.5 - 85.5	SOS segment 6025; Ter plaatse van het Vierhuizergat, geen kwelders aanwezig, dus is sprake van een kortere kwelweg
3.3	85.5 - 82.7	SOS segment 6025; Ten oosten van het Vierhuizergat
4.1	82.7 - 81.8	SOS segment 6024

Figuur 51
Vakindeling STPH



Maatgevende locaties

In een eerder stadium zijn door Arcadis peilbuisproeven uitgevoerd op de meest pipinggevoelige locaties [Arcadis, 2018a] en [Arcadis, 2018b]. Dit zijn 5 locaties in vakken 3.1, 3.3 en 4.1:

- 88.89, nabij Kmp 88.9 in dijkvak 3.1
- 87.02, nabij Kmp 87.0 in dijkvak 3.1
- 84.04, nabij Kmp 84.0 in dijkvak 3.3
- 83.22, nabij Kmp 83.2 in dijkvak 3.3
- 82.59, nabij Kmp 82.6 in dijkvak 4.1

Voor deze 5 locaties zijn in [Arcadis, 2018a,b] lokale ondergrond-schematisaties opgesteld. Deze schematisaties worden ook voor de beoordeling STPH gebruikt. Daarnaast wordt het dwarsprofiel gebruikt dat op de locatie van de peilbuizen aanwezig is. Er worden dus lokale schematisaties toegepast. In vakken 1.1 en 2.1 zijn geen peilbuisproeven uitgevoerd. Hier wordt geen lokale schematisatie toegepast, maar is gewerkt met ondergrondscenario's. De ondergrondscenario's uit paragraaf 2.3 worden gebruikt voor deze vakken, en maatgevende hydraulische belastingen en maatgevende dwarsprofielen worden gekozen. In vak 3.2 zijn ook geen peilbuizen aanwezig. Door het non-uniforme karakter van de ondergrond (westelijk een dunne deklaag, oostelijk een dikke) zijn in dit vak twee lokale schematisaties opgesteld: een bij Kmp 86.1 en een bij Kmp 85.8. Daarnaast is bij Kmp 82.1 in vak 4.1 een afwijkende ondergrond gevonden, zonder diepe stoorlaagjes. Op deze locatie is een extra schematisatie opgesteld.

Hydraulische belastingen

De hydraulische randvoorwaarden zijn beschreven in paragraaf 2.2. De piping berekeningen zijn uitgevoerd bij een buitenwaterstand (MHW) met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de signaleringswaarde van het traject. Voor elk vak (en elke locatie) zijn de hydraulische belastingen weergegeven in Tabel 41. De polderpeilen in het achterland komen uit [NZV, 2018c]. Op locaties waar geen teensloot aanwezig is, wordt het polderpeil aangenomen op maaiveldniveau.

Tabel 41
Hydraulische
belastingen per STBI
vak

Vak	Locatie	Waterstand bij de norm (1/3.000 per jaar)	Polderpeil
1.1	Maatgevend voor vak 1.1	5,00	Maaiveld

Vak	Locatie	Waterstand bij de norm (1/3.000 per jaar)	Polderpeil
2.1	Maatgevend voor vak 2.1	5,01	-0,93
3.1	Kmp 88.9	5,01	Maaiveld
	Kmp 87.0	5,02	Maaiveld
3.2	Kmp 86.2	5,03	-1,60
	Kmp 85.8	5,05	Maaiveld
3.3	Kmp 84.0	5,11	-1,60
	Kmp 83.2	5,14	-1,60
4.1	Kmp 82.6	5,16	-1,34
	Kmp 82.1	5,17	Maaiveld

Geometrie

Voor vakken 1.1 en 2.1 is een maatgevend dwarsprofiel gekozen voor de pipingberekeningen. Hierbij is gelet op de volgende aspecten:

- Niveau maaiveld polderzijde: hoe lager het maaiveld aan polderzijde, hoe ongunstiger het resultaat;
- Aanwezigheid teensloot: een teensloot heeft doorgaans een negatieve invloed op de piping gevoeligheid.
- Lengte kwelweg: hoe korter de kwelweg, hoe negatiever het resultaat. De aanwezigheid van een voorland heeft een gunstig effect op het resultaat, omdat dit de kwelweg vergroot.

Voor de overige vakken zijn lokale schematisaties opgesteld. Hierbij is steeds het dwarsprofiel dat daadwerkelijk op de locatie voorkomt gebruikt in de berekeningen. De maatgevende dwarsprofielen zijn voor elk vak en elke locatie te vinden in Bijlage L.1.

Grondopbouw (per vak)

De verschillende ondergrondscenario's die voorkomen langs het te beoordelen traject zijn beschouwd in paragraaf 2.3. Als volgende stap is voor dijkvak 1.1 en 2.1 bepaald welke van deze ondergrondscenario's voorkomen en over welk deel van het vak. Op deze manier is per vak een percentage van voorkomen toegekend aan de verschillende ondergrondscenario's (op basis van de lengte waarover het scenario voorkomt t.o.v. de lengte van het vak). Omdat uitgebreid grondonderzoek aanwezig is, kunnen de ondergrondscenario's op basis van het GTLP voldoende betrouwbaar worden toegekend aan specifieke delen.

Voor de overige locaties zijn lokale schematisaties opgesteld, gebaseerd op de schematisaties van Arcadis (voor zover aanwezig). Hierin is de volgende koppeling tussen grondlagen in het peilbuisonderzoek [Arcadis, 2018a,b] en SOS eenheden aangehouden:

Tabel 42
Koppeling
grondlagen Arcadis
en SOS eenheden

Aanduiding grondlaag in [Arcadis,2018a,b]	SOS eenheid
Opgebracht matig tot grof zand	Dijksmateriaal

Aanduiding grondlaag in [Arcadis,2018a,b]	SOS eenheid
Klei	H_Mp_k
Klei, plaatselijk gelaagd met zand	H_Mp_k (gelaagd met zand)
Matig fijn tot matig grof zand, plaatselijk gelaagd met klei	H_Mg_zk (matig grof)
Zeer tot matig fijn zand, plaatselijk gelaagd met klei	H_Mg_zk (fijn)
Zeer tot matig fijn zand, sterk gelaagd met klei	H_Mkw_z&k
Zeer tot matig fijn zand (Peelo)	P_Om_zf
Potklei, plaatselijk gelaagd met zand	P_Ova_sd
Zeer tot matig fijn zand (Eem)	P_Mg_zk

De ondergrondscenario's en lokale schematisaties die zijn gebruikt voor de berekeningen zijn te vinden in Bijlage L.

Grondparameters

De grondparameters zijn gebaseerd op het uitgevoerde grondonderzoek en de schematisaties van Arcadis. Waar geen parameterwaarden bekend zijn, zijn standaardwaarden gebruikt uit SOS en de schematiseringshandleidingen. In Ringtoets dienen de parameters te worden ingevoerd als stochastische verdelingen: met een verwachtingswaarde en een variatiecoëfficiënt/standaardafwijking.

Voor het verzadigde gewicht van de verschillende grondsoorten worden als verwachtingswaarde de gemiddeldes gebruikt uit de bandbreedtes zoals aangegeven in de schematiseringshandleiding macrostabiliteit [RWS – WVL, 2016d]. Als variatiecoëfficiënt wordt 5% gebruikt, overeenkomstig met schematiseringshandleiding piping [RWS – WVL, 2017c]. De deklagen moeten echter in Ringtoets allemaal dezelfde standaardafwijking hebben. Voor alle deklagen wordt daarom een standaardafwijking van $0,9 \text{ kN/m}^3$ gebruikt, overeenkomstig met de standaardafwijking van H_Mkw_z&k, de zwaarste deklaag, bij 5% variatie. De gebruikte waarden zijn weergegeven in Tabel 43.

Tabel 43
Waarden nat
volumiek gewicht

Grondlaag	Deklaag Ja/nee	Nat volumiek gewicht γ_n [kN/m ³]
H_Mg_zk (fijn)	Nee	21
H_Mg_zk (matig grof)	Nee	21
H_Mkw_z&k	Ja	18,5
H_Mp_k	Ja	14,5
H_Mp_k (gelaagd met zand)	Ja	14,5
P_Mg_zk	Nee	21
P_Ova_sd	Nee	14,5
P_Om_zf	Nee	21
P_Rg_zm (vak 1.1+2.1)	Nee	21
P_Wdz_zf (vak 1.1+2.1)	Nee	21
H_Mg_zk (vak 1.1+2.1)	Nee	21
H_Mkw_z&k (vak 1.1+2.1)	Ja	21
H_Mp_k (vak 1.1+2.1)	Ja	14,5
P_Ova_sd (vak 1.1+2.1)	Nee	14,5
H_Vbv_v (vak 1.1+2.1)	Nee	11

Voor de doorlatendheid (k) van de watervoerende zandlagen in vakken 1.1 en 2.1 is, waar mogelijk, gebruik gemaakt van de uitgevoerde slugtests [Wiertsema en Partners, 2018]. Hierin is op 20 locaties langs het te beoordelen traject de doorlatendheid bepaald. De peilbuizen zijn allemaal geplaatst in de zandlagen H_Mg_zk. Deze laag is beschouwd als een homogene laag, die doorloopt langs het traject. De gemiddelde k -waarde van de proeven is 7,35m/dag, met een variatiecoëfficiënt van 25%. Deze waarden zijn gebruikt als input voor Ringtoets. In vakken 1.1 en 2.1 is zijn er echter ook andere zandlagen aanwezig (P_Wdz_zf en P_Rg_zm), waarin piping kan optreden. Voor deze lagen zijn standaardwaarden voor k gebruikt uit het SOS. Voor deze lagen is de standaard variatiecoëfficiënt van 50% gebruikt, conform schematiseringshandleiding piping [RWS – WVL, 2017c]. De doorlatendheden van de watervoerende zandlagen in vakken 3.1 t/m 4.1 zijn gebaseerd op de doorlatendheden gehanteerd door Arcadis [Arcadis, 2018a,b]. Zodoende sluiten de berekeningen zo dicht mogelijk aan bij het peilbuisenonderzoek. Aangezien de relevante watervoerende zandlagen in deze vakken H_Mg_zk zijn, wordt hiervoor ook een variatiecoëfficiënt van 25% gehanteerd. Voor de lagen waarover geen nadere informatie beschikbaar is, zijn de standwaarden uit de schematiseringhandleiding toegepast. We merken op in het peilbuisenonderzoek per locatie verschillende doorlatendheden zijn gehanteerd voor dezelfde lagen. In de berekeningen is dit niet gedaan, maar is de maatgevende doorlatendheid van een bepaalde laag overal in het traject gebruikt (niet locatie-afhankelijk). De gebruikte k -waarden zijn weergegeven in Tabel 35. Hierin is onderscheid gemaakt tussen de lagen in vakken 1.1 en 2.1 en de rest van het traject.

Tabel 44
k-waardes
watervoerende
zandlagen

Grondsoort	Verwachtingswaarde k [m/dag]	Variatiecoëfficiënt
H_Mg_zk (fijn)	10	0,25
H_Mg_zk (matig grof)	12	0,25
P_Mg_zk	10	0,25
P_Om_zf	14	0,25
H_Mg_zk (vak 1.1+2.1)	7,35	0,25
P_Wdz_zf (vak 1.1+2.1)	30	0,50
P_Rg_zm (vak 1.1+2.1)	20	0,50

Voor de korrelgrootte d_{70} van de watervoerende zandlagen is gebruik gemaakt van het uitgevoerde grondonderzoek, waarin korrelverdelingen zijn gemaakt [Wiertsema & Partners, 2018]. Op 7 locaties is op verschillende niveaus de d_{70} bepaald, overal in het Holocene zandpakket. Alleen de boormonsters die minder dan 5% fijne fractie bevatten zijn bekeken. Op 6 locaties betreft dit de laag H_Mg_zk. De gemiddelde d_{70} van deze korrelverdelingen is 0,161mm, met een variatiecoëfficiënt van 12%. Op 1 locatie (boring MB90047) zijn ook andere zandlagen aangetroffen (P_Wdz_zf, P_Rg_zm). De d_{70} bij deze boring is hoger dan op de andere locaties. Als conservatieve keuze ook voor deze grondlagen ook een d_{70} van 0,161mm aangehouden. De gebruikte waarden zijn weergegeven in Tabel 35. Schematiseringshandleiding piping [RWS – WVL, 2017c] geeft als standaardwaarde voor de variatiecoëfficiënt 12% aan. We merken op dat er onderscheid is gemaakt tussen fijn zand en matig grof zand (H_Mg_zk). Bij

gebrek aan voldoende metingen zijn voor deze lagen dezelfde korrelgroottes aangehouden.

*Tabel 45
D₇₀ watervoerende
zandlagen*

Grondsoort	Verwachtingswaarde d ₇₀ [mm]	Variatiecoëfficiënt
H_Mg_zk (fijn)	0,161	0,12
H_Mg_zk (matig grof)	0,161	0,12
P_Mg_zk	0,161	0,12
P_Om_zf	0,161	0,12
P_Wdz_zf (vak 1.1+2.1)	0,161	0,12
P_Rg_zm (vak 1.1+2.1)	0,161	0,12
H_Mg_zk (vak 1.1+2.1)	0,161	0,12

Intredepunt

Het intredepunt is gedefinieerd als het punt waar de watervoerende zandlaag in direct contact staat met het buitenwater of, indien er een voorland aanwezig is, waar de stijghoogte in de watervoerende zandlaag (nagenoeg) gelijk is aan de buitenwaterstand (MHW). In het peilbuisonderzoek van Arcadis [Arcadis, 2018a,b] zijn fictieve intredepunten op de 5 locaties bepaald. Deze zijn echter alleen geldig voor de zandlaag waarin de peilbuis stond. Voor andere zandlagen kunnen deze intredepunten niet worden gebruikt. Voor deze zandlagen is eerst een berekening uitgevoerd met het intredepunt ter plaatse van de buitenteen. Indien dit niet tot een voldoende oordeel leidt, is het fictieve intredepunt bepaald volgens de schematiseringshandleiding piping [RWS – WVL, 2017c], op basis van modellen uit het TRWD.

Ter plekke van het Vierhuizergat (vak 3.2) staan de watervoerende zandlagen in direct contact met het buitenwater. Het intredepunt aldaar is gekozen op de plek waar dit contact ontstaat. In vak 2.1 zijn geen peilbuisproeven uitgevoerd. Hier is echter een bebouwd voorland aanwezig van orde grootte 100m ter plaatse van de buitenhaven. Het intredepunt is daarom op het einde van dit voorland gelegd. In vak 1.1 zijn ook geen peilbuisproeven uitgevoerd. Hier als conservatieve inschatting voor het intredepunt gekozen voor de buitenteen.

Uittredepunt

Als uittredepunt kunnen twee verschillende locaties worden gekozen:

- 1) Bij de teensloot: hier is de deklaag meestal het dunst en kan dus gemakkelijk opbarsten plaatsvinden;
- 2) Bij de binnenteen: hier is de deklaag dikker dan bij de teensloot, maar de kwelweg korter.

In de gedetailleerde beoordeling in Ringtoets wordt elke locatie twee maal berekend: een keer voor elk uittredepunt. De berekening met de hoogste faalkans is dan maatgevend. In de eenvoudige beoordeling wordt de meest ongunstige combinatie van de verschillende uittredepunten gebruikt: de dikte van de deklaag bij de teensloot (dunne deklaag is maatgevend) en de kwelweglengte bij de binnenberm (korte kwelweg is maatgevend).

Dempingsfactor bij uittredepunt

De dempingsfactor bij het uittredepunt is de respons van de stijghoogte in de watervoerende zandlaag ter plaatse van het uittredepunt. Voor de 5 peilbuislocaties zijn de stijghoogtes bij MHW in een eerder stadium berekend Bijlage P. Deze stijghoogtes zijn bepaald bij de berm, maar er is aangenomen dat de stijghoogtes bij de sloot even groot zijn. Dit is een conservatieve benadering. Deze stijghoogtes zijn omgerekend naar een dempingsfactor via de volgende formule:

$$r = \frac{\varphi - PP}{MHW - PP}$$

Waarin:

r	Dempingsfactor
φ	Stijghoogte bij uittredepunt
PP	Polderpeil
MHW	Waterstand bij de norm

Voor de locaties (en zandlagen) waar geen stijghoogtes van bepaald zijn, is in eerste instantie gerekend met 100% respons. Dit betekent dat de dempingsfactor gelijk is aan 1,0. Indien dit niet leidt tot een voldoende oordeel, is de stijghoogte bij het uittredepunt bepaald met behulp van modellen uit TRWD, en vervolgens via bovenstaande formule omgerekend naar een dempingsfactor.

Voor de dempingsfactor wordt standaard een variatiecoëfficiënt van 10% gebruikt [RWS – WVL, 2017c]. Voor een dempingsfactor van 1,0 wordt een variatie van 0% gebruikt, omdat de dempingsfactor nooit hoger zal worden dan 1,0.

Rekenscenario's

Voor elke pipinglocatie zijn verschillende scenario's doorerekend. Zoals hierboven al beschreven is de veiligheid voor piping berekend bij twee mogelijke uittredepunten: de teensloot (indien aanwezig) en de binnenteen. Daarnaast zijn er op de meeste locaties meerdere zandlagen aanwezig die aan de bovenkant worden begrenst door een ondoorlatende laag; er zijn dus meerdere lagen aanwezig waarin piping zou kunnen optreden. De veiligheid tegen piping van al deze lagen wordt voor beide mogelijke uittredepunten berekend. Uiteindelijk wordt de combinatie zandlaag en uittredepunt met de hoogste faalkans als maatgevend gezien.

Voor elke zandlaag is eerst een berekening gemaakt met de teensloot als uittredepunt. In deze berekeningen zijn de stijghoogtes bij het uittredepunt gebaseerd op de peilbuisproeven, zoals al eerder vermeld. Indien in dit geval opbarsten kan optreden (opbarstveiligheid < 1,20, conform STBI criterium) wordt aangenomen dat zich hier de grenspotentiaal zal instellen. Dit blijkt voor alle rekenscenario's aan de orde te zijn. Het instellen van de grenspotentiaal bij de teensloot heeft invloed op de stijghoogte bij de

binnenteen. De stijghoogte zal namelijk lineair verlopen van de buitenwaterstand bij het intredepunt naar de grenspotential bij de teensloot. Op deze manier kan de nieuwe stijghoogte (na opbarsten bij de teensloot) bij de binnenteen worden bepaald. Deze wordt gebruikt om de dempingsfactor voor de berekening met de binnenteen als uittredepunt te bepalen. De nieuwe stijghoogte bij de binnenteen leidt tot kleine (vaak minimale) kansen op opbarsten. Daarnaast wordt aangenomen dat de freatische lijn nabij de binnenteen op het maaiveld ligt. Door de variatiecoëfficiënt van 10% op het polderpeil (freatische lijn), komt deze in de berekening iets onder maaiveld te liggen. De teensloot, waar het polderpeil heerst, ligt ongeveer 40m verderop. Er kan dus veilig worden aangenomen dat de freatische lijn bij de binnenteen hoger ligt.

3.3.3 Resultaten eenvoudige beoordeling

De eenvoudige beoordeling van dit faalmechanisme bestaat uit onderstaande stappen:

- **E.1:** Waterkering is dijk of een dam.
- **E.2:** Waterkering bestaat uit een zanddijk op een zandondergrond
- **E.3:** Constructieve elementen zijn aanwezig in het grondlichaam of in de ondergrond
- **E.4:** De dijk voldoet op basis van een eenvoudige tijdsafhankelijke benadering
- **E.5:** De waterkering heeft veilige afmetingen

Met als resultaat:

- **E.1:** De waterkering is langs het gehele beschouwde traject een dijk of dam.
- **E.2:** Geen zand op zand situaties. Er zijn altijd (dunne) stoorlagen aanwezig.
- **E.3:** Er zijn geen constructieve elementen in de ondergrond aanwezig.
- **E.4:** Een van de voorwaarden voor het voldoen aan de eenvoudige tijdsafhankelijke benadering is dat er rapporten beschikbaar zijn op basis waarvan kan worden aangetoond dat er in het verleden geen zandmeevoerende wel is waargenomen. Aangezien deze rapporten niet beschikbaar zijn, wordt niet voldaan aan de eenvoudige tijdsafhankelijke benadering.
- **E.5:** Alle vakken mogen op basis van stappen E.1 t/m E.4 getoetst worden op basis van veilige afmetingen. In toets E.5 voldoet geen van deze vakken op basis van veilige afmetingen. Deze vakken dienen allemaal verder beoordeeld te worden in de gedetailleerde beoordeling.

De eenvoudige beoordeling is terug te vinden in Bijlage L.3.

3.3.4 Resultaten gedetailleerde beoordeling

De gedetailleerde beoordeling STPH is uitgevoerd met Ringtoets versie 17.3.1. De resultaten van de gedetailleerde beoordeling STPH in Ringtoets zijn weergegeven in Tabel 46.

Tabel 46
Faalkansen STPH per
vak en
ondergrondscenario

Vak	Ondergrondscenario/ Locatie	Faalkans	Voldoet ja/nee	
			Signaalwaarde (4,24E-06)	Ondergrens (1,27E-05)
1.1	6027_1b1	FV	Ja	Ja
	6027_1b2	1,43E-07	Ja	Ja
2.1	6026_1b1	2,98E-08	Ja	Ja
	6026_1b2	1,68E-07	Ja	Ja
3.1	Kmp 88.9	1,33E-06	Ja	Ja
	Kmp 87.0	3,37E-08	Ja	Ja
3.2	Kmp 86.1	6,98E-05	Nee	Nee
	Kmp 85.8	1,85E-11	Ja	Ja
3.3	Kmp 84.0	4,82E-07	Ja	Ja
	Kmp 83.2	7,68E-07	Ja	Ja
4.1	Kmp 82.6	8,80E-07	Ja	Ja
	Kmp 82.1	2,81E-07	Ja	Ja

Bij de resultaten merken we het volgende op:

- Alleen locatie Kmp 86.1 in vak 3.2 voldoet niet aan de signaalwaarde en de ondergrens. Alle andere vakken en locaties voldoen aan beide.
- Bij elke berekening is het uittredepunt bij de teensloot maatgevend over het uittredepunt bij de binnenteen
- In vak 3.3 en 4.1 zijn de fictieve intredepunten van de bovenste zandlaag bepaald aan de hand van TRWD, omdat de peilbuisproeven geen intredepunten voor deze lagen geven en het intredepunt bij de teen niet tot een voldoende oordeel heeft geleid. Aan de hand van TRWD is het oordeel wel voldoende. Daarnaast is bij Kmp 82.6 ook de stijghoogte bij de sloot voor de bovenste zandlaag bepaald aan de hand van TRWD.
- Het intredepunt van de diepste zandlaag bij Kmp 82.6 is gelijk aangenomen als dat van de zandlaag erboven. Waarschijnlijk ligt het intredepunt in werkelijkheid nog verder weg, omdat er meer weerstand aanwezig is. De aanname van gelijke intredepunten is daarom conservatief.
- De faalkansen zijn erg gevoelig voor het wel of niet aanwezig zijn van stoorlaagjes in de diepere zandlagen. Deze verkleinen namelijk de aquiferdikte (splitsen de aquifer in twee), waardoor de veiligheid tegen piping groter wordt. Op basis van de sonderingen verwachten we dat deze diepere stoorlaagjes overal aanwezig zijn. De berekeningen zoals hierboven gepresenteerd geven daarom een goed beeld van de veiligheid van het hele traject. Alleen bij Kmp 82.1 zijn diepere stoorlaagjes niet heel duidelijk aanwezig. Deze berekening is dan ook uitgevoerd zonder deze stoorlaagjes. Door de grote kwelder die op deze locatie voor de dijk aanwezig is, wordt op deze locaties ook zonder stoorlaagjes voldaan aan de faalkanseis.
- In vak 2.1 is het intredepunt op het eind van het aanwezige voorland gelegd. Hier is echter geen onderzoek uitgevoerd. Als het voorland niet

zou worden meegenomen, leidt tot door het lage maaiveld bij de binnenhaven waarschijnlijk tot een onvoldoende oordeel.

- Voor de profielen met teensloot is de diepte van de teensloot onbekend. Het is aangenomen dat de bodem van de teensloot 1m beneden polderpeil ligt. Als dit leidt tot insnijden van de deklaag, is aangenomen dat de bodem van de teensloot op de grens van de deklaag en watervoerende zandlaag ligt. Dit leidt tot een maatgevende situatie.

Voor alle vakken liggen de faalkansen op de verschillende locaties redelijk dicht bij elkaar. De maatgevende van de twee wordt daarom als resultaat voor het gehele vak gezien. Alleen in vak 3.2 (Vierhuizergat) is er een groot verschil tussen beide locaties. Dit is te verklaren door de dikte van de deklaag, die in het westen veel dunner is dan in het oosten. Er wordt aangenomen dat beide locaties representatief zijn voor 50% van het vak. De totale faalkans voor vak 3.2 wordt dan $3,49E-05$. Dit leidt nog steeds tot een onvoldoende oordeel. De faalkansen per vak zijn gepresenteerd in Tabel 46.

*Tabel 47
Faalkans STPH per
vak in 2017*

Vak	Faalkans [1/jaar]	Faalkanseis op doorsnede niveau	
		Signaalwaarde ($4,24E-06$)	Max. toelaatbare kans ($1,27E-05$)
1.1	$1,43E-07$	Voldoet	Voldoet
2.1	$1,68E-07$	Voldoet	Voldoet
3.1	$1,33E-06$	Voldoet	Voldoet
3.2	$3,49E-05$	Voldoet niet	Voldoet niet
3.3	$7,68E-07$	Voldoet	Voldoet
4.1	$8,80E-07$	Voldoet	Voldoet

Op basis van de berekende faalkansen voor STPH kunnen de verschillende vakken in verschillende categorieën worden geplaatst, elk met bijbehorend veiligheidsoordeel. Deze indeling in categorieën is conform Bijlage III Sterkte en Veiligheid [RWS – WVL, 2017a]. De veiligheidsoordelen zijn weergegeven in Tabel 48.

*Tabel 48
Veiligheidsoordeel
voor STPH conform
de categorieën van
het WBI*

Vak	Categorie	Oordeel
1.1	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
2.1	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
3.1	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
3.2	IV _v	Voldoet mogelijk aan de ondergrens of aan de signaleringswaarde
3.3	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde
4.2	II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde

3.3.5

Restlevensduur

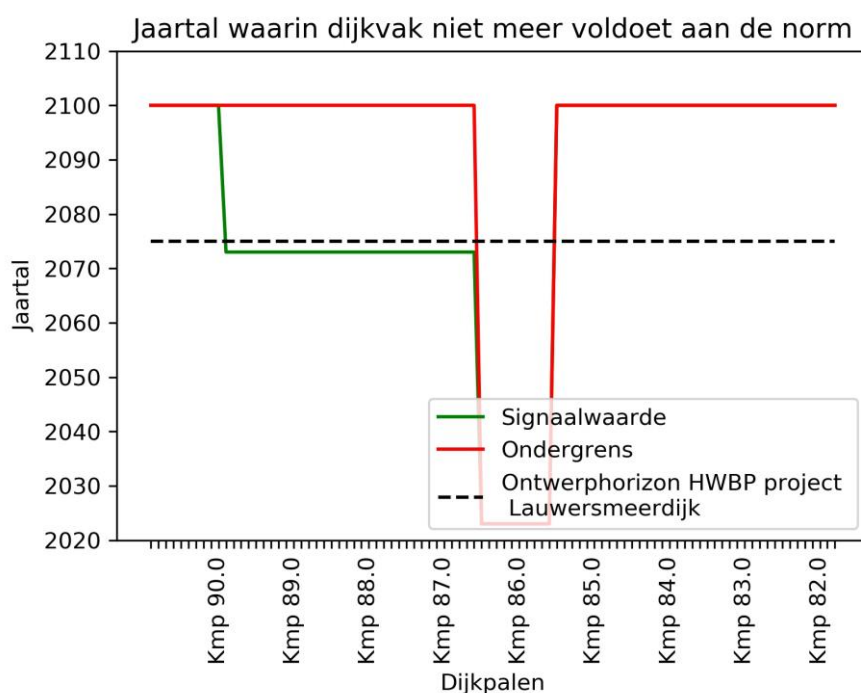
Vak 3.2 uitgezonderd wordt in de huidige situatie voldaan aan de signaalwaarde. Voor deze vakken is een restlevensduuranalyse uitgevoerd. Deze analyse is op dezelfde wijze uitgevoerd als de hierboven beschreven beoordeling. Alleen zijn de hydraulische randvoorwaarden voor zichtjaar 2075 gebruikt. De dempingsfactor is gelijk aangenomen aan de huidige situatie. In

Tabel 49 zijn de faalkansen voor zichtjaar 2075 weergegeven. Alleen vak 3.1 voldoet niet aan de signaalwaarde in 2075, maar wel aan de ondergrens. De overige vakken blijven voldoen aan zowel de signaalwaarde als de ondergrens.

Tabel 49
Restlevensduur
analyse. Beoordeling
in zichtjaar 2075

Vak	Faalkans [1/jaar]	Faalkanseis op doorsnede niveau	
		Signaalwaarde (4,24E-06)	Max. toelaatbare kans (1,27E-05)
1.1	3,64E-07	Voldoet	Voldoet
2.1	1,34E-06	Voldoet	Voldoet
3.1	4,45E-06	Voldoet niet	Voldoet
3.3	2,08E-06	Voldoet	Voldoet
4.1	2,38E-06	Voldoet	Voldoet

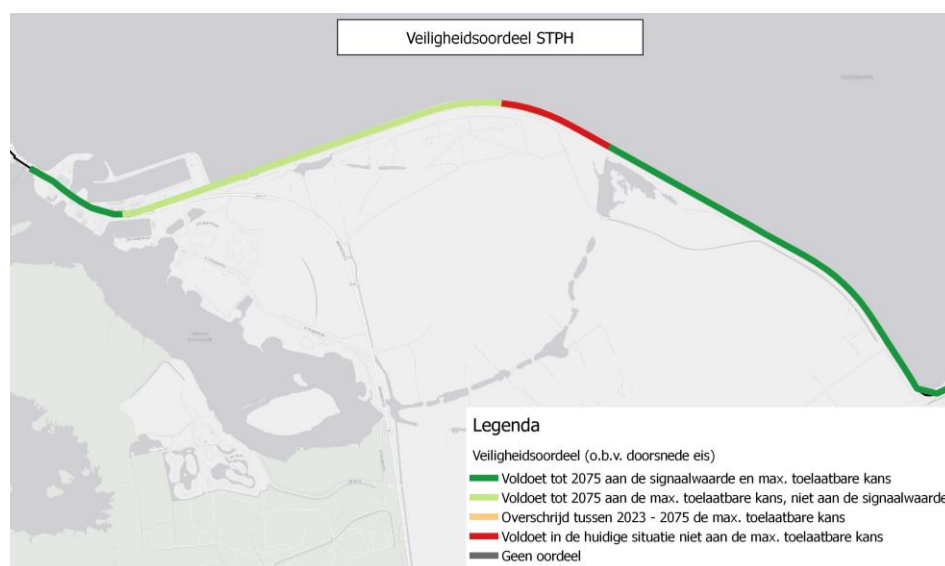
Figuur 52
Restlevensduur voor
piping



3.3.6 Veiligheidsoordeel

Figuur 53 geeft het veiligheidsoordeel voor piping weer. Bijna het gehele traject voldoet in ieder geval tot 2075 aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. De getijdenafzettingen en de bijbehorende gelaagdheid van de ondergrond in combinatie met de aanwezig kwelders is hiervoor de belangrijkste reden. Bij het Vierhuizergat is geen voorland aanwezig. Het intredepunt ligt hier aan de buitenteen van de dijk en is de aanwezige kwelweg significant kleiner. Dit vak voldoet daarom in de huidige situatie niet aan de maximaal toelaatbare kans.

*Figuur 53
Veiligheidsoordeel
piping*



3.3.7 Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

De lauwersmeerdijk is over een beperkte lengte afgekeurd op piping. Gezien het ontbreken van het voorland is dit duidelijk de zwakste schakel. Om tot 2075 te voldoen aan de maximaal toelaatbare kans moet de faalkans met een factor 3-10 verkleind worden. Gezien een lokale schematisatie is opgesteld waarin de dikte van de deklaag, doorlatendheid en de korreldiameter zijn bepaald op basis van lokale data lijkt dit niet reëel. We raden aan peilbuizen te plaatsen en de respons te meten. Daarnaast om te verkennen of op basis van een tijdsafhankelijke benadering of anisotropie tot een voldoende oordeel kan worden gekomen. Wanneer de opgave gemakkelijk meegekoppeld kan worden in het HWBP project, raden we aan dit deel op te nemen in de scope van het project.

3.4

Stabiliteit steenzetting – ZST

Belangrijk: tijdens de uitvoering van de veiligheidsbeoordeling zijn onjuistheden gevonden in de voorgeschreven software (Steentoets). De beoordeling is zo goed als mogelijk uitgevoerd, rekening houdend met de achtergronden van de rekenmethodes (zoals o.a. vastgelegd in de technische leidraden). Desalniettemin betreft het gepresenteerde veiligheidsoordeel een voorlopig oordeel.

3.4.1

Algemeen

De beoordeling van de stabiliteit van de steenzetting heeft betrekking op alle steenzettingen met een waterkerende functie. Binnen het faalmechanisme zijn de volgende deelmechanismen gedefinieerd:

- Toplaagstabiliteit onder golfaanval (ZTG);
- Toplaagstabiliteit onder langsstroming (ZTS);
- Afschuiven (ZAF);
- Materiaaltransport uit granulaire lag (ZMG);
- Materiaaltransport vanuit de ondergrond (ZMO);
- Erosie van de onderlagen (ZEO).

Op de Lauwersmeerdijk zijn vijf verschillende bekledingszones aanwezig (van oost naar west):

1. De Groene Dijk: Buiten de haven is de dijk vrijwel uniform en bestaat de steenzetting op het benedentalud uit koperslakblokken. Boven de asfaltbekleding liggen rijen met betonblokken en klinkers. Dit dijksegment bevindt zich van dp 82.0 t/m 89.
2. Het oostelijke deel binnen de haven (dp 89.1 t/m 90.1) bestaat uit asfalt met daarboven een strook klinkers en betonblokken.
3. Het westelijke deel bestaat uit klinkers op de zandkern over het gehele talud en ligt tussen dp. 90.1 en 90.5.
4. Tussen de dijkpalen 90.5 en 90.9 is geen steenbekleding aanwezig.
5. Als laatste zijn koperslakken aanwezig op het talud tussen de Cleveringsluis en de havendam in (dp. 90.9 t/m 91.0). In tegenstelling tot de groene dijk is hier geen asfalt aanwezig en ook liggen er geen klinkers en betonblokken hoger op het talud.

3.4.2

Specifieke uitgangspunten

Hieronder zijn de belangrijkste uitgangspunten voor de beoordeling van het faalmechanisme stabiliteit steenzetting (ZST) benoemd:

- De hydraulische randvoorwaarden zijn afgeleid met als uitgangspunt dat de havendam aanwezig is (variant 1), dit is ook toegelicht in paragraaf 2.2.7.
- Niveaus bekledingen zijn vastgesteld op basis van DTM [MUG, 2018] i.c.m. ontwerptekeningen [RWS, 1967] en vastgelegd in het document met de beoordelingsstrategie (Bijlage B). Enige afwijking hierop is het meest westelijke dijkvak, nabij de Cleveringsluizen. Hier zijn de niveaus vastgesteld n.a.v. een veldbezoek door de beheerder [NZV, 2018d]
NB: Het DTM beperkt zich tot inmetingen van visueel zichtbare bekledingen. Uit ontwerptekeningen [RWS, 1967] blijkt echter dat de koperslakblokken doorgezet zijn tot onder het wad (tot ca. NAP -0,4m). Het niveau van de onderzijde van de koperslakblokken is daarom op basis van het niveau van de bovenzijde van de koperslakblokken in het DTM en de lengte van het taluddeel in de ontwerptekeningen vastgesteld.
- Eigenschappen ondergrond buitentalud op basis van grondonderzoek Wiertsema & Partners [Wiertsema & Partners, 2018]
- Profielschematisaties op basis van DTM en AHN2 i.c.m. ontwerptekeningen
- Koperslakblokken: Opbouw en eigenschappen toplaag en filterla(a)g(en) op basis van ontwerptekeningen en standaardwaarden WBI2017. De ontwerptekeningen presenteren de belangrijkste informatie met betrekking tot de opbouw. Daarnaast is aangenomen dat de inklemming aanwezig is en de blokken ingewassen zijn. De spleetbreedte is op basis

van visuele inspectie ingeschat op 5 mm. In overleg met de beheerder is deze opbouw ook gehanteerd voor het meest westelijke dijkvak nabij de Cleveringsluizen.

- Bekleding boven asfalt: opbouw en eigenschappen toplaag en filterla(a)g(en) op basis inventarisatie keringbeheerder [NZV, 2018b]. De inventarisatie van de keringbeheerder maakt onderscheid tussen betonstenen (30x30x15 cm) en keiformaat klinkers (10x20x8 cm). Omdat hierin, noch in het DTM, geen scherpe definitie van de overgang tussen betonblokken en klinkers is gegeven, is aangenomen: breedte strook conform DTM met maximaal 5 rijen betonstenen [NZV, 2018b] en eventueel resterende breedte bestaande uit klinkers.
- Bekleding t.p.v. dp 90.1 t/m 90.5: opbouw en eigenschappen toplaag en filterla(a)g(en) op basis inventarisatie keringbeheerder [NZV, 2018d]. Uit deze inventarisatie volgt dat er keiformaat klinkers (10x20x8 cm) vanaf het haventerrein tot de kruin aanwezig zijn. De klinkers liggen rechtstreeks op de zandkern van de dijk. Op basis van foto's is een spleetbreedte van 5mm aangenomen (Figuur 53). Daarnaast is geen inwassing zichtbaar en is goede inklemming niet te verwachten.
- Toepassing van Steentoets versie 17.1.1.1. (meeste recente versie die beschikbaar is op Helpdesk Water).

*Figuur 54
Bekleding tussen
dijkpaal 90.1 en
90.5*



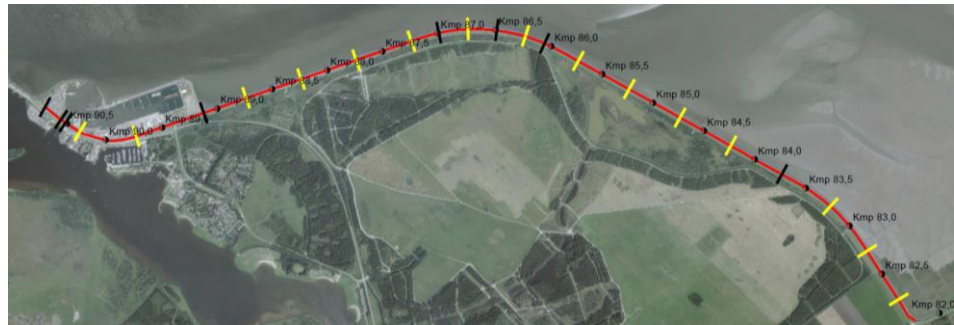
Vakindeling

Voor de vakindeling is gekozen om vakken te creëren van maximaal 500 m. Daarnaast zijn op basis van onderstaande criteria extra knippen gelegd:

- Significante wijziging van oriëntatie;
- Wijziging van opbouw bekleding;
- Overgang groene dijk naar havengebied.

Figuur 55 toont de resulterende vakindeling.

*Figuur 55
Vakindeling ZST.
Gele strepen zijn
500m begrenzingen,
zwarte strepen
representeren de
knippen o.b.v.
criteria.*



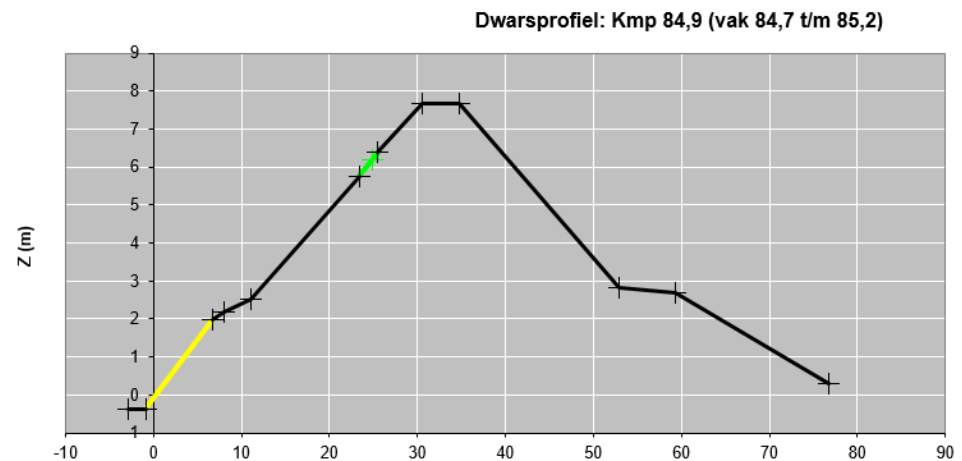
Profielen

De profielen zijn per 100 m gegenereerd door middel van het DTM [MUG, 2018]. Vervolgens is per dijkvak op basis van expert judgement het maatgevende profiel geselecteerd. Hiervoor zijn de volgende criteria gehanteerd:

- Laag voorland;
- Steil talud; en
- Niveau steenzetting.

Elk profiel is volledig geschematiseerd in Steentoets ingevuld. Dit betekent dat naast het buitentalud ook de kruin en binnentalud zijn opgenomen in het te beoordelen profiel. Hierdoor rekent Steentoets met de correcte dijkbreedtes voor het bepalen van reststerkte. Figuur 56 toont een voorbeeld van een maatgevend profiel in Steentoets, waarbij in dit geval het gele deel de koperslakblokken representeren en het groene deel de betonblokken en klinkers.

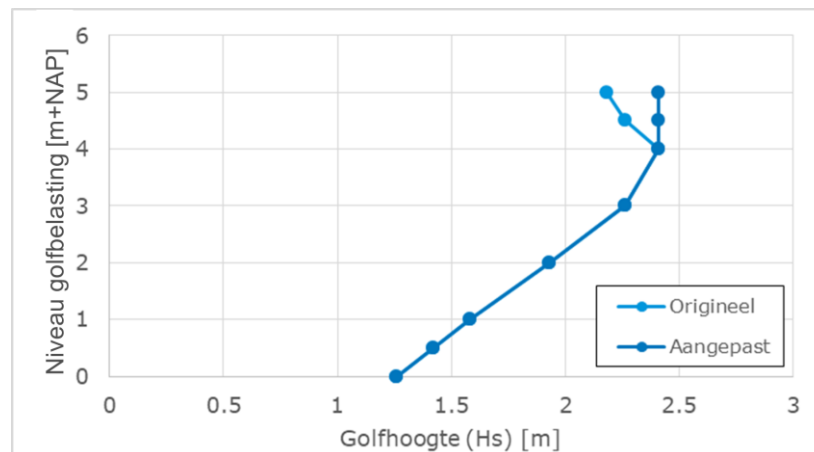
*Figuur 56
Voorbeeld
dwarsprofiel in
Steentoets – profiel
kmp 84.9*



Golfcondities per waterstandsniveau.

Voor elk dijkvak is gekeken welk uitvoerpunt maatgevend is voor het te beoordelen profiel. Deze zijn vervolgens gekoppeld. De voor dit uitvoerpunt bij verschillende overschrijdingsfrequenties berekende golfcondities (zie paragraaf 2.2) zijn ingevoerd in Steentoets.

*Figuur 57
Voorbeeld
aanpassing
golfbelasting
Steentoets
($T=3.000$, dijkvak
86,70 - 87,00)*



Om tot een stabiel resultaat te komen is conservatief aangenomen, in samenspraak met de beheerder, dat bij hogere waterstanden de golfhoogte niet zal afnemen. HR-berekeningen tonen namelijk bij de hoogste waterstanden en kleine daling in golfhoogte. Daarom is bij afname van golfhoogte bij hogere waterstanden uit de berekeningen, gerekend met de golfcondities die zijn afgeleid voor de waterstand waarbij de hoogste golfcondities zijn bepaald. Figuur 57 illustreert dit voor een willekeurig dijkvak. Indien bovenstaande handeling niet zou worden uitgevoerd kan dit in enkele gevallen leiden tot een verbetering van het oordeel voor hooggelegen steenzetting bij een grotere herhalingstijd.

Opbouw steenzetting

In onderstaande tabel is de opbouw van de steenzetting op de Lauwersmeerdijk weergegeven.

*Tabel 50
Opbouw steenzetting*

Toplaag	Filter-/onderlagen	Bronnen
"Groene dijk" (dp 82.0 t/m 89.1)		
Koperslakblokken	Grind, mijnsteen	Ontwerptekeningen
Betonblokken	Klei	Inventarisatie keringbeheerder
Klinkers (keiformaat)	Klei	Inventarisatie keringbeheerder
"Havengebied oost" (dp 89.1 t/m 90.1)		
Betonblokken	Klei	Inventarisatie keringbeheerder
Klinkers (keiformaat)	Klei	Inventarisatie keringbeheerder
"Havengebied west" (dp. 90.1 t/m 90.5)		
Klinkers (keiformaat)	Zand	Inventarisatie keringbeheerder
"Nabij Cleveringsluizen" (dp. 90.9 t/m 91.0)		
Koperslakblokken	Grind, mijnsteen	Inventarisatie keringbeheerder

Parameters Steentoets

De parameters voor Steentoets (eigenschappen van toplaag, filterla(a)g(en) en onderlaag per taluddeel) volgen uit de ontwerptekeningen en zijn

geverifieerd door de beheerder. Indien voor de met Steentoets uit te voeren beoordeling noodzakelijke invoer ontbrak zijn de standaardwaarden van Steentoets gebruikt, dan wel veilige aannames gedaan. In Bijlage L is de bron van de verschillende parameters weergegeven.

3.4.3

Resultaten

Gedetailleerde beoordeling

Door voor verschillende terugkeertijden de golfcondities per waterstandsniveau te bepalen kan een categorie-oordeel gegeven worden over de steenzetting op de dijk. Onderstaande tabel toont deze categorie-indeling.

*Tabel 51
Categorie-indeling
steenzetting*

Faalkanseis op vakniveau	Eis waarbij hydraulische belasting wordt afgeleid	Terugkeertijd [jaar]	Oordeel indien aan eis wordt voldaan
$\frac{1}{30} P_{eis;sig;dsn}$	$\frac{1}{30} P_{sig;traj}$	90.000	I _v
$P_{eis;sig;dsn}$	$P_{sig;traj}$	3.000	II _v
$P_{eis;ond;dsn}$	$P_{ond;traj}$	1.000	IV _v
$P_{eis;ond}$	$P_{ond;traj}$	1.000	IV _v
$30 \cdot P_{eis;ond}$	$30 \cdot P_{ond;traj}$	33	V _v
Geen faalkanseis	Voldoet niet aan bovenstaande belastingen	-	VI _v

Figuur 58 toont de resultaten van de veiligheidsbeoordeling voor het volledige dijktraject. Hierin is het beoordelingsresultaat van de koperslabblokken apart weergegeven van het beoordelingsresultaat van de betonstenen met de klinkerstrook. Het eindoordeel voor het beoordelingsspoor ZST wordt hierbij opgemaakt door de laagste categorie van de betreffende doorsnede (de koperslabblokken).

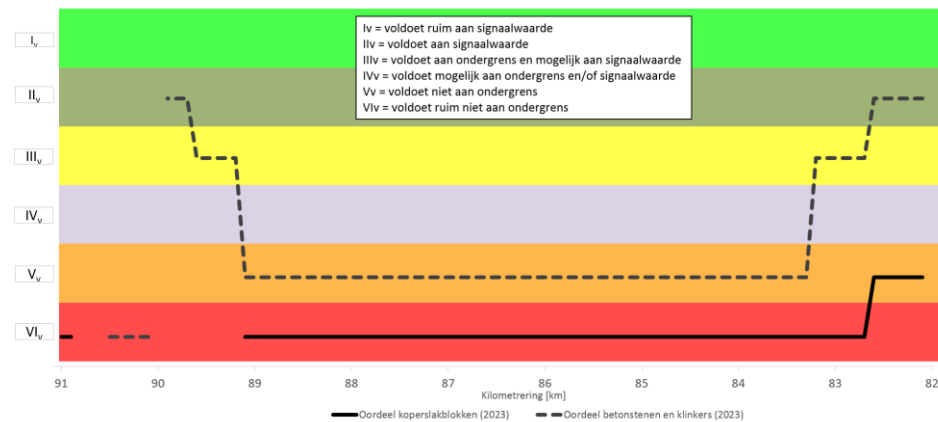
Koperslabblokken:

Het grootste deel van de steenzettingen op het talud voldoen ruim niet aan de maximaal toelaatbare kans (ondergrens). Alleen bij het meest oostelijke deel van het traject valt de ZST score in categorie Vv. Dit betekent dat de koperslabblokken niet bestand zijn tegen een belasting van 1/1.000 per jaar, maar wel tegen een belasting van 1/33 per jaar. Bij de overige vakken zijn de koperslabblokken ook niet bestand tegen een belasting van 1/33 per jaar.

De resultaten laten zien dat bij een belasting met een kans van voorkomen van 1/33 per jaar de koperslabblokken een significant diktetekort hebben

(orde 0,10 m). Dit wordt verklaard door de relatief hoge maatgevende golven (orde 1,40 m) welke over een langere duur het taluddeel belasten.

*Figuur 58
Beoordeling ZST,
zichtjaar 2023*



Betonblokken/klinkers:

De betonblokken en klinkers liggen bij een waterstand met een kans van voorkomen van 1/33 per jaar hoger dan de maatgevende waterstand (MHW is ca. NAP +3,80m, o.k. betonblokken ligt op ca. NAP+5,7m). Hierdoor is de belasting op de betonblokken laag en voldoen ze aan de eisen bij een belasting met een kans van voorkomen van 1/33 per jaar. Ook bij een kans van voorkomen van 1/1.000 per jaar liggen de betonblokken en klinkers boven de maatgevende waterstand. De belasting is dan echter al zodanig toegenomen dat deze op het deelspoor toplaaginstabiliteit (ZTG) veelal niet stabiel zijn. Ook de reststerkte van het onderliggende klei is onvoldoende om tot een stabiel eindoordeel te komen.

De betonblokken en klinkers boven het asfalt voldoen tussen dijkpaal 82.0 – 83.2 en 89.2 – 89.9 in de huidige situatie in ieder geval nog aan de maximaal toelaatbare overstromingskansen op peildatum (1 januari 2023). Binnen het havengebied (dijkpaal 89.2 – 89.9) is de golfhoogte significant lager dan voor de 'groene dijk'. Hierdoor blijft het oordeel ook voor grotere herhalingstijden stabiel. Bij het meest oostelijke deel van het traject (dijkpaal 82.0 – 83.2) is de hoek van golfinval groot, daarnaast neemt de golfhoogte af (zie ook Tabel 12). Hierdoor voldoen de betonblokken ook bij een belasting met een kans van voorkomen van kleiner dan 1/1.000 per jaar aan de eisen.

De klinkers ter hoogte van het toekomstige werelderfgoed centrum (dijkpaal 90.1 t/m 90.5) liggen direct op het zand en op een erg steil talud (ca. 1 op 2). De klinkers zijn daarom niet meer stabiel zo snel sprake is van enige golfaanval. Bij een terugkeertijd van 1/33 per jaar zijn deze daarom niet meer stabiel. De waterstand is in dat geval meer dan 1,0 m hoger dan het voorland waardoor zelfs bij deze lage terugkeertijd al sprake kan zijn van golfaanval.

Het wordt opgemerkt dat voor de klinkers tussen dijkpaal 90.1 t/m 90.5 strikt genomen een Toets op Maat moet worden uitgevoerd voor afschuiving van de steenzetting vanwege het steile talud. Echter, omdat de klinkers hier

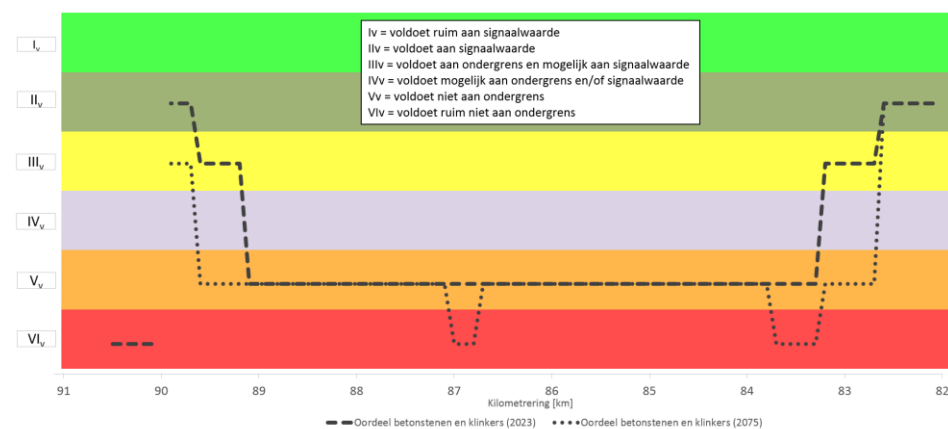
direct op zand liggen volgt ook het oordeel "niet stabiel" op basis van andere deelsporen. Een Toets op maat heeft zodoende geen meerwaarde.

3.4.4

Restlevensduur

De betonblokken en klinkers tussen de dijkpalen 82.0 – 82.6 voldoen in 2075 nog aan de signaalwaarde (zie Figuur 59). De betonblokken en klinkers in het oostelijk haven, dijkpaal 89.7 – 89.9, voldoen in 2075 nog aan de maximale toelaatbare overstromingskans. Dit omdat binnen de haven de golfhoogte significant lager blijft. Op het tussenliggende deel van de Lauwersmeerdijk, dijkpaal 83.2 – 89.7 wordt in 2075 niet voldaan aan de max. toelaatbare kans.

*Figuur 59
Veiligheidsoordeel in
2023 en 2075 van
de betonblokken en
klinkers boven het
asfalt*



3.4.5

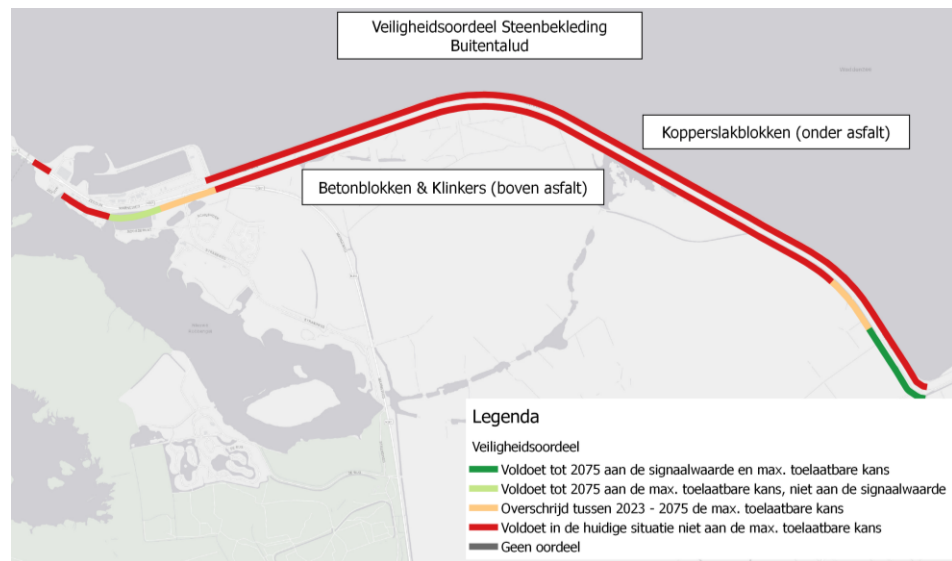
Veiligheidsoordeel

Vanwege onjuistheden in steentoets betreft onderstaand oordeel een voorlopig veiligheidsoordeel.

De koperslabblokken voldoen in de huidige situatie niet aan de max. toelaatbare overstromingskans. Hetzelfde geldt voor het grootste deel van de betonblokken en klinkers (Figuur 60). De koperslabblokken hebben een hogere faalkans dan de betonblokken en klinkers. De koperslabblokken bepalen daarom het veiligheidsoordeel van ZST.

Alleen in de haven en tussen dijkpaal 82.0 – 83.2 voldoen de betonblokken en klinker in de huidige situatie wel aan de max. toelaatbare kans (peildatum 1 jan. 2023). In 2075 voldoet het meeste oostelijke en westelijke deel (89.7 – 89.9 en 82.0 – 82.6) nog aan de max. toelaatbare kans. Door de hogere waterstanden neemt de golfbelasting toe. De klinkers tussen dijkpaal 90.1 en 90.5 voldoet in de huidige situatie niet aan de eis. Dit omdat ze direct op het zand liggen en er is sprake van een talud van ongeveer 1 op 2.

*Figuur 60
Veiligheidsoordeel
ZST*



3.4.6

Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

Tijdens de beoordeling zijn onjuistheden geconstateerd in de software (Steentoets). We raden aan de beoordeling te herzien wanneer zeker is dat Steentoets geen onjuistheden meer bevat en/of bij de start van het ontwerp stil te staan bij deze onjuistheden.

Uit de voorlopig resultaten blijkt dat sommige delen van de steenbekleding niet bestand zijn tegen een belasting van 1/33 per jaar (vooral de kopperslakblokken). Dit is niet in lijn met de ervaring van de beheerder. We raden aan bij het ontwerp van de steenbekleding een reality check te doen op de uitkomsten zodat een eventuele nieuw te ontwerpen steenbekleding niet overmatig zwaar wordt aangelegd.

3.5

Grasbekleding erosie kruin binnentalud - GEKB

3.5.1

Algemeen

Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB) is het beoordelingsspoor dat zich richt op golfoverslag en overloop van de kering. De 'hoogtetoets' is voor zowel het huidige zichtjaar als voor de toekomstige zichtjaren in beeld gebracht. Omdat voor GEKB geen eenvoudige beoordeling beschikbaar is, is een gedetailleerd beoordeling uitgevoerd. Voor de huidige situatie is de faalkans van de kering in beeld gebracht op basis van de uitgangspunten in de Schematiseringshandleiding Grasbekleding [RWS – WVL, 2016a]. Hiervoor is een faalkansberekening in Riskeer uitgevoerd. Daarnaast is met Hydra-NL voor de huidige situatie en de toekomstige zichtjaren het HBN voor de overslaggebieden 0.1, 1, 5, 10, 20 en 50 l/s/m afgeleid (zie ook paragraaf 2.2.4).

3.5.2

Specifieke uitgangspunten

De uitgangspunten zijn beschreven in de beoordelingsstrategie (Bijlage B). Hieronder staat een drietal uitgangspunten uitgelicht.

- Tijdens een het veldgezoek is vastgesteld dat sprake is van een gesloten zode (zie ook Figuur 62).
- De golfklasse bepaalt samen met het type zode welke kansverdeling van het overslagdebiet van toepassing is. Uit de faalkans berekeningen blijkt dat de indicatieve golfhoogte op verschillende locaties groter is dan 3,0 meter⁵. Deze waarde is groter dan de bovengrens van de hoogte golfhoogteklasse in de schematiseringshandleiding grasbekleding (Tabel 6.6). Voor golfhoogtes van groter dan 3,0 m is in de schematiseringshandleiding geen kansverdeling van het kritieke golfoverslagdebiet beschikbaar is. Voor deze locaties is de kansverdeling behorend bij golfklasse 2-3 meter aangehouden. Deze locaties staan gemarkeerd in de resultaten (Figuur 63).
- Van dijkpaal 89.9 t/m 90.9 ontbreekt een kleilaag op het binnentalud (Figuur 61). Op deze locaties is de beoordeling uitgevoerd o.b.v. een kritisch overslagdebiet van 0,1 l/s/m. Conform het OI2014v4 [RWS – WVL, 2017d] worden dan geen eisen meer gesteld aan de kleilaag op het binnentalud.

*Figuur 61
Onderzoek naar de
bekleding op het
binnentalud*



- Het binnentalud van de Lauwersmeerdijk bestaat over het algemeen uit (1) een binnentalud tussen de kruin en de berm met een helling van ongeveer 1 op 3, (2) een binnenberm en (3) een talud tussen de binnenberm en de binnenteen van ongeveer 1 op 4. Conform de toepassingsvoorwaarden van het GEKB moet minimaal een kleilaag van 0,4 m dik aanwezig zijn of moet de taludhelling flauwer zijn dan 1V:4H. Op de binnentalud tussen de kruin en de berm (het steilste taluddeel) is altijd een kleilaag van 0,4 m of dikker aanwezig. Op het onderste taluddeel (tussen de berm en de binnenteen) is op de meeste locaties

⁵ Merk op dat dit een andere berekening is die gevraagd wordt vanuit de toepassingsvoorwaarden voor GEKB. In de toepassingsvoorwaarden van GEKB is beschreven dat de golfhoogte bij een HBN berekening met $q = 0,1$ l/s/m kleiner moet zijn dan 3,0 m. Als voorbeeld is de golfhoogte bij dijkpaal 86.5 gelijk aan 2,8 m. In de faalkansberekening in de gedetailleerde beoordeling is de golfhoogte bij dijkpaal 86.5 gelijk aan 3,2 m.

geen kleilaag van 0,4 m aanwezig (Figuur 62). De taludhelling is hier ongeveer 1V:4H. Strikt genomen voldoet dit taluddeel op een aantal locaties niet met zekerheid aan de toepassingsvoorwaarden voor de gedetailleerde beoordeling van GEKB. In deze analyse is de gedetailleerde beoordeling wel uitgevoerd omdat het taluddeel binnenwaarts van de berm ligt (ongeveer 30 m binnen de kruin) en de verwachte stroomsnelheden door golfoverslag daar lager zijn en de helling van het taluddeel met zekerheid flauwer is dan 1V:3,5H.

Figuur 62
Duiding dikte van
kleilaag op het
binnentalud



- Voor locaties die zich op de grens tussen twee golfklassen bevinden, is de hoogste golfhoogteklasse aangehouden.

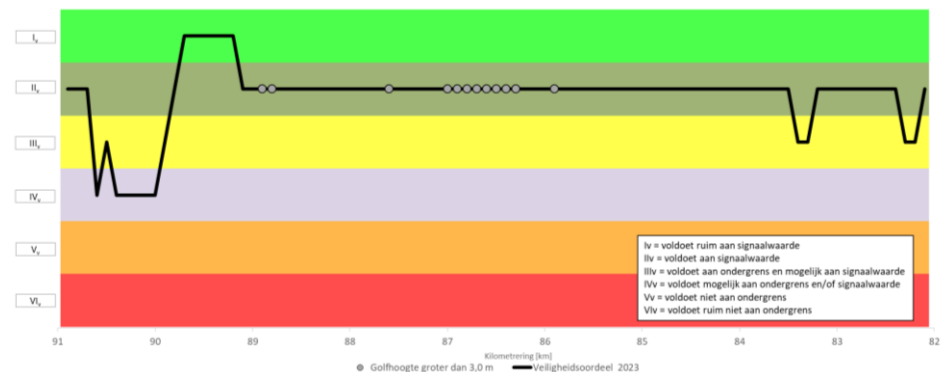
3.5.3

Resultaten

Gedetailleerde beoordeling

Figuur 63 toont het veiligheidsoordeel voor GEKB. De locaties waar de indicatieve golfhoogte groter is dan 3,0 m zijn gemarkeerd met grijze bolletjes.

Figuur 63
Veiligheidsoordeel
GEKB



Dijkpaal 90.6 uitgezonderd voldoet de Lauwersmeerdijk in de huidige situatie aan de eisen voor GEKB bij de maximaal toelaatbare overstromingskansen (categorie IIIIv of hoger). De faalkans is namelijk kleiner de faalkans-eis op doorsnede niveau bij de maximaal toelaatbare kans. Het overgrote deel van de locaties voldoet ook aan de signaalwaarde (categorie IIv of hoger). Bij dijkpaal 90.6 wordt niet voldaan aan de max. toelaatbare overstromingskansen (categorie IVv). Bij de dijken 90.2 – 90.5, 83.3 – 83.4 en 82.2 – 82.3 wordt wel voldaan aan de maximaal toelaatbare kans en niet aan de

signaalwaarde. De berekende faalkansen voor elke dijkpaal zijn te vinden in Bijlage F.

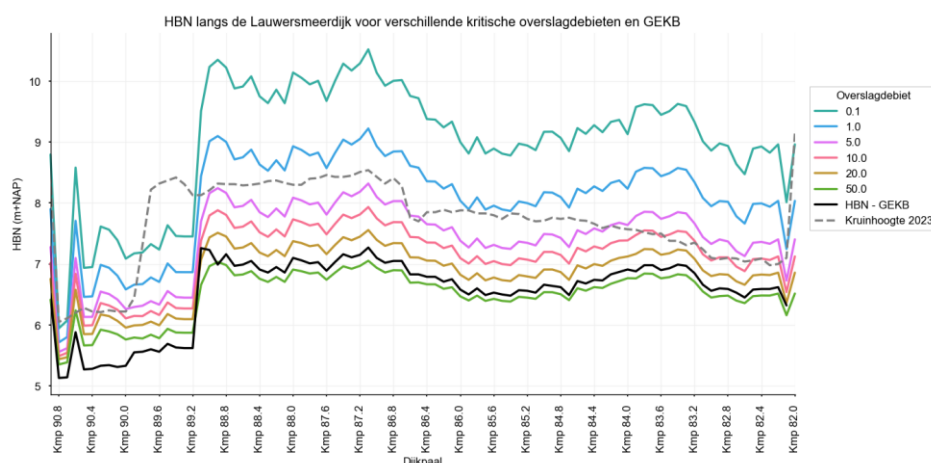
3.5.4

Restlevensduur

De bepaling van restlevensduur van de Lauwersmeerdijk is gebaseerd op de hydraulische randvoorwaarden die zijn afgeleid met Hydra-NL voor de zichtjaren 2023, 2050, 2075 en 2100. Dit omdat Riskeer niet met andere zichtjaren kan werken. Riskeer maakt gebruik van een kansverdeling van het kritieke golfoverslagdebiët, terwijl in Hydra-NL met een vaste waarde van dit debiet wordt gewerkt. Om te zorgen voor consistentie tussen beide modellen, zijn de berekeningen voor 2023 op elkaar afgestemd (voor dat jaar zijn immers beide modellen beschikbaar). Daarvoor is de volgende werkwijze gehanteerd.

Met Hydra-NL zijn HBN's bepaald voor een reeks aan deterministisch overslagdebieten (zie paragraaf 2.2 over de hydraulische belastingen). Figuur 64 toont de hydraulische belastingniveaus behorende bij die verschillende (vaste) kritische overslagdebieten. In dezelfde figuur is ook het HBN te zien dat is bepaald met behulp van Riskeer. Hieruit blijkt dat een berekening met Riskeer voor 2023 (conform de schematiseringshandleiding met een probabilistisch overslagdebiët [RWS – WVL, 2016a]) goed overeenkomt met een berekening met Hydra-NL met een deterministisch overslagdebiët van ongeveer 40 l/s/m. In de haven is de golfhoogte lager. Als een kleilaag op het binnentalud aanwezig is, is op deze locaties meer overslag toegestaan voordat falen wordt bereikt. Op deze locaties is de deterministische overslagdebiët die het probabilistisch criterium uit de schematiseringshandleiding benaderd groter dan 50 l/s/m (zwarte lijn in Figuur 64 ligt lager dan de $q = 50$ l/s/m lijn). Op de locaties waar geen kleilaag aanwezig is het kritisch overslagdebiët gelijk aan 0,1 l/s/m.

*Figuur 64
HBN's voor de
verschillende
overslagdebieten en
in het zwart GEKB
bij de maximaal
toelaatbare kans (T
 $= 12.500$ jaar)*



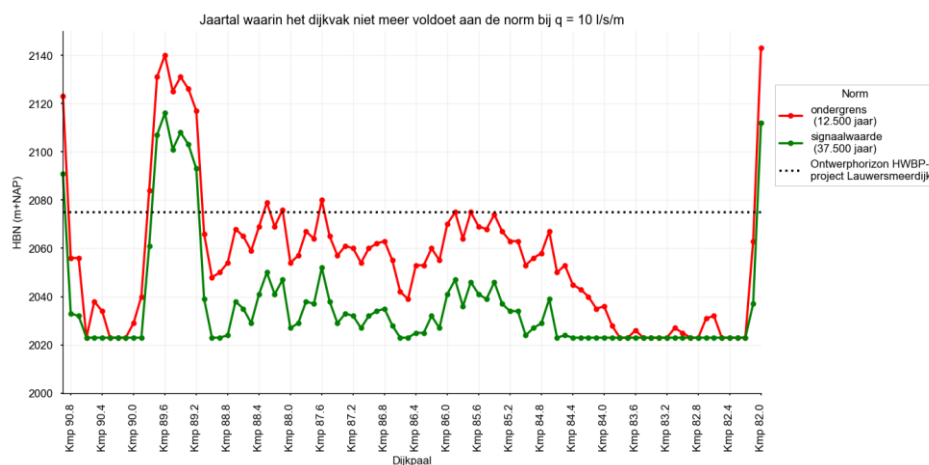
De restlevensduuranalyse wordt uitgevoerd bij een overslagdebiët van $q = 10$ l/s/m. Dit is strenger dan wanneer de schematiseringshandleiding gevolgd wordt. Conform de schematiseringshandleiding kan de restlevensduur bepaald worden bij een (deterministisch) overslagdebiët van 40 l/s/m worden

uitgevoerd. Dit komt immers overeen de faalkans berekeningen in Riskeer conform de schematiseringshandleiding (zie bovenstaand). Toch is gekozen voor een overslagdebiet van 10 l/s/m:

1. Deze veiligheidsanalyse wordt uitgevoerd om de scope van het HWBP project vast te stellen. Voor ontwerpen wordt in het OI2014 versie 4 [RWS – WVL, 2017d] een kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m voorgeschreven.
2. Voor een deel van de locaties is een indicatieve golfhoogte gevonden die groter is dan 3 meter. Uitgaande van het feit dat de grasmat sneller faalt bij grotere golfhoogtes (zoals ook in de cumulatieve overslagbenadering [RWS – WVL, 2012]) faalt de grasmat op locaties met een golfhoogte groter dan 3 meter bij een lager overslagdebiet dan beschreven in de schematiseringshandleiding. In het OI2014 versie 4 is aangegeven dat een overslagdebiet van 10 l/s/m geldig is tot een golfhoogte van 4,0 meter.
3. Op de locaties waar geen kleilaag aanwezig is het kritisch overslagdebiet gelijk aan 0,1 l/s/m.

Figuur 65 toont de jaartallen waarin de verschillende dijkpalen niet meer voldoen aan de gestelde normen bij een kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m. Locaties waar het HBN (de benodigde kruinhoogte) hoger is dan de aanwezig kruinhoogte hebben een restlevensduur van 0 jaar, deze zijn toegekend aan het zichtjaar 2023.

*Figuur 65
Restlevensduur van
de Lauwersmeerdijk
voor de max.
toelaatbare kans
(ondergrens) en de
signaalwaarde*

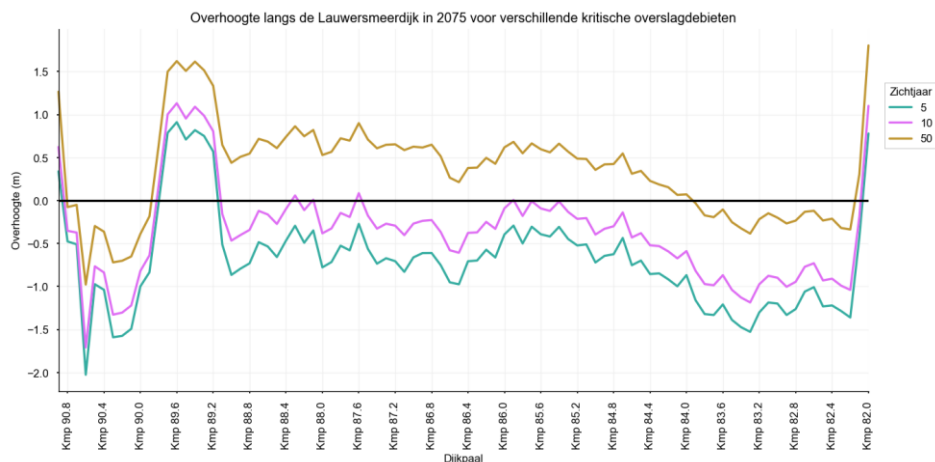


Alleen in de haven, tussen dijkpaal 89.2 en 89.7, is tot 2075 geen sprake van een structurele hoogteopgave. Op deze locaties is de huidige hoogte tot het einde van het HWBP project hoog genoeg. Ten westen van de haven, tussen dijkpaal 89.1 en 84.0, en bij dijkpaal 90.9 wordt de signaalwaarde tussen 2020 en 2040 overschreden. Hierdoor ontstaat tussen 2050 en 2075 een hoogteopgave. Ten oosten van dijkpaal 84.0 en in de haven tussen dijkpaal 90.9 en 89.8 is de signaalwaarde in de huidige situatie al overschreden. Tussen nu en 2020 wordt ook niet meer voldaan aan de maximaal toelaatbare kans.

De opgave bij de overslagdebieten 5, 10 en 50 l/s/m in 2075 bij de maximaal toelaatbare kans is weergegeven in Figuur 66. Hierin is te zien dat wanneer

een hoger overslagdebiet wordt toegestaan, de hoogteopgave deels kan worden opgelost.

Figuur 66
Overhoogte
(positief) en opgave
(negatief) in 2075
bij de max.
toelaatbare
overstromingskans.



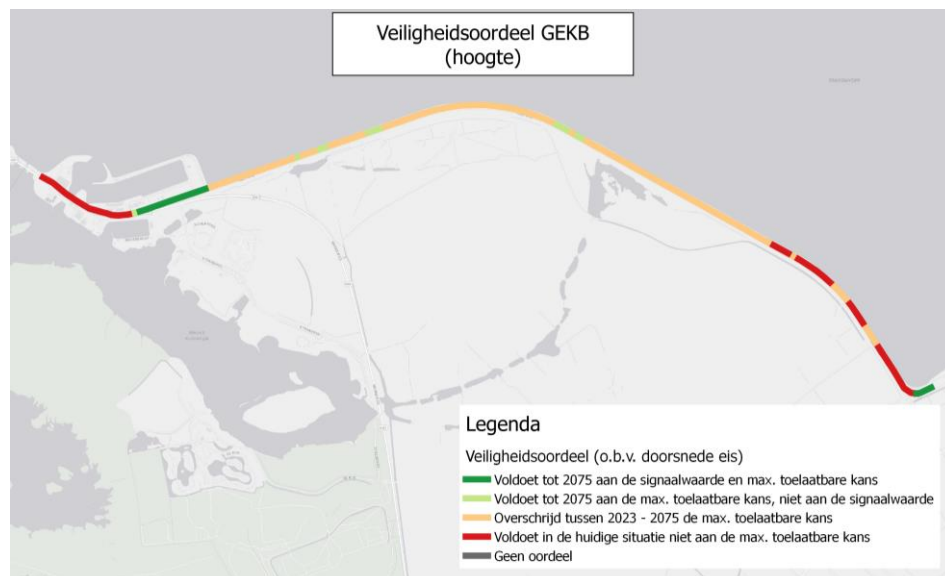
3.5.5

Veiligheidsoordeel

Voorliggende veiligheidsbeoordeling heeft als doel om de scope van de verkenningsfase van het HWBP project vast te stellen. Voor de bepaling van de hoogteopgave is daarom een overslagdebiet van 10 l/s/m aangehouden (conform het OI2014 v4). Voor het overgrootste deel van de Lauwermeersdijk ontstaat dan voor 2075 een hoogte opgave (uitgaande van de max. toelaatbare kans). Slechts op enkele locaties in de haven van Lauwersoog is tot 2075 geen sprake van een hoogte opgave.

De grasmat op het binnentalud is in de regel bestand tegen grotere hoeveelheden golfoverslag dan 10 l/s/m voordat deze faalt (conform de schematiseringshandleiding grasbekleding). Voor een deel van de Lauwersmeerdijk kan de hoogte opgave worden opgelost als rekening wordt gehouden met dit hogere overslagdebieten.

Figuur 67
Veiligheidsoordeel
GEKB



3.5.6

Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

Voor locaties waar de dijkverhoging niet wenselijk of ruimtelijk lastig inpasbaar is, raden we aan een hoger overslagdebiet te overwegen. Van de haven (dijkpaal 89.0) tot dijkpaal 84.0 kan de hoogte opgave in 2075 worden opgelost door een hoger overslagdebiet toe te staan. Op deze manier valt de hoogte opgave niet meer binnen de scope van het HWBP project. We raden aan de hoogteopgave mee te koppelen met de opgave op het buitentalud en deze integraal te verkennen. Op locaties waar meer overslagdebiet wordt toegestaan raden we te onderzoeken of op deze locaties wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden om dit hoge overslagdebiet toe te staan.

Ten tweede raden we aan de hoogteopgave in de haven bij het werelderfgoed centrum nader in kaart te brengen. Dit vanwege de combinatie van complexe hydraulische belastingen (ligging achter de havendammen) en een sterk variërende geometrie van de dijk (ter plaatse en ten oosten van de Robbengatsluis).

3.6

Grasbekleding erosie buitentalud – GEBU

3.6.1

Algemeen

Het faalmechanisme grasbekleding erosie buitentalud beschrijft het falen van de grasbekleding op het buitentalud door golfklap of golfoploop. In geval van golfklap geeft een brekende golf op het talud een kortdurende lokale hoge waterdrukgradiënten op het talud, die de zode kunnen beschadigen en delen ervan verwijderen uit de grasbekleding. In het geval dat golfklap onder maatgevende condities plaatsvindt op een harde bekleding, ligt een hoger gelegen grasbekleding in de golfoploopzone. De belasting die erosie van de grasbekleding kan veroorzaken, bestaat in geval van de oploopzone uit stroming door golfoploop en golfneerloop. De voor golfklappen karakteristieke waterdruk-puls blijft bij golfoploop achterwege. Een met gras bekleed talud dat wordt blootgesteld aan golven zal als eerste falen in de golfklapzone, omdat de golfklapbelasting maatgevend is boven de golfoploopbelasting.

In geval van het te beoordelen dijktraject 6-5 (km 82,0 t/m 91,0) kan op voorhand niet worden vastgesteld of de grasbekleding in de golfklap of golfoploopzone ligt. Dit is afhankelijk van de waterstand bij norm in vergelijking met de onderkant van de grasbekleding.

3.6.2

Specifieke uitgangspunten

De belangrijkste uitgangspunten voor het beoordelingsspoor GEBU zijn:

- Het niveau van de onderzijde van de grasbekleding is vastgesteld op basis van het DTM [MUG, 2018]. Dit is geverifieerd door de keringbeheerder.

- De graskwaliteit wordt overal gesteld als 'gesloten zode'. Tijdens het veldonderzoek is vastgesteld dat de graskwaliteit goed is. Daarnaast is het beheer gericht op het onderhouden van een gesloten zode. Voor de gevoeligheid wordt ook gekeken naar het resultaat bij een 'open zode'. Uitzondering hierop bevindt zich tussen dijkpaal 90.5 en 90.9, dit is het deel van de Lauwersmeerdijk achter de parkeergarage. Hier is de zode als open geclassificeerd⁶.
- Voor de sterkte van de grasbekleding worden de standaardwaarden in [RWS – WVL, 2016a] gebruikt.
- Eigenschappen van de deklaag op basis van grondonderzoek Wiertsema & Partners [Wiertsema & Partners, 2017]. Dit is geverifieerd door de keringbeheerder.
- Profielschematisaties op basis van profiel AHN2 (geverifieerd o.b.v. DTM).
- BM – Gras Buitentalud 17.1.1 (de meest recente versie welke beschikbaar is op Helpdesk Water).

Vakindeling

Voor GEBU is om de 100 m een beoordeling uitgevoerd. De vakgrenzen liggen dus 50 m voor én na de betreffende dijkpaal. Figuur 68 illustreert de resulterende vakindeling voor GEBU.

*Figuur 68
Vakindeling GEBU*

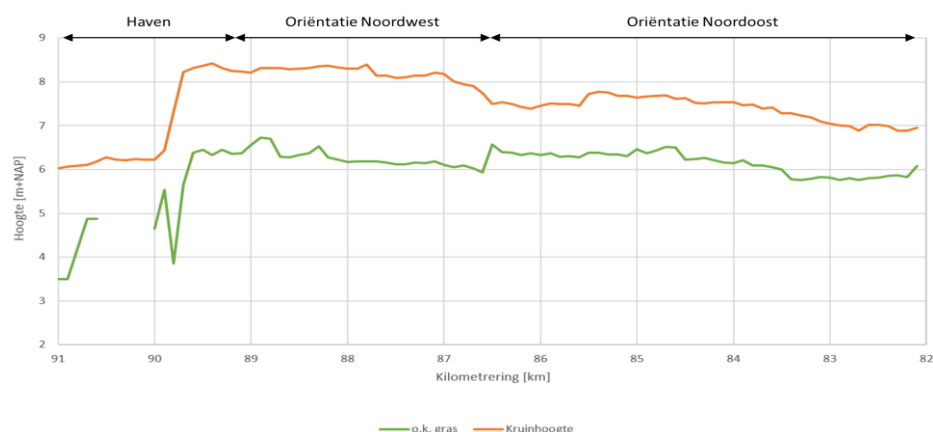


Profielen en onderkant van de grasbekleding

Voor het faalmechanisme GEBU is van belang op welke hoogte de overgang ligt van harde bekleding naar gras. Deze zijn vastgesteld op basis van het DTM. Figuur 69 illustreert de hoogteligging over het traject. Van dijkpaal 90.1 t/m 90.5 is geen grasbekleding op het buitentalud aanwezig. Hier liggen de klinkers tot aan de kruin (zie ook ZST, Tabel 50). Daarnaast de profielen van belang (vooral bij golfoploop). Hiervoor zijn de profielen van GEKB toegepast, deze zijn beschreven in paragraaf 2.2.3.

⁶ Op deze locaties is ook sprake van begroeiing door bosschages. De zode kan daarom eventueel als fragmentarisch worden geclassificeerd.

Figuur 69
Hoogteligging
onderkant
grasbekleding



Golfcondities per waterstandsniveau

Alle profielen zijn gekoppeld aan het dichtstbijzijnde uitvoerpunt. De voor dit uitvoerpunt bij verschillende overschrijdingsfrequenties berekende golfcondities (zie paragraaf 0) zijn gebruikt bij de gedetailleerde beoordeling.

Opbouw toplaag grasbekleding

Op basis van grondonderzoek uitgevoerd door Wiertsema & Partners [Wiertsema, 2017] zijn de parameters van de opbouw van de grondlaag afgeleid.

Tabel 52
Parameters
grondlaag

Parameter	Waarde
Dikte kleilaag+gras [m]	0,6 – 1,4 m
Zandgehalte [-]	<69% ⁷

Binnen het dijkvak 90.6 t/m 90.8 zijn geen relevante boringen binnen het maatgevende profiel beschikbaar. In overleg met de keringbeheerder is hier een dikte van 0,5m aangehouden en een zandgehalte kleiner dan 70%.

3.6.3

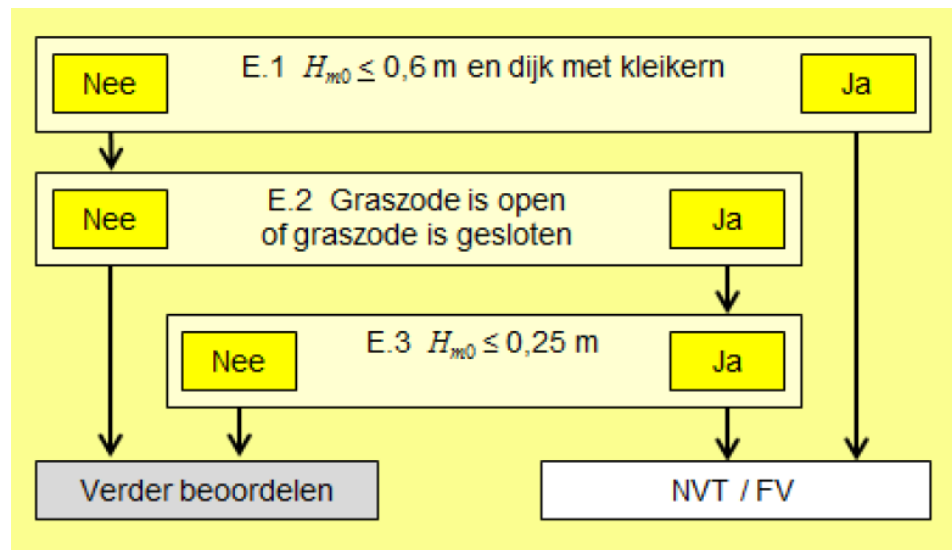
Resultaten

Eenvoudige beoordeling

De eenvoudige toets voor het toetsspoor GEBU is een gecombineerde toets voor erosie in de golfklap- en golfoploopzone, en bestaat uit drie beslisregels (zie Figuur 70).

⁷ Grondonderzoek toont aan dat de toplaag van klei overwegend kleilig is. Omdat een zandgehalte kleiner dan 70% geen invloed heeft op de resultaten is deze niet verder beschouwd.

Figuur 70
Beslisregels GEBU



Conform Bijlage II zijn voor deze eenvoudige toets zowel de waterstand als golfhoogte bij de doorsnede-eis nodig voor de signaleringswaarde.

Stap E.1

De dijk heeft geen kleikern. Zodoende kan stap E.1 met 'nee' beantwoord worden, waardoor vervolgt moet worden met stap E.2.

Stap E.2

Ten behoeve van de beoordeling van het toetsspoor GEBU geldt als uitgangspunt dat de kwaliteit van de graszode op het buitentalud gesloten is (zie Bijlage B). Voor alle vakken is de beoordeling daarom voorgezet met stap E.3.

Stap E.3

Om GEBU op basis van Stap E.3 uit te kunnen sluiten dient de golfhoogte over het traject bij de marginale statistiek bij de doorsnede-eis kleiner te zijn dan 0,25m. Uit een inventarisatie van de betreffende golfhoogtes blijkt dat deze altijd significant hoger liggen dan de gestelde eis, namelijk ca. 2,5 m. Voor alle vakken is dus een gedetailleerde toets noodzakelijk.

Gedetailleerde beoordeling

Bij de gedetailleerde toets per vak voor het toetsspoor GEBU wordt onderscheid gemaakt tussen erosie in de golfklap- en golfoploopzone. In de golfklapzone wordt de erosie van de zode en de onderliggende kleilaag bepaald. Voor de oploopzone daarentegen wordt alleen de erosie van de zode bepaald. De golfklap- en golfoploopberekening betreft een semi-probabilistische berekening die wordt uitgevoerd in BM - Gras Buitentalud.

Stap G.1

Alvorens een semi-probabilistische berekening uit te voeren, is gecontroleerd of aan de toepassingsvoorwaarden is voldaan.

De gedetailleerde toets mag alleen worden toegepast als:

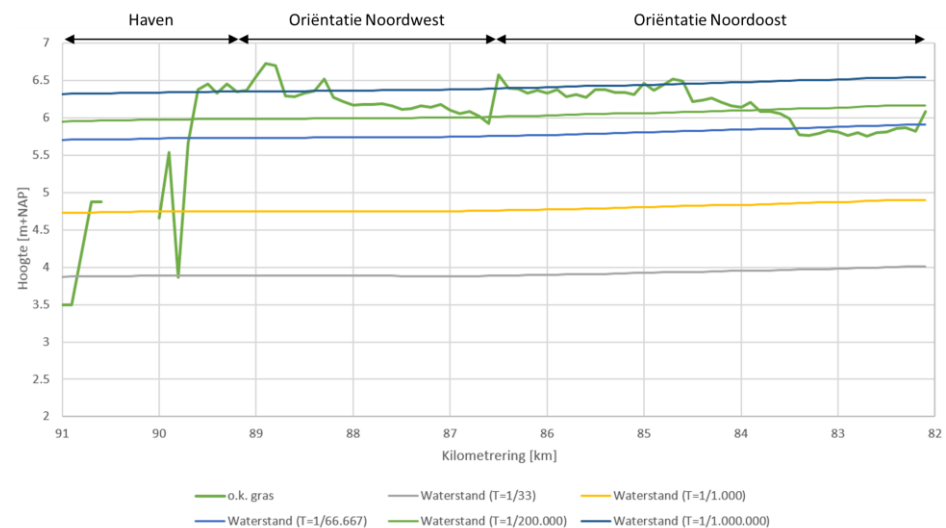
- de kwaliteit van de graszode gesloten of open is; én
- de helling van het buitentalud gelijk aan of flauwer dan 1V:2,5H is.

Uit het DTM blijkt dat de helling van het met gras beklede buitentalud voor beide profielen flauwer is dan 1V:2,5H. Omdat de graszode op het buitentalud van de dijk gesloten is wordt voor alle vakken voldaan aan de toepassingsvoorwaarden.

Golfklap vs. golfploopzone⁸

Voor een grasmat beneden de waterstand bij doorsnede-eis dient een golfklapberekening uitgevoerd te worden. Voor het zichtjaar 2023 is in Figuur 71 het niveau van de onderzijde van de grasbekleding en de waterstand bij verschillende overschrijdingsfrequenties weergegeven. Indien bij een gekozen terugkeertijd de grasbekleding hoger ligt wordt een golfploopberekening worden uitgevoerd. Het tegenovergestelde geldt voor golfklap. Op deze wijze is voor alle zichtjaren en terugkeertijden bepaald of een golfklap- of golfploopberekening noodzakelijk is.

*Figuur 71
Niveau onderkant
grasbekleding en
waterstandsniveaus
bij verschillende
herhalingstijden*



Stap G.2a

De beoordeling van de grasbekleding in de golfploopzone betreft een semi-probabilistische berekening. Deze golfploopberekening is uitgevoerd met BM – Gras Buitentalud.

Voor het uitvoeren van een golfploopberekening met BM – Gras Buitentalud zijn de volgende parameters noodzakelijk:

- Algemene parameters: evaluatiehoogte;
- Sterkte parameters: kritische stroomsnelheid;
- Geometrie: dijknormaal en dijkgeometrie;

⁸ Dit betreft geen stap in de gedetailleerde beoordeling van het toetsspoor GEBU maar is noodzakelijk om te bepalen of stap G.2a of G.2b moet worden doorlopen.

- Hydraulische belasting: waterstandsverloop en golfcondities per waterstandsniveau.

In BM – Gras Buitentalud zijn daarnaast nog enkele parameters welke voor belang zijn voor het rekenproces. Hiervoor zijn standaardwaarden gebruikt zoals opgenomen in [RWS – WVL, 2016a].

Algemene parameters - Evaluatiehoogte

De golfploopberekening wordt uitgevoerd voor één punt op het buitentalud: de evaluatiehoogte. Dit punt is het laagst gelegen punt van de grasbekleding in de golfploopzone en is in dit geval gelijk aan het niveau van de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding. Deze is afgeleid uit het DTM en gepresenteerd in Figuur 69 en Figuur 71.

Sterkte parameters - Kritische stroomsnelheid (golfploop)

Bij het erosiemodel voor gras in de golfploopzone, de cumulatieve overbelastingmethode, wordt de erosiebestendigheid van de grasbekleding gekarakteriseerd door de kritische stroomsnelheid U_c . De waarden voor de U_c zijn gekoppeld aan de graskwaliteit.

Voor gesloten en open zode op klei zijn respectievelijk conform tabel 6.2 in [RWS - WVL, 2016a] kritische stroomsnelheden van 6,6 m/s en 4,3 m/s aangehouden.

Geometrie - Dijknormaal

De dijknormaal ten opzichte van het noorden is bepaald op basis van de traject-shape zoals aangeleverd in Riskeer.

Geometrie - Dijkgeometrie

Conform de schematiseringsregels in [RWS - WVL, 2016a] zijn de profielen per 100 m geschematiseerd (inclusief ruwheidsfactor per taluddeel). Voor de geschematiseerde profielen wordt verwezen naar de invoerbestanden van BM – Gras Buitentalud.

Hydraulische belasting - Waterstandsverloop

Het voor de golfploopberekening te gebruiken waterstandsverloop is beschreven in paragraaf 2.2.4.

Hydraulische belasting - Golfcondities per waterstandsniveau

Voor elk van de uitvoerpunten zijn de golfcondities per waterstandsniveau bepaald. Voor de golfcondities wordt verwezen naar de invoerbestanden van BM – Gras Buitentalud.

Golfploopberekening

Met BM – Gras Buitentalud is de cumulatieve overbelasting berekend. De grasbekleding faalt wanneer deze belasting conform Bijlage III van [RWS – WVL, 2017a] de kritische waarde van $7.000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ overschrijdt (de berekende veiligheidsfactor is dan kleiner 1). Wanneer de cumulatieve overbelasting kleiner is dan de kritische waarde voldoet de grasbekleding aan de

gedetailleerde toets per vak (de berekende veiligheidsfactor is groter dan of gelijk aan 1).

Stap G.2b

De beoordeling van de grasbekleding in de golfklapzone betreft ook een semi-probabilistische berekening. Deze golfklapberekening is ook met BM – Gras Buitentalud uitgevoerd.

Voor het uitvoeren van een golfklapberekening met BM – Gras Buitentalud zijn de volgende parameters noodzakelijk:

- Algemene parameters: minimale en maximale waterstand;
- Constructie en sterkte parameters: coëfficiënten a, b, c, zandgehalte, dikte kleilaag + gras, Zgrass,min en Zgrass,max;
- Hydraulische belasting: waterstandsverloop en golfcondities per waterstandsniveau.

In BM – Gras Buitentalud moeten nog meer parameters worden ingevoerd. Voor deze parameters worden de standaardwaarden zoals opgenomen in [RWS - WVL, 2016a] gebruikt.

Algemene parameters – Minimale en maximale waterstand

De minimale en maximale waterstand is gelijk aan de minimale en maximale waterstand van het waterstandsverloop.

Constructie en sterkte parameters – Coëfficiënten a, b en c (golfklap)

Voor de golfklapzone is de graskwaliteit gekoppeld aan coëfficiënten a, b en c. Voor gesloten en open zode op klei worden conform tabel 6.3 in [RWS - WVL, 2016a] voor alle vakken de volgende waarden gebruikt:

Voor gesloten zode:

- Coëfficiënt a = 1;
- Coëfficiënt b = -0,035;
- Coëfficiënt c = 0,25.

Voor open zode:

- Coëfficiënt a = 0.8;
- Coëfficiënt b = -0,07;
- Coëfficiënt c = 0,25.

Constructie en sterkte parameters – Zandgehalte

Voor het zandgehalte is een zandgehalte van 69% aangehouden.

Constructie en sterkte parameters – Dikte kleilaag + gras

Voor de dikte van de kleilaag + gras wordt de maximale dikte van 0,5 m aangehouden: uit beschikbaar grondonderzoek [Wiertsema & Partners, 2017] blijkt dat de toplaag overal op een minimaal 0,6 m dikke laag klei ligt.

Constructie en sterkte parameters – Zgrass,min en Zgrass,max

Voor Zgrass,min wordt het niveau van de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding gebruikt. Zgrass,max is gelijk aan de waterstand bij de betreffende overschrijdingsfrequentie.

Hydraulische belasting - Waterstandsverloop

Zie stap G.2a. Voor het waterstandsverloop wordt verwezen naar de invoerbestanden van BM – Gras Buitentalud.

Hydraulische belasting - Golfcondities per waterstandsniveau

Voor elk van de vakken zijn de golfcondities per waterstandsniveau bepaald. Voor de golfcondities wordt verwezen naar de invoerbestanden van BM – Gras Buitentalud.

Golfklapberekening

Met BM – Gras Buitentalud wordt de faalfractie (verhouding tussen de belastingduur en standtijd) van de grasbekleding inclusief sterkte van de aanwezige kleilaag berekend. De faalfracties gedurende de storm worden gesommeerd. Bij een som van 1 wordt de kritische waarde van de faalfractie bereikt en faalt de grasbekleding (de berekende veiligheidsfactor is dan kleiner dan 1). Bij faalfractie kleiner dan of gelijk aan 1 voldoet de grasbekleding aan de gedetailleerde toets per vak (de berekende veiligheidsfactor is groter dan of gelijk aan 1).

Resultaten golfoploop- en golfklapberekening

Omdat het toetsspoor GEBU in groep 3 valt zijn voor het toekennen van het toetsoordeel berekeningen met golfcondities bij verschillende overschrijdingsfrequenties gemaakt. Onderstaande tabel toont voor GEBU de categorie-indeling in combinatie met de bijbehorende overschrijdingsfrequenties.

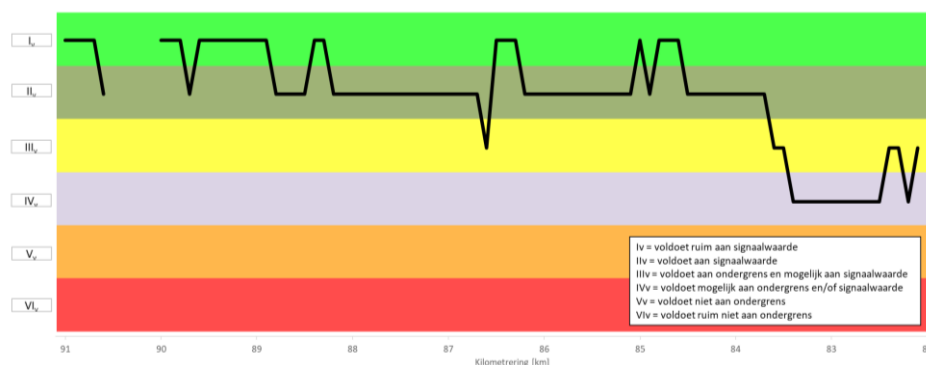
*Tabel 53
Categorie-indeling
GEBU*

Faalkanseis op vakniveau	Eis waarbij hydraulische belasting wordt afgeleid	Terugkeertijd [jaar]	Oordeel indien aan eis wordt voldaan
$\frac{1}{30} P_{eis;sig;dsn}$	$\frac{1}{30} \frac{\omega P_{sig;traj}}{N_{dsn}}$	6.000.000	I _v
$P_{eis;sig;dsn}$	$\frac{\omega P_{sig;traj}}{N_{dsn}}$	200.000	II _v
$P_{eis;ond;dsn}$	$\frac{\omega P_{ond;traj}}{N_{dsn}}$	66.667	III _v
$P_{eis;ond}$	$P_{ond;traj}$	1.000	IV _v
$30 \cdot P_{eis;ond}$	$30 \cdot P_{ond;traj}$	33	V _v
Geen faalkanseis	Voldoet niet aan bovenstaande belastingen	-	VI _v

Uit de berekeningen in BM - Gras Buitentalud zijn vervolgens per terugkeertijd berekeningen uitgevoerd. Hieruit volgt een veiligheidsfactor.

Indien deze groter is dan 1, voldoet het profiel voor de bewuste terugkeertijd. Figuur 72 toont de resultaten.

*Figuur 72
Resultaten GEBU,
zichtjaar 2023*

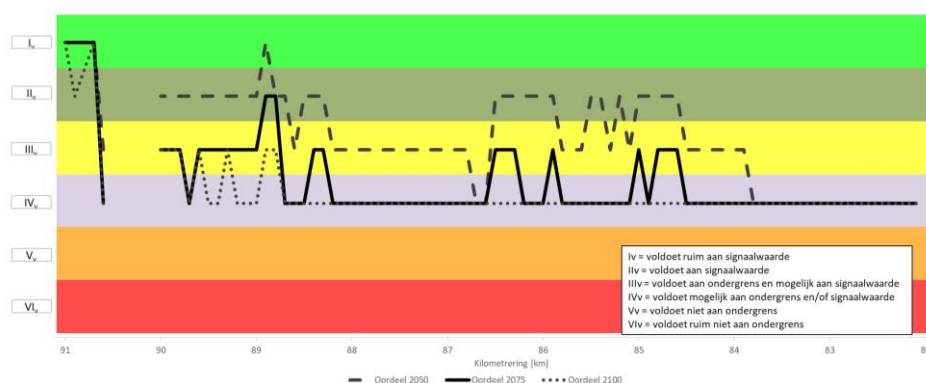


De resultaten tonen dat voor het zichtjaar 2023 vrijwel alle dijkvakken voldoen aan de doorsnede-eis bij maximaal toelaatbare kans (III_v). Enkel het meest oostelijke deel, tussen Kmp 82.0 en 83.7 voldoet hier niet aan. Dit is te verklaren door de lager gelegen grasbekleding over dit deeltraject, waardoor het gras eerder door golfklap wordt belast. In het havengebied ligt de onderkant van de grasbekleding vaak nog lager. Hier is echter de golfbelasting dusdanig laag dat golfklap niet tot falen leidt.

3.6.4 Restlevensduur

Omdat veel dijkvakken aan de signaleringswaarde voldoen is ook de restlevensduur vastgesteld. Hiervoor is bovenstaand proces opnieuw doorlopen, maar dan met hydraulische belastingen behorende bij de zichtjaren 2050, 2075 en 2100. De zetting is verdisconteerd in de geschematiseerde profielen en het niveau van de onderzijde van de grasbekleding. Onderstaande tabel toont de resultaten van de restlevensduur analyse.

*Figuur 73
Resultaten GEBU,
zichtjaar 2050, 2075
en 2100*



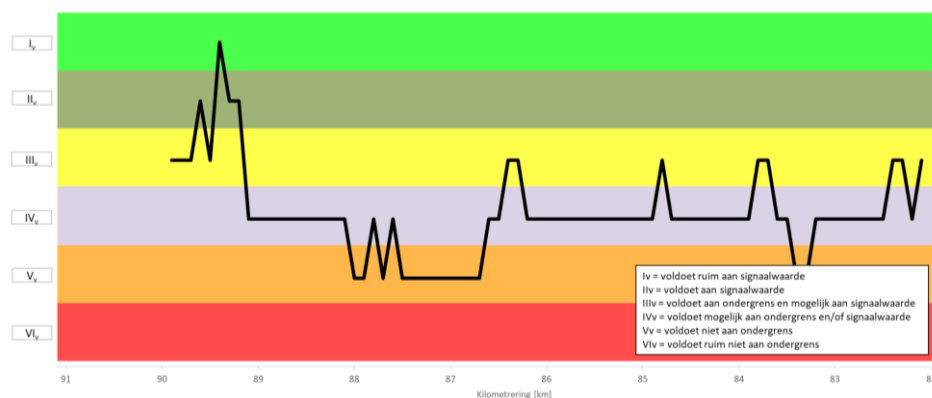
Uit de tabel blijkt dat, zoals verwacht, door toenemende golfbelasting en waterstanden het veiligheidsoordeel in de toekomst slechter wordt. Waar in 2023 nog overwegend voldaan wordt aan de signaleringswaarde (cat. II_v – doorsnede eis van de signaalwaarde), voldoet de dijk in 2100 vrijwel overal enkel aan de max. toelaatbare kans bij de norm (cat. IV_v - T = 1.000 jaar).

Voor het grootste deel van de dijkvakken is het oordeel in 2050 gelijk aan cat. IIIv. Dit betekent dat nog wordt voldaan aan de faalkanseis op doorsnede niveau bij de max. toelaatbare overstromingskans. Dit betekent dat de grasbekleding in ieder geval tot 2050 voldoet aan de maximaal toelaatbare kans. Tussen 2050 en 2075 wordt de faalkanseis op doorsnede niveau bij de max. toelaatbare overstromingskans overschreden.

3.6.5 Gevoeligheidsanalyse

Als gevoeligheidsanalyse is voor het gehele traject ook een beoordeling uitgevoerd met de instelling 'open zode' voor het zichtjaar 2023. Overige parameters zijn ongewijzigd gebleven. De analyse is alleen uitgevoerd voor de locaties waar de zodekwaliteit als gesloten is geclassificeerd (dijkpaal 90.0 t/m 82.0).

*Figuur 74
Resultaten GEBU
voor het huidige
zichtjaar bij een
open zode.*



Figuur 74 laat zien dat het overgrote deel van de vakken niet voldoet aan de faalkanseis op doorsnede niveau bij de max. toelaatbare overstromingskans (cat IIIv). Dit betreft vooral de groene dijk, ten oosten van de haven.

Hieruit blijkt dat de kwaliteit van de zode grote invloed heeft op het eindresultaat. Het is dan ook van belang dat het beheerregime ingericht is met het doel om de gesloten zode te kunnen blijven garanderen.

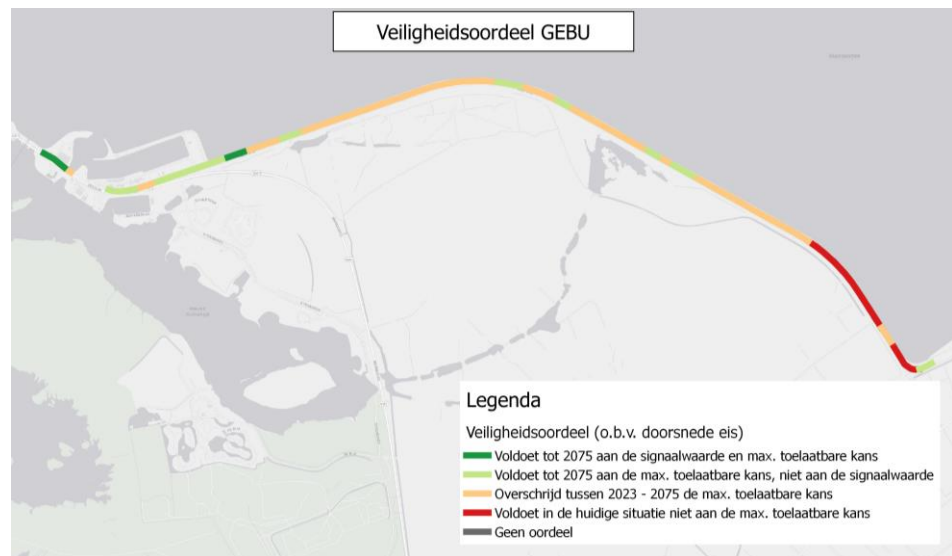
3.6.6

Veiligheidsoordeel

Op de meeste locaties voldoet de grasbekleding op het buitentalud aan de max. toelaatbare overstromingskans. Alleen tussen dijkpaal 82.0 en 83.7 wordt in de huidige situatie niet voldaan aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit omdat de overgang tussen de betonblokken en klinkers naar de grasbekleding te laag ligt.

Voor het grootste deel van de locaties ligt de overgang tussen de betonblokken en klinkers naar de grasbekleding te laag op het talud om tot 2075 te voldoen aan de maximaal toelaatbare kans.

Figuur 75
Veiligheidsoordeel
GEBU



3.6.7 Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

We raden aan GEBU onderdeel te maken van de scope van het HWBP project.

3.7 Grasbekleding afschuiven binnentalud - GABI

3.7.1 Algemeen

Naast erosie van de grasbekleding (GEKB) wordt afschuiving van de grasmat beoordeeld in het beoordelingspoor Grasbekleding Afschuiven Binnentalud (GABI). Een hoge grondwaterstand in de dijk in combinatie met golfoverslag kan leiden tot afschuiven/opdrukken van de van de kleibekleding en daarmee de grasbekleding. Alvorens voor dit toetsspoor een eenvoudige en, indien noodzakelijk, een gedetailleerde toets uit te voeren is eerst een beoordeling op relevantie uitgevoerd.

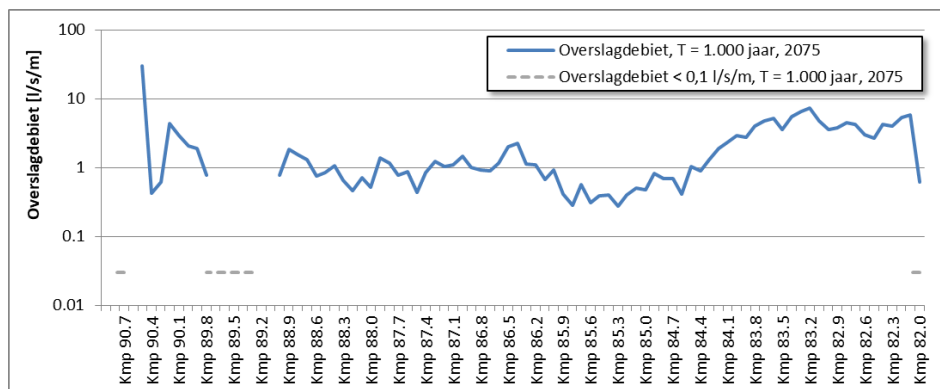
3.7.2 Specifieke uitgangspunten

De belangrijkste uitgangspunten voor het beoordelingspoor GABI zijn:

- Het niveau van de onderzijde van de grasbekleding op het binnentalud (teen binnentalud) en de taludhelling is vastgesteld op basis van DTM [MUG, 2018].
- Eigenschappen deklaag binnentalud op basis van grondonderzoek Wiertsema & Partners;
- Indien bepaalde geotechnische parameters niet bekend zijn wordt hier een conservatieve aanname voor gedaan conform WBI.
- Wanneer een te beoordelen dijkvak een overslagdebiet heeft kleiner dan 0,1 l/m/s is voorgeschreven dat een beoordeling op STMI moet worden uitgevoerd. In voorliggende veiligheidsbeoordeling altijd een GABI

berekening uitgevoerd. Dit omdat (1) de veiligheidsbeoordeling plaatsvindt in het kader van de scopebepaling van het HWBP project Lauwermsmeerdijk en (2) de GABI beoordeling in de toekomst op nagenoeg alle locaties relevant wordt (zie Figuur 76 – locaties met grijze lijn). Als het golfoverslagdebiet kleiner is dan 0,1 l/s/m is de locatie beoordeeld alsof sprake is van een overslagdebiet van 0,1 l/m/s en een golfhoogte van 2,0 m. Dit is een veilige benadering, maar realistisch gezien de scope van het project.

*Figuur 76
Overslagdebiet bij
max. toelaatbare
kans in 2075.
Overslagdebieten
kleiner dan 0.1 l/s/m
worden niet
berekend door
Hydra-NL. Deze
locaties zijn met de
grijze stippellijn
weergegeven.*



Vakindeling

Omdat er voor elke 100 m informatie beschikbaar is over de belangrijkste parameters, is ervoor gekozen om met eenzelfde vakgrootte als bij het toetsspoor GEBU de beoordeling uit te voeren.

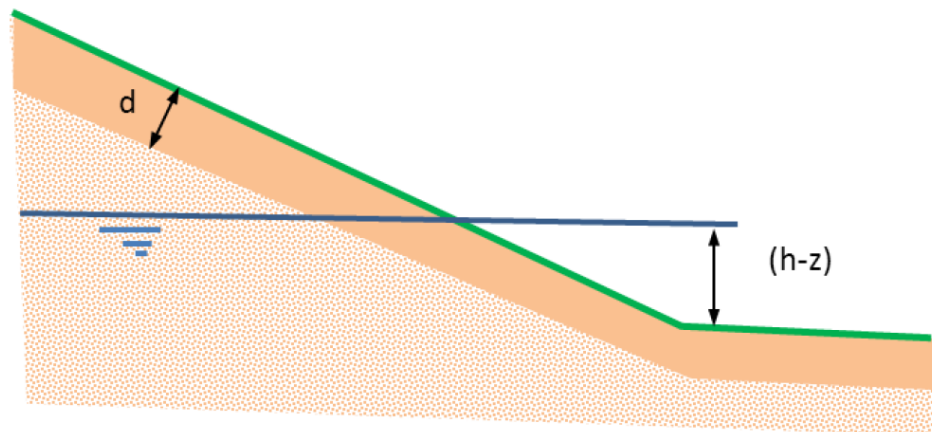
Profielen

De profielen zijn afgeleid op basis van het DTM. Hiervoor is met name de afstand tussen bovenkant koperslakblokken (intredepunt, zie onderstaande subparagraaf) en de onderkant van de grasbekleding op het buitentalud relevant. Van deze laatst genoemde locatie is daarnaast ook de hoogteligging van belang.

Waterdruk tegen kleibekleding

De grasbekleding op het binnentalud kan pas afschuiven wanneer de grondwaterstand dusdanig verhoogd is dat deze een opwaartse druk (h-z) uitoefent op de kleibekleding, zoals geïllustreerd in Figuur 77.

Figuur 77
Waterdruk op
grasbekleding
binnentalud



De hoogte van de teen van het binnentalud (z) is een, zoals eerder benoemd, afgeleid op basis van het DTM.

De grondwaterstand in de dijk (h), uitgedrukt in m+NAP, is een opsomming van onderstaande elementen:

- Grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden;
- Verhoging van freatisch vlak door hoge buitenwaterstand; en
- Verhoging van freatisch vlak door infiltratie door golfoverslag.

Hieronder zijn deze elementen individueel toegelicht:

Grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden

In [NZV, 2018c] staat visueel weergegeven welk grondwaterpeil per deelgebied gehanteerd wordt onder dagelijkse omstandigheden. Voor elk van deze gebieden is beschouwd langs welk dijkvak het betreffende peil gehandhaafd wordt. Dit peil is het startpunt voor het bepalen van het freatisch vlak tegen de binnenteen.

Verhoging van freatisch vlak door hoge buitenwaterstand

De verhoging van de grondwaterstand gedurende maatgevende condities is geschematiseerd met een lineair verloop van hoogwaterstand buitendijks tot de grondwaterstand in het binnentalud. Om de lengte van dit lineaire verhang, de indringingslengte, te bepalen is onderstaande formulering toegepast, conform WBI2017. De genoemde veilige standaardwaarden zijn afkomstig uit [RWS - WVL, 2016a]

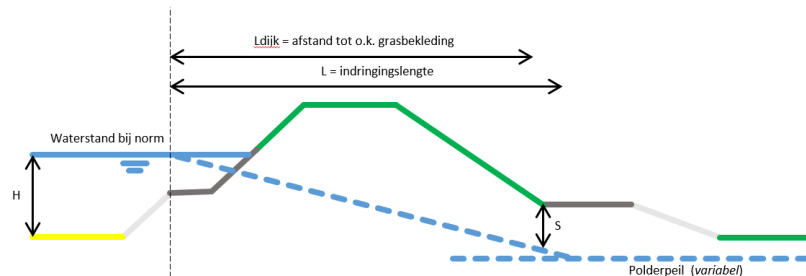
$$L = \sqrt{\frac{2HkT}{n}}$$

Met:

- L = Horizontale indringingslengte vanaf het buitentalud [m].
- H = Karakteristieke hoogte van het zandpakket waardoor het water naar binnen stroomt [m].
- k = Doorlatendheid zandkern [m/s] (default: $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s)
- T = Periode hoogwater [s] (Waddenzee: 45 uur)
- n = porositeit zandkern [-] (default: 0,35)

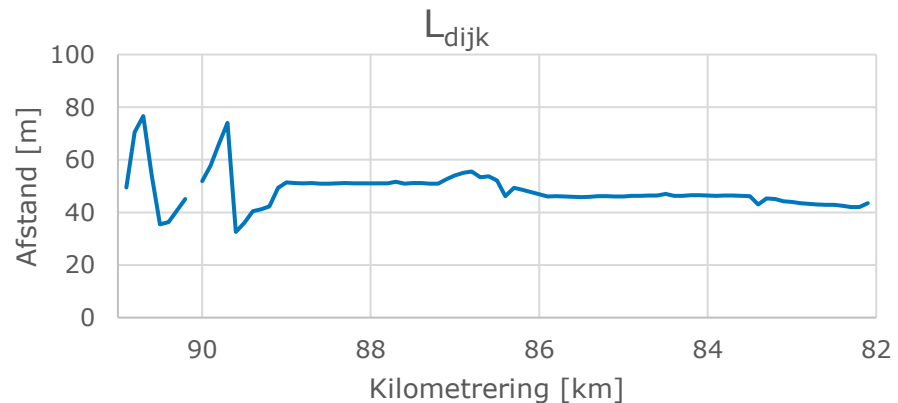
Onderstaand figuur toont het resulterend freatisch vlak schematisch voor de Lauwersmeerdijk.

Figuur 78
Schematische
weergave freatisch
vlak



De afstand tussen het intredepunt, bovenkant koperslakblokken, en het opbarst-/afschuifpunt is bepaald over de lengte van de dijk (L_{dijk}). Voor de 'groene' dijk ligt het opbarst-/afschuifpunt bij de onderkant van de grasbekleding boven de onderhoudsweg. Nabij het haventerrein is deze afstand niet eenvoudig te bepalen. Voor de haven is dan ook een werkwijze op maat aangehouden waarbij het intredepunt is aangenomen op bovenkant haventerrein en het uitredepunt afhankelijk is gemaakt van de locatie van het binnentalud. Figuur 87 illustreert de afstand over de lengte van de dijk. Enkel bij het profiel van kmp 90.1 is geen lengte af te leiden door hooggelegen achterland.

Figuur 79
Afstand intredepunt
en potentiële
opbarst-/afschuif-
locatie



Verhoging van freatisch vlak door infiltratie door golfoverslag

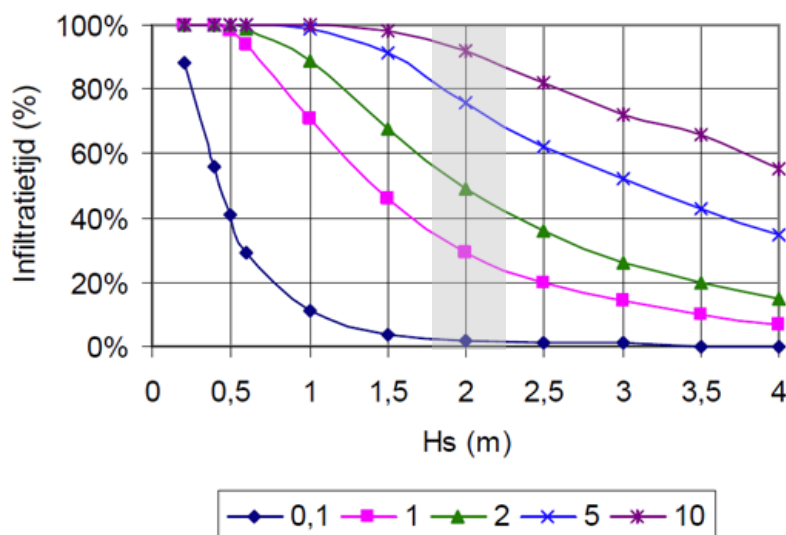
Om de verhoging van de freatische lijn als gevolg van infiltratie door golfoverslag bovenop de indringingslengte te bepalen wordt de methode beschreven in [Deltares, 2016] toegepast. Daarbij wordt de infiltratietijd gedurende een storm van 6 uur bepaald. Deze infiltratietijd is afhankelijk van het overslagdebiet en golfhoogte en kan worden afgeleid uit onderstaande grafiek (Figuur 80). De benodigde golfhoogte volgt uit het illustratiepunt van het overslagdebiet bij de norm (ondergrens en signaleringswaarde). Voor het zichtjaar 2023 liggen de golfhoogtes van het illustratiepunt van de golfoverslagberekeningen bij de norm over het traject rond de 2,0m zoals weergegeven door de grijze band in Figuur 80. Met deze golfhoogte is

vervolgens bij elk dwarsprofiel het overslagdebiet gebruikt om de infiltratietijd te bepalen.

Tabel 54
Golfhoogtes
illustratiepunt
golfoverslagberekeni
ngen t.b.v. GABI

Zichtjaar	Terugkeertijd	Min. golfhoogte (Hs) [m]	Max. golfhoogte (Hs) [m]	Gemid. golfhoogte (Hs) [m]
2023	1.000	1,45	2,30	1,95
2023	3.000	1,60	2,45	2,10

Figuur 80
Infiltratietijd als
functie van de
significante
golfhoogte



Door de infiltratietijd te vermenigvuldigen met de totale duur (6 uur) en met de infiltratiecapaciteit van de kleibekleding (veilig aangenomen op 10^{-4} m/s), volgt hieruit een waterinstroom (m^3 per m^2). In combinatie met een veilige waarde voor de porositeit ($n=0,33$) leidt dit tot een verhoging van het freatisch vlak.

3.7.3

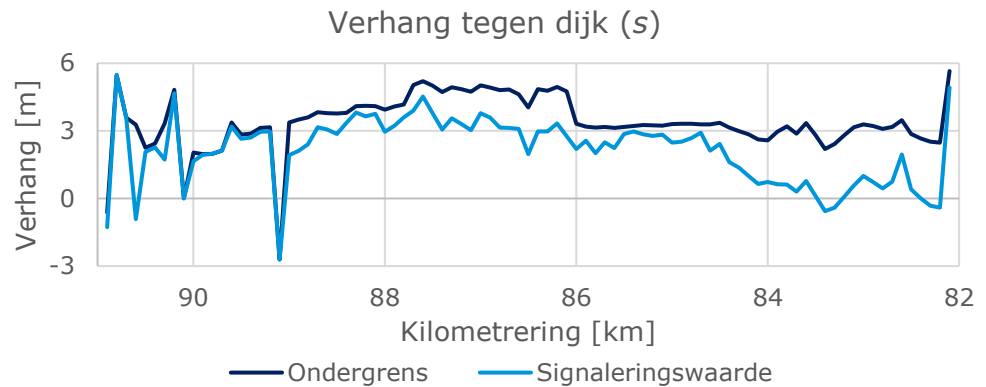
Resultaten

Beoordeling op relevantie

Het faalmechanisme GABI kan alleen relevant zijn indien het freatisch vlak, inclusief verhoging door golfoverslag, hoger is dan de onderkant van de kleibekleding, zoals in Figuur 78 weergegeven parameter s . In het geval van de Lauwersmeerdijk ligt de kleibekleding vrij hoog, omdat het binnentalud een teen heeft bestaande uit stortsteen met daarboven een geasfalteerde weg op de berm.

Indien de verticale lengte tussen de freatische lijn en onderkant grasbekleding (s) kleiner is dan 0, is er een verval over de bekleding en kan GABI optreden. In geval s groter is dan 0, is er geen forcering aanwezig die tot afschuiven of opbarsten van de bekleding kan leiden. Figuur 106 illustreert deze waterdrukken.

*Figuur 81
Verhang tegen
kleibekleding
binnentalud. Een
negatieve waarde
representeert
aanwezigheid van
verhang*



Uit het figuur kan worden afgeleid dat bij de ondergrens slechts in twee profielen het freatisch vlak hoger ligt dan de onderkant kleibekleding (kmp 89,1 en 90,9). Bij de signaleringswaarde neemt dit toe tot 8 profielen. Voor deze profielen is dus de beoordeling uitgevoerd.

Eenvoudige beoordeling

De eenvoudige beoordeling volgens WBI bestaat uit een beoordeling aan eenvoudige kenmerken. De faalkans wordt verwaarloosbaar geacht indien aan één of meer van onderstaande voorwaarden voldaan wordt:

- Het overslagdebiet bij de norm (q) is kleiner dan 0,1 l/m/s.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:5 en bestaat niet uit veen.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:3 en de dijk bestaat uit stevige klei.
- De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1:4 en de dijk bestaat uit klei die niet als stevig wordt geclassificeerd.
- De dijk bestaat uit zand, al dan niet voorzien van een kleibekleding, en heeft goed werkende drainage in de binnenteen.

Voor het te beoordelen dijktraject vallen de criteria met betrekking tot de taludhelling, aangezien hier niet aan voldaan wordt, af. Ook is geen goed werkende drainage in de binnenteen aanwezig is. Omdat het overslagdebiet groter is dan 0,1 l/s per m dient een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd te worden.

Gedetailleerde beoordeling

In de gedetailleerde toets per vak wordt onder falen verstaan: stabiliteitsverlies van de grasbekleding door opdrukken en/ of afschuiven van de bekleding of het uitspoelen van zand. Omdat de kleibekleding geen gaten (graverij) of scheuren in de teen van de dijk heeft zal eerst opdrukken of afschuiven moeten optreden voordat uitspoelen van zand mogelijk is. Bij de gedetailleerde toets is daarom alleen gekeken of de bekleding kan opdrukken en/of afschuiven. Indien een van deze deelfaalmechanismen onvoldoende veilig is, volgt het oordeel onvoldoende.

Opdrukken kleibekleding

Voor het opdrukken van de kleibekleding is een vereenvoudigde en een meer gedetailleerde methode beschikbaar gesteld binnen het WBI2017. De vereenvoudigde methode volgt onderstaande formule:

$$SF = \frac{R}{S} = \frac{1}{\gamma_n \gamma_d} \frac{\cos \alpha \, d \frac{\rho_g}{\gamma_{m,p}}}{(h - z) \rho_w}$$

Met hierin:

- SF = Safetyfactor, indien groter dan 1 voldoet het profiel [-]
- $\gamma_d \gamma_n$ = Modelfactor x schadegetal, (1,1 x 1,1 = 1,21) [-]
- $\gamma_{m,p}$ = Partiële veiligheidsfactor op volumieke massa grond (= 1,0) [-]
- ρ_g = Volumieke massa natte grond [kg/m³] (=
- ρ_w = Volumieke massa water [kg/m³]
- α = Taludhelling [°]
- d = Laagdikte [m]
- $(h - z)$ = Ligging van het freatisch vlak onder het binnentalud ten opzichte van een niveau [m]

Voor de Lauwersmeerdijk zijn onderstaande parameters afgeleid op basis van het grondonderzoek [Wiertsema & Partners, 2018], waarbij een realistisch conservatieve waarde gekozen is voor het traject.

Tabel 55
Invoerparameters
vereenvoudigde
methode GABI

Parameter [SI]	Conservatieve waarde
ρ_g [kg/m ³]	1774
ρ_w [kg/m ³]	1025
α [°]	18
d [m]	0,6
h [m+NAP]	7,68
z [m+NAP]	2,73

Indien blijkt dat er niet aan de vereenvoudigde methode van opdrukken kleibekleding voldaan kan worden kan een uitgebreide methode worden toegepast. Deze methode houdt wel rekening met de wrijving langs de randen van de opgedrukte grondmoot. Hiervoor is onderstaande methode, conform WBI toegepast.

$$SF = \frac{R}{S} = \frac{1}{\gamma_n \gamma_d} \frac{\frac{2c'd}{\gamma_{m,c}} + \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,p}} \Delta x \, d \cos \alpha + \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,p}} \Delta x \, d \sin \alpha \frac{\tan \phi'}{\gamma_m \phi}}{\left(\Delta h - \frac{1}{2} \Delta x \sin \alpha \right) \frac{\rho_w g}{\gamma_{m,p}} \Delta x}$$

Met hierin in aanvulling op de eenvoudige methode:

- $\tan \phi'$ = Tangens van de effectieve hoek van inwendige wrijving [°]
- $\gamma_{m,\phi}$ = Partiële veiligheidsfactor op $\tan \phi'$ (=1,1) [-]
- c' = Effectieve cohesie [Pa]
- $\gamma_{m,c}$ = Partiële veiligheidsfactor op c' (=1,25) [-]
- g = Zwaartekrachtversnelling (=9,81) [m/s²]

Δx = Kritische lengtemaat langs het talud [m]

Zowel de hoek van inwendige wrijving als de effectieve cohesie is niet in het grondonderzoek bepaald. Hiervoor is uitgeweken naar veilige waarden uit tabel 2.b van NEN 9997-1. Tabel 56 toont deze waardes.

*Tabel 56
Aanvullende
invoerparameters
gedetailleerde
methode GABI (klei)*

Parameter [SI]	Conservatieve waarde
$\tan \phi'$ [°]	22,5
c' [Pa]	5.000

Afschuiven kleibekleding

Het afschuiven van de kleibekleding is berekend met de methode gepresenteerd in het WBI2017. Hierin staat onderstaande formule gepresenteerd:

$$SF = \frac{R}{S}$$

$$= \frac{1}{\gamma_n \gamma_d} \frac{c}{\gamma_{m,c}} \frac{d}{\sin \alpha} + \frac{1}{2} \frac{d^2}{\sin \alpha} \frac{\rho_g g \tan \phi}{\gamma_{m,\rho} \gamma_{m,\phi}} + \frac{c'}{\gamma_{m,c}} + \left(\cos \alpha \frac{\Delta h}{\sin \alpha} d \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,\rho}} - \frac{1}{2} \sin \alpha \frac{\rho_w g}{\gamma_{m,\rho}} \Delta h^2 \right) \frac{\tan \phi'}{\gamma_{m,\phi}}$$

$$\left(\Delta h d \frac{\rho_g g}{\gamma_{m,\rho}} \right)$$

Hierin zijn geen nieuwe parameters gepresenteerd ten opzichte van de eenvoudige en gedetailleerde methode voor het bepalen van opbarsten. Echter, dient ook de schuifweerstand tussen klei en zand meegenomen te worden. Hiervoor zijn onderstaande parameters afgeleid.

*Tabel 57
Aanvullende
invoerparameters
afschuiving methode
GABI (zand)*

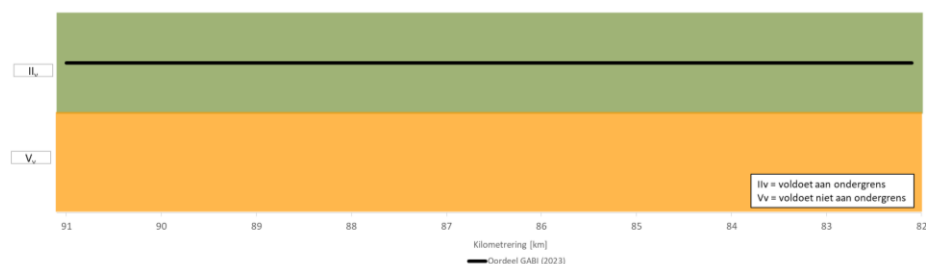
Parameter [SI]	Conservatieve waarde
ϕ' [°]	20
c' [Pa]	0

Resultaat

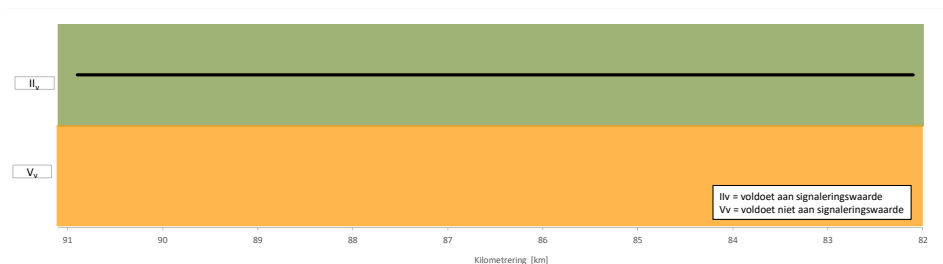
Voor het faalmechanisme GABI is zowel bij de ondergrens als signaleringswaarde een beoordeling uit gevoerd. Op basis van relevantie kunnen grote delen van het traject als voldoende beoordeeld worden. Er blijven bij de ondergrens en signaleringswaarde zodoende respectievelijk slecht twee en acht profielen over voor de gedetailleerde beoordeling.

Uit de gedetailleerde beoordeling blijkt dat zowel bij de ondergrens als signaleringswaarde alle locaties voldoet aan de norm op basis van opdrukken van de grasbekleding. Figuur 82 en Figuur 83 tonen respectievelijk de resultaten voor de ondergrens en signaleringswaarde.

*Figuur 82
Beoordeling GABI,
ondergrens 2023*



Figuur 83
Beoordeling GABI,
signaleringswaarde
2023

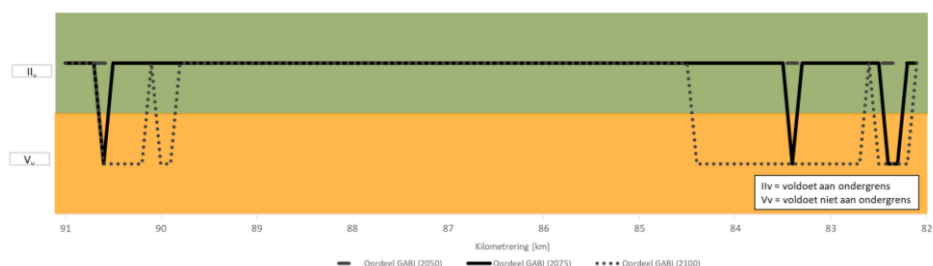


3.7.4

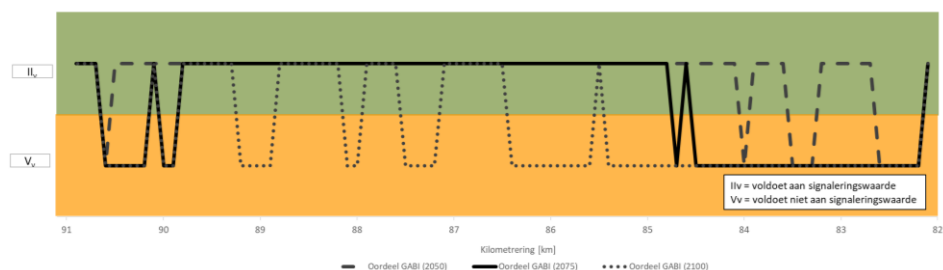
Restlevensduur

Voor de bepaling van de restlevensduur is eenzelfde werkwijze aangehouden als gepresenteerd in de beoordeling van zichtjaar 2023. Voor de toekomstige zichtjaren zijn echter zetting, verhoging van normwaterstanden en toenemende overslagdebieten meegenomen.

Figuur 84
Beoordeling GABI,
max. toelaatbare
kans 2050, 2075 en
2100



Figuur 85
Beoordeling GABI,
signaleringswaarde
2050, 2075 en 2100



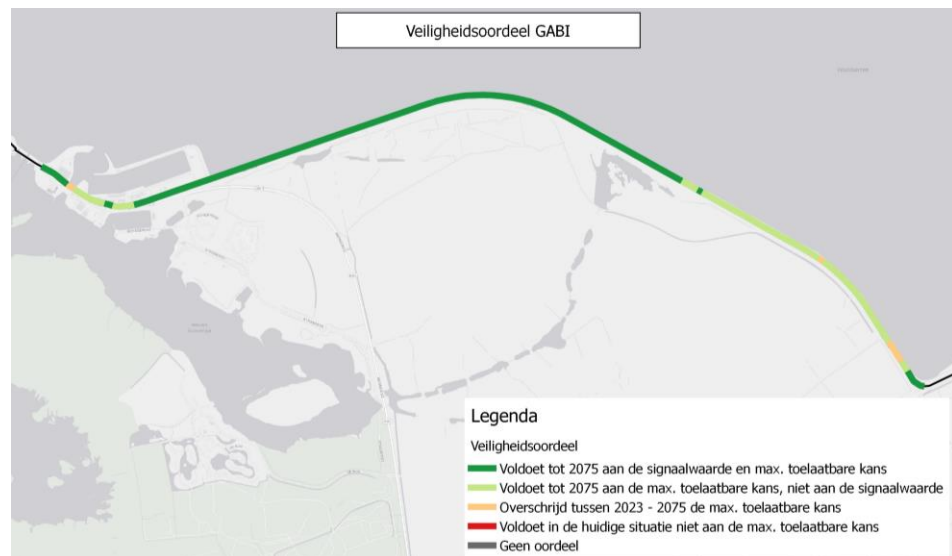
De resultaten laten zien dat bij de max. toelaatbare kans het grootste deel van de dijk voldoet tot 2100. Enkel op locaties met hoge overslagdebieten (oostzijde en haven) stijgt het freatisch vlak in de dijk, waardoor in sommige gevallen sprake is van een verzadigde dijk. In deze situaties wordt voor het toetsspoor GABI niet voldaan aan de norm.

3.7.5

Veiligheidsoordeel t.b.v. HWBP project

Het grootste deel van de Lauwersmeerdijk voldoet tot 2075 in ieder geval aan de max. toelaatbare kans. Op het meest oostelijke deel van het traject en bij de Robbengatsluis wordt in de huidige situatie (peildatum 1 jan. 2023) nog wel voldoen aan de maximaal toelaatbare kans, maar in 2075 niet meer.

Figuur 86
Veiligheidsoordeel
GABI



3.7.6

Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

Op locaties waar niet tot 2075 wordt voldaan aan de max. toelaatbare kans is ook sprake van een hoogte opgave. Het is waarschijnlijk dat de opgave voor GABI wordt opgelost als de kruin wordt verhoogt (en daarmee de hoeveelheid golfoverslag wordt verminderd). We raden daarom aan om GABI vooralsnog geen onderdeel uit te laten maken van het HWBP project. Dit dient wel controleert te worden bij het HWBP project.

3.8

Grasbekleding afschuiven buitentalud – GABU

3.8.1

Algemeen

Naast erosie van de grasbekleding (GEBU) wordt afschuiving van de grasmat beoordeeld in het beoordelingsspoor Grasbekleding Afschuiven Buitentalud (GABU).

Afschuiven van de kleibekleding kan plaatsvinden door golfbelasting samen met een hoge grondwaterstand in de (zand)kern van de dijk. Tijdens een dal in de golfperiode kan zodoende een buitenwaartse drukgradiënt ontstaan die de kleilaag kan opdrukken en afschuiven. Dit proces vindt alleen plaats in de golfklapzone. Het WBI definieert de golfklapzone voor GABU (afwijkend van GEBU) als het taluddeel tussen de waterstand bij de norm en het niveau met een kans van overschrijden van 1/10 per jaar.

Afschuiven van gras op het buitentalud kan dus alleen bij zanddijken met een kleiafdekking in de golfklapzone (beneden de waterstand bij de norm) plaatsvinden.

3.8.2

Specifieke uitgangspunten

De uitgangspunten voor GABU komen grotendeels overeen met het faalmechanisme GEBU:

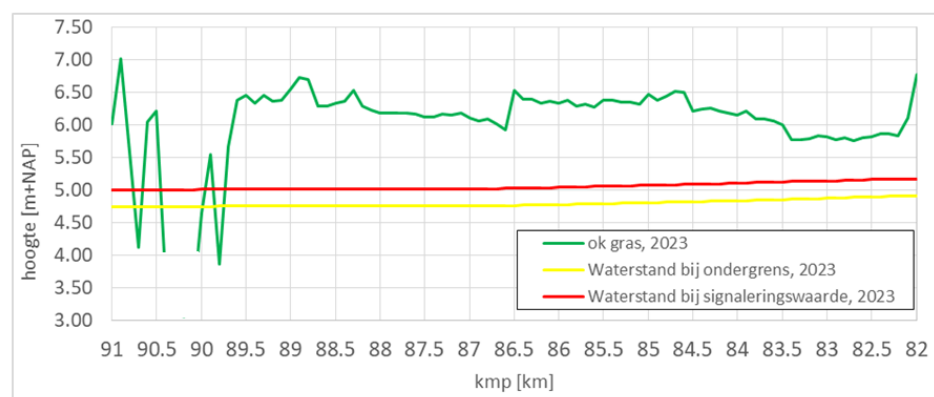
- Het niveau van de onderzijde van de grasbekleding worden vastgesteld op basis van DTM [MUG, 2018];
- Eigenschappen van de deklaag op basis van grondonderzoek Wiertsema & Partners [Wiertsema & Partners, 2018];
- Profielschematisaties op basis van profiel DTM (i.c.m. AHN2).

3.8.3

Resultaten

Voor de beschouwing van GABU voor het zichtjaar 2023 is eerst een beoordeling uitgevoerd op relevantie. Figuur 87 laat zowel het niveau van de onderzijde van de grasbekleding (ok gras) en de waterstand bij de norm (signaleringswaarde) zien. Uit het figuur valt op te maken dat de grasbekleding veelal niet in de golfklapzone ligt (onderkant gras > waterstand bij de norm). Om deze reden kan het faalmechanisme GABU voor deze vakken worden uitgesloten. Enkel voor vakken in het havengebied dient een gedetailleerde beoordeling te worden uitgevoerd.

*Figuur 87
Onderzijde
grasbekleding en
waterstanden bij
max. toelaatbare
kans (ondergrens)
en de signalerings-
waarde in 2023*



Eenvoudige beoordeling

De eenvoudige beoordeling bestaat uit drie stappen. De eerste twee stappen hebben de betrekking op de aanwezigheid van een kleikern (E.1) en zandscheg (E.2). Uit het grondonderzoek [Wiertsema & Partners, 20187] komt naar voren dat er geen kleikern aanwezig is. Daarnaast tonen de sonderingen en boringen in het binnen- en buitentalud ook enkel zandlagen onder de bekleding. Gebaseerd op deze informatie, in combinatie met de geschiedenis van de dijk en de ervaring van de beheerder, wordt geconcludeerd dat geen zandscheg aanwezig is. Omdat beide stappen zodoende met 'nee' beantwoord worden, dient ook de laatste stap (E.3) behandeld te worden. Deze stelt dat als de golfhoogte kleiner is dan de kleilaagdikte de faalkans verwaarloosbaar is. Omdat de golfhoogtes bij de norm ter plaatse van het te beoordelen deeltraject en voor zichtjaren 2075 en 2100 tussen de 2,17 en 2,67 m liggen en de kleilaag veel dunner (max 0,86 m) is, is voor het toetsspoor GABU een gedetailleerde toets uitgevoerd.

Gedetailleerde beoordeling

Bij de gedetailleerde toets per vak van het toetsspoor GABU is aan de hand van de onderstaande empirische rekenregel beoordeeld of de kans op afschuiven van de bekleding voldoende klein is (reststerkte wordt hierbij niet meegenomen):

$$\frac{H_{m0}}{\Delta g d_{klei} \cos \alpha} \leq 3$$

Hierin is:

H_{m0} Significante golfhoogte bij norm [m]

Δg Relatieve dichtheid kleilaag [-]

d_{klei} Dikte kleilaag [m]

α Taludhelling [°]

Stap G.1

De gedetailleerde rekenregel mag worden toegepast als de bekleding in de vakken niet op een zandscheg ligt en de taludhelling minder steil is dan 1V:2,5H. Uit stap E.2 volgde al dat onder de bekleding geen zandscheg aanwezig is. Uit het DTM volgt dat de taludhelling van in de te beoordelen trajecten maximaal 1:4 is. Omdat aan beide toepassingsvoorwaarden wordt voldaan, mag de gedetailleerde rekenregel worden toegepast.

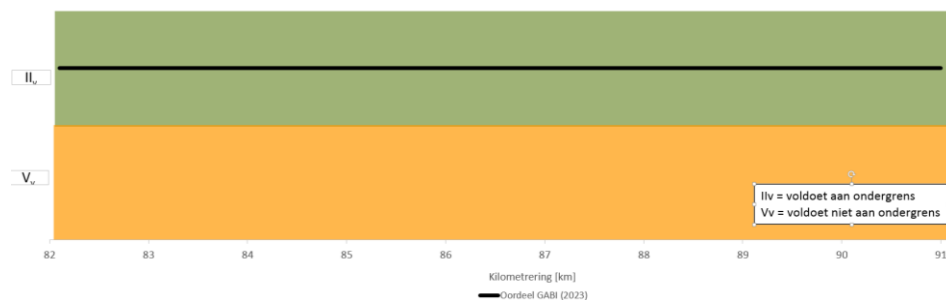
Stap G.2

Uit Tabel 58 volgt dat voor overal het resultaat kleiner dan 3 blijft waarmee wordt voldaan. Omdat de kans op afschuiven van de bekleding voldoende klein is, wordt wel voldaan aan de gedetailleerde rekenregel. Alle vakken voldoen bij zowel de signaleringswaarde als de max. toelaatbare kans dus aan de norm (zie ook Figuur 88 en Tabel 58).

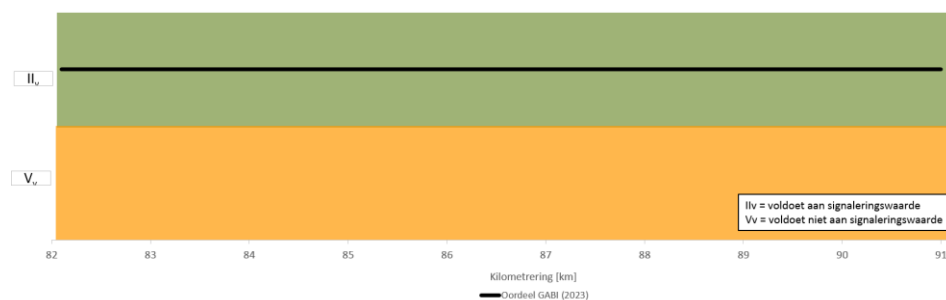
*Tabel 58
Resultaten
empirische
ongelijkheid GABU
voor max.
toelaatbare kans en
signaleringswaarde
(2023)*

Norm	Vak	H_{m0} [m]	Δg [-]	d_{klei} [m]	$\cos \alpha$ [-]	$\frac{H_{m0}}{\Delta g d_{klei} \cos \alpha}$
Max. toelaatbare kans	89,8	1,62	0,56	1,40	0,97	2,12
	90,0	1,40	0,56	1,36	0,97	1,90
	90,1	1,48	0,56	1,34	0,97	2,04
	90,2	1,48	0,56	1,31	0,97	2,07
	90,3	1,46	0,56	1,29	0,97	2,07
	90,4	1,51	0,56	1,27	0,97	2,18
	90,7	1,55	0,56	1,21	0,97	2,36
Signalerings- waarde	89,8	1,84	0,56	1,40	0,97	2,41
	90,0	1,52	0,56	1,36	0,97	2,06
	90,1	1,57	0,56	1,34	0,97	2,16
	90,2	1,57	0,56	1,31	0,97	2,19
	90,3	1,55	0,56	1,29	0,97	2,20
	90,4	1,59	0,56	1,27	0,97	2,29
	90,7	1,67	0,56	1,21	0,97	2,54

*Figuur 88
Beoordeling GABU,
max. toelaatbare
kans, 2023*



*Figuur 89
Beoordeling GABU,
Signaleringswaarde,
2023*



3.8.4

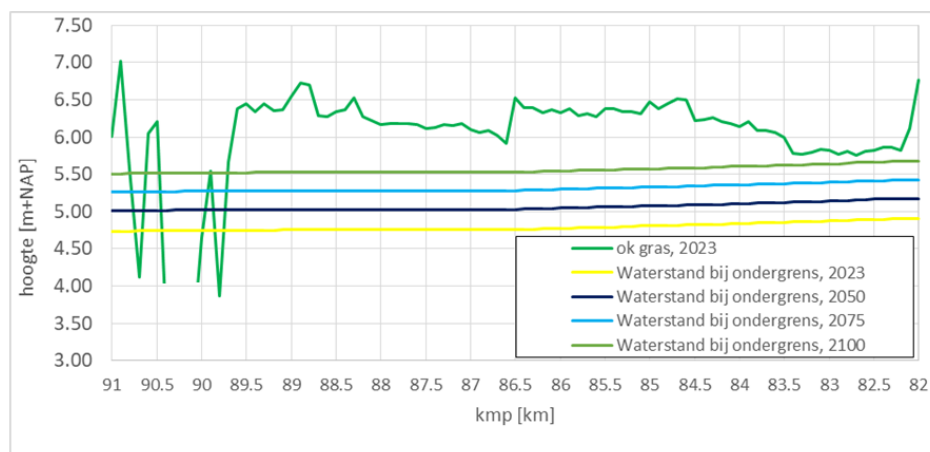
Restlevensduur

Beoordeling bij maximaal toelaatbare overstromingskans

Ook voor de restlevensduur kan een beschouwing op basis van relevantie worden uitgevoerd. Figuur 90 geeft de resultaten van deze analyse bij de max. toelaatbare kans. Hieruit valt op te maken dat tot 2100 geen extra profielen beoordeeld dienen te worden ten opzichte van het zichtjaar 2023. Voor deze profielen is voor de zichtjaren 2050, 2075 en 2100 een beoordeling op de wijze zoals beschreven in paragraaf 3.8.3 uitgevoerd. Tabel 59 toont de resultaten.

Voor alle profielen wordt voldaan aan de gestelde eisen. Daarom voldoen alle vakken tot het zichtjaar 2100 aan de maximaal toelaatbare overstromingskans.

*Figuur 90
Onderzijde
grasbekleding en
waterstanden bij
max. toelaatbare
kans (ondergrens) in
diverse zichtjaren*



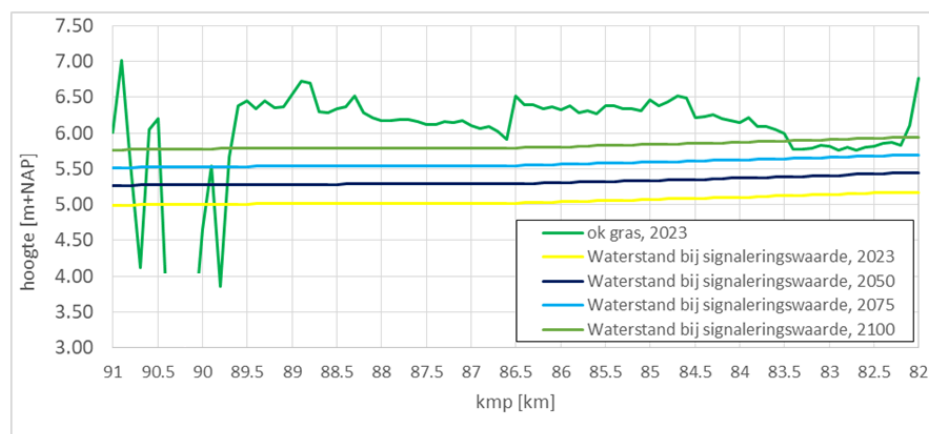
Tabel 59
Resultaten GABU,
max. toelaatbare
kans (ondergrens)
bij verschillende
zichtjaren

Dijkvak	$\frac{H_{m0}}{\Delta_g d_{klei} \cos \alpha}$		
	Max. toelaatbare kans (T=1.000)		
2050	2075	2100	
89,8	2,25	2,38	2,51
90,0	1,96	2,03	2,12
90,1	2,09	2,12	2,18
90,2	2,12	2,15	2,21
90,3	2,11	2,16	2,19
90,4	2,20	2,23	2,26
90,7	2,40	2,44	2,49

Beoordeling bij signaleringswaarde

De analyse op relevantie voor de signaleringswaarde, weergegeven in Figuur 91, resulteert niet in de beoordeling van extra profielen voor het zichtjaar 2050 ten opzichte van 2023. Anders is dit voor de zichtjaren 2075 en 2100. Uit het figuur blijkt dat in 2100 voor het traject tussen 82.7 en 83.4 het toetsspoor GABU doorlopen dient te worden. Voor 2075 geldt dit slechts voor één extra locatie (kmp 82,7). Tabel 60 toont de resultaten van de gedetailleerde beoordeling.

Figuur 91
Onderzijde
grasbekleding en
waterstanden bij
signaleringswaarde
in diverse zichtjaren



Tabel 60
Resultaten GABU,
ondergrens bij
verschillende
zichtjaren

Dijkvak	$\frac{H_{m0}}{\Delta_g d_{klei} \cos \alpha}$		
	Signaleringswaarde (T=3.000)		
2050	2075	2100	
82,2	Niet relevant	Niet relevant	6,22
82,3	Niet relevant	Niet relevant	5,33
82,4	Niet relevant	Niet relevant	4,79
82,5	Niet relevant	Niet relevant	4,26
82,6	Niet relevant	Niet relevant	4,85
82,7	Niet relevant	4,98	5,16
82,8	Niet relevant	Niet relevant	5,59

$\frac{H_{m0}}{\Delta_g d_{kiet} \cos \alpha}$ Signaleringswaarde (T=3.000)			
Dijkvak	2050	2075	2100
82,9	Niet relevant	Niet relevant	5,68
83,0	Niet relevant	Niet relevant	5,30
83,1	Niet relevant	Niet relevant	5,15
83,2	Niet relevant	Niet relevant	4,87
83,3	Niet relevant	Niet relevant	5,03
83,4	Niet relevant	Niet relevant	5,17
89,8	2,55	2,69	2,82
90,0	2,14	2,24	2,34
90,1	2,21	2,27	2,33
90,2	2,24	2,30	2,36
90,3	2,26	2,29	2,35
90,4	2,34	2,38	2,42
90,7	2,59	2,63	2,69

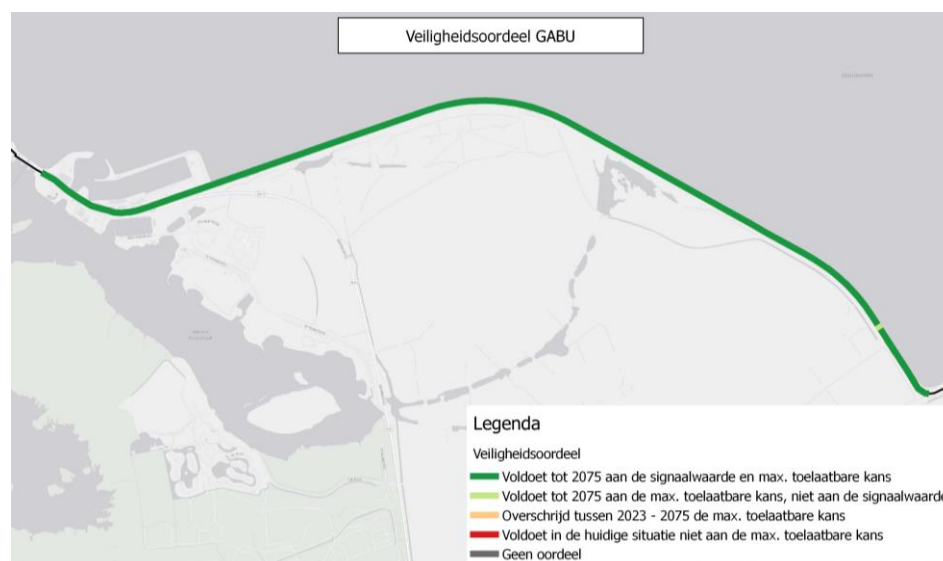
De resultaten laten zien dat in het havengebied (dijkpaal 89.8 t/m 90.7) voor het toetsspoor GABU voor alle zichtjaren wordt voldaan aan de signaalwaarde. Buiten de haven tussen dijkpaal 82.2 t/m 83.4 in 2100 niet meer voldaan aan de signaalwaarde. Hier is de golfbelasting dusdanig dat deze tot een onvoldoende oordeel leidt zo snel de waterstand bij de norm hoger ligt dan de onderkant van de grasbekleding. Bij dijkpaal 82.7 wordt in 2075 al niet meer voldaan aan de signaalwaarde.

3.8.5

Veiligheidsoordeel

De Lauwersmeerdijk voldoet voor GABU tot 2075 altijd aan de max. toelaatbare kans. Dijkpaal 82.7 uitgezonderd wordt ook tot 2075 voldaan aan de signaalwaarde van de norm. GABU is dus niet relevant voor het HWBP project.

Figuur 92
Veiligheidsoordeel
GABU



3.8.6

Specifieke aanbevelingen t.b.v. HWBP project

GABU vorm geen onderdeel van de scope van het HWBP project. Er is vanuit GABU geen reden om de huidige overgang tussen en harde bekleding op te trekken om te voldoen aan de maximaal toelaatbare kans in 2075.

3.9

Micro instabiliteit - STMI

Het beoordelingsspoor STMI is niet relevant in voorliggende veiligheidsbeoordeling. Zie ook paragraaf 3.7.2.

3.10

Golfafslag voorland – VLGA

3.10.1

Algemeen

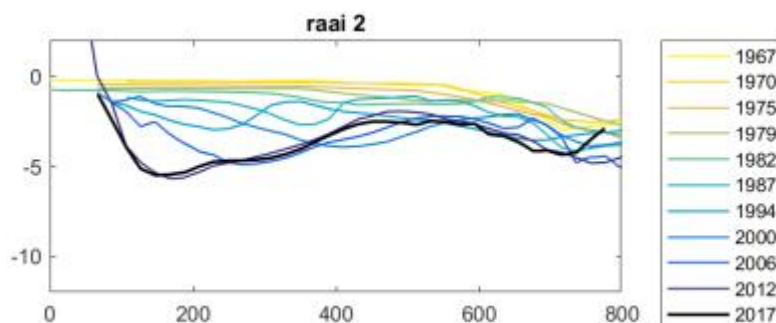
Deze paragraaf beschrijft de totstandkoming van het eindoordeel van de beoordeling voor het beoordelingsspoor voorlanden golfafslag (VLGA). De beoordeling is begonnen met een eenvoudige beoordeling. Indien deze eenvoudige beoordeling tot het oordeel 'verder beoordelen' leidt, is een Toets op Maat (TOM) benodigd. In dit beoordelingsspoor is geen gedetailleerde beoordeling beschikbaar.

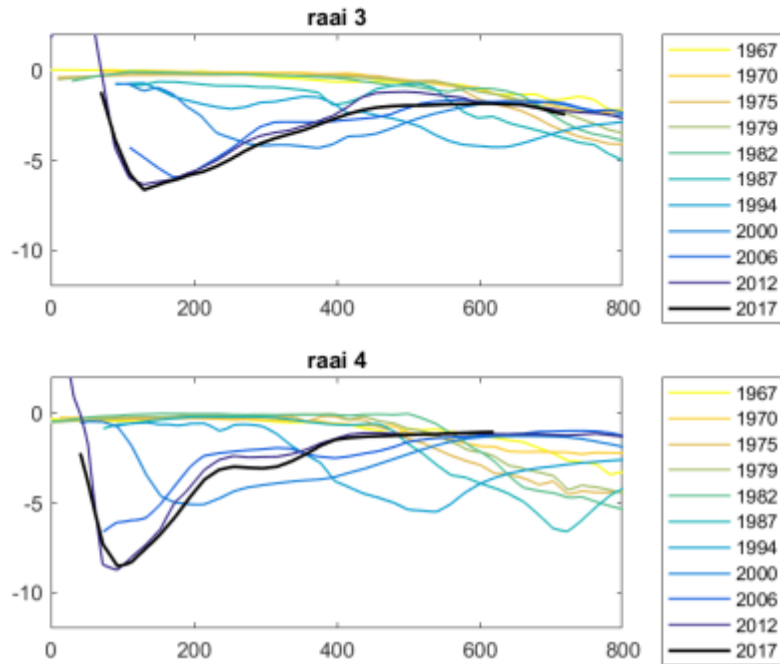
3.10.2

Specifieke uitgangspunten

- Invloedszone = 4H (H = hoogte dijk – hoogte teen).
- De profielen zijn gebaseerd op de door de keringbeheerder aangeleverde lodingen (februari 2018). Deze zijn aangevuld met gegevens uit AHN-2 (2009).
- De ligging, diepte en breedte voorland verandert niet in de tijd. Sinds de aanleg van de bestorting is geen sprake meer van morfologische ontwikkelingen. Dit is weergegeven in de t/m . Hierin is te zien dat het Vierhuizergat de laatste vijf jaar stabiel is.

*Figuur 93
Bodemhoogte langs
3 raaien in het diepe
deel van het
Vierhuizergat. Bron:
HKV, 2018b*



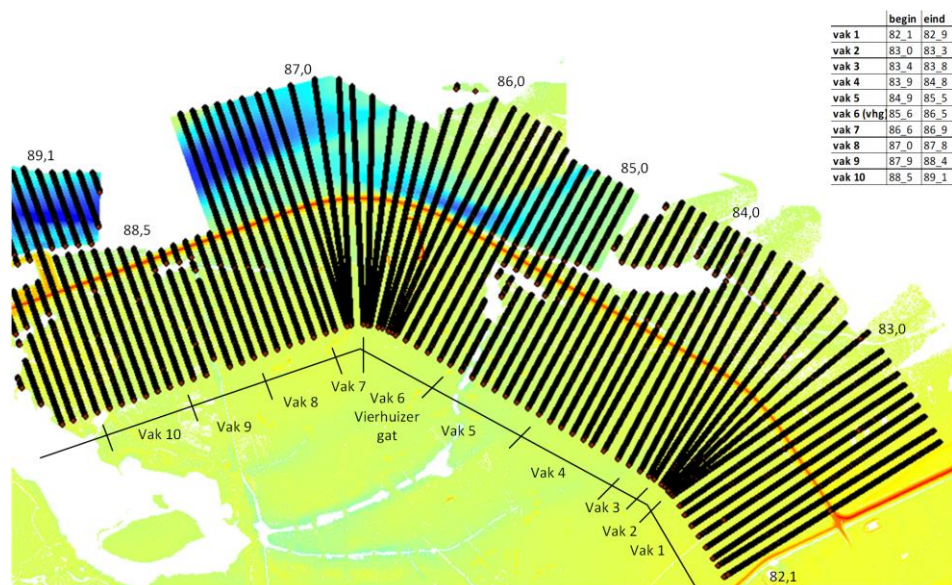


- Ter plaatse van het Vierhuizergat zijn de ontwerpprofielen gebruikt. Aangenomen is dat het ontwerpprofiel op peildatum zichtbaar aanwezig.
- Alleen ter plaatse van het Vierhuizergat is een bestorting aanwezig.
- Aangenomen is dat eventuele nu aanwezige bestorting ook op peildatum zichtbaar aanwezig is.
- Het voorland is opgebouwd uit zand.
- Gemiddelde waterstand GW is gelijk aan NAP
- De laagwaterlijn bij gemiddeld tij is NAP -1,26 m (zie paragraaf 2.2.8)
- De laag laagwaterstand LLWS is NAP -1,42 m (zie paragraaf 2.2.8)
- $d_{50, \text{gemiddeld}}$ onderwatertalud > 0,2 mm.
- $d_{15, \text{gemiddeld}}$ onderwatertalud > 0,1 mm.

Vakindeling

De vakindeling voor de het beoordelingsspoor is weergegeven in Figuur 94. Bij de vakindeling is de beschikbaarheid van gegevens en de oriëntatie van de dijk leidend geweest. Bij de vakindeling diende het Vierhuizergat (vak 6) als vertrekpunt. Omdat tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 geen gegevens over het voorland beschikbaar waren is dit deel als apart vak (9) beschouwd. De andere vakken zijn onderscheiden op basis van de oriëntatie van de dijk. De vakindeling is gelijk voor alle drie de beoordelingssporen met betrekking tot voorlanden (VLGA, VLAf, VLZV).

*Figuur 94
Vakindeling
beoordelingssporen
voorlanden (VLGA,
VLAf, VLZV)*



3.10.3

Resultaten

De resultaten voor VLGA zijn weergegeven in Tabel 60. De resultaten laten zien de faalkans voor het grootste deel van de Lauwersmeerdijk verwaarloosbaar klein is. Nu en in de toekomst. Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 (Vak 9) zijn geen voorlandlodingen beschikbaar. Voor de naastgelegen vakken is de faalkans verwaarloosbaar. Het lijkt daarom reëel te veronderstellen dat de faalkans hier ook verwaarloosbaar is.

De eenvoudige toets voor het Vierhuizergat is beschreven in deze paragraaf. De beoordeling van de andere vakken is gepresenteerd in de Bijlage N.

*Tabel 61
Resultaten VLGA*

Vak	Score VLGA							
	2023		2050		2075		2100	
	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000
1	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
2	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
3	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
4	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
5	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
6	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
7	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
8	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

Eenvoudige beoordeling Vierhuizergat

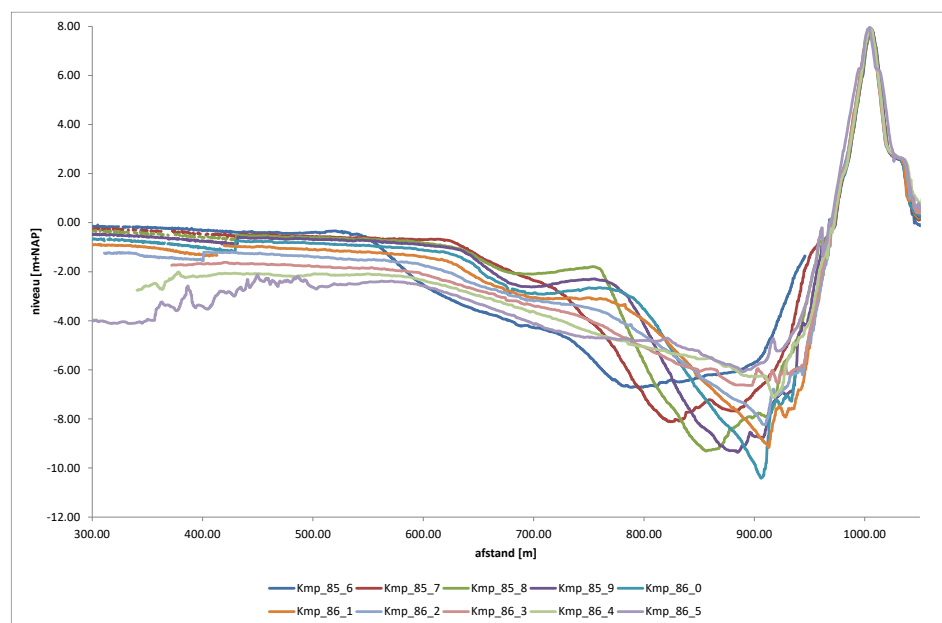
De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is.

Het dijkvak bij het Vierhuizergat (Vak 6) loopt van dijkpaal 85.6 t/m 86.5. In Figuur 95 zijn de lodingen van het voorland weergegeven. De ontwerpprofielen van het Vierhuizergat zijn maatgevend verondersteld (zie ook uitgangspunten).

Stap E.1: Golfafslag is schadelijk voor andere mechanismen

Golfafslag is schadelijk als de rand van het voorland volgens het rekenprofiel landwaarts van de rand van het voorland volgens het signaleringsprofiel ligt. Het signaleringsprofiel is afhankelijk van de invloedszone (4H) en een marge voor maximale afslag (is afhankelijk van de golfhoogte en materiaal van het voorland). Omdat de rand van het voorland volgens het rekenprofiel nagenoeg aan de teen van de dijk ligt, zal deze rand – gelet op de invloedszone – altijd landwaarts van de rand van het voorland volgens het signaleringsprofiel liggen. Golfafslag is dus schadelijk.

*Figuur 95
Lodingen bij het
Vierhuizergat*



Stap E.2: Schadelijke golfafslag is mogelijk

Schadelijke golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmat of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In dit vak liggen 6 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00047 t/m WZ_1_6-5_dk_00042. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven.

*Tabel 62
Hydraulische
belasting bij het
Vierhuizergat per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen*

Zichtjaar	Faalkanseis	h^9 (m+NAP)	Hs^{10} (m)
2023	1/1.000	4,79-4,76	2,48-1,98
2050	1/1.000	5,06-5,03	2,51-2,07
2075	1/1.000	5,31-5,28	2,62-2,11
2100	1/1.000	5,59-5,53	2,69-2,19
2023	1/3.000	5,06-5,02	2,64-2,70
2050	1/3.000	5,32-5,29	2,78-2,25
2075	1/3.000	5,58-5,55	2,86-2,33
2100	1/3.000	5,82-5,79	2,94-2,39

Het voorland is bekleed met staalslakken. Omdat vrijwel geen vlak voorland aanwezig is en de dijk direct overgaat in het Vierhuizergat, wordt het niveau van het voorland gelijk gesteld aan de gemiddelde waterstand laagwaterlijn NAP -1,26 m (conform de schematiseringshandleiding). Het voorland ligt hiermee dus lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgegaan van de minimale waterstand bij de norm en de hierbij berekende maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte.

Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland lager ligt dan het maximale niveau. Golfafslag is dus niet mogelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van golfafslag van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

*Tabel 63
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is*

Zichtjaar	Faalkanseis	h_{min} (m+NAP)	$2_{Hs,max}$ (m)	Maximaal niveau voorland voor oordeel FV (m+NAP)
2023	1/1.000	4,76	4,96	-0,2
2050	1/1.000	5,03	5,02	0,01
2075	1/1.000	5,28	5,24	0,04
2100	1/1.000	5,53	5,38	0,15
2023	1/3.000	5,02	5,28	-0,26
2050	1/3.000	5,29	5,56	-0,27
2075	1/3.000	5,55	5,72	-0,17
2100	1/3.000	5,82	5,88	-0,06

⁹ O.b.v. marginale statistiek

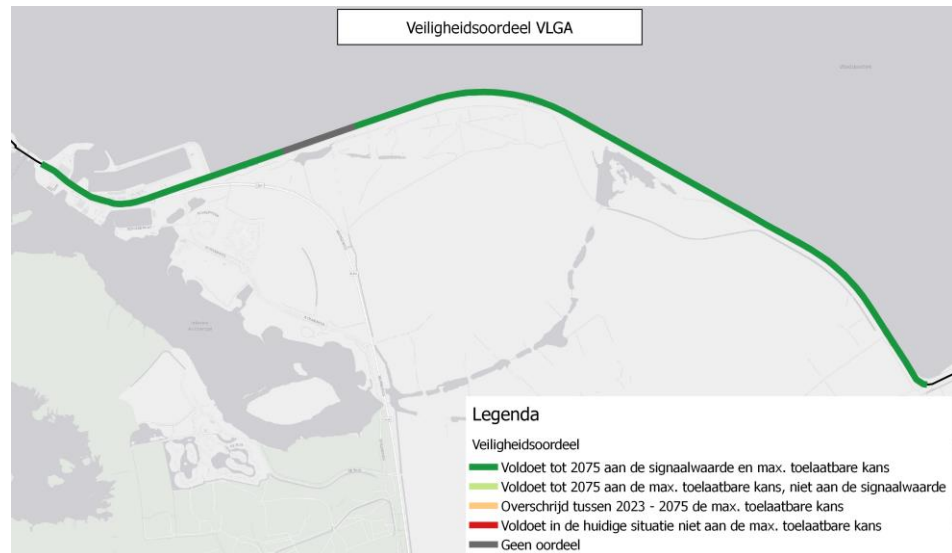
¹⁰ Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden. Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief

3.10.4

Veiligheidsoordeel

Voor de Lauwersmeerdijk is de faalkans in ieder geval tot 2075 verwaarloosbaar klein. Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 zijn geen voorlandlodingen beschikbaar. Daarom is geen oordeel toegekend.

*Figuur 96
Veiligheidsoordeel
VLGA*



3.10.5

Specifieke aanbevelingen

Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 is geen oordeel vanwege ontbrekende data. Gezien voor de naastgelegen vakken de faalkans verwaarloosbaar is, lijkt het reëel te veronderstellen dat de faalkans verwaarloosbaar is. Om dit vast te stellen adviseren we aanvullende lodingen uit te voeren.

3.11

Afschuiving voorland – VLAF

3.11.1

Algemeen

Deze paragraaf beschrijft de totstandkoming van het eindoordeel van de beoordeling voor het beoordelingsspoor afschuiving voorland (VLAF). De beoordeling is begonnen met een eenvoudige beoordeling. Indien nodig is de gedetailleerde toets uitgevoerd.

De uitgangspunten en de vakindeling voor de beoordeling van VLAF zijn gelijk aan die van VLGA en VLZV. Deze zijn daarom terug te vinden in paragraaf 3.10.2 en niet opnieuw beschreven.

3.11.2

Resultaten

De resultaten voor VLAF zijn weergegeven in Tabel 64. De resultaten laten zien de faalkans voor het grootste deel van de Lauwersmeerdijk verwaarloosbaar klein is. Nu en in de toekomst.

Bij het Vierhuizergat kan op basis van eenvoudige toets geen oordeel worden bepaald. Bij het Vierhuizergat moet daarom een gedetailleerde beoordeling worden uitgevoerd. De eenvoudige en gedetailleerde beoordeling is beschreven in deze paragraaf. De beoordeling van de andere vakken is gepresenteerd in Bijlage N.

Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 (Vak 9) zijn geen voorlandlodingen beschikbaar. Voor de naastgelegen vakken is de faalkans verwaarloosbaar. Het lijkt daarom reëel te veronderstellen dat de faalkans hier ook verwaarloosbaar is.

Tabel 64
Resultaten VLAF

Vak	Score VLGA							
	2023		2050		2075		2100	
	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000
1	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
2	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
3	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
4	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
5	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
6	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
7	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
8	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

Eenvoudige beoordeling - Vierhuizergat

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is.

Stap E.1: Afschuiving is schadelijk

Bij deze stap wordt gecontroleerd of het afschuiven schadelijk is. Afschuiven is schadelijk als het afschuifpunt Saf landwaarts ligt van het signaleringspunt Ssign. Omdat de geulrand nagenoeg aan de teen van de dijk ligt, zal Ssign – gelet op de invloedszone – altijd buitenwaarts van Saf. Afschuiving is dus schadelijk.

Stap E.2: Afschuiving is mogelijk

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. Uit de beschikbare ontwerpprofielen blijkt dat de helling tussen geulrand en geulbodem 1:4 is. De gemiddelde helling tussen geulrand en geulbodem is dus steiler dan 1:4,5. Afschuiven is daarom mogelijk. Voor dit vak is, om tot een oordeel te komen, een gedetailleerde toets noodzakelijk.

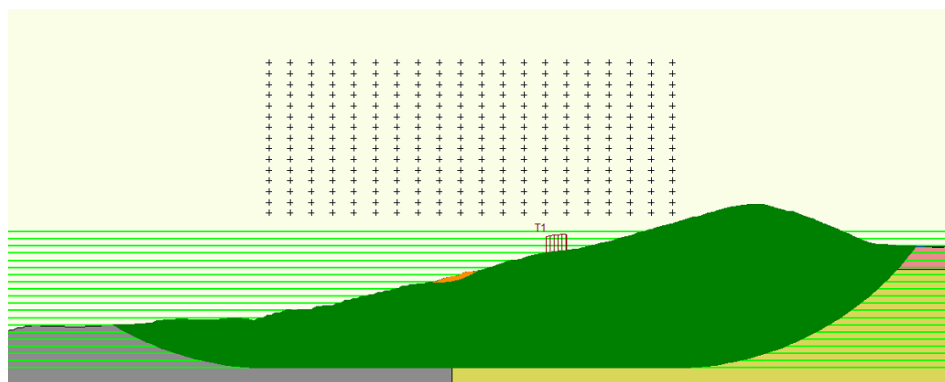
Gedetailleerde beoordeling - Vierhuizergat

De gedetailleerde toets is uitgevoerd met DGeo Stability. De toegepaste uitgangspunten komen overeen met uitgangspunten in het beoordelingsspoor STBU. Hierbij wordt opgemerkt de staalslakken en de bestorting als zand gemodelleerd. Daarnaast zijn specifiek in bij VLAF alleen glijvlakken met een insteek in het voorland meegenomen (insteek van de cirkel ligt zeewaarts van de onderkant van de koperslakblokken).

De werkwijze om de faalkanseis te bepalen waarbij VLAF voldoet aan de norm is beschreven in Bijlage III van de Waterwet (Sterkte en Veiligheid, [RWS – WVL, 2016a]) en de schematiseringshandleiding afschuiving voorlanden [RWS – WVL, 2016e]. De werkwijze in deze twee documenten is niet met elkaar in overeenstemming¹¹. Daarom is in voorliggende analyse in eerste instantie de faalkanseis op doorsnede niveau voor STBU maatgevend gesteld voor VLAF. In geval de veiligheidsfactor gelijk aan of groter is dan 1,15 wordt voldaan aan de norm.

In Figuur 97 laat zien welke delen van het Vierhuizergat niet voldoen aan een veiligheidsfactor van 1,15. Hierin is te zien dat een zeer beperkt deel van het voorland niet voldoet aan de veiligheidsfactor van 1,15 (oranje delen in Figuur 97). Deze glijvlakken zijn maximaal 0,5 m diep. Deze kleine glijvlakken zijn niet schadelijk voor de standzekerheid van de waterkering. Daarmee voldoet afschuiving voorlanden aan de gestelde eisen.

*Figuur 97
Safety overview
afschuiving van het
Vierhuizergat. In de
groene delen is de
SF groter dan 1,15
(eis), in de oranje
delen is de SF
tussen de 1,0 en
1,15. Er zijn alleen
glijvlakken met een
insteek in het
voorland
meegenomen*



3.11.3

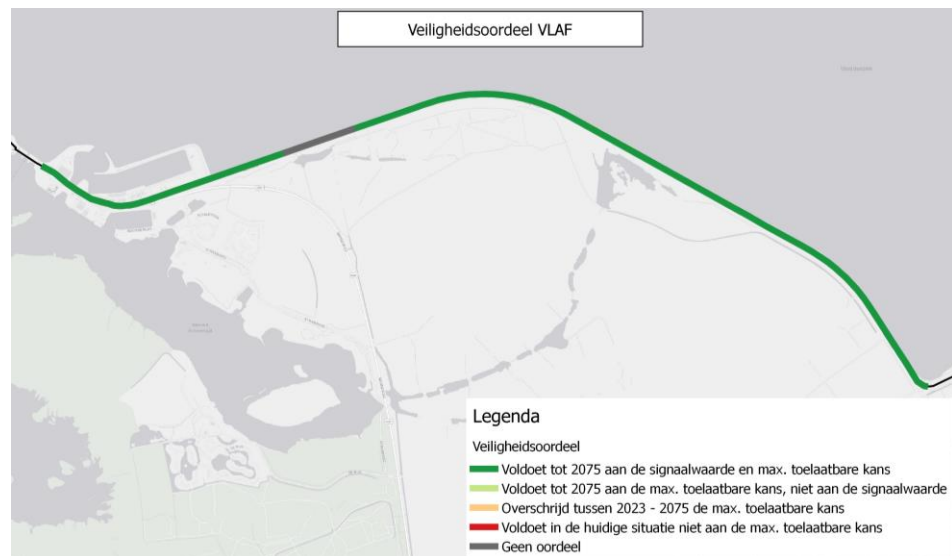
Veiligheidsoordeel

Voor de Lauwersmeerdijk is de faalkans in ieder geval tot 2075 verwaarloosbaar klein.

Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 zijn geen voorlandlodingen beschikbaar. Daarom is geen oordeel toegekend. Gezien voor de naastgelegen vakken de faalkans verwaarloosbaar is, lijkt het reëel te veronderstellen dat de faalkans verwaarloosbaar is. Om dat dit vast te stellen adviseren we aanvullende lodingen uit te voeren.

¹¹ Hierover is met RWS – WVL contact gehad en een vraag ingediend bij Helpdesk Water.

Figuur 98
Veiligheidsoordeel
VLAF



3.11.4

Specifieke aanbevelingen

Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 is geen oordeel vanwege ontbrekende data. Gezien voor de naastgelegen vakken de faalkans verwaarloosbaar is, lijkt het reëel te veronderstellen dat de faalkans verwaarloosbaar is. Om dit vast te stellen adviseren we aanvullende lodingen uit te voeren.

3.12

Zettingsvloeiing voorland – VLZV

3.12.1

Algemeen

Deze paragraaf beschrijft de totstandkoming van het eindoordeel van de beoordeling voor het beoordelingsspoor afschuiving voorland (VLZV). De beoordeling is begonnen met een eenvoudige beoordeling. Indien nodig is de gedetailleerde toets uitgevoerd.

De uitgangspunten en de vakindeling voor de beoordeling van VLZV zijn gelijk aan die van VLGA en VLAF. Deze zijn daarom terug te vinden in paragraaf 3.10.2 en niet opnieuw beschreven.

3.12.2

Resultaten

De resultaten voor VLGA zijn weergegeven in Tabel 60. De resultaten laten zien de faalkans voor het grootste deel van de Lauwersmeerdijk verwaarloosbaar klein is. Nu en in de toekomst.

Bij het Vierhuizergat kan op basis van eenvoudige toets zettingsvloeiing worden uitgesloten omdat de geulrand bestort is. Direct ten oosten van het

Vierhuizergat is een gedetailleerde toets noodzakelijk (Vak 5). Hieruit volgt dat ook dit vak voldoet aan de gestelde eisen.

De gedetailleerde toets van Vak 5 (ten oosten van het Vierhuizergat) is beschreven na Tabel 61 – dit vak heeft van de twee vakken naast het Vierhuizergat de diepste bodemligging. De beoordeling van de andere vakken is gepresenteerd in de Bijlage N.

Tabel 65
Resultaten VLGA

Vak	Score VLGA							
	2023		2050		2075		2100	
	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000
1	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
2	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
3	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
4	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
5	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet	Voldoet
6	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
7	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
8	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

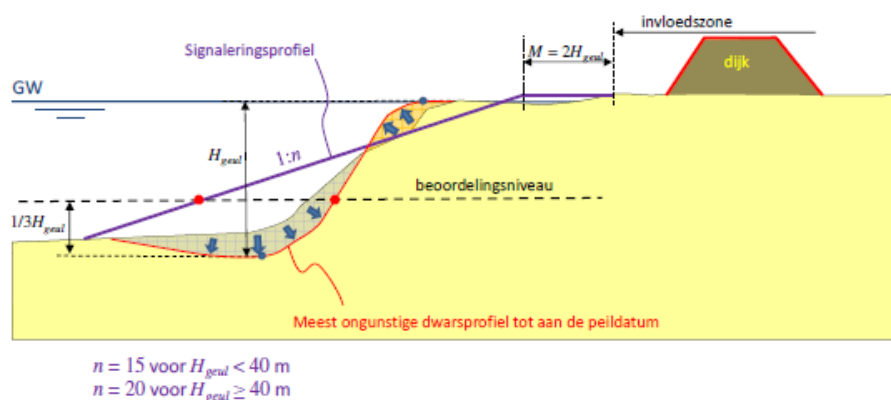
Eenvoudige beoordeling – Vak 5 (ten oosten van het Vierhuizergat)

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium “steilste helling over 5 m” en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1: zettingsvloeiing is schadelijk

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever niet bestort is wordt nagegaan waar het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel (zie Figuur 99) ligt.

*Figuur 99
Schematische
weergave
signaleringsprofiel
zettingsvloeiing
(vooroever niet
bestort)*



Om het snijpunt van het beoordelingsniveau van het rekenprofiel en het signaleringsprofiel te bepalen is de diepte van de geul benodigd. Wanneer wordt uitgegaan van de geulbodem ter hoogte van dp85.5 is de geuldiepte H_{geul} ongeveer 6 m. Het beoordelingsniveau komt hiermee op NAP -4 m te liggen. De invloedszone is gelet op de kruinhoogte (NAP +8 m) en het niveau van de teen (NAP -1 m) ca. 36 m. Samen met de te hanteren marge M (=12 m) komt de rand van het signaleringsprofiel op 48 m vanaf de teen te liggen. Vanaf daar loopt de vooroever onder een helling van 1:15 tot aan de geulbodem. Het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel komt dan landwaarts ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel te liggen. Zettingsvloeiing is dus schadelijk. Voor dit vak wordt de beoordeling voortgezet met stap E.2

Stap E.2: zettingsvloeiing is mogelijk op basis van de steil helling over 5 m
 Stap E.3 van de eenvoudige toetsing mag alleen worden uitgevoerd als de gemiddelde helling van het onderwatertalud over een hoogte van minimaal 5 m flauwer is dan 1:4 3. Het steilste deel van het onderwatertalud bij dp85.5 is 1:8. Daarmee wordt voldaan de eis voor het voortzetten van de eenvoudige toets met Stap E.3.

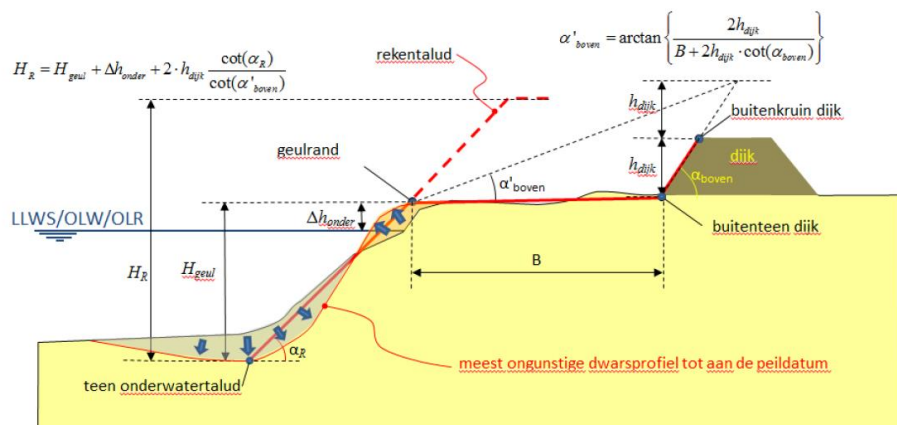
Stap E.3: Optreden is mogelijk op basis van de lokale geometrie
 Zettingsvloeiing kan alleen optreden als verwekings- en/ of bresvloeiing kan optreden.

Bresvloeiing kan alleen optreden als in één of meer zand- en siltlagen van het onbestorte onderwatertalud de taludhelling te steil is. De maximale toegestane lokale helling per diepte-interval is in Tabel 24-1 van Bijlage III van [RWS – WVL, 2016a] gegeven. Omdat wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden van de geometrische toets voor bresvloeiing (maximale hoogte onderwatertalud <40, $d_{50, \text{gemiddeld}} > 0,2$ mm en $d_{15, \text{gemiddeld}} > 0,1$ mm), wordt – gelet op de maximale helling van het onderwatertalud (1:9) – de maximale toelaatbare helling niet overschreden. Bresvloeiing kan niet optreden.

Verwekingsvloeïing kan optreden als over de rekenhoogte H_R geldt dat $\cot \alpha_R \leq 7 \left(\frac{H_R}{24} \right)^{\frac{1}{3}}$. Voor de definities van H_R en de rekentaludhelling a_R wordt verwezen naar Figuur 100. Voor a_R wordt het steilste deel van het onderwatertalud gebruikt ($\cot a_R$ is dus 8). Omdat er vrijwel geen vlak voorland aanwezig is, wordt het niveau van de geulrand gelijk gesteld aan de laagwaterlijn. Hierdoor is Δh_{onder} 0,16 m

Omdat B gelijk is aan 0 m is a_{boven} gelijk aan a'_{boven} ($\cot a'_{boven}$ is dus 4). Gelet op de waarden voor a_R , Δh_{onder} , en a'_{boven} wordt, uitgaande van een H_{geul} van 6 m en een h_{dijk} van 9 m, een H_R van circa 42 m gevonden. Gelet op de rekenhoogte mag $\cot(a_R)$ niet kleiner zijn dan 8,45. Omdat de rekentaludhelling steiler is kan verwekingsvloeïing optreden. Een gedetailleerde toets is dus noodzakelijk om tot een oordeel voor het toetsspoor VLZV te komen.

Figuur 100
Signaleringsprofiel
vs. rekenprofiel

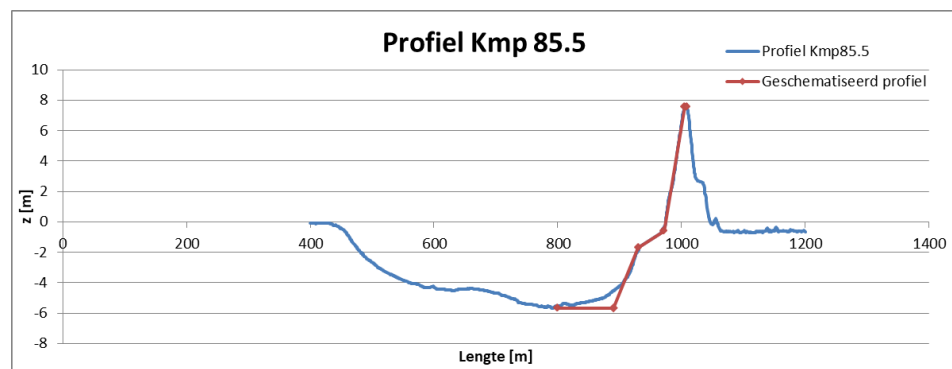


Gedetailleerde beoordeling – Vak 5 (ten oosten van het Vierhuizergat)

De gedetailleerde beoordeling uitgevoerd conform Bijlage III [RWS – WVL, 2016a] en de schematiseringshandleiding zettingsvloeïing [RWS – WVL, 2016f]. Daarbij is gebruik gemaakt van de software D-Flow Slide versie 16.1.1.4981.

Gelijk aan de eenvoudige beoordeling is de geometrie bij dijkpaal Kmp 85.5 maatgevend voor dijkvak 5. Dit profiel is voor de invoer voor de software vereenvoudigd tot een aantal karakteristieke punten. Het werkelijke en geschematiseerde profiel zijn weergegeven in Figuur 104. De karakteristieke punten van het geschematiseerde profiel zijn weergegeven in Tabel 68. De start van de bodem van de geul is zo gekozen dat een steil ontstaat. Dit is een veilige schematisatie. De invloedszone van de dijk loopt tot 36m voor de buitenteen, zoals al beschreven in de eenvoudige beoordeling. Als waterstand is NAP -1,42 m toegepast, horend bij laagwater springtij (zie ook paragraaf 2.2.8).

*Figuur 101
Profiel bij dijkpaal
85.5 en het
geschematiseerde
profiel voor de
software invoer*



*Tabel 66
Karakteristieke
punten
geschematiseerd
profiel dijkpaal 85.5*

Karakteristiek punt	L [m]	z [NAP+m]
Bottom river channel	800	-5,65
Bottom river channel	890	-5,65
Insert river channel	930	-1,70
Dike toe at river	972	-0,60
Dike top at river	1005	7,60
Dike top at polder	1009	7,60

Over het grootste deel van dijkvak 5 komt ondergrondscenario 6025_1b2 voor, waarin het Holocene alleen bestaat uit H_Mg_zk (zand gelaagd met klei – zie ook paragraaf 2.3). Doordat in dit scenario alleen zandige grond voorkomt, is dit ook het maatgevende scenario. Dit scenario is daarom gebruikt voor de beoordeling. Het dijklichaam bestaat uit zandig dijksmateriaal.

Voor het inschatten van de korrelgrootte van het zand is gebruikgemaakt van de defaultwaarden van d_{70} , beschikbaar in SOS. De d_{70} wordt normaal gesproken gebruikt voor de beoordeling STPH. De gebruikte waarde is bepaald uit het lokaal grondonderzoek. Hieruit volgt een waarde van 0,15 mm. Op deze waarde is een VC van 12%, de rekenwaarde voor VLZV wordt daarmee 0,13 mm (we merken op dat deze waarde gelijk is aan standaardwaarde voor d_{70} voor H_Mg_zk in het SOS-segment ter plaatse van Vak 5). Met behulp van een uniformiteitscoëfficiënt $U=1,5$ (conform de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing [RWS – WVL, 2016f]) zijn de d_{15} en d_{50} geschat op respectievelijk 0,85 mm en 0,12 mm¹².

De waarde voor de state parameter (ψ_{5m}) is lastig te bepalen zonder uitgebreid grondonderzoek. De schematiseringshandleiding zettingsvloeiing geeft aan dat een waarde van 0,1 voor zand een veilige waarde is [RWS – WVL, 2016f]. Voor zand gelaagd met klei, waar in dijkvak 5 sprake van is, is deze waarde lager (wat resulteert in een gunstiger oordeel). In de

¹² De gevoeligheid van deze schatting is echter onderzocht door gebruik te maken van een brede range in waardes. Dit blijkt voor vak 5 geen significant effect te hebben op de resulterende faalkans.

beoordeling is conform de schematiseringhandleiding een veilige waarde van 0,1 toegepast.

Voor de factor voor cohesieve lagen ($F_{\text{cohesivelayers}}$) is een waarde van 1 gebruikt, die volgens de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing [RWS – WVL, 2016f] past bij zand met een beperkt aantal kleilaagjes.

In de gedetailleerde beoordeling is voorgeschreven rekening te houden met morfodynamiek. In deze beoordeling is verondersteld dat geen sprake is van significante morfodynamische veranderingen. De software kan echter niet rekenen met een migratiesnelheid van het voorland van 0 m/jaar. Daarom is een lage waarde van 0,0001 m/jaar gebruikt.

De resulterende faalkans berekend met D-Flow slide is $8,7 \text{ E-}07$. De faalkanseis is bepaald met behulp van Bijlage III Sterkte en Veiligheid [RWS – WVL, 2016a]:

$$P_{\text{eis,vak}} = P_{\text{voorland}} * L_{\text{vak}} / 1\text{km}$$

Waarin:

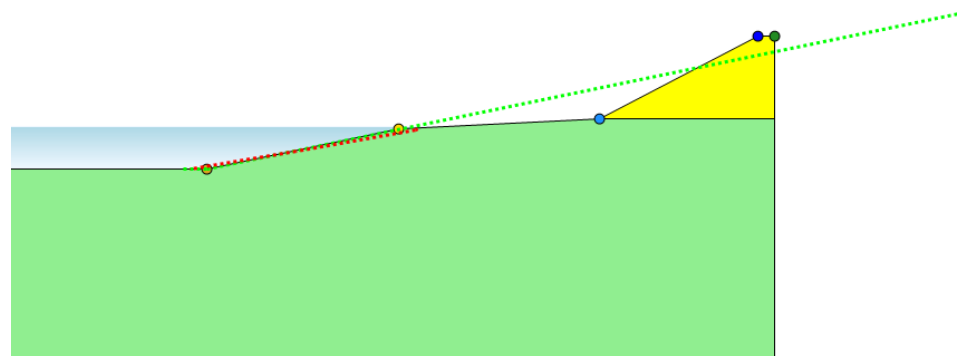
P_{voorland}	Kans van optreden van voorlandmechanisme waarbij de bijdrage nog juist aan de overstromingskans verwaarloosbaar wordt geacht. $P_{\text{voorland}} = 0,01$
$P_{\text{eis,vak}}$	Faalkanseis per vak
L_{vak}	Lengte van het vak [km]

Met een dijkvaklengte van 600m voor vak 5 is de faalkanseis $6,0 \text{ E-}03$. De berekende faalkans voldoet ruim aan de faalkanseis. Samenvattend zijn de kansen weergegeven in Tabel 67. Het resterend profiel na zettingsvloeiing is weergegeven in Figuur 102.

*Tabel 67
Faalkans en
faalkanseis VLZV
dijkvak 5*

Dijkvak	Faalkans	Faalkanseis ($6,0\text{E-}03$)
Vak 5	$8,7 \text{ E-}07$	Voldoet

*Figuur 102
Resterend profiel na
zettingsvloeiing (in
rood)*



Bij klimaatverandering wordt het springtij laag water hoger. Dit heeft een positieve invloed op het oordeel voor zettingsvloeiing. Daarnaast veranderd

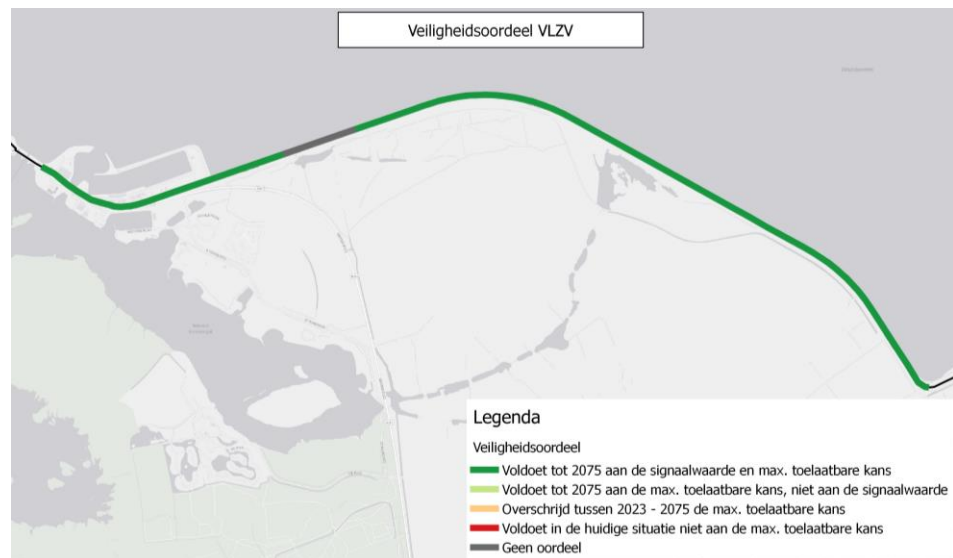
het waterstandsverschil bij de val naar laag water niet. Zettingsvloeiing is in de toekomst daarom ook niet relevant.

3.12.3

Veiligheidsoordeel

Voor de Lauwersmeerdijk is de faalkans in ieder geval tot 2075 verwaarloosbaar klein. Voor het dijkvak ten oosten van het Vierhuizergat is een gedetailleerde beoordeling uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de faalkans gelijk is aan $8,7 \cdot 10^{-7}$. Daarmee wordt voldaan aan de eisen is de bijdrage van VLZV aan de faalkans ook voor het dijkvak ten oosten van het Vierhuizergat verwaarloosbaar.

Figuur 103
Veiligheidsoordeel
VLZV



3.12.4

Specifieke aanbevelingen

Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 is geen oordeel vanwege ontbrekende data. Gezien voor de naastgelegen vakken de faalkans verwaarloosbaar is, lijkt het reëel te veronderstellen dat de faalkans verwaarloosbaar is. Om dit vast te stellen adviseren we aanvullende lodingen uit te voeren.

3.13

Niet waterkerende objecten - NWO

3.13.1

Algemeen

Niet waterkerende objecten (NWO's) kunnen negatieve invloed hebben op het veiligheidsoordeel van de waterkering. Het betreft echter een indirect faalmechanisme. In die lijn is het beoordelen van een bepaalde NWO pas noodzakelijk als deze invloed kan hebben op het eindoordeel. Dit is alleen het geval wanneer er uit het directe faalmechanisme volgt dat het betreffende spoor voldoet.

Binnen WBI2017 wordt onderscheidt gemaakt in de volgende typen NWO's:

1. Bebouwing (NWObe);
2. Begroeiingen (NWObo);
3. Kabels en leidingen (NWOkl);
 - a. Waterleiding
 - b. Gasleiding
4. Overige constructies (NWOoc)

3.13.2

Bebouwing

Voorals langs het westelijk deel van de Lauwersmeerdijk, bij de haven, is bebouwing aan de dijkteen aanwezig. Daarnaast is bij dijkpaal 82.0 een dijkopslag (depot) aanwezig. In het beoordelingsspoor NWObe is het effect van deze bebouwing niet nader in beeld gebracht. Dit omdat het positieve effect van de bebouwing en verharding is in de basis situatie niet in beeld is gebracht. Het negatieve effect van de bebouwing is daarom niet additioneel geanalyseerd.

3.13.3

Begroeiing

Langs nagenoeg het hele traject van de Lauwersmeerdijk is begroeiing aanwezig. Dit betreft vooral strijkgewas. Deze struiken zijn lager dan 5,0 m. Op basis van de eenvoudige toets (E2.4.1.) is de faalkans voor de begroeiing verwaarloosbaar.

*Figuur 104
Begroeiing bij de
Lauwersmeerdijk*



3.13.4

Kabel en Leidingen

Specifieke uitgangspunten

In geval van kabels in de kernzone, wordt ervan uitgegaan dat deze zonder mantelbuis zijn aangelegd, tenzij specifiek vermeld.

Uit bronnen aangeleverd door NZV zijn onderstaande relevante¹³ kabels en leidingen geïnventariseerd. Tabel 68 toont het overzicht van deze gegevens.

¹³ Kabels zonder mantelbuis zijn hierin buiten beschouwing gelaten. Conform WBI2017 hebben deze een verwaarloosbare invloed op het veiligheidsoordeel

Tabel 68
Overzicht gegevens
relevante leidingen

Naam	Beheerder	Type	Materiaal	Diameter (mm)	Druk (MPa)	Bronnen
Gas_ENE	Enexis	Gas	Kunststof	110mm	0,4	[MUG, 2018a] [NZV, 2018b]
Water	Waterbedrijf Groningen	Water	Asbest-cement	200mm	0,35	[MUG, 2018a] [NZV, 2018a]
Gas_NAM	NAM	Gas	Staal	273mm	12,5	[MUG, 2018a] [Tebodin, 2007]
Riolering	n.n.b.	Afval-water	n.n.b.	n.n.b.	n.n.b.	[MUG, 2018a]

Relevantie

Zoals te zien in Figuur 105 doorkruisen alle leidingen de dijk nabij de haven. Daarnaast loopt ook de gasleiding van Enexis over vrijwel het gehele traject langs de dijk op een afstand van ca. 20m vanaf de binnenteen. Dit ligt binnen de gestelde veiligheidszone (4x kerende hoogte). Hieruit kan geconcludeerd worden dat alle leidingen relevant zijn en daarom beoordeeld dienen te worden.

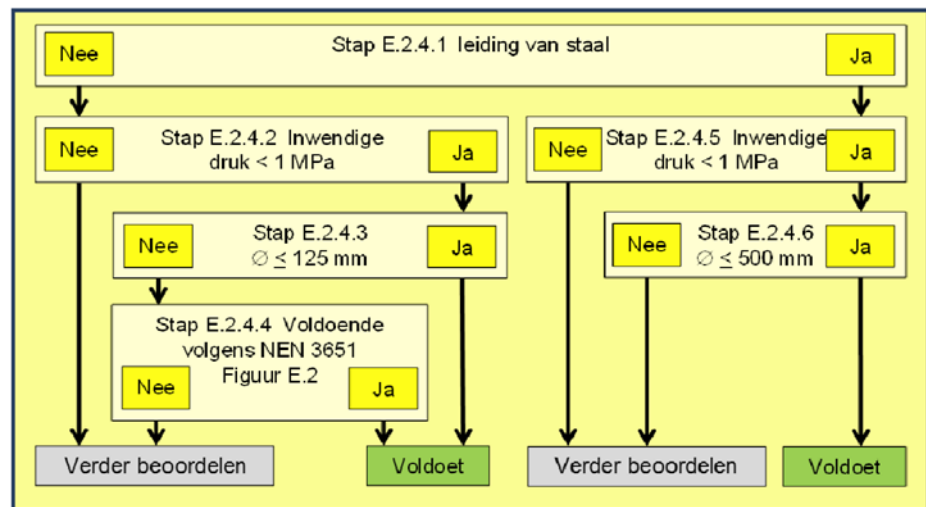
Figuur 105
Ligging NWOKI nabij
havengebied



Eenvoudige beoordeling

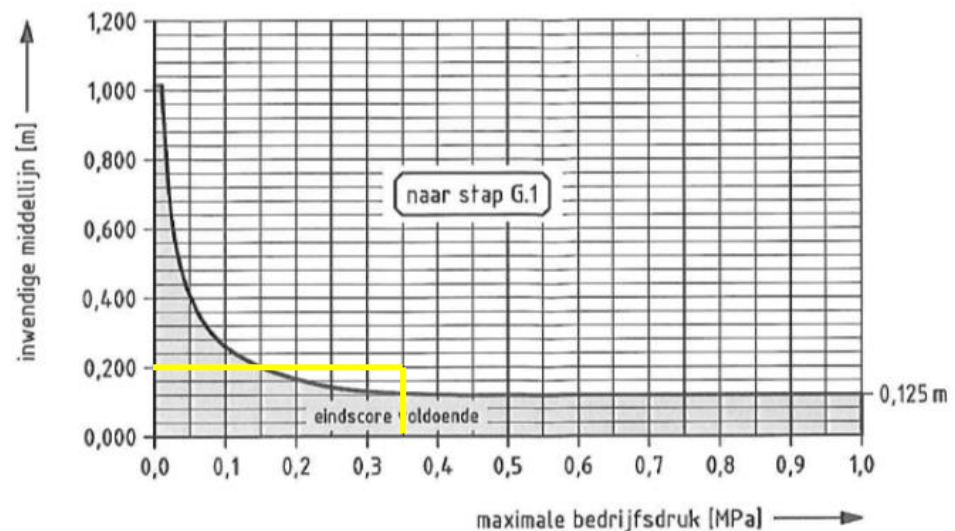
De eenvoudige beoordeling, conform WBI2017 is in onderstaande figuur weergegeven.

*Figuur 106
Eenvoudige
beoordeling NWO's*



Stap 2.4.4 verwijst naar de NEN 3651, specifiek naar Figuur 107. Deze is relevant voor de waterleiding van Waterbedrijf Groningen. In de figuur zijn de resultaten van deze leiding weergegeven.

*Figuur 107
Beoordeling middel-
lijn-drukcombinatie
lagedrukleidingen uit
NEN3651-2012
(figuur E.2)*



Voor de relevante leidingen zijn alle stappen uit Figuur 107 uitgevoerd. Onderstaande tabel toont de resultaten.

*Tabel 69
Resultaten relevante
leidingen*

Naam	E.2.4.1	E.2.4.2	E.2.4.3	E.2.4.4	E.2.4.5	E.2.4.6	Oordeel
Gas_ENE	nee	ja	ja	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	Voldoet
Water	nee	ja	nee	nee	n.v.t.	n.v.t.	Verder beoordelen
Gas_NAM	ja	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	nee	n.v.t.	Verder beoordelen
Riolering	n.n.b.	n.n.b.	n.n.b.	n.n.b.	n.n.b.	n.n.b.	n.n.b.

Gedetailleerde beoordeling

Gasleiding, NAM

Uit de gedetailleerde toets blijkt dat de sterkte van de gasleiding moet worden bepaald conform de NEN3651. Deze herberekening komt neer op het 'herontwerpen' van de bestaande situatie waarin zettingen meegenomen dienen te worden.

Aangezien het ontwerp uit 2007 met dezelfde NEN-norm is uitgevoerd is het ontwerp als beoordeling te beschouwen¹⁴. Daarmee krijgt de leiding een voldoende oordeel.

Waterleiding, Waterbedrijf Groningen

De gedetailleerde toets binnen het WBI2017 verwijst naar de NEN3651, waarin een wijze beschreven staat hoe asbestleidingen getoetst kunnen worden. Deze is echter onvolledig in beschrijving (in de NEN zelf), complex en vereist veel extra informatie die niet beschikbaar is.

Daarnaast lijkt het Waterbedrijf Groningen geen goed beeld te hebben van de staat van de huidige waterleidingen. Ervaring van andere dijkversterkingen toont aan dat juist tijdens uitvoering risico op schade door trillingen en zettingen vergroot. Daarom adviseren we vervanging van de leiding als meekoppelkans binnen de dijkversterking te overwegen. Het Waterschap Noorderzijlvest heeft aangegeven in gesprek te zijn met de leidingeigenaar.

Drukriolering

Voor de druk riool leiding is onvoldoende informatie over beschikbaar om zowel een eenvoudige als gedetailleerde beoordeling te kunnen uitvoeren. Deze is niet verder beoordeeld

3.13.5

Overige constructies

Conform het WBI2017 worden de aanwezige kleine objecten, zoals taludtrappen, bankjes, etc. niet beoordeeld. Langs de lauwersmeerdijk zijn geen andere relevante NWO's aanwezig (die vallen onder overige constructies).

¹⁴ In samenspraak met de beheerder besloten

4 Havendam – HAV

Om de haven liggen strekdammen om de golfhoogte in de haven te reduceren. Deze dammen zijn aangelegd met het oog op de scheepvaart, maar ze reduceren de golfhoogte ook tijdens maatgevende omstandigheden voor de Lauwersmeerdijk (de primaire waterkering). Hierdoor leveren ze ook een bijdrage aan de waterveiligheidsstatus van de Lauwersmeerdijk. De westelijke havendam is opgenomen in de legger van Waterschap Noorderzijlvest, maar maakt geen deel uit van het stelsel van primaire waterkeringen (bij doorbraak volgt immers geen overstroming).

In dit hoofdstuk is de faalkans van de havendam en de bijdrage aan de waterveiligheidssituatie van de primaire kering (de Lauwersmeerdijk) nader in beeld gebracht. Bij de beoordeling ligt de focus op de westelijke havendam omdat deze is opgenomen in de legger van Waterschap Noorderzijlvest.

De beoordeling bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Beoordeling van de havendam voor de directe faalmechanismen macrostabiliteit (paragraaf 4.1), steenbekleding buitenzijde (paragraaf 4.2), grasbekleding (paragraaf 4.3) en de indirecte faalmechanismen (paragraaf 4.4)¹⁵.
2. Beschouwing van het effect van de havendam op de veiligheidsbeoordeling van de primaire waterkering (paragraaf 4.5).
3. Veiligheidsoordeel van de havendam (paragraaf 4.6).

4.1 Macrostabiliteit (STBI & STBU)

4.1.1 Algemeen

Deze paragraaf presenteert de beoordeling van de havendam voor de faalmechanismen stabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts. Gezien bij de havendam aan twee zijden waterstaat bestaat de belastingsituatie voor zowel de binnenzijde als de buitenzijde uit een val van hoog- naar laagwater, waardoor instabiliteit kan optreden. De beoordeling op binnenwaartse en buitenwaartse macrostabiliteit van de havendam vindt plaats volgens het toetsspoor STBU (Bijlage III Sterkte en Veiligheid, RWS – WVL [2017a]). De uitgangspunten voor de beoordeling van de havendam zijn grotendeels gelijk aan de beoordeling van STBU van de primaire waterkering (paragraaf 3.2). De belangrijkste uitgangspunten in de beoordeling van de havendam en wijzigingen van de uitgangspunten t.o.v. de beoordeling van de primaire kering zijn weergegeven in paragraaf 4.1.2.

¹⁵ Niet alle faalmechanismen zijn bij de beoordeling van de havendam relevant omdat aan beide kanten van de havendam water staat (bijv. piping). Zie hoofdstuk 26 in Bijlage III van het WBI (RWS – WVL, 2017a).

Vakindeling

Figuur 108 toont een overzichtstekening van de havendam. Er zijn 22 dwarsprofielen gegenereerd: 1 t/m 22. In het meest westelijke deel van de havendam, profielen 1 t/m 6, maakt de dam deel uit van de waterkering. Deze dwarsprofielen maken deel uit van de primaire kering en zijn meegenomen in de beoordeling van STBU voor de primaire kering (dijkvak 1.1, zie Figuur 44). De beoordeling van de stabiliteit van de havendam loopt daarom van het restaurant 'Waddengenot aan Zee' tot aan het de punt van de havendam bij de haveningang (profielen 6 t/m 22).

Voor de ondergrondschematisatie zijn twee sonderingen beschikbaar: DKMP90622 en DKMP90532. De vakindeling voor de havendam is gebaseerd op deze twee sondering: in vak 1 is gebaseerd op sondering DKMP90622 en in vak 2 op DKMP90532. De profielen worden aan een sondering toegewezen op basis van afstand: de profielen bij DKMP90622 liggen horen bij vak 1 en profielen bij DKMP90532 liggen bij vak 2. De helling van het buitentalud en de hydraulische belasting (de waterstand) is nagenoeg gelijk langs de havendam. Daarom zijn geen aanvullende criteria gebruikt om de vakindeling op te delen. De vakindeling is weergegeven in Figuur 108 en in Tabel 70.

*Figuur 108
Vakindeling
havendam*



*Tabel 70
Vakindeling
havendam*

Vak	Profielen
Vak 1	6 - 15
Vak 2	15 - 22

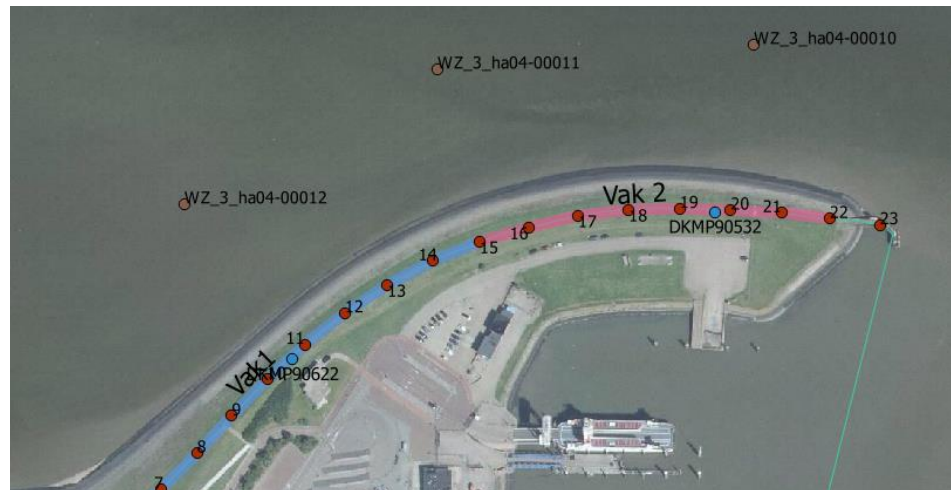
Waterstand bij de norm

De waterstand bij de norm (signaalwaarde) is bepaald bij drie WBI-uitvoerlocaties. Deze zijn weergegeven als bruine punten in de overzichtskaart van Figuur 109. In Tabel 71 is weergegeven welke profielen bij welke uitvoerlocatie horen op basis van afstand, en in welk vak de uitvoerlocatie geldig is. Daarnaast is voor elke uitvoerlocatie de waterstand bij de norm weergegeven. Voor beide vakken wordt als maatgevende waterstand gekozen voor de hoogste waterstand bij de norm die in het vak voorkomt. Voor beide vakken is dit 4,99m+NAP.

Tabel 71
WBI-uitvoerlocaties
voor verschillende
profielen

Locatie	MHW (signaalwaarde) [m+NAP]	Profielen	Vak
WZ_3_ha04-0012	4,98	6 - 13	1
WZ_3_ha04-0011	4,99	14 - 17	1-2
WZ_3_ha04-0010	4,99	18 - 22	2

Figuur 109
WBI-uitvoerlocaties
hydraulische
randvoorwaarden bij
de havendam

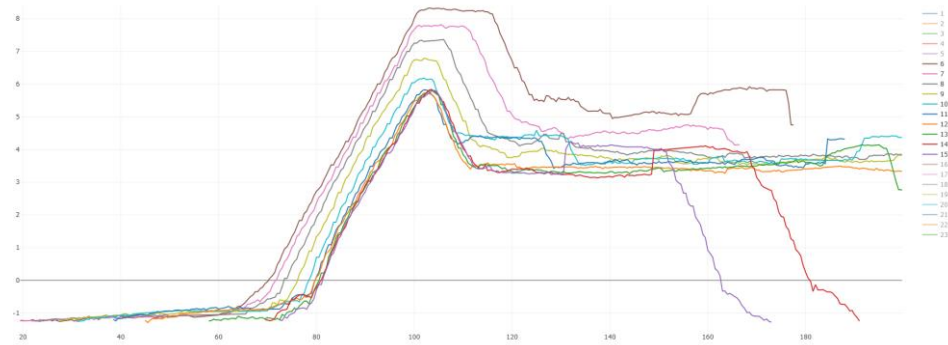


Geometrie

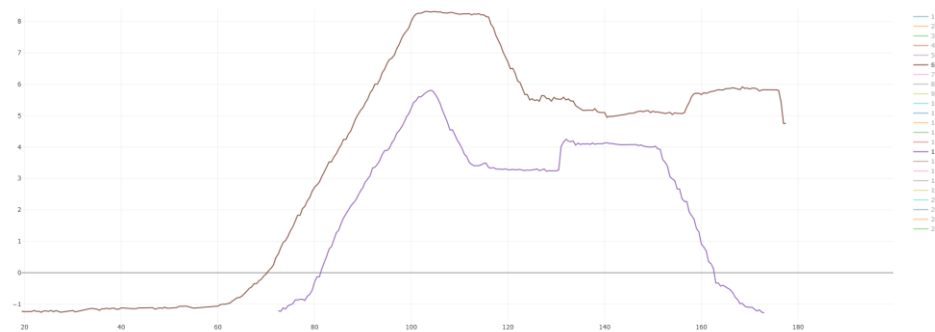
In Figuur 110 zijn de profielen van vak 1 (6 t/m 15) weergegeven. Er valt op dat er veel verloop is in hoogte, de kruinhoogte wordt alsmaar lager in noordoostelijke richting. Daarnaast wordt ook het hoge terrein achter de dam steeds minder breed. Voor macrostabiliteit aan de buitenzijde is profiel 6 (bruine profiel) maatgevend, omdat dit profiel het hoogste verschil heeft in kruinhoogte en buitendijks maaiveld. Aan de binnenzijde is macrostabiliteit echter verwaarloosbaar voor profiel 6, omdat de breedte van het hoge terrein achter de kering enkele honderden meters bedraagt. Om tot falen te leiden zou er dus een glijcirkel van enkele honderden meters lang nodig zijn. Dit wordt als onrealistisch ingeschat. Voor macrostabiliteit aan de binnenzijde is daarom profiel 15 maatgevend voor vak 1, omdat het hoge terrein achter de havendam in dit profiel het smalst is. Profiel 6 en 15 zijn weergegeven in Figuur 111.

We merken op dat de profielen zijn gebaseerd op AHN2. Er zijn dus geen meetpunten op de havenbodem en de zeebodem buitendijks. Deze liggen respectievelijk op NAP -6 m en NAP -5 m. De profielen zijn verlengd tot aan deze dieptes onder een 1:3 talud.

*Figuur 110
Alle profielen binnen
vak 1*

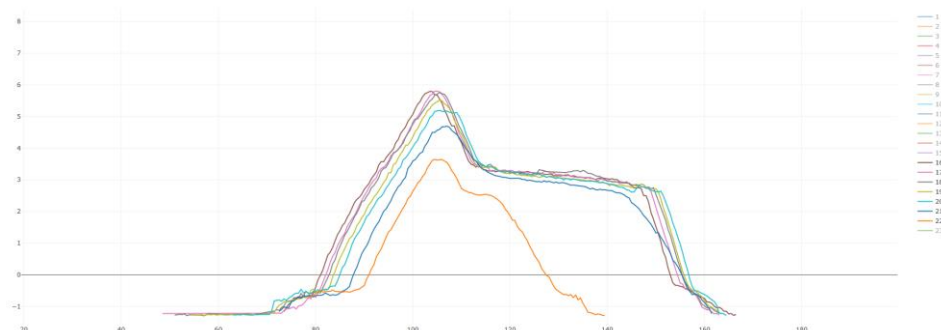


*Figuur 111
Profiel 6 (bruin) en
profiel 15 (paars)*

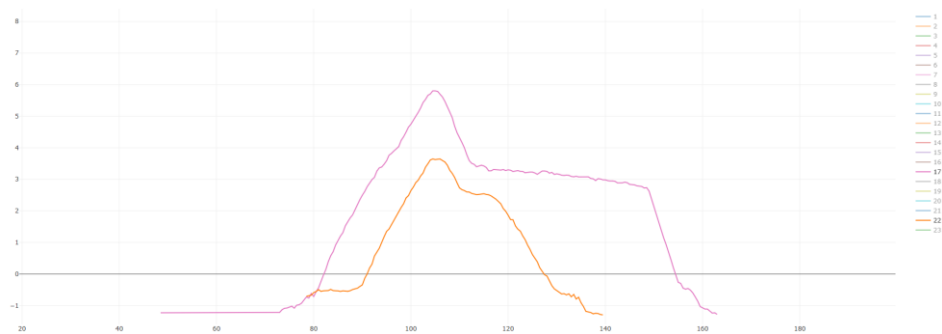


In Figuur 112 zijn de profielen van vak 2 (16 t/m 22) weergegeven. Het valt op dat er minder verloop is in geometrie dan in vak 1. Profiel 17 (roze) heeft de hoogste kruin en een relatief steil binnen- en buitentalud, en is daarom maatgevend voor vak 2. Verder valt profiel 22 (oranje) op. Dit ligt helemaal op de punt van de havendam en is een soort overgangsprofiel van de havendam naar vlak maaiveld (waar geen havendam meer aanwezig is). Het profiel heeft een lage kruinhoogte, maar door de beperkte breedte van het hoge terrein achter de dam kan het maatgevend zijn voor macro-stabiliteit aan de binnenzijde. Daarom worden profiel 17 en profiel 22 beide gebruikt in de beoordeling. Deze profielen zijn weergegeven in Figuur 113. Verder geldt dat de profielen weer verlengd zijn tot NAP -6 m aan de binnenzijde en NAP -5 m aan de buitenzijde onder een 1:3 talud.

*Figuur 112
Alle profielen binnen
vak 2*



Figuur 113
Profiel 17 (roze) en
profiel 22 (oranje)



Opbouw havendam & Grondparameters

De opbouw van de kern van de havendam en de grondparameters zijn gelijk aangenomen als in de beoordeling van de primaire waterkering, zie paragraaf 3.1.2.

Grondopbouw

Zoals eerder vermeld, is de grondopbouw per vak gebaseerd op één sondering. In Bijlage Q is de interpretatie van deze sonderingen en een koppeling naar SOS eenheden beschreven. De grondopbouw per vak die gebruikt wordt voor de beoordeling is weergegeven in Tabel 72 en Tabel 73.

Tabel 72
Grondopbouw vak 1

Laagnummer	Eenheid	Niveau bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
1	H_Mg_zk	0	
2	H_Mkw_z&k	-7,5	
3	P_Ova_sd	-11	
4	P_Rg_zm	-20	

Tabel 73
Grondopbouw vak 2

Laagnummer	Eenheid	Niveau bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
1	H_Mp_k	1,75	
2	H_Mg_zk	1,25	
3	H_Mkw_z&k	-7,5	
4	H_Vbv_v	-12,25	
5	P_Ova_sd	-12,75	
6	P_Rg_zm	-22	

Waterspanningen

De waterspanningen zijn in grote lijnen identiek aan toetsspoor STBU, zie paragraaf 3.2.2.

De enige aanpassing is de freatische lijn aan de binnenzijde. Deze ligt in het dijklichaam op 1m beneden MHW, net als aan de buitenzijde. Van hier volgt de freatische lijn het binnentalud tot aan de waterstand in de haven na de val naar laagwater van NAP-1,42 m). Er is hier dus geen rekening gehouden met eventuele bekleding op de havendam, zoals bij STBU, omdat geen harde bekleding op de binnenzijde aanwezig is. Vanwege aanwezigheid van de steenzetting (inclusief onderlagen) is de freatische lijn aan de een afstand van 0,30m tot het oppervlak aangehouden (gelijk aan de primaire waterkering).

Verkeersbelasting

Bij STBU van de havendam is sprake van een verkeersbelasting van 6 kN/m² op de kruin, veroorzaakt door inspectievoertuigen na hoogwater. Bij het toetsen van macrostabiliteit aan de binnenzijde is deze belasting zoveel mogelijk aan de binnenzijde van de kruin geplaatst en bij toetsen aan de buitenzijde zoveel mogelijk aan de buitenzijde van de kruin.

Maatgevend glijvlak (faaldefinitie)

Omdat de buitenzijde van de havendam direct bloot staat aan golfaanval kan elk glijvlak dat de bekleding doorsnijdt leiden tot falen. De gevonden glijvlakken moeten daarom in ieder geval de bekleding op het buitentalud doorsneden. Aan de binnenzijde is er echter voor de meeste profielen over een breed hooggelegen terrein aanwezig achter de dam. Een afschuiving van dit terrein zal niet tot falen van de havendam. Daarom zijn voor het toetsen aan de binnenzijde alleen glijcirkels die het talud van de havendam zelf doorsnijden als maatgevend beschouwd.

4.1.3

Resultaten gedetailleerde beoordeling

De gedetailleerde beoordeling is uitgevoerd met de software D-GeoStability versie 18.1. Hierin is het LiftVan glijvlak model gebruikt.

Resultaten per vak

De resultaten van de gedetailleerde beoordeling zijn weergegeven in Tabel 74 en Figuur 115.

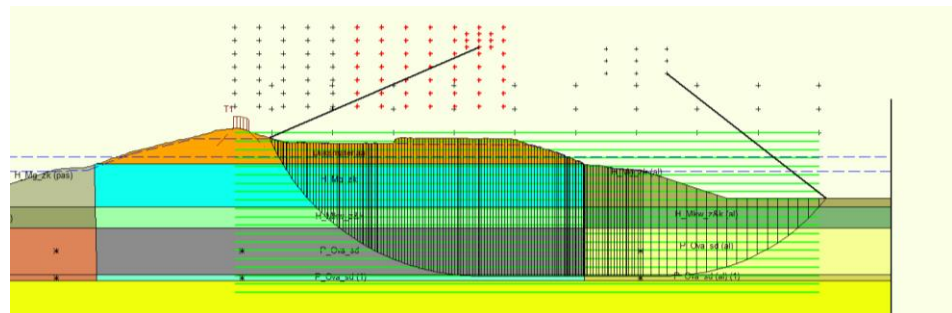
Tabel 74
Resultaten
gedetailleerde
beoordeling

Vak	Profiel	Buitenwaars/binnenwaarts	SF	Faalkans
Vak 1	6	Binnenwaarts	-	-
		Buitenwaarts	0,85	4,5 E-03
	15	Binnenwaarts	1,22	3,9 E-07
		Buitenwaarts	0,85	4,5 E-03
Vak 2	17	Binnenwaarts	1,08	2,5 E-05
		Buitenwaarts	0,90	1,7 E-03
	22	Binnenwaarts	0,96	4,8 E-04
		Buitenwaarts	1,14	4,6 E-06

Bij de resultaten merken wij het volgende op:

- De faalkans voor de stabiliteit aan de buitenzijde is een factor 10 – 1.000 keer groter dan de faalkans aan de binnenzijde. Dit omdat aan de binnenzijde hooggelegen haventerreinen aanwezig zijn.
- Voor het grootste deel van de havendam varieert de faalkans voor de buitenwaartse stabiliteit tussen de 1/100 tot 1/1.000 per jaar. Op het einde van de havendam, waar de hoogte lager is, is de faalkans het kleinst.
- Voor de binnenwaartse stabiliteit varieert de faalkans tussen de 1/10.000 en 1/1.000.000 per jaar. Dit omdat sprake is van zeer brede haventerreinen achter de havendam. Om tot falen te komen moet de afschuiving erg groot zijn van omvang, de kans hierop is erg klein. Op het einde van de havendam ontbreekt het hoge haventerrein, de faalkans is hier hoger dan gemiddeld (ongeveer 1/2.000 per jaar). Bij profiel 6 (nabij het restaurant) is stabiliteit in binnenwaartse richting niet beoordeeld, omdat het hoge terrein hier enkele honderden meters breed is. De faalkans is hier als verwaarloosbaar aangenomen.
- Veel glijcirkels doorsnijden de laag P_Ova_sd voor een groot deel, zie Figuur 114. Dit is een samengedrukte Pleistocene kleilaag, die normaal gesproken erg stevig is. De schematiseringshandleiding macrostabiliteit geeft geen POP waarde voor deze laag. Net als in de veiligheidsbeoordeling van de primaire kering is de sterkte veilig is ingeschat. De POP is aangenomen op 15 kN/m² en voor de sterkte S is de ondergrenswaarde van 0,22 aangehouden. Het waarschijnlijk is de sterkte van deze laag in werkelijkheid groter.

*Figuur 114
Maatgevende
glijcirkel profiel 15
binnenwaarts. De
glijcirkel gaat door
de laag P_Ova_sd.*



4.1.4

Faalkans voor stabiliteit

Gezien de havendam geen primaire waterkering is, heeft deze geen wettelijke norm. De bijdrage van de havendam aan de waterveiligheid is beschreven in paragraaf 4.5. De faalkans voor macrostabiliteit is weergegeven in Figuur 115. Voor het grootste deel van de havendam varieert de faalkans voor de buitenwaartse stabiliteit tussen de 1/100 tot 1/1.000 per jaar. Dit is ongeveer gelijk aan de faalkans van de primaire waterkering ter hoogte van de Cleverlingsluizen (deze is 1/300 per jaar, zie de meest linkse locatie in Figuur 115).

*Figuur 115
Faalkans van de
havendam voor
stabiliteit bij de
verschillende
profielen 22, 17, 15
en 6 (van rechts
naar links). De
meest linkse locatie
geeft faalkans van
de primaire
waterkering voor
STBU weer (Vak 1.1)*



4.1.5

Specifieke aanbevelingen

Zoals eerder vermeld doorsnijdt de maatgevende glijcirkel voor bijna alle profielen voor een groot deel de laag P_Ova_sd. Voor deze laag is een conservatieve lage sterkte aangenomen. Het wordt daarom aanbevolen in een gevoeligheidsanalyse de invloed van de sterkte van deze laag op de stabiliteit te onderzoeken.

4.2

Steenbekleding (ZST)

Belangrijk: tijdens de uitvoering van de veiligheidsbeoordeling zijn onjuistheden gevonden in de voorgeschreven software (Steentoets). De beoordeling is zo goed als mogelijk uitgevoerd, rekening houdend met de achtergronden van de rekenmethodes (zoals o.a. vastgelegd in de technische leidraden). Desalniettemin betreft het gepresenteerde veiligheidsoordeel een voorlopig oordeel.

4.2.1

Algemeen

De beoordeling van de stabiliteit van de steenzetting heeft betrekking op alle steenzettingen met een waterkerende functie. Binnen het faalmechanisme zijn de volgende deelmechanismen gedefinieerd:

- Toplaagstabiliteit onder golfaanval (ZTG);
- Toplaagstabiliteit onder langsstroming (ZTS);
- Afschuiven (ZAF);
- Materiaaltransport uit granulaire lag (ZMG);
- Materiaaltransport vanuit de ondergrond (ZMO);
- Erosie van de onderlagen (ZEO).

*Figuur 116
Impressie van de
zetsteen op de
havendam*



4.2.2

Specifieke uitgangspunten

Hieronder zijn de belangrijkste uitgangspunten voor de beoordeling van het faalmechanisme stabiliteit steenzetting (ZST) op de havendam benoemd:

- De niveaus van de bekleding en de opbouw van de bekleding is vastgesteld op basis van de inventarisatie van de keringbeheerder [NZV, 2018d].
- Profielschematisaties op basis van AHN2.
- Koperslakkblokken: Opbouw en eigenschappen toplaag en filterla(a)g(en) op basis van ontwerptekeningen van de 'groene dijk' en standaardwaarden WBI2017. In afstemming met de keringbeheerder is dezelfde opbouw voor de havendam overgenomen [NZV, 2018d]. De ontwerptekeningen presenteren de belangrijkste informatie met betrekking tot de opbouw. Daarnaast is aangenomen dat de inklemming aanwezig is en de blokken ingewassen zijn. De spleetbreedte is op basis van visuele inspectie ingeschat op 5 mm.
- Diaboolblokken: opbouw en eigenschappen toplaag en filterla(a)g(en) op basis inventarisatie keringbeheerder [NZV, 2018b]. De inventarisatie van de keringbeheerder toont aan dat het gaat om 25 rijen diaboolblokken (30 x 30 cm, dik 30 cm) direct boven de koperslakkblokken. De hoogste 5 rijen hebben een uitstekende blokken (>30cm) welke een golremmende werking hebben.
- Toepassing van Steentoets versie 17.1.1.1. (meeste recente versie die beschikbaar is op Helpdesk Water).

Vakindeling

Voor de vakindeling is gekozen om de havendam op te splitsen in twee dijkvakken, dijkvak A en B. Per vak is vervolgens een profiel geschematiseerd. Om de wijzigingen in oriëntatie en hydraulische belastingen binnen het dijkvak volledig te vangen zijn beide dijkvakken opgedeeld in 9 deelvakken. Binnen deze deelvakken wijzigt dus enkel de oriëntatie en de hydraulische belasting. Figuur 117 toont de resulterende vakindeling.

*Figuur 117
Vakindeling ZST
havendam (de
paarse delen zijn
zetsteen, gras is
groen).*



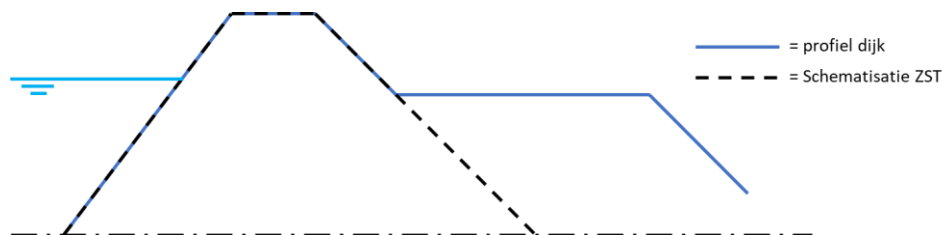
Profielen

De profielen zijn per 25 m gegenereerd door middel van het AHN2. Vervolgens is per dijkvak op basis van expert judgement het maatgevende profiel geselecteerd. Hiervoor zijn de volgende criteria gehanteerd:

- Laag voorland;
- Steil talud; en
- Niveau steenzetting.

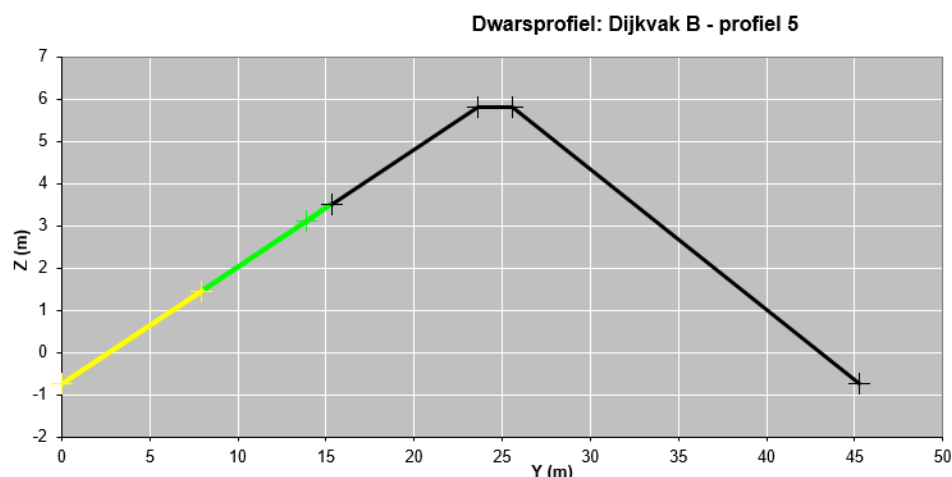
Elk profiel is volledig geschematiseerd in Steentoets ingevuld. Dit betekent dat naast het buitentalud ook de kruin en binnentalud zijn opgenomen in het te beoordelen profiel. De havendam beschikt over een groot deel van de lengte over een haventerrein aan de binnenzijde. Hierdoor rekent Steentoets met de correcte dijkbreedtes voor het bepalen van reststerkte. Om onnodig detail te voorkomen is de eerste helling aanwezig na de kruin doorgezet tot het niveau van de buitenteen. Figuur 118 illustreert op schematische wijze hoe dit is verwerkt. Een gevoeligheidsanalyse bevestigt dat het volledig schematiseren van het binnentalud geen effect heeft op het resultaat.

*Figuur 118
Schematische
weergave van het
profiel in steentoets*



Figuur 56 toont een voorbeeld van een maatgevend profiel in Steentoets, waarbij in dit geval het gele deel de koperslabblokken representeren en het groene deel de betonblokken en klinkers.

*Figuur 119
Voorbeeld
dwarsprofiel in
Steentoets – dijkvak
B – profiel 5, in dit
profiel: geel =
koperslakblokken,
groen =
diaboolblokken.*



Golfcondities per waterstandsniveau.

Voor elk dijkvak is gekeken welk uitvoerpunt maatgevend is voor het te beoordelen profiel. Deze zijn vervolgens gekoppeld. De voor dit uitvoerpunt bij verschillende overschrijdingsfrequenties berekende golfcondities (zie paragraaf 2.2) zijn ingevoerd in Steentoets.

Opbouw steenzetting

In onderstaande tabel is de opbouw van de steenzetting op de Lauwersmeerdijk weergegeven.

*Tabel 75
Opbouw steenzetting*

Toplaag	Filter-/ onderlagen	Bronnen
"Groene dijk" (dp 82.0 t/m 89.1)		
Koperslakblokken	Grind, mijnsteen	Afstemming keringbeheerder
Diaboolblokken	Grind, mijnsteen	Afstemming keringbeheerder

Parameters Steentoets

De parameters voor Steentoets (eigenschappen van toplaag, filterla(a)g(en) en onderlaag per taluddeel) volgen uit de ontwerptekeningen van de 'groene dijk' (zie paragraaf 3.4.2) en zijn met verificatie en goedkeuring door de beheerder toegepast bij de havendam. Indien voor de met Steentoets uit te voeren beoordeling noodzakelijke invoer ontbrak zijn de standaardwaarden van Steentoets gebruikt, dan wel veilige aannames gedaan. In Bijlage L is de bron van de verschillende parameters weergegeven.

4.2.3

Gedetailleerde beoordeling

Omdat falen van de havendam slechts indirect invloed heeft op de overstromingskans is de beoordeling op ZST, is het primaire doel van de gedetailleerde beoordeling om de faalkans van de zetstenen bekleding in

beeld te brengen. De beoordeling is daarom uitgevoerd voor de volgende terugkeertijden: 3.000, 1.000, 300, 100 en 33 jaar (de terugkeertijden 100 en 300 jaar zijn toegevoegd ten opzichte van een reguliere beoordeling om de faalkans iets nauwkeuriger te bepalen).

De resultaten tonen aan dat zowel de laaggelegen koperslakblokken als de diaboolblokken niet voldoen bij hydraulische belasting met een overschrijdingsfrequentie van 1/33 per jaar. Beide steenzettingen tonen toplaaginstabiliteit met een diktetekort van respectievelijk ca. 0,15 m en 0,1 m. Nabij het uiteinde van de havendam neemt dit diktetekort toe tot respectievelijk 0,2 m en 0,15 m. De onderlagen bieden daarnaast veelal te weinig reststerkte om dit te compenseren. Voor enkele profielen is er wel genoeg reststerkte onder de diaboolblokken aanwezig, echter is dit niet aanwezig over een geheel dijkvak.

Het eindoordeel voor het beoordelingsspoor ZST wordt zodoende opgemaakt door de laagste categorie van de betreffende doorsnede (de koperslakblokken), hoewel ook de diaboolblokken veelal niet voldoen.

4.2.4

Specifieke aanbevelingen

Uit de voorlopige resultaten blijkt dat zowel de koperslakblokken als de diaboolblokken niet bestand zijn tegen een belasting van 1/33 per jaar. Dit resultaat past niet bij de ervaring van de beheerder. We raden aan te verkennen of het beoordelingsresultaat in lijn kan worden gebracht met de ervaring van de beheerder. Daarnaast zal extra onderzoek naar de opbouw van de bekleding tot een stabiel oordeel leiden.

4.3

Grasbekleding (GEKB en GEBU)

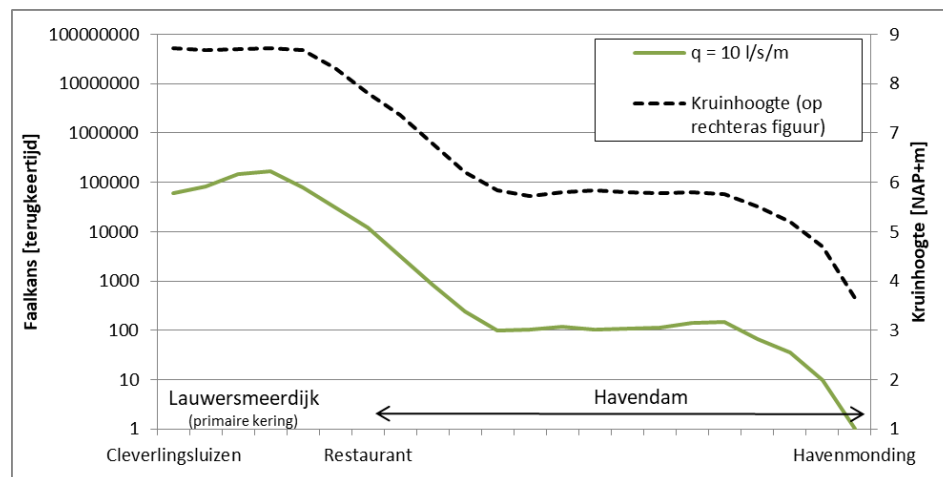
De grasbekleding op de havendam bestaat uit een goede gesloten zode op een leeflaag van ongeveer 20 cm [NZV, 2018d]. Voor de beoordeling van de grasbekleding betekent dit dat de erosiebestendigheid van de grasmat lager is dan in de schematiseringshandleiding aangenomen is. Voor gras op een leeflaag zijn in de schematiseringshandleiding geen standaardwaarden beschikbaar. De beoordeling voor GEKB en GEBU wordt daarom uitgevoerd als een Toets op Maat.

Grasbekleding binnentalud (GEKB)

Voor de grasbekleding op de binnenzijde van de havendam wordt daarom aangenomen dat deze faalt bij een deterministisch overslagdebiet van 10 l/s/m. De faalkans van de havendam is weergegeven in weergegeven in Figuur 120.

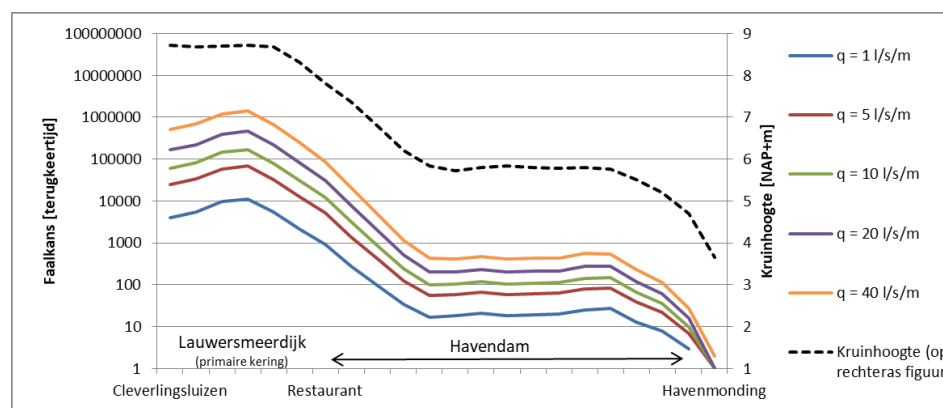
De hoogte van de Lauwersmeerdijk en het begin van de havendam is NAP +8,7 m. De faalkans is hier ongeveer 1/100.000 per jaar. De hoogte neemt 100 m af tot NAP +5,8 m. De faalkans bij een hoogte van NAP +5,8 m is ongeveer 1/100 per jaar. Op de laatste 100 m bij de monding neemt de hoogte van de havendam af tot NAP +4,0 m. De faalkans wordt dan groter dan 1/100 per jaar.

*Figuur 120
Faalkans van de
grasbekleding aan
de binnenzijde van
de havendam o.b.v.
falen bij een
deterministisch
overslagdebiet van
10 l/s/m*



De gevoeligheid van de aanname dat het gras op het binnentalud faalt bij een deterministisch overslagdebiet is onderzocht in een gevoeligheidsanalyse. De faalkans is daarom in kaart gebracht als de grasbekleding faalt bij een overslagdebiet van 1, 5, 20 en 40 l/s/m. Het verschil tussen een debiet van 5 en 20 l/s/m is relatief klein. De faalkans is nog steeds ordegrrootte gelijk aan de faalkans bij 10 l/s/sm (afwijking kleiner dan een factor 3). Het is niet waarschijnlijk dat een overlegdebiet van 1 of 40 l/s/m een goede indicatie geven van de faalkans. Een overslagdebiet van 1 l/s/m is waarschijnlijk te laag omdat anders historische schade verwacht wordt (deze schade aan de grasmat is niet bekend) en een overslagdebiet van 40 l/s/m is niet waarschijnlijk omdat deze sterkte overeenkomt met een grasmat op een kleilaag van 40 cm (wat niet het geval is).

*Figuur 121
Faalkans van de
grasbekleding aan
de binnenzijde van
de havendam o.b.v.
falen bij een
deterministisch
overslagdebiet van
1, 5, 10, 20 en 40
l/s/m*



Op basis van de gevoeligheidsanalyse wordt geconcludeerd dat de faalkans op basis van een deterministisch overslagdebiet van 10 l/s/m een goede

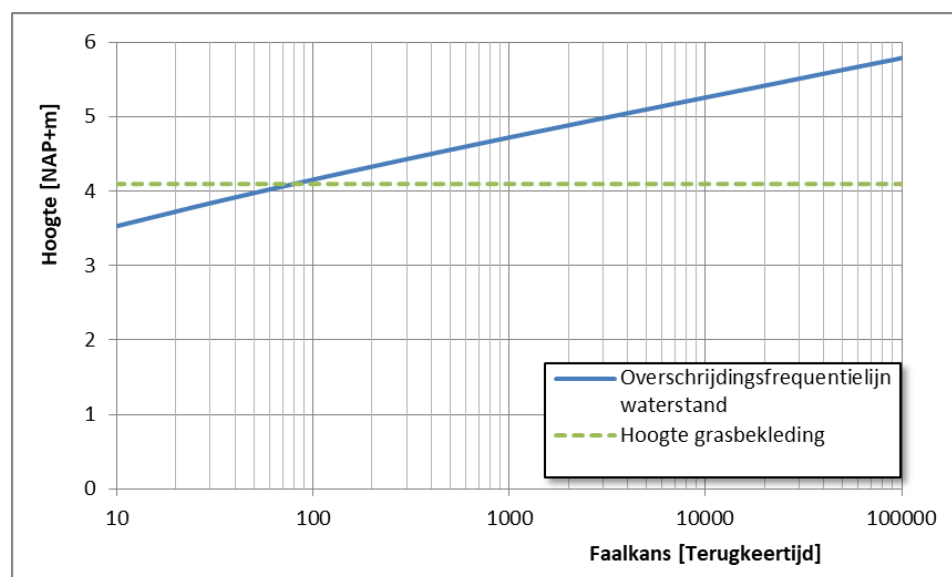
benadering geeft van de (ordegrootte) van de faalkans van de grasbekleding aan de binnenzijde van de havendam.

Grasbekleding buitentalud (GEBU)

Boven de steenbekleding op de havendam ligt een grasbekleding. Ter hoogte van het restaurant ligt de onderkant van deze grasbekleding op ongeveer NAP +6,0 m. Net na het restaurant tot aan de punt van de havendam ligt de overgang van de grasbekleding op ongeveer NAP +4,1 m [MUG, 2018]. Bij de beoordeling van GEBU (paragraaf 3.6) bleek dat de graszode faalt op het moment dat sprake is van golfklap. De waterstand is dan (ongeveer) gelijk aan de onderkant van de grasbekleding.

Gezien op de havendam geen sprake is van een gesloten zode maar van gras op een leeflaag wordt de faalkans van de grasbekleding op de havendam ingeschat door aan te nemen dat deze faalt als de waterstand 25 cm lager is dan de onderkant van de bekleding. Daar waar de onderkant van de grasbekleding gelijk is aan NAP +4,1 m NAP is de faalkans van de grasbekleding dan (ordegrootte) gelijk aan 1/30 per jaar. Waar de onderkant van de grasbekleding gelijk is aan NAP +6,0 m is de faalkans ingeschat op 1/250.000 jaar. Deze grasbekleding ligt dus ruimschoots hoog genoeg. De grasbekleding bij NAP +4,1 m en de overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand is weergegeven in Figuur 122.

*Figuur 122
Onderkant
grasbekleding en
overschrijdings-
frequentielijn van de
waterstand*



Om de gevoeligheid van het faalcriterium (falen bij waterstand 25 cm lager dan de onderkant grasbekleding) in beeld te brengen is ook onderzocht wat de faalkans van de grasbekleding is als deze faalt bij een waterstand gelijk of 50 cm lager dan de onderkant van de grasbekleding. Dit is alleen gedaan voor de locaties waar de onderkant van de grasbekleding gelijk is aan NAP +4,1 m. Het resultaat is weergegeven in Tabel 76. Falen van de grasbekleding bij een waterstand van 50 cm lager dan de onderkant van de bekleding lijkt niet logisch omdat bij een kans van 1/10 per jaar historische schade bekend moet zijn. Dit is niet het geval. De is onwaarschijnlijk dat de

grasbekleding bestand is tegen golfklap (zeker gezien sprake is van een leeflaag van slechts 20 cm). Een faalkans van 1/100 per jaar (afgerond) is daarom een bovengrens van de faalkans van de grasbekleding.

Tabel 76
Gevoeligheid
faalkans gras voor
faalcriterium

Criterium	Faalkans
WS gelijk aan onderkant gras	1/80 per jaar
WS 25 cm lager dan onderkant gras (referentie)	1/30 per jaar
WS 50 cm lager dan onderkant gras	1/10 per jaar

De faalkans van de grasbekleding op het buitentalud (GEBU) wordt daarom ingeschat op 1/30 – 1/100 per jaar.

4.4

Indirecte mechanismen

Als laatste zijn de indirect faalmechanismen beschouwd. Deze faalkans is ingeschat op dezelfde orde van grootte als de faalkans voor de direct faalmechanismen. Dit omdat de oorzaken voor falen (golfbelasting en verlies van stabiliteit door een afschuiving) grotendeels gelijk zijn. Daarnaast is het niet mogelijk om voor de indirecte mechanismen een faalkans te bepalen¹⁶.

- Grasbekleding. De faalkans voor GABI en GABU (indirect falen van de grasbekleding op het binnen en buitentalud) is gelijk gesteld aan de faalkans voor GEKB en GEBU (direct falen van de grasbekleding op het binnen en buitentalud), namelijk 1/30 tot 1/100 per jaar. Dit omdat beide mechanismen worden veroorzaakt door een te hoge hoeveelheid golfoverslag en te hoge verzadigingsgraad van de dijk. Dit beeld wordt bevestigd in de beoordeling primaire kering. De delen die voor GEKB zijn afgekeurd komen grotendeels overeen met de delen die voor GABI zijn afgekeurd. De delen die voor GEBU zijn afgekeurd zijn grotendeels ook afgekeurd voor GABU.
- Falen van de havendam door macrostabiliteit (STBI en STBU), afschuiving van de voorlanden (VLAF) en zettingsvloeiing (VLZV) wordt geïnitieerd door een val naar laag water. De faalkans voor VLAF en VLZV wordt daarom gelijk gesteld aan de faalkans voor STBU, namelijk kleiner 1/100 per jaar.
- Het voorland ligt lager dan de gemiddelde waterstand (ongeveer NAP). In de eenvoudige beoordeling van de lauwersmeerdijk is laten zien dat wanneer de voorlanden zo laag liggen, de kans op golfafslag verwaarloosbaar klein is (zie paragraaf 3.10).
- Op de havendam is één NWO aanwezig, het restaurant 'Wadgenot aan zee'. Over het restaurant zijn onvoldoende gegevens beschikbaar om een uitspraak te doen over het effect van het restaurant op de faalkans van de havendam.

¹⁶ De indirecte faalmechanismen behoren tot de groep 5 sporen. Het oordeel is dan gelijk aan voldoet of voldoet niet. Het is niet mogelijk een faalkans te berekenen [RWS – WVL, 2017a].

Effect van de havendam op de primaire waterkering

Vanaf dijkpaal 89.2 t/m 90.9 ligt de primaire kering in een havengebied. De aanwezigheid van de havendam heeft effect op de hydraulische belastingen en dus op het beoordelingsresultaat van de primaire waterkering (de Lauwersmeerdijk). In deze paragraaf wordt dat effect inzichtelijk gemaakt. In deze effectanalyse is er vanuit gegaan dat de havendammen niet meer aanwezig zijn, maar dat hooggelegen voorlanden nog wel aanwezig zijn. Gezien de havendam effect heeft op de golfcondities ligt de focus in deze paragraaf op het effect van de havendam op het veiligheidsoordeel van de steen- en grasbekleding.

Bij de beoordeling van de Lauwersmeerdijk in Hoofdstuk 3 is de huidige situatie beoordeeld, de havendam is ook bij maatgevende condities aanwezig is (conform variant 1, zie paragraaf 2.2.7). De effectanalyse is volgens dezelfde uitgangspunten uitgevoerd als beschreven Hoofdstuk 3. Alleen de toegepaste hydraulische belastingen wijzigen. In deze effectanalyse is het golf remmende effect van de havendam immers niet meegenomen.

Steenbekleding (ZST) op de primaire kering

De resultaten van de zetsteen beoordeling laten zien dat er geen verschil is tussen de situatie met en zonder havendammen. Hiervoor zijn twee verklaringen.

- Het effect van de havendammen op de hydraulische belastingen in het havengebied is bij dp 89.2 t/m 90.0 relatief klein. De belangrijkste bijdrage aan de golfreductie wordt geleverd door de hooggelegen voorlanden (zie paragraaf 2.2.6). Het oordeel bij dijkpaal 89.2 t/m 90.0 veranderd daarom niet.
- Ter plaatse van dp 90.1 t/m 90.5 is een zeer steil talud (ca. 1:2,1) aanwezig waardoor bij een belasting van 1/33 per jaar het oordeel niet stabiel is. Dit is de slechts mogelijke score. Bij toenemende hydraulische belastingen (door afwezigheid van de havendammen) wordt de golfaanval groter. Gezien de slechtste score als is bereikt, veranderd het oordeel niet bij toenemende belastingen.

Grasbekleding (GEBU en GEKB) op de primaire kering

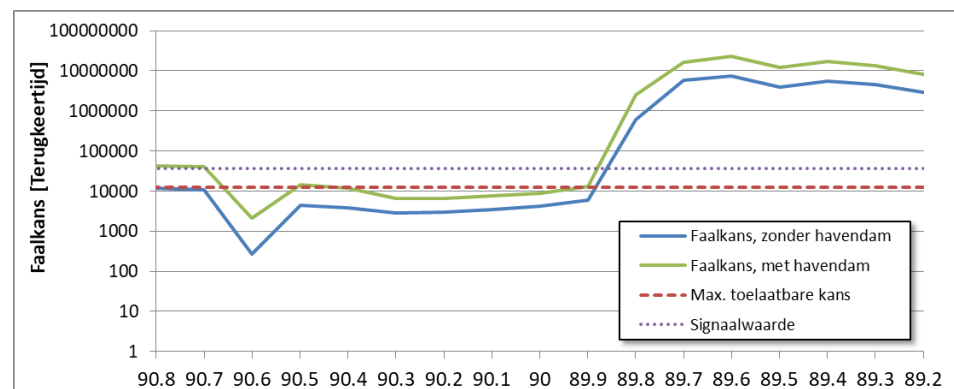
Grasbekleding binnentalud (GEKB)

Figuur 123 geeft de faalkans voor de grasbekleding op het binnentalud van de Lauwersmeerdijk weer met en zonder de aanwezigheid van de havendam. Hierin is te zien dat de faalkans ongeveer een factor 3 groter is de havendam niet aanwezig is. Ten oosten van dijkpaal 89.8 is een goede bekleding op het binnentalud aanwezig. Hier wordt in alle gevallen voldaan aan de signaalwaarde en de maximaal toelaatbare overstromingskans. Tussen

dijkpaal 90.9 en 89.8 ontbreekt de bekleding op het binnentalud. De faalkans met havendam is hier voor de meeste locaties ongeveer gelijk aan maximaal toelaatbare overstromingskans. In geval de havendam niet aanwezig is, is de faalkans duidelijk groter dan de maximaal toelaatbare overstromingskans.

Omdat de faalkans ongeveer gelijk aan is aan de maximaal toelaatbare overstromingskans hebben kleine wijzigingen strikt genomen effect op het veiligheidsoordeel (voldoet wel / niet aan de eis). De aan- of afwezigheid van de havendam resulteert daarom in een verandering van de beoordelingscategorie voor het zichtjaar 2023. Gezien de faalkans met havendam in 2075 sowieso niet voldoet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans (zie paragraaf 3.5), heeft dit geen effect op de veiligheidsscope.

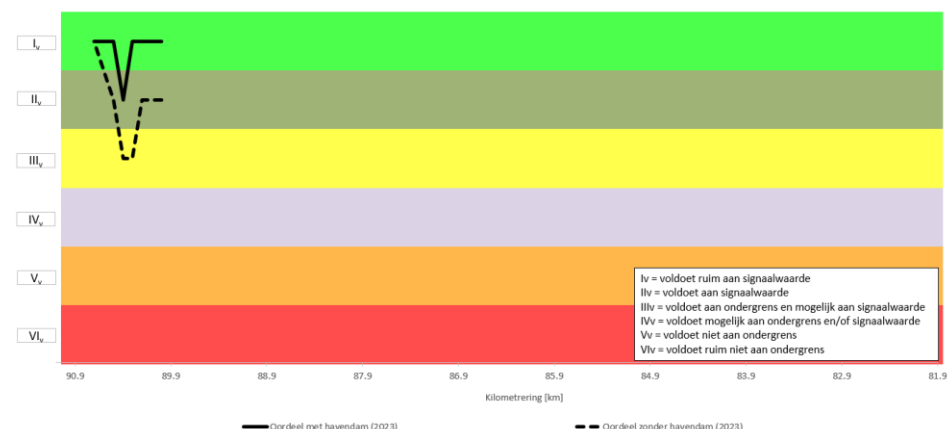
Figuur 123
Faalkans GEBK met en zonder havendam. Zichtjaar 2023



Grasbekleding buitentalud (GEBU)

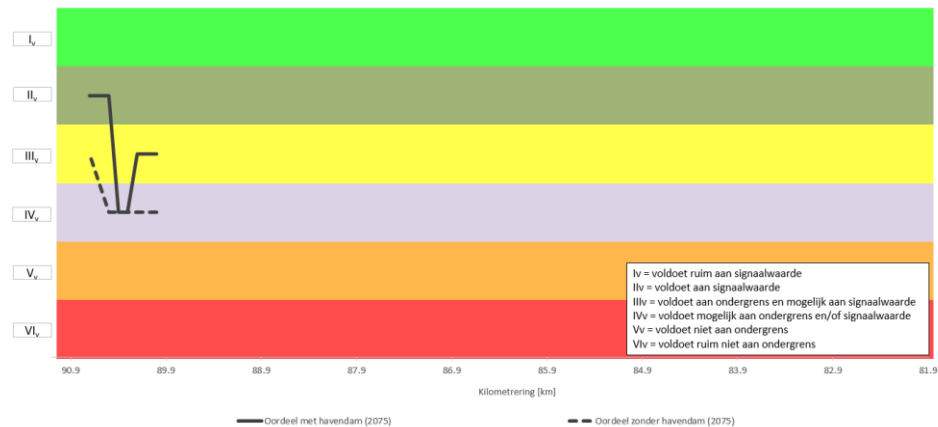
De beoordeling voor het faalmechanisme grasbekleding erosie buitentalud is ook beoordeeld zonder de effecten van de havendam op de hydraulische randvoorwaarden. Figuur 124 laat de verschillen in de oordelen zien (zichtjaar 2023). De effectanalyse laat zien dat de beoordelingscategorie met havendam vaak een beoordelingscategorie hoger uitvallen ten opzichte van de oordelen zonder havendam. Dit omdat de westelijke havendam vooral effect heeft op de golfhoogtes optredend die optreden bij grotere terugkeertijden. De beoordelingscategorie valt daarom vooral bij bijna alle dijkpalen een categorie lager uit.

Figuur 124
Resultaat beoordeling GEBU met en zonder havendammen in zichtjaar 2023



Door klimaatverandering neemt de hydraulische belasting toe. In 2075 voldoet een deel van de Lauwersmeerdijk niet meer voor GEBU. In Figuur 125 (ook in paragraaf 3.6) op een deel van het traject sprake is van beoordelingscategorie IVv. Als ook de golfremmende werking van de havendammen niet wordt meegenomen neemt de omvang van het afgekeurde deel toe.

*Figuur 125
Resultaat
beoordeling GEBU
met en zonder
havendammen in
zichtjaar 2075*



4.6

Veiligheidsoordeel van de havendam

4.6.1

Faalkans van de havendam

De faalkans van de havendam wordt ingeschat tussen de 1/30 – 1/100 per jaar.

- De faalkans van de havendam door macrostabiliteit is ordegrrootte gelijk aan 1/100 – 1/1.000 per jaar. Deze vindt plaats door een val naar laagwater (zie paragraaf 4.1);
- De faalkans van de steenbekleding op de buitenzijde van de havendam is orde 1/30 per jaar. De software (steentoets) laat zien dat de bekleding niet bestand is tegen een hydraulische belasting van 1/33 per jaar (zie paragraaf 4.2). Gezien geen historische schade bekend is, is de faalkans van de steenbekleding ingeschat op 1/30 per jaar.
- De faalkans van de grasbekleding op de binnen- en buitenzijde van de havendam is orde 1/30 tot 1/100 per jaar (zie paragraaf 4.3).
- De faalkans van de indirecte faalmechanismen is ingeschat op dezelfde orde van grootte als de directe faalmechanismen. Dit omdat de oorzaken voor falen (golfbelasting en verlies van stabiliteit door een afschuiving) grotendeels gelijk zijn.

Bij falen van de gras- en steenbekleding komt de kern van de havendam bloot te liggen. Dit is de start van een erosieproces waarbij uiteindelijk de volledige havendam kan eroderen. Afschuiving van de havendam of het voorland vindt plaats na afloop van een hoogwater. Falen van de havendam vindt dan plaats bij de volgende storm als hersteld niet tijdig heeft plaatsgevonden.

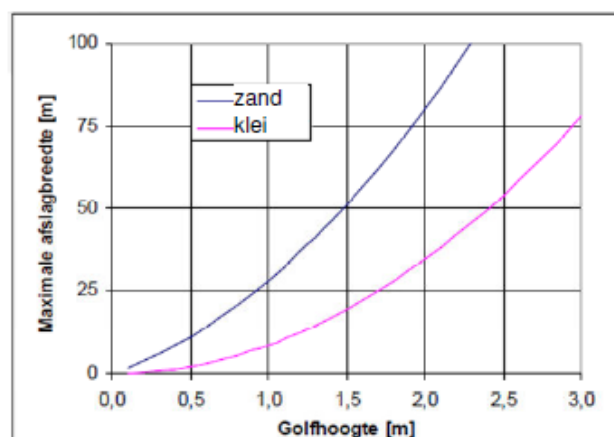
4.6.2

Falen van de havendam en de haventerreinen

In paragraaf 2.2 is laten zien dat de hooggelegen haventerreinen de grootste invloed hebben op de hydraulische belastingen. Wanneer deze afwezig zijn neemt de hydraulische belasting op de primaire kering significant toe. De kans dat de havendam én de haventerreinen volledig eroderen (en daarmee geen waterkerende functie meer hebben) wordt verwaarloosbaar klein verondersteld omdat:

- De faalkans van de havendam is 1/30 – 1/100 per jaar. De havendam is dan niet direct zijn golf brekende werking kwijt (zie paragraaf 4.6.1). De havendam is bij de monding van de haven lager dan direct bij de Lauwersmeerdijk, falen start daarom bij de monding en breidt zich langzaam uit naar de dijk zelf.
- De maximale afslagbreedte van het voorland is ongeveer 100 m. De totale lengte van het voorland achter de westelijke havendam is 200 m. Zelfs bij deze conservatieve inschatting van een afslag van 100 m wordt slechts de helft van het voorland afgeslagen. Deze 100 m is een conservatieve inschatting en in werkelijkheid minder groot omdat:
 1. De afslagbreedte van 100m is afgeleid op basis van een zandig voorland. De significante golfhoogte met een kans van voorkomen van 1/3.000 per jaar is gelijk aan 2,22 m¹⁷. De maximale afslagbreedte op basis van een voorland van zand is 100 m (zie Figuur 126). Door de aanwezige verhardingen op het haventerrein (bebouwing, asfalt en bestrating) en de damwanden is de erosiegevoeligheid van het voorland door afslag significant kleiner dan de erosiegevoeligheid van alleen zand. De verwachte afslag is daarom significant minder dan 100 m.
 2. De afslagbreedte van 100 m is gebaseerd op een volledige stormduur. Deze volledige stormduur is niet beschikbaar voor afslag van het voorland omdat eerste de havendam moet eroderen. De werkelijke afslag (zelfs bij een zandig voorland) is daarom minder groot dan 100 m.

*Figuur 126
Maximale
afslagbreedte obv
WBI, voorlanden
golfafslag. Bron:
Figuur 22-3 uit
Bijlage III van het
WBI [RWS – WVL,
2017a]*



¹⁷ Uitvoerlocaties WZ_1_6-5_dk_00023, WBI2017_Waddenzee_Oost_6-5_v03

4.6.3

Veiligheidsoordeel & advies voor HWBP scope

De beoordeling laat zien dat de faalkans van de havendam relatief groot is, tussen de 1/30 tot 1/100 per jaar. Deze faalkans is significant groter dan de faalkans van de achterliggende primaire kering. Tijdens maatgevende omstandigheden voor de primaire kering is falen van (of significante schade aan) de havendam daarom waarschijnlijk.

Door de hoge ligging leveren de havenkades de belangrijkste bijdrage aan de golfreductie. De invloed van het falen van de havendam op de hydraulische belasting is minder groot, maar wel aanwezig. De faalkans voor GEKB is met de havendam een factor 3 kleiner dan zonder de havendam. Voor GEBU is de resulterende beoordelingscategorie gemiddeld 1 klasse lager. In de huidige situatie heeft de havendam geen invloed op het beoordelingsresultaat van ZST. Dit omdat met havendam al sprake is van de laagste beoordelingsklasse (het betekent dus niet dat er geen relatie is tussen het oordeel van ZST en de havendam). Ondanks de invloed op de hydraulische belasting is de havendam (en de faalkans daarvan) niet van invloed op de veiligheidsscope van de Lauwersmeerdijk. Dit omdat ook met de aanwezigheid van de havendam de primaire kering op de verschillende directe mechanismen wordt afgekeurd.

Scope HWBP project Lauwersmeerdijk Vierhuizergat

We raden aan de havendam op te nemen in de scope van het HWBP project Lauwersmeerdijk. Dit vanwege de directe relatie tussen de hydraulische belasting op de Lauwersmeerdijk en de aanwezigheid van de havendam. Dit komt het sterkste tot uiting bij het faalmechanisme GEKB (de hoogteopgave). Verbetering van de havendam kan daarom worden gezien een mogelijk oplossingsrichting in het traject VKA. Indien verbetering van de havendam geen onderdeel uitmaakt van het VKA (en de huidige faalkans van de havendam representatief blijft) raden we in het ontwerp geen rekening te houden met het golf remmend effect van de havendam, maar wel met het golf remmend effect van de haventerreinen. De kans dat de havendam én de hooggelegen haventerreinen volledig wegslaan wordt verwaarloosbaar klein verondersteld.

5 Veiligheidsoordeel

Normtraject 6-5 is gelegen langs de Waddenzee en ten noorden van het Lauwersmeer. In de derde toetsronde is het asfalt op het buitentalud van de Lauwersmeerdijk afgekeurd, daarom is de Lauwersmeerdijk geprogrammeerd in het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

Per 1 januari 2017 zijn de nieuwe waterveiligheidsnormen van kracht. In voorliggende studie is de waterveiligheidsstatus van de Lauwersmeerdijk (9 km) beoordeeld op basis van deze nieuwe waterveiligheidseisen. Omdat het asfalt op het buitentalud in de derde toetsronde al is afgekeurd, is dit niet opnieuw beoordeeld. Daarnaast wordt opgemerkt dat uit inspecties blijkt dat het asfalt in een slechte staat verkeerd. De Cleverlingsluizen en de Robbengatsluis zijn niet beoordeeld in voorliggende veiligheidsbeoordeling (de beoordeling van deze kunstwerken is separaat beoordeeld [Van Bree, 2018]).

De veiligheidsbeoordeling laat zien dat:

- Voor de huidige situatie (peildatum 1 jan. 2023) is vooral sprake van een veiligheidsopgave op het buitentalud. Naast het asfalt voldoen de koperslakkblokken onder op het buitentalud (ZST) langs het hele traject niet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. Dit geldt ook voor het grootste deel van de betonblokken en klinkers (ZST) en de buitenwaartse stabiliteit (STBU). Als laatste voldoet de Lauwersmeerdijk bij het Vierhuizergat niet voor het faalmechanisme piping (STPH).
- Langs het oostelijke deel van de Lauwersmeerdijk en in de haven van Lauwersoog is de huidige veiligheidsopgave niet beperkt tot het buitentalud. Op het meest oostelijk deel van het traject, tussen dijkpaal 82.0 en 83.5 voldoet de grasbekleding op het binnen- en buitentalud (GEKB en GEBU) niet aan de maximaal toelaatbare kans. Bij de haven van Lauwersoog ontbreekt de kleibekleding op het binnentalud, daarom is bij de haven ook sprake van een opgave voor GEKB. Ook als wel sprake zou zijn van een kleilaag is er een opgave aanwezig voor GEKB. Als laatste voldoet de binnenwaartse stabiliteit in de haven (STBI) bij dijkpaal 89.9 niet aan de faalkanseis.
- Als klimaatverandering wordt beschouwd, wordt de veiligheidsopgave groter. De opgave voor de grasbekleding op het binnen- en buitentalud (GEKB en GEBU) is het meest gevoelig voor klimaatverandering. In de huidige situatie voldoet het grootste deel (tussen dijkpaal 89.9 en 84.0) van de Lauwersmeerdijk nog wel aan de maximaal toelaatbare kans. In 2075 voldoet het grootste deel van de Lauwersmeerdijk echter niet meer aan de maximaal toelaatbare kans.
- De voorlanden voor de Lauwersmeerdijk zijn stabiel. De kans op afschuiving (VLAF), golfafslag (VLGA) en zettingsvloeiing (VLZV) is verwaarloosbaar.

Als laatste voldoet piping (STPH) niet aan de gestelde eisen omdat de geul het voorland doorsnijdt en daarmee daardoor kwelweg daardoor korter is.

- Op de Lauwersmeerdijk bij het Vierhuizergat voldoet de binnenwaartse stabiliteit (STBI), de grasbekleding op het buitentalud (GEBU) en de huidige kruinhoogte (GEKB) in de huidige situatie wel aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. In 2075 voldoen deze faalmechanismen niet meer aan de maximaal toelaatbare overstromingskans.

*Figuur 128
Ligging
Vierhuizergat*



5.3

Havendam

De beoordeling laat zien dat de faalkans van de havendam relatief groot is, tussen de 1/30 tot 1/100 per jaar. Deze faalkans is significant groter dan de faalkans van de achterliggende primaire kering. Tijdens maatgevende omstandigheden voor de primaire kering is falen van (of significante schade aan) de havendam daarom waarschijnlijk.

Door de hoge ligging leveren de havenkades de belangrijkste bijdrage aan de golfreductie. De invloed van het falen van de havendam op de hydraulische belasting is minder groot, maar wel aanwezig. De faalkans voor GEKB is zonder de havendam een factor 3 groter. Voor GEBU is de resulterende beoordelingscategorie gemiddeld een klasse hoger. In de huidige situatie heeft de havendam geen invloed op het beoordelingsresultaat van ZST. Dit omdat met havendam al sprake is van de laagste beoordelingsklasse.

Ondanks de invloed op de hydraulische belasting is de havendam (en de faalkans daarvan) in de huidige situatie niet van invloed op de veiligheidsscope voor het HWBP project. Dit omdat ook met de aanwezigheid van de havendam de primaire kering op de verschillende (directe) mechanismen wordt afgekeurd.

5.4

Conclusies per beoordelingsspoor

In deze paragraaf zijn de conclusies per beoordelingsspoor weergegeven. Omdat deze veiligheidsbeoordeling dient om de scope van het HWBP project vast te stellen staan de volgende twee vragen centraal:

- Is in de huidige situatie (peildatum 1 jan. 2023) sprake van een waterveiligheidsopgave? Oftewel, wordt voldaan aan de maximaal toelaatbare overstromingskans?
- Als op dit moment geen sprake is van een waterveiligheidsopgave, ontstaat tijdens de levensduur van het HWBP project een

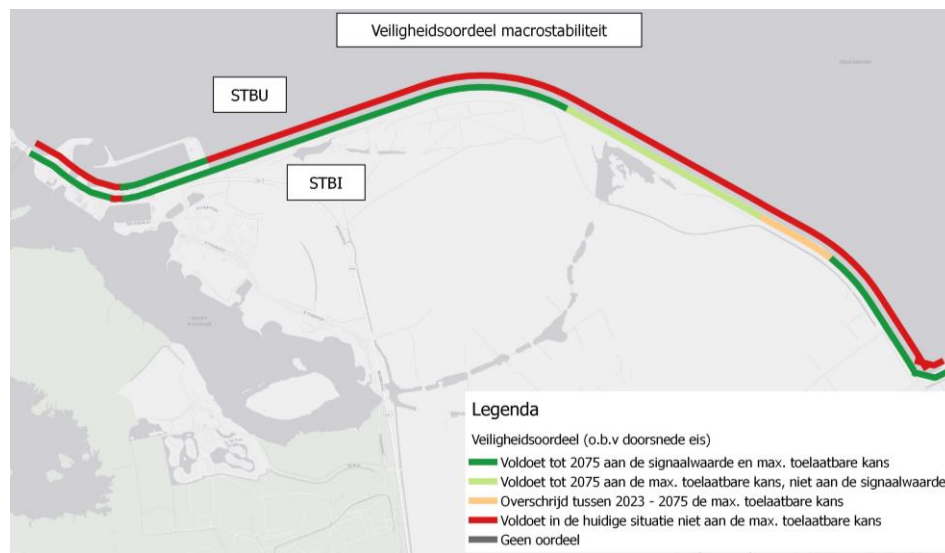
veiligheidsopgave? Oftewel, wordt in 2075 nog voldaan aan de maximaal toelaatbare overstromingskans?

In Hoofdstuk 3 is het veiligheidsoordeel bij zowel de maximaal toelaatbare kans en de signaalwaarde en voor verschillende zichtjaren beschreven (o.a. 2023, 2050, 2075 en 2100)

STBI: Zowel in de huidige situatie als in de toekomst voldoet het grootste deel van de Lauwersmeerdijk voor de binnenwaartse stabiliteit. Bij de binnenhaven, bij dijkpaal 89.9) is lokaal sprake van een opgave. Door de steile binnentalud is onvoldoende weerstand tegen afschuiven aanwezig. Tussen 83.3 en 84.0 wordt de faalkans rond 2070 groter dan maximaal toelaatbare kans.

Langs het grootste deel van het traject vindt (bij de huidige kruinhoogte) significante golfoverslag plaats. Bij dijkpaal 83.5 is de controle op macrostabiliteit in combinatie met significante golfoverslag uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de stijghoogte onder de kleibekleding niet hoger kan worden dan NAP +4,42 m. Bij hoger waterstanden gaat de kleibekleding namelijk opbarsten en zal deze opgebarsten zone als drainage fungeren. Bij deze maximale waterstand wordt voldaan aan de gestelde eisen voor macrostabiliteit en golfoverslag. Bij hogere waterstanden zal de kleibekleding dus opbarsten. Gezien de waterstand van NAP +4,42 m een bovenmaatgevende situatie is voor het faalmechanisme GABI leidt dit niet tot afkeuren van de dijk.

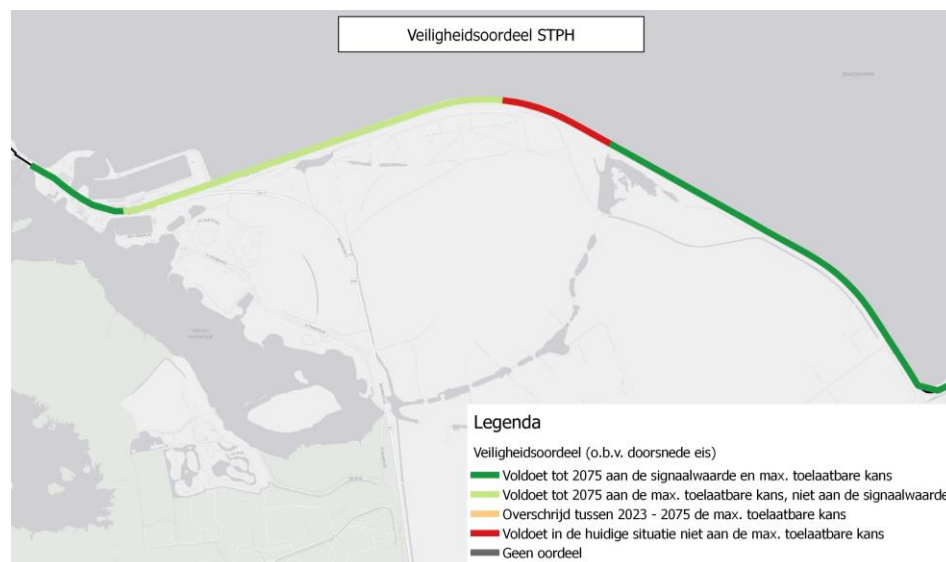
*Figuur 129
Veiligheidsoordeel
STBU (bovenste lijn)
en STBI (onderste
lijn)*



STBU: In de huidige situatie voldoet de Lauwersmeerdijk alleen tussen dijkpaal 89.1 – 89.9 aan de gestelde eisen voor STBU, dit is in het oostelijk deel van de haven van Lauwersoog. Hier wordt tot na 2075 voldaan aan de maximaal toelaatbare kans. Alle overige delen van de Lauwersmeerdijk voldoet in de huidige situatie niet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans.

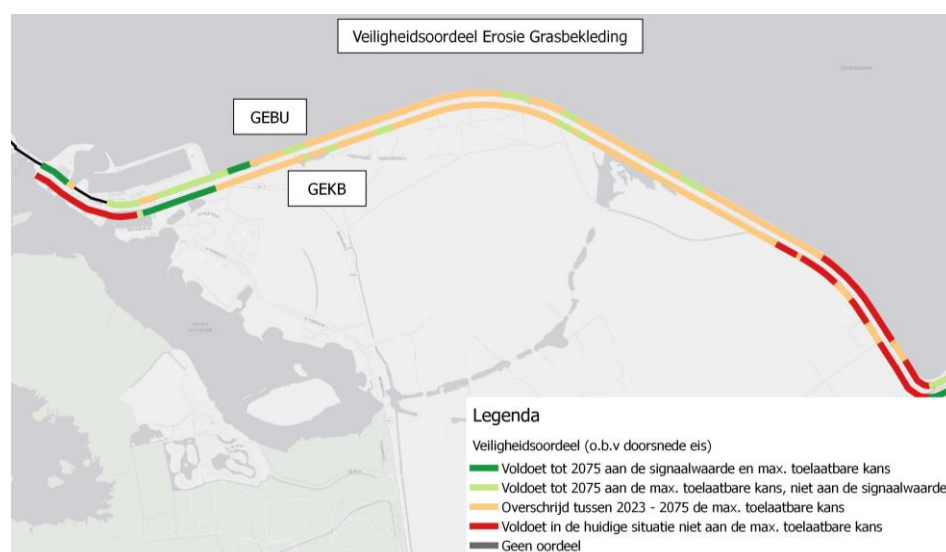
STPH: Bijna het gehele traject voldoet in ieder geval tot 2075 aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. De getijdenafzettingen en de bijbehorende gelaagdheid van de ondergrond in combinatie met de aanwezig kwelders is hiervoor de belangrijkste reden. Bij het Vierhuizergat is geen voorland aanwezig. Het intredepunt ligt hier aan de buitenteen van de dijk en is de aanwezige kwelweg significant kleiner. Dit vak voldoet daarom in de huidige situatie niet aan de maximaal toelaatbare kans.

*Figuur 130
Veiligheidsoordeel
piping*



GEKB: In de huidige situatie concentreert de opgave zich binnen het westelijk deel van de haven van Lauwersoog en op het oostelijk deel van het traject. In de haven ontbreekt de kleibekleding aan de binnenzijde (dijkpaal 90.9 t/m 89.9). De overslagbestendigheid is hier laag. Op het oostelijk deel van de Lauwersmeerdijk is de kering te laag. Alleen binnen het oostelijk deel van de haven van Lauwersoog is tot 2075 geen sprake van een hoogteopgave. Voor het overgrote deel van de Lauwermeersdijk ontstaat voor 2075 een hoogteopgave (uitgaande van de max. toelaatbare kans en een toegestaan overslagdebiet van 10 l/s/m).

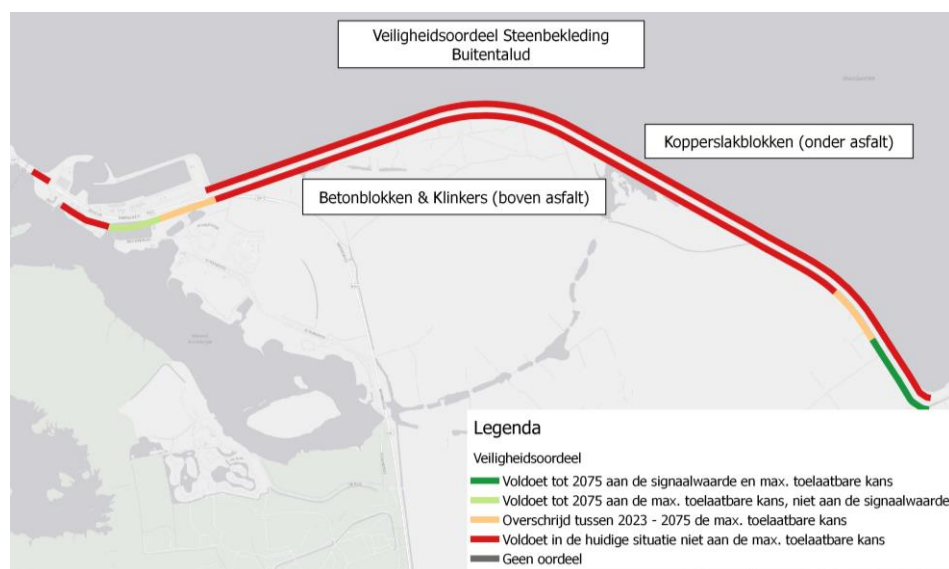
*Figuur 131
Veiligheidsoordeel
GEBU (bovenste lijn)
en GEKB (onderste
lijn)*



GEBU: Op de meeste locaties voldoet de grasbekleding op het buitentalud aan de max. toelaatbare overstromingskans. Alleen tussen dijkpaal 82.0 en 83.7 wordt in de huidige situatie niet voldaan aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. Voor het grootste deel van de locaties ligt de overgang naar de grasbekleding te laag op het talud om tot 2075 te voldoen aan de max. toelaatbare kans.

ZST: Vanwege onjuistheden in Steentoets betreft onderstaand oordeel een voorlopig veiligheidsoordeel. De koperslablokken voldoen in de huidige situatie nergens aan de max. toelaatbare overstromingskans. Hetzelfde geldt voor het grootste deel van de betonblokken en klinkers. Alleen in de haven en tussen dijkpaal 82.0 – 83.0 voldoen de betonblokken en klinkers in de huidige situatie wel aan de maximaal toelaatbare kans (peildatum 1 jan. 2023). In 2075 voldoet het meeste oostelijke en westelijke deel (89.7 – 89.9 en 82.0 – 82.6) nog aan de max. toelaatbare kans.

*Figuur 132
Veiligheidsoordeel
ZST,
koperslablokken
(bovenste lijn) en
betonblokken &
klinkers (onderste
lijn)*



GABI: Het grootste deel van de Lauwersmeerdijk voldoet tot 2075 in ieder geval aan de max. toelaatbare kans. Met name op het meest oostelijke deel van het traject bevinden zich enkele locaties die nu nog wel voldoen aan de maximaal toelaatbare kans, maar in 2075 niet meer.

GABU: De Lauwersmeerdijk voldoet voor GABU tot 2075 altijd aan de max. toelaatbare kans. Uitgezonderd dijkpaal 82.7 wordt ook tot 2075 voldaan aan de signaalwaarde van de norm.

VLGA, VLAf, VLZV: Voor de Lauwersmeerdijk is de faalkans in ieder geval tot 2075 verwaarloosbaar klein. Tussen dijkpaal 87.9 en 88.4 zijn geen voorlandlodingen beschikbaar. Daarom is geen oordeel toegekend.

Kabels en Leidingen: De gasleiding van de NAM en van Enexis voldoen aan de gestelde eisen. Waterschap Noorderzijlvest is in overleg met het

waterleidingbedrijf in gesprek over de aanwezig waterleiding. Deze heeft daarom geen oordeel.

6 Reflecties en aanbevelingen

- **Werelderfgoed centrum:** Om de opgave nabij het werelderfgoed centrum een beter in beeld te krijgen moet een detailanalyse uitgevoerd worden. Dit vanwege de combinatie van complexe hydraulische belastingen (ligging achter de havendammen) en sterk variërende geometrie (ter plaatse en ten oosten van de Robbengatsluis). Focus in deze analyse op de bekledingsmechanismen (GEKB, GEBU, ZST). Dit kan door de gedetailleerde methode voor het bepalen van golfrandvoorwaarden in havenbekkens toe te passen. Hiervoor wordt het golfmodel SWACH gebruikt.
- **Havendam** We raden aan de havendam op te nemen in de scope van het HWBP project Lauwersmeerdijk. Dit vanwege de directe relatie tussen de hydraulische belasting op de Lauwersmeerdijk en de aanwezigheid van de havendam. Dit komt het sterkste tot uiting bij het faalmechanisme GEKB (de hoogteopgave). Verbetering van de havendam kan daarom worden gezien een mogelijk oplossingsrichting in het traject VKA. Indien verbetering van de havendam geen onderdeel uitmaakt van het VKA (en de huidige faalkans van de havendam representatief blijft) raden we in het ontwerp geen rekening te houden met het golf remmend effect van de havendam, maar wel met het golf remmend effect van de haventerreinen. De kans dat de havendam én de hooggelegen haventerreinen volledig wegslaan wordt verwaarloosbaar klein verondersteld.
- **STBI:** Voer de beoordeling voor macrostabiliteit binnenwaarts in combinatie met significante golfoverslag uit voor het hele traject. Langs het grootste deel van het traject vindt (bij de huidige kruinhoogte) namelijk significante golfoverslag plaats. De controle bij dijkpaal 83.5 laat zien dat de stabiliteit bij significante golfoverslag niet voldoet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans.
- **STBU:** Het veiligheidsoordeel is tot stand gekomen op basis van een streng criterium voor het maatgevend glijvlak en een zanddijk die grotendeels verzadigd is. We raden aan te verkennen of het mogelijk is om deze uitgangspunten onderbouwd te versoepelen. Dit door peilbuizen te plaatsen en extra informatie over de val naar laagwater te verzamelen. Het beoordelingsresultaat is namelijk erg gevoelig voor de ligging van de freatische lijn. Daarnaast raden we aan de opgave voor STBU integraal te bekijken met de opgave voor de bekleding van het buitentalud. De fundering van een steenbekleding kan namelijk extra sterkte toevoegen.

- **STPH:** Door het ontbreken van het voorland is de Lauwersmeerdijk bij het Vierhuizergat duidelijk het gevoeligst voor piping. De afstand tot de norm is een factor 3-10. We raden aan peilbuizen te plaatsen en de respons te meten ter plaatse van het Vierhuizergat. Daarnaast om te verkennen of op basis van een tijdsafhankelijke benadering of anisotropie tot een voldoende oordeel kan worden gekomen. Wanneer de opgave gemakkelijk meegekoppeld kan worden in het HWBP project, raden we aan dit deel op te nemen in de scope van het project (dit deel blijft namelijk de zwakste schakel voor het mechanisme piping en het gebied is slecht inspecteerbaar tijdens hoogwater).
- **ZST:** Tijdens de beoordeling zijn onjuistheden geconstateerd in de software (Steentoets). We raden aan de beoordeling te herzien wanneer zeker is dat Steentoets geen onjuistheden meer bevat. en/of bij de start van het ontwerp stil te staan bij deze onjuistheden.
- **ZST:** Uit de voorlopig resultaten blijkt dat sommige delen van de steenbekleding niet bestand zijn tegen een belasting van 1/33 per jaar (vooral de koperslakblokken). Bij deze faalkans zou historische schade bekend moeten zijn. We raden aan bij het ontwerp van de steenbekleding een reality check te doen op de uitkomsten zodat een eventuele nieuw te ontwerpen steenbekleding niet overmatig zwaar wordt aangelegd.
- **GEKB:** Voor locaties waar dijkverhoging niet wenselijk of ruimtelijk lastig inpasbaar is, raden we de hoogteopgave integraal te verkennen met de opgave op het buitentalud en een hoger kritiek overslagdebiet te overwegen. Op deze manier valt de hoogteopgave niet meer binnen de scope van het HWBP project. Als een hoger overslagdebiet wordt toegestaan raden we aan te onderzoeken of op de locaties wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden om dit hogere overslagdebiet toe te staan.
- **GABI:** De locaties waar GABI niet voldoet aan de maximaal toelaatbare kans komen overeen met de locaties met een hoogteopgave (GABI voldoet niet op een kleiner deel van de Lauwersmeerdijk). Het is waarschijnlijk dat de opgave voor GABI wordt opgelost als de hoeveelheid overslag wordt verlaagd (door bijv. kruinverhoging of verruwing van het buitentalud). Daarmee wordt de hoeveelheid golfoverslag verminderd. We raden daarom aan om GABI vooralsnog geen onderdeel uit te laten maken van het HWBP project.

Arcadis (2018a)

Onderzoek Analyse Peilbuismetingen Lauwersmeerdijk. S. Huizer. Arcadis, 13 april 2018.

Arcadis (2018b)

Onderzoek MHW-situatie Lauwersmeerdijk. S. Huizer. Arcadis, 15 mei 2018.

Deltares (2017)

Hydraulische belastingen Kust, Wettelijk beoordelingsinstrumentarium 2017. https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132669/1230087-002-hye-0001-v4-r-hydraulische_belastingen_kust_def3.pdf

Deltares (2017a)

Handleiding Steentoets v17.1.1.1, Deltares, mei 2017

Deltares, (2015)

WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS. https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132668/1209432-004-geo-0002-v2-r-handleiding_lokaal_schematiseren_met_wti-sos-generale_repetitie.pdf.

HHNK (2017)

Verslag expertsessie macrostabiliteit BalgzanddijkAmsteldiepdiijk, 12 september 2017.

HKV (2018)

POV Waddenzeedijken. Onderzoek Geulmanagement, Fase B2. S. Ouwerkerk, juli 2018. Projectnummer PR3744.10

HKV (2018b)

Beoordelingsstrategie Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat, HKV/Infram/Tauw, 2018

HKV (2017)

Hydraulische Belastingen Havens – Gebruikershandleiding en Methode. HKV/Aktis Hydraulics, Januari 2018

KPR (2017)

Voorlopige werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag OI2014v4, 14 maart 2017

MUG (2018)

Digital Terrain Model (DTM), MUG Ingenieursbureau, maart 2018

NZV (2018a)

Bodemdaling toegeleverd door het projectteam regionale keringen Lauwersmeerdijk. Bodemdaling door gaswinning afkomstig van: <http://www.commissiebodemdaling.nl/bodemdaling/prognose/>

NZV (2018b)

E-mail: "Gegevens steenzetting LMD" waarin zetsteen liggend boven het asfalt wordt beschreven door M. Arends, 21 februari 2018.

NZV (2018c)

Polderpeilen thv Lauwersmeerdijk, 8 maart 2018.

NZV (2018d)

Eigenschappen steenbekleding o.b.v. inventarisatie NZV op 19 juni 2018. Toelevering per e-mail door Bert de Wolff, 26 juli 2018, 16:08.

RWS (1967)

Aanlegtekeningen Lauwerszeewerken.

RWS - WSW-SBB (2013)

Hydrografie Waddenzee - Friesche Zeegat.

RWS - WVL (2017a)

Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid.

RWS - WVL (2017b)

Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage I Procedure.

RWS - WVL (2017c)

Schematiseringshandleiding piping, WBI 2017. 2 januari 2017.

RWS - WVL (2017d)

Handreiking ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen – OI2014 versie 4. RWS – WVL, februari 2017.

RWS - WVL (2016a)

Schematiseringshandleiding Grasbekleding, RWS - WVL, 1 december 2016

RWS - WVL (2016b)

Schematiseringshandleiding Hoogte, RWS - WVL, 1 december 2016

RWS - WVL (2016c)

Schematiseringshandleiding Grasbekleding, RWS - WVL, 1 december 2016

RWS - WVL (2016d)

Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, WBI 2017. 1 december 2016.

RWS –WVL (2016e)

Schematiseringshandleiding afschuiven voorlanden, WBI 2017. 1 december 2016.

RWS –WVL (2016f)

Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing, WBI 2017. 1 december 2016.

RWS –WVL (2016g)

Schematiseringshandleiding hydraulische condities bij dijkteen, WBI 2017. 1 december 2016.

RWS –WVL (2012)

Handreidking jtoetsen grasbekleding op dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel in de verlengde derde toetsronde, RWS – WVL. 25-10-2012.

RWS –WVL (2013)

Kenmerkende waarden Lauwersoog. RWS – WVL, 2013
https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Kenmerkende%20waarden%20getijgebied%202011_tcm21-97249.pdf

TAW (2004)

Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD). Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), september 2004.

Van Bree, Bob (2018)

WBI-beoordeling kunstwerken Cleveringsluizen en Robbengatsluis. WBI-beoordeling in het kader van de vierde wettelijke beoordelingsronde. Bob van Bree, juni 2018.

Wiertsema & Partners (2018)

Geotechnisch onderzoek, dijkverbetering lauwersmeerdijk-Vierhuizergat te lauwersoog. VN-68912-1, 26 januari 2018.

A

Afkorting

In de veiligheidsbeoordeling zijn de volgende afkortingen voor de beoordelingssporen gebruikt

GABI	Gras Afschuiven Binnentalud
GABU	Gras Afschuiven Buitentalud
GEBU	Gras Erosie Buitentalud
GEKB	Gras Erosie Kruin Binnentalud
STBI	Stabiliteit Binnenwaarts
STBU	Stabiliteit Buitenwaarts
STPH	Piping
VLAf	Afschuiving voorland
VLGA	Golfafslag voorland
VLZV	Zettingsvloeiing voorland
ZST	Stabiliteit Steenzetting
NWO	Niet Waterkerende Objecten

Daarnaast de volgende afkortingen:

NZV	Waterschap Noorderzijlvest
SOS	Stochastische Ondergrond Schematisatie
WBI	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma

C

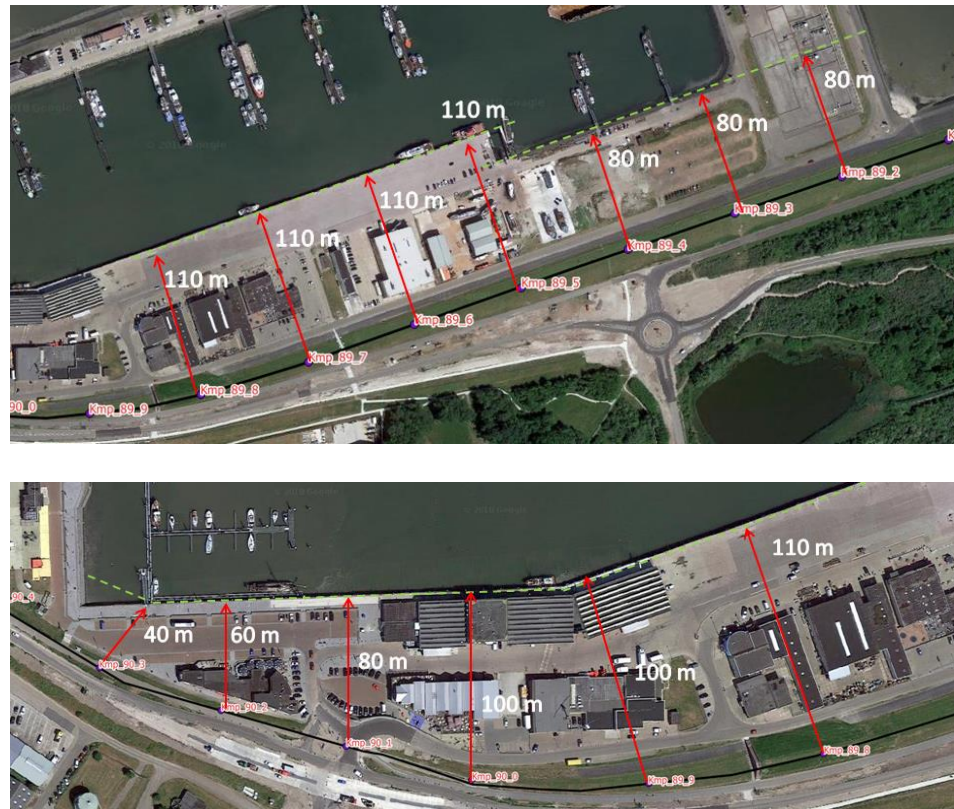
Schematisering havenprofielen

In deze bijlage zijn de voorlandschematisaties in de haven weergegeven. Deze schematisaties zijn gebruikt in de haven varianten 1 en 3. In variant 2 (geen haven aanwezig) is geen voorland maar een golf brekende berm geschematiseerd.

C.1

Voorlanden

*Figuur 133
Voorlanden haven
dijkpalen 90.9 tot
89.2*

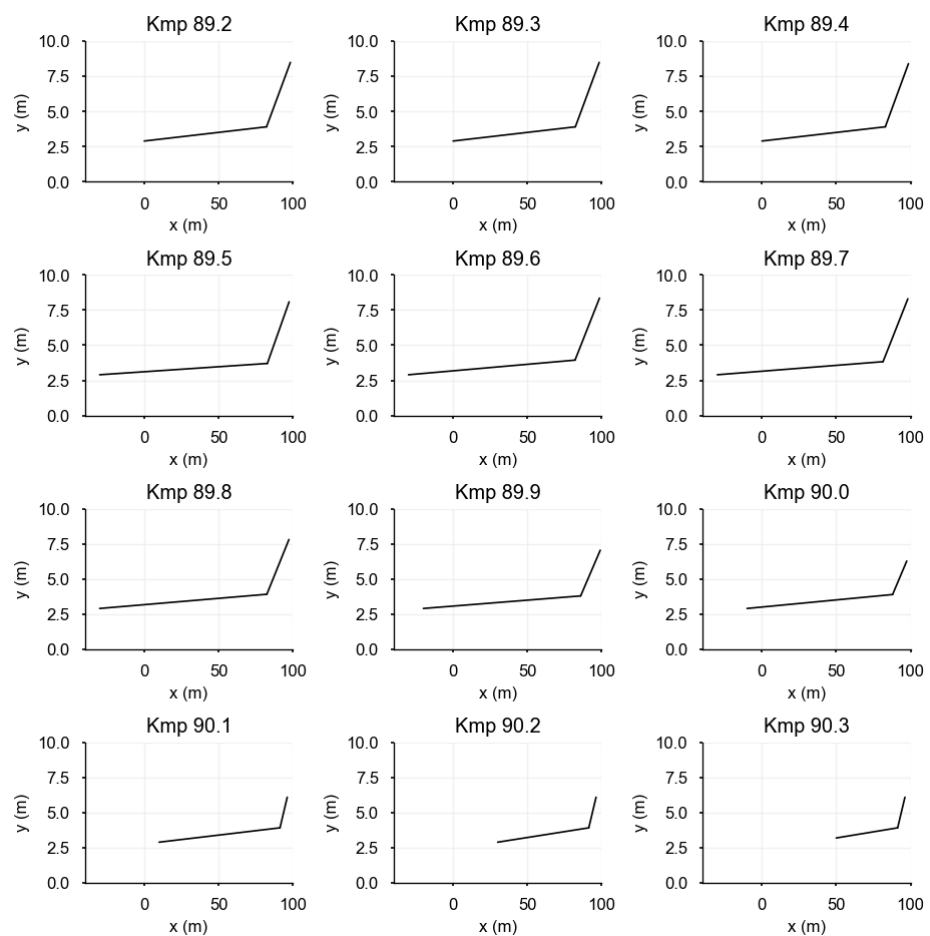


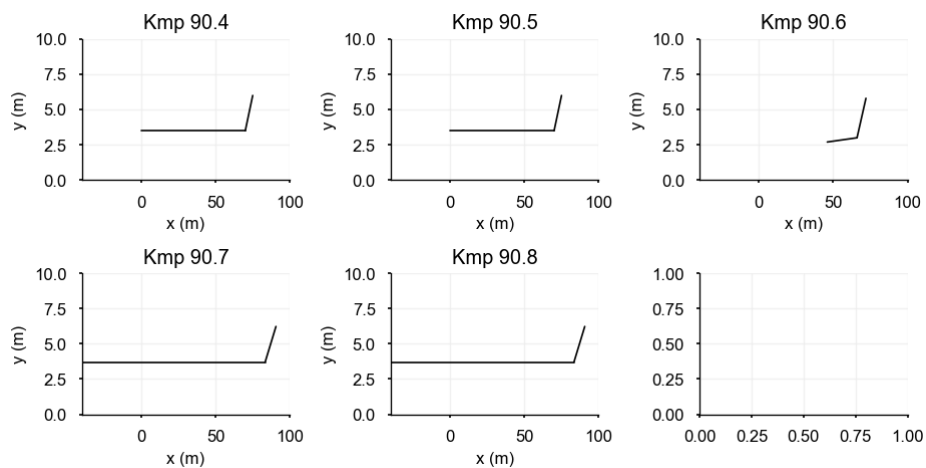


C.2

Profielen

*Figuur 134
Zijaanzichten van de
profielschematisatie
in de haven*





D

Duiding HBN traject 6-5

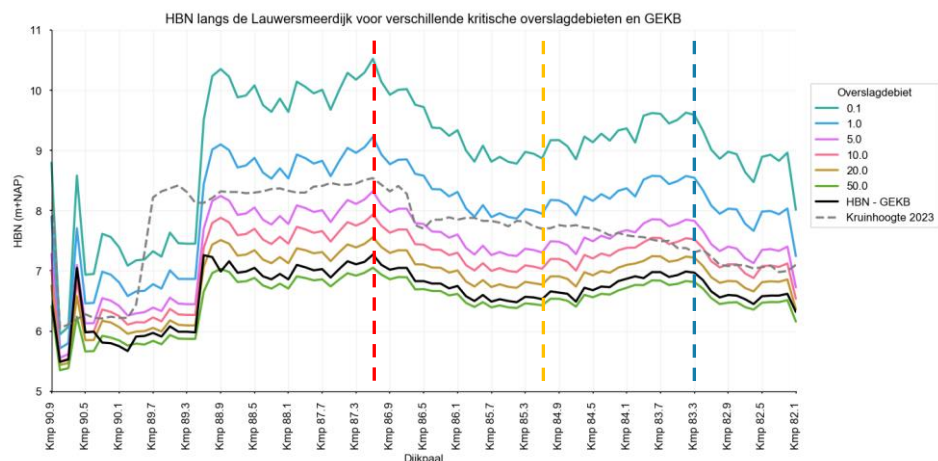
Project : Beoordeling Lauwersmeerdijk en Vierhuizergat
 Datum : 5 april 2018
 Onderwerp : HBN verandering oostelijk deel traject 6-5
 Van : Joost Stenfert, Jan Stijnen en Gerbert Pleijter
 Aan : Heine van Maar, Bert de Wolff en Martin Arends

Dit memorandum beschrijft het verloop van het hydraulisch belastingniveau (HBN) langs traject 6-5 in het beheergebied van NZV. Bij de analyse van de resultaten hebben we specifiek aandacht voor de dijkstrekkings met een oostelijke oriëntatie.

Het verloop van het HBN is in onderstaande figuur weergegeven voor verschillende kritieke golfoverslagdebieten. De gekleurde lijnen horen bij een vaste waarde van het kritieke golfoverslagdebiët en zijn bepaald met Hydra-NL. De resultaten in de haven van Lauwersoog (vanaf Kmp 89.2 t/m 90.8) zijn in Hydra-NL bepaald met schematiseringsvariant 1 van de haven. Dat betekent dat beide havendammen zijn meegenomen in de bepaling van de golfcondities in de haven. De zwarte lijn geeft de resultaten voor het HBN uit een GEKB-berekening met Riskeer. In de GEKB-berekening is gebruik gemaakt van de standaard WBI2017-database voor het gehele traject (inclusief de haven).

Ten oosten van Kmp 87.1 (rode verticaal gestreepte lijn) constateren we een afname in het HBN tot ongeveer Kmp 85.6 (gele lijn). Vanaf daar neemt het HBN weer toe. Na Kmp 83.3 (blauwe lijn) neemt het HBN vervolgens weer af richting het oosten. De maatgevende windrichting is voor alle locaties 330° N. Daarnaast is windrichting 300° N nog een beetje van belang.

Figuur 135
 Overgangspunten in
 het verloop van het
 HBN



Merk op dat het verloop van het HBN sterk afhangt van de keuze van het kritieke golfoverslag-debiët. Aangezien voor de beoordeling in 2023 het resultaat uit de GEKB-berekening van Riskeer leidend is, geeft die lijn het meest representatieve verloop van het HBN langs het traject. De vergelijkbare Hydra-NL berekening met een constant overslagdebiët komt overeen met ongeveer 40 l/s/m, zoals blijkt uit bovenstaande figuur.

*Figuur 136
Locaties van de
overgangspunten
van het HBN*



De verwachting is dat een locatie ter plaatse van Kmp 85.6 door zijn oostelijke oriëntatie minder last zou moeten hebben van golven. De maatgevende windsector is 330° N, waardoor golven evenwijdig aan de kust lijken binnen te komen. Dit is niet helemaal het geval. De golven draaien wel iets bij, maar veel is het niet als we naar de hoek van golfinval kijken. In de figuur geven de zwarte pijlen de golfrichting aan en de blauwe lijnen de dijknormaal per locatie (zie tabel hieronder voor details).

Het is logisch dat de maatgevende windrichting 330° N is, zelfs bij flauw invallende golven, immers:

- bij deze windrichting (en nog westelijkere windrichtingen) is sprake van de meeste windopzet. Dit is goed terug te zien in de toename van de maatgevende waterstanden langs dit traject.
- bij oostelijke windrichtingen is sprake van directere golfinval (en daarmee golfoverslag), de windopzet neemt echter sterk af. Mogelijk is bij deze richtingen zelfs sprake van afwaaiing;
- bij wind met richting 300° N zijn beide aspecten terug te vinden. Bij westelijkere richtingen neemt de overslag door golven snel af, bij oostelijke richtingen neemt de windopzet snel af.

Door in de detailresultaten van de Hydra-berekeningen te kijken (illustratiepunten), kunnen we vaststellen wat de hoek van golfinval is onder maatgevende condities (zie onderstaande tabel). De golven vallen op het oostelijk georiënteerde deel dus binnen onder een hoek van ongeveer 60 graden.

*Tabel 77
Dijknormalen van de
dijkpalen*

Dijklocatie	Dijknormaal [$^\circ$ t.o.v. N]	Golfrichting [$^\circ$ t.o.v. N]
Kmp 87.1	342	323
Kmp 85.6	29	335
Kmp 83.3	39	333

De golfgegevens die als invoer dienen voor de Hydra-modellen zijn bepaald met het numerieke golfmodel SWAN. Dit is een geavanceerd golfgroeimodel dat binnen het kader van het WBI de standaard is om golven te modelleren. Het onderzoeken van de details over de door dit model berekende golfgroei valt buiten de huidige projectscope.

Tussen de rode en de gele lijn is een duidelijke afname van het HBN te zien. Tussen Kmp 87.1 en Kmp 85.6 zien we een afname in de significante golfhoogte van 2.32 naar 2.16 meter bij een kritiek golfoverslagdebiet van q

= 5 l/s/m. Dit komt rechtstreeks terug in het verloop van het HBN en is dus conform verwachting.

Tussen de gele en de groene lijn neemt het HBN echter weer wat toe met orde 0.8 meter tussen het laagste (gele lijn) en het hoogste punt (groene lijn). Dit lijkt in eerste instantie verrassend, de oriëntatie over dat traject verandert immers niet. Als we kijken naar het verloop van de golfparameters zelf, dan zien we het volgende:

- Na Kmp 85.6 neemt de golfhoogte wat toe richting het oosten van 2.16 tot 2.22 m voor $q = 5$ l/s/m bij Kmp 83.3. Daarna neemt de golfhoogte weer af (dit komt overeen met het laatste stukje van de kering dat nog verder naar het oosten buigt). Een toename van de golfhoogte zorgt (in combinatie met de waterstand en de golfperiode, zie hieronder) voor een stijging van het HBN.
- Naast de verandering in golfhoogte over dit gedeelte van het traject zien we een toename van de maatgevende waterstanden van ongeveer 0.12 meter. Een (iets) hogere waterstand, zorgt naast een stijging met dezelfde hoeveelheid ook voor (iets) hogere golven, en dus een hoger HBN.
- Bovenstaande twee aspecten zorgen al voor een flinke verhoging van het HBN (orde 0.3 – 0.4 meter bij een kritiek golfoverslagdebiet van 5 l/s/m), maar ze geven nog geen voldoende verklaring. Het blijkt dat met name de verandering in de golfperiode ($T_{m-1,0}$) van belang zijn. Voor de locaties ter plaatse van de gele, rode en groene lijn is dit respectievelijk 4.9, 4.5 en 5.2 seconde. Met name deze wijzigingen in de periodemaat (orde 10%) werken door in de hydraulische belastingniveaus.

Tot slot merken we op dat het verloop van het HBN over het oostelijke traject beperkt blijft tot orde 0.5 meter bij de GEKB-berekening. Dit komt overeen met de resultaten van een berekening met een constant golfoverslagdebiet van ongeveer 40 l/s/m. De toe- en afnames van de golfparameters volgen direct uit de gehanteerde WBI2017 databases, welke zijn gevuld met SWAN-berekeningen. Op basis van plaatselijke verschillen in de bodemhoogte van het SWAN-model, de meegenomen fysica in de SWAN-modellering voor de golfgroei en de lokale eigenschappen van waterkering zelf (oriëntatie, talud) achten we de berekende HBN's plausibel.

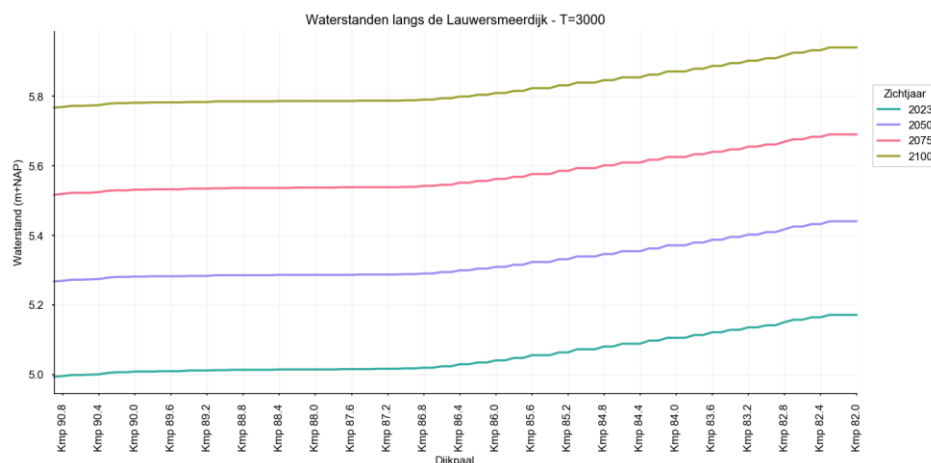
E

Hydraulische belastingen bij de signaalwaarde

De bijlage beschrijft de hydraulische belastingen bij de signaalwaarde van de norm. De hydraulische belastingen bij de max. toelaatbare kans zijn weergegeven in paragraaf 2.2.4. De resultaten zijn ook toelicht in paragraaf 2.2.4.

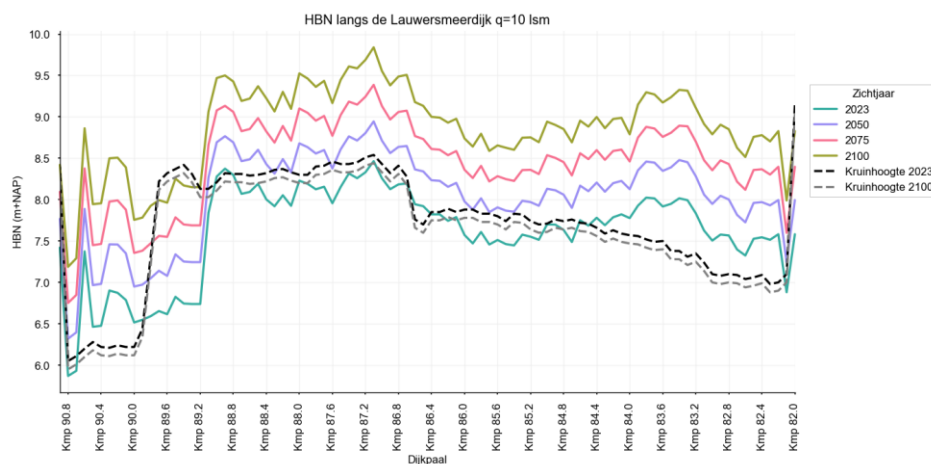
Waterstand bij de norm

Figuur 137
Waterstand bij de max. toelaatbare overstromingskans (1/3.000 per jaar)

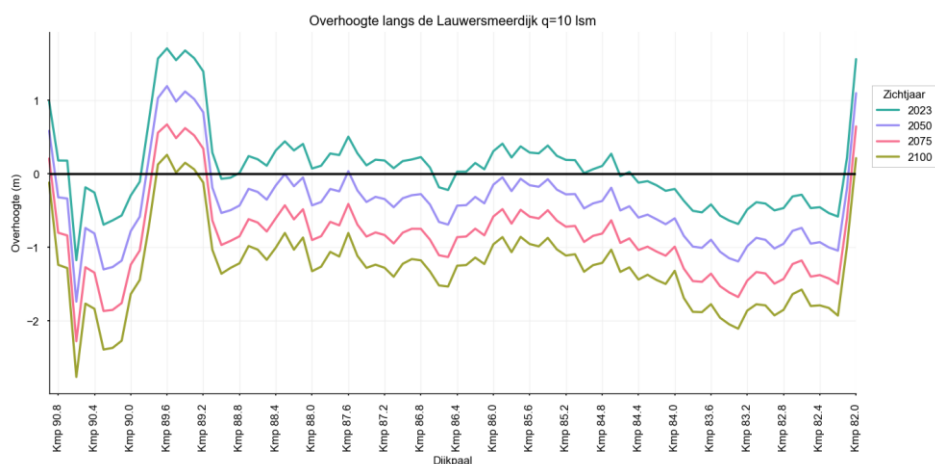


Hydraulische belasting niveau (HBN) en hoogteopgave

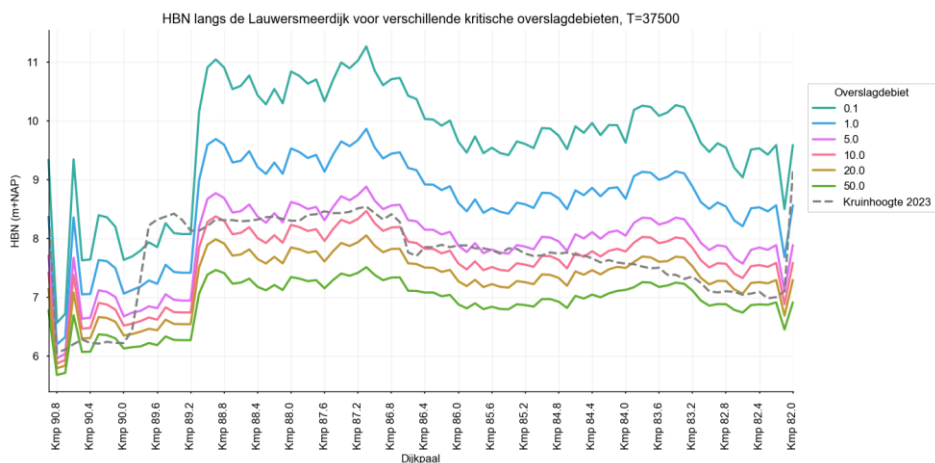
Figuur 138
HBN doorsnede eis behorend bij de signaalwaarde (1/37.500 per jaar) bij $q = 10 \text{ l/s/m}$ voor verschillende zichtjaren



Figuur 139
Overhoogte bij de doorsnede eis behorend bij de signaalwaarde (1/37.500 per jaar) bij $q = 10$ l/s/m voor verschillende zichtjaren

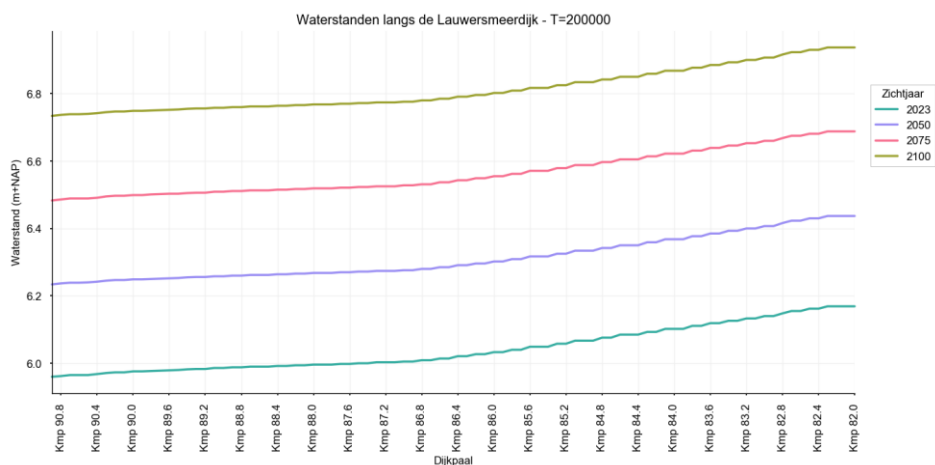


Figuur 140
HBN bij de doorsnede eis behorend bij de signaalwaarde (1/37.500 per jaar) in 2023 voor verschillende overslagdebieten



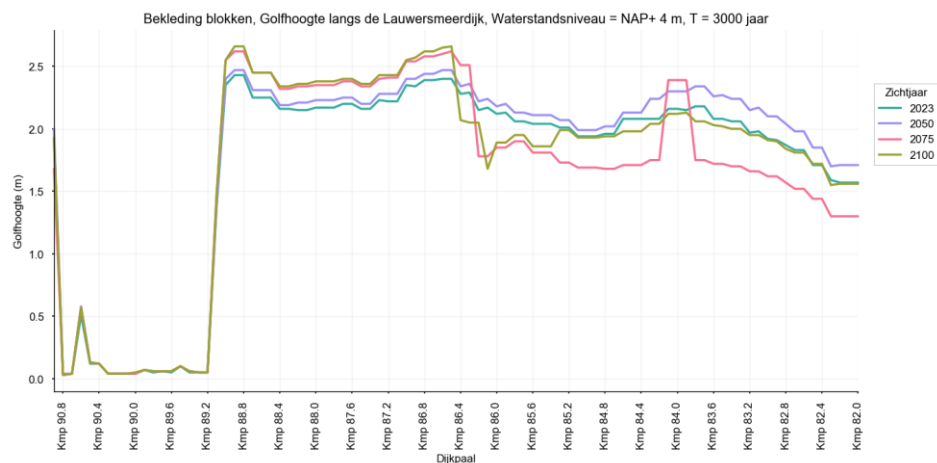
Waterstand bij doorsnede – eis GEBU

Figuur 141
Waterstand bij de doorsnede eis van GEBU behorend bij de signaalwaarde (1/200.000 per jaar)

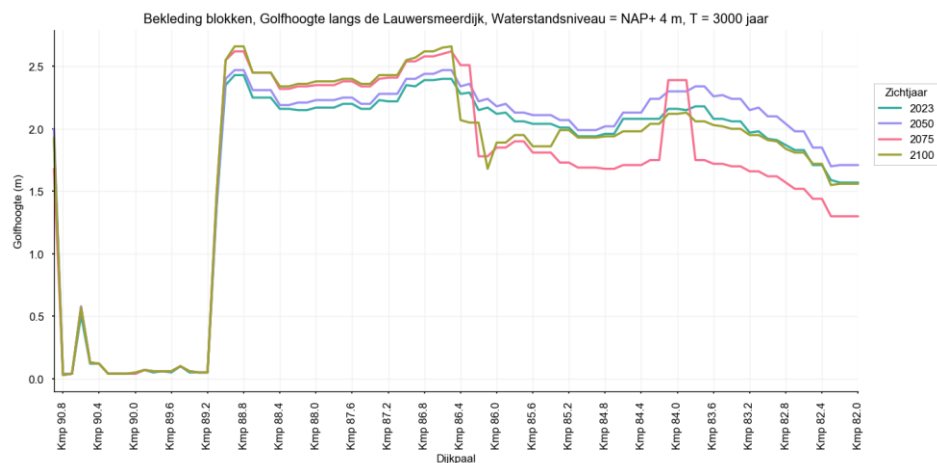


Golfrandvoorwaarden blokken

Figuur 142
Significante
golfhoogten voor
betonblokken bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en de
signaalwaarde
(1/3.000 per jaar)

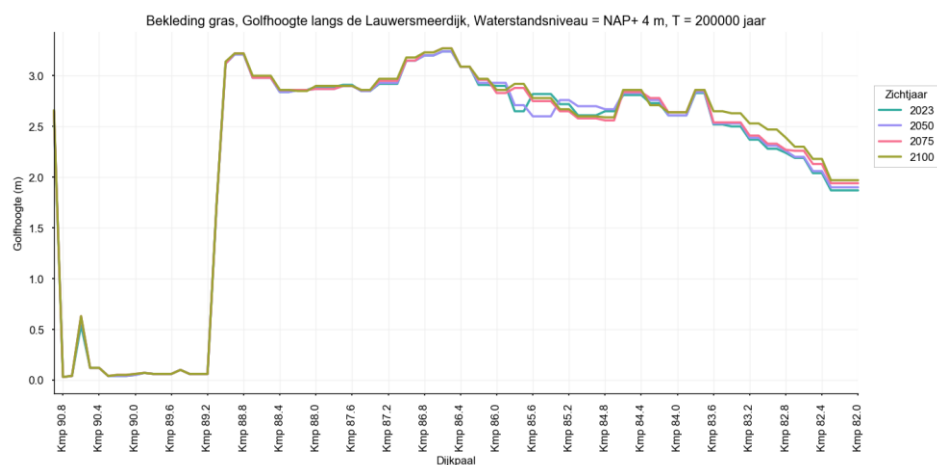


Figuur 143
Piekperiodes voor
betonblokken bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en de
signaalwaarde
(1/3.000 per jaar)

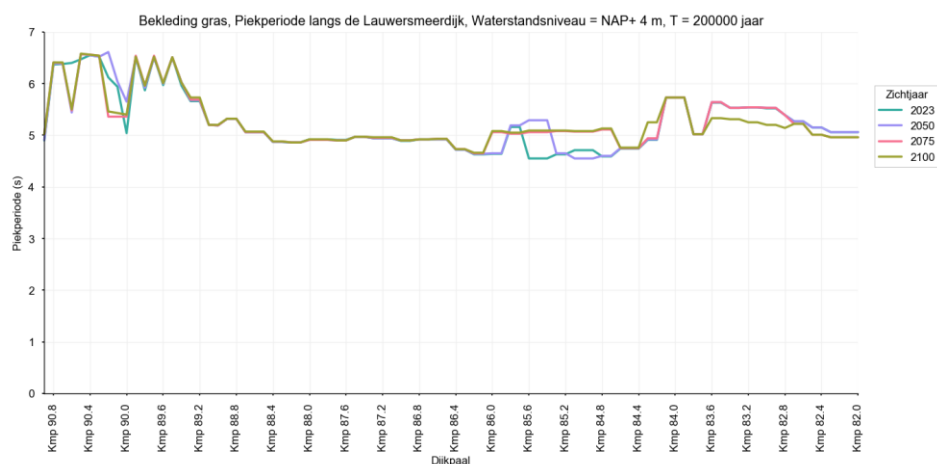


Golfrandvoorwaarden grasbekleding

Figuur 144
Significante
golfhoogten voor
grasbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en bij
de doorsnede eis
o.b.v. de
signaalwaarde
(1/200.000 per jaar)

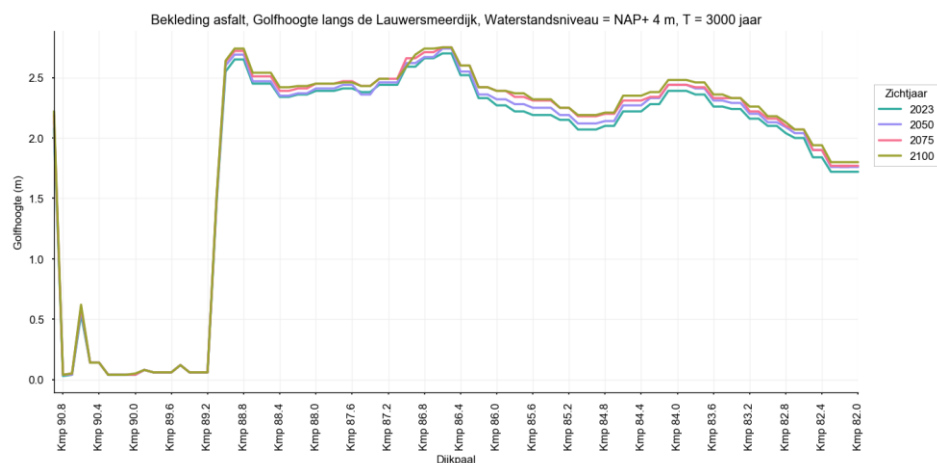


Figuur 145
Piekperioden voor
grasbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en bij
de doorsnede eis
o.b.v. de
signaalwaarde
(1/200.000 per jaar)

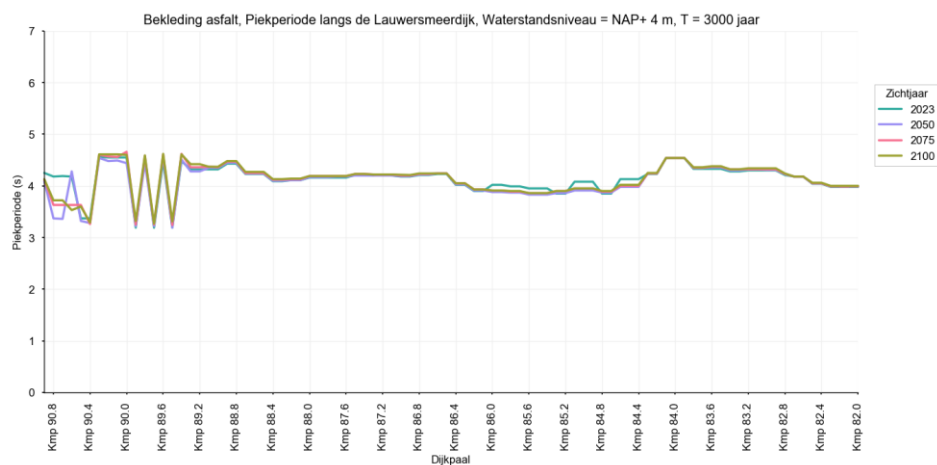


Golfrandvoorwaarden asfalt

Figuur 146
Significante
golfhoogten voor
asfaltbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en
signaalwaarde
(1/3.000 per jaar)



Figuur 147
Piekperioden voor
asfaltbekleding bij
waterstandsniveau
NAP +4,0 m en
signaalwaarde
(1/1.000 per jaar)



F

Faalkans en HBN per dijkpaal

Dijkpaal	Faalkans	HBN (doorsnede-eis=1/12.500) bij probabilistisch overslagdebiet zoals beschreven in de schematiseringhandleiding
82.1	291.000	6.32
82.2	32.800	6.62
82.3	35.100	6.59
82.4	45.600	6.59
82.5	43.600	6.58
82.6	63.500	6.45
82.7	55.400	6.53
82.8	45.500	6.59
82.9	40.100	6.6
83	50.900	6.56
83.1	56.000	6.66
83.2	45.600	6.85
83.3	28.800	6.97
83.4	32.800	6.99
83.5	38.000	6.93
83.6	56.800	6.9
83.7	45.700	6.98
83.8	48.300	6.98
83.9	71.000	6.88
84	89.900	6.91
84.1	84.800	6.87
84.2	102.000	6.83
84.3	119.600	6.73
84.4	114.600	6.74
84.5	156.100	6.68
84.6	140.300	6.72
84.7	330.100	6.49
84.8	185.900	6.62
84.9	173.400	6.64
85	148.000	6.66
85.1	216.700	6.53
85.2	222.200	6.56
85.3	256.700	6.57
85.4	354.800	6.48
85.5	275.600	6.5
85.6	291.700	6.53
85.7	353.000	6.49
85.8	248.700	6.6
85.9	376.400	6.5
86	303.700	6.58
86.1	178.000	6.75
86.2	212.800	6.71
86.3	170.100	6.79
86.4	168.800	6.79
86.5	103.300	6.83
86.6	114.000	6.83
86.7	208.400	7.05
86.8	286.000	7.05
86.9	266.700	7.02
87	254.900	7.1
87.1	205.300	7.27
87.2	257.600	7.15
87.3	264.600	7.11
87.4	226.200	7.16
87.5	316.500	7.03
87.6	552.400	6.89
87.7	307.100	7.03
87.8	322.300	7.01
87.9	219.700	7.06
88	198.300	7.1

88.1	443.700	6.86
88.2	351.300	6.95
88.3	480.500	6.86
88.4	345.500	6.91
88.5	225.900	7.05
88.6	278.300	6.99
88.7	303.000	6.97
88.8	185.900	7.16
88.9	307.900	6.99
89	123.700	7.23
89.1	953.00	7.26
89.2	8.359.100	5.62
89.3	13.579.000	5.62
89.4	17.374.200	5.63
89.5	12.217.200	5.69
89.6	23.232.100	5.56
89.7	16.221.900	5.6
89.8	14.987.00	5.56
89.9	177.000	5.55
90	195.700	5.33
90.1	141.900	5.31
90.2	131.900	5.34
90.3	126.000	5.33
90.4	204.800	5.28
90.5	257.700	5.27
90.6	27.900	5.88
90.7	420.700	5.14
90.8	385.000	5.13
90.9	2.377.500	6.52

H

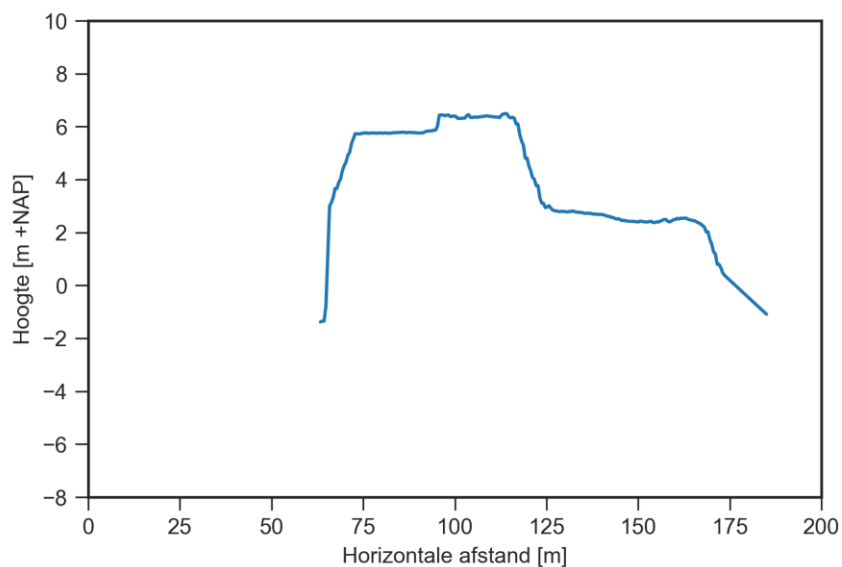
Relevantie van piping (STPH) langs de
Lauwersmeerdijk

I Vakindeling geotechnische sporen (STBI, STBU, STPH)

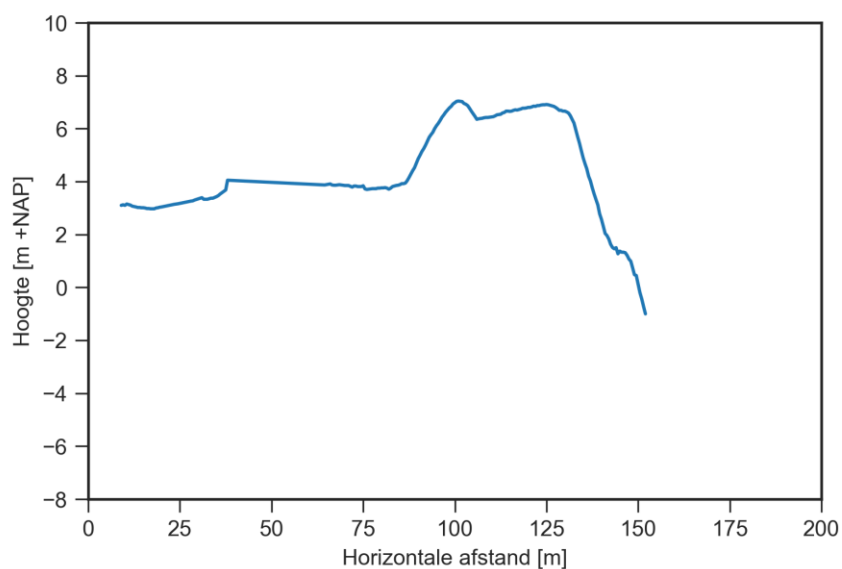
Maatgevende dwarsprofielen

In Figuur 148 t/m Figuur 157 is voor elk vak het maatgevende dwarsprofiel weergegeven.

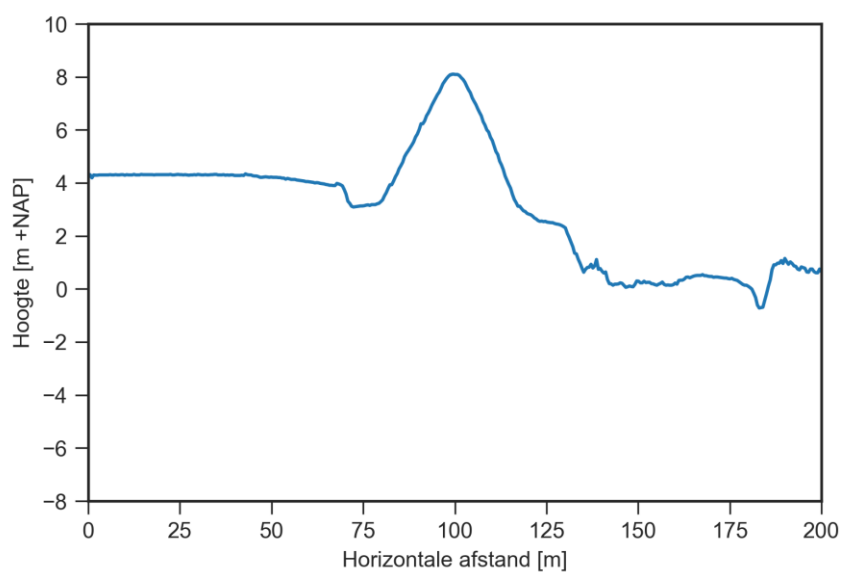
*Figuur 148
Maatgevend
dwarsprofiel vak 1-1*



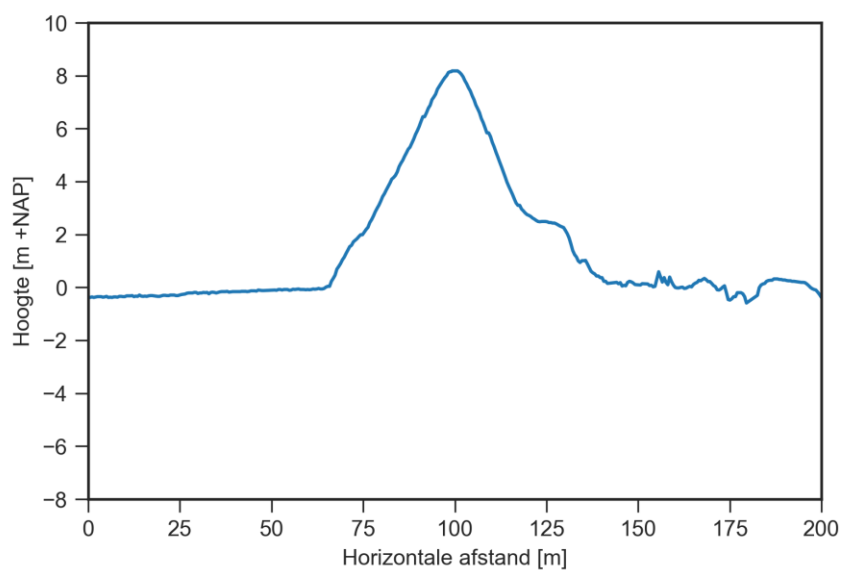
*Figuur 149
Maatgevend
dwarsprofiel vak 2-1*



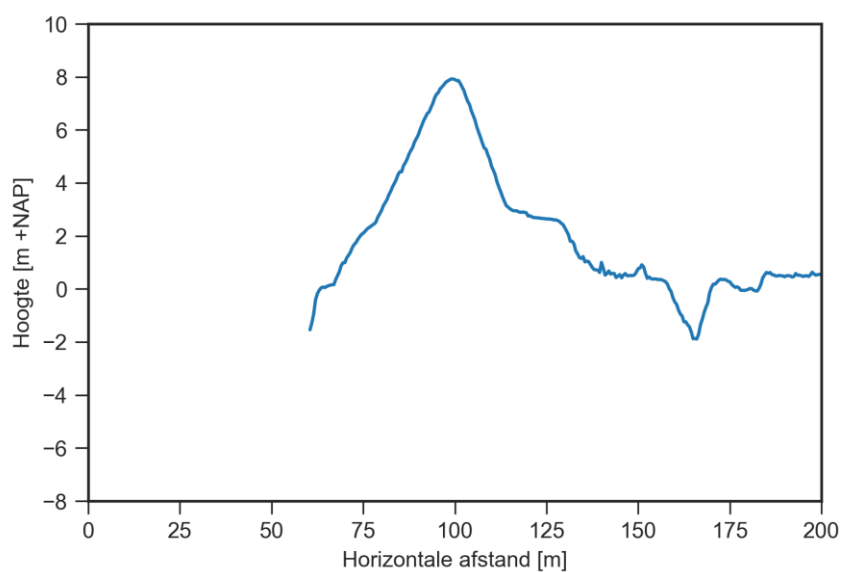
*Figuur 150
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3-1*



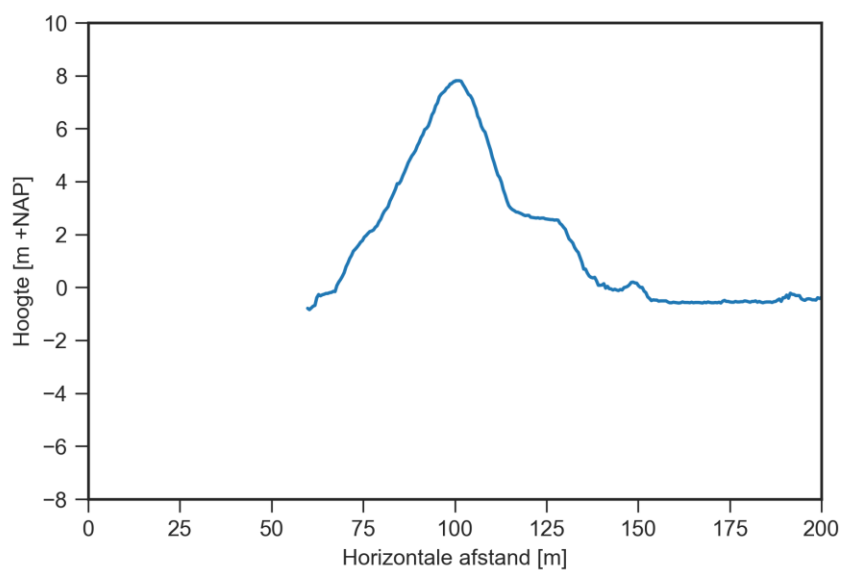
*Figuur 151
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3-2*



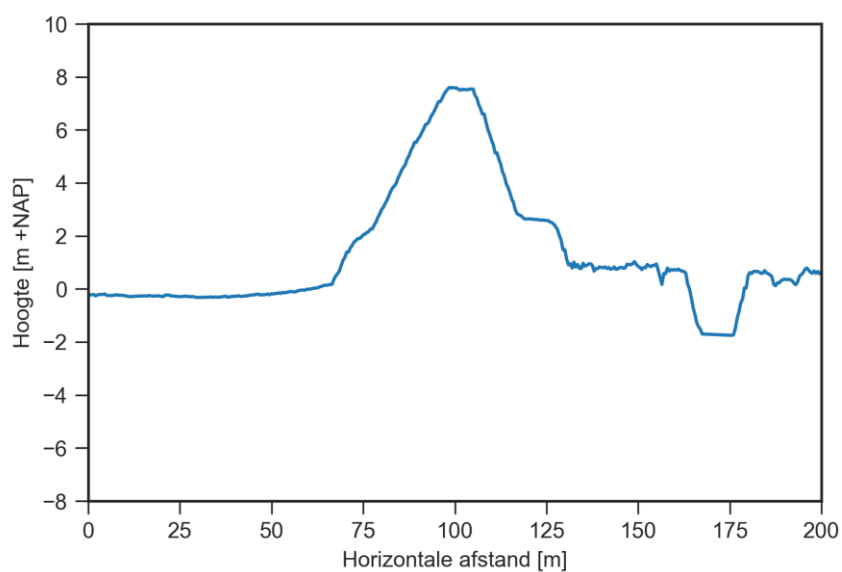
*Figuur 152
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3-3*



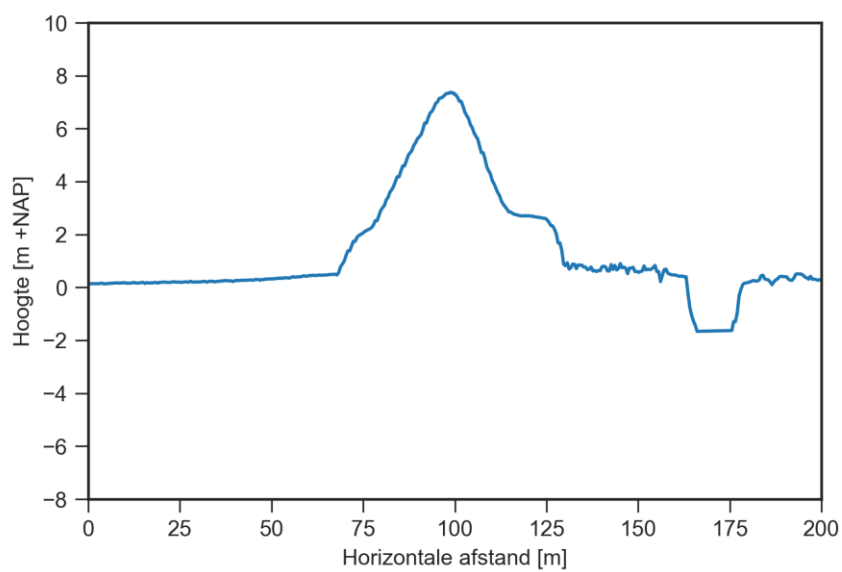
*Figuur 153
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3-4*



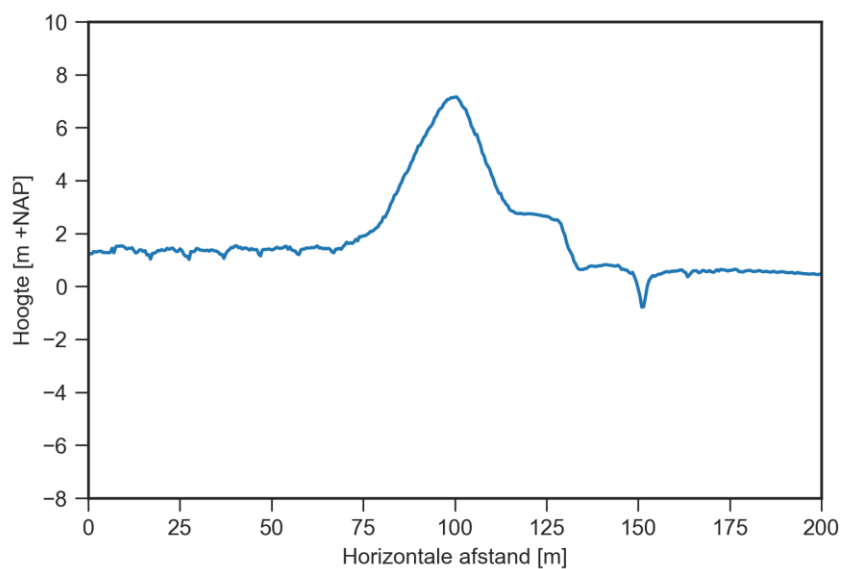
*Figuur 154
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3-5*



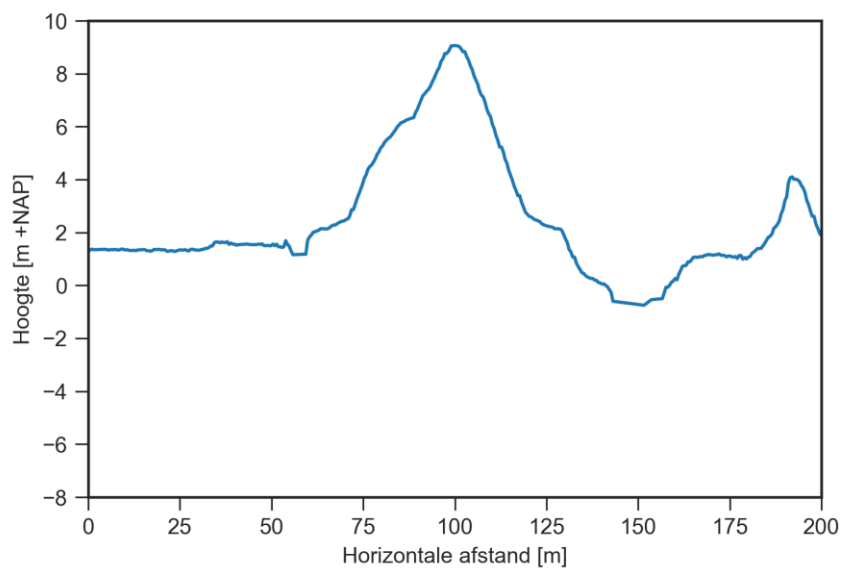
*Figuur 155
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3-6*



*Figuur 156
Maatgevend
dwarsprofiel vak 4-1*



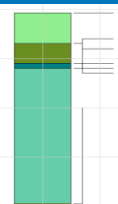
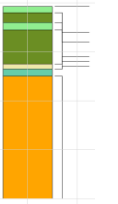
*Figuur 157
Maatgevend
dwarsprofiel vak 4-2*



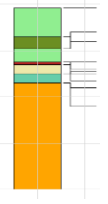
Grondopbouw

Per vak wordt bestudeerd welke ondergrondscenario's voorkomen en in welke mate. De laagliggingen van de scenario's worden per vak aangescherpt op basis van lokaal grondonderzoek. De uiteindelijke ondergrondscenario's per vak zijn weergegeven in Tabel 78 t/m Tabel 87. De kansen van voorkomen van de ondergrondscenario's per vak zijn weergegeven in Tabel 88. Deze kansen zijn gedefinieerd als het percentage van de vaklengte waarin een bepaald ondergrondscenario voorkomt.

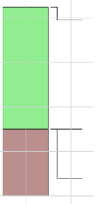
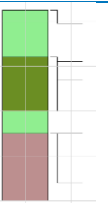
Tabel 78
Ondergrond
scenario's vak 1.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6027_1b1	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mp_k	-11	
	4	P_Ova_sd	-12	
	5	P_Rg_zm	-39,5	
6027_1b2	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-2	
	3	H_Mg_zk	-4	
	4	H_Mkw_z&k	-5,5	
	5	P_Wdz_zf	-12,5	
	6	P_Ova_sd	-13,5	
	7	P_Rg_zm	-15	

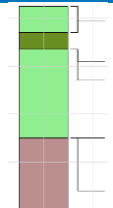
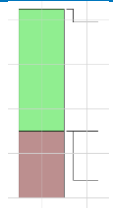
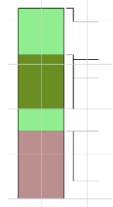
Tabel 79
Ondergrond
scenario's vak 2.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6026_1b1	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mg_zk	-9,5	
	4	H_Vbv_v	-12,5	
	5	P_Wdz_zf	-13	
	6	P_Ova_sd	-15	
	7	P_Rg_zm	-17	
6026_1b2	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mp_k	-10	
	3	H_Vbv_v	-12	
	4	P_Wdz_zf	-12,5	
	5	P_Ova_sd	-14	
	6	P_Rg_zm	-15,5	

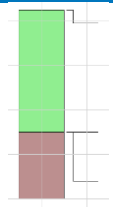
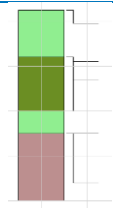
Tabel 80
Ondergrond
scenario's vak 3.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-8	
	3	H_Mg_zk	-20	
	4	P_Om_zf	-25	

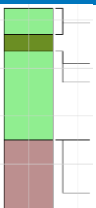
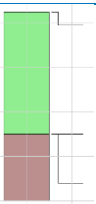
Tabel 81
Ondergrond
scenario's vak 3.2

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b1	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-2	
	3	H_Mg_zk	-4	
	4	P_Om_zf	-25	
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mg_zk	-15	
	4	P_Om_zf	-25	

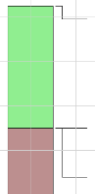
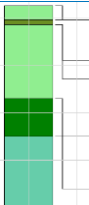
Tabel 82
Ondergrond
scenario's vak 3.3

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-10	
	3	H_Mg_zk	-20	
	4	P_Om_zf	-25	

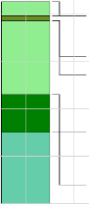
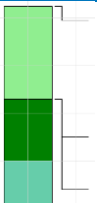
Tabel 83
Ondergrond
scenario's vak 3.4

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b1	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-3	
	3	H_Mg_zk	-6,5	
	4	P_Om_zf	-25	
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Om_zf	-25	

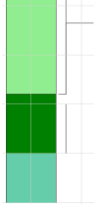
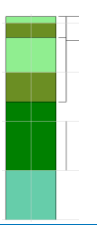
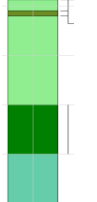
Tabel 84
Ondergrond
scenario's vak 3.5

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b4	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-0,5	
	3	H_Mg_zk	-2	
	4	P_Mg_zk	-17	
	5	P_Ova_sd	-25	

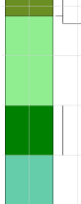
Tabel 85
Ondergrond
scenario's vak 3.6

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b4	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	H_Mkw_z&k	-0,5	
	3	H_Mg_zk	-1,5	
	4	P_Mg_zk	-17	
	5	P_Ova_sd	-25	
6025_1b5	1	H_Mg_zk	2,5	
	2	P_Mg_zk	-17	
	3	P_Ova_sd	-30	

Tabel 86
Ondergrond
scenario's vak 4.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b1	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	P_Mg_zk	-18	
	3	P_Ova_sd	-30	
6024_1b2	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	0	
	3	H_Mg_zk	-3	
	4	H_Mkw_z&k	-10	
	5	P_Mg_zk	-16	
	6	P_Ova_sd	-30	
6024_1b3	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	-1	
	3	H_Mg_zk	-2	
	4	P_Mg_zk	-20	
	5	P_Ova_sd	-30	

Tabel 87
Ondergrond
scenario's vak 4.2

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b3	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	1,25	
	3	H_Mg_zk	-2,5	
	4	P_Mg_zk	-20	
	5	P_Ova_sd	-30	

We merken op dat slechts van de eerste 100m (van de in totaal 300m) van vak 4.2 lokaal grondonderzoek beschikbaar is. We nemen aan dat de grondopbouw in de rest van dit vak gelijk is.

Tabel 88
Kansen ondergrond
scenario's STBI.

Vak	Scenario	Scenariokans
1-1	6027_1b1	65%
	6027_1b2	35%
2-1	6026_1b1	38%
	6026_1b2	62%
3-1	6025_1b1	0%
	6025_1b2	72%
	6025_1b3	28%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-2	6025_1b1	14%
	6025_1b2	70%
	6025_1b3	16%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-3	6025_1b1	0%
	6025_1b2	22%
	6025_1b3	78%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-4	6025_1b1	26%
	6025_1b2	74%
	6025_1b3	0%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-5	6025_1b1	0%
	6025_1b2	35%
	6025_1b3	0%
	6025_1b4	65%
	6025_1b5	0%
3-6	6025_1b1	0%
	6025_1b2	0%
	6025_1b3	0%
	6025_1b4	71%
	6025_1b5	29%
4-1	6024_1b1	25%
	6024_1b2	50%
	6024_1b3	25%
4-2	6024_1b1	0%
	6024_1b2	0%
	6024_1b3	100%

Bij de beoordeling STBI wordt van grof naar fijn gewerkt. Dit betekent dat in eerste instantie wordt gezocht naar het maatgevende ondergrondscenario per vak, indien dit eenvoudig te bepalen is. Indien het vak voldoet voor STBI voor dit scenario, hoeven de andere scenario's niet berekend te worden, omdat het oordeel hierdoor nog gunstiger zal uitvallen. Als het maatgevende scenario niet voldoet, worden ook de andere scenario's berekend. Tabel 89

geeft voor de verschillende vakken aan welk scenario maatgevend is, en welke dus berekend worden. In de meeste gevallen is het maatgevende scenario niet eenduidig aan te wijzen. In dat geval worden meerdere scenario's berekend.

Bij het bepalen van de maatgevende scenario's is gebruik gemaakt van de sterkteparameters van de verschillende grondlagen. Hierbij is voor de meeste vakken vooral het verschil tussen H_Mkw_z&k en H_Mk_zk. Van deze twee heeft H_Mkw_z&k een grotere sterkte (ϕ). Echter, indien H_Mkw_z&k relatief hoog voorkomt in de ondergrond kan deze zich gedragen als deklaag en opbarsten. De sterkte van deze laag wordt dan gereduceerd tot 0 en wordt dus lager dan de sterkte van H_Mk_zk.

*Tabel 89
Maatgevende
ondergrond
scenario's*

Vak	Maatgevende scenario ('s)	Uitleg
1-1	6027_1b1 en 6027_1b2	Maatgevende scenario niet eenduidig aan te wijzen
2-1	6026_1b1 en 6026_1b2	Maatgevende scenario niet eenduidig aan te wijzen
3-1	6025_1b2	In dit scenario komt alleen H_Mk_zk voor, met een relatief hoge sterkte. In scenario 6026_1b3 komt ook een relatief diepe laag H_Mkw_z&k voor.
3-2	6025_1b1 en 6025_1b2	6025_1b2 is maatgevend over 6025_1b3 (zie 3.1). Echter, indien de relatief hoge deklaag H_Mkw_z&k in 6025_1b1 opbarst, zou dit scenario ook maatgevend kunnen zijn.
3-3	6025_1b2	Zelfde redeneratie als 3-1
3-4	6025_1b1 en 6025_1b2	Indien de deklaag H_Mkw_z&k opbarst, kan scenario 6025_1b1 maatgevend zijn. Anders is 6025_1b2 maatgevend.
3-5	6025_1b2 en 6025_1b4	Indien de deklaag H_Mkw_z&k opbarst, kan scenario 6025_1b4 maatgevend zijn. Anders is 6025_1b2 maatgevend.
3-6	6025_1b4 en 6025_1b5	Indien de deklaag H_Mkw_z&k opbarst, kan scenario 6025_1b4 maatgevend zijn. Anders is 6025_1b5 maatgevend.
4-1	6024_1b1, 6024_1b2 en 6024_1b3	Indien de deklaag H_Mkw_z&k opbarst, kunnen 6024_1b2 en 6024_1b3 beide maatgevend zijn. Anders is 6024_1b1 maatgevend.
4-2	6024_1b3	Slechts 1 scenario aanwezig.

J.4

Glijvlakken STBI

K

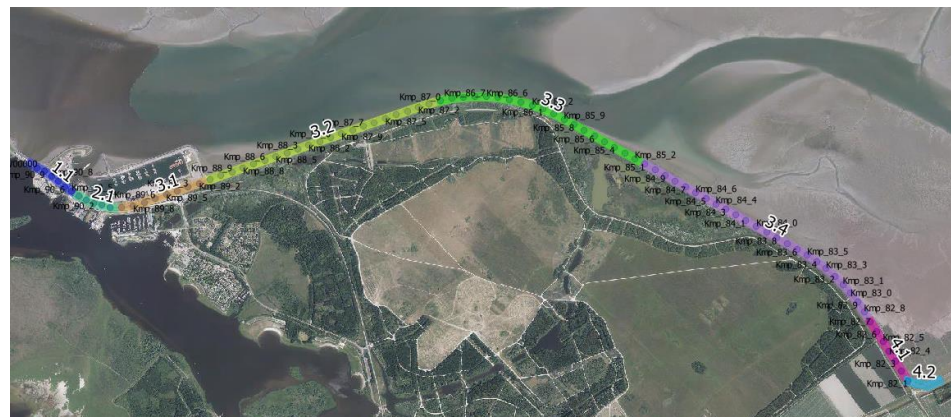
Vakindeling, ondergrond en beoordeling STBU

K.1

Vakindeling

De vakindeling voor STBU is te zien in [Figuur 158](#). Het eerste cijfer van een vak correspondeert met het bijbehorende basisvak SOS segment: vak 1 is SOS segment 6027, vak 2 is SOS segment 6026, vak 3 is SOS segment 6025 en vak 4 is SOS segment 6024. Een verdere verdeling in vakken van een SOS segment is aangegeven met het tweede cijfer. Vakken 4-1 en 4-2 bijvoorbeeld zijn twee vakken als gevolg van een verdere verdeling van basisvak 4 (SOS segment 6024).

*Figuur 158
Vakindeling voor het
faalmechanisme
STBU.*



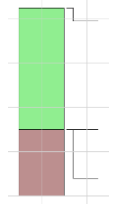
Vakken 1 en 2 (SOS segmenten 6027 en 6026) zijn niet verder onderverdeeld. Vak 3 (SOS segment 6025) is onderverdeeld in vier vakken, waarbij met name de geometrie ter plaatse van de haven (vak 3-1) en het voorland ter plaatse van het Vierhuizergat (vak 3-3) bepalend zijn geweest voor de verfijning van de vakindeling. Voor vak 4 (SOS segment 6024) gaat de dijk ter plaatse van vak 4-2 'de bocht om' waarbij de dijkgeometrie dusdanig verandert dat een nieuw vak zinvol is.

K.2

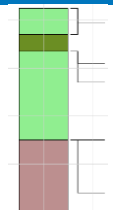
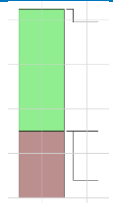
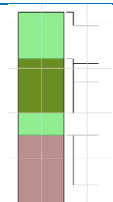
Aanscherping ondergrondscenario's

De aangescherpte vakindeling heeft voor de vakken 3 en 4 geleid tot een onderverdeling in een aantal kleinere vakken. Voor deze kleinere vakken zijn, op basis van het geotechnisch lengteprofiel, de ondergrondscenario's aangescherpt. Deze aanscherping is terug te zien in wijzigingen in de laagliggingen van de ondergrondscenario's. Daarnaast zijn ondergrondscenario's die niet meer in de kleinere vakken terug te zien weggelaten. Het resultaat van de aanscherping voor de vakken 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 4-1 en 4-2 is terug te vinden in de Tabel 90 - Tabel 95.

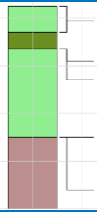
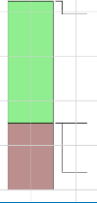
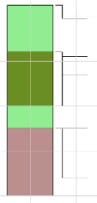
Tabel 90
Te beoordelen
ondergrond
scenario's vak 3-1

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	H_Mkw_z&k	-8	
	3	H_Mg_zk	-20	
	4	P_Om_zf	-25	

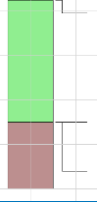
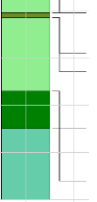
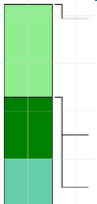
Tabel 91
Te beoordelen
ondergrond
scenario's vak 3-2

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b1	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	H_Mkw_z&k	-2	
	3	H_Mg_zk	-4	
	4	P_Om_zf	-25	
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mg_zk	-15	
	4	P_Om_zf	-25	

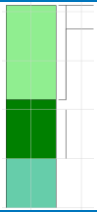
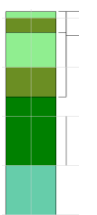
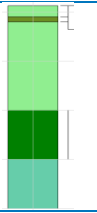
Tabel 92
Te beoordelen
ondergrond
scenario's vak 3-3

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b1	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	H_Mkw_z&k	-3	
	3	H_Mg_zk	-4.5	
	4	P_Om_zf	-25	
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	H_Mkw_z&k	-10	
	3	H_Mg_zk	-20	
	4	P_Om_zf	-25	

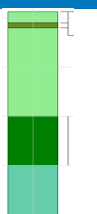
Tabel 93
Te beoordelen
ondergrond
scenario's vak 3-4.

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b2	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b4	1	H_Mg_zk	2,50	
	2	H_Mkw_z&k	-0,5	
	3	H_Mg_zk	-2	
	4	P_Mg_zk	-17	
	5	P_Ova_sd	-25	
6025_1b5	1	H_Mg_zk	0	
	2	P_Mg_zk	-17	
	3	P_Ova_sd	-30	

Tabel 94
Te beoordelen
ondergrond
scenario's vor vak 4-
1.

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b1	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	P_Mg_zk	-18	
	3	P_Ova_sd	-30	
6024_1b2	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	-1	
	3	H_Mg_zk	-3	
	4	H_Mkw_z&k	-10	
	5	P_Mg_zk	-16	
	6	P_Ova_sd	-30	
6024_1b3	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	-1	
	3	H_Mg_zk	-2,5	
	4	P_Mg_zk	-20	
	5	P_Ova_sd	-30	

Tabel 95
Te beoordelen
ondergrond
scenario's voor vak
4-2.

Scenario	Laag- nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b3	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	-1	
	3	H_Mg_zk	-2,5	
	4	P_Mg_zk	-20	
	5	P_Ova_sd	-30	

K.3

Kansen voor de ondergrondscenario's

Op basis van het geotechnisch lengteprofiel zijn ook de ondergrondscenariokansen aangescherpt. Deze zijn te zien in [Tabel 88](#).

*Tabel 96
Ondergrondscenario-
kansen voor de
STBU vakindeling.*

Vak	Scenario	Scenariokans
1-1	6027_1b1	65%
	6027_1b2	35%
2-1	6026_1b1	38%
	6026_1b2	62%
3-1	6025_1b1	0%
	6025_1b2	72%
	6025_1b3	28%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-2	6025_1b1	8%
	6025_1b2	75%
	6025_1b3	17%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-3	6025_1b1	33%
	6025_1b2	33%
	6025_1b3	34%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-4	6025_1b1	0%
	6025_1b2	55%
	6025_1b3	0%
	6025_1b4	39%
	6025_1b5	6%
4-1	6024_1b1	25%
	6024_1b2	50%
	6024_1b3	25%
4-2	6024_1b1	0%
	6024_1b2	0%
	6024_1b3	100%

K.4

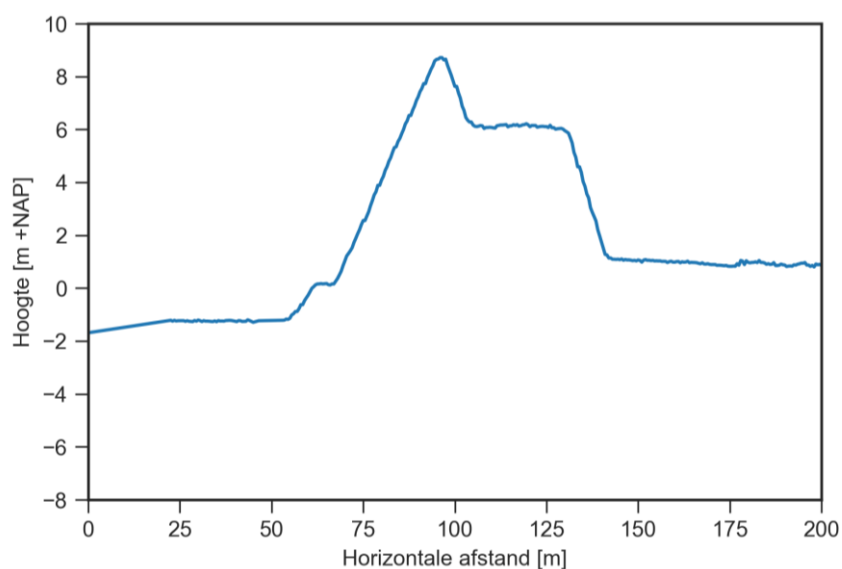
Maatgevende profielen

De maatgevende profielen per vak zijn gekozen op basis van de volgende criteria:

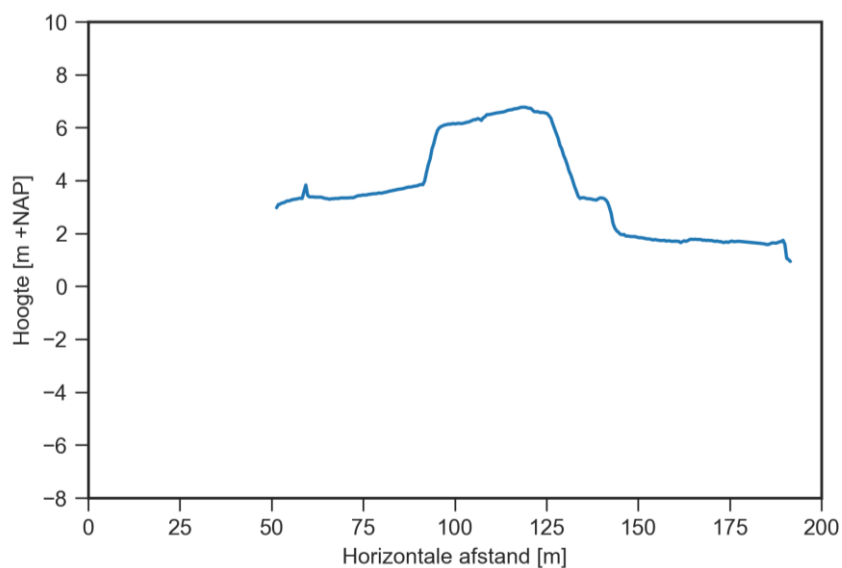
- Steilheid buitentalud: hoe steiler het buitentalud, hoe ongunstiger het resultaat;
- Niveau teen/bodemligging buitenwaterzijde: hoe lager de teen/bodemligging aan de buitenwaterzijde, hoe ongunstiger het resultaat;

De maatgevende profielen zijn te zien in [Figuur 159](#) - [Figuur 166](#).

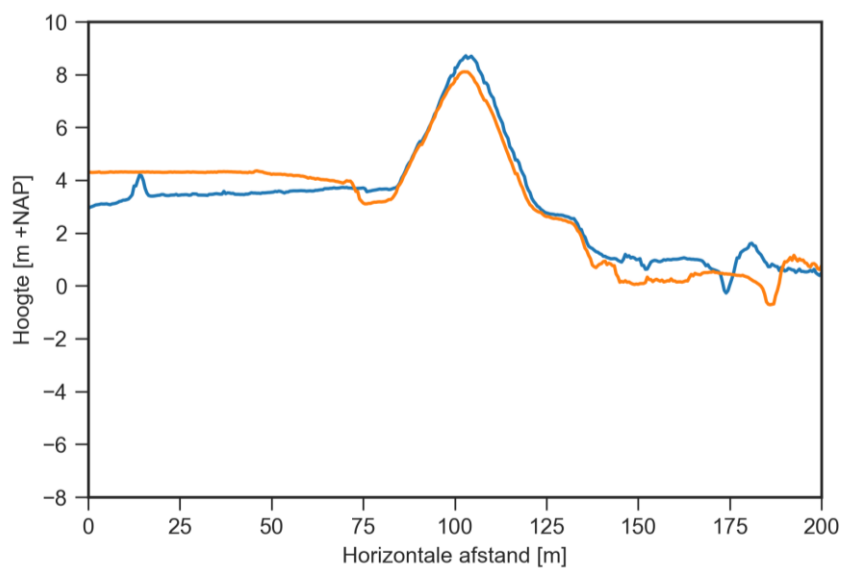
*Figuur 159
Maatgevend profiel
(ter hoogte van
Kmp_91.0) voor vak
1-1.*



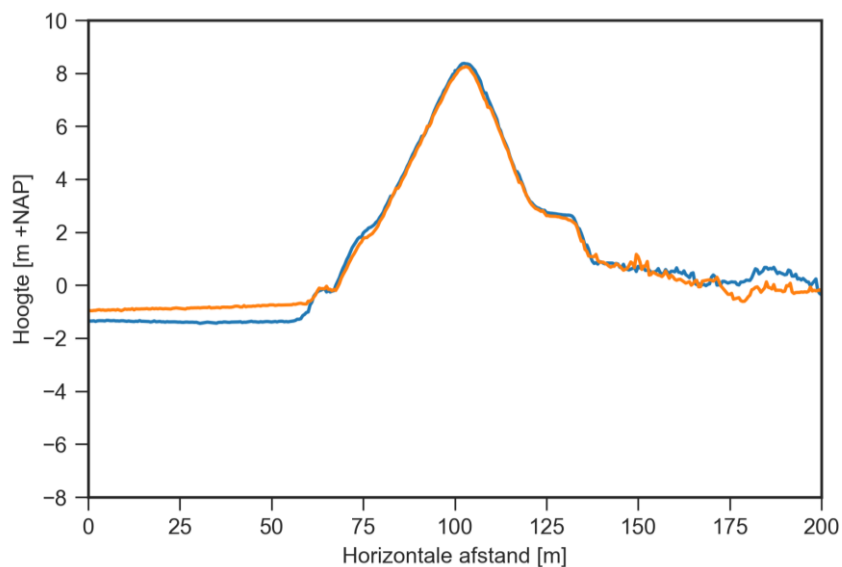
*Figuur 160
Maatgevend profiel
(ter hoogte van
Kmp_90.3) voor vak
2-1.*



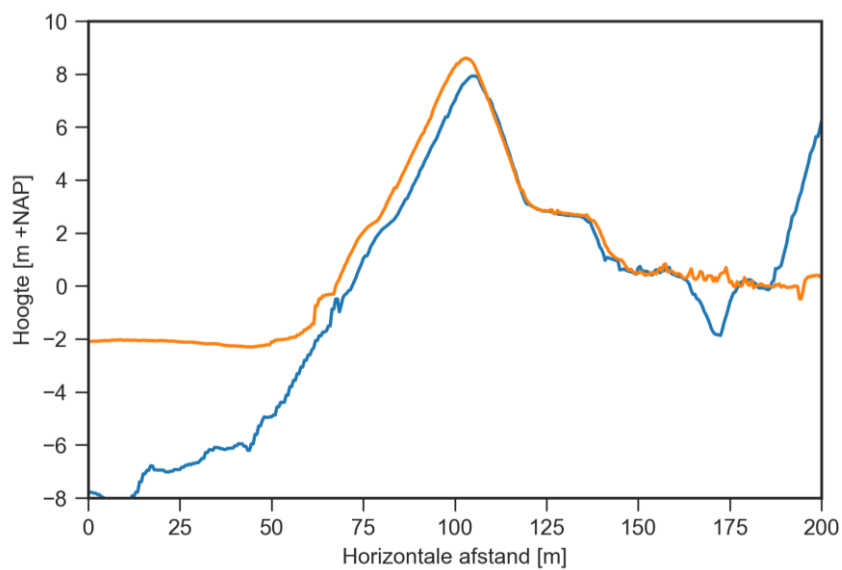
*Figuur 161
Twee potentieel
maatgevende
profielen (ter hoogte
van Kmp_89.3 en
Kmp_89.2) voor vak
3-1.*



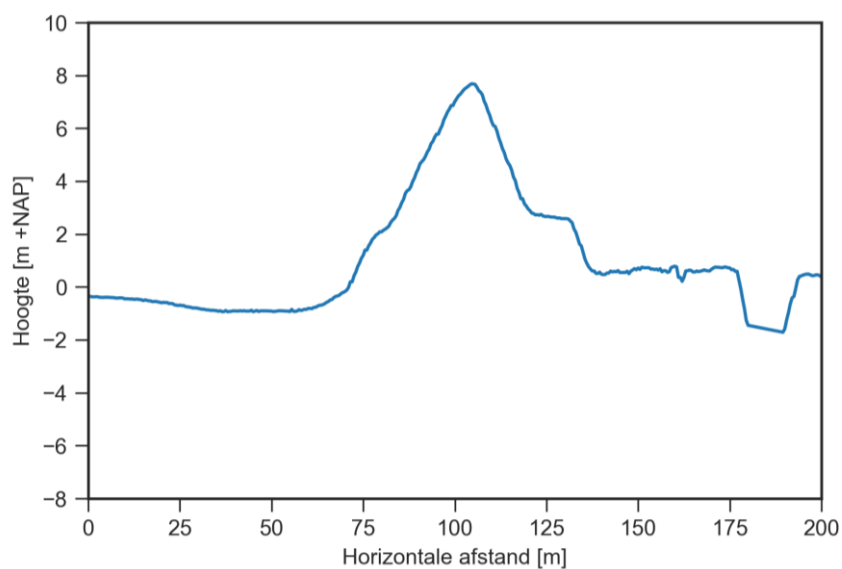
*Figuur 162
Twee potentieel
maatgevende
profielen (ter hoogte
van Kmp_88.5 en
Kmp_89.0) voor vak
3-2.*



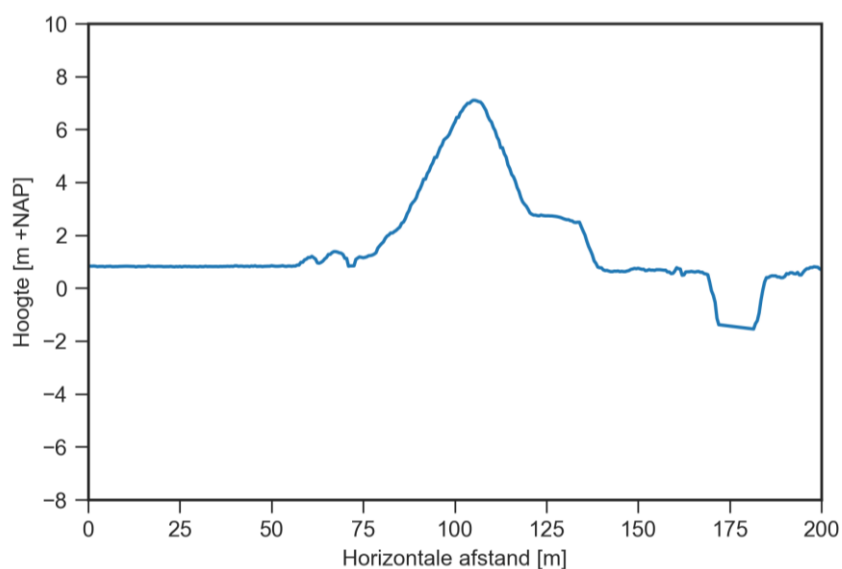
*Figuur 163
Twee potentieel
maatgevende
profielen (ter hoogte
van Kmp_86.2 en
Kmp_87.0) voor vak
3-3.*



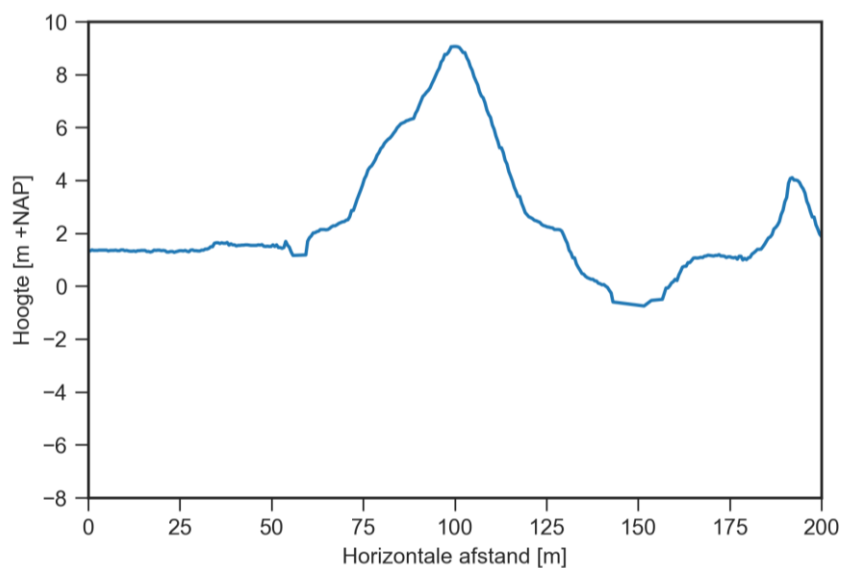
*Figuur 164
Maatgevend profiel
(ter hoogte van
Kmp_84.0) voor vak
3-4.*



*Figuur 165
Maatgevend profiel
(ter hoogte van
Kmp_82.7) voor vak
4-1.*



*Figuur 166
Maatgevend profiel
(ter hoogte van
Kmp_81.9) voor vak
4-2.*



Eenvoudige beoordeling

De invoer en de resultaten van de eenvoudige beoordeling per vak zijn te zien in Tabel 97. Voor alle vakken geldt dat de faalkans niet verwaarloosbaar is, en dat deze vakken verder beoordeeld moeten worden.

Tabel 97
Invoer en resultaat
van de eenvoudige
beoordeling.

Vak	Oordeel EB	Type Water- kering	Constructieve elementen aanwezig	Type dijk	Veenlaag hoger dan maaiveld	Kruin- breedte [m]	Breedte voorland [m]	Helling binnen- talud [-]	Dijk- hoogte [m]	Dikte cohesieve laag [m]	Buiten- waterstand [m]
1-1	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	30	30	4	7.5	2	6.18
2-1	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	25	40	2	1.9	2	1.5
3-1	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	4	80	4	5.4	12	1.94
3-2	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	4	50	5	8.93	8	6.5
3-3	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	4	0	4	9.51	1.5	6.6
3-4	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	4	0	4	8.62	1.5	6
4-1	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	4	50	4	6.4	3	4.4
4-2	Verder beoordelen	dijk	nee	zand	nee	4	50	3	7.9	3	4

Gedetailleerde beoordeling

De gedetailleerde beoordeling is uitgevoerd met de software D-GeoStability versie 18.1. De berekeningen zijn uitgevoerd met het Bishop glijvlakmodel. Vanwege de zandige dijklichamen worden relatief kleine, cirkelvormige, maatgevende glijvlakken verwacht. Deze glijvlakken kunnen met het model Bishop goed gemodelleerd worden.

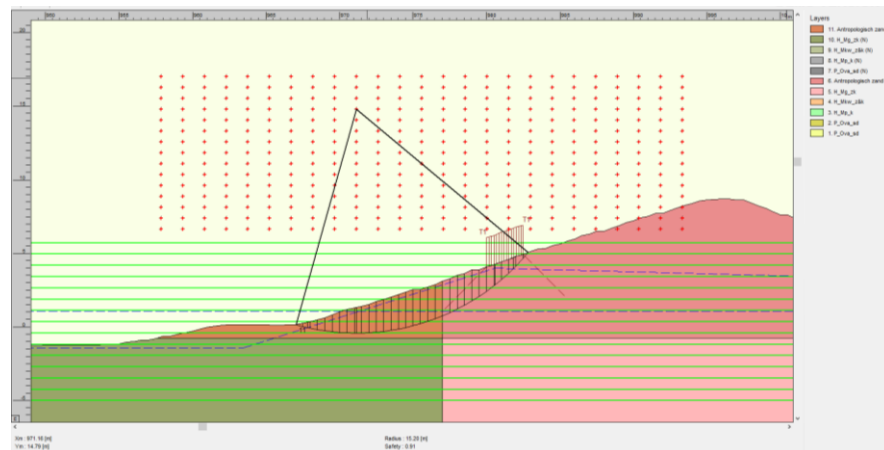
De gedetailleerde beoordeling is trapsgewijs uitgevoerd. Eerst is per vak een enkel ondergrondscenario doorgererekend. Indien het maatgevende glijvlak door grondlagen gaat die identiek zijn in alle scenario's, is aangenomen dat de stabiliteitsfactoren identiek zijn voor deze scenario's. De stabiliteitsfactoren per vak en per ondergrondscenario zijn te zien in Tabel 98. Cursieve stabiliteitsfactoren geven aan dat voor die scenario's is aangenomen dat de resultaten identiek zijn aan de andere scenario's.

*Tabel 98
Ondergrondscenario
kansen voor de
STBU vakindeling.*

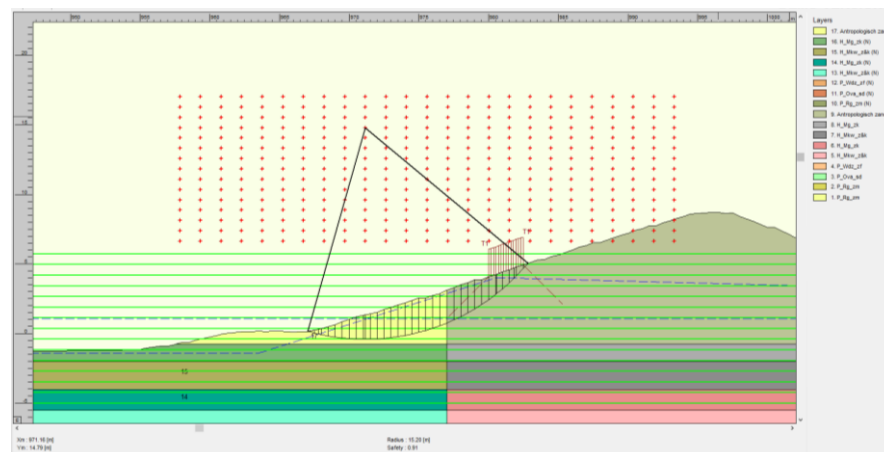
Vak	Scenario	Scenariokans	Stabiliteitsfactor
1-1	6027_1b1	65%	0,91
	6027_1b2	35%	0,91
2-1	6026_1b1	38%	0,70
	6026_1b2	62%	0,70
3-1	6025_1b1	0%	-
	6025_1b2	72%	1,03
	6025_1b3	28%	1,03
	6025_1b4	0%	-
	6025_1b5	0%	-
3-2	6025_1b1	8%	1,04
	6025_1b2	75%	1,04
	6025_1b3	17%	1,04
	6025_1b4	0%	-
	6025_1b5	0%	-
3-3	6025_1b1	33%	1,05
	6025_1b2	33%	1,05
	6025_1b3	34%	1,05
	6025_1b4	0%	-
	6025_1b5	0%	-
3-4	6025_1b1	0%	-
	6025_1b2	55%	0,82
	6025_1b3	0%	-
	6025_1b4	39%	0,81
	6025_1b5	6%	0,82
4-1	6024_1b1	25%	1,07
	6024_1b2	50%	1,07
	6024_1b3	25%	1,07
4-2	6024_1b1	0%	-
	6024_1b2	0%	-
	6024_1b3	100%	0,96

De bijbehorende maatgevende glijvlakken zijn te zien in Figuur 167 - Figuur 177. Puur op basis van de gevonden stabiliteitsfactoren voldoet geen enkel vak aan de minimale stabiliteitsfactoreis. Het valt echter op dat in de maatgevende glijvlakken voor de vakken 2-1, 3-1 en 3-4 erg klein en ondiep zijn. Het glijvlak van vak 3-3 is ook relatief klein en ondiep. Al deze glijvlakken zijn nader beschouwd met de 'safety overview' modus van D-Geo Stability. Dit is een modus die alleen mogelijk is in combinatie met het Bishop model. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 178 - Figuur 181. Indien vlakken oranje of rood gekleurd zijn, betekent dit dat er gebieden zijn waar glijvlakken een stabiliteitsfactor heeft die lager is dan de Bishop eis van 1,15. Dit betekent dat vakken 2-1 en 3-4 alsnog niet voldoen. Vak 3-3 is uit conservatieve overwegingen alsnog als niet voldoende beoordeeld. Vak 3-1 heeft een zeer klein en ondiep gebied waar de stabiliteitsfactor lager is dan 1,15, en is op basis van deze analyse alsnog als voldoende beoordeeld.

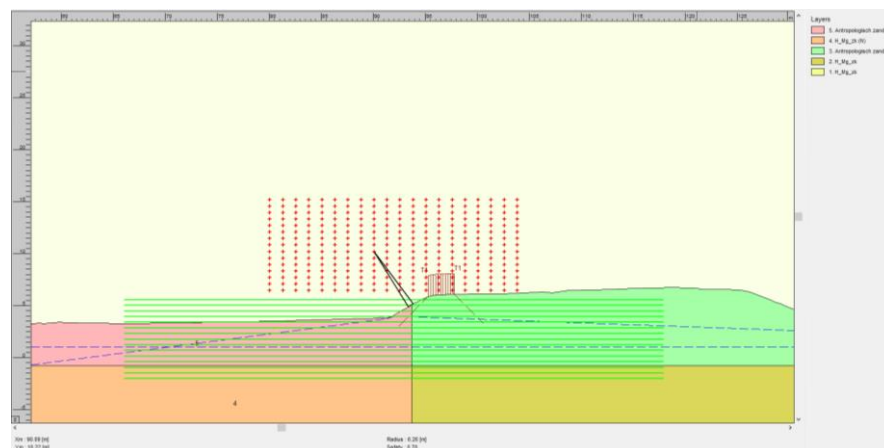
Figuur 167
Maatgevend glijvlak
voor vak 1-1
scenario 1b1.



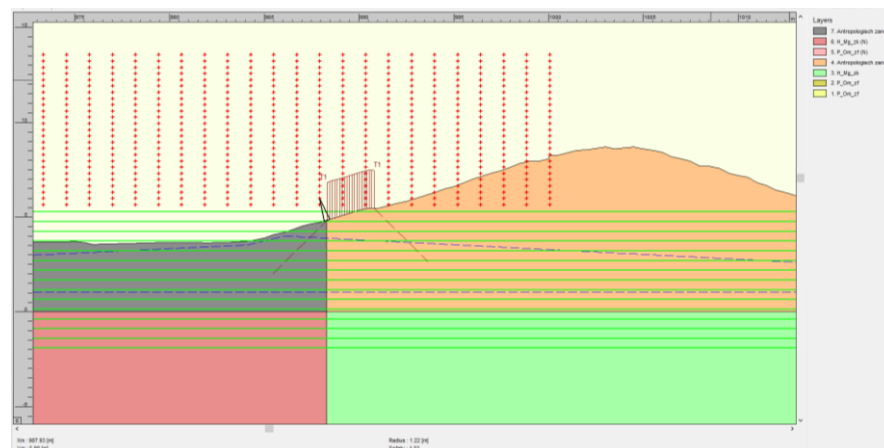
Figuur 168
Maatgevend glijvlak
voor vak 1-1
scenario 1b2.



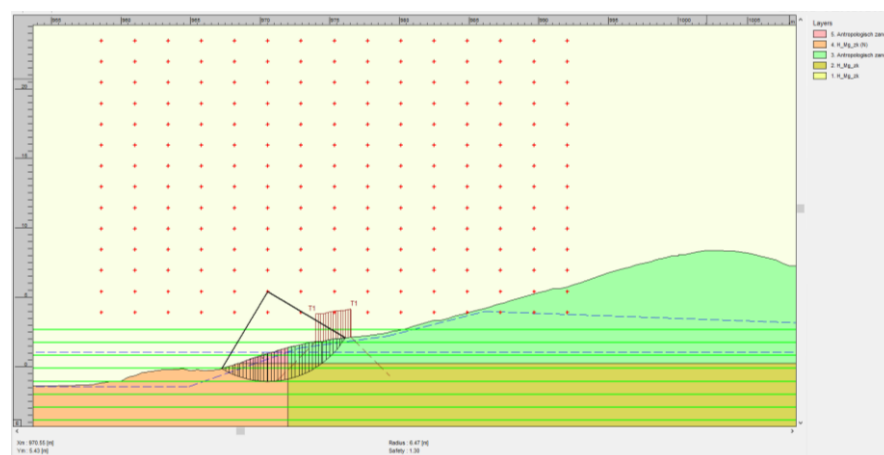
*Figuur 169
Maatgevend glijvlak
voor vak 2-1
scenario 1b2.*



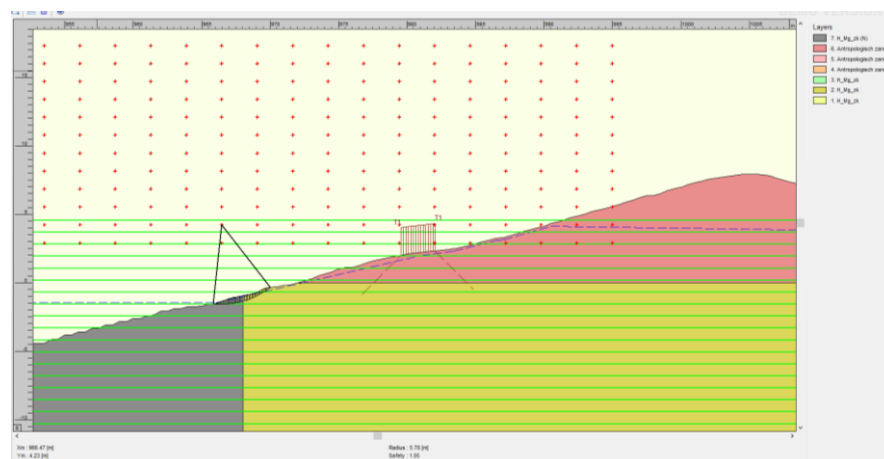
*Figuur 170
Maatgevend glijvlak
voor vak 3-1
scenario 1b2.*



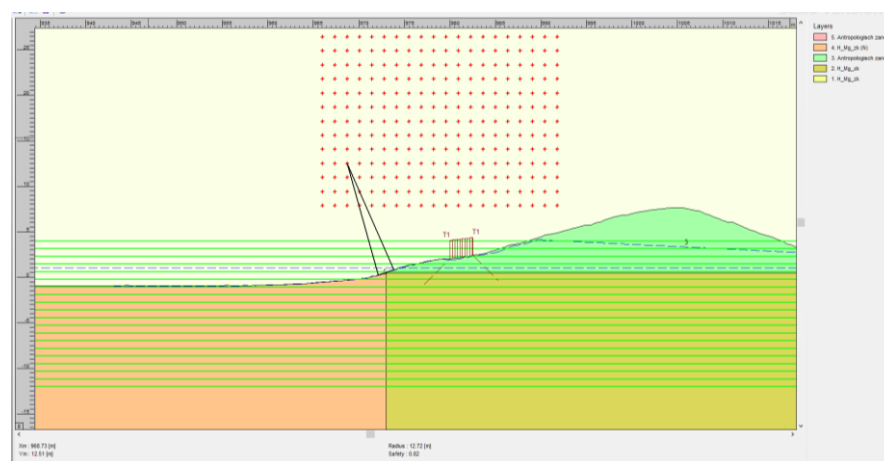
*Figuur 171
Maatgevend glijvlak
voor vak 3-2
scenario 1b2.*



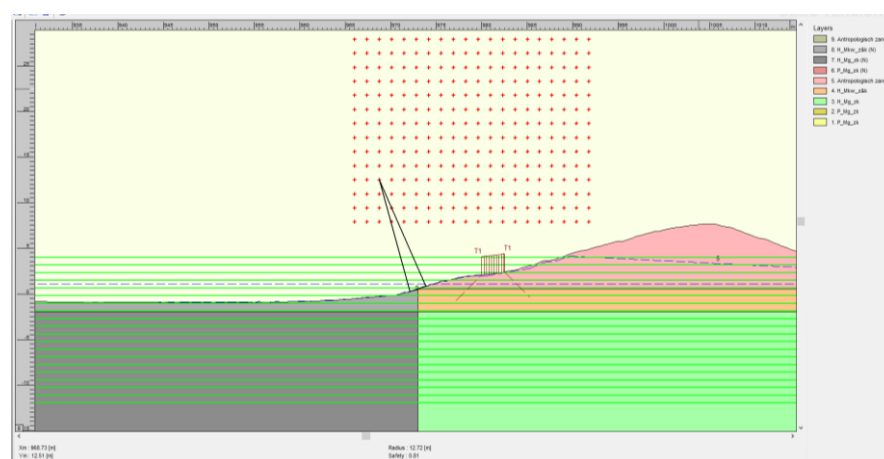
*Figuur 172
Maatgevend glijvlak
voor vak 3-3
scenario 1b2.*



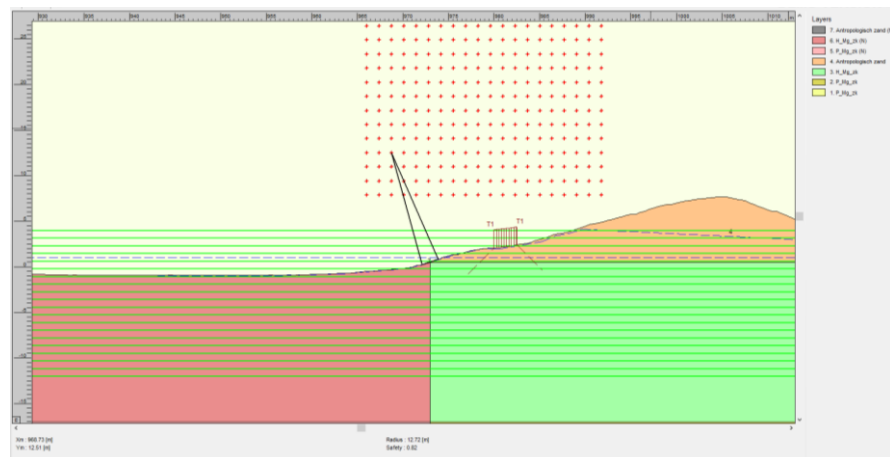
*Figuur 173
Maatgevend glijvlak
voor vak 3-4
scenario 1b2.*



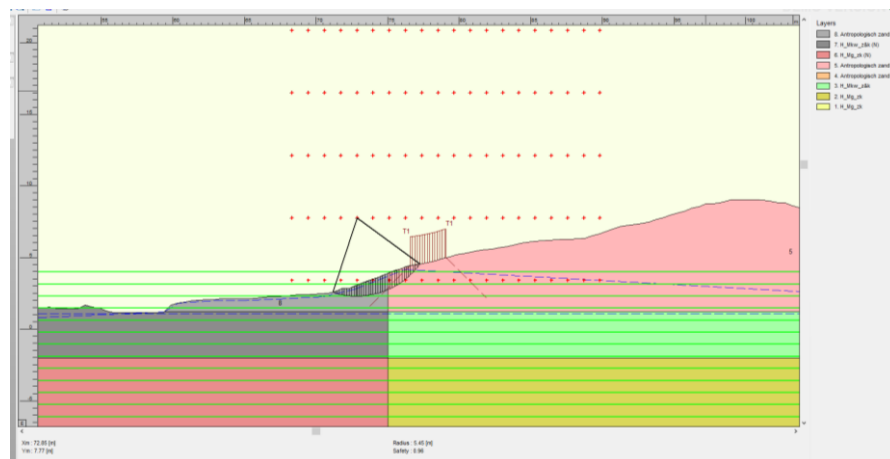
*Figuur 174
Maatgevend glijvlak
voor vak 3-4
scenario 1b4.*



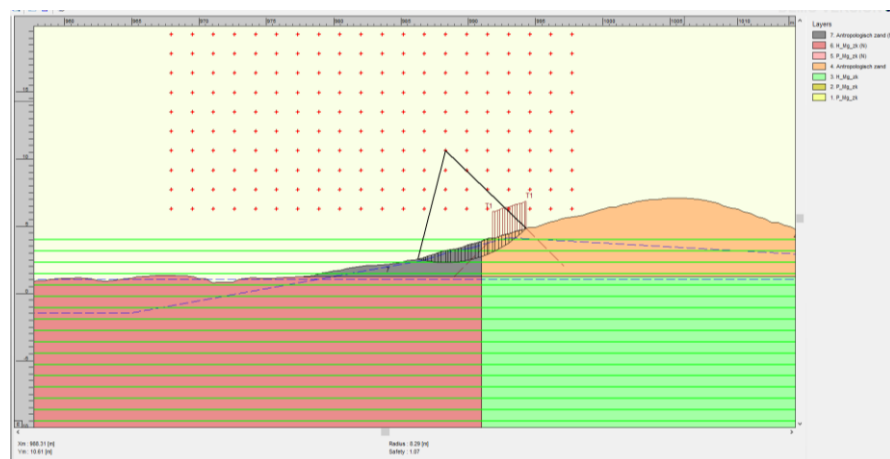
Figuur 175
Maatgevend glijvlak
voor vak 3-4
scenario 1b5.



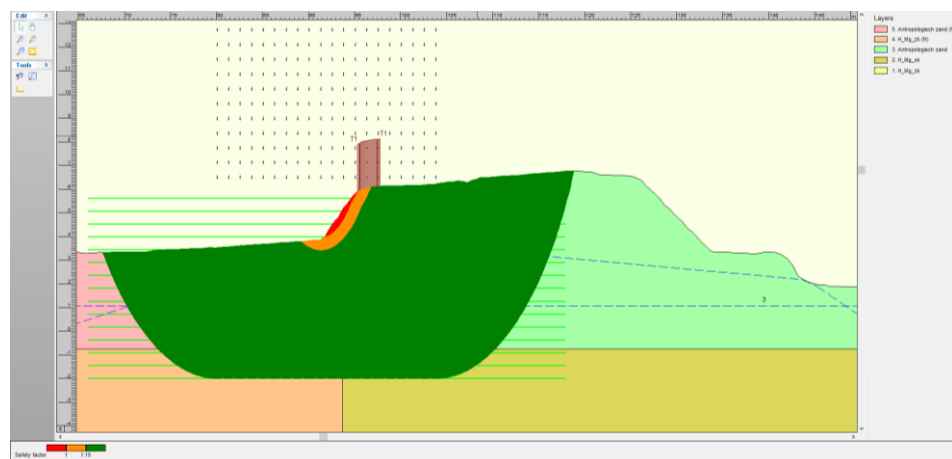
Figuur 176
Maatgevend glijvlak
voor vak 4-1
scenario 1b1.



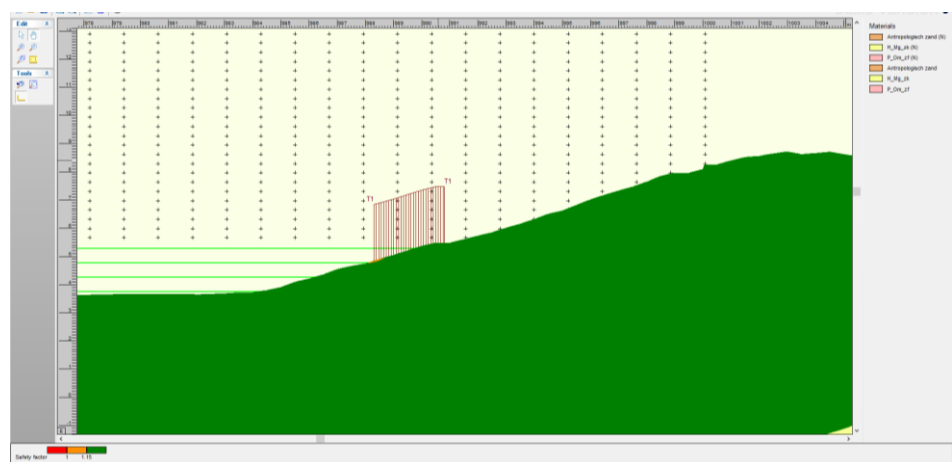
Figuur 177
Maatgevend glijvlak
voor vak 4-1
scenario 1b3.



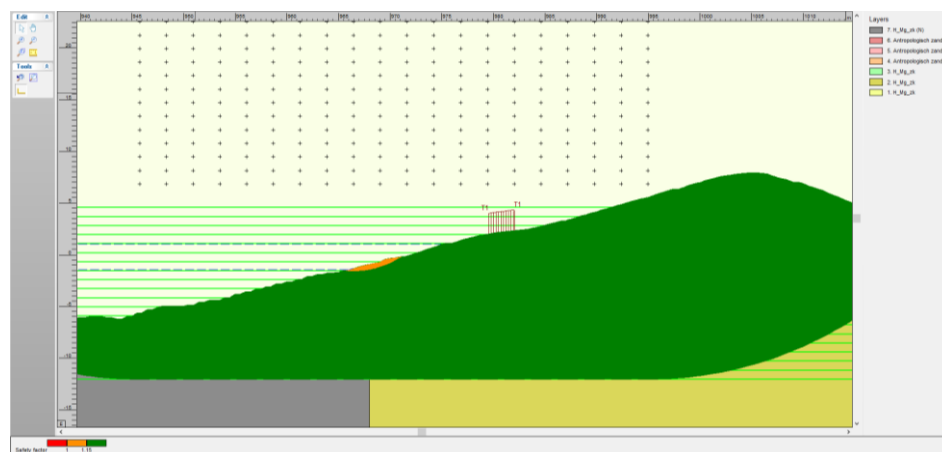
*Figuur 178
Safety overview
voor vak 2-1,
scenario 1b2.*



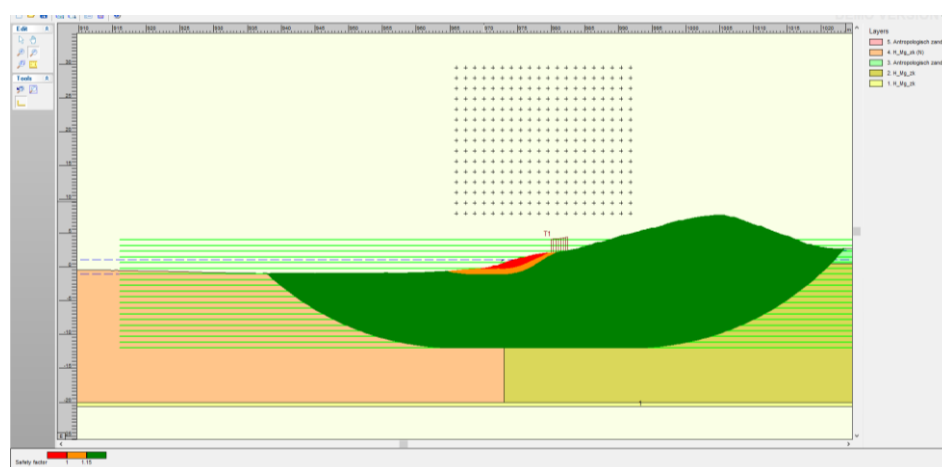
*Figuur 179
Safety overview
voor vak 3-1,
scenario 1b2.*



*Figuur 180
Safety overview
voor vak 3-3,
scenario 1b2.*



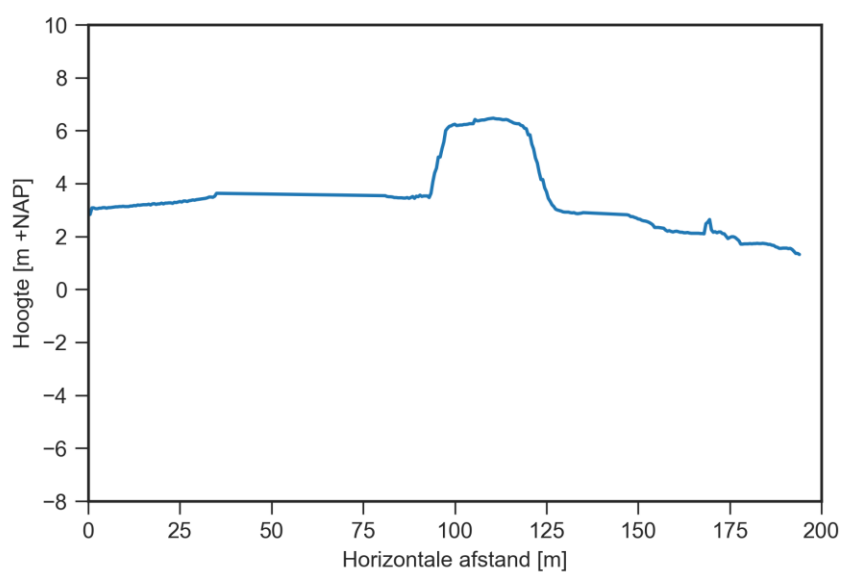
*Figuur 181
Safety overview
voor vak 3-4,
scenario 1b2.*



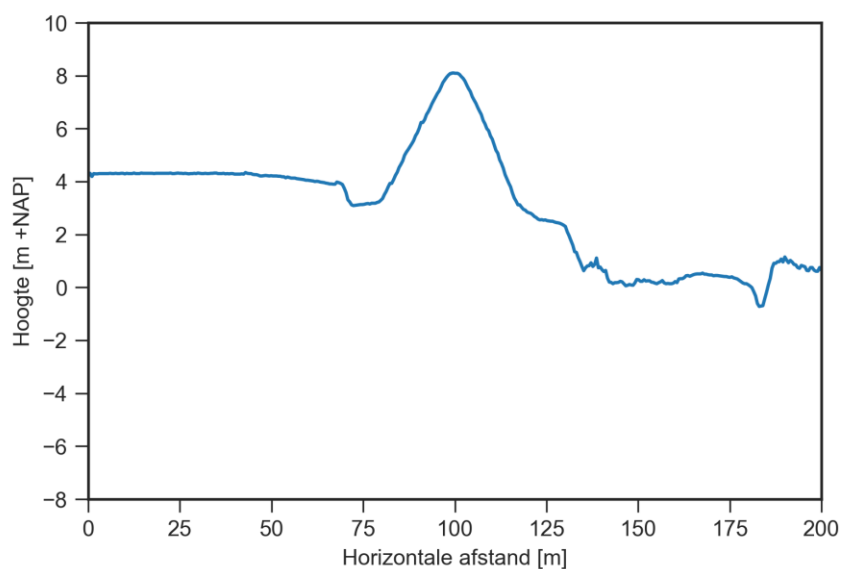
Maatgevende dwarsprofielen

In onderstaande figuren is voor elk vak het maatgevende dwarsprofiel weergegeven.

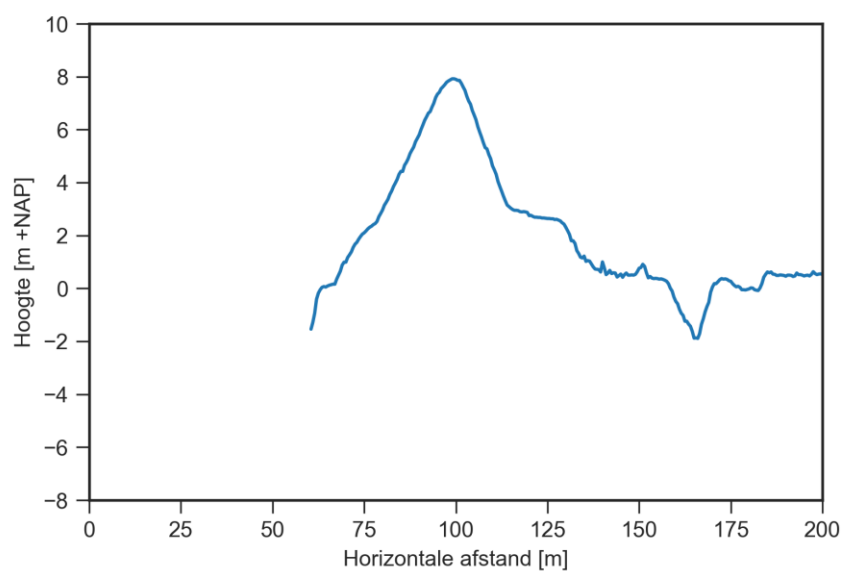
*Figuur 182
Maatgevend
dwarsprofiel vak 1.1*



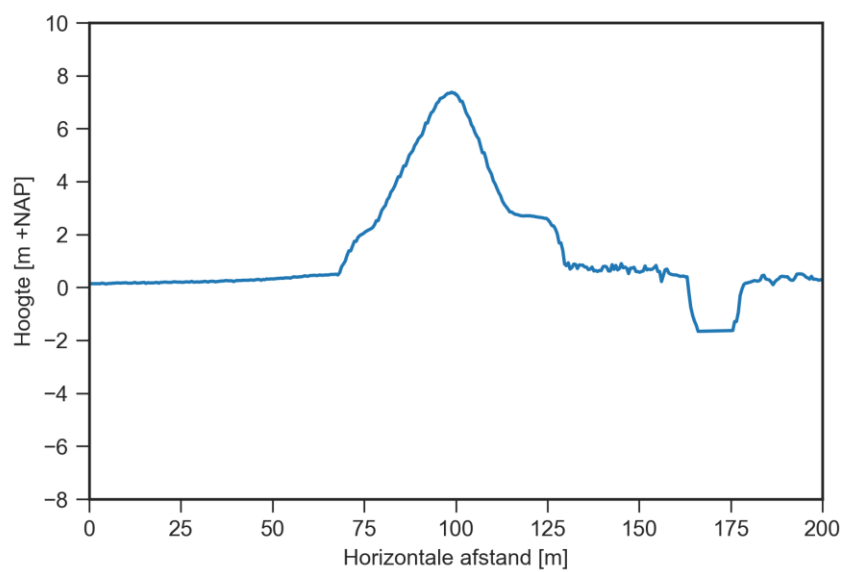
*Figuur 183
Maatgevend
dwarsprofiel vak 2.1*



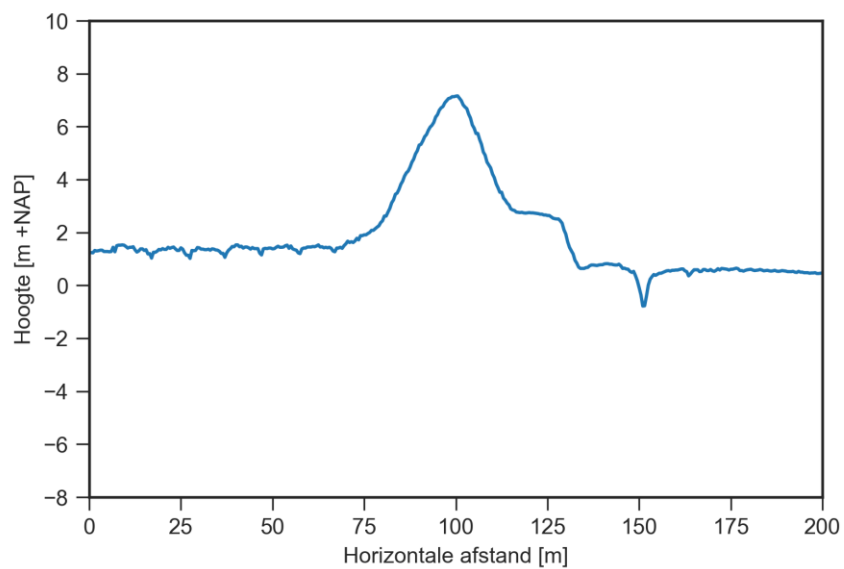
*Figuur 184
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3.1*



*Figuur 185
Maatgevend
dwarsprofiel vak 3.2*



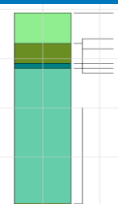
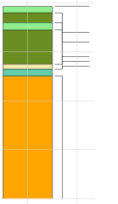
*Figuur 186
Maatgevend
dwarsprofiel vak 4.2*



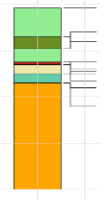
Grondopbouw

Per vak wordt bestudeerd welke ondergrondscenario's voorkomen en in welke mate. De laagliggingen van de scenario's worden per vak aangescherpt op basis van lokaal grondonderzoek. De uiteindelijke ondergrondscenario's per vak zijn weergegeven in Tabel 78 t/m Tabel 87. De kansen van voorkomen van de ondergrondscenario's per vak zijn weergegeven in Tabel 88. Deze kansen zijn gedefinieerd als het percentage van de vaklengte waarin een bepaald ondergrondscenario voorkomt.

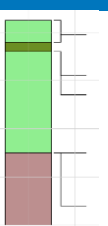
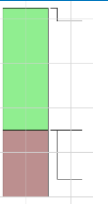
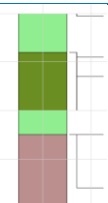
Tabel 99
Ondergrond
scenario's vak 1.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6027_1b1	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mp_k	-11	
	4	P_Ova_sd	-12	
	5	P_Rg_zm	-39,5	
6027_1b2	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-2	
	3	H_Mg_zk	-4	
	4	H_Mkw_z&k	-5,5	
	5	P_Wdz_zf	-12,5	
	6	P_Ova_sd	-13,5	
	7	P_Rg_zm	-15	

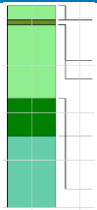
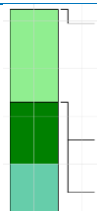
Tabel 100
Ondergrond
scenario's vak 2.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6026_1b1	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mkw_z&k	-7	
	3	H_Mg_zk	-9,5	
	4	H_Vbv_v	-12,5	
	5	P_Wdz_zf	-13	
	6	P_Ova_sd	-15	
	7	P_Rg_zm	-17	
6026_1b2	1	H_Mg_zk	-0,75	
	2	H_Mp_k	-10	
	3	H_Vbv_v	-12	
	4	P_Wdz_zf	-12,5	
	5	P_Ova_sd	-14	
	6	P_Rg_zm	-15,5	

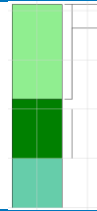
Tabel 101
Ondergrond
scenario's vak 3.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b1	1	H_Mg_zk	0	
	2	H_Mkw_z&k	-3	
	3	H_Mg_zk	-5	
	4	P_Om_zf	-27	
6025_1b2	1	H_Mg_zk	0	
	2	P_Om_zf	-25	
6025_1b3	1	H_Mg_zk	0	
	2	H_Mkw_z&k	-8	
	3	H_Mg_zk	-20	
	4	P_Om_zf	-25	

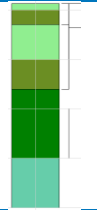
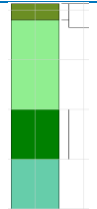
Tabel 102
Ondergrond
scenario's vak 3.2

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6025_1b4	1	H_Mg_zk	0	
	2	H_Mkw_z&k	-0,5	
	3	H_Mg_zk	-1,5	
	4	P_Mg_zk	-17	
	5	P_Ova_sd	-30	
6025_1b5	1	H_Mg_zk	0	
	2	P_Mg_zk	-17	
	3	P_Ova_sd	-30	

Tabel 103
Ondergrond
scenario's vak 4.1

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b1	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	P_Mg_zk	-18	
	3	P_Ova_sd	-30	

Tabel 104
Ondergrond
scenario's vak 4.2

Scenario	Laag-nummer	Eenheid	Bovenkant laag [m+NAP]	Illustratie scenario
6024_1b2		H_Mkw_z&k	0	
		H_Mg_zk	-3	
		H_Mkw_z&k	-10	
		P_Mg_zk	-16	
		P_Ova_sd	-30	
6024_1b3	1	H_Mg_zk	1,25	
	2	H_Mkw_z&k	1,25	
	3	H_Mg_zk	-2,5	
	4	P_Mg_zk	-20	
	5	P_Ova_sd	-30	

Vak	Scenario	Scenariokans
1-1	6027_1b1	65%
	6027_1b2	35%
2-1	6026_1b1	38%
	6026_1b2	62%
3-1	6025_1b1	12%
	6025_1b2	67%
	6025_1b3	21%
	6025_1b4	0%
	6025_1b5	0%
3-2	6025_1b1	0%
	6025_1b2	0%
	6025_1b3	0%
	6025_1b4	90%
	6025_1b5	10%
4-1	6024_1b1	100%
	6024_1b2	0%
	6024_1b3	0%
4-2	6024_1b1	0%
	6024_1b2	50%
	6024_1b3	50%

L.3

Eenvoudige beoordeling

In onderstaande tabel zijn de invoer en de resultaten van de eenvoudige beoordeling weergegeven.

Tabel 105
Invoer en resultaat
van de eenvoudige
beoordeling.

Vak (onder- rondsce- nario)	Oordeel I EB	Type Water- kering	Zanddijk op zand- ondergrond	Construct- ieve elementen	Voldoet aan veilige tijdsafhankelijke benadering	Deklaag- dikte	Verval	Herhaling -stijd norm- traject	Traject- lengte	Veilige afmetingen
1.1 (6027_1 b1)	Verder beoordelen	dijk	nee	nee	nee	9,5	5,93	1/3.000	13,4	Nee
1.1 (6027_1 b2)	Verder beoordelen	dijk	nee	nee	nee	8	5,93	1/3.000	13,4	Nee
2.1 (6026_1 b1)	Verder beoordelen	dijk	nee	nee	nee	3	7,74	1/3.000	13,4	Nee
2.1 (6026_1 b2)	Niet van toepassing	dijk	ja							
3.1 (6025_1 b1)	Verder beoordelen	dijk	nee	nee	nee	18,5	7,74	1/3.000	13,4	Nee
3.1 (6025_1 b2)	Verder beoordelen	dijk	nee	nee	nee	2,5	6,56	1/3.000	13,4	Nee
3.1 (6025_1 b3)	Niet van toepassing	dijk	ja							
3.2 (6025_1 b4)	Niet van toepas	dijk	ja							

	sing									
3.2(6025 _1b5)	Verder beoord elen	dijk	nee	nee	nee	3	6,51	1/3.000	13,4	Nee
4.1 (6024_1 b1)	Verder beoord elen	dijk	nee	nee	nee	2	6,51	1/3.000	13,4	Nee
4.2 (6024_1 b2)	Verder beoord elen	dijk	nee	nee	nee	9,5	5,93	1/3.000	13,4	Nee
4.2 (6025_1 b3)	Verder beoord elen	dijk	nee	nee	nee	8	5,93	1/3.000	13,4	Nee

Tabel 106
Invoerparameters
Steentoets

Parameter	Waarde	Bron
Richting normaal op dijk [° t.o.v. N]	Variabel	Afgeleid o.b.v. referentielijn WBI
Voorland, niveau bij teen [m +NAP]	ca. NAP+0m	Afgeleid o.b.v. onderkant inmeting DTM [MUG, 2017]
Voorland, helling [tanα]	n.v.t.	Geen voorland ingevoegd.
Taluddeel, niveau ondergrens [m +NAP]	Variabel	Afgeleid op basis van DTM [MUG, 2017]
Taluddeel, niveau ondergrens [m +NAP]	Variabel	Afgeleid op basis van DTM [MUG, 2017]
Taluddeel, helling [tanα]	Variabel	Afgeleid op basis van DTM [MUG, 2017]
Taluddeel, segmentbreedte	n.v.t. (geen vlakke taluddelen aanwezig)	
Type en kenmerken toplaag en onderla(a)g(en)	Variabel	o.b.v. beschikbaar tekenwerk [RWS, 1967] en inventarisatie beheerder [NZV, 2018a]
Toplaag, stootvoeg [mm]	5	Expert judgement
Toplaag, langsvoeg [mm]	5	Expert judgement
Toplaag, open oppervlak [%]	n.v.t. (zie stootvoeg en langsvoeg)	
Toplaag, gaten in steen?	Nee	o.b.v. beschikbaar tekenwerk [RWS, 1967] en inventarisatie beheerder [NZV, 2018a]
Toplaag, karakteristieke opening [mm]	n.v.t.	
Toplaag, soortelijke massa [mm]	Default	Bepaald door Steentoets
Toplaag, ingewassen	In alle gevallen: 'nee'	Op advies van beheerder
Toplaag, D15 inwasmateriaal [mm]	Default	Bepaald door Steentoets
Toplaag, goed ingeklemd?	In alle gevallen 'nee'	Op advies van beheerder
Filterlaag, b [m]	bovenste: 0,08 tweede: 1,00	o.b.v. beschikbaar tekenwerk [RWS, 1967]
Filterlaag, D15 [mm]	bovenste: 20 tweede: 3	[Deltares 2017a]
Filterlaag, D50 [mm]	Default waarde	Bepaald door Steentoets
Filterlaag, porositeit [-]	bovenste: 0,40 tweede: 0,25	Expert judgement
Klei, dijkopbouw	Variabel	Bepaald op basis van tekenwerk [RWS, 1967] en inventarisatie beheerder [NZV, 2018a] i.c.m. grondonderzoek [Wiertsema, 2017]

Parameter	Waarde	Bron
Klei. bklei [m]	Variabel	Inventarisatie beheerder [NZV, 2018a] i.c.m. grondonderzoek [Wiertsema, 2017]
Klei, kwaliteit	Indien aanwezig: 'goed'	grondonderzoek [Wiertsema, 2017]
Klei, D50 [mm]	Default	Bepaald door Steentoets
Klei, D90 [mm]	Default	Bepaald door Steentoets
Type bovenste overgang(constructie)	Variabel	Bepaald op basis van tekenwerk [RWS, 1967]
GLW [m +NAP]	Variabel	[RWS – WVL, 2013]
GHW [m+NAP]	Variabel	[RWS – WVL, 2013]
Waterstand bij de norm [m +NAP]	Variabel	Zie paragraaf 0
Stroomsnelheid [m/s]	0	Conform WBI2017
Waterstanden	Variabel	Waterstandsverloop zoals beschreven in paragraaf 0
Q-variant	Variabel	

N

Beoordeling Voorlanden (VLGA, VLAF, VLZV)

N.1

Inleiding

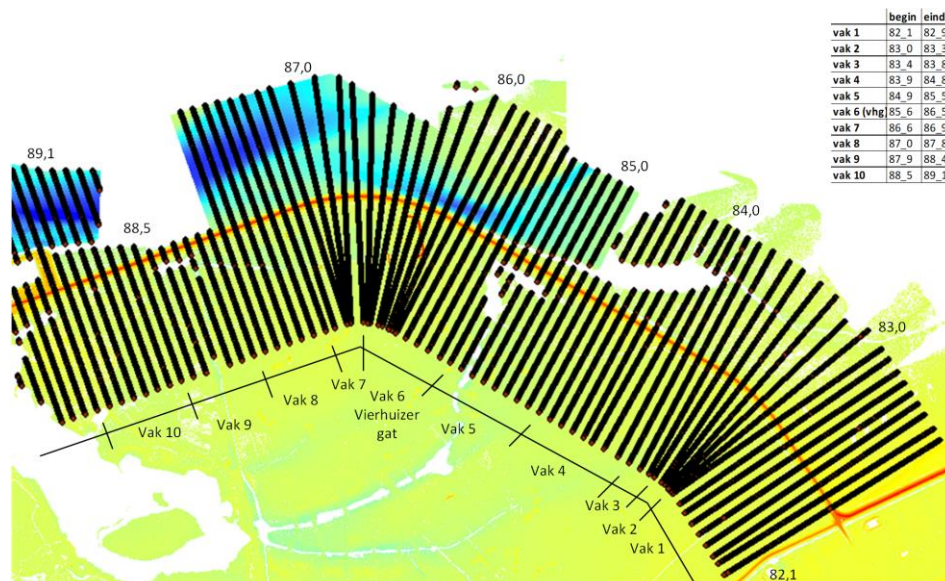
De beoordeling van het voorland bestaat uit drie toetssporen:

- Golfafslag voorland (VLGA)
- Afschuiving voorland (VLAF)
- Zettingsvloeiing voorland (VLZV)

NB: deze toetssporen beschrijven de beoordeling van indirecte mechanismen¹⁸ (groep 5).

Ten behoeve van de beoordeling van het voorland is het traject opgedeeld in 10 vakken (zie onderstaand figuur). Bij de vakindeling is de beschikbaarheid van gegevens en de oriëntatie van de dijk leidend geweest. Bij de vakindeling diende het Vierhuizergat (vak 6) als vertrekpunt. Omdat tussen dp 87.9 en 88.4 geen gegevens over het voorland beschikbaar waren is dit deel als apart vak (9) beschouwd.

*Figuur 187
Vakindeling
voorlandsporen*



N.2

Uitgangspunten

- Invloedszone = 4H (H = hoogte dijk – hoogte teen)
- De profielen zijn gebaseerd op de door de keringbeheerder aangeleverde lodingen (februari 2018). Deze zijn aangevuld met gegevens uit AHN-2 (2009).

¹⁸ Een indirect mechanisme leidt niet direct tot falen van de waterkering maar vergroot de kans op falen door een vervolgmecanisme.

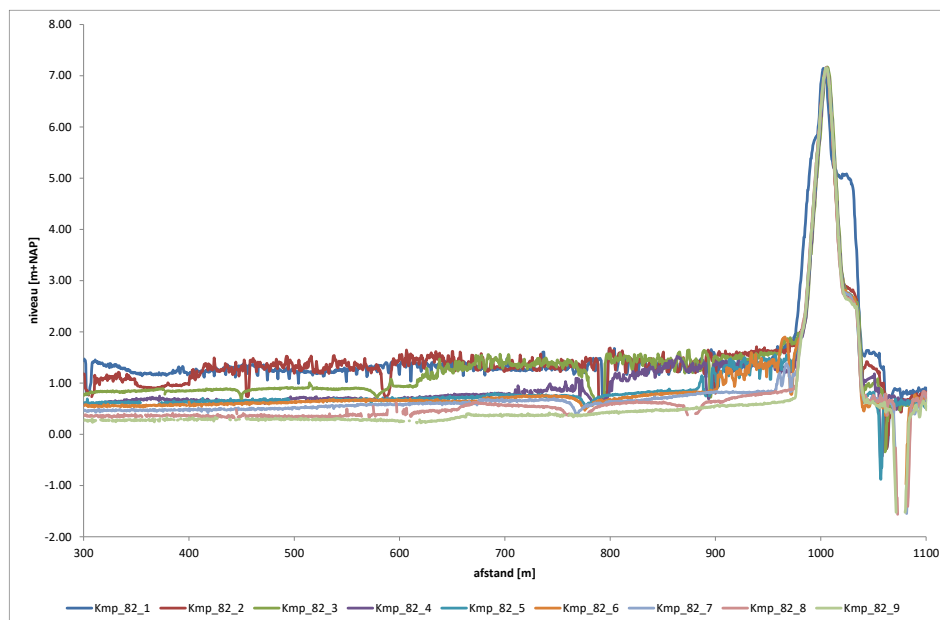
- Hoogte en breedte voorland verandert niet in de tijd (morfologische ontwikkelingen worden verwaarloosd)
- Ter plaatse van het Vierhuizergat zijn de ontwerpprofielen gebruikt. Aangenomen is dat het ontwerpprofiel op peildatum zichtjaar aanwezig
- Aangenomen is dat de geulrand en -bodem (die uit de profielen volgt) niet verandert in de tijd (morfologische ontwikkelingen worden verwaarloosd)
- Alleen ter plaatse van het Vierhuizergat is een bestorting aanwezig
- Aangenomen is dat eventuele nu aanwezige bestorting ook op peildatum zichtjaar aanwezig is.
- Het voorland is opgebouwd uit zand
- Gemiddelde waterstand GW is gelijk aan NAP
- De laagwaterlijn bij gemiddeld tij is is NAP -1,26 m
- De laag laagwaterstand LLWS is NAP -1,42 m
- $d_{50, \text{gemiddeld}}$ onderwatertalud > 0,2 mm
- $d_{15, \text{gemiddeld}}$ onderwatertalud > 0,1 mm

N.3

Vak 1

Vak 1 loopt van dp 82.0 t/m dp 82.9. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 188
Profielen vak 1*



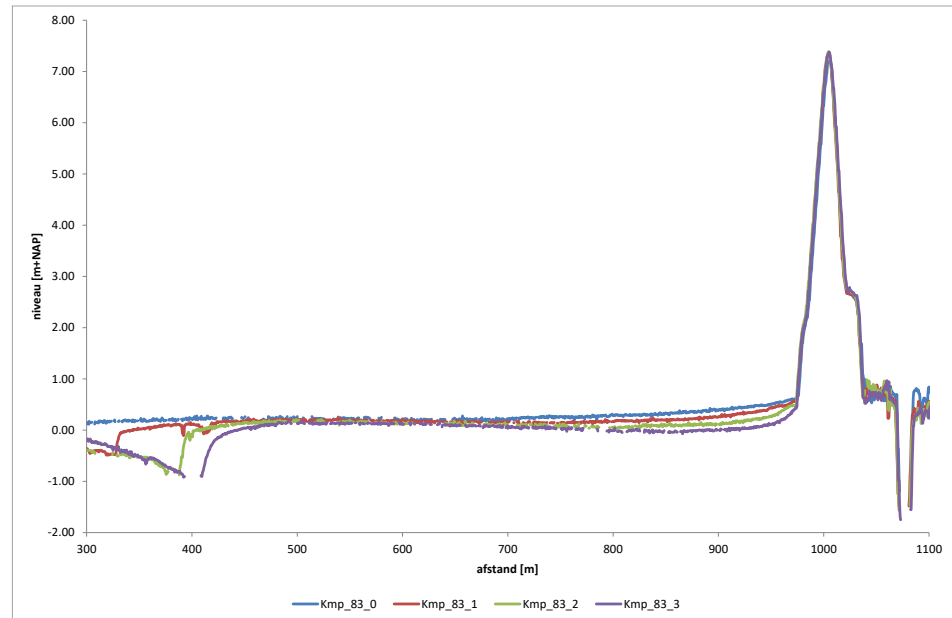
Vóór vak 1 zijn kwelders aanwezig. Deze kwelders liggen hoger dan de gemiddelde waterstand GW (NAP). Omdat een geulrand ontbreekt wordt eventuele golfafslag, afschuiving en/ of zettingsvloeiing niet schadelijk geacht voor de waterkering (de toetssporen VLGA, VLAf en VLZV zijn dan ook niet doorlopen). Voor vak 1 is de faalkans dan ook verwaarloosbaar.

N.4

Vak 2

Vak 2 loopt van dp 83.0 t/m dp 83.3. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

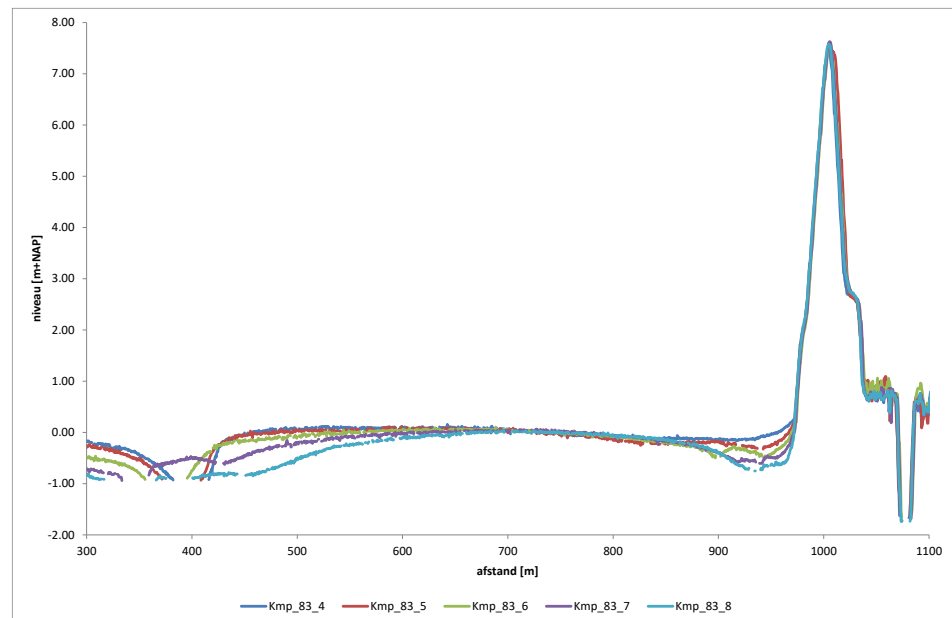
*Figuur 189
Profielen vak 2*



De hoogte van het voorland bij vak 2 is ongeveer gelijk aan de gemiddelde waterstand GW (NAP). Op ruim 500 m van de waterkering bevindt zich een ondiepe geul. Omdat een diepe geul ontbreekt, dan wel deze op grote afstand van de waterkering ligt, wordt eventuele golfafslag, afschuiving en/of zettingsvloeiing niet schadelijk geacht voor de waterkering (de toetssporen VLGA, VLAF en VLZV zijn dan ook niet doorlopen). Voor vak 2 is de faalkans dan ook verwaarloosbaar.

Vak 3 loopt van dp 83.4 t/m dp 83.8. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 190
Profielen vak 3*

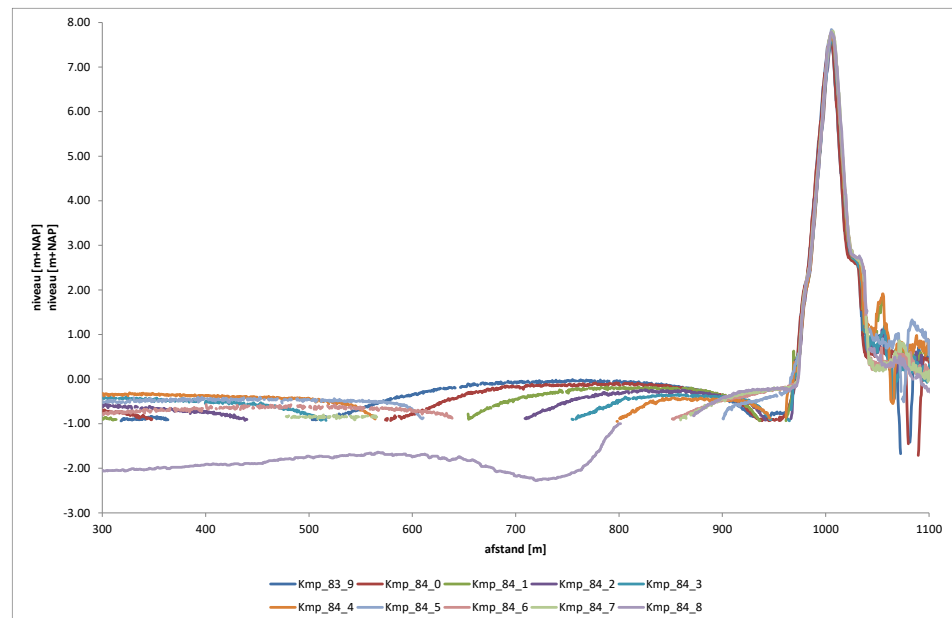


De hoogte van het voorland bij vak 3 is ongeveer gelijk aan de gemiddelde waterstand GW (NAP). Op ruim 500 m van de waterkering bevindt zich een ondiepe geul. Omdat een diepe geul ontbreekt, dan wel deze op grote afstand van de waterkering ligt, wordt eventuele golfafslag, afschuiving en/of zettingsvloeiing niet schadelijk geacht voor de waterkering (de toetssporen VLGA, VLAF en VLZV zijn dan ook niet doorlopen). Voor vak 3 is de faalkans dan ook verwaarloosbaar.

Vak 4

Vak 4 loopt van dp 83.9 t/m dp 84.8. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 191
Profielen vak 4*



Voor de waterkering in vak 4 is een geul aanwezig. De diepte van deze geul is onbekend. Gelet op de profielen in bovenstaand figuur is de minimale afstand van de teen tot aan de geulrand ca. 100 m. De hoogte van het aanwezige voorland is bij benadering gelijk aan NAP.

VLGA - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets van het toetsspoor VLGA bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat golfafslag mogelijk is wordt, alvorens een TOM uit te voeren, nagegaan of, golfafslag schadelijk is.

Stap E.2

Golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmat of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In vak 4 liggen 5 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00054 t/m WZ_1_6-5_dk_49. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven

*Tabel 107
Hydraulische
belasting vak 4 per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen*

Zichtjaar	Faalkanseis	h^* (m+NAP)	Hs^{**} (m)
2023	1/1.000	4,85-4,81	2,20-1,87
2050	1/1.000	5,11-5,07	2,30-1,97
2075	1/1.000	5,37-5,33	2,33-2,01
2100	1/1.000	5,61-5,57	2,44-2,08
2023	1/3.000	5,11-5,07	2,39-2,10
2050	1/3.000	5,38-5,34	2,47-2,14
2075	1/3.000	5,63-5,59	2,53-2,23
2100	1/3.000	5,88-5,84	2,59-2,27

*marginale statistiek

**Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden. Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief.

Het voorland is niet bekleed en ligt lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgegaan van de minimale waterstand bij de norm en de maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte. Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland (NAP) lager ligt dan het maximale niveau (zie ook onderstaande tabel). Golfafslag is dus niet mogelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van golfafslag van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

*Tabel 108
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is*

Zichtjaar	Faalkanseis	h_{min} (m+NAP)	$2_{Hs,max}$ (m)	Maximaal niveau Voorland (m+NAP)
2023	1/1.000	4,81	4,40	0,41
2050	1/1.000	5,07	4,60	0,47
2075	1/1.000	5,33	4,66	0,67
2100	1/1.000	5,57	4,88	0,69
2023	1/3.000	5,07	4,78	0,29
2050	1/3.000	5,34	4,94	0,40
2075	1/3.000	5,59	5,06	0,53
2100	1/3.000	5,84	5,18	0,66

VLAF - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat afschuiving mogelijk is wordt, alvorens een gedetailleerde toets uit te voeren, nagegaan of, afschuiving schadelijk is.

Stap E.2

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. Uit de beschikbare profielen blijkt dat deze helling veel flauwer is. Afschuiving kan dus niet optreden. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van afschuiving van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

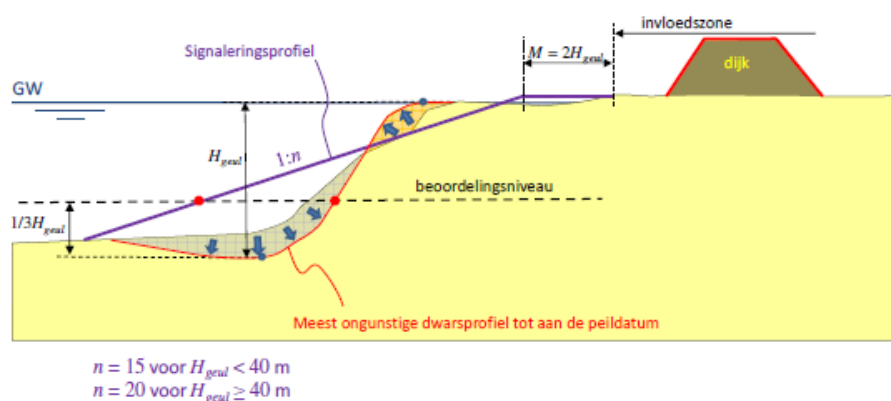
VLZV - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium "steilste helling over 5 m" en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever niet bestort is wordt nagegaan waar het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel (zie onderstaand figuur) ligt. In de in Figuur 192 weergegeven situatie ligt het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel landwaarts van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel en is zettingsvloeiing schadelijk.

*Figuur 192
Schematische
weergave
signaleringsprofiel
zettingsvloeiing
(vooroever
onbestort)*



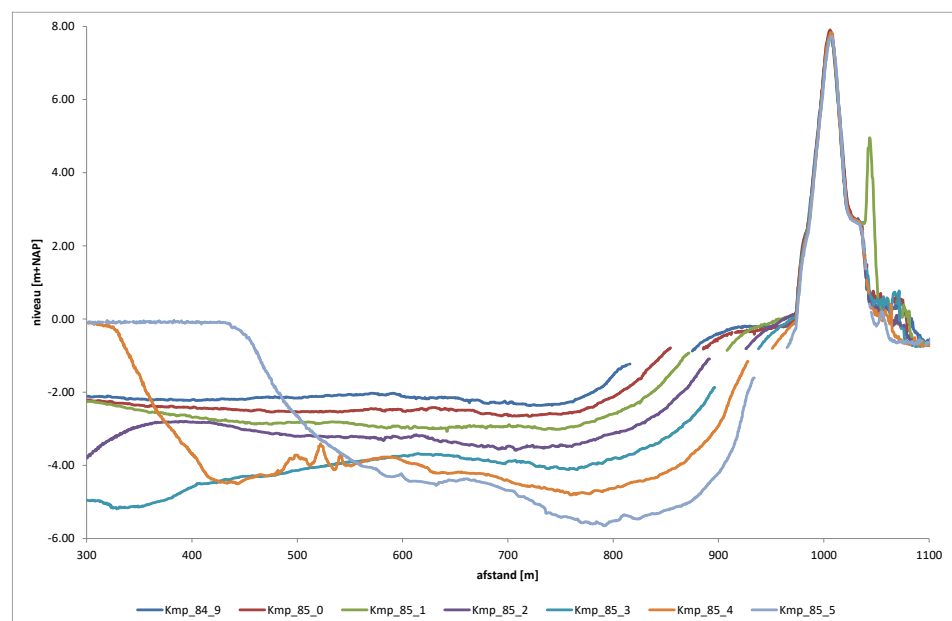
Om het snijpunt van het beoordelingsniveau van het rekenprofiel en het signaleringsprofiel te bepalen is de diepte van de geul benodigd. Hoewel informatie over de diepte van de geul ontbreekt is aangenomen dat geulbodem op ca. NAP -3 m ligt. De geuldiepte H_{geul} wordt hiermee 3 m. Het beoordelingsniveau komt hiermee op NAP -2 m te liggen. De invloedzone is gelet op de kruinhoogte (NAP +8 m) en het niveau van de teen (NAP -1 m) ca. 36 m. Samen met de te hanteren marge M (=6 m) komt de rand van het signaleringsprofiel op 42 m vanaf de teen te liggen. Vanaf daar loopt de vooroever onder een helling van 1:15 tot aan de geulbodem. Het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel komt dan zeewaarts ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel te liggen. Zettingsvloeiing is dus niet schadelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van zettingsvloeiing van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

N.7

Vak 5

Vak 5 loopt van dp 84.9 t/m dp 85.5. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 193
Profielen vak 5*



Voor de dijk is een geul aanwezig. De diepte van de geul varieert en is ter hoogte van dp85.5 het diepst (ca. NAP -6 m). Dit profiel wordt voor dit vak dan ook maatgevend gesteld.

VLGA - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat golfafslag mogelijk is wordt, alvorens een TOM uit te voeren, nagegaan of, golfafslag schadelijk is.

Stap E.2

Golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmat of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In dit vak liggen 4 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00050 t/m WZ_1_6-5_dk_00047. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven.

*Tabel 109
Hydraulische
belasting vak 4 per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen*

Zichtjaar	Faalkanseis	h^* (m+NAP)	Hs^{**} (m)
2023	1/1.000	4,81-4,79	1,98-1,88
2050	1/1.000	5,08-5,05	2,07-1,92
2075	1/1.000	5,34-5,31	2,11-2,00
2100	1/1.000	5,58-5,56	2,19-2,05
2023	1/3.000	5,08-5,06	2,21-2,07
2050	1/3.000	5,35-5,32	2,25-2,12
2075	1/3.000	5,60-5,58	2,33-2,21
2100	1/3.000	5,85-5,82	2,39-2,26

*marginale statistiek

**Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden.

Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief.

Het voorland is niet bekleed. Omdat er vrijwel geen vlak voorland aanwezig is, wordt het niveau van het voorland gelijk gesteld aan de laagwaterlijn (NAP -1,26 m). Het voorland ligt hiermee dus lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgeteerd

van de minimale waterstand bij de norm en de hierbij berekende maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte. Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland lager ligt dan het maximale niveau. Golfafslag is dus niet mogelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van golfafslag van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

*Tabel 110
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is*

Zichtjaar	Faalkanseis	h_{min} (m+NAP)	$2_{Hs,max}$ (m)	Maximaal niveau Voorland (m+NAP)
2023	1/1.000	4,79	3,96	0,83
2050	1/1.000	5,05	4,14	0,91
2075	1/1.000	5,31	4,22	1,09
2100	1/1.000	5,56	4,38	1,18
2023	1/3.000	5,06	4,42	0,64
2050	1/3.000	5,32	4,5	0,82
2075	1/3.000	5,58	4,66	0,92
2100	1/3.000	5,82	4,78	1,04

VLAF - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat afschuiving mogelijk is wordt, alvorens een gedetailleerde toets uit te voeren, nagegaan of, afschuiving schadelijk is.

Stap E.2

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. Uit de beschikbare profielen blijkt dat de helling tussen geulrand en geulbodem bij dp85.5 de steilste delen bevat. Het steilste deel is hier ca. 1:8. De gemiddelde helling tussen geulrand en geulbodem is dus veel flauwer dan 1:4,5. Afschuiving kan dus niet optreden. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van afschuiving van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

VLZV - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium "steilste helling over 5 m" en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever niet bestort is wordt nagegaan waar het snijpunt van het

beoordelingsniveau met het rekenprofiel ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel (zie Figuur 194) ligt.

Om het snijpunt van het beoordelingsniveau van het rekenprofiel en het signaleringsprofiel te bepalen is de diepte van de geul benodigd. Wanneer wordt uitgegaan van de geulbodem ter hoogte van dp85.5 is de geuldiepte H_{geul} ongeveer 6 m. Het beoordelingsniveau komt hiermee op NAP -4 m te liggen. De invloedszone is gelet op de kruinhoogte (NAP +8 m) en het niveau van de teen (NAP -1 m) ca. 36 m. Samen met de te hanteren marge M (=12 m) komt de rand van het signaleringsprofiel op 48 m vanaf de teen te liggen. Vanaf daar loopt de vooroever onder een helling van 1:15 tot aan de geulbodem. Het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel komt dan landwaarts ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel te liggen. Zettingsvloeiing is dus schadelijk. Voor dit vak wordt de beoordeling voortgezet met stap E.2

Stap E.2

Stap E.3 van de eenvoudige toetsing mag alleen worden uitgevoerd als de gemiddelde helling van het onderwatertalud over een hoogte van minimaal 5 m flauwer is dan 1:4 3. Het steilste deel van het onderwatertalud bij dp85.5 is 1:8. Daarmee wordt voldaan de eis voor het voortzetten van de eenvoudige toets met Stap E.3.

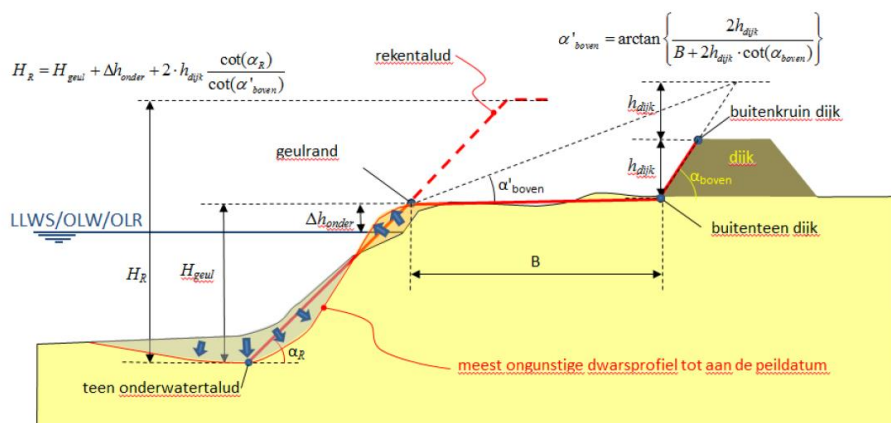
Stap E.3

Zettingsvloeiing kan alleen optreden als verwekings- en/ of bresvloeiing kan optreden.

Bresvloeiing kan alleen optreden als in één of meer zand- en siltlagen van het onbestorte onderwatertalud de taludhelling te steil is. De maximale toegestane lokale helling per diepte-interval is in Tabel 24-1 van Bijlage III van [RWS – WVL, 2016a] gegeven. Omdat wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden van de geometrische toets voor bresvloeiing (maximale hoogte onderwatertalud <40, $d_{50, gemiddeld} > 0,2$ mm en $d_{15, gemiddeld} > 0,1$ mm), wordt – gelet op de maximale helling van het onderwatertalud (1:9) – de maximale toelaatbare helling niet overschreden. Bresvloeiing kan niet optreden.

Verwekingsvloeiing kan optreden als over de rekenhoogte H_R geldt dat $\cot \alpha_R \leq 7 \left(\frac{H_R}{24} \right)^{\frac{1}{3}}$. Voor de definities van H_R en de rekentaludhelling α_R wordt verwezen naar onderstaand figuur.

Figuur 194
Signaleringsprofiel
vs rekenprofiel vak 5



Voor α_R wordt het steilste deel van het onderwatertalud gebruikt ($\cot \alpha_R$ is dus 8).

Omdat er vrijwel geen vlak voorland aanwezig is, wordt het niveau van de geulrand gelijk gesteld aan de laagwaterlijn. Hierdoor is Δh_{onder} 0,16 m. Omdat B gelijk is aan 0 m is α_{boven} gelijk aan α'_{boven} ($\cot \alpha'_{\text{boven}}$ is dus 4). Gelet op de waarden voor α_R , Δh_{onder} , en α'_{boven} wordt, uitgaande van een H_{geul} van 6 m en een h_{dijk} van 9 m, een H_R van circa 42 m gevonden. Gelet op de rekenhoogte mag $\cot \alpha_R$ niet kleiner zijn dan 8,45. Omdat de rekentaludhelling steiler is kan verwekingsvloeiing optreden. Een gedetailleerde toets is dus noodzakelijk om tot een oordeel voor het toetsspoor VLZV te komen.

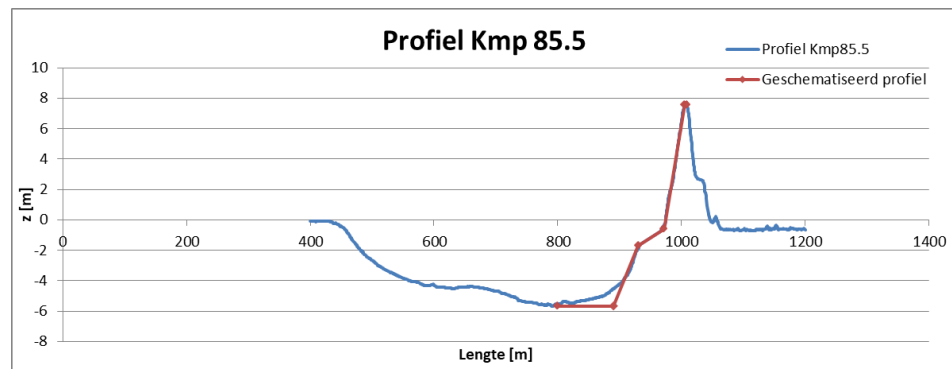
Gedetailleerde beoordeling – Vak 5 (ten oosten van het Vierhuizergat)

De gedetailleerde beoordeling uitgevoerd conform Bijlage III [RWS – WVL, 2016a] en de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing [RWS – WVL, 2016f]. Daarbij is gebruik gemaakt van de software D-Flow Slide versie 16.1.1.4981.

Gelijk aan de eenvoudige beoordeling is de geometrie bij dijkpaal Kmp 85.5 maatgevend voor dijkvak 5. Dit profiel is voor de invoer voor de software vereenvoudigd tot een aantal karakteristieke punten. Het werkelijke en geschematiseerde profiel zijn weergegeven in Figuur 104. De karakteristieke punten van het geschematiseerde profiel zijn weergegeven in Tabel 68. De start van de bodem van de geul is zo gekozen dat een steil ontstaat. Dit is een veilige schematisatie. De invloedszone van de dijk loopt tot 36m voor de buitenteen, zoals al beschreven in de eenvoudige beoordeling. Als waterstand is NAP -1,42 m toegepast, horend bij laagwater springtij (zie ook paragraaf 2.2.8).

Figuur 195
Profiel bij dijkpaal
85.5 en het

geschematiseerde
profiel voor de
software invoer



Tabel 111
Karakteristieke
punten
geschematiseerd
profiel dijkpaal 85.5

Karakteristiek punt	L [m]	z [NAP+m]
Bottom river channel	800	-5,65
Bottom river channel	890	-5,65
Insert river channel	930	-1,70
Dike toe at river	972	-0,60
Dike top at river	1005	7,60
Dike top at polder	1009	7,60

Over het grootste deel van dijkvak 5 komt ondergrondscenario 6025_1b2 voor, waarin het Holocene alleen bestaat uit H_Mg_zk (zand gelaagd met klei – zie ook paragraaf 2.3). Doordat in dit scenario alleen zandige grond voorkomt, is dit ook het maatgevende scenario. Dit scenario is daarom gebruikt voor de beoordeling. Het dijklichaam bestaat uit zandig dijksmateriaal.

Voor het inschatten van de korrelgrootte van het zand is gebruikgemaakt van de defaultwaarden van d_{70} , beschikbaar in SOS. De d_{70} wordt normaal gesproken gebruikt voor de beoordeling STPH. De gebruikte waarde is bepaald uit het lokaal grondonderzoek. Hieruit volgt een waarde van 0,15 mm. Op deze waarde is een VC van 12%, de rekenwaarde voor VLZV wordt daarmee 0,13 mm (we merken op dat deze waarde gelijk is aan standaardwaarde voor d_{70} voor H_Mg_zk in het SOS-segment ter plaatse van Vak 5). Met behulp van een uniformiteitscoëfficiënt $U=1,5$ (conform de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing [RWS – WVL, 2016f]) zijn de d_{15} en d_{50} geschat op respectievelijk 0,85 mm en 0,12 mm¹⁹.

De waarde voor de state parameter (ψ_{5m}) is lastig te bepalen zonder uitgebreid grondonderzoek. De schematiseringshandleiding zettingsvloeiing geeft aan dat een waarde van 0,1 voor zand een veilige waarde is [RWS – WVL, 2016f]. Voor zand gelaagd met klei, waar in dijkvak 5 sprake van is, is deze waarde lager (wat resulteert in een gunstiger oordeel). In de

¹⁹ De gevoeligheid van deze schatting is echter onderzocht door gebruik te maken van een brede range in waardes. Dit blijkt voor vak 5 geen significant effect te hebben op de resulterende faalkans.

beoordeling is conform de schematiseringhandleiding een veilige waarde van 0,1 toegepast.

Voor de factor voor cohesieve lagen ($F_{\text{cohesivelayers}}$) is een waarde van 1 gebruikt, die volgens de schematiseringshandleiding zettingsvloeiing [RWS – WVL, 2016f] past bij zand met een beperkt aantal kleilaagjes.

In de gedetailleerde beoordeling is voorgeschreven rekening te houden met morfodynamiek. In deze beoordeling is verondersteld dat geen sprake is van significante morfodynamische veranderingen. De software kan echter niet rekenen met een migratiesnelheid van het voorland van 0 m/jaar. Daarom is een lage waarde van 0,0001 m/jaar gebruikt.

De resulterende faalkans berekend met D-Flow slide is $8,7 \text{ E-}07$. De faalkanseis is bepaald met behulp van Bijlage III Sterkte en Veiligheid [RWS – WVL, 2016a]:

$$P_{\text{eis,vak}} = P_{\text{voorland}} * L_{\text{vak}} / 1\text{km}$$

Waarin:

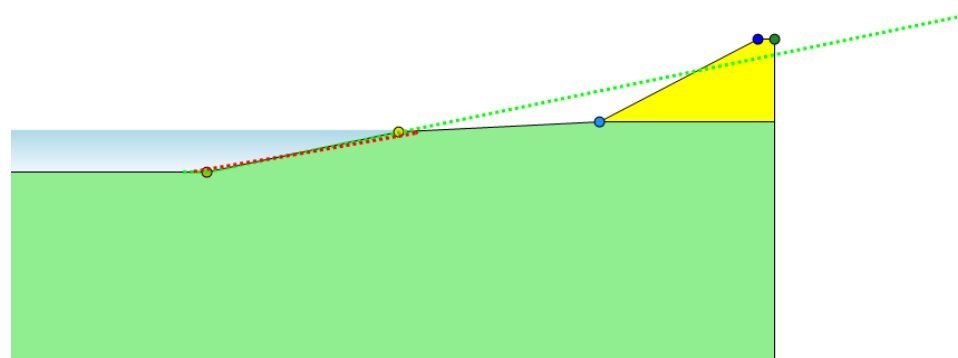
P_{voorland}	Kans van optreden van voorlandmechanisme waarbij de bijdrage nog juist aan de overstromingskans verwaarloosbaar wordt geacht. $P_{\text{voorland}} = 0,01$
$P_{\text{eis,vak}}$	Faalkanseis per vak
L_{vak}	Lengte van het vak [km]

Met een dijkvaklengte van 600m voor vak 5 is de faalkanseis $6,0 \text{ E-}03$. De berekende faalkans voldoet ruim aan de faalkanseis. Samenvattend zijn de kansen weergegeven in Tabel 67. Het resterend profiel na zettingsvloeiing is weergegeven in Figuur 102.

*Tabel 112
Faalkans en
faalkanseis VLZV
dijkvak 5*

Dijkvak	Faalkans	Faalkanseis ($6,0\text{E-}03$)
Vak 5	$8,7 \text{ E-}07$	Voldoet

*Figuur 196
Resterend profiel na
zettingsvloeiing (in
rood)*



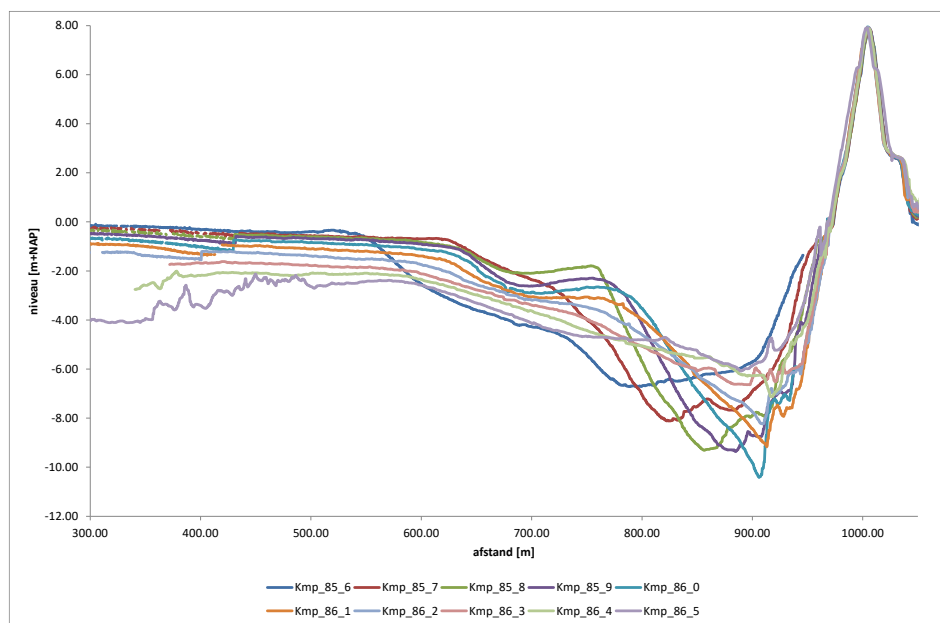
Bij klimaatverandering wordt het springtij laag water hoger. Dit heeft een positieve invloed op het oordeel voor zettingsvloeiing. Daarnaast verandert het waterstandsverschil bij de val naar laag water niet. Zettingsvloeiing is in de toekomst daarom ook niet relevant.

N.8

Vak 6

Vak 6 loopt van dp 85.6 t/m dp 86.5 (Vierhuizergat). In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 197
Profielen vak 6*



Voor de dijk is een geul aanwezig. De diepte van de geul varieert en is ter hoogte van dp86.0 het diepst (ca. NAP -10 m). Dit profiel wordt voor dit vak dan ook maatgevend gesteld.

VLGA - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat golfafslag mogelijk is wordt, alvorens een TOM uit te voeren, nagegaan of, golfafslag schadelijk is.

Stap E.2

Golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmatt of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In dit vak liggen 6 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00047 t/m WZ_1_6-5_dk_00042. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven.

*Tabel 113
Hydraulische
belasting vak 6 per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen*

Zichtjaar	Faalkanseis	h* (m+NAP)	Hs** (m)
2023	1/1.000	4,79-4,76	2,48-1,98
2050	1/1.000	5,06-5,03	2,51-2,07
2075	1/1.000	5,31-5,28	2,62-2,11
2100	1/1.000	5,59-5,53	2,69-2,19
2023	1/3.000	5,06-5,02	2,64-2,70
2050	1/3.000	5,32-5,29	2,78-2,25
2075	1/3.000	5,58-5,55	2,86-2,33
2100	1/3.000	5,82-5,79	2,94-2,39

*marginale statistiek

**Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden. Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief.

Het voorland is bekleed met staalslakken. Omdat er vrijwel geen vlak voorland aanwezig is, wordt het niveau van het voorland gelijk gesteld aan de laagwaterlijn (NAP -1,26 m). Het voorland ligt hiermee dus lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgegaan van de minimale waterstand bij de norm en de hierbij berekende maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte.

Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland lager ligt dan het maximale niveau. Golfafslag is dus niet mogelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van golfafslag van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

*Tabel 114
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is*

Zichtjaar	Faalkanseis	$h_{\min}$ (m+NAP)	$2H_{s,\max}$ (m)	Maximaal niveau Voorland (m+NAP)
2023	1/1.000	4,76	4,96	-0,2
2050	1/1.000	5,03	5,02	0,01
2075	1/1.000	5,28	5,24	0,04
2100	1/1.000	5,53	5,38	0,15
2023	1/3.000	5,02	5,28	-0,26
2050	1/3.000	5,29	5,56	-0,27
2075	1/3.000	5,55	5,72	-0,17
2100	1/3.000	5,82	5,88	-0,06

VLAF - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat afschuiving mogelijk is wordt, alvorens een gedetailleerde toets uit te voeren, nagegaan of, afschuiving schadelijk is.

Stap E.2

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. Uit de beschikbare ontwerpprofielen blijkt dat de helling tussen geulrand en geulbodem 1:4 is. De gemiddelde helling tussen geulrand en geulbodem is dus steiler dan 1:4,5. Afschuiving kan dus optreden. Voor dit vak is daarom ook vak E.1 uitgevoerd.

Stap E.1

Bij deze stap wordt gecontroleerd of het afschuiven schadelijk is. Afschuiven is schadelijk als het afschuifpunt S_{af} landwaarts ligt van het signaleringspunt S_{sign} . Omdat de geulrand nagenoeg aan de teen van de dijk ligt, zal S_{sign} – gelet op de invloedszone – altijd buitenwaarts van S_{af} . Golfafslag is dus mogelijk. Voor dit vak is, om tot een oordeel te komen, een gedetailleerde toets noodzakelijk.

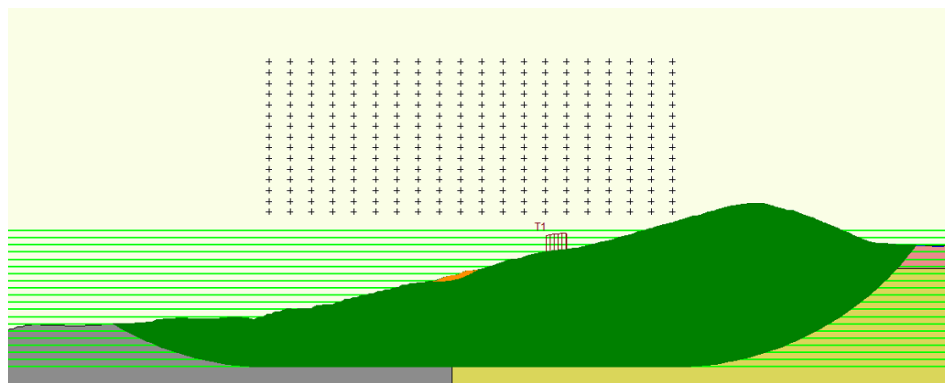
Gedetailleerde beoordeling - Vierhuizergat

De gedetailleerde toets is uitgevoerd met DGeo Stability. De toegepaste uitgangspunten komen overeen met uitgangspunten in het beoordelingsspoor STBU. Hierbij wordt opgemerkt de staalslakken en de bestorting als zand gemodelleerd. Daarnaast zijn specifiek in bij VLAF alleen glijvlakken met een insteek in het voorland meegenomen (insteek van de cirkel ligt zeewaarts van de onderkant van de koperslabblokken).

De werkwijze om de faalkanseis te bepalen waarbij VLAF voldoet aan de norm is beschreven in Bijlage III van de Waterwet (Sterkte en Veiligheid, [RWS – WVL, 2016a]) en de schematiseringshandleiding afschuiving voorlanden [RWS – WVL, 2016e]. De werkwijze in deze twee documenten is niet met elkaar in overeenstemming²⁰. Daarom is in voorliggende analyse in eerste instantie de faalkanseis op doorsnede niveau voor STBU maatgevend gesteld voor VLAF. In geval de veiligheidsfactor gelijk aan of groter is dan 1,15 wordt voldaan aan de norm.

In Figuur 97 laat zien welke delen van het Vierhuizergat niet voldoen aan een veiligheidsfactor van 1,15. Hierin is te zien dat een zeer beperkt deel van het voorland niet voldoet aan de veiligheidsfactor van 1,15 (oranje delen in Figuur 97). Deze glijvlakken zijn maximaal 0,5 m diep. Deze kleine glijvlakken zijn niet schadelijk voor de standzekerheid van de waterkering. Daarmee voldoet afschuiving voorlanden aan de gestelde eisen.

*Figuur 198
Safety overview
afschuiving van het
Vierhuizergat. In de
groene delen is de
SF groter dan 1,15
(eis), in de oranje
delen is de SF
tussen de 1,0 en
1,15. Er zijn alleen
glijvlakken met een
insteek in het
voorland
meegenomen*



VLZV - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium "steilste helling over 5 m" en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever bestort is met staalslakken kan zettingsvloeiing niet optreden en is de faalkans verwaarloosbaar.

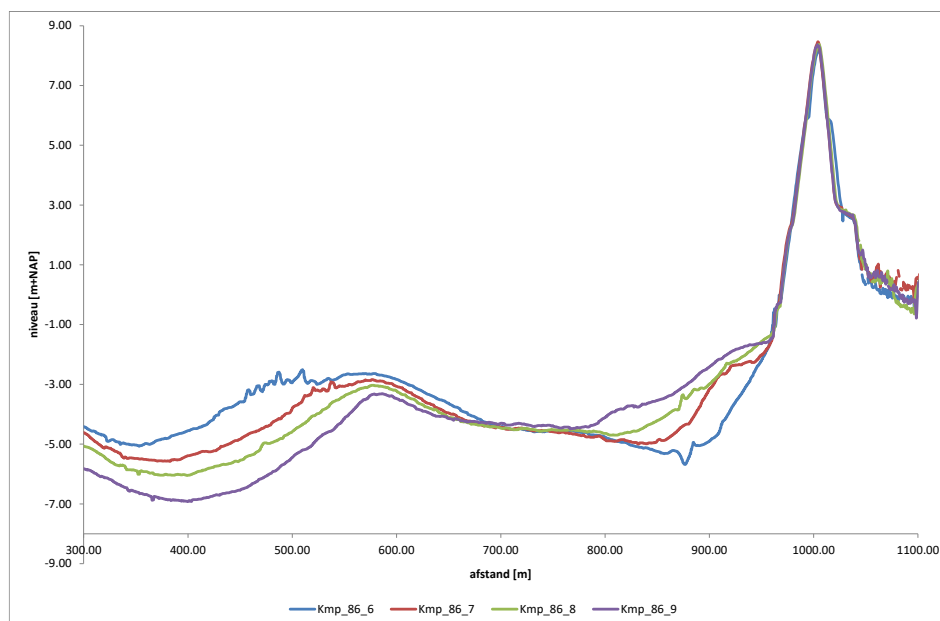
N.9

Vak 7

Vak 7 loopt van dp 86.6 t/m dp 86.4. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

²⁰ Hierover is met RWS – WVL contact gehad en een vraag ingediend bij Helpdesk Water.

*Figuur 199
Profielen vak 7*



VLGA - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat golfafslag mogelijk is wordt, alvorens een TOM uit te voeren, nagegaan of, golfafslag schadelijk is.

Stap E.2

Golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmat of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In dit vak liggen 4 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00040 t/m WZ_1_6-5_dk_00043. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven.

Tabel 115
Hydraulische
belasting vak 7 per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen

Zichtjaar	Faalkanseis	h^* (m+NAP)	Hs^{**} (m)
2023	1/1.000	4,75-4,76	2,48-2,36
2050	1/1.000	5,02-5,03	2,51-2,44
2075	1/1.000	5,28-5,29	2,62-2,51
2100	1/1.000	5,52-5,53	2,69-2,58
2023	1/3.000	5,02-5,03	2,70-2,59
2050	1/3.000	5,29-5,30	2,78-2,65
2075	1/3.000	5,54-5,55	2,86-2,76
2100	1/3.000	5,79-5,80	2,94-2,80

*marginale statistiek

**Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden. Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief.

Het voorland is niet bekleed. Omdat er vrijwel geen vlak voorland aanwezig is, wordt het niveau van het voorland gelijk gesteld aan de laagwaterlijn (NAP -1,26 m). Het voorland ligt hiermee dus lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgegaan van de minimale waterstand bij de norm en de hierbij berekende maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte. Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland lager ligt dan het maximale niveau. Golfafslag is dus niet mogelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van golfafslag van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

Tabel 116
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is

Zichtjaar	Faalkanseis	h_{min} (m+NAP)	$2H_{s,max}$ (m)	Maximaal niveau Voorland (m+NAP)
2023	1/1.000	4,76	4,96	-0,2
2050	1/1.000	5,03	5,02	0,01
2075	1/1.000	5,29	5,24	0,05
2100	1/1.000	5,53	5,38	0,15
2023	1/3.000	5,03	5,40	-0,37
2050	1/3.000	5,30	5,56	-0,26
2075	1/3.000	5,55	5,72	-0,17
2100	1/3.000	5,80	5,88	-0,08

VLAF - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat afschuiving mogelijk is wordt, alvorens een gedetailleerde toets uit te voeren, nagegaan of, afschuiving schadelijk is.

Stap E.2

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. Ter plaatse van dp86.6 is de helling tussen geulrand en geulbodem maximaal. Deze helling is 1:10. De gemiddelde helling tussen geulrand en geulbodem is dus flauwer dan 1:4,5. Afschuiving kan dus niet optreden. De faalkans is verwaarloosbaar.

VLZV - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium "steilste helling over 5 m" en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever niet bestort is wordt nagegaan waar het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel ligt.

Om het snijpunt van het beoordelingsniveau van het rekenprofiel en het signaleringsprofiel te bepalen is de diepte van de geul benodigd. Wanneer wordt uitgegaan van de geulbodem ter hoogte van dp86.6 is de geuldiepte H_{geul} ongeveer 6 m. Het beoordelingsniveau komt hiermee op NAP -4 m te liggen.

De invloedzone is gelet op de kruinhoogte (NAP +8 m) en het niveau van de teen (NAP -1 m) ca. 36 m. Samen met de te hanteren marge M (=12 m) komt de rand van het signaleringsprofiel op circa 48 m vanaf de teen te liggen. Vanaf daar loopt de vooroever onder een helling van 1:15 tot aan de geulbodem.

Het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel komt dan landwaarts ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel te liggen. Zettingsvloeiing is dus schadelijk. Voor dit vak wordt de beoordeling voortgezet met stap E.2

Stap E.2

Stap E.3 van de eenvoudige toetsing mag alleen worden uitgevoerd als de gemiddelde helling van het onderwatertalud over een hoogte van minimaal 5 m flauwer is dan 1:4. Het steilste deel van het onderwatertalud bij dp 86.6 is 1:10. Daarmee wordt voldaan de eis voor het voortzetten van de eenvoudige toets met Stap E.3.

Stap E.3

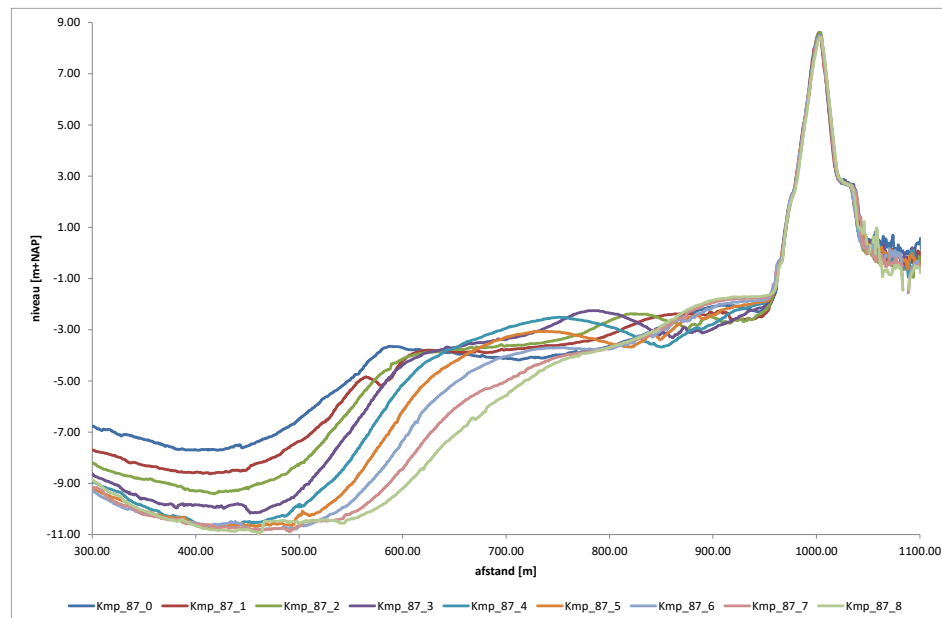
Zettingsvloeiing kan alleen optreden als verwekings- en/ of bresvloeiing kan optreden.

Bresvloeiing kan alleen optreden als in één of meer zand- en siltlagen van het onbestorte onderwatertalud de taludhelling te steil is. De maximale toegestane lokale helling per diepte-interval is in Tabel 24-1 van Bijlage III van [RWS – WVL, 2016a] gegeven. Omdat wordt voldaan aan de toepassingsvoorwaarden van de geometrische toets voor bresvloeiing (maximale hoogte onderwatertalud < 40 , $d_{50, \text{gemiddeld}} > 0,2$ mm en $d_{15, \text{gemiddeld}} > 0,1$ mm), wordt – gelet op de maximale helling van het onderwatertalud (1:10) – de maximale toelaatbare helling niet overschreden (1:2.5). Bresvloeiing kan niet optreden.

Verwekingsvloeiing kan optreden als over de rekenhoogte H_R geldt dat $\cot \alpha_R \leq 7 \left(\frac{H_R}{24} \right)^{\frac{1}{3}}$. Voor de definities van H_R en de rekentaludhelling α_R wordt verwezen naar Figuur 194. Voor α_R wordt het steilste deel van het onderwatertalud gebruikt ($\cot \alpha_R$ is dus 10). Omdat er vrijwel geen vlak voorland aanwezig is, wordt het niveau van de geulrand gelijk gesteld aan GW. Hierdoor is Δh_{onder} 0,16 m. Omdat B gelijk is aan 0 m is α'_{boven} gelijk aan α'_{boven} ($\cot \alpha'_{\text{boven}}$ is dus 4). Gelet op de waarden voor α_R , Δh_{onder} en α'_{boven} wordt, uitgaande van een H_{geul} van 6 m en een h_{dijk} van 9 m, een H_R van circa 51 m gevonden. Gelet op de rekenhoogte mag $\cot \alpha_R$ niet kleiner zijn dan 9. Omdat de rekentaludhelling flauwer is kan geen verwekingsvloeiing optreden. Omdat geen bres- en verwekingsvloeiing kan optreden is de faalkans voor zettingsvloeiing verwaarloosbaar.

Vak 8 loopt van dp 87.0 t/m dp 87.8. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 200
Profielen vak 8*



VLGA - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat golfafslag mogelijk is wordt, alvorens een TOM uit te voeren, nagegaan of, golfafslag schadelijk is.

Stap E.2

Golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmat of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In dit vak liggen 3 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00037 t/m WZ_1_6-5_dk_00039. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven.

*Tabel 117
Hydraulische
belasting vak 8 per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen*

Zichtjaar	Faalkanseis	h^* (m+NAP)	Hs^{**} (m)
2023	1/1.000	4,75	2,36-2,16
2050	1/1.000	5,02	2,44-2,24
2075	1/1.000	5,28	2,51-2,30
2100	1/1.000	5,52	2,58-2,36
2023	1/3.000	5,02	2,59-2,39
2050	1/3.000	5,29	2,65-2,41
2075	1/3.000	5,54	2,76-2,51
2100	1/3.000	5,79	2,80-2,54

*marginale statistiek

**Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden.

Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief.

Het hoogste punt van het voorland is de teen van de dijk. Deze ligt op maximaal op circa NAP -1,6 m. Het voorland ligt hiermee dus lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgegaan van de minimale waterstand bij de norm en de hierbij berekende maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte. Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland overal lager ligt dan het maximale niveau (zie ook onderstaande tabel). Golfafslag is dus niet mogelijk. Voor dit vak is de faalkans als gevolg van golfafslag van het voorland dan ook verwaarloosbaar.

*Tabel 118
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is*

Zichtjaar	Faalkanseis	h_{min} (m+NAP)	$2_{Hs,max}$ (m)	Maximaal niveau voorland (m+NAP)
2023	1/1.000	4,75	4,72	0,03
2050	1/1.000	5,02	4,88	0,14
2075	1/1.000	5,28	5,02	0,26
2100	1/1.000	5,52	5,16	0,36
2023	1/3.000	5,02	5,18	-0,16
2050	1/3.000	5,29	5,30	-0,01
2075	1/3.000	5,54	5,52	0,02
2100	1/3.000	5,79	5,60	0,19

VLAF - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat afschuiving mogelijk is wordt, alvorens een gedetailleerde toets uit te voeren, nagegaan of, afschuiving schadelijk is.

Stap E.2

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. Ter plaatse van dp87.3 is de helling tussen geulrand en geulbodem maximaal. Deze helling is 1:20. De gemiddelde helling tussen geulrand en geulbodem is dus flauwer dan 1:4,5. Afschuiving kan dus niet optreden. De faalkans is verwaarloosbaar.

VLZV - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium "steilste helling over 5 m" en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever niet bestort is wordt nagegaan waar het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel ligt.

Om het snijpunt van het beoordelingsniveau van het rekenprofiel en het signaleringsprofiel te bepalen is de diepte van de geul benodigd. Wanneer wordt uitgegaan van de geulbodem ter hoogte van dp 87.3 is de geuldiepte H_{geul} 10m. Het beoordelingsniveau komt hiermee op NAP – 6,7 m te liggen. De invloedszone is gelet op de kruinhoogte (NAP +8 m) en het minimale niveau van de teen (NAP -3 m) ca. 44 m. Samen met de te hanteren marge M (=20 m) komt de rand van het signaleringsprofiel op circa 64 m vanaf de teen te liggen. Vanaf daar loopt de vooroever onder een helling van 1:15 tot aan de geulbodem. Het beoordelingsniveau met het rekenprofiel komt dan zeewaarts ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel te liggen. Zettingsvloeiing is dus niet schadelijk. Voor dit vak is de faalkans verwaarloosbaar.

N.11

Vak 9

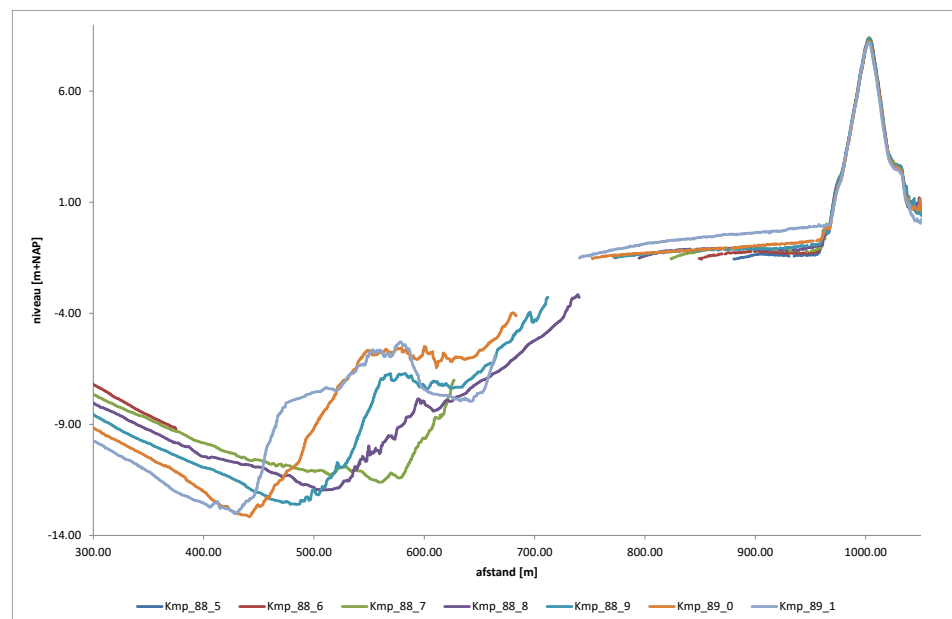
Vak 9 loopt van dp 87.9 t/m dp 88.4. Voor dit vak ontbreken gegevens over het voorland en is geen beoordeling uitgevoerd.

N.12

Vak 10

Vak 10 loopt van dp 88.5 t/m dp 89.1. In onderstaand figuur zijn de profielen van het voorland weergegeven.

*Figuur 201
Profielen vak 10*



VLGA - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of golfafslag schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of golfafslag mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat golfafslag mogelijk is wordt, alvorens een TOM uit te voeren, nagegaan of, golfafslag schadelijk is.

Stap E.2

Golfafslag is niet mogelijk als:

- Op het voorland een grasmat of bodembescherming aanwezig is en de golfhoogte kleiner is dan 0,75 m; of
- Het niveau van het voorland lager is dan de waterstand bij de norm én het verschil tussen beide groter is dan twee keer de significante golfhoogte; of
- Het niveau van het voorland hoger is dan de waterstand bij de norm én de bekleding van het voorland (inclusief de brekerzone) voldoet aan de eisen gesteld aan de betreffende bekleding(en).

In dit vak liggen 3 uitvoerpunten: WZ_1_6-5_dk_00031 /m WZ_1_6-5_dk_00033. In onderstaande tabel zijn voor de verschillende zichtjaren de waterstand en golfhoogte bij verschillende faalkanseisen weergegeven.

*Figuur 202
Hydraulische
belasting vak 10 per
zichtjaar voor
verschillende
faalkanseisen*

Zichtjaar	Faalkanseis	h^* (m+NAP)	Hs^{**} (m)
2023	1/1.000	4,75	2,23-1,38
2050	1/1.000	5,02	2,30-1,53
2075	1/1.000	5,28	2,34-1,57
2100	1/1.000	5,52	2,39-1,72
2023	1/3.000	5,01	2,45-1,59
2050	1/3.000	5,29	2,47-1,61
2075	1/3.000	5,54	2,56-1,78
2100	1/3.000	5,79	2,61-1,81

*marginale statistiek

**Voor de significante golfhoogte is de maximale golfhoogte gebruikt die bij het bepalen van de golfcondities voor bekledingen werd gevonden. Opgemerkt wordt dat deze golfhoogte niet per definitie hoort bij de waterstand bij faalkanseis. In veel gevallen zijn bij deze faalkanseis geen golfcondities bepaald. Daarnaast wordt bij hogere waterstanden een lagere golfhoogte gevonden. De gebruikte golfhoogte is dus conservatief.

Het hoogste punt van het voorland is de teen van de dijk. Deze ligt maximaal op circa NAP -1,2 m. Het voorland ligt hiermee dus lager dan de waterstand bij de norm. Golfafslag is dus niet schadelijk als de waterdiepte bij norm groter is dan twee keer de significante golfhoogte. Wanneer voor het vak wordt uitgegaan van de minimale waterstand bij de norm en de hierbij berekende maximale golfhoogte wordt het maximale niveau van het voorland gevonden waarbij de waterdiepte bij norm gelijk is aan twee keer de significante golfhoogte. Voor het gehele vak geldt dat het niveau van het voorland overal lager ligt dan het maximale niveau. Kortom, Golfafslag is niet mogelijk. Faalkans is verwaarloosbaar.

*Tabel 119
Niveau voorland
waarbij golfafslag
mogelijk is*

Zichtjaar	Faalkanseis	h_{min} (m+NAP)	$2_{Hs,max}$ (m)	Maximaal niveau Voorland (m+NAP)
2023	1/1.000	4,75	4,46	0,29
2050	1/1.000	5,02	4,60	0,42
2075	1/1.000	5,28	4,68	0,60
2100	1/1.000	5,52	4,78	0,74
2023	1/3.000	5,01	4,90	0,11
2050	1/3.000	5,29	4,94	0,35
2075	1/3.000	5,54	5,12	0,42
2100	1/3.000	5,79	5,22	0,57

VLAF - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit twee stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of afschuiving schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of afschuiving mogelijk is. Bij deze beoordeling wordt de volgorde omgedraaid. Indien blijkt dat afschuiving mogelijk is wordt, alvorens een gedetailleerde toets uit te voeren, nagegaan of, afschuiving schadelijk is.

Stap E.2

Volgens stap E.2 is afschuiven niet mogelijk als de totale helling tussen geulrand en geulbodem gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H is. De helling tussen geulrand en geulbodem is maximaal ongeveer 1:17. De gemiddelde helling tussen geulrand en geulbodem is dus flauwer dan 1:4,5. Afschuiving kan dus niet optreden. De faalkans is verwaarloosbaar.

VLZV - Eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit drie stappen. In eerste instantie wordt beoordeeld of zettingsvloeiing schadelijk is. Zo ja, dan wordt gekeken of zettingsvloeiing kan optreden op basis van het criterium "steilste helling over 5 m" en, zo nee, of zettingsvloeiing mogelijk is op basis van de totale geometrie.

Stap E.1

Zettingsvloeiing kan niet optreden als de vooroever bestort is. Omdat de vooroever niet bestort is wordt nagegaan waar het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel ligt.

Om het snijpunt van het beoordelingsniveau van het rekenprofiel en het signaleringsprofiel te bepalen is de diepte van de geul benodigd. Wanneer wordt uitgegaan van de geulbodem ter hoogte van dp89.0 is de geuldiepte H_{geul} 13 m. Het beoordelingsniveau komt hiermee op circa NAP -8,7 m te liggen.

De invloedszone is gelet op de kruinhoogte (NAP +8 m) en het minimale niveau van de teen (NAP -2 m) ca. 40 m. Samen met de te hanteren marge M (=26 m) komt de rand van het signaleringsprofiel op circa 66 m vanaf de teen te liggen. Vanaf daar loopt de vooroever onder een helling van 1:15 tot aan de geulbodem. Het snijpunt van het beoordelingsniveau met het rekenprofiel komt dan zeewaarts ten opzichte van het snijpunt van het beoordelingsniveau met het signaleringsprofiel te liggen. Zettingsvloeiing is dus niet schadelijk. Voor dit vak is de faalkans verwaarloosbaar.

Resultaat

In onderstaande tabellen zijn de resultaten voor de verschillende toetssporen bij verschillende zichtjaren weergegeven.

*Tabel 120
Resultaat
beoordeling VLGA*

Vak	Score VLGA							
	2023		2050		2075		2100	
	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000
1	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
2	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
3	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
4	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
5	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
6	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
7	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
8	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

*Tabel 121
Resultaat
beoordeling VLAF*

Vak	Score VLGA							
	2023		2050		2075		2100	
	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000
1	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
2	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
3	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
4	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
5	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
6	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT
7	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
8	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

Tabel 122
 Resultaat
 beoordeling VLZV

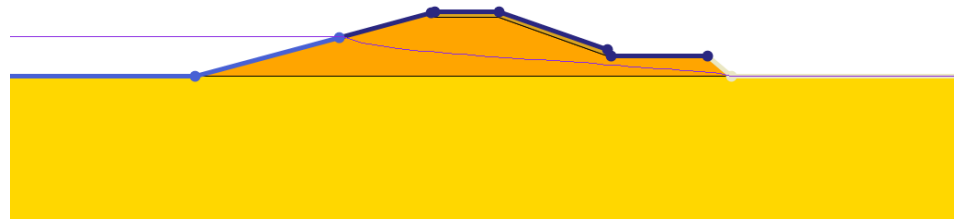
Vak	Score VLZV							
	2023		2050		2075		2100	
	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000	1/ 1.000	1/ 3.000
1	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
2	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
3	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
4	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
5	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT
6	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
7	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
8	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV	FV

Verzadiging van het dijklichaam bij golfoverslag

Bij de berekening van de stabiliteit bij een overslag situatie is in eerste instantie uitgegaan van een volledig verzadigde dijk. Dit is een conservatieve benadering, omdat de dijk een zandkern heeft, een open buitenbekleding en kleibekleding aan de binnenzijde. Het is niet onwaarschijnlijk dat een verhoogde freatische lijn snel kan draineren. Om gevoel te krijgen bij de ontwikkeling van de freatische lijn als gevolg van overslag zijn berekeningen gemaakt met D-GeoFlow. Hierin is het verloop van de buitenwaterstand en golfoverslag gemodelleerd in combinatie met de geohydrologische eigenschappen van de dijk.

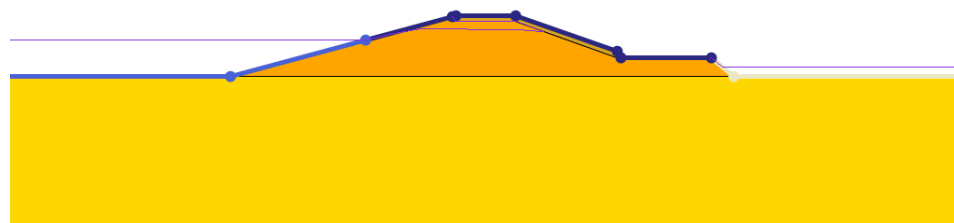
Om het model te calibreren is als eerste instantie een D-GeoFlow berekening gemaakt zonder golfoverslag. Voor het waterstandsverloop zijn de schematiseringsregels voor het faalmechanisme GEBU aangehouden. Figuur 203 laat het resultaat zien. Uit de berekening blijkt dat de freatische lijn zich ontwikkelt zoals ook in het TRWD beschreven is, zij het iets lager. Dit is conform verwachting en betekent dat het model een betrouwbare inschatting kan geven van de ontwikkeling van de freatische lijn.

*Figuur 203
Freatische lijn in de
situatie zonder
golfoverslag*



Uit de berekeningen met golfoverslag (Figuur 204) concluderen we dat de dijk bij overslag snel volloopt. Daarnaast zien we dat de waterstand bij de binnenteen stijgt, en de freatische lijn zich ontwikkelt van een aflopende lijn (zonder golfoverslag) tot een horizontale lijn (met golfoverslag). Dit als golfoverslag intreedt over het hele talud en als deze alleen intreedt op de kruin.

*Figuur 204
Freatische lijn in de
situatie met
golfoverslag*



Als gevolg van het verzadigen van de dijk zal de druk aan de onderkant van de kleibekleding op het binnentalud dermate hoog worden, dat de bekleding wordt afgedrukt. In paragraaf 3.1 is beschreven dat de bekleding wordt

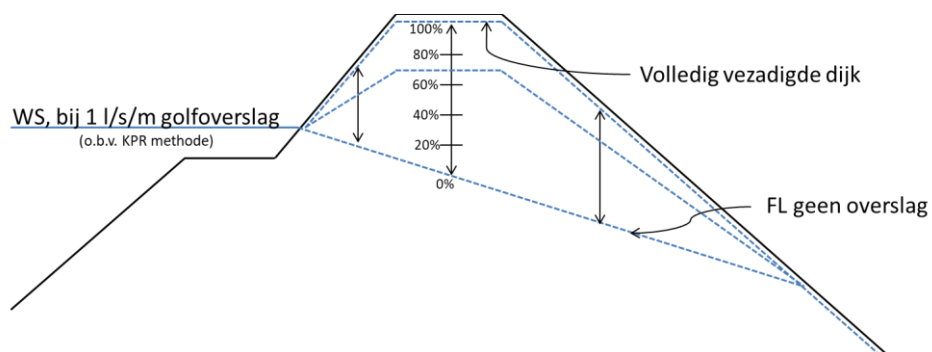
afgedrukt wanneer de waterstand beneden de kleibekleding 4,42m+NAP is. De stabiliteitsfactor voor macrostabiliteit voor vak 3.5 in deze freatische lijn is 0,95, dus de dijk voldoet in deze situatie aan de signaalwaarde ($SF > 0,90$).

Wanneer de dijk verder verzadigd raakt wordt de stijghoogte aan de onderkant van de kleibekleding hoger dan 4,42m+NAP en zal de kleibekleding worden afgedrukt. Na afdrukken van de bekleding kan het water, dat infiltreert door overslag, makkelijker het dijklichaam uitstromen. De freatische lijn langs het binnentalud zal dan dalen, en waarschijnlijk uittreden rond de insteek van het binnentalud. Een stijghoogte van NAP +4,42 m is daarom de fysisch maximale waterstand bij het binnentalud.

Ligging van de freatische lijn

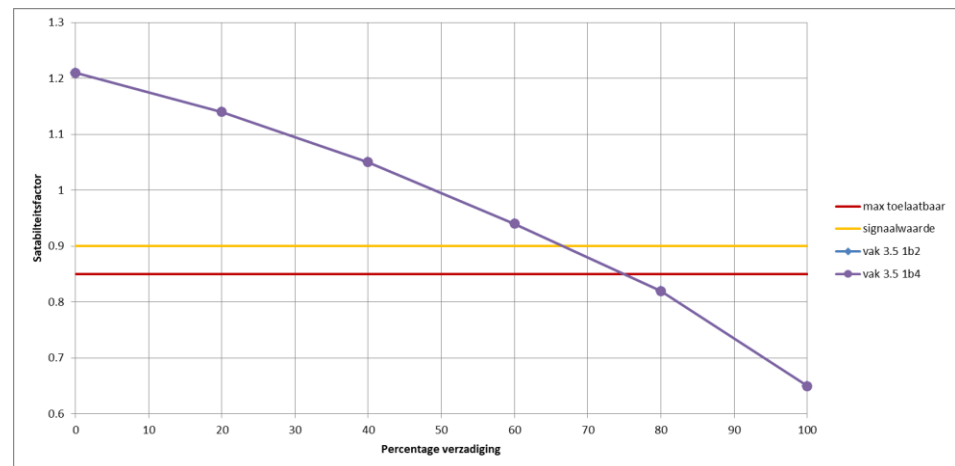
Om inzicht te krijgen in het effect van de ligging van de freatische lijn (bij golfoverslag) op de stabiliteit zijn enkele gevoeligheidsberekeningen gemaakt. In deze berekeningen is de freatische lijn stapsgewijs verhoogd van de freatische lijn zonder overslag (volgens TRWD) naar een volledig verzadigde dijk (zoals in de initiële berekening volgens de kpr notitie). Hierin is de hoogte van de freatische lijn telkens op twee punten, beneden de buitenkruin en beneden de binnenkruin, in vijf stappen verhoogd van 0% verzadiging (geen overslag) tot 100% verzadiging (zie onderstaande figuur).

*Figuur 205
Verschillende
freatische lijnen bij
golfoverslag*



De resultaten van de hierboven beschreven gevoeligheidsberekeningen voor vak 3.5 zijn in Figuur 206 grafisch weergegeven. De resultaten laten zien dat vooral de ligging van de freatische lijn bij het binnentalud van belang is. Zo lang de afstand tussen de freatische lijn en het oppervlakte van het binnentalud groot is voldoet de dijk aan de gestelde eisen. Wanneer de afstand kleiner wordt, wordt niet meer voldaan aan de gestelde eisen. De ligging van de freatische lijn in de kern van de dijk is minder van belang. Dit omdat de gevonden glijvlakken oppervlakkig van aard zijn (in de KPR methode worden geen eisen gesteld aan golfoverslag).

*Figuur 206
Safety factor bij
verschillende
verzadigingsgraden*



Locatie	MHW	Peilbuis	Stijghoogte [m NAP]
82	5.17	3	1.35
		4	1.62
83	5.16	3	2.09
		4	2.00
84	5.11	3	2.70
		4	2.49
87	5.02	3	4.40
		4	2.23
88	5.02	3	3.16
		4	2.22

Bron: email Martin Arends (martin.arends@arcadis.com) naar Jan Tigchelaar en Gerbert Pleijter, maandag 28 mei 2018 17:00.

Q

Havendam

Q.1

Grondopbouw havendam

Voor de ondergrondschematisatie is uitgegaan van twee sonderingen in twee dijkvakken (1 per dijkvak): DKMP90622 in vak 1 en DKMP90532 in vak 2. Het meest naastgelegen SOS segment is 6027. De sonderingen zijn weergegeven in Bijlage Q.1.

DKMP90622:

- Onderkant dijksmateriaal aangehouden op 0,9m+NAP. Dit komt overeen met het niveau van de dijkbasis in vak 1.
- Van NAP tot -7,5m+NAP H_Mg_zk op basis van hoge conus en laag wrijvingsgetal. Tussen -2,5m+NAP en -3m+NAP wel een klein piekje in wrijvingsgetal en dipje in conus, wat kan duiden op H_Mg_z&k. Dit is echter niet heel duidelijk en slechts heel lokaal (niet te zien op andere sonderingen). Bovendien is H_Mg_zk maatgevend (lagere sterkte), dus is dit aangehouden.
- Van -7,5m+NAP tot -11m+NAP H_Mg_z&k: afwisselend hoog en laag wrijvingsgetal, idem voor conus. Dit wijst op laagjes klei en zand.
- Van -11m+NAP tot -20m+NAP P_Ova_sd: heel hoog wrijvingsgetal en relatief lage conus.
- Vanaf -20m+NAP tot ondergrens P_Rg_zm: laag wrijvingsgetal en hoge conus.
- Komt redelijk overeen met SOS, op enkele laagliggingen na.

DKMP90532:

- Onderkant dijksmateriaal aangehouden op 1,75m+NAP. Vanaf 1,75m+NAP is namelijk klei te zien.
- Van 1,75m+NAP tot 1,25m+NAP H_Mp_k: hoog wrijvingsgetal en zeer lage conus duiden op klei.
- Van 1,25m+NAP tot -7,5m+NAP H_Mg_zk op basis van hoge conus en laag wrijvingsgetal.
- Van -7,5m+NAP tot -12,25m+NAP H_Mg_z&k: afwisselend hoog en laag wrijvingsgetal, idem voor conus. Dit wijst op laagjes klei en zand.
- Van -12,25 tot -12,75m+NAP H_Vbv_v: heel hoog wrijvingsgetal, lage conus, en hoge piek in waterspanning duiden op veen. Door diepe ligging voor basisveen gekozen.
- Van -12,75 tot -22m+NAP P_Ova_sd: heel hoog wrijvingsgetal en relatief lage conus. Sondering houdt op bij -22m+NAP.
- -22m+NAP naar beneden P_Rg_zm. Op basis van andere sondering en SOS kan deze laag verwacht worden, al komt hij niet voor op de sondering (beperkte diepte). Precieze ligging van deze laag is irrelevant voor macrostabiliteit.
- Komt redelijk overeen met SOS, op de laag H_Vbv_v na, deze komt echter wel voor in het naastgelegen SOS segment 6026.

Q.2

Sonderingen havendam

**Hoofdkantoor**

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad
Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Nevenvestiging

Elektronicaweg 12
2628 XG Delft

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl