

Veiligheidsanalyse

STERKE LEKDIJK

Irenesluis - Culemborgseveer



HOOGHEEMRAADSCHAP
DE STICHTSE
RIJNLANDEN

Veiligheidsanalyse Dijkversterking Irenesluis - Culemborgse Veer

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

Poldermolen 2
3994 DD Houten

030 634 57 00 T
sterkelekdijk@hdsr.nl E
hdsr.nl/sterkelekdijk W




STERKE LEKDIJK


Titel: Veiligheidsanalyse Dijkversterking Irenesluis - Culemborgse Veer (tbv Nota kansrijke Oplossingen)
Kenmerk: DM1856645
Versie: V7.0
Datum: 20 september 2022
Projectnaam: Dijkversterking Irenesluis – Culemborgse Veer (Sterke Lekdijk)
Projectnummer: 120612
Opgesteld door: M. Vollering, M. Roosendaal, E. Ünal en E. Fiktorie
Gecontroleerd door: Fugro, RHDHV en HDSR

Colofon

Vrijgave NVU:

| Functie | Naam | Paraaf |
|----------------------------|--------------|--|
| Projectmanager RHDHV/Fugro | M. Eversdijk | 14-02-2022  |

Vrijgave NKO:

| Functie | Naam | Paraaf |
|----------------------------|--------------|--|
| Projectmanager RHDHV/Fugro | M. Eversdijk | 20-09-2022  |

Vrijgave VKA:

| Functie | Naam | Paraaf |
|----------------------------|--------------|--------|
| Projectmanager RHDHV/Fugro | M. Eversdijk | |

| Omschrijving | Code | Datum | Toelichting |
|--------------|------|------------|--|
| v1.0 | | 4-2-2022 | Eindconcept |
| v2.0 | | 14-2-2022 | 100% eindversie NvU |
| v3.0 | | | Tussentijdse resultaten optimalisaties |
| v4.0 | | 9-05-2022 | Eindconcept intern review RHDHV |
| v5.0 | | 20-05-2022 | Tussen oplevering t.b.v. NKO |
| V5.1 | | 8-7-2022 | Oplevering concept VA t.b.v. NKO |
| V5.2 | | 20-7-2022 | Verwerken review HDSR |
| V6.0 | | 5-8-2022 | Oplevering eindconcept t.b.v. NKO |
| V7.0 | | 20-9-2022 | Oplevering definitief t.b.v. NKO |

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Aanleiding | 1 |
| 1.2 | Deelproject Dijkversterking Irenesluis – Culemborgse Veer | 1 |
| 1.3 | Doel | 2 |
| 1.4 | Leeswijzer | 2 |
| 2 | Hoogte | 3 |
| 2.1 | Uitgangspunten | 3 |
| 2.1.1 | Huidige hoogte | 3 |
| 2.1.2 | Hydraulische Randvoorwaarden (HR) | 3 |
| 2.1.3 | Autonome bodemdaling | 4 |
| 2.1.4 | Detailniveau beoordeling Hoogte | 4 |
| 2.2 | Uitvoering beoordeling Hoogte | 4 |
| 2.2.1 | Resultaat HBN 5 l/s/m | 5 |
| 2.2.2 | Resultaat HBN 1 l/s/m | 6 |
| 2.2.3 | Resultaat HBN 0,1 l/s/m | 7 |
| 2.3 | Conclusie beoordeling hoogte | 8 |
| 2.4 | Reflectie & Aanbevelingen | 8 |
| 3 | Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) | 10 |
| 3.1 | Uitgangspunten | 10 |
| 3.1.1 | Normering | 10 |
| 3.1.2 | Partiële veiligheidsfactoren | 10 |
| 3.1.3 | Hydraulische belastingen | 11 |
| 3.1.4 | Grondeigenschappen | 11 |
| 3.1.5 | Schematisering freatische lijn, stijghoogte en waterspanningen | 12 |
| 3.1.6 | Opbarsten | 15 |
| 3.1.7 | Selectie STBI locaties | 15 |
| 3.2 | Macrostabiliteit binnenwaarts bij significante overslag | 16 |
| 3.3 | Berekeningsresultaten beoordeling binnenwaartse macrostabiliteit | 16 |
| 3.4 | Conclusie beoordeling stabiliteit binnenwaarts | 17 |
| 3.5 | Reflectie en aanbevelingen | 18 |
| 4 | Piping (STPH) | 20 |
| 4.1 | Uitgangspunten | 20 |
| 4.2 | Schematiseringsfactor | 21 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.3 | Beoordeling opbarsten | 21 |
| 4.3.1 | Analyse | 21 |
| 4.3.2 | Resultaten | 21 |
| 4.4 | Beoordeling heave | 22 |
| 4.4.1 | Analyse | 22 |
| 4.4.2 | Resultaat | 22 |
| 4.5 | Beoordeling piping | 23 |
| 4.5.1 | Analyse | 23 |
| 4.5.2 | Resultaat | 23 |
| 4.6 | Beslisboom piping | 25 |
| 4.6.1 | Hypothese 1 | 26 |
| 4.6.2 | Hypothese 2 | 27 |
| 4.6.3 | Resultaten | 27 |
| 4.7 | Reflectie en aanbevelingen | 28 |
| 4.7.1 | Reflectie | 28 |
| 4.7.2 | Aanbevelingen | 28 |
| 4.8 | Conclusie | 29 |
| | | |
| 5 | Macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) | 31 |
| | | |
| 5.1 | Uitgangspunten | 31 |
| 5.1.1 | Partiële veiligheidsfactoren | 31 |
| 5.1.2 | Verkeersbelasting | 31 |
| 5.1.3 | Schematisering freatische lijn, stijghoogte en waterspanningen | 32 |
| 5.2 | Maatgevende belastingsituaties | 32 |
| 5.3 | Berekeningsresultaten beoordeling buitenwaartse macrostabiliteit | 33 |
| 5.3.1 | Faalkansanalyse macrostabiliteit buitenwaarts | 34 |
| 5.4 | Conclusie beoordeling macrostabiliteit buitenwaarts | 36 |
| 5.5 | Reflectie en aanbevelingen | 37 |
| | | |
| 6 | Bekledingen | 40 |
| | | |
| 6.1 | Micro instabiliteit (STMI) | 40 |
| 6.2 | Asfalt | 40 |
| 6.3 | Resultaten Grasbekleding | 40 |
| 6.3.1 | Grasbekleding Afschuiven Buitentalud (GABU) | 40 |
| 6.3.2 | Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU) | 41 |
| 6.3.3 | Grasbekleding Afschuiven Binnentalud (GABI) | 52 |
| 6.3.4 | Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB) | 57 |
| 6.3.5 | Reflectie en aanbevelingen | 58 |
| 6.4 | Steen | 58 |
| 6.4.1 | Stortsteen | 58 |
| 6.4.2 | Betonzuilen | 58 |
| 6.4.3 | Berekeningsresultaten Steenbekleding | 58 |
| | | |
| 7 | Voorland (VL) | 59 |

| | | |
|------------------|---|-----------|
| 7.1 | Golfafslag (VLGA) | 60 |
| 7.2 | Afschuiving (VLAF) | 61 |
| 7.3 | Zettingsvloeiing (VLZV) | 62 |
| 7.4 | Resultaten beoordeling voorland | 63 |
| 8 | Niet waterkerende objecten (NWO's) | 64 |
| 9 | Conclusie | 65 |
| 9.1 | Algemeen | 65 |
| 9.2 | Hoogte | 68 |
| 9.3 | Macrostabieliteit binnenwaarts | 68 |
| 9.4 | Piping | 69 |
| 9.5 | Macrostabieliteit buitenwaarts | 69 |
| 9.6 | Microstabieliteit | 70 |
| 9.7 | Bekledingen | 70 |
| 9.8 | Voorland | 71 |
| 9.9 | Niet-waterkerende objecten (NWO's) | 71 |
| 9.10 | Reflectie | 71 |
| 10 | Literatuur | 74 |
| 10.1 | Project specifieke documenten | 74 |
| 10.2 | Waterveiligheid | 74 |
| Bijlage A | Eindoordeel | 75 |
| Bijlage B | Stabiliteitsberekeningen STBI | 78 |
| B.1 | Dijkpaal 106 | 78 |
| B.2 | Dijkpaal 113 | 78 |
| B.3 | Dijkpaal 117 | 79 |
| B.4 | Dijkpaal 126 | 79 |
| B.5 | Dijkpaal 136 | 80 |
| B.6 | Dijkpaal 144 | 80 |
| B.7 | Dijkpaal 153 | 81 |
| B.8 | Dijkpaal 156 | 81 |
| B.9 | Dijkpaal 164 | 82 |
| B.10 | Dijkpaal 172 | 83 |
| B.11 | Dijkpaal 183 | 84 |
| B.12 | Dijkpaal 190 | 84 |
| B.13 | Dijkpaal 196 | 85 |
| B.14 | Dijkpaal 203 | 86 |
| Bijlage C | Berekeningsresultaten STPH | 87 |

| | | |
|------------------|---|------------|
| Bijlage D | Stabiliteitsberekeningen STBU | 88 |
| D.1 | Dijkpaal 106 | 88 |
| D.2 | Dijkpaal 113 (geometrie buitendijks obv dijkpaal 111) | 89 |
| D.3 | Dijkpaal 117 | 90 |
| D.4 | Dijkpaal 128 | 90 |
| D.5 | Dijkpaal 136 | 91 |
| D.6 | Dijkpaal 144 | 91 |
| D.7 | Dijkpaal 153 | 92 |
| D.8 | Dijkpaal 156 | 92 |
| D.9 | Dijkpaal 164 | 93 |
| D.10 | Dijkpaal 172 | 93 |
| D.11 | Dijkpaal 183 | 94 |
| D.12 | Dijkpaal 190 | 94 |
| D.13 | Dijkpaal 196 | 95 |
| D.14 | Dijkpaal 203 | 96 |
| Bijlage E | Faalkansanalyse - val na hoogwater | 97 |
| E.1 | Dijkpaal 106 – Val na hoogwater | 97 |
| E.2 | Dijkpaal 106 – Gevoeligheidsanalyse faalkansenboom | 100 |
| Bijlage F | Beoordelingen voorland | 105 |
| F.1 | Dijkpaal 114 | 105 |
| F.2 | Dijkpaal 124 | 105 |
| F.3 | Dijkpaal 133 | 106 |
| F.4 | Dijkpaal 143 | 106 |
| F.5 | Dijkpaal 146 | 107 |
| F.6 | Dijkpaal 148 | 107 |
| F.7 | Dijkpaal 161 | 108 |
| F.8 | Dijkpaal 177 | 108 |
| F.9 | Dijkpaal 194 | 109 |
| F.10 | Dijkpaal 203 | 109 |
| Bijlage G | Gevoeligheidsanalyse POP | 110 |
| Bijlage H | Resultaten reststerkte analyse GEBU | 114 |
| Bijlage I | Resultaten reststerkte analyse GEBU | 117 |

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

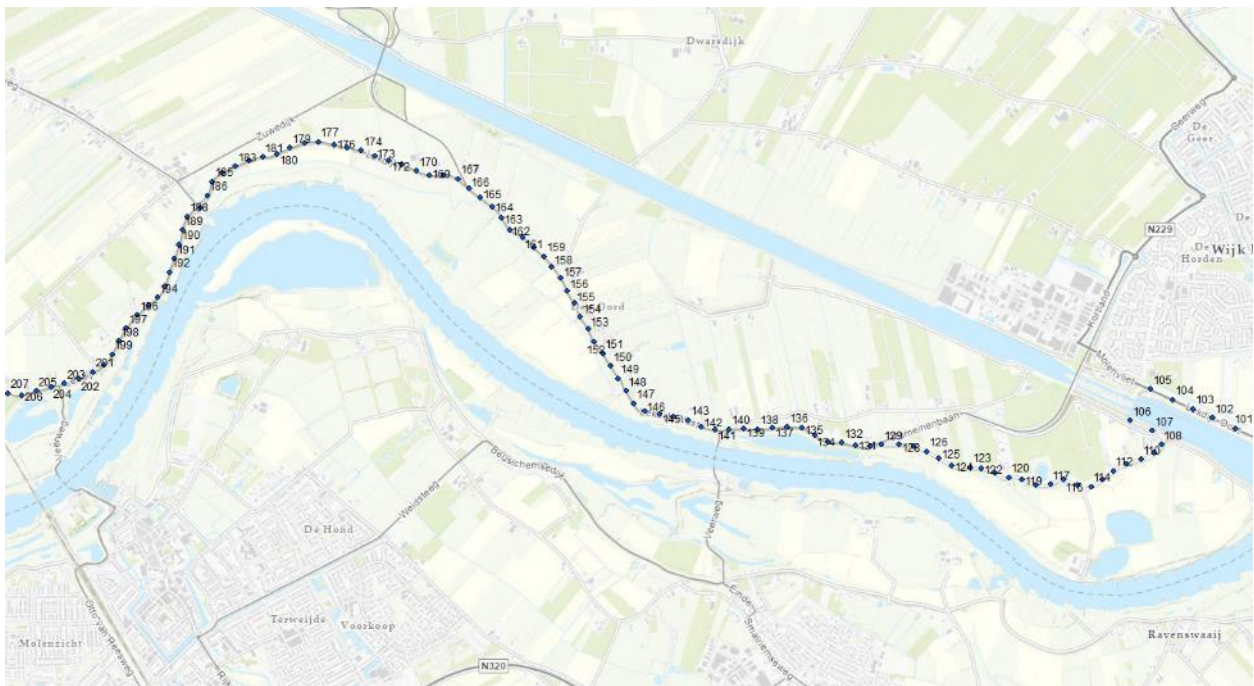
Voor het dijkversterkingsproject ICU (een deel van dijktraject 44-1), dat ligt tussen de Prinses Irenesluis en Culemborgse veer, is HDSR na de zomer van 2021 gestart met de verkenningfase. Onderdeel hiervan is het opstellen van een veiligheidsanalyse om de scope vast te stellen. Om in een vroeg stadium een indruk te hebben van de scope van de waterveiligheidsopgave is eerst een pré-veiligheidsanalyse uitgevoerd voor de volgende hoofdsporen:

- Hoogte (HT)
- Stabiliteit binnenwaarts (SBTI)
- Piping (STPH)

Dit rapport is de vastlegging van de veiligheidsanalyse waarbij de overige sporen zijn toegevoegd voor het kunnen bepalen van de scope. Voor de overige sporen is waar mogelijk enkel de Eenvoudige Toets toegepast. Waar nodig zijn ook vervolgstappen, de Gedetailleerde toets, Toet op Maat en Faalkansanalyses, doorlopen. De Veiligheidsanalyse is opgesteld op basis de Strategische Nota van Uitgangspunten [1] van het programma Sterke Lekdijk en de specifiek voor het traject ICU opgestelde Technische Uitgangspunten Nota [6].

1.2 Deelproject Dijkversterking Irenesluis – Culemborgse Veer

Het dijktraject van het project Irenesluis – Culemborgse Veer (afgekort als ICU) is circa 9,9 km lang. Van oost naar west loopt het traject langs de noordkant van de Lek van de Prinses Irenesluis (dijkpaal 106) tot en met de veerweg van het Culemborgse veer (dijkpaal 203). Het traject doorkruist de gemeenten Houten en Wijk bij Duurstede, ligt in de provincie Utrecht in het zuiden van het beheergebied van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden.



Figuur 1-1 Ligging deelproject ICU met locaties van dijkpalen (dijkpaal 203 in het westen tot 106 in het oosten)

1.3 Doel

Het doel van dit document is om de beoordelingsresultaten van de veiligheidsanalyse vast te leggen. De veiligheidsanalyse is onderdeel van de verkenningsfase waarin drie fasen te onderscheiden zijn.

- 1) In het NvU worden de hoofdmechanismen Hoogte, Macrostabieleit (STBI & STBU) en Piping (STPH) beoordeelt.
- 2) In het NKO worden deze mechanismen waar nodig en waar mogelijk geoptimaliseerd en de faalmechanismen gerelateerd aan de grasbekleding (GABI, GEBU, GEKB en GEBU) beoordeelt.
- 3) In het VKA worden enige optimalisaties doorgevoerd op het faalmechanisme Piping en een start gemaakt in de beoordeling van Niet Waterkerende Objecten (NWO's).

In deze versie van het document zijn de beoordelingsresultaten uit de fase van het NKO vastgelegd. Deze dient als vertrekpunt voor de vervolgfase van het Voorkeurs Alternatief waarin een nadere uitwerking tot en met het niveau van een Definitief ontwerp wordt gerealiseerd.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is het spoor Hoogte (HT) uitgewerkt. Vervolgens is in hoofdstuk 3 het faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts (STBI) uitgewerkt. Daaropvolgend zijn in de hoofdstukken 4, 5, 6 respectievelijk de faalmechanismen piping en heave (STPH), macrostabieleit buitenwaarts (STBU) en bekledingen uitgewerkt. In hoofdstuk 7 is tot slot de beoordeling van het voorland beschreven.

In elk hoofdstuk zijn de uitgangspunten, de uitvoering en de resultaten beschreven. Tot slot volgen in hoofdstuk 9 de conclusies samengebracht per mechanisme en al geheel over het traject van ICU.

2 Hoogte

In dit hoofdstuk is de beoordeling van de minimaal benodigde kruinhoogte bepaald op basis van een Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) met een overslagdebiet van 5 l/s/m conform de werkwijze van het OI2014v4/WBI2017. De beoordeling van de kruinhoogte is per dijkpaal (DP106 tot en met DP203) uitgevoerd. Aan de hand van de huidige kruinhoogte, hydraulische randvoorwaarden en de autonome bodemdaling is bepaald of de kering tot en met 2073 voldoende hoog is. Ook geeft deze beoordeling inzicht in welke mate er sprake is van “hoogtetekort” of “overhoogte”.

2.1 Uitgangspunten

2.1.1 Huidige hoogte

De huidige hoogte is bepaald op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) met als inwintjaar 2015. De hoogte van de kruin loopt niet exact horizontaal. In overleg met HDSR is gekozen om per dijkpaal de hoogte ter plaatse van de hart-kruinlijn te gebruiken. Deze hartlijn in de kruin van de primaire kering is afkomstig van het Open Data Portaal, Waterkeringenlijn – Waterkeringen Lijn BR.

Deze keuze sluit aan op de schematiseringshandleiding van Hoogte/GEKB [9] waarin wordt aangedrongen om geen buitenkruinlijn te hanteren, omdat de bestaande kerende hoogte van de kering daarmee onderschat wordt. De referentielijn “Waterkeringen Lijn BR” is een realistische benadering om de bestaande hoogte te beoordelen.

2.1.2 Hydraulische Randvoorwaarden (HR)

HDSR heeft voor de hele Sterke Lekdijk vooraf een grote hoeveelheid hydraulische randvoorwaarden bepaald. Dit is vastgelegd met de WBI_database en de DPa_database en vervolgens samengevoegd en beschikbaar gesteld voor onder andere het project ICU.

Voor ICU zijn de hydraulische randvoorwaarden bij de dijkpalen 106-203 (uitvoerpunten LE_1_44-1_dk_00017 t/m LE_1_44-1_dk_00117) overgenomen uit de door HDSR opgeleverde Excelsheet [2] om de beoordeling van Hoogte.

2.1.2.1 Hydraulisch Belastingniveau (HBN)

De waterkering is beoordeeld en wordt ontworpen met een hydraulisch belastingniveau (HBN) bij een overslagdebiet van 5 l/s/m conform de Strategische Nota van Uitgangspunten [1].

Daarnaast is het HBN beschikbaar gesteld voor de overslagdebieten van 1 l/s/m en 10 l/s/m. Het HBN met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m is door Fugro bepaald. Dit geeft een doorkijk naar de beoordeling van andere faalmechanismen die tijdens de verkenningsfase beschouwd worden. Denk hierbij aan het rekenen met een verzadigde zone bij stabiliteit binnenwaarts (STBI) of Grasbekleding Afschuiving Binnentalud (GABI). Te de nemen beoordelingsstappen zijn afhankelijk van het optredende overslagdebiet.

Alle verschillende HBN's zijn bepaald met een kans van voorkomen van 1/41.667 voor de zichtjaren 2023, 2050 en 2100. Dit is conform de faalkansbegroting voor normtraject 44-1.

2.1.2.2 Zichtjaar

Het zichtjaar voor de beoordeling van de waterkering is door HDSR voor ICU vastgesteld op 2073. Dit sluit aan op de naastgelegen deeltrajecten Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM) en Culemborgse veer – Beatrixsluis (CUB). De minimale benodigde kruinhoogte voor het zichtjaar 2073 is bepaald op basis van een lineaire interpolatie voor de hydraulisch belastingniveaus uit 2050 en 2100. In deze benodigde kruinhoogte is geen autonome bodemdaling verdisconteerd.

2.1.3 Autonome bodemdaling

HDSR heeft voor verschillende gebieden de autonome bodemdaling in kaart gebracht en opgenomen in de Strategische Nota van Uitgangspunten [1]. Voor ICU geldt alleen een autonome bodemdaling van 2 mm per jaar of 4 mm per jaar. Dit is vastgelegd in de Shapefile “SLD_Bodemdaling” met daarin verschillende gradaties bodemdaling.

De totale bodemdaling die in rekening is gebracht voor de minimale benodigde kruinhoogte strekt zich uit over een periode van 58 jaar, namelijk van 2015 (inwinjaar AHN3) tot en met 2073 (zichtjaar). Voor elke dijkpaal is deze locatie specifieke autonome bodemdaling ingevoerd en verwerkt in de Hoogtebeoordeling.

Tabel 2-1 Autonome bodemdaling per dijkpaal

| Van dijkpaal | Tot en met dijkpaal | Autonome bodemdaling | Bodemdaling (2015-2073) |
|--------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| 106 | 119 | 2 mm per jaar | 0,12 meter |
| 120 | 155 | 4 mm per jaar | 0,23 meter |
| 156 | 159 | 2 mm per jaar | 0,12 meter |
| 160 | 168 | 4 mm per jaar | 0,23 meter |
| 169 | 203 | 2 mm per jaar | 0,12 meter |

2.1.4 Detailniveau beoordeling Hoogte

De beoordeling van Hoogte is per dijkpaal (ongeveer elke 100 meter) bepaald. Uit de beoordeling blijkt of het Hoogte spoor “Voldoet” of “Onvoldoende” is. Bij locaties met een eventuele hoogteopgave kan in de verkenningsfase gedetailleerder beoordeeld worden, bijvoorbeeld elke 50 meter.

Als de locatie (dijkpaal) voldoet aan de hoogte-eis kan er sprake zijn van ‘overhoogte’. In het geval van ‘overhoogte’ zal er minder dan 5 l/s/m overslag plaatsvinden onder maatgevende omstandigheden.

2.2 Uitvoering beoordeling Hoogte

De beoordeling is in eerste instantie uitgevoerd voor een HBN bij een overslagdebiet van 5 l/s/m conform SNvU [1]. Ook is de beoordeling uitgevoerd voor het HBN bij een overslagdebiet van 1 l/s/m en 0,1 l/s/m om een beeld te krijgen wat de invloed is van deze overslagdebieten op twee andere faalmechanismen, namelijk:

- Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI) bij een verzadigde dijk. Wanneer het overslagdebiet groter is dan 1 l/s/m (met een herhalingstijd die getalsmatig gelijk is aan de trajectnorm (ondergrens), in dit geval

1/10.000 per jaar) dient ook een binnenwaartse stabiliteitsberekening uitgevoerd te worden met een verzadigde dijk. Het resultaat is uitgewerkt in paragraaf 2.2.2.

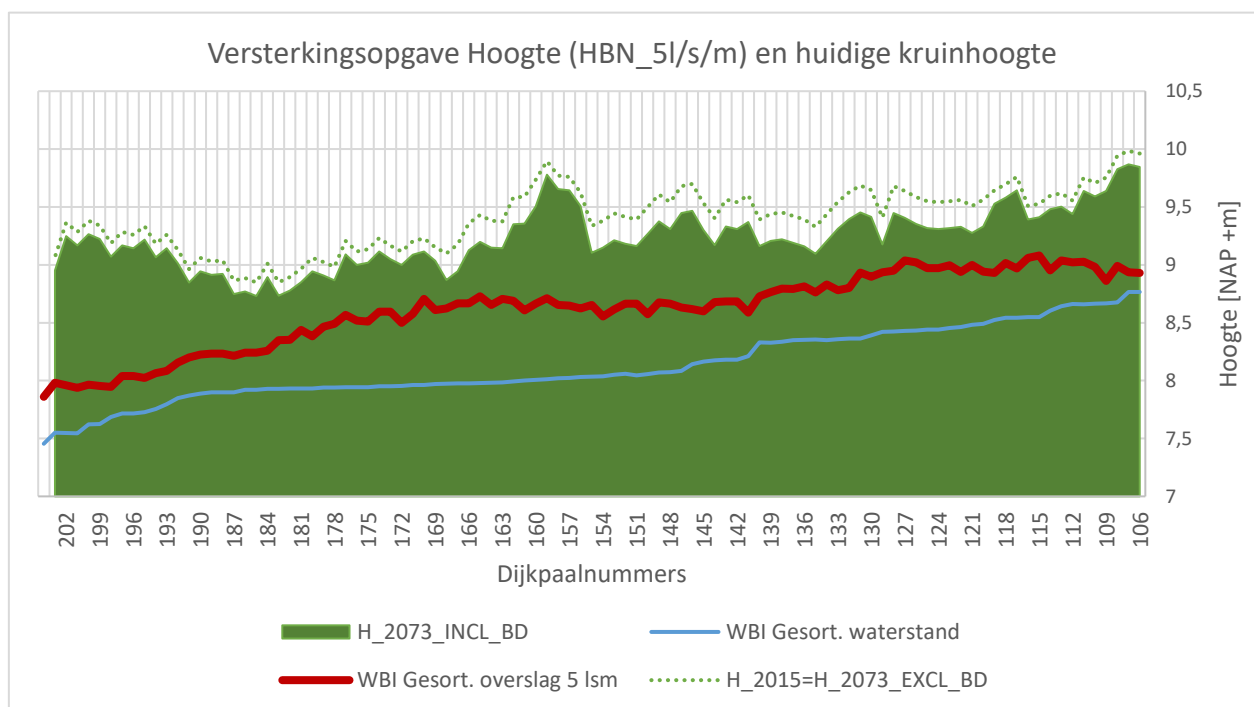
- Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB). Wanneer het overslagdebiet kleiner is dan 0,1 l/s/m (met een herhalingstijd die getalsmatig gelijk is aan de doorsnede-eis voor GEKB (ondergrens)), kan worden volstaan met een eenvoudige toets. Dit resultaat is uitgewerkt in paragraaf 2.2.3.
- Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI). Wanneer het overslagdebiet kleiner is dan of gelijk aan 0,1 l/s/m (met een herhalingstijd die getalsmatig gelijk is aan de trajectnorm (ondergrens) van 1/10.000 per jaar), kan worden volstaan met een eenvoudige toets. Dit resultaat is uitgewerkt in paragraaf 6.3.3.

2.2.1 Resultaat HBN 5 l/s/m

De hoogte van de waterkering in 2073 voldoet als deze gelijk of groter is dan het hydraulisch belasting niveau met een overslagdebiet van 5 l/s/m.

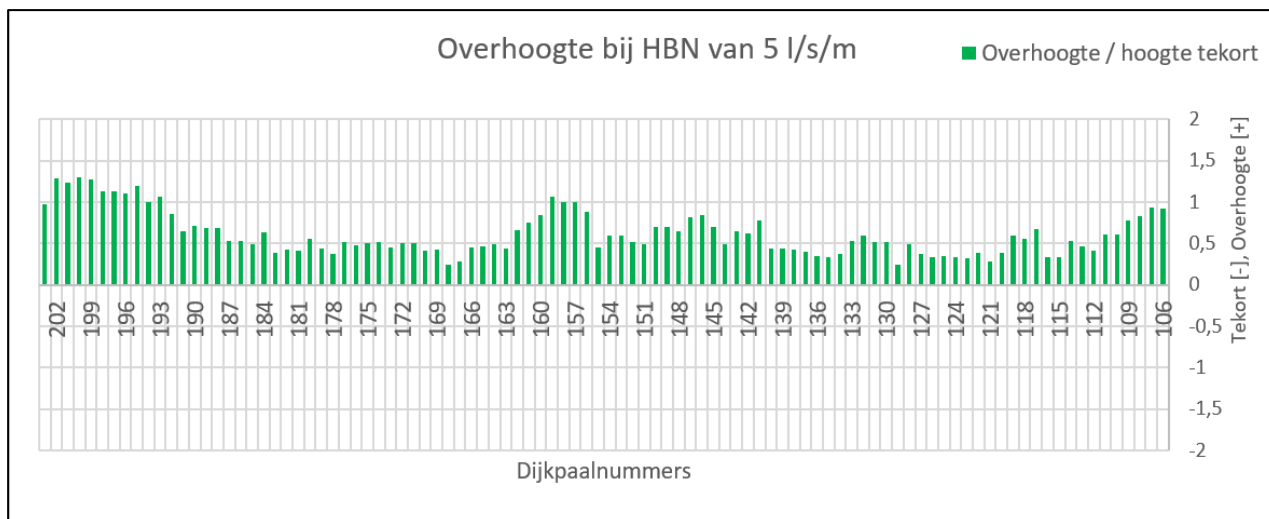
Kruinhoogte 2073 incl. bodemdaling \geq HBN van 5 l/s/m

Voor het hele projectgebied van ICU geldt dat wordt voldaan aan Hoogte (HBN 5 l/s/m). In Figuur 2-1 is de beoordeling voor dijkpaal 106 tot en met 203 weergegeven. De groene stippelijijn in Figuur 2-1 is de huidige kruinhoogte (gemeten in 2015). De top van het groene vlak is de kruinhoogte inclusief bodemdaling tot en met het zichtjaar 2073 en ligt overal hoger dan de rode lijn (hydraulisch belasting niveau met overslagdebiet van 5 l/s/m) bij zichtjaar 2073.



Figuur 2-1 Beoordeling Hoogte HBN 5 l/s/m

In Figuur 2-2 is de 'overhoogte' per dijkpaal weergegeven. De 'overhoogte' is uiteenlopend tussen enkele decimeters tot soms meer dan 1,0 meter. Aangezien per dijkpaal (per ca. 100 m) ruim wordt voldaan aan de hoogte eis van 5 l/s/m is er geen reden om gedetailleerder naar de hoogteopgave te kijken (bijvoorbeeld per 50 m).



Figuur 2-2 Overhoogte HBN 5 l/s/m

2.2.2 Resultaat HBN 1 l/s/m

Het mechanisme STBI met de verzadigde dijk (STBI_{overslag}) wordt beoordeeld aan de hand van de schematiseringshandleiding macrostabiliteit en een KPR Factsheet [12]. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen twee verschillende situaties:

1. De faalkans van het spoor STBI_{overslag} is verwaarloosbaar klein indien het overslagdebiet 1 l/s/m of kleiner is onder maatgevende omstandigheden bij norm.
2. Bij een overslagdebiet groter dan 1 l/s/m is de faalkans niet verwaarloosbaar en dient een aanvullende stabiliteitsberekening te worden gemaakt van een verzadigde dijk.



Figuur 2-3 Beoordeling kruinoogte HBN 1 l/s/m: Overhoogte [+], hoogte tekort [-]

Toelichting verzadigde dijk

De schematiseringhandleiding macrostabiliteit [12] gaat uit van een overslagdebiet van maximaal 1 l/s/m. Bij grotere overslagdebieten zal dit effect hebben op de waterspanningen in het dijklichaam. Dit heeft grote invloed op het bepalen van het maatgevende glijvlak en het eventuele restprofiel.

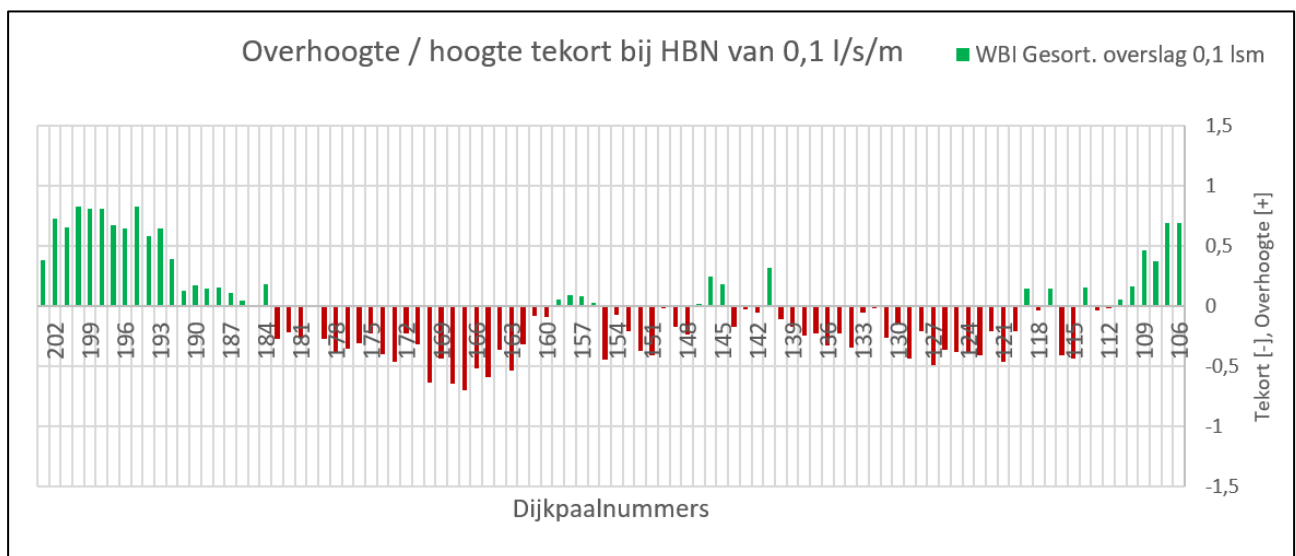
Indien niet wordt voldaan aan het HBN van 1 l/s/m dienen aanvullende stabiliteitsberekening te worden gemaakt van een verzadigde dijk aan de hand van de KPR factsheet Werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag. Indien wél wordt voldaan hoeft de locatie niet meer beoordeeld te worden op verzadiging van de dijk.

Bij dijkpaal 168 wordt net niet voldaan aan de hoogte eis met een HBN van 1 l/s/m. Er is sprake van een hoogtetekort van 6 millimeter. Gegeven de robuuste aannames in de zettingsverwachting, is dit tekort acceptabel en daarom is de “verzadigde dijk” belastingsituatie niet berekend.

2.2.3 Resultaat HBN 0,1 l/s/m

Het mechanisme GABI wordt beoordeeld aan de hand van de eenvoudige toets Stap E.1 [11]. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen twee verschillende situaties:

3. De faalkans van het spoor GEKB is verwaarloosbaar indien het overslagdebiet gelijk of kleiner is dan 0,1 l/s/m onder maatgevende omstandigheden.
4. Bij een overslagdebiet groter dan 0,1 l/s/m is de faalkans niet verwaarloosbaar en zal de bekleding nader beschouwd worden met de verschillende beoordelingen.

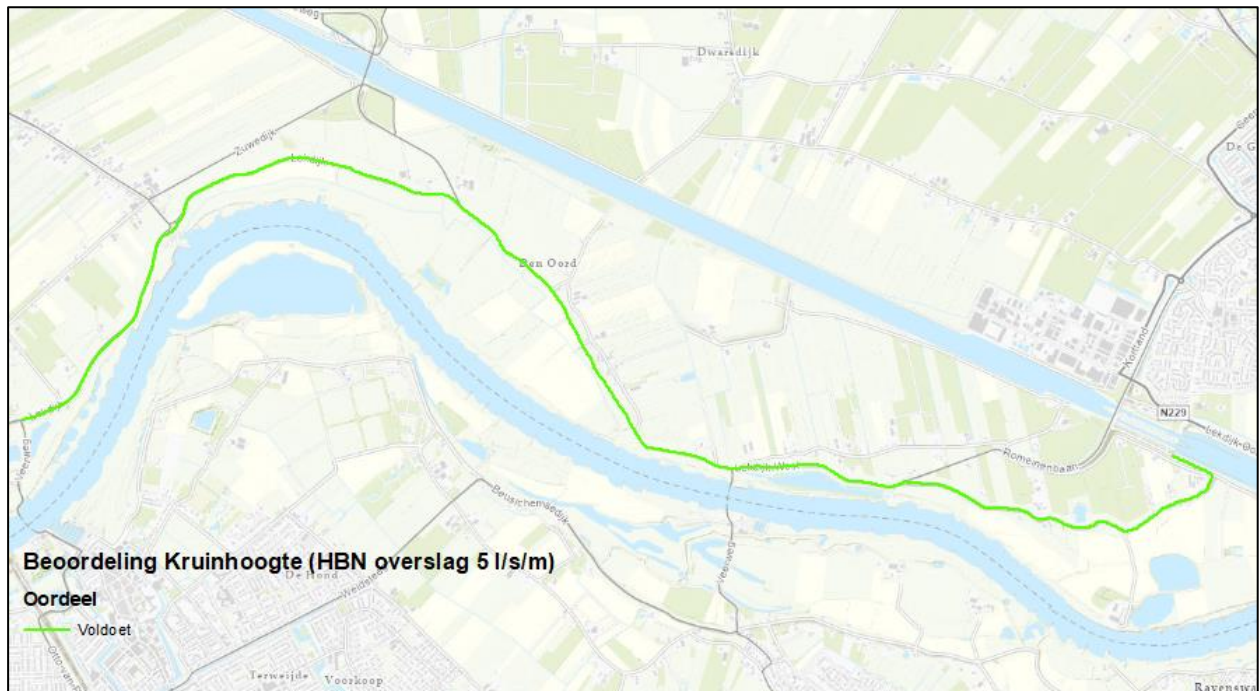


Figuur 2-4 Beoordeling kruinhoogte HBN 0,1 l/s/m: Overhoogte [+], hoogte tekort [-]

Bij een Hoogte eis met een HBN van 0,1 l/s/m resulteert dit in 60 dijkpalen met een hoogtetekort (dus een overslagdebiet groter dan 0,1 l/s/m) en 38 dijkpalen die voldoen en overhoogte hebben.

2.3 Conclusie beoordeling hoogte

De minimaal benodigde kruinhoogte is voldoende bij een kritiek overslagdebiet van 5 l/s/m bij een terugkeertijd van 1/41.167. Voor de beoordeling van de kruinhoogte geldt dus dat het gehele deeltraject ICU voldoet aan de faalkanseis op doorsnedeniveau conform SNvU [1].



Figuur 2-5 Beoordeling kruinhoogte bij een overslagdebiet van 5,0 l/s/m (DP106-DP203)

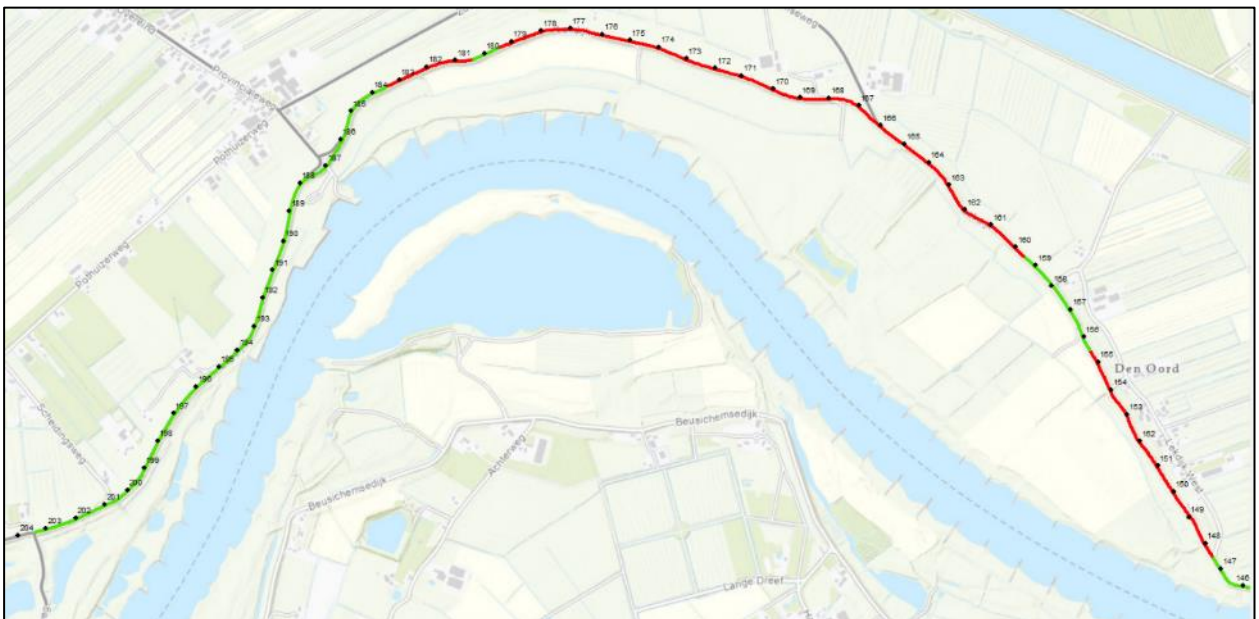
2.4 Reflectie & Aanbevelingen

De beoordeling met een overslagdebiet van 1 l/s/m (bij een terugkeertijd van 1/41.167) resulteert in een bijna volledige groene overzichtskaart. Alleen DP168 voldoet niet aan de minimaal benodigde kruinhoogte bij een kritieke overslagdebiet van 1 l/s/m. Het hoogtetekort is echter verwaarsloorbaar klein. Voor de minimale kruinhoogte bij een overslagdebiet van 1 l/s/m geldt dat, conform de [1] en in afstemming met HDSR, de gehele waterkering voldoet aan de eis. Dit houdt in dat voor macrostabiliteit binnenwaarts geen aanvullende beschouwing hoeft te worden uitgevoerd waarbij rekening wordt gehouden met significante golfoverslag.

De beoordeling met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m (bij een terugkeertijd van 1/41.167) is weergegeven in twee verschillende overzichtskaarten (figuur 2-6 en figuur 2-7). Hieruit kan geconcludeerd worden dat de oriëntatie een rol speelt. Voornamelijk locaties die zuidelijk, en zuidwestelijk georiënteerd zijn voldoen niet aan een HBN met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m. In totaal voldoen 60 dijkpalen niet aan de minimaal benodigde kruinhoogte bij een overslagdebiet van 0,1 l/s/m. Dit betekent echter niet dat de waterkering niet voldoet aan het beoordelingsspoor kruinhoogte. Voor beoordelingsspoor “Grasbekleding afschuiving binnentalud (GABI)” is daarom een aanvullende beschouwing uitgevoerd.



Figuur 2-6 Beoordeling kruinhoogte met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m (DP106-DP146)



Figuur 2-7 Beoordeling kruinhoogte met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m (DP147-DP203)

3 Macrostabiliiteit binnenwaarts (STBI)

In dit hoofdstuk is de beoordeling van het faalmechanisme macrostabiliiteit binnenwaarts opgenomen. Hierbij wordt specifiek ingegaan op de onderbouwing voor de keuze van de maatgevende profielen per dijkvak. Verder zijn de belangrijkste input parameters nader beschreven zoals de grondeigenschappen en de geohydrologische schematisaties. De berekeningen zijn uitgevoerd volgens de Technische uitgangspuntennotitie (TUN) [1] die specifiek voor het deelproject ICU is opgesteld. Wanneer een andere invulling is gegeven aan deze uitgangspunten of een nadere toelichting op de gehanteerde uitgangspunten nodig is, dan is dit expliciet vermeld.

3.1 Uitgangspunten

De randvoorwaarden en uitgangspunten voor de beoordeling op macrostabiliiteit binnenwaarts zijn benoemd in de TUN [1]. De volgende randvoorwaarden en uitgangspunten toegepast.

3.1.1 Normering

Voor het dijktraject 44-1 geldt een norm van 1/10.000 per jaar. Hieruit wordt de faalkanseis voor Macrostabiliiteit binnenwaarts afgeleid met behulp van de algemene formules binnen het WBI 2017 [2].

3.1.2 Partiële veiligheidsfactoren

De macrostabiliiteit binnenwaarts is beoordeeld met een semi-probabilistische werkwijze uit het WBI 2017 [2]. Verschillende onzekerheden beïnvloeden de macrostabiliiteit van een dijk en daarom is er gebruik gemaakt van een aantal partiële veiligheidsfactoren. Gezamenlijk leiden deze factoren tot een geïste stabiliteitsfactor (SF) voor STBI.

- De schadefactor is 1,17 (afgeleid vanuit het WBI 2017 [14]).

De schematiseringsfactor is 1,10. In afstemming met HDSR is gekozen om deze waarde van de direct naastgelegen deeltrajecten CUB [3] en WAM over te nemen vanwege de uniforme bodemopbouw in gelaagdheid en in de sterkteparameters. De schematiseringsfactor wordt afgeleid door scenario's in acht te nemen die leiden tot onzekerheden in de schematisering. De scenario's en de bijbehorende onzekerheden verschillen per traject. Hoewel het gebruik van de schematiseringsfactor van een buurtraject met een uniforme opbouw in gelaagdheid een goede eerste inschatting is, is het aan te raden deze scherp te stellen indien SF's dicht bij de eis berekend worden. Volgens het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken [23] bedraagt deze factor minimaal 1,0 en maximaal 1,3. Deze bandbreedte rond de schematiseringsfactor leidt tot een bandbreedte in SF. Het overzicht hiervan is weergegeven in

tabel 3-1. Middels de bandbreedte van de SF is de invloed van de schematiseringsfactor in kaart gebracht. In het VKA wordt de gehanteerde schematiseringsfactor van 1,10 kwantitatief bepaald om na te gaan of alle onzekerheden voor macrostabiliteit binnen ICU voldoende afgedekt worden.

-
- Modelfactor van 1,06 bij UpliftVan
- De vereiste stabiliteitsfactor (SF) = 1,37 (bij het model UpliftVan)

Tabel 3-1: Bandbreedte stabiliteitseis volgens methode UpliftVan bij verschillende schematiseringsfactoren

| Schematiseringsfactor | Vereiste SF |
|-----------------------|-------------|
| 1,05 | 1,30 |
| 1,10 | 1,37 |
| 1,15 | 1,42 |
| 1,20 | 1,48 |

3.1.3 Hydraulische belastingen

HDSR heeft voor de hele Sterke Lekdijk een grote hoeveelheid hydraulische belastingen vooraf bepaald. Dit is bepaald met de WBI_database en de DPa_database en vervolgens samengevoegd en beschikbaar gesteld voor onder andere het project ICU.

Voor ICU zijn de hydraulische belastingen bij de dijkpalen 106-203 (uitvoerpunten LE_1_44-1_dk_00017 t/m LE_1_44-1_dk_00117 dus uit de WBI_database) overgenomen om de beoordeling voor alle mechanismen uit te voeren.

Waterstand bij Norm (WBN)

De macrostabiliteit is beoordeeld op basis van een waterstand bij Norm (WBN) met een kans van voorkomen van 1/10.000 per jaar conform WBI 2017 [14].

Zichtjaar

Het zichtjaar voor de beoordeling van de waterkering is door HDSR voor ICU vastgesteld op 2073. Dit sluit aan op de naastgelegen deeltrajecten Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM) en Culemborgse veer – Beatrixsluis (CUB). Het WBN voor het zichtjaar 2073 is bepaald met een lineaire interpolatie tussen de berekende waarden uit 2050 en 2100.

3.1.4 Grondeigenschappen

Bij de berekening van de binnenwaartse stabiliteit zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Voor de POP (Pre-Overburden Pressure) waarden zijn de defaultwaarden uit de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit [3] gehanteerd. Dit betreft de karakteristieke waarde POP voor grondsoort Echteld klei diep en ondiep, Hollandveen en Dijkmateriaal (klei). In het NKO zijn de POP-waarden geoptimaliseerd. De defaultwaarden zijn te conservatief bevonden. Omdat de bodemopbouw sterkt lijkt op die bij CUB, zijn alternatieve (realistische) waarden bepaald aan de hand van de waarden gebruikt voor dit buurtraject. Hierbij zijn er lagere waarden gehanteerd ten opzichte van CUB. De gevoeligheid van de SF voor een reële bandbreedte rond de waarden is onderzocht in een gevoeligheidsanalyse (Bijlage G) om te onderzoeken of een reële variatie in POP-waarde, effect heeft op de scope. Hierbij kwam naar voren de SF niet gevoelig is voor keuzes binnen de gehanteerde bandbreedte. De gehanteerde waarden leiden daarom tot een stabiel resultaat. De geoptimaliseerde dwarsprofielen zijn: DP106, DP113, DP156, DP172, DP190 en DP196, omdat hier een veiligheidsopgave was berekend.

- De sterkteparameters (met uitzondering van de POP-waarden) van de verschillende grondsoorten zijn gebaseerd op de proevenverzameling van CUB [4]. De proevenverzameling van CUB is geactualiseerd met het laboratoriumonderzoek dat is uitgevoerd op grondmonsters die zijn gestoken in het deeltraject ICU.
- Voor de kleilagen geldt dat wanneer deze zich boven de dagelijkse grondwaterstand bevinden deze gedraineerd worden berekend en daaronder ongedraineerd.

3.1.5 Schematisering freatische lijn, stijghoogte en waterspanningen

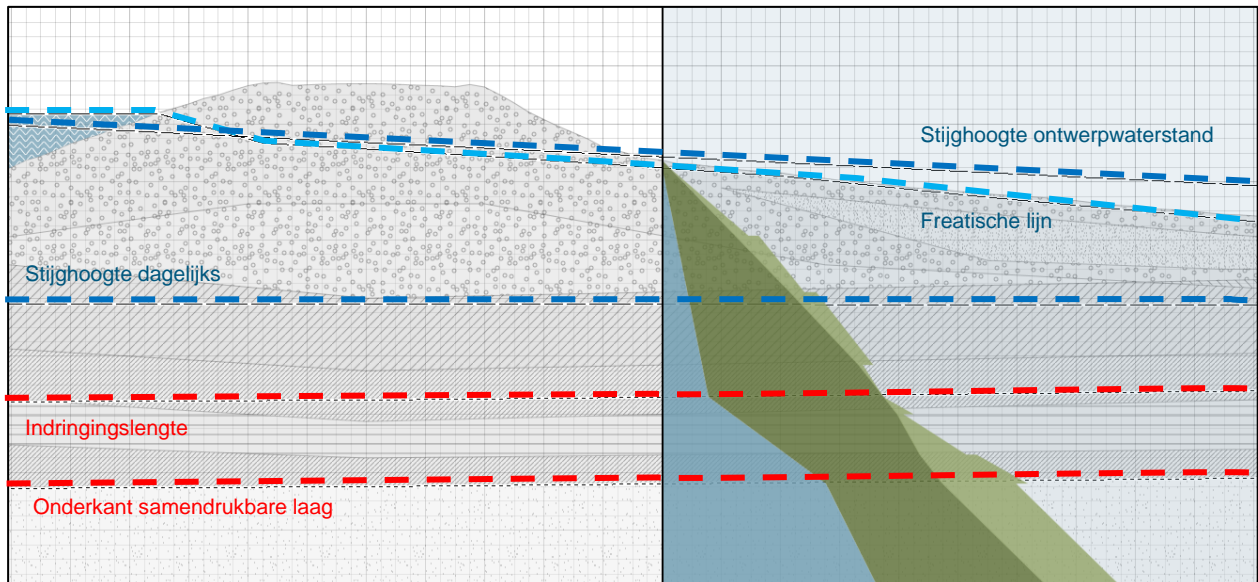
In onderstaande tabel zijn de gehanteerde geohydrologische randvoorwaarden met betrekking tot de freatische lijn en stijghoogte onder dagelijkse omstandigheden opgenomen. Deze karakteristieke waarden zijn bepaald op basis van de beschikbare peilbuismetingen [8]. Per dijkvak is een selectie gemaakt uit de twee dichtstbijzijnde peilbuizen op basis van polderpeilen en deklaagdikte. Daarnaast is gebruik gemaakt van de indicatief gemeten waterstanden tijdens de uitvoering van de mechanische boringen en de beschikbare sonderingen met waterspanningsmeting.

Tabel 3-2: Gehanteerde waarden freatische lijn en stijghoogte bij dagelijkse omstandigheden

| Dijkvak | Dijkpaal | Freatische lijn BUT dagelijks (tov NAP [m]) | Freatische lijn Kruin dagelijks (tov NAP [m]) | Stijghoogte BIT dagelijks (tov NAP [m]) |
|---------|----------|---|---|---|
| 1 | 106 | 3,0 | 4,5 | 2,1 |
| 2a | 113 | 3,0 | 4,5 | 2,25 |
| 2b | 117 | 3,0 | 4,5 | n.t.b. (maatwerklocatie) |
| 2c | 126 | 3,0 | 4,5 | 1,8 |
| 3 | 136 | 3,0 | 5,25 | 1,75 |
| 4 | 144 | 3,0 | 4,5 | 2,0 |
| 5a | 153 | 3,0 | 4,5 | 2,1 |
| 5b | 156 | 2,7 | 4,5 | 1,8 |
| 6a+b | 164 | 2,75 | 4,25 | 0,85 |
| 6c | 172 | 2,25 | 3,75 | 1,2 |
| 6d | 183 | 2,0 | 3,5 | 1,4 |
| 7 | 190 | 3,0 | 4,5 | 2,4 |
| 8a | 196 | 3,0 | 4,5 | 2,5 |
| 8b | 203 | 2.91 | 4.41 | 2.53 |

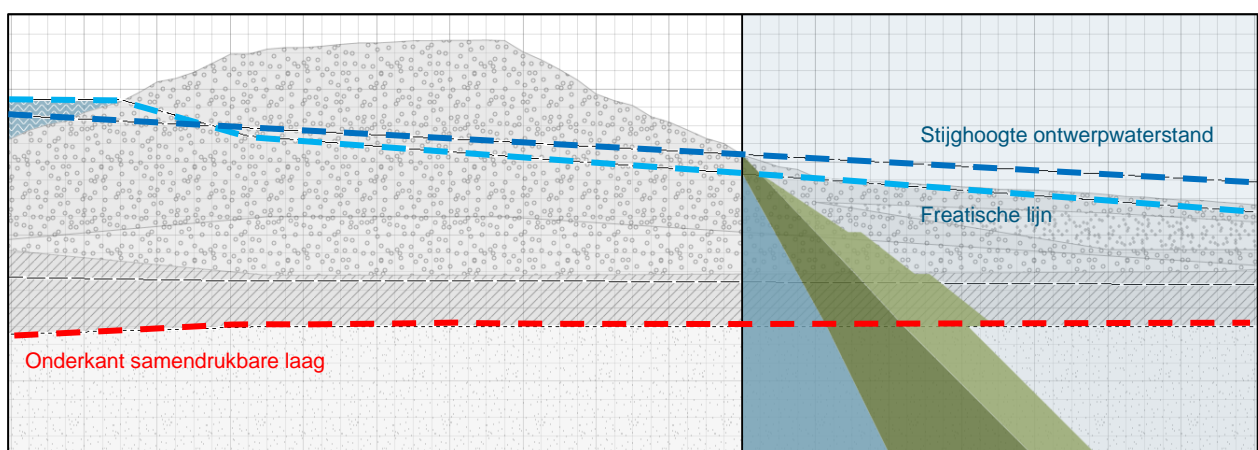
Het verloop van de waterspanningen in het watervoerend pakket en in het samendrukbare lagenpakket (indringingszone van 2 meter) is geschematiseerd volgens de TUN. Het verloop van de waterspanningen (bij ontwerpwaterstand) in het samendrukbare lagenpakket is als volgt geschematiseerd. Het waterspanningsverloop in de kleikern en het samendrukbare pakket is aangenomen met een lineair verloop tussen

het freatisch vlak bij ontwerpwaterstand en de stijghoogte onder normale dagelijkse omstandigheden (bij GHW) aan de bovenzijde van de indringingslaag, zie figuur 3-1.



Figuur 3-1 Schematisering van waterspanningen conform uitgangspunten TUN.

Echter wanneer de deklaag relatief dun is ($< 4,0$ m) en de stijghoogte onder dagelijkse omstandigheden relatief laag ligt, leiden deze uitgangspunten tot een onveilige schematisering met te lage waterspanning tot gevolg. Wanneer deze situatie zich voordoet bij de berekende maatgevende dwarsprofielen is daar een geoptimaliseerde schematisering gehanteerd conform [3]. Hierbij is een lineair waterspanningsverloop geschematiseerd vanaf het freatisch vlak bij ontwerpwaterstand en de stijghoogte bij de ontwerpwaterstand aan de onderzijde van de samendrukbare laag, zie Figuur 3-2. Dit is een conservatief uitgangspunt.



Figuur 3-2 Alternatieve schematisering van waterspanningen bij relatief dunne deklaag

De responsfactor bepaalt de mate waarin de buitenwaterstand bij maatgevend hoogwater de stijghoogte in het watervoerende pakket beïnvloedt. De responsfactor is bepaald aan de hand van de beschikbare peilbuismetingen in de binnentoe of het achterland van de dijk. Voor de bepaling is de methodiek gehanteerd, beschreven in bijlage 3.3 van het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) 74. Door

middel van extrapolatie van de hoogste waterstand gemeten gedurende een hoogwatergolf van enige duur is de stijghoogte bij extreme maatgevende waterstanden afgeleid. Bij deze methodiek wordt een stationaire situatie aangenomen en uitgegaan van een lineair verband tussen de waterstanden in de peilbuis en rivier. Deze aanname is gerechtvaardigd aangezien er een lang (>7 dagen) hoogwater is gemeten en er geen invloed is van getijde of andere secundaire golven, waardoor het niet-stationaire karakter van de grondstroming beperkt is. Deze methode is een sterke versimpeling van de realiteit. Voor de responsfactor is de bovengrenswaarde bepaald volgens een lognormale verdeling, met een startwaarde voor de variatiecoëfficiënt van 0,1. Hierbij worden de modelonzekerheden voor het gebruik van deze methode deels verdisconteerd. Op basis van een vergelijking tussen de responsfactoren die zijn afgeleid voor verschillende deeltrajecten van de Sterke Lekdijk bevinden de gehanteerde bovengrenswaarden voor de responsfactoren zich aan de conservatieve kant en geven deze waarden voldoende vertrouwen als vertrekpunt voor de pipinganalyse. Wel wordt geadviseerd tijdens de projectfase VKA een gevoeligheidsanalyse uit te voeren waarbij de beschikbare metingen worden gefit aan de numerieke geohydrologische berekeningen.

Voor de maatgevende buitenwaterstand is de maatgevende stijghoogte in het watervoerende zandpakket ter plaatse van de binnenteen (BIT) bepaald voor de ontwerpwaterstand WBN 2073. Voor de betreffende dwarsprofielen is de dichtstbijzijnde peilbuis in de binnenteen of achterland gehanteerd. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 3-3

Tabel 3-3: Gehanteerde peilbuizen per maatgevend dwarsprofiel en afgeleide maatgevende stijghoogte

| Dijkvak | Dijkpaal | Peilbuisnaam | Locatie | WBN 2073 (tov NAP [m]) | Stijghoogte BIT bij WBN 2073 (tov NAP [m]) |
|---------|----------|---|---------|---------------------------|--|
| 1 | 106 | DP106+000_B_AL_pb2 | AL | 8,77 | 4,74 |
| 2a | 113 | DP115+094_B_AL_pb2 | AL | 8,64 | 6,44 |
| 2b | 117 | DP115+094_B_AL_pb2 | AL | 8,46 | 6,36 |
| 2c | 126 | DP126+042_B_AL_pb1 | AL | 8,43 | 5,29 |
| 3 | 136 | DP135+047_B_BERM_pb2 | BIT | 8,35 | 5,14 |
| 4 | 144 | DP150+005_B_AL_pb2 | AL | 8,17 | 5,97 |
| 5a | 153 | DP156+068_B_KR_pb2 | KR | 8,05 | 4,41 |
| 5b | 156 | DP156+068_B_KR_pb2 | KR | 8,03 | 4,39 |
| 6a+b | 164 | B39A2377-001 (Dinoloket) nabij DP166 | BIT | 7,98 | 3,13 |
| 6c | 172 | B39A2379-001 (Dinoloket) nabij DP173 | BIT | 7,95 | 3,61 |
| 6d | 183 | DP180+027_B_AL_pb1 | AL | 7,93 | 4,08 |
| 7 | 190 | DP192+096_B_KR_pb1 | KR | 7,89 | 6,43 |
| 8a | 196 | DP192+096_B_KR_pb1 | KR | 7,72 | 6,29 |

| | | | | | |
|----|-----|---|-----|------|------|
| 8b | 203 | B39A2382-001 (Dinoloket) nabij DP202 | BIT | 7,55 | 5,64 |
|----|-----|---|-----|------|------|

Er is een kwalitatieve doorvertaling gedaan van het beschikbare voorland naar de gehanteerde stijghoogtes. Bij dijkvakken 5a t/m 6d is relatief veel voorland beschikbaar en wordt ook een lage stijghoogte gehanteerd. Terwijl bij dijkvakken 2c t/m 4 en 7 t/m 8b relatief weinig voorland beschikbaar is en ook een relatief hoge stijghoogte is gehanteerd. Uitzonderingen zijn dijkvakken 1 t/m 2b waar ondanks een groot voorland, de gehanteerde stijghoogte relatief hoog is. Het voorland onderzoek van Medusa (uit 2017) geeft aan dat de deklaagdikte hier sterk varieert. Als de peilbuizen conservatief zijn geplaatst dus bij locaties met een dunne deklaag, is hier het watervoerend pakket dikker en is op deze locaties sprake van een hoger doorlaatvermogen. Dit geeft hogere responsfactoren.

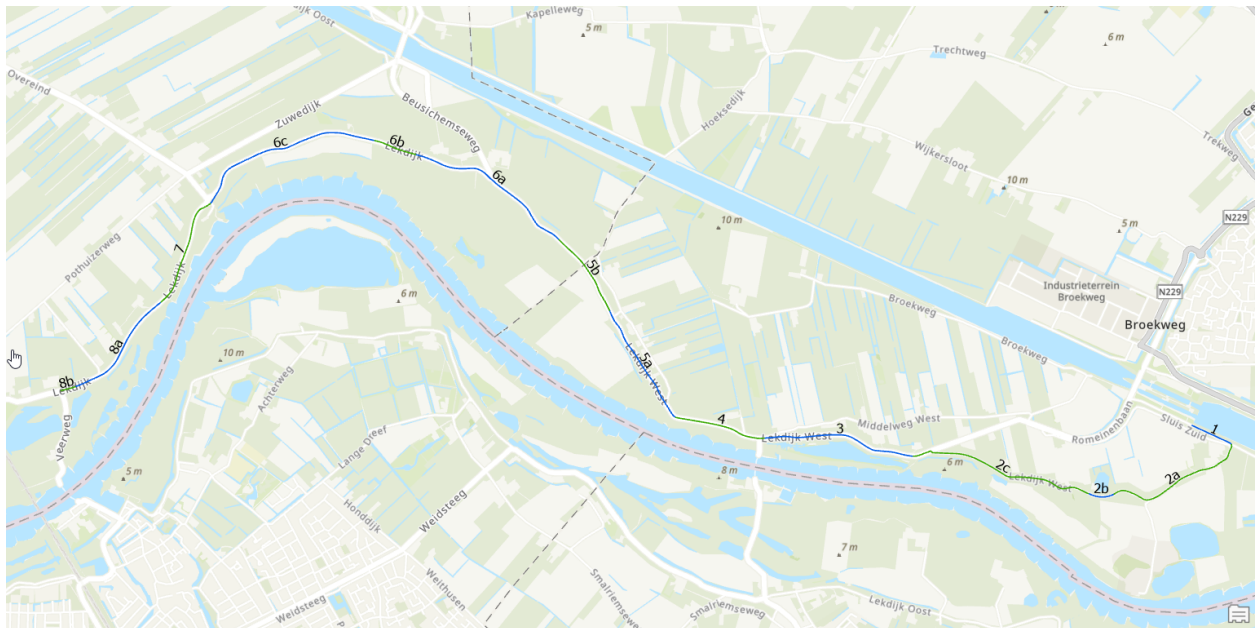
3.1.6 Opbarsten

Voor de locatie met een dunne deklaag (deklaagdikte < 4,0 m) of een tussenzandlaag is een opbarst berekening uitgevoerd, waarbij de totaalspanning aan de onderzijde van de deklaag in acht is genomen. Op basis van de stijghoogte in het watervoerend pakket is de grenspotentiaal -na opbarsten- bepaald en ingevoerd in de stabiliteitsberekening. Afhankelijk van de uitkomst van deze analyse zijn de volgende stabiliteitsberekeningen uitgevoerd:

- Opbarstveiligheid groter dan 1,2; methode UpliftVan;
- Opbarstveiligheid kleiner dan 1,2 en deklaag > 4 m; methode UpliftVan zonder aanpassing van sterkte eigenschappen van de grond;
- Opbarstveiligheid kleiner dan 1,2 en deklaag < 4 m; methode UpliftVan met aanpassing van sterkte eigenschappen van de grond waarbij in de opbarstzone geen sterkte eigenschappen aan de grond worden toegekend ($S = m = 0$);
- Opbarstveiligheid kleiner dan 1,0 en deklaag < 4 m; methode UpliftVan met aanpassing van sterkte eigenschappen van de grond waarbij in de opbarstzone geen sterkte eigenschappen aan de grond worden toegekend ($S = m = 0$) waarbij de grensstijghoogte in rekening wordt gebracht;
- Opbarstveiligheid kleiner dan 1,0 en deklaag > 4 m; methode UpliftVan zonder aanpassing van sterkte eigenschappen van de grond waarbij de grensstijghoogte in rekening wordt gebracht.

3.1.7 Selectie STBI locaties

Voor macrostabiliteit binnenwaarts is het deeltraject ICU onderverdeeld in 14 dijkvakken. Bij het vaststellen van een dijkvakindeling is gekeken naar de geometrie, de bodemopbouw en de geohydrologische kenmerken. Bij de dijkvakindeling is voornamelijk gekeken naar de ondergrond. Voor het bepalen van de maatgevende profielen voor de berekeningen is dus op dijkvakniveau onderscheid gemaakt in de bodemopbouw. Bij de keuze van het maatgevende profiel per dijkvak is in eerste instantie gekeken naar de meest ongunstige geometrie, aangezien de bodemopbouw langs het deeltraject ICU redelijk uniform is. Wanneer er binnen een dijkvak nog aanzienlijke verschillen zijn in de bodemopbouw die van invloed kunnen zijn op de stabiliteit, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een dikke veenlaag, is er gekozen voor een profiel met de maatgevende bodemopbouw en een representatieve geometrie.



Figuur 3-3 Dijkvakindeling macrostabiliteit binnenwaarts

De beoordeling voor het faalmechanisme macrostabiliteit is uitgevoerd voor 14 maatgevende dwarsprofielen. Om de 14 maatgevende dwarsprofielen vast te stellen is eerst per dijkvak een maatgevend dwarsprofiel bepaald. Dijkvak 8b betreft de aansluiting op het deeltraject CUB. Hierbij is in het dijkvak per dijkpaal gekeken naar de meest ongunstige combinatie van geometrie en bijbehorende bodemopbouw.

3.2 Macrostabiliteit binnenwaarts bij significante overslag

In §2.2.2 is vastgesteld dat enkel bij dijkpaal 168 niet wordt voldaan aan de hoogte eis met een HBN van 1 l/s/m. Het hoogte tekort bedraagt slechts 6 millimeter. Conform de KPR factsheet [4] moet bij een overslagdebiet van 1,0 l/s/m of groter bij de beoordeling van de macrostabiliteit van het binnentalud zowel verzadigd als onverzadigd worden beschouwd. Echter, aangezien het hoogtetekort zeer klein is en slechts bij één dijkpaal aanwezig, wordt een beschouwing van de binnenwaartse stabiliteit bij significante overslag niet nodig geacht.

3.3 Berekeningsresultaten beoordeling binnenwaartse macrostabiliteit

In Tabel 3-4 zijn de resultaten opgenomen van de beoordeling van de binnenwaartse macrostabiliteit. In Bijlage B zijn de bijbehorende maatgevende glijvlakken opgenomen. De binnenwaartse macrostabiliteit is beschouwd voor elk maatgevend profiel per dijkvak. Hierbij is in eerste instantie gekeken naar het maatgevende glijvlak. Indien binnen een dijkvak een ondiep glijvlak door het binnentalud maatgevend blijkt te zijn, is een aanvullende beschouwing uitgevoerd om te bepalen wat de stabiliteitsfactor is van het diepe glijvlak. De stabiliteitsanalyse is uitgevoerd volgens het LiftVan-model. In Tabel 3-4 zijn de berekeningsresultaten van de binnenwaartse stabiliteit bij WBN opgenomen. Naast de stabiliteitsfactoren is ook gekeken naar de opbarstveiligheid. Hierbij is enkel gekeken naar het opbarsten van een deklaag kleiner dan 4,0 m. Bij een opbarstveiligheid kleiner dan 1,2 en deklaag < 4,0 m wordt een opbarstzone in rekening gebracht waarbij in de opbarstzone geen sterkte eigenschappen aan de grond worden toegekend ($S = 0$).

Tabel 3-4 Resultaten stabiliteitsanalyse macrostabiliteit binnenwaarts volgens methode UpliftVan

| Dijkvak | Dijkpaal | Hectometrerig grondopbouw | Opbarst veiligheid | STBI bij WBN SF [-] (eis SF $\geq 1,37$) | Oordeel |
|---------|----------|------------------------------|-----------------------------------|--|--------------|
| 1 | 106 | 106+000 ¹⁾ | 1,50 | 2,14 | Voldoet |
| 2a | 113 | 122+032 ¹⁾ | 1,23 | 1,70 | Voldoet |
| 2b | 117 | 117+000 | n.t.b. | 1,14 | Voldoet niet |
| 2c | 126 | 126+000 | 1,03 (deklaag > 4,0 m) | 1,50 | Voldoet |
| 3 | 136 | 137+008 | 1,14 (deklaag > 4,0 m) | 1,66 | Voldoet |
| 4 | 144 | 144+000 | 1,31 0,54 (tussen zandlaag) | 1,89 1,73 (grenspotentiaal tussen zandlaag) | Voldoet |
| 5a | 153 | 153+000 | 1,32 | 1,79 | Voldoet |
| 5b | 156 | 156+000 ¹⁾ | 1,29 | 1,62 (hoog) 1,95 (diep) | Voldoet |
| 6a+b | 164 | 163+090 | 1,53 | 1,49 | Voldoet |
| 6c | 172 | 172+051 ¹⁾ | 1,30 | 1,57 (hoog) 1,94 (diep) | Voldoet |
| 6d | 183 | 183+005 ¹⁾ | 1,08 (deklaag > 4,0 m) | 1,38 | Voldoet |
| 7 | 190 | 189+055 ¹⁾ | 0,99 (deklaag > 4,0 m) | 1,40 | Voldoet |
| 8a | 196 | 196+000 ¹⁾ | 0,79 (opbarstzone) | 1,44 (ondiep) (grenspotentiaal) 1,40 (diep) (grenspotentiaal) | Voldoet |
| 8b | 203 | 203+000 ¹⁾ | (deklaag > 4,0 m) | 1,75 (hoog) 1,95 (diep) | Voldoet |

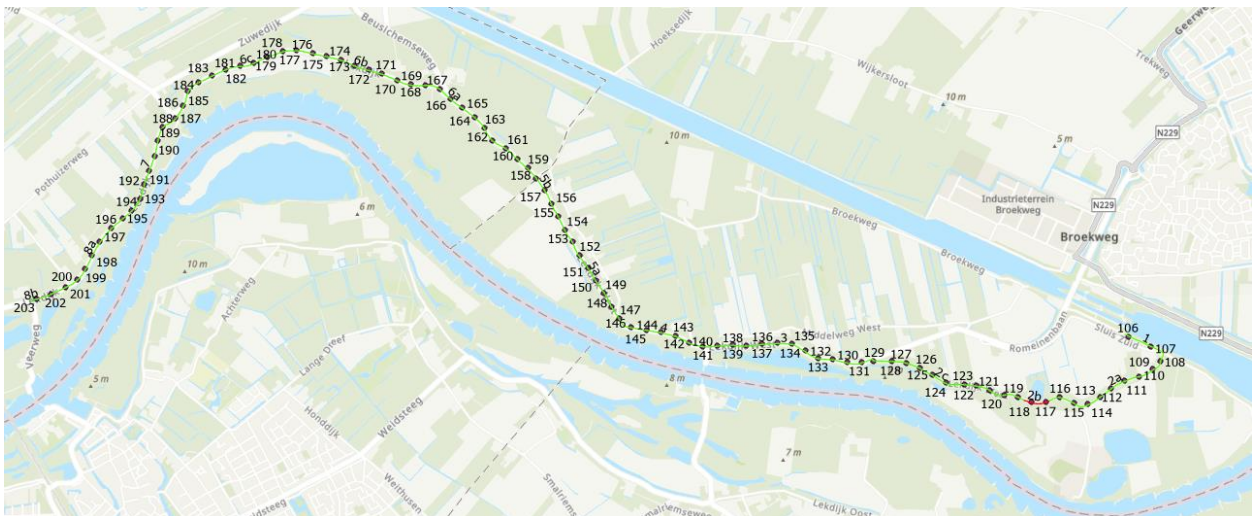
¹⁾ De som is geoptimaliseerd in het NKO

3.4 Conclusie beoordeling stabiliteit binnenwaarts

In dit hoofdstuk is de veiligheidsopgave met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts nader beschouwd. Op basis van deze beschouwing trekken wij de volgende conclusies:

- De voorhavendijk van de Prinses Irenesluis (dijkvak 1) voldoet aan de binnenwaartse stabiliteit. Dit deeltraject kenmerkt zich door een lage responsfactor.

- Bij dijkvakken 2a en 2c t/m 4 is de stijghoogte bij de binnenteen tijdens de normwaterstand relatief hoog aangezien bij deze dijkvakken hoge responsfactoren zijn afgeleid bij de analyse van de peilbuisdata. De dijkvakken voldoen echter alsnog ruim aan de stabiliteitseis.
- Dijkvak 2b is aangemerkt als maatwerklocatie. Dit dijkvak wordt gekenmerkt door een wiel direct langs de binnenteen die is ontstaan door een plaatselijke dijkdoorbraak in het verleden. Op basis van de huidige uitgangspunten voldoet dit dijkvak niet aan de binnenwaartse stabiliteit.
- Bij dijkvak 5a t/m 6c is de stijghoogte bij de binnenteen tijdens de normwaterstand relatief laag omdat bij deze dijkvakken lage responsfactoren zijn afgeleid. Bij de stabiliteitsanalyse van dijkvak 5b en 6c ontstaat er een ondiep glijvlak langs het binnentalud. De binnentaluds van dijkvak 5b en 6c hebben een helling van respectievelijk 1:2,1 en 1:2,3 en is mogelijk de oorzaak van de hoge glijvlakken. Alle vakken voldoen na optimalisatieslag 1, aanpassing van de indringingslengte, POP-waarden en toevoegen van toplagen en cohesie in het dijksmateriaal, aan de binnenwaartse stabiliteit.
- In dijkvak 7 ontstaat een diep maatgevend glijvlak dat voldoet aan de stabiliteitseis.
- In dijkvak 8a voldoet het ondiepe glijvlak aan de stabiliteitseis na optimalisatie. Het binnentalud is hier relatief steil met een helling van 1:2,2. Voor de stijghoogte bij de binnenteen tijdens de waterstand bij norm, is het grenspotential in combinatie met een opbarstzone aangehouden. Het diepe glijvlak voldoet ook aan de stabiliteitseis.
- Bij de aansluiting van de waterkering op het deeltraject CUB (Dijkvak 8b) voldoet zowel het diepe als het hoge glijvlak aan de stabiliteitseis.



Figuur 3-4 Beoordeling macrostabiliteit binnenwaarts per dijkvak.

3.5 Reflectie en aanbevelingen

In de conclusie van paragraaf 3.4 is er gereflecteerd op de resultaten gegeven de fysische kenmerken per deeltraject.

Het oordeel is hierbij gebaseerd op een aangenomen schematiseringsfactor van 1.1. De keuze is hierop gevallen, omdat de grondopbouw in gelaagdheid vergelijkbaar is met buurtraject CUB. Hoewel dit een goed eerste uitgangspunt is, worden onzekerheden in de schematisering specifiek voor ICU mogelijk onderschat. Dit vormt een risico. Een mogelijk ongunstige(re) schematiseringsfactor leidt tot afkeuring van dijkvakken 6d, 7 en 8, omdat deze op het randje met enkele procenten boven de eis voldoen. Merk op dat

hier de diepe glijvlakken maatgevend zijn. Daarom wordt aanbevolen om de schematiseringsfactor te verifiëren in het VKA aan de hand van het rekenblokje om de veiligheidsanalyse te bekrachtigen.

4 Piping (STPH)

In dit hoofdstuk volgt de beoordeling voor het hoofdmechanisme piping. Per dijkpaal is het profiel geschematiseerd en zijn de randvoorwaarden en uitgangspunten opgesteld. Falen van de dijk op het mechanisme piping houdt in dat allereerst opbarsten plaatsvindt, gevolgd door heave en vervolgens terugschrijdende erosie. Wanneer de dijk voldoet op één van de drie deelmechanismen, is het totaaloordeel voldoende. Indien een dijkpaal op alle drie de deelmechanismen geen voldoende oordeel is behaald is het methodische totaal oordeel “onvoldoende”. Waar dat het geval is zijn optimalisaties doorgevoerd zoals bijvoorbeeld de beslisboom piping.

4.1 Uitgangspunten

De randvoorwaarden en uitgangspunten voor de beoordeling op opbarsten, heave en piping zijn benoemd in de TUN [1]. Daarop zijn de volgende randvoorwaarden en uitgangspunten toegepast.

- In voorliggende rapportage is een alternatieve beoordeling uitgevoerd. Er is gekeken naar het zichtjaar 2073 en gebruik gemaakt van het OI2014v4 om te beoordelen of het huidige dijkprofiel en ondergrond voldoen aan de gestelde veiligheidseisen. Daarom is gewerkt met een schematiseringsfactor in plaats van de scenario's uit het WBI.
- De beoordeling voor STPH is per dijkpaal uitgevoerd conform het OI2014v4 [5]
- Indien een dijkpaal het oordeel optreden van piping heeft gekregen is vervolgens de beslisboom piping toegepast [19][20]. Ten behoeve van de Nota kansrijke oplossingen is hiervoor hypothese 1 toegepast (dikte deklaag > 6m binnendijs).
- Voor de buitenwaterstand is de Waterstand Bij Norm (WBN) aangehouden voor het zichtjaar 2073. Op basis van beschikbare peilbuismetingen is voor de stijghoogte binnendijs de maatgevende stijghoogte (behorend bij het uittredepunt) bepaald. Hierbij is de stijghoogte gehanteerd die bepaald is in de responsanalyse (zie paragraaf 3.1.5).
- Per dijkpaal is een inventarisatie gemaakt met betrekking tot de aanwezigheid van binnendijsse kwel sloten en/of tussenzandlagen. Als opbarstlocatie zijn, indien relevant, een tweetal situaties beoordeeld:
 1. opbarstlocatie ter plaatse van de binnentoevoer van de dijk
 2. opbarstlocatie ter plaatse van een lokaal aanwezige kwel- of kopsloot.Ook zijn eventueel aanwezige tussenzandlagen beoordeeld. In de rapportage is alleen de laagste factor vermeld aangezien deze als maatgevend geldt.
- Er is gerekend met karakteristieke waarden. Onderstaand is per parameter aangegeven hoe met deze parameter is omgegaan in de analyse:
 - d_{70} : In deze analyse is voor de d_{70} niet de waarde van het WBI SOS aangehouden maar een laag karakteristieke waarde bepaald op basis van zeefproeven. Dit is gedaan omdat voldoende zeefproeven beschikbaar zijn om goede waarden uit af te leiden die aansluiten bij de lokale situatie. Doordat voldoende proeven aanwezig zijn is ook rekening gehouden met de regionale spreiding in de resultaten en onderscheid gemaakt tussen verschillende gebieden. De gehanteerde karakteristieke waarden per grondsoort staan weer gegeven in §8.8.2 van de TUN.
 - Voor het volumieke gewicht is uitgegaan van een lage karakteristieke schatting van de laaggemiddelde waarde gehanteerd conform de veiligheidsanalyse van CUB. Omdat op basis van de beschikbare sonderingen het niet mogelijk is om een onderscheid te maken tussen Klei licht en Klei zwaar zijn de volumegewicht bepalingen van alle kleimonster samengevoegd zodat voor klei één waarde wordt gebruikt. De gehanteerde karakteristieke waarden per grondsoort staan weer gegeven in §8.5 van de TUN.

4.2 Schematiseringsfactor

Voor de beoordeling van opbarsten is een schematiseringsfactor van 1,1 gehanteerd. Deze factor dient de onzekerheden in de schematiseringen van de opbouw van de ondergrond en de optredende water-spanningen af te dekken. De schematiseringsfactor is gebaseerd op ervaringen uit CUB en kan onderbouwd worden door voldoende beschikbare resultaten uit het uitgevoerde geotechnisch onderzoek en het hanteren van conservatieve uitgangspunten.

4.3 Beoordeling opbarsten

In voorliggende paragraaf is een overzicht gegeven van de uitgevoerde analyses en de resultaten van de beoordeling op opbarsten bij het faalmechanisme piping (STPH). De onderliggende berekeningen zijn opgenomen in Bijlage C.

4.3.1 Analyse

De veiligheid tegen opbarsten is beschouwd op basis van het evenwicht van de korrelspanningen in de cohesieve deklaag. Er is veiligheid tegen opbarsten wanneer het optredende stijghoogteverschil over de deklaag ter plaatse van het uittredepunt $\Delta\phi$ kleiner is dan het kritieke stijghoogteverschil over de deklaag $\Delta\phi_{c,u}$. Om te bepalen of er voldaan wordt op opbarsten wordt de volgende verificatie uitgevoerd.

$$\Delta\phi \leq \frac{\Delta\phi_{c,u}}{\gamma_{up} \cdot \gamma_{b,up}}$$

Waarin:

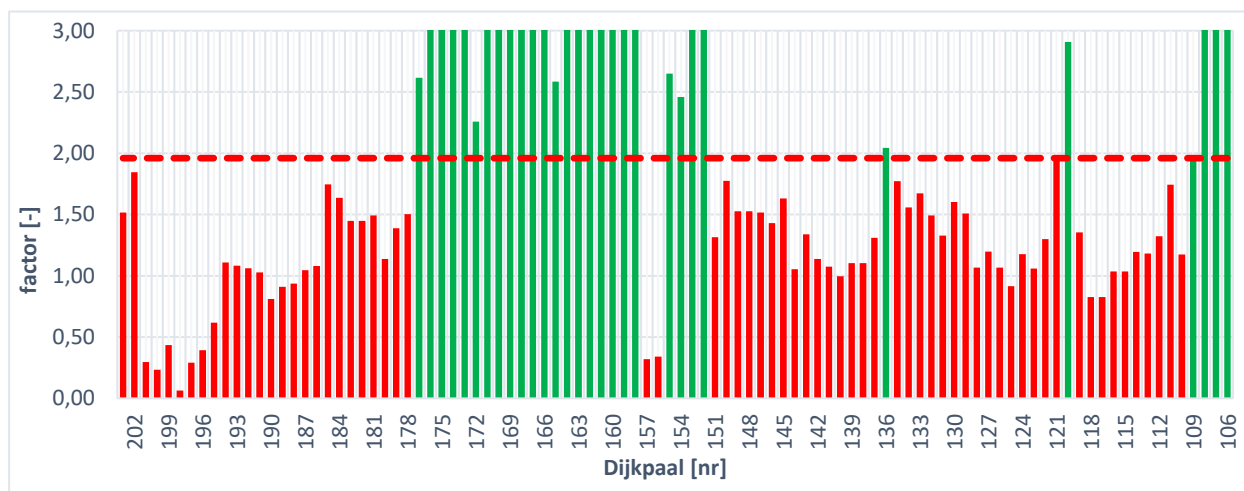
| | |
|--------------------|--|
| $\Delta\phi$ | Optredend stijghoogteverschil [m] |
| $\Delta\phi_{c,u}$ | Kritiek stijghoogteverschil over de deklaag [m] |
| γ_{up} | Betrouwbaarheidsindex afhankelijke veiligheidsfactor voor opbarsten [-] |
| $\gamma_{b,up}$ | Schematiseringsfactor, voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het deelfaalmechanisme opbarsten [-] |

Het verschil in stijghoogte waarbij de deklaag zal opbarsten, is het kritieke stijghoogteverschil en is te berekenen volgens *vergelijking 6.9* van de TUN [1]. Het optredend stijghoogteverschil is gegeven door *vergelijking 6.10* van de TUN [1].

Ten behoeve van de Nota kansrijke Oplossingen (NKO) is de opbarstveiligheid herzien door gebruik te maken van de Beslisboom Piping. Voor nadere toelichting zie paragraaf 4.6.

4.3.2 Resultaten

Per dijkpaal zijn de veiligheidsfactoren voor opbarsten afgeleid. Er wordt voldaan aan opbarsten wanneer de veiligheidsfactor groter of gelijk is aan de benodigde stabiliteitsfactor voor opbarsten. De veiligheidsfactor voor opbarsten is verkregen door het kritieke stijghoogteverschil te delen door het optredende stijghoogteverschil. De benodigde stabiliteitseis bedraagt 1,96 (= veiligheidsfactor opbarsten $\gamma_{up} = 1,78$ x schematiseringsfactor $\gamma_{b,up} = 1,1$). In onderstaande kolomdiagram zijn de resultaten grafisch weergegeven. Op de horizontale as zijn de dijkpalen weergegeven. De verticale as toont de stabiliteitsfactor. De rode lijn betreft de benodigde stabiliteitsfactor voor opbarsten. Alle dijkpalen met een rode staaf voldoen dus niet aan de gestelde eis van 1,96. De dijkpalen met een groene staaf voldoen wel.



Figuur 4-1: Beoordeling op opbarsten per dijkpaal

4.4 Beoordeling heave

In voorliggende paragraaf is een kort overzicht gegeven van de uitgevoerde analyse en de resultaten van de beoordeling op heave bij het faalmechanisme STPH. De onderliggende berekeningen zijn opgenomen in Bijlage C.

4.4.1 Analyse

De veiligheid tegen het deelmechanisme heave wordt beschouwd door de optredende heave gradiënt te vergelijken met de kritieke heave gradiënt $i_{c,h}$. De kritieke heave gradiënt $i_{c,h}$ waarbij de grenstoestand optreedt is vastgesteld op 0,3. Om te bepalen of er voldaan wordt op heave wordt de volgende verificatie uitgevoerd.

$$\frac{i_{c,h}}{i} \geq \gamma_{he} \cdot \gamma_{b,he}$$

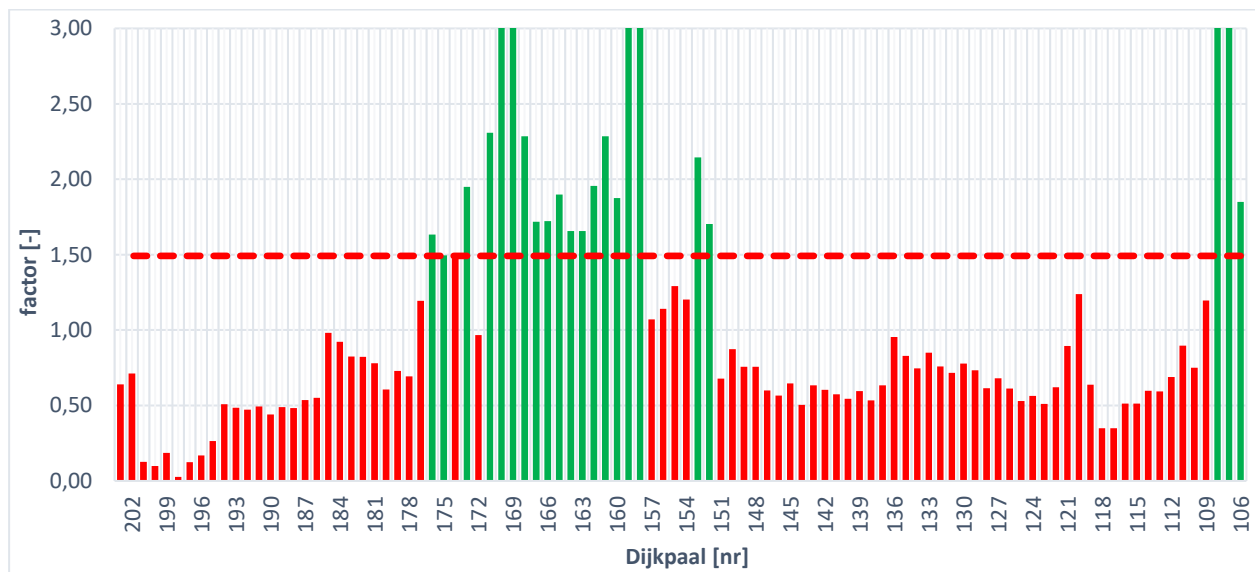
Waarin:

- i Optredende heavegradiënt [-]
- $i_{c,h}$ Kritieke heave gradiënt, in het OI2014v4 gesteld op 0,3

De optredende heave gradiënt wordt berekend met behulp *vergelijking 6.13* van de TUN [1].

4.4.2 Resultaat

Per dijkpaal zijn de veiligheidsfactoren voor heave afgeleid. Er wordt voldaan aan heave wanneer de veiligheidsfactor groter of gelijk is aan de benodigde stabiliteitsfactor voor heave. De veiligheidsfactor voor heave wordt verkregen door de kritieke heavegradiënt te delen door de optredende heavegradiënt. De benodigde stabiliteitseis bedraagt 1,49 (= veiligheidsfactor opbarsten $g_{he} = 1,36$ x schematiseringsfactor $g_{b,he} = 1,1$). In onderstaande kolomdiagram zijn de resultaten grafisch weergegeven. Op de horizontale as zijn de dijkpalen weergegeven. De verticale as toont de stabiliteits-factor. De rode lijn betreft de stabiliteitsfactor voor heave.



Figuur 4-2: Beoordeling op heave per dijkpaal

4.5 Beoordeling piping

In voorliggende paragraaf is een kort overzicht gegeven van de uitgevoerde analyse en de resultaten van de beoordeling op het deelmechanisme terugschrijdende erosie. De onderliggende berekeningen zijn opgenomen in Bijlage C.

4.5.1 Analyse

De weerstand tegen het deelmechanisme piping (terugschrijdende erosie) wordt bepaald aan de hand van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer. De waterkering voldoet op piping wanneer het optredende verval ΔH kleiner is dan het kritieke verval $\Delta H_{c,p}$. Om te bepalen of er voldaan wordt op piping wordt de volgende verificatie uitgevoerd.

$$\frac{\Delta H_{c,p}}{\Delta H} \leq \gamma_{pip} \cdot \gamma_{b,pip}$$

Waarin:

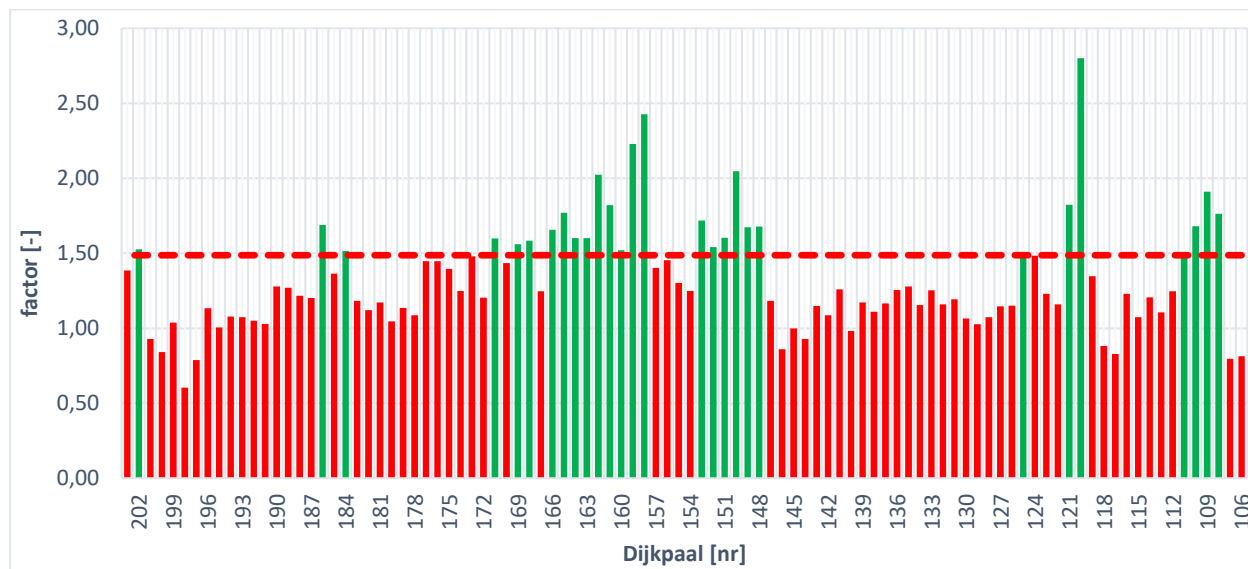
| | |
|------------------|---|
| ΔH | Optredende verval over de waterkering [m] |
| $\Delta H_{c,p}$ | Kritieke verval [m] |
| γ_{pip} | Betrouwbaarheidsindex afhankelijk veiligheidsfactor voor piping [-] |
| $\gamma_{b,pip}$ | Schematiseringsfactor, voor de onzekerheid over de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen bij het faalmechanisme piping [-] |

Het verval over de waterkering is bepaald op basis van *vergelijking 6.15* van de TUN [1]. Er is beoordeeld of het optredend verval over de kering voldoet aan het kritiek verval. Het kritieke verval wordt bepaald op basis van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer en volgt uit *vergelijking 6.14* van de TUN [1].

4.5.2 Resultaat

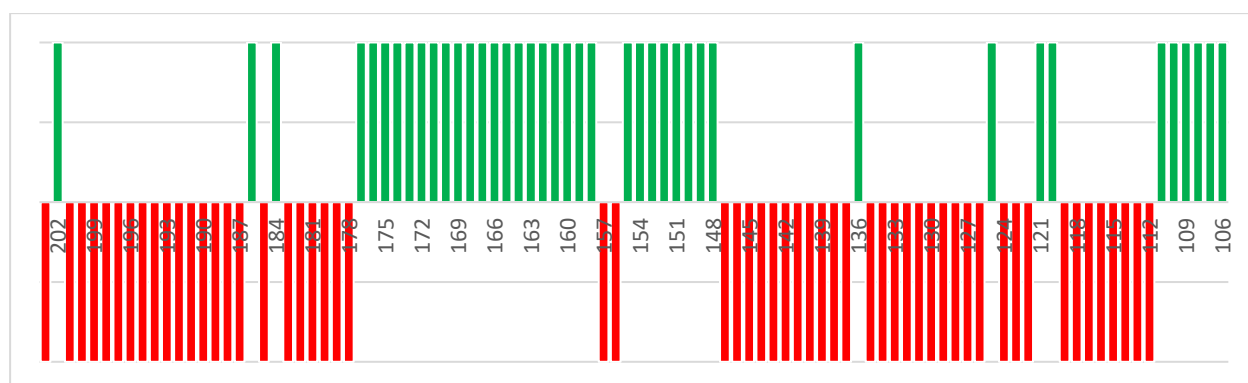
Per dijkpaal zijn de veiligheidsfactoren voor piping afgeleid. Er wordt voldaan aan piping wanneer de veiligheidsfactor groter of gelijk is aan de benodigde stabiliteitsfactor voor piping. De veiligheidsfactor voor piping wordt verkregen door het kritieke verval te delen door het optredende verval. De benodigde stabiliteitseis bedraagt 1,49 (= veiligheidsfactor opbarsten $\gamma_{pip} = 1,35$ x schematiseringsfactor $\gamma_{b,pip} = 1,1$). In onderstaande kolomdiagram zijn de resultaten grafisch weergegeven. Op de horizontale as zijn de dijkpalen

weergegeven. De verticale as toont de stabiliteitsfactor. De rode lijn betreft de benodigde stabiliteitseis voor piping.



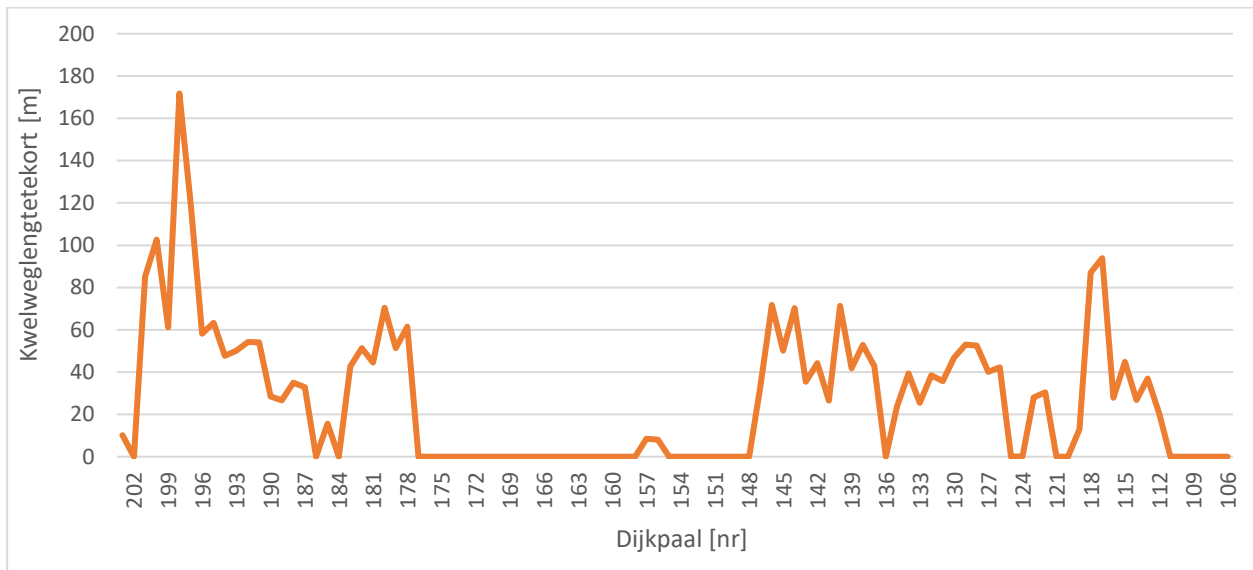
Figuur 4-3: Beoordeling op piping per dijkpaal.

Om tot een voldoende eindoordeel te komen dient één van de bovenstaande beoordelingen (opbarsten, heave en piping, zie voorgaande 3 paragrafen) een voldoende te scoren. Daarom zijn de bovenstaande oordelen gecombineerd. In onderstaande afbeelding is een overzicht gegeven van de eindscore van het dijktraject ICU. Dijkpalen waar het oordeel voldoende is, zijn aangegeven in een groene kleur en dijkpalen waar het oordeel onvoldoende is zijn aangemerkt met rood.



Figuur 4-4: Assemblage deelfaalmecanismen STPH

Voor de dijkpalen die geen voldoende scoren op het faalmecanisme piping is het kwelweglengtetekort bepaald, zie Figuur 4-5. Bij dijkpaal 156 en 157 geldt dat op piping wordt voldaan voor de diepe watervoerende zandlaag. Echter, bevindt zich ter hoogte van deze dijkpalen een tussenzandlaag (ondiepe zandbaan) die niet voldoet op een van de drie deelmechanismen, waardoor dijkpaal 156 en 157 niet voldoet op piping. Het kwelweglengtetekort is hier wel beperkt tot maximaal 10 meter.



Figuur 4-5: Kwelweglengtetekorten per dijkpaal

In totaal zijn er 98 locaties (dijkpalen) beoordeeld op het faalmechanisme piping. In onderstaand overzicht is per deelmechanisme aangegeven hoeveel locaties zijn goedgekeurd of afgekeurd.

Tabel 4-1: Resultaten per deelmechanisme

| Deelmechanisme | Totaal aan DWP | Goedgekeurd | Afgekeurd |
|-------------------------------|----------------|-------------|-----------|
| Opbarsten | 98 | 32 | 66 |
| Heave | 98 | 22 | 76 |
| Piping | 98 | 28 | 70 |
| Totaal (geassembleerd) | 98 | 41 | 57 |

In totaal blijkt dat 42% van de totale lengte van de waterkering nu voldoet. Met een trajectlengte van 9,7 km komt dit overeen met 4,1 km. Hierdoor blijft er nog 5,6 km over aan versterkingsopgave.

4.6 Beslisboom piping

Uit de resultaten van de pipingberekeningen blijkt dat over 5,6 km de dijk niet aan de faalkanseis voldoet. Echter, uit de analyses blijkt dat op behoorlijk wat locaties binnendijks een deklaag voorkomt die dikker is dan 4 a 6 m. Ook bevindt zich op veel locaties een behoorlijk groot voorland. Op basis hiervan lijkt de kans op het voorkomen van piping minder waarschijnlijk. Binnen Sterke Lekdijk wordt voor dit soort situaties de Beslisboom Piping toegepast. Daarin zijn twee optimalisaties voorgesteld in de vorm van hypothesen. Deze optimalisaties zijn vooralsnog hypothesen, omdat onderzoek gaande is of wordt opgestart voor het vertalen van de nieuwe inzichten naar rekenregels.

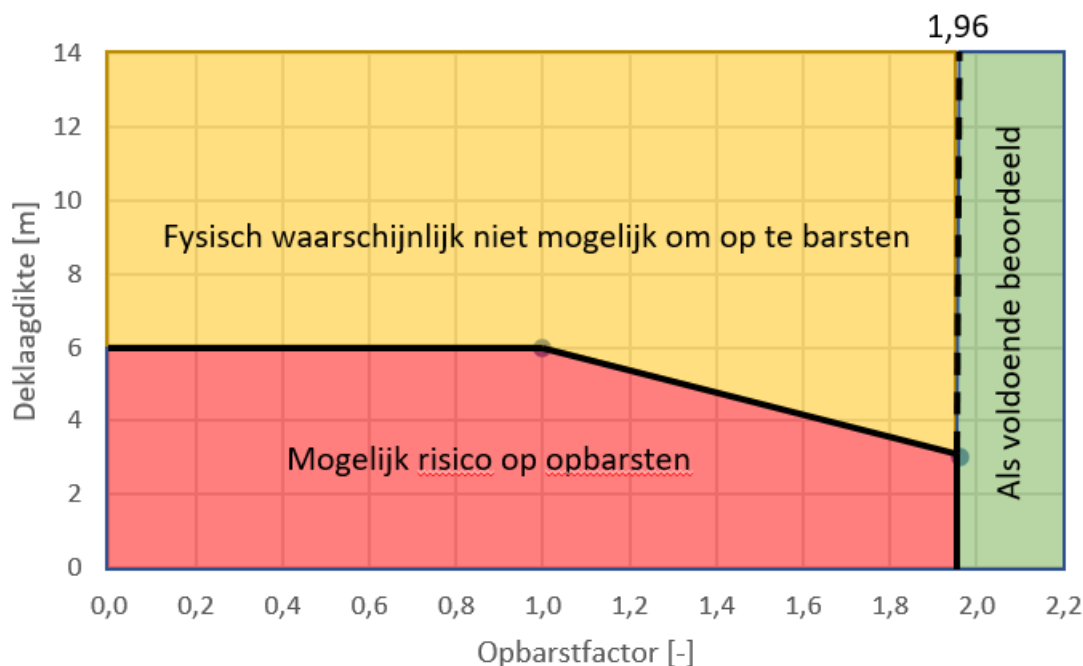
Merk op dat de beslisboom is opgesteld om de Piping-opgave uit te stellen wanneer er twijfel bestaat over de noodzaak van piping-maatregelen. Uitstel moet hier worden opgevat als het winnen van tijd om later een gedetailleerde pipinganalyse uit te voeren volgens de nieuwe inzichten, op basis van metingen en uitgewerkt met gevalideerde software [18]. De versterkingsoplossing wordt wel ontworpen maar pas gerealiseerd als verificatie van de hypothesen niet mogelijk blijkt [749]. Daarnaast zullen de maatregelen

getroffen dienen te worden zoals van toepassing bij uitstel op basis van de Beslisboom Piping. Denk hierbij aan monitoring en beheersmaatregelen in de tussentijd conform de zorgplicht. De uitwerking hiervan ligt buiten de strekking van de Verkenningsfase waardoor de uitwerking aan HDSR gelaten wordt.

4.6.1 Hypothese 1

De eerste hypothese heeft betrekking op het opbarsten van de deklaag. Onderzoek wijst uit dat het zeer onwaarschijnlijk is dat de deklaag zal opbarsten indien deze dikker is dan 3 à 4 meter. In de methodiek van de huidige rekenregels wordt geen rekening gehouden met sterkte (cohesie) en stijfheid van de deklaag. Ook wordt geen rekening gehouden met optredende horizontale krachten als resultaat van het gewicht van de dijk. De hypothese is dat de deklaag zal opdrijven, maar dit, door de bovengenoemde fenomenen, niet zal leiden tot opbarsten. Het is niet mogelijk om de deklaagdikte per locatie met zekerheid te bepalen aan de hand van uitgevoerd onderzoek. Om het risico van de variatie mee te nemen wordt in deze hypothese de opbarstfactor meegewogen.

De hypothese is toegepast voor deeltraject SAS[20] en is goedgekeurd voor gebruik binnen ICU. Er is een grafiek opgesteld waarin drie zones zijn onderscheiden aan de hand van opbarstfactor en deklaagdikte; “Voldoet”, “Voldoet niet” en “Fysisch waarschijnlijk niet mogelijk om op te barsten”. Hierin refereert “Voldoet” aan het oordeel aan de hand van de huidige rekenregels, een veiligheidsfactor groter dan eis. “Fysisch waarschijnlijk niet mogelijk om op te barsten” refereert aan de combinatie van opbarstfactor en deklaagdikte wat niet voldoet aan de huidige rekenregels, maar onderzoek aantoon dat het onwaarschijnlijk is dat het op zal barsten. “Voldoet niet” refereert aan een combinatie van (effectieve) deklaagdikte en opbarstfactor wat niet voldoet aan de huidige rekenregels en nieuw onderzoek. Deze grafiek is aangepast aan de vereiste veiligheidsfactor van deeltraject ICU. Voor ICU is een dikte van de binnendijkse deklaag van >6m gehanteerd.

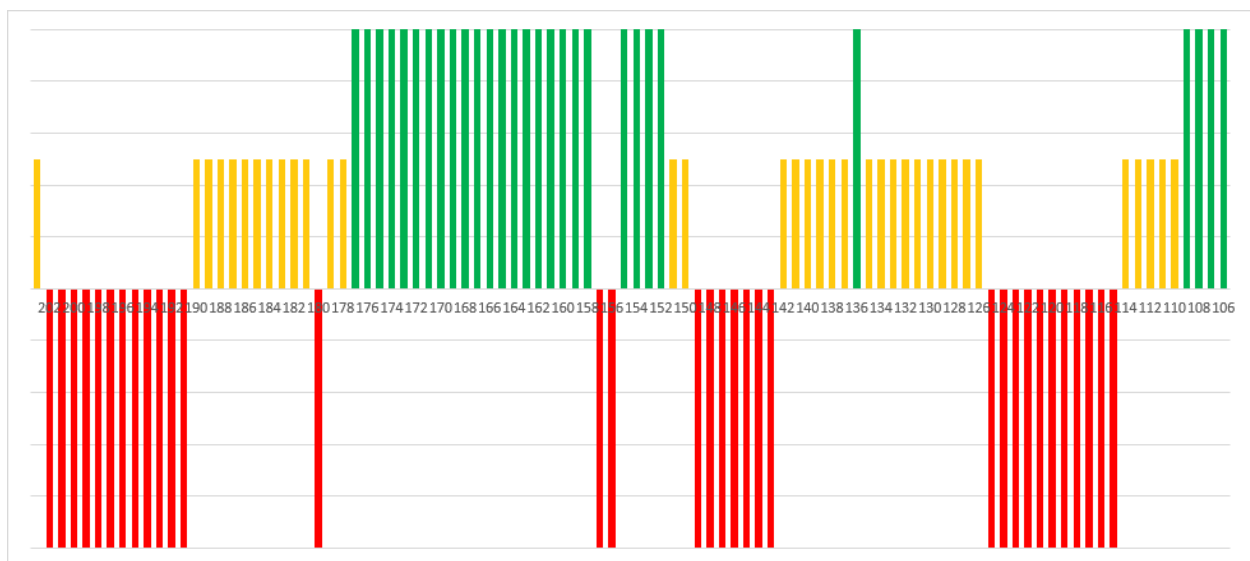


Figuur 4-6: Grafiek onderdeel van de beslisboom opgesteld voor de beoordeling van de opbarstveiligheid.

4.6.2 Hypothese 2

Deze hypothese heeft betrekking op intredeweerstand in het voorland. Een aanwezige deklaag kan namelijk het intredende debiet in het voorland zodanig beperken dat deze niet voldoende voeding geeft om bijvoorbeeld terugschrijdende erosie te veroorzaken. Op het moment van deze veiligheidsanalyse is nog te weinig informatie over het voorland bekend, waardoor het toepassen van de hypothese 2 nog niet mogelijk is. Dit blijft een mogelijke optimalisatie voor in de fase van het VKA wanneer nader onderzoek in het voorland beschikbaar is gekomen. In de zomer van 2022 voeren we nader voorlandonderzoek uit.

4.6.3 Resultaten



Figuur 4-7: Beoordeling op piping per dijkpaal na het gebruik van de beslisboom.

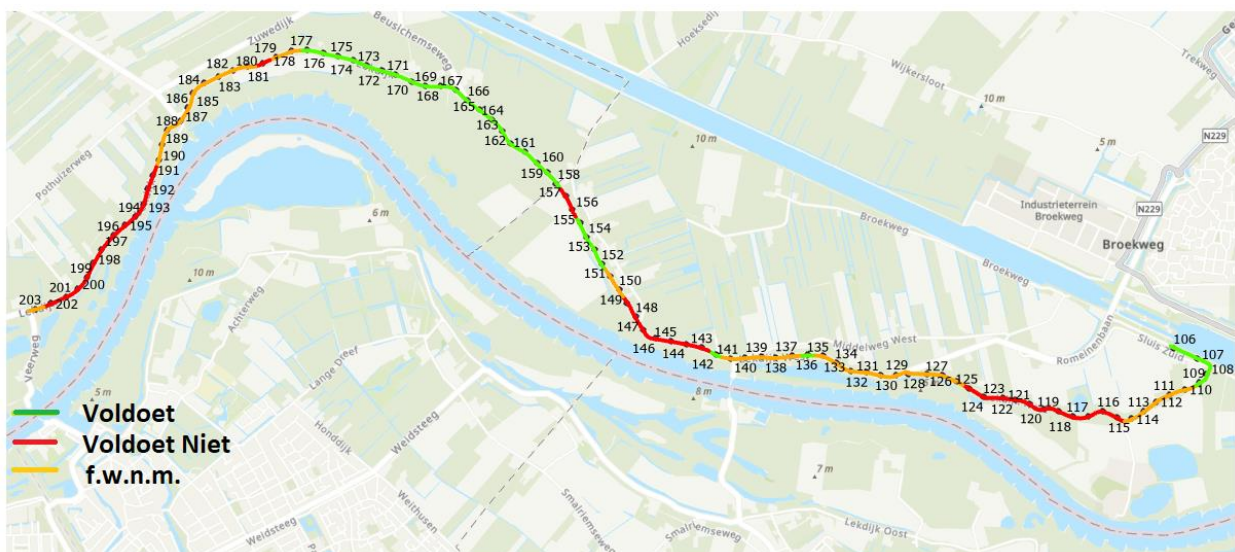
Voor de dijkpalen die niet voldoen aan piping is het deelmechanisme opbarstveiligheid opnieuw beschouwd aan de hand van Figuur 4-6. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4-7 en Figuur 4-8. Door gebruik te maken van de beslisboom, wordt de piping opgave gereduceerd tot 33 dijkpalen. Voor de dijkpalen met het oordeel "Fysisch waarschijnlijk niet mogelijk" moeten dan wel beheersmaatregelen worden getroffen. Merk op dat er bij het gebruik van de beslisboom ook het eerdere oordeel op piping is herzien. De resultaten gepresenteerd in paragrafen 4.4 en 4.5 volgen bij een aanname van een kwelweglengte die overeenkomt met 2x de dijkbasis. Echter moet worden aangetoond dat over een voorlandlengte gelijk aan 1x dijkbasis een deklaagdikte van 1 meter aanwezig. Omdat uit het beschikbare Medusa onderzoek dit niet voor alle dijkpalen aangetoond kan worden, is op basis van deze vereiste scope bij gekomen (en afgevallen op basis van de beslisboom). Er is scope bijgekomen voor dijkpalen DP125, DP148 en DP149, DP191 en DP192. Hoewel in de eerdere analyse naar voren kwam dat DP120 en DP121 voldoen, zijn deze aangemerkt als maatwerklocatie, omdat kwelwater is geconstateerd in kruipruimten van woningen bij hoge rivierwaterstand.

4.7 Reflectie en aanbevelingen

4.7.1 Reflectie

De resultaten met betrekking tot de beoordeling van het mechanisme STPH zijn geloofwaardig. Dit baseren wij op het volgende:

- We hebben de stappen conform het WBI gevolgd met zo nodig conservatieve uitgangspunten of aannamen.
- Optimalisaties zijn uitgevoerd op basis van de laatste stand van de kennis met betrekking tot STPH.
- De beslisboom piping is gebruikt conform de Sterke Lekdijk trajecten WAM en SAS. Het gebruik en de resultaten van de beslisboom bij ICU zijn bekrachtigd door het college van HDSR. Niet vanwege de toepasbaarheid (dit is inmiddels vastgelegd in de overkoepelende Strategische Nota van Uitgangspunten), maar omdat de impact door toepassing in het traject ICU significant is.
- De deklaagdikten gebruikt in de beslisboom zijn gebaseerd op het in 2022 geüpdatete geotechnisch lengte profiel. Daarmee is de meest actuele en dus accurate informatie verwerkt.



Figuur 4-8: Kaart met de beoordeling op piping per dijkpaal na gebruik van de beslisboom

4.7.2 Aanbevelingen

Op basis van voorliggende analyse worden de volgende aanbevelingen gedaan om uit te voeren in het vervolg:

- De karakteristieke doorlatendheid kan worden geoptimaliseerd door het meenemen van anisotropie en meerlaagsheid. Op deze manier kan mogelijk een reductie van het kwelweglengtetekort worden gerealiseerd. Dit kan meegenomen worden in geohydrologische modelberekeningen (of ook nog in andere optimalisatieberekeningen?) of D-Geoflow berekeningen.
- De beslisboom piping toont aan dat een groot deel van de piping opgave uitgesteld kan worden wegens de relatief dikke deklaag die binnendijks aanwezig is. Op de uitgestelde trajecten moeten beheersmaatregelen worden getroffen, denk hierbij aan inspecties en monitoring. De uitgestelde

opgave moet gedetailleerd worden uitgevoerd in een toekomstige beoordelingsronde (de eerstvolgende beoordelingsronde is in 2035). Een mogelijke afkeur zou de uitvoer van een versterking vereisen. Het gebruik van de beslisboom vereist daarom ook het ontwerp van een versterking om deze mogelijk in de toekomst alsnog uit te voeren.

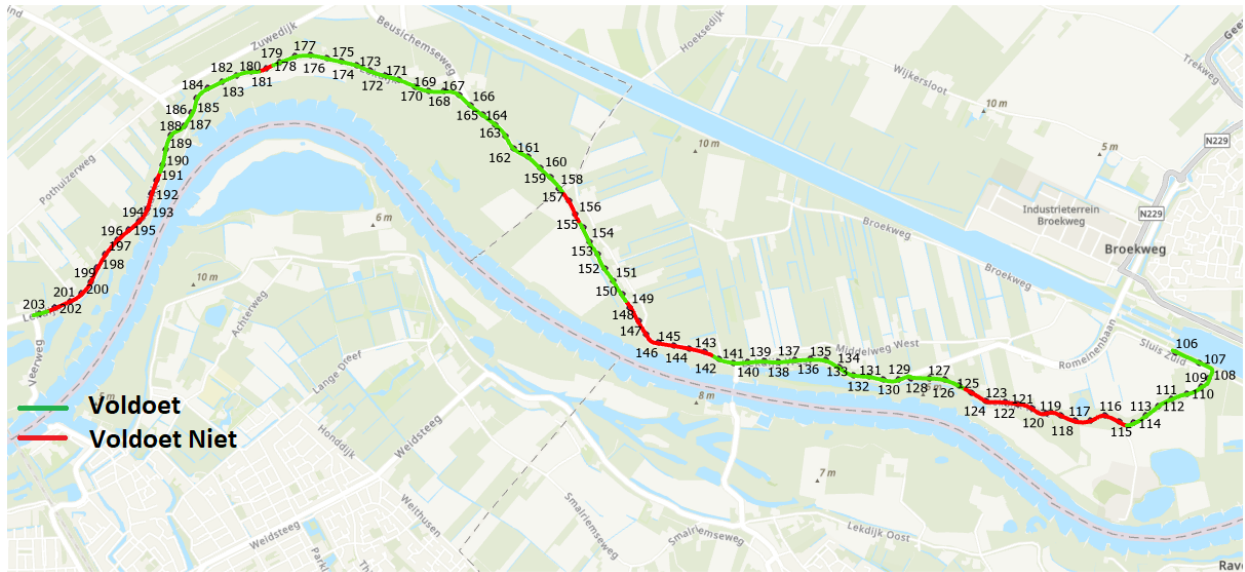
Voor de berekening van de kwelweglengte is de dubbele dijkbasislengte gebruikt. Een optimalisatie parallel aan de beslisboom piping is het meenemen van de aanwezige voorlandlengte. Dit zou mogelijk gunstig uitpakken voor dijkpalen 112 t/m 130, 156, 157 en 179 t/m 184. Bij dijkpalen DP125, DP148 en DP149 moet nog 1 maal de dijkbasis worden aangetoond.

4.8 Conclusie

In dit hoofdstuk is de veiligheidsopgave met betrekking tot het faalmechanisme piping nader beschouwd. Op basis van deze beschouwing zijn de volgende conclusies op te maken.

- Bij de voorhavendijk van de Prinses Irenesluis is geen piping opgave na gebruik van beslisboom Piping.
- Tussen de Bosscherwaarden en Den Oord (DP 112 t/m 148) zijn relatief hoge responsfactoren afgeleid. Dit dijktraject voldoet daarom, op enkele dijkpalen na, niet aan het deelmechanisme opbarsten. Zelfs niet wanneer er een dikke deklaag aanwezig is (> 6,0 m). Ook bij overige deelmechanismen wordt niet aan de veiligheidseis voldaan, waardoor niet voldaan wordt op het faalmechanisme piping. De beslisboom toont aan dat de piping opgave uitgesteld kan worden voor DP112 t/m DP114 en DP126 t/m DP135, DP137 t/m DP142. DP136 voldoet in dit deeltraject als enige zonder beslisboom Piping.
- Voor de Schalkwijker Buitenwaard (DP148 t/m DP 177) dat gekenmerkt wordt door een breed voorland, is geen piping opgave op een strekking van 200 m na. Ter hoogte van dijkpaal 156 en 157 is een tussenzandlaag aanwezig die niet voldoet aan het faalmechanisme piping. De opgave is hier echter zeer gering met een kwelweglengte tekort van ca. 10 m. Voor DP148 en DP149 moet een deklaagdikte van 1m in het voorland worden aangetoond. DP150 en DP151 voldoen op basis van beslisboom Piping.
- Ook tussen de Schalkwijker Buitenwaard en Culemborgse Veer (DP 178 t/m 203) zijn relatief hoge responsfactoren afgeleid. Dit deel voldoet daarom ook niet, op enkele dijkpalen na, aan het deelmechanisme opbarsten. Ook wordt hier niet voldaan het deelmechanisme heave, ondanks dat langs een groot deel van de dijk een dikke deklaag aanwezig is (> 6,0 m). Ook bij de overige deelmechanismen wordt niet aan de veiligheidseisen voldaan, waardoor dit traject niet voldoet op piping. De beslisboom toont aan dat de piping opgave mogelijk verminderd kan worden tot 9 dijkpalen; 180 en 195 t/m 202.

In onderstaande afbeelding is de piping opgave per dijkpaal geprojecteerd over het projectgebied.



Figuur 4-9: Eindoordeel piping per dijkspaal



Figuur 4-10: Deklaagdiktes [m] langs het deeltraject ICU

5 Macrostabieleit buitenwaarts (STBU)

In dit hoofdstuk is de beoordeling van het faalmechanisme macrostabieleit buitenwaarts opgenomen. Voor de beschouwing van de buitenwaartse stabiliteit zijn de schematiseringen gehanteerd uit de stabiliteitsanalyse van de binnenwaartse stabiliteit. Hierbij is gekeken of bij naastgelegen dijkpalen ongunstige taludhellingen en/of een teensloot aanwezig is. Indien een steiler talud of een teensloot bij een naastgelegen dijkpaal aanwezig is, is voor de bestaande schematisering een aanvullende stabiliteitsberekening uitgevoerd met een aangepaste geometrie. De input parameters voor de hydraulische belastingen en de grondeigenschappen zijn conform §3.1.3 en §3.1.4. De berekeningen zijn uitgevoerd volgens de Technische uitgangspuntennotitie (TUN) [1] die specifiek voor het deelproject ICU is opgesteld. Wanneer een andere invulling is gegeven aan deze uitgangspunten of een nadere toelichting op de gehanteerde uitgangspunten nodig is, dan is dit expliciet vermeld.

5.1 Uitgangspunten

De randvoorwaarden en uitgangspunten voor de beoordeling op macrostabieleit binnenwaarts zijn benoemd in de TUN [1]. De volgende randvoorwaarden en uitgangspunten toegepast.

5.1.1 Partiële veiligheidsfactoren

De macrostabieleit buitenwaarts is beoordeeld met een semi-probabilistische werkwijze uit het WBI 2017 [2]. Verschillende onzekerheden beïnvloeden de macrostabieleit van een dijk en daarom is er gebruik gemaakt van een aantal partiële veiligheidsfactoren. Gezamenlijk leiden deze factoren tot een geïsteeerde stabiliteitsfactor voor STBU.

- De schadefactor is 1,11 (afgeleid vanuit het WBI 2017 [14]).
- De schematiseringsfactor is 1,10. In afstemming met HDSR is gekozen om deze waarde van de direct naastgelegen deeltrajecten CUB [3] en WAM over te nemen vanwege de uniforme bodemopbouw in gelaagdheid en in de sterkteparameters. In de NKO fase wordt de schematiseringsfactor niet verder geverifieerd. Dit wordt in het VKA gedaan.
- Modelfactor van 1,06 bij UpliftVan
- De vereiste stabiliteitsfactor (SF) = 1,29 (bij het model UpliftVan)

Tabel 5-1: Bandbreedte stabiliteitsfactor volgens methode UpliftVan bij gehanteerde schematiseringsfactor

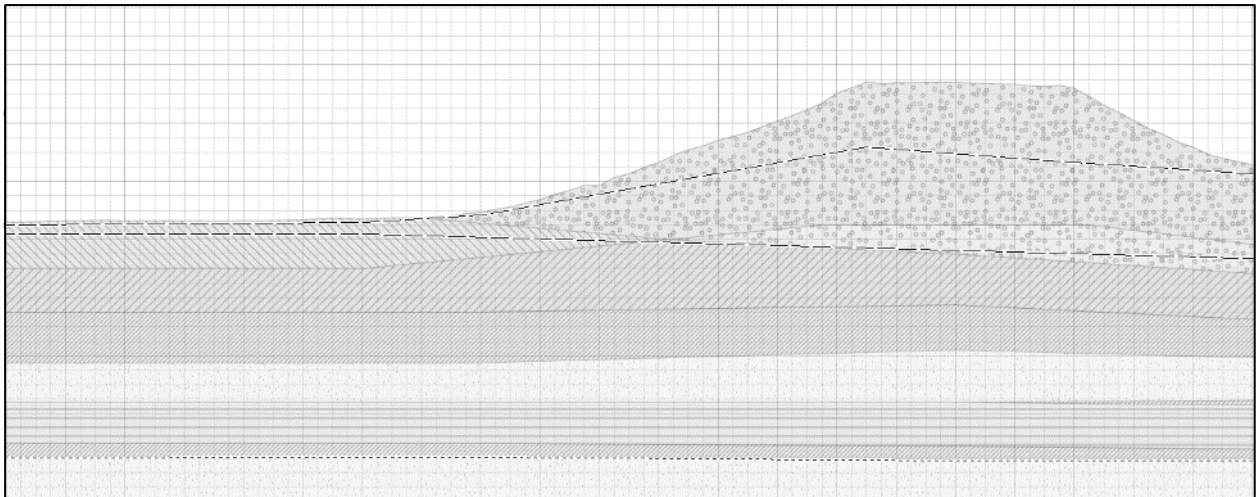
| Schematiseringsfactor | Vereiste SF |
|-----------------------|-------------|
| 1,10 | 1,29 |

5.1.2 Verkeersbelasting

Voor een verkeersbelasting in de Uiterste Grenstoestand (UGT) in deze situatie wordt uitgegaan van een belasting van 13,3 kN/m² over een breedte van 2,5 m conform de SNvU [1]. Voor de verkeersbelasting geldt een spreidingshoek van 30 graden en een consolidatie-grad van 0% in klei en veen en 100% in zand.

5.1.3 Schematisering freatische lijn, stijghoogte en waterspanningen

Voor de belastingsituatie val na hoog water dient conform de TUN [1] voor de freatische lijn op het voorland een waarde van WBN -4,0 m gehanteerd te worden. Op enkele locaties langs het deeltraject ICU ligt deze waarde echter lager dan het voorlandniveau. Dit leidt tot een te optimistische schematisering. Voor die locaties is in de berekeningen daarom een freatische lijn gehanteerd die ca. 0,1 m onder het voorlandniveau ligt.



Figuur 5-1: Alternatieve schematisering van freatische lijn op voorland bij val na hoogwater

Voor de schematisering van de stijghoogte bij val na hoogwater worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Stijghoogte in watervoerende zandlaag is gelijk aan de aangehouden waterstand op het voorland, zie punt A uit tabel 6-6 van de TUN [1];
- Hydrostatisch verloop van de freatische lijn tot de onderzijde van het samendrukbare lagenpakket.

5.2 Maatgevende belastingsituaties

Belastingsituatie extreem laag water

In Tabel 5-2 zijn de berekende stabiliteitsfactoren opgenomen voor macrostabiliteit buitenwaarts voor de belastingsituatie val na hoogwater. Voor de semi-probabilistische werkwijze is bepaald of de belastingsituatie extreem laag water niet maatgevend is, is voor DP106 en DP194 ook een berekening uitgevoerd voor de belastingsituatie extreem laag water. Hiervoor zijn twee dijkprofielen beschouwd met weinig tot geen voorland. Het dijkprofiel bij DP106 (Voorhavendijk) betreft een schaarlijk. Bij D194 bevindt zich het smalste voorland. De volgende resultaten zijn hierbij gevonden:

DP106 SF = 0,90 (voor de belastingsituatie WBN wordt een waarde van 1,07 gevonden)

DP194 SF = 1,43 (bij belastingsituatie val na hoogwater wordt een waarde van 1,32 gevonden)

Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat voor de semi-probabilistische werkwijze de belastingsituatie extreem laag water maatgevend is voor de Voorhavendijk (dijkvak 1) t.o.v. de belastingsituatie val na hoogwater. Voor het overige dijktraject kan geconcludeerd worden dat de belastingsituatie extreem laag water niet maatgevend is t.o.v. de belastingsituatie val na hoogwater.

Belastingsituatie extreme neerslag

In Tabel 5-2 zijn de berekende stabiliteitsfactoren opgenomen voor macrostabiliteit buitenwaarts voor de belastingsituatie val na hoogwater. Om te beoordelen of de belastingsituatie extreme neerslag niet

maatgevend is, is voor DP106 en DP194 ook een berekening uitgevoerd voor de belastingsituatie extreme neerslag. Hierbij worden de volgende resultaten gevonden:

DP106 SF = 0,92 (voor de belastingsituatie WBN wordt een waarde van 1,07 gevonden)
DP194 SF = 1,39 (voor de belastingsituatie WBN wordt een waarde van 1,32 gevonden)

Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat voor de semi-probabilistische werkwijze de belastingsituatie extreme neerslag maatgevend is voor de Voorhavendijk (dijkvak 1) t.o.v. de belastingsituatie val na hoogwater. Voor het overige dijktraject kan geconcludeerd worden dat de belastingsituatie extreem laag water niet maatgevend is t.o.v. de belastingsituatie val na hoogwater.

Enige bekritisering hierbij, voor beide belastingsituaties 'extreme neerslag' en 'extreem laagwater' geldt dat dit samenvalt met het onderdeel 'bewezen sterkte', omdat deze situaties niet veel verschillen van de dagelijkse situatie qua verval. Immers zijn er bij de dagelijkse situatie geen schadebeelden bekend, terwijl deze situatie zich regelmatig voordoet. Voor de 'val na hoogwater' is dit totaal anders en daarom is het vervolg van de beoordeling gericht op 'de val na hoogwater' met de andere belastingsituaties in het achterhoofd.

5.3 Berekeningsresultaten beoordeling buitenwaartse macrostabiliteit

In Tabel 5-2 zijn de resultaten opgenomen van de beoordeling van de buitenwaartse macrostabiliteit voor de semi-probabilistische werkwijze en de faalkansanalyse. In Bijlage D zijn de bijbehorende maatgevende glijcirkels opgenomen. De buitenwaartse macrostabiliteit is beschouwd voor elk maatgevend profiel per dijkvak. De stabiliteitsanalyse is uitgevoerd volgens het Uplift Van-model.

Tabel 5-2 Resultaten stabiliteitsanalyse macrostabiliteit buitenwaarts volgens rekenmodel Uplift Van

| Dijkvak | Dijkpaal / dwarsprofiel | Hectometrering grondopbouw | STBU (val na hoogwater) SF [-] | Oordeel Semi-prob (eis SF ³ 1,29) | Oordeel Faalkansanalyse (Pf; eis ≤ 1,79E-06) |
|---------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|--|
| 1 | 106 | 106+000** | 1,18*** | Voldoet niet | Voldoet |
| 2a | 113 | 122+032** | 1,36 | Voldoet | n.v.t. |
| 2b | 117 | 117+000 | 1,50 | Voldoet | n.v.t. |
| 2c | 128* | 126+000 | 1,40 | Voldoet | n.v.t. |
| 3 | 136 | 137+008** | 1,30 | Voldoet | n.v.t. |
| 4 | 144 | 144+000 | 1,50 | Voldoet | n.v.t. |
| 5a | 152* | 153+000 | 1,36 | Voldoet | n.v.t. |
| 5b | 156 | 156+000 | 1,37 | Voldoet | n.v.t. |
| 6a | 164 | 163+090 | 1,31 | Voldoet | n.v.t. |
| 6b | Idem 6a | Idem 6a | Idem 6a | Idem 6a | n.v.t. |
| 6c | 172 | 172+051 | 1,37 | Voldoet | n.v.t. |
| 6d | 183 | 183+005** | 1,31 | Voldoet | n.v.t. |
| 7 | 190 | 189+055** | 1,31 | Voldoet | n.v.t. |
| 8a | 196 | 196+000 | 1,33 | Voldoet | n.v.t. |

| | | | | | |
|----|-----|---------|------|---------|--------|
| 8b | 203 | 203+000 | 1.32 | Voldoet | n.v.t. |
|----|-----|---------|------|---------|--------|

*In dijkvak 2c en 5a zijn andere maatgevende dwarsprofielen gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

**In enkele berekeningen zijn er meerdere optimalisatieslagen gedaan, waarbij de materialen/ grondopbouw gespecificeerde uitgangspunten hebben.

***Methodiek Faalkansanalyse is alleen opgezet voor (snelle) val na hoogwater.

Enkele locaties voldoen net, namelijk dijkvak 3 (SF=1,301), dijkvak 6d (SF=1,308) en dijkvak 7 (SF=1,305). Voor andere locaties die iets verder van de norm voor STBU liggen speelt dit in mindere mate een rol.

Faalkansanalyse

Binnen het deeltraject ICU is er één schaaldijk aanwezig, namelijk tussen dijkpaal 106 tot en met dijkpaal 107+60. Deze schaaldijk locatie is extra gevoelig voor macro instabiliteit buitenwaarts en daarom is deze situatie naast de reguliere beoordeling (semi-probabilistisch) ook met een faalkansanalyse beschouwd.

Op 1 juni is de methodiek met HDSR afgestemd, waarbij gebruik is gemaakt van twee andere faalkansanalyses voor een “snelle val na hoogwater” die zijn uitgevoerd voor twee andere deel- dijktrajecten en waterschappen. Namelijk SAFE en SAS (liggen tegenover elkaar aan de Lek). De methodiek is opgenomen als bijlage in de TUN [6].

De uitwerking van de faalkansanalyse voor de schaaldijk (dijkpaal 106+00 tot en met 107+060) staat in paragraaf 5.3.1 van de Veiligheidsanalyse. De bijbehorende uitgangspunten zijn opgenomen in de TUN [6] als bijlage.

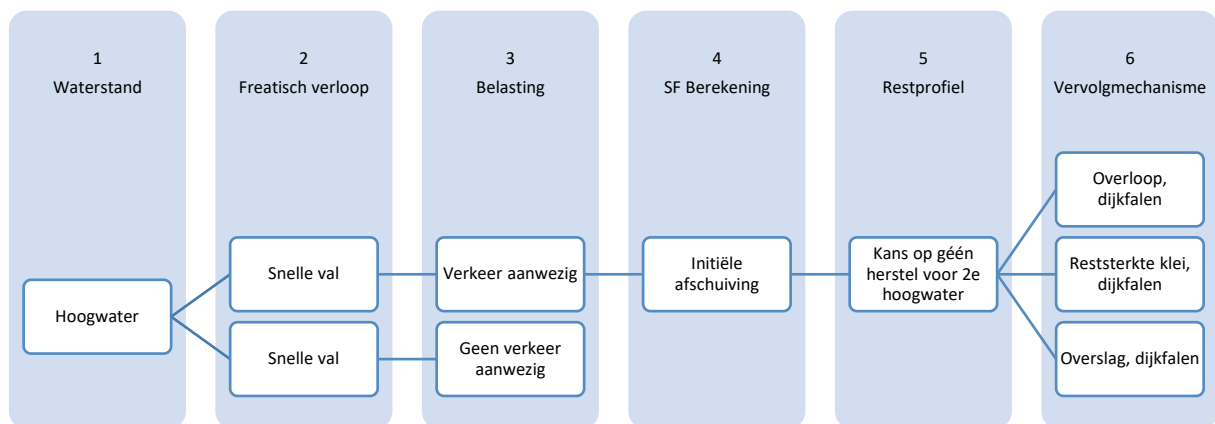
5.3.1 Faalkansanalyse macrostabiliteit buitenwaarts

In deze paragraaf is de faalkansanalyse voor macrostabiliteit buitenwaarts uitgewerkt. Hiervoor worden een aantal termen gebruikt, waarvoor de definitie vanuit de waterveiligheid is weergegeven.

Tabel 5-3: Terminologie faalkansanalyse macrostabiliteit buitenwaarts

| Term | Definities* |
|--------------------|--|
| Gebeurtenissenboom | Een schema of boom waarin achtereenvolgende gebeurtenissen visueel zijn weergegeven |
| Faaltraject | Na het optreden van het initiële mechanisme ook meerdere vervolgmecanismen optreden die uiteindelijk tot een overstroming (dijk falen) kunnen leiden |
| Faalpad | Een enkel pad of route door de gebeurtenissenboom. Dit is een scenario. |
| Faalkans | Het product van alle kansen of frequenties voor een faalpad |
| Faalpadanalyse | Uitwerking van gebeurtenissen en kansen voor een faalpad |
| Faalkansanalyse | Uitwerking van gebeurtenissen en kansen voor een faaltraject |
| Kans/ frequentie | De kans die bij de gebeurtenis uit de boom hoort |

*deze definities zijn zelf opgesteld en kunnen ter discussie worden gesteld.



Figuur 5.2: Gebeurtenissenboom macrostabiliteit buitenwaarts

Gebeurtenissen

1. Waterstand
2. Freatisch verloop
3. Belasting (verkeer)
4. Stabiliteitsberekening
5. Kans op géén herstel, voor 2^e hoogwater
6. Vervolgmechanismen die tot dijkgalen (overstroming) leiden

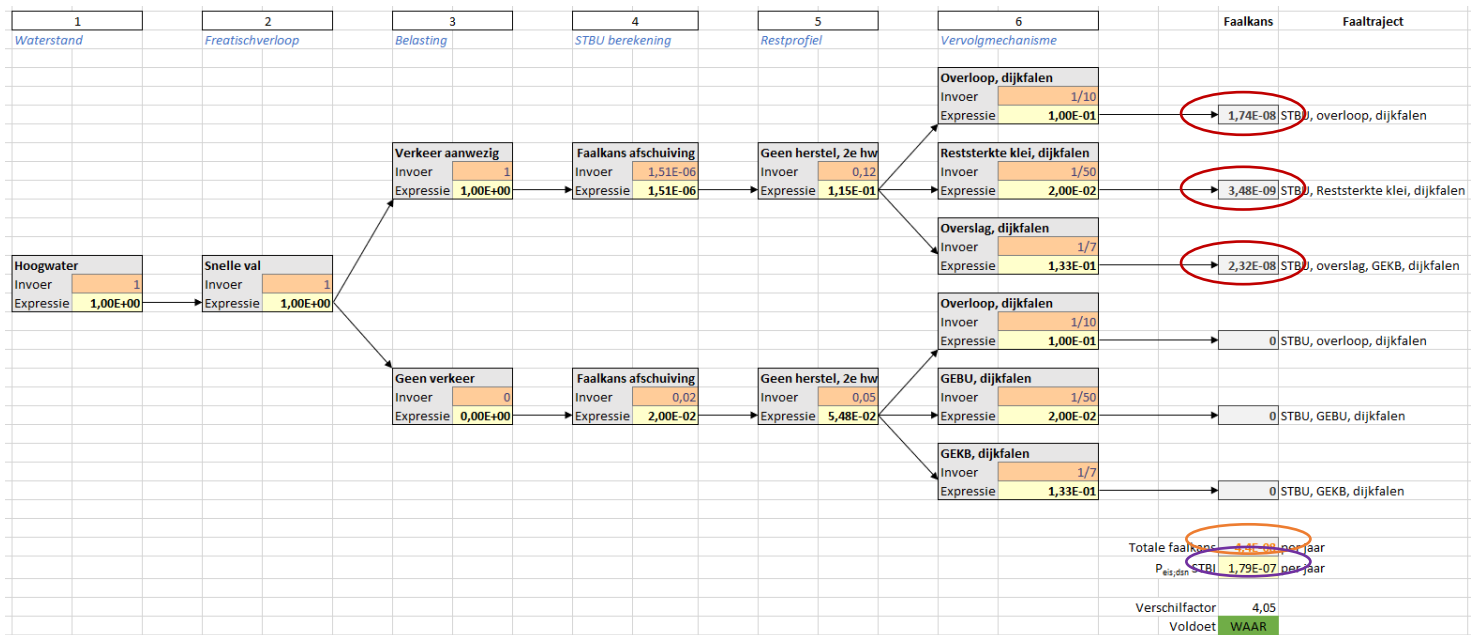
In de gebeurtenissenboom zijn 6 achtereenvolgende gebeurtenissen weergegeven, waarvoor elk een kans of frequentie is ingevuld. Dit heeft geleid tot drie verschillende faalpaden (A-C) die uiteindelijk tot dijkgalen (overstroming) leiden, namelijk:

Tabel 5-4: Faalkansen voor drie verschillende faalpaden die tot een overstroming leiden bij dijkgpaal 106

| | Beschrijving faaltraject (bestaande uit 3 faalpaden) | Faalkans |
|---|--|----------|
| A | Initieel glijvlak (STBU) treedt op, leidt tot een laag restprofiel, overloop kan optreden en leidt direct tot dijkgalen (overstroming) | 1,74E-08 |
| B | Initieel glijvlak (STBU) treedt op, leidt tot een restprofiel van klei, golfcondities leiden tot verdere erosie, bij onvoldoende klei leidt dit tot een bres (dijkgalen of overstroming) | 3,48E-09 |
| C | Initieel glijvlak (STBU) treedt op, leidt tot een verlaagd restprofiel, overslag van 1,0 l/s/m kan optreden en leidt uiteindelijk tot dijkgalen (overstroming) | 2,32E-08 |
| | Totale faalkans = | 4,41E-08 |
| | Macrostabiliteit: $P_{eis;dsn}$ STBI = | 1,79E-07 |
| | Oordeel = | Voldoet |
| | Marge (factor) \approx | 4 |

Voor gebeurtenissen 1, 2 en 3 zijn de kansen/ frequenties “1” ingevuld. Dit kan alsnog exacter bepaald worden, maar ook binnen de faalkansanalyse wordt er eerst van grof naar fijn gerekend.

In Figuur 5.3 staat een gebeurtenissen- faalkansenboom, bestaande uit gebeurtenissen en bijbehorende kansen. In totaal zijn er voor drie verschillende faalpaden de **faalkansen bepaald**. De sommatie leidt tot de **totale faalkans** welke vergeleken wordt met de **beoordelingseis**, in dit geval de doorsnede-eis van STBU.



Figuur 5.3: Gebeurtenissenboom macro-instabiliteit (buitenwaarts) bij dijkpaal 106

Het verschil tussen de totale faalkans en beoordelingseis is ruim factor 4. In deze faalkansanalyse is aangetoond dat een initieel buitenwaarts glijvlak als gevolg van een val na hoogwater niet tot dijkfalen (overstroming) zal leiden. Wel vraagt dit om een actie vanuit HDSR (zorgplicht) om te voorkomen dat vervolgmechanismen niet tot dijkfalen leiden. Dit is opgenomen in de conclusie.

In Bijlage E is de faalkansanalyse (gebeurtenissenboom + kansen) weergegeven. Daarbij is het restprofiel na de buitenwaartse afschuiving toegevoegd en de daarbij horende hydraulische belastingen voor overloop, overslag van 1 l/s/m en golfcondities die de kleikern verder eroderen (reststerkte).

5.4 Conclusie beoordeling macrostabiliteit buitenwaarts

In dit hoofdstuk is de veiligheidsopgave met betrekking tot het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts nader beschouwd. Op basis van deze beschouwing trekken wij de volgende conclusies:

- Alle dijkvakken die in de NvU zijn afgekeurd zijn succesvol geoptimaliseerd tbv het NKO. Dit heeft ertoe geleid dat alle dijkvakken binnen ICU volgens een semi-probabilistische werkwijze voldoen aan de gestelde doorsnede-eis voor macrostabiliteit buitenwaarts ($S.F. \geq 1,29$). Alleen dijkvak 1 (schaardijk van dijkpaal 106 tot en met dijkpaal 107+060) voldoet niet na het uitvoeren van de optimalisaties in het NKO.
- In de fase van het NKO is voor dijkvak 1 (schaardijk) een faalkansanalyse uitgevoerd door twee eerdere uitgevoerde faalkansanalyses voor een “snelle val na hoogwater” te combineren. Het

resultaat is dat bij beoordeling aan de doorsnede-eis voor macrostabiliteit buitenwaarts ($S.F. \geq 1,29$) wordt voldaan. In de faalkans zit een marge van factor 4 wat voldoende is. Voor deze faalkansanalyse gelden nog een aantal aanbevelingen.

Bij de analyse van de buitenwaartse stabiliteit is de bekleding ter hoogte van de waterlijn buiten beschouwing gelaten. Deze bekleding bestaat uit gezette betonzuilen en breuksteen en hebben mogelijk een positieve invloed op de stabiliteit;

In de faalkansanalyse is rekening gehouden met een hersteltijd van 21 dagen. Concreet betekent dit dat er vanuit de zorgplicht om actie gevraagd wordt wanneer tussen dijkpaal 106 en 107+060 een buitenwaarts glijvlak optreedt om vervolgens binnen de gestelde “hersteltijd” van 21 dagen de kering dusdanig te herstellen dat dijkkfalen voorkomen wordt.



Figuur 5-4 Beoordeling macrostabiliteit buitenwaarts per dijkvak bij belastingsituatie val na hoogwater

5.5 Reflectie en aanbevelingen

Voor de dijkvakken waarbij met een semi-probabilistische werkwijze is aangetoond dat het “voldoet” is er géén versterkingsopgave. Voor de schaaldijk (tussen dijkpaal 106 en 107+060) is ook géén versterkingsopgave van toepassing, omdat is aangetoond dat een initieel buitenwaarts glijvlak niet tot dijkkfalen of een overstroming leidt mits het profiel tijdig (dus voor een volgend hoogwater) hersteld is. Hiermee moet dit stuk schaaldijk wel onder de Zorgplicht van beheer van HDSR gaan vallen. Aanbevolen wordt om met beheer/ Assetteam van HDSR de “kans op niet-tijdig herstel” van 21 dagen te valideren.

Voor de faalkansanalyse zijn tussentijds enkele inzichten verkregen die in de huidige aanpak ontbreken waarover het gesprek verder gevoerd moet worden om de situatie bij de schaaldijk scherper te krijgen. Het gaat om de bandbreedte van herstel en detectietijd. Wat is haalbaar en wat is maximaal. Daarnaast is er voor de volledigheid een andere belastingsituatie tegen het licht gehouden, namelijk een extreem laagwater situatie wat samenvalt met een ‘bewezen sterkte’ benadering.

Tabel 5-5: Gevoeligheidsberekeningen faalkansanalyse DP106 (duur hersteltijd, beoordelingseis, belastingsituaties)

| ID | Faalkansanalyse | Totale Faalkans | P _{eis;dsn} Macro | Marge |
|--|--|-----------------|----------------------------|-------|
| DP106 val na HW*, realistisch. herstel | Faalkansanalyse (indirect, STBI doorsnede eis) met hersteltijd van 21 dagen | 4,41E-08 | 1,79E-07 | 4 |
| DP106 val na HW, max. herstel | Faalkansanalyse (indirect, STBI doorsnede eis). Er is 85 dagen tijd om herstel uit te voeren om te voldoen aan de overstromingskansbenadering. Mits de drie vervolgmecanismen een kans van 1/10 en 1/50 en 1/7 hebben. | 1,76E-06 | 1,79E-06 | 1,01 |
| DP106 extreme N* | Faalkansanalyse (extreme neerslag + gemiddelde waterstand), waarbij optimalisatie 1 en 2 moeten leiden tot een SF = 1,05. Op dit moment, NKO (exclusief optimalisaties) SF = 0,92. | 1,58E-06 | 1,79E-06 | 1,1 |
| DP106 extreem LW* | Faalkansanalyse (extreem laagwater), waarbij optimalisatie 1 en 2 moeten leiden tot een SF = 0,95 waarbij de kans op deze Extreme LW 1/10 krijgt. Op dit moment, NKO (exclusief optimalisaties) SF = 0,90 | 1,73E-06 | 1,79E-06 | 1,03 |

*Voor alle drie de verschillende belastingsituaties is een hersteltijd van 21 dagen aangehouden.

Herstel

Voor de val na Hoogwater is aangetoond dat het ruim voldoet aan de doorsnede-eis van macrostabiliteit buitenwaarts, ook bij een lange herstelperiode van **maximaal 85 dagen** met realistische kansen bij het optreden van de drie vervolgmecanismen ter plaatse van het restprofiel. Indien de vervolgmecanismen allemaal een kans van 1,0 per jaar hebben blijkt dat het herstel en detectie in 7 gedagen moet worden gedaan om te voldoen aan de overstromingskansbenadering.

Beoordelingseis macrostabiliteit

Daarnaast moet de vraag gesteld worden of dit vervolgens getoetst moet worden aan de doorsnede-eis van macrostabiliteit binnenwaarts.

Met de huidige faalkansanalyse en een hersteltijd van 21 dagen lijkt met factor 4 net te worden voldaan aan de doorsnede-eis van stabiliteit binnenwaarts.

Belastingssituatie

Voor de bestaande faalkansanalyses is gerekend met een "snelle val na hoogwater". Daarbij moet de kanttekening worden gesteld dat in de faalkansanalyses gekeken wordt naar de vervolgmecanismen wat in feite een volgend (2^e) hoogwater betekent.

Daarbij moet dus niet alleen naar een “snelle val na hoogwater” (gebeurtenis 1 en 2) gekeken worden, maar ook naar een extreme laagwaterstand gecombineerd met neerslag. Immers kan na deze extreme laagwaterstand ook een volgend hoogwater optreden en vervolgmechanismen in gang worden gezet.

Tabel 5-6: De drie belastingsituaties die bij 1e of 2e hoogwater dezelfde vervolgmechanismen in gang kunnen zetten

| Belasting situatie | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------|------------|---------------------|---------|-------------|--------------|---------------------------------|
| Snelle val | Hoogwater | Snelle val | Verkeer | Glijvlak SF | Geen herstel | 2e HW → vervolgmechanisme (1-3) |
| Extreem Laag | Streefpeil | Lange droge periode | Verkeer | Glijvlak SF | Geen herstel | 1e HW → vervolgmechanisme (1-3) |
| Extreme Neerslag | Streefpeil | Extreme neerslag | Verkeer | Glijvlak SF | Geen herstel | 1e HW → vervolgmechanisme (1-3) |

De kans dat na een ‘extreem laagwater’ situatie overgaat in een hoogwatersituatie is zeer onwaarschijnlijk. Hiermee zal de waterstand in een zeer korte tijd een enorm verval moeten overbruggen, namelijk het verschil tussen NAP 1,63m NAP en een waterstand die tot een overstroming kan leiden

Er is een indicatieve berekening een kans van orde 1/10 reductie toegepast op de overbrugging van het nog grotere verval tussen extreem laagwater en een hoge waterstand die vervolgens tot overloop, overslag of reststerkte leidt en uiteindelijk tot dijkkfalen en dus een overstroming.

Deze laatste resultaten over STBU worden bij het Assetteam voorgelegd, omdat het mede samenvalt met detectie en hersteltijd.

6 Bekledingen

6.1 Micro instabiliteit (STMI)

Het faalmechanisme microstabiliteit (STMI) kan bij een dijk leiden tot het falen van de waterkering. Bij microstabiliteit wordt de weerstand gecontroleerd tegen erosie van het binnentalud als gevolg van uittredend water. Voor het gehele deeltraject ICU geldt dat op basis van stap E.2. van de eenvoudige toets de dijk voldoet op het faalmechanisme microstabiliteit omdat voldaan wordt aan het volgende criterium:

- De waterkering heeft een (slecht doorlatende) kleikern waarvan de hoogte gelijk is aan of hoger dan de waterstand bij norm en waarvan de basis aansluit op een slecht doorlatende ondergrond.

Beoordeling

Dijkpaal 106 tot en met dijkpaal 203 voldoen aan het mechanisme Microstabiliteit (STMI) vanwege de aanwezige kleikern.

Conclusie

Er is geen scope vanuit het mechanisme Microstabiliteit.

6.2 Asfalt

Langs het deeltraject ICU is geen asfaltbekleding aanwezig. De faalmechanismen Golfklappen op asfaltbekleding (AGK) en Wateroverdruk bij asfaltbekleding (AWO) zijn daarom niet aan de orde.

6.3 Resultaten Grasbekleding

De beoordeling van de grasbekleding omvat vier toetssporen:

- *Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)*;
- *Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)*;
- *Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)*; en
- *Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)*.

De resultaten van deze toetssporen staan beschreven in onderstaande paragrafen 6.3.1 tot en met 6.3.4.

6.3.1 Grasbekleding Afschuiven Buitentalud (GABU)

Wijze van beoordelen

Het faalmechanisme grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU) kan bij een dijk leiden tot het falen van de waterkering. Het afschuiven van de kleilaag van het buitentalud kan plaatsvinden als gevolg van golfwerking in combinatie met een hoge grondwaterstand in het zand onder de kleilaag (indien aanwezig). Op het moment van maximale golfsterkte heerst er een ongunstig buitenwaarts gericht verhang over de kleilaag, waardoor deze kan opdrukken en/of afschuiven. Voor het gehele deeltraject ICU geldt dat op basis van stap E.1. van de eenvoudige toets, de dijk voldoet op het faalmechanisme GABU omdat voldaan wordt aan de volgende criteria:

- De bekleding van het buitentalud ligt direct op de kleikern van de waterkering.

Beoordeling

Dijkpaal 106 tot en met dijkpaal 203 voldoet aan Grasbekleding afschuiving buitentalud (GABU).

Conclusie

Dijkpaal 106 tot en met dijkpaal 203 voldoen aan het mechanisme Grasbekleding afschuiving buitentalud (GABU) omdat de bekleding van het buitentalud direct op de kleikern van de waterkering ligt.

Aanbevelingen en bekritisering

Er zijn geen aanbevelingen of andere punten die bekritiseerd moeten worden voor het mechanisme Grasbekleding afschuiving buitentalud.

6.3.2 Grasbekleding Erosie Buitentalud (GEBU)

Wijze van beoordelen (eenvoudige toets + gedetailleerde toets)

Eenvoudige toets

De eenvoudige toets conform het WBI [6] bestaat uit drie beslisregels. Als aan een combinatie van de beslisregels wordt voldaan is de bijdrage aan de overstromingskans verwaarloosbaar. Als niet aan de juiste combinatie van regels wordt voldaan, kan op grond van de eenvoudige toets geen oordeel worden geveld en dient verder te worden beoordeeld middels de gedetailleerde toets. Voor ICU blijkt dat de eenvoudige toets niet voldoende is, zie resultaten hieronder. Daarom volgen in onderstaande tekst na de resultaten van de eenvoudige toets, de resultaten van de gedetailleerde toets.

Stap E.1: $H_{m0} \leq 0,6$ m en de dijk heeft een kleikern

Indien de dijk een kleidijk is of een kleikern heeft tot 0,5 m boven de waterstand (h) en de golfhoogte (bij de norm) $H_{m0} \leq 0,6$ m, dan leidt erosie van het buitentalud nooit tot een doorbraak gedurende de maatgevende storm. Bij onvoldoende oordeel wordt de beoordeling voortgezet met stap E.2.

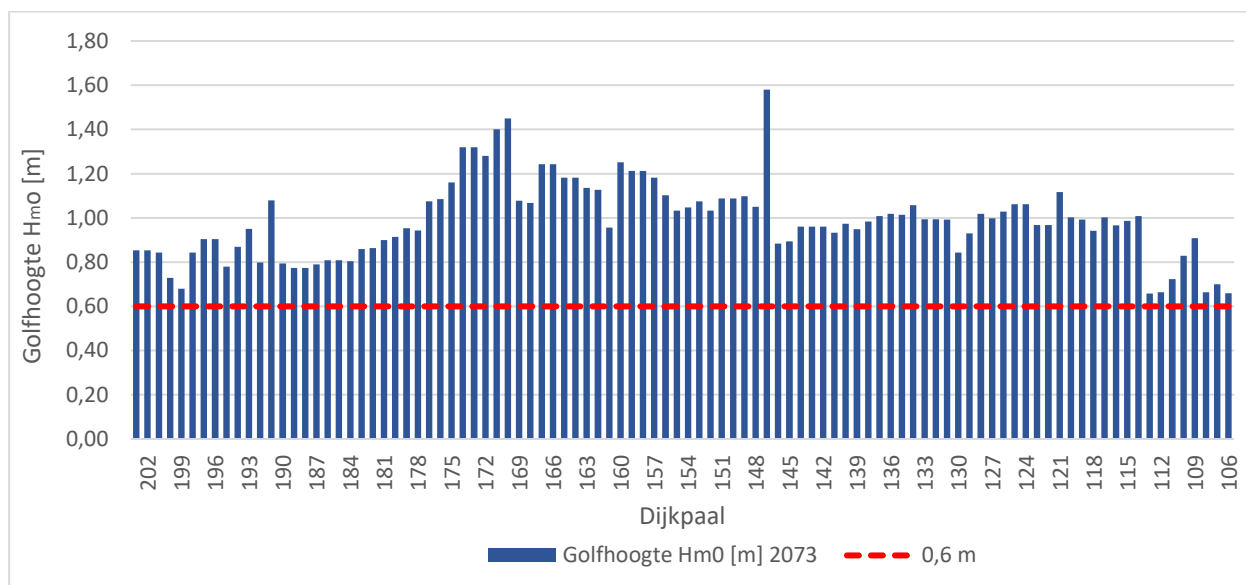
De dijk bestaat langs het gehele traject van ICU uit een kleikern.

Met behulp van Hydra-NL is per uitvoerpunt de significante golfhoogte bij de norm uitgerekend en gekoppeld aan de dichtstbijzijnde dijkpaal. Voor deze berekening zijn onderstaande uitgangspunten aangehouden:

- Hydra-NL-versie 2.7.1 (2019);
- Database: WBI2017_Bovenrijn_44-1_v04;
- Berekeningstype: significante golfhoogte;
- Terugkeertijd = 222.222 jaar;
- Klimaatscenario: KNMI 2006 W+
- Aftopping Lobith: 16.000m³/s
- Zichtjaar 2073: lineaire interpolatie tussen de zichtjaren 2050 en 2100.

De golfhoogte is bepaald bij een faalkanseis voor bekleding. Hierbij is geen rekening gehouden met de hoogteligging van het voorland, de lengte van het voorland, aanwezige dammen en de aanwezige zomerdijk waardoor dergelijke golfcondities niet kunnen ontstaan. Wel is er rekening gehouden met de golfinvalshoek volgens de meest actuele schematiseringhandleiding Bekleding uit het WBI [6]. Aflandige golf-richtingen worden hierdoor niet bepaald.

In onderstaande grafiek zijn de significante golfhoogtes per dijkpaal weergegeven. Daarnaast is een lijn toegevoegd op 0,6 m. Op deze manier kan snel visueel getoetst worden of er een uitvoerpunt is waar de golfhoogte lager is dan 0,6 m.



Figuur 6-1: Significante golfhoogte zichtjaar 2073 per uitvoerpunt (Terugkeertijd 1:222.222 jaar)

Op basis van bovenstaande grafiek 6-1 kan worden geconcludeerd dat er geen uitvoerpunt is met een voldoende resultaat en dat de beoordeling dient te worden voortgezet met stap E.2.

Stap E.2: Graszode is open of graszode is gesloten

Indien de graszode open is of indien de graszode gesloten is, wordt de toets voortgezet met stap E.3. Indien de graszode slechts fragmentarisch is, dan kan op grond van de eenvoudige toets geen oordeel worden geveld. HDSR hanteert voor de gehele Sterke Lekdijk een open zode voor de grasbekleding, omdat in overleg met beheer is vastgesteld dat een gesloten zode niet kan worden gewaarborgd. Hieruit volgt dat de beoordeling kan worden doorgezet met stap E.3.

Stap E.3: $H_{m0} < 0,25$ m

Indien de golfhoogte H_{m0} kleiner is dan 0,25 m, dan is de faalkans verwaarloosbaar klein. Zo niet dan dient een gedetailleerde toets te worden uitgevoerd. Specifiek voor ICU geldt dat in stap E.1 al is geconstateerd dat de golfhoogte H_{m0} in alle gevallen groter is dan 0,6 m. Dit betekent geen enkele dijkpaal langs het dijktraject een voldoende scoort op het faalmechanisme GEBU en dus een gedetailleerde toets dient te worden uitgevoerd.

Gedetailleerde toets GEBU

Voor de gedetailleerde toets is gerekend met de Basis Module BM Gras Buitentalud. Het eindoordeel is gebaseerd op de veiligheidsfactor die verkregen is uit de *Expertmodus* uit GM Gras buitentalud. Voor ICU zijn de berekende dijkpaallocaties en eindoordelen weergegeven in Tabel 6-1.

Volgens de schematiseringshandleiding van grasbekleding is de *Expertmodus* als het ware een Toets op Maat, waarin de "Hoek van inval" zowel in het bepalen van de Golfbelasting S en de invloedsfactor f_{β} worden meegenomen. In de *WBI gebruiker* modus is dat niet het geval en wordt daarmee binnen het WBI gezien als de gedetailleerde toets zonder reducties.

Beoordeling

Het eindoordeel is gebaseerd op de Veiligheidsfactor voor GEBU uit de *Exportmodus* waarbij rekening is gehouden met de invloed van de hoek van de golfaanval. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6-1.

Tabel 6-1: Resultaten GEBU (Gedetailleerde toets en Toets op Maat)

| Geovak GEBU | Van | Tot | Rekenlocatie dijkpaal [-] | Dijknormaal/ oriëntatie [°] | Veiligheidsfactor WBI gebruiker [-] | Veiligheidsfactor- Export modus [-] | Eindoordeel |
|-------------|--------|--------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| GEBU_01 | 106+00 | 107+60 | 107 | 38 | 0,891 | 2,702 | Voldoet |
| GEBU_02 | 107+60 | 116+75 | 114 | 163 | 0,228 | 1,912 | Voldoet |
| GEBU_03 | 116+75 | 146+50 | 128 | 182 | 0,206 | 0,742 | Voldoet niet |
| GEBU_04 | 146+50 | 177+50 | 160 | 225 | 0,154 | 0,24 | Voldoet niet |
| GEBU_05 | 177+50 | 203+50 | 178 | 161 | 0,282 | 0,319 | Voldoet niet |

Toelichting resultaat en invloed hoek van golfaanval (tabel 6-1)

De gedetailleerde toets met de WBI gebruiker modus heeft een zeer conservatieve aanpak wat in veel gevallen tot onterechte afkeur leidt. Hierin wordt gerekend met een loodrechte golfaanval, terwijl in de praktijk de golven uit andere richtingen komen. Door deze golfrichtingen in bijvoorbeeld Hydra-NL te bepalen zal het erosieproces langzamer verlopen.

In de expertmodus zorgt de Invloedsfactor f_{β} ervoor dat er niet met een loodrechte golfaanval wordt gerekend. Daarvoor moet in Hydra-NL de golfcondities op een andere wijze bepaald worden [17] :

“Het toepassen van deze invloedsfactor in “BM - Gras Buitentalud” moet altijd gecombineerd worden met golfrandvoorwaarden die bepaald zijn met Hydra-NL of Riskeer waarin gerekend is met $c = 0,67$ (zie paragraaf 4.7). Door met deze waarde de golfcondities te bepalen, wordt er op de juiste wijze rekening gehouden met de invloed van scheve golfaanval bij het bepalen van de maatgevende condities.”

In Hydra-NL wordt bepaald uit welke verschillende richtingen de golven komen en welke richting de grootste belasting (S) geeft. Dit wordt gedaan met de formule:

$$S = H_{sa} T_{pb} (\cos\beta)^c.$$

“Zo wordt ervoor gezorgd dat loodrechte golfaanval met een iets kleinere golfhoogte toch maatgevend is ten opzichte van scheef invallende golven met een iets grotere golfhoogte.”

Oftewel, een correctie met $c=0,67$ in Hydra-NL voor grasbekleding is hiervoor nodig. Dit is gedaan voor het bepalen van de golfcondities bij ICU, waardoor onterechte afkeur in BM Gras buitentalud is voorkomen.

Vertaling resultaat vakken GEBU_01-GEBU-05

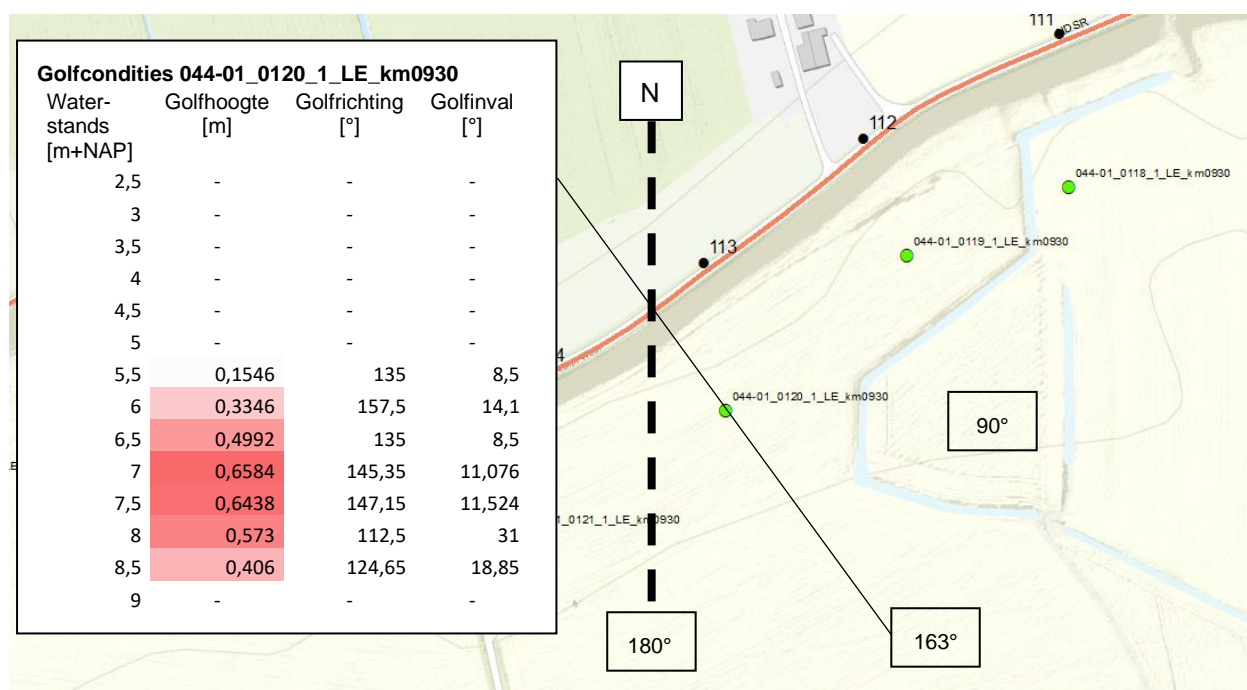
Voor elk Geovak is een maatgevende rekenlocatie gekozen op basis van de meest ongunstige oriëntatie (zuid, zuidwest, west). De verwachting aan de voorkant is dat het resultaat van alle vijf rekenlocaties geldt voor het hele geovak, maar dit is niet het geval:

- Drie rekenlocaties voldoen niet na het uitvoeren van de Gedetailleerde toets en Toets op maat (waar rekening is gehouden met de invloed hoek van golfaanval), zie tabel 6-1.

- Twee rekenlocaties blijken wel te voldoen, zie tabel 6-1. Dit betreft geovakken GEBU_01 en 02 oftewel DP 106 t/m 116. Hiervoor zijn geen verdere berekeningen nodig.

Met een extra kwaliteitsslag wordt gecontroleerd of “hoek golfaanval” ook binnen het Geovak tot afkeur kan leiden, aangezien binnen het vak de dijkoriëntatie lichtelijk varieert. Ook bij de twee rekenlocaties die voldoen. Voor GEBU_02 is DP113 gekozen, waarbij de golfrichtingen het meest gevarieerd zijn vergeleken met andere dijkpalen binnen het geovak.

De golfrichting ten opzichte van het noorden varieert tussen een hoek van 125 graden tot 158 graden, oftewel een verschil van 33 graden, wat zeer beperkt is.



Figuur 6-2: Meeste variatie in golfrichting binnen GEBU_02, dijkpaal 113

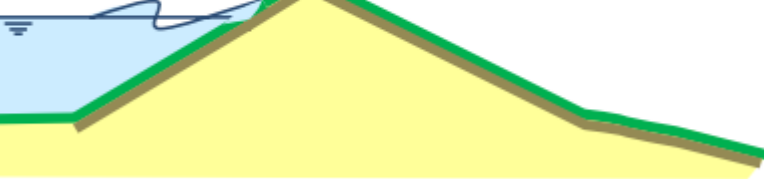
De tussenconclusie is dat de golfrichting en de mate waarin de golfinval varieert, zeer beperkt is voor deze locatie in Figuur 6-2. Voor alle andere dijkpalen binnen GEBU_02 geldt dat er bij elke waterstand een uniforme golfrichting en golfinval is gevonden, oftewel minder variatie in golfrichting en golfinval.

Reststerkte analyse

begin storm; geen schade



gat in graszode



erosie onderlagen



erosie dijklichaam



begin doorbraak



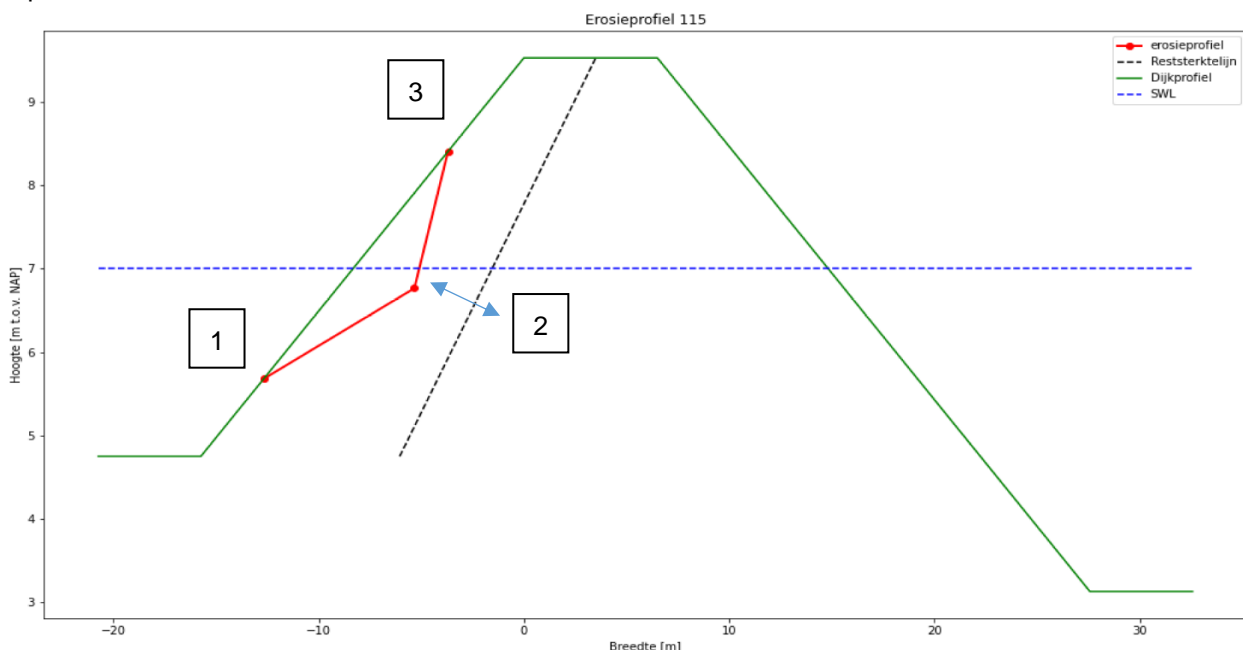
Figuur 6-3: Fasen faalmechanisme GEBU.74[10]

De gedetailleerde toets toont aan dat een groot deel van het traject (DWP117 t/m 203) niet voldoet aan de GEBU-eis. In die toets is de erosie van de grasbekleding beoordeeld. De grasbekleding biedt de meeste weerstand tegen erosie. Echter, resulteert het eroderen van de grasbekleding niet tot een dijkdoorbraak. Hiervoor moet erosie van de kleikern plaatsvinden. Omdat de dijk kern uit klei bestaat voor het traject ICU, biedt de volledige dijk kern weerstand tegen erosie als gevolg van golfklappen onder maatgevende omstandigheden.

De reststerkte wordt beoordeeld door de te “verwachten erosie” te vergelijken met de “aanwezige reststerkte”. De erosie wordt bepaald met de rekenmethode opgesteld door Deltares [21]. Deze veronderstelt dat in een dwarsdoorsnede de optredende erosie rekenkundig kan worden benaderd aan de hand van een driehoekvormig profiel. Het model bepaalt de drie hoekpunten van dit profiel.

Het reststerkteprofiel is een lijn met een helling van 1v:2h. Deze helling is in overeenstemming met de uitgangspunten voor andere faalmechanismen. De lijn snijdt de kruin op een afstand van 3m van de binnenkruin. Dit om voldoende breedte te waarborgen voor reparatiewerkzaamheden. Figuur 6-4 geeft een voorbeeld van een erosieprofiel (rode lijn) en een reststerkteprofiel (gestippelde zwarte lijn).

De reststerkte, uitgedrukt in restbreedte, is de horizontale afstand tussen het reststerkteprofiel en het inscharingspunt (punt 2) van het erosieprofiel. Indien het inscharingspunt links van de reststerktelijn is, is er voldoende reststerkte aanwezig en levert dit een positieve restbreedte op. Als het inscharingspunt rechts van de reststerktelijn is, is er onvoldoende reststerkte aanwezig en levert dit een negatieve restbreedte op.



Figuur 6-4: Voorbeeld reststerkte analyse.

De reststerkte analyse is per dijkpaal uitgevoerd. Hiervoor is er een versimpelde schematisering van de geometrie bepaald aan de hand van AHN3. De golfcondities zijn bepaald bij een overschrijdingsfrequentie van 1/222.222 per jaar met Hydra-NL. Golfcondities die het maaveld in het voorland doorsnijden zijn niet beschouwd i.v.m. het breken van golven. Per dijkpaal is de reststerkte voor elke golfconditie bepaald en de analyse met de laagste restbreedte is maatgevend beschouwd.

De waarden gebruikt voor de parameters in het erosiemodel zijn opgenomen in Tabel 6-2.

Tabel 6-2: Gehanteerde modelparameters reststerkte analyse GEBU

| Parameter | Verklaring | Waarde |
|---------------------------|---|--------------------|
| P_{max} | Maximaal toelaatbare overstroomingskans van het dijktraject (jaar) | 1/10000 |
| $P_{eis,dsn}$ | Terugkeertijd golfcondities (faalkanseis op doorsnedeniveau) | 1/222000 |
| N | Lengte-effect factor | 1.0 |
| ω_B | Faalkansruimte factor | 0.1 |
| λ_1 | Deel faalkansruimte bekledingen bestemd voor grasbekledingen | 0.5 |
| λ_2 | Deel faalkansruimte grasbekledingen bestemd voor falen grasbekleding door graserosie. | 0.9 |
| α_s | Invloedscoëfficiënt golfbelasting | 1.0 |
| $\alpha_{R;erosievolum}$ | Invloedscoëfficiënt erosievolum | 0.32 ¹⁾ |
| $\alpha_{R;insnijdiepte}$ | Invloedscoëfficiënt insnijdiepte | 0.32 ¹⁾ |
| $V_{erosievolum}$ | Variatiecoëfficiënt erosievolum | 0.25 ²⁾ |
| $V_{insnijdiepte}$ | Variatiecoëfficiënt insnijdiepte | 0.15 ²⁾ |
| T_{storm} | Belastingduur (Bovenrivierengebied) | 12u |
| C_e | Erosiecoëfficiënt | 0.55 |
| V_{C_e} | Variatiecoëfficiënt van Erosiecoëfficiënt | 0,25 |
| $M_{C_e;d}$ | Veiligheidsfactor erosievolum | 1,36 ³⁾ |
| Gras | Fragmentarisch/Open/Gesloten grasmat | Open |
| a | Parameter voor bepaling H_{m0} bij open graszode | 0.8 |
| b | Parameter voor bepaling H_{m0} bij open graszode | -0.07 |
| c | Parameter voor bepaling H_{m0} bij open graszode | 0.25 |

1. ISO-gestandaardiseerde invloedscoëfficiënt voor niet-dominante sterkteparameter.
2. Standaardwaarde [DELTA 2013a]
3. Veiligheidsfactor bepaald op basis van een normale verdeling $\gamma = 1 + \alpha_R \beta_{eis;drs} V$

De resultaten van de reststerkte analyse is opgenomen in Tabel 6-3. Uit de reststerkte analyse komt naar voren dat er voor elke dijkpaal voldoende restbreedte aanwezig is en dus het falen van de grasbekleding en de daaropvolgende erosie van de kern niet tot het falen van de dijk zal leiden. Een uitgebreidere tabel met de maatgevende golfcondities is opgenomen in Bijlage H.

Tabel 6-3: Oordeel GEBU reststerkte analyse per dwarsprofiel voor geovakken GEBU_03 t/m _05

| Dwars- profiel | Water- stand [mNAP] | Rest- breedte [m] | | | | | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|-----|-----|------|-----|-----|------|
| 117 | 8 | 6.79 | 144 | 7 | 4.23 | 174 | 6.5 | 2.95 |
| 118 | 7.5 | 2.86 | 145 | 7 | 4.78 | 175 | 6.5 | 4.90 |
| 119 | 8 | 1.50 | 146 | 7 | 4.38 | 176 | 6.5 | 3.53 |
| 120 | 7.5 | 1.33 | 147 | 4.5 | 0.85 | 177 | 7 | 4.09 |
| 121 | 7.5 | 1.85 | 148 | 7 | 3.91 | 178 | 7 | 4.73 |
| 122 | 7.5 | 2.18 | 149 | 7 | 4.76 | 179 | 7 | 3.67 |
| 123 | 7.5 | 4.25 | 150 | 7 | 5.17 | 180 | 6.5 | 3.15 |
| 124 | 7 | 1.91 | 151 | 7 | 4.03 | 181 | 7 | 7.76 |
| 125 | 7.5 | 4.88 | 152 | 7 | 5.64 | 182 | 8 | 5.31 |
| 126 | 7.5 | 1.70 | 153 | 6.5 | 3.41 | 183 | 7 | 4.01 |
| 127 | 7 | 0.80 | 154 | 6.5 | 3.23 | 184 | 8 | 3.84 |
| 128 | 7 | 2.08 | 155 | 6.5 | 2.05 | 185 | 7 | 5.09 |
| 129 | 6.5 | 0.64 | 156 | 6.5 | 2.25 | 186 | 7 | 7.33 |
| 130 | 7.5 | 4.63 | 157 | 6.5 | 2.01 | 187 | 4 | 4.21 |
| 131 | 7 | 4.33 | 158 | 6.5 | 2.93 | 188 | 7 | 5.51 |
| 132 | 7 | 3.97 | 159 | 6.5 | 2.00 | 189 | 7.5 | 6.51 |
| 133 | 7 | 5.70 | 160 | 6.5 | 2.57 | 190 | 7 | 4.95 |
| 134 | 7.5 | 3.19 | 161 | 7 | 4.16 | 191 | 7 | 5.02 |
| 135 | 7 | 4.25 | 162 | 7 | 4.08 | 192 | 7 | 6.08 |
| 136 | 7 | 4.33 | 163 | 6.5 | 1.75 | 193 | 6 | 4.67 |
| 137 | 7 | 2.75 | 164 | 6.5 | 2.40 | 194 | 6.5 | 4.47 |
| 138 | 7 | 4.12 | 165 | 6.5 | 0.25 | 195 | 6.5 | 4.21 |
| 139 | 7 | 4.61 | 166 | 6.5 | 2.00 | 196 | 5.5 | 4.73 |
| 140 | 7 | 14.91 | 167 | 6.5 | 0.95 | 197 | 5.5 | 4.33 |
| 141 | 7 | 5.85 | 168 | 6.5 | 3.50 | 198 | 6 | 4.78 |
| 142 | 7.5 | 4.27 | 169 | 6.5 | 2.40 | 199 | 7.5 | 4.75 |
| 143 | 7.5 | 3.57 | 170 | 6.5 | 2.41 | 200 | 6.5 | 4.36 |
| | | | 171 | 6.5 | 2.71 | 201 | 6.5 | 2.98 |
| | | | 172 | 6.5 | 2.75 | 202 | 6.5 | 4.19 |
| | | | 173 | 6.5 | 3.02 | 203 | 6.5 | 4.64 |

- 1
- 2 **Reflectie resultaten**
- 3 Om te reflecteren op de resultaten zijn enkele grafieken geplot waarin de locatie (uitgedrukt in dijkpaal-
- 4 nummer) uitgezet is tegen invoerparameters. Hieruit is geconstateerd dat de invoerparameters golfhoogte
- 5 en kruinbreedte het meest invloedrijk zijn over dit traject. De golfhoogte is bepalend voor de mate van
- 6 erosie, omdat erosie optreedt door de energie van een golfklap. Een grotere golfhoogte veroorzaakt een
- 7 grotere golfklap. De kruinbreedte heeft indirect invloed op de aanwezige restbreedte op een bepaalde
- 8 hoogte samen met de waterstand van de golfbelasting. Door het verschil in de helling van het buitentalud
- 9 en de restprofiellijn is er meer breedte aanwezig voor lageregelegen golfbelastingen. Uit de grafieken van
- 10 de resultaten bleek dat de waterstand niet maatgevend is. De grafieken ten opzichte van deze

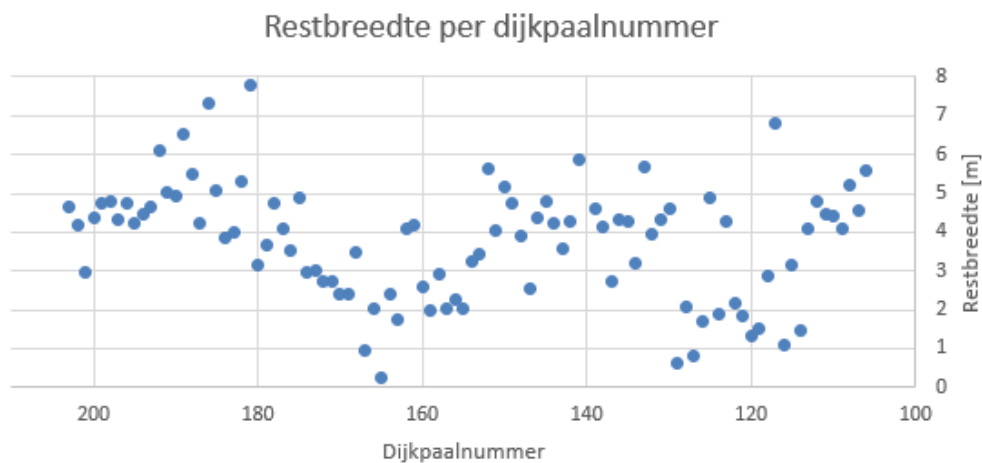
11 invoerparameters en een grafiek waarin de restbreedte is uitgezet tegen de locatie zijn weergegeven in
12 Figuur 6-5, Figuur 6-6 en Figuur 6-7. Een reflectie op de resultaten zal dan ook worden uitgevoerd in het
13 licht van deze parameters.

14
15 DP117 t/m DP 129: De restbreedte is relatief laag (<3m). Dit gedeelte van de dijk wordt gekenmerkt met
16 relatief hoge golfhoogtes (0,75m-1,1m) in combinatie met relatief dunne kruinbreedtes (<5,0m). Dijkpalen
17 117,123 en 125 zijn een uitzondering. Deze locaties hebben een bredere kruin en lagere golfhoogtes
18 (0,9m).

19
20 DP130 t/m DP146: De restbreedte varieert enorm. De golfhoogte is stabiel met een lichte daling richting
21 het westen. De variatie wordt voornamelijk veroorzaakt door variatie in kruinbreedte. De afname in golf-
22 hoogte is niet duidelijk te herleiden in de restbreedte.

23
24 DP152 en DP176: Dit gedeelte van de dijk wordt gekenmerkt door relatief hoge golfhoogtes en het effect
25 hiervan is te herkennen door een lagere restbreedte (<3m). De kruinbreedte neemt licht af richting het
26 westen en dit is terug te zien in de restbreedte. De restbreedte op dijkpaal 165 is met 0,25m kritisch. Dit
27 komt door de ongunstige ligging, waarbij de kering georiënteerd is op het zuidwesten en flinke strijkleng-
28 tes aanwezig zijn. Tussen DP177 en 203 is de restbreedte gemiddeld (3m-6m) en varieert sterk evenals
29 de golfhoogte. Er zijn enkele uitschieters in restbreedte (>6m) veroorzaakt door uitschieters in kruin-
30 breedte (DP181 & DP186) of door een combinatie van een lage golfhoogte en een relatief hoge kruin-
31 breedte (DP189 & DP192).

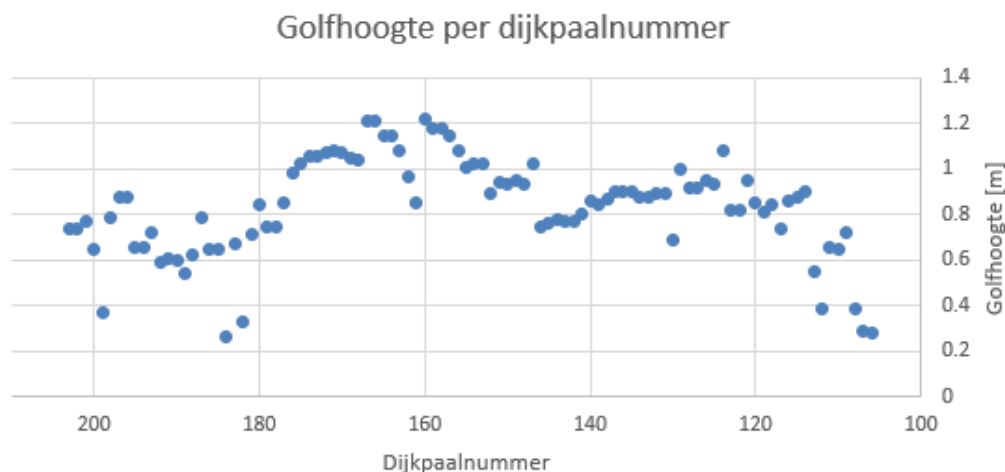
32



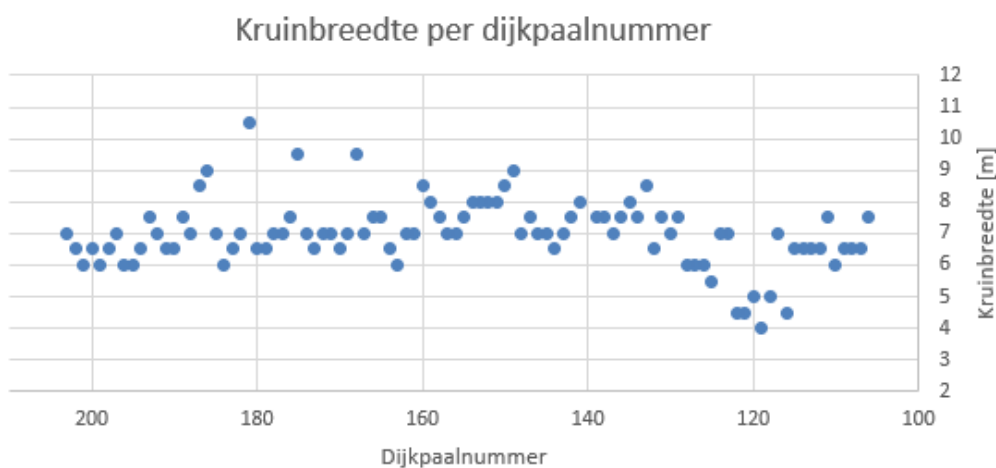
Figuur 6-5: Restbreedte per dijkpaal

46
47

4R



Figuur 6-6: Golfhoogte per dijkpaal.



Figuur 6-7: Kruinbreedte per dijkpaal.

74 **Aanbevelingen & Bekritisering**

75 In [21]74 wordt geadviseerd om een helling 1v:3h te hanteren voor de reststerktelijn van een klei dijk kern.
76 Hiervan is afgeweken omdat dit een conservatief uitgangspunt is en het gangbaar is om een helling van
77 1v:2h te hanteren. Deze aanname is consistent met uitgangspunten van andere faalmechanismen.

78
79 De resultaten geven aan dat de golfhoogte en kruinbreedte maatgevend zijn voor de reststerkte. De golf-
80 hoogte bepaalt in grote mate de hoeveelheid erosie die gaat plaatsvinden. De kruinbreedte bepaalt de
81 beschikbare restbreedte. De resultaten zijn in lijn met de invoer.

82
83 De analyse heeft enige onzekerheid met betrekking tot de kwaliteit van de kleikern. De kleikern is aange-
84 toond aan de hand van sonderingen en het daaruit resulterende geotechnisch lengteprofiel. De kwaliteit
85 en daarmee de mate van erosiebestendigheid van de klei, is niet bepaald. Voor de gebruikte standaard
86 coëfficiënt in deze analyse moet worden aangetoond dat de kleikern uit stevige of schrale klei (categorie

87 1 &2) bestaat. Indien een deel van de waterkering bestaat uit klei categorie 3 zal dit deel onder een golf-
88 belasting snel eroderen. Het is daarom belangrijk om inzichtelijk hebben of de dijk kern inderdaad erosie-
89 bestendig is. Er wordt aanbevolen om in de fase van het VKA boringen uit te voeren en de Atterbergse
90 grenzen van de klei te bepalen zodat de erosie categorie kan worden bepaald. De onzekerheid hiervan is
91 enigszins verdisconteerd door een veiligheidsfactor op het erosievolume toe te passen, bepaald aan de
92 hand van de doorsnede-eis, aangenomen erosie coëfficiënt en een ISO-gestandaardiseerde standaardaf-
93 wijking.

94
95 Naast de onzekerheid over de erosiebestendigheid van de kleilaag speelt ook de wijze waarop de klei-
96 laag bij de vorige dijkversterking is aangebracht en voldoende is verdicht. Hierbij wordt gesproken over
97 de erodeerbaarheid van het aanwezige materiaal. In deze reststerkte analyse is geen rekening gehouden
98 met de erodeerbaarheid. Wel wordt aanbevolen om inzicht te krijgen van de verdichtingsgraad of wijze
99 van aanbrengen van de kleilagen van de vorige versterking.

100
101 Omdat voor het mechanisme GEBU met reststerkte is gerekend om tot goedkeuring te komen, mag rest-
102 sterkte niet bij andere faalmechanismen toegepast worden. Omdat de scope voor meerdere mechanis-
103 men zeer beperkt is, speelt dit binnen ICU geen rol.

104
105 **Conclusie**

106 De reststerkteanalyse is uitgevoerd voor alle dijkpalen. Hieruit komt naar voren dat voor alle dijkpalen vol-
107 doende reststerkte aanwezig is als de grasbekleding faalt. De bepaalde restbreedte is veranderlijk over
108 het hele traject. De variatie wordt veroorzaakt door de aanwezige kruinbreedte en de golfhoogte.

109
110 Voor de eindbeoordeling van GEBU is een overzicht gemaakt van alle uitgevoerde beoordelingen en
111 weergegeven in Tabel 6-4. Om aan het eindoordeel te voldoen dient minimaal één van de toetsingen te
112 voldoen die van grof naar fijn zijn uitgevoerd.

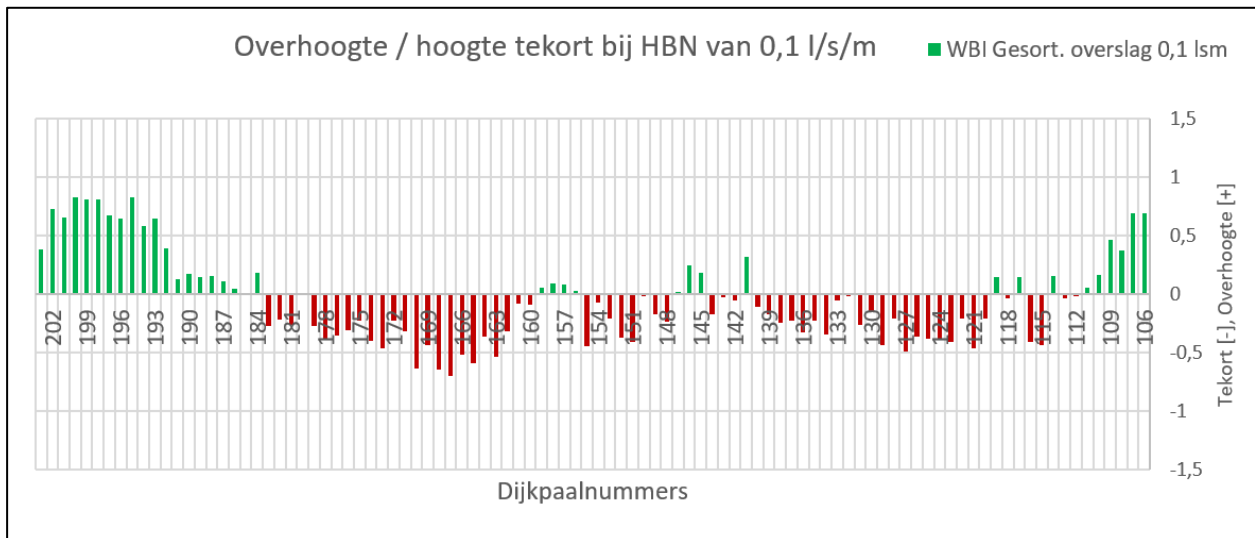
113
114 *Tabel 6-4: Resultaten GEBU (ET =eenvoudige toets, GT =gedetailleerde toets, TOM =Toets op Maat, Reststerkte*
115 *analyse)*

| Geovak GEBU | Van | Tot | ET | GT | TOM | Reststerkte analyse | Eindoordeel |
|-------------|--------|--------|--------------|-------|-------|-----------------------|-------------|
| GEBU_01 | 106+00 | 107+60 | Voldoet niet | 0,891 | 2,702 | n.v.t. | Voldoet |
| GEBU_02 | 107+60 | 116+75 | Voldoet niet | 0,228 | 1,912 | n.v.t. | Voldoet |
| GEBU_03 | 116+75 | 146+50 | Voldoet niet | 0,206 | 0,742 | positieve restbreedte | Voldoet |
| GEBU_04 | 146+50 | 177+50 | Voldoet niet | 0,154 | 0,24 | positieve restbreedte | Voldoet |
| GEBU_05 | 177+50 | 203+50 | Voldoet niet | 0,282 | 0,319 | positieve restbreedte | Voldoet |

116
117

- 118
119
120
- 121 **6.3.3 Grasbekleding Afschuiven Binnentalud (GABI)**
- 122 **Wijze van beoordelen (eenvoudige toets + Omgang GABI SLD)**
- 123 Het faalmechanisme afschuiven binnentalud heeft een sterke relatie met het faalmechanisme micro-Insta-
124 biliteit. Bij een overslagdebiet dat bij de norm groter is dan 0,1 l/s/m kunnen de waterspanningen in de
125 dijk extra snel stijgen. De waterspanningstoename als gevolg van golfoverslag moet de f worden meege-
126 nomen bij de beoordeling van de stabiliteit van de bekleding op het binnentalud. Als het overslagdebiet
127 groter is dan 0,1 l/s/m dan is de beoordeling van GABI maatgevend over de beoordeling van microstabilitei-
128 teit. Vanuit een indicatieberekening van het analysespoor kruinhoogte waarin het Hydraulisch Belastingni-
129 veau is bepaald (hoofdstuk 2), is gebleken dat over een deel van het dijktraject het overslagdebiet $> 0,1$
130 l/s/m bedraagt, waardoor het faalmechanisme GABI onderzocht moet worden.
- 131
- 132 In onderstaande tekst wordt eerst ingegaan op de resultaten van de Eenvoudige Toets, vervolgens op de
133 beoordeling via de werkwijze beschreven in de “Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk”,
134
- 135 **Eenvoudige toets**
- 136 De eenvoudige toets voor grasbekleding afschuiven binnentalud bestaat uit een toets op basis van geo-
137 metrische kenmerken en eenvoudig te bepalen parameters.
138
- 139 **Stap E.1: De bekleding voldoet als positief geantwoord kan worden op eenvoudige kenmerken**
- 140 • Het overslagdebiet is kleiner dan 0,1 l/s/m (bepaald bij de norm);
 - 141 ○ Om te controleren of aan deze voorwaarde wordt voldaan zijn overslagberekeningen uit-
142 gevoerd gebaseerd op het rekenrecept [7] en de rekenbestanden die ook gebruikt zijn
143 om het hydraulisch belastingniveau voor 1 l/s/m, 5 l/s/m en 10 l/s/m vast te stellen, zie
144 hoofdstuk 2.2.3.
 - 145 • De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1V:5H en bestaat niet uit veen;
 - 146 ○ Antwoord: De binnendijkse taludhellingen bij ICU zijn steiler dan 1V:5H.
 - 147 • De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1V:3H en de dijk bestaat uit stevige
148 klei;
 - 149 ○ Antwoord: De binnendijkse taludhellingen bij ICU zijn, op een enkele dijkpaal na, steiler
150 dan 1V:3H of de aanwezigheid van stevige klei is niet aangetoond.
 - 151 • De taludhelling van het binnentalud is flauwer of gelijk aan 1V:4H en bestaat uit klei die niet als
152 stevig wordt gekwalificeerd;
 - 153 ○ Antwoord: De binnendijkse taludhellingen bij ICU zijn steiler dan 1V:4H.
- 154
- 155 **Resultaten**
- 156 In Figuur 6-8 zijn de resultaten te zien van de benodigde kruinhoogte voor een overslagdebiet van 0,1
157 l/s/m en de bestaande kruinhoogte. Aangehouden is het zichtjaar 2073 en er is rekening gehouden met
158 bodemdaling door de bestaande kruinhoogte te verlagen. De roodgekleurde kolommen geven locaties
159 aan waar niet wordt voldaan aan de benodigde kruinhoogte voor een overslagdebiet van 0,1 l/s/m of min-
160 der.
- 161
- 162 Bij de berekening van het HBN met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m dient het volgende te worden opge-
163 merkt:
- 164 • Uitgangspunten zijn overgenomen uit de eerder uitgevoerde HBN-berekeningen voor een over-
165 slagdebiet van 10, 5, 1 en 0,1 l/s/m.

166
167



168 *Figuur 6-8: Hoogteoverschot of -tekort per dijkpaal met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m*

169 Geconcludeerd kan worden dat van de 98 dijkpalen er 60 niet voldoen aan de benodigde kruinhoogte bij
170 een overslagdebiet van 0,1 l/s/m.

171

172 **Beoordeling – Stap 1**

173 In de fase van het NKO wordt GABI “Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk” voortgezet met stap 1, waarin
174 een analyse wordt uitgevoerd met de formules van Edelman Joustra. Sectie 1 tot en met sectie 7 voldoen
175 al aan de eenvoudige toets en zijn in stap 1 van de notitie niet nog eens beschouwd. Het oordeel van
176 stap 1 is weergegeven in Tabel 6-5. Indien “voldoet niet” van toepassing is, wordt er de benodigde talud-
177 helling in de laatste kolom weergegeven om uiteindelijk wel te voldoen aan GABI. Dit kan als scope wor-
178 den beschouwd.

179

180 *Tabel 6-5: Resultaten GABI (Stap 1, “Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk” [7])Eenvoudige toets*

| | Geovak GABI | Van | Tot | Rekenlocatie dijkpaal [-] | Correctie factor | Veiligheids factor | Oordeel | Benodigde talud helling |
|----------|-------------|--------|--------|---------------------------|------------------|--------------------|--------------|-------------------------|
| Sectie 1 | | 106+00 | 111+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_01 | 111+60 | 113+50 | 112 | 1.00 | 0.80 | Voldoet niet | 3,19 |
| Sectie 2 | | 113+50 | 114+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_02 | 114+50 | 116+75 | 115 | 1.00 | 0.81 | Voldoet niet | 3,19 |
| | GABI_03 | 116+75 | 118+50 | 118 | 1.00 | 0.86 | Voldoet niet | 3,19 |
| Sectie 3 | | 118+50 | 119+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_04 | 119+50 | 130+50 | 126 | 1.00 | 0.62 | Voldoet niet | 3,19 |
| | GABI_05 | 130+50 | 140+50 | 134 | 1.00 | 0.65 | Voldoet niet | 3,19 |

| | Geovak GABI | Van | Tot | Reken- locatie dijkpaal [-] | Correctie factor | Veiligheids factor | Oordeel | Benodigde talud hel- ling |
|----------|----------------|--------|--------|--------------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|---------------------------------|
| Sectie 3 | | 140+50 | 141+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_06 | 141+50 | 144+50 | 144 | 1.00 | 0.60 | Voldoet niet | 3,19 |
| Sectie 4 | | 144+50 | 147+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_07 | 147+50 | 155+50 | 155 | 1.00 | 0.55 | Voldoet niet | 3,19 |
| Sectie 5 | | 155+50 | 159+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_08 | 159+50 | 166+00 | 165 | 1.00 | 0.75 | Voldoet niet | 3,19 |
| | GABI_09 | 166+00 | 179+50 | 173 | 1.00 | 0.57 | Voldoet niet | 3,19 |
| Sectie 6 | | 179+50 | 181+50 | | | | Voldoet | |
| | GABI_10 | 181+50 | 183+50 | 183 | 1.00 | 0.71 | Voldoet niet | 3,19 |
| Sectie 7 | | 183+50 | 203+00 | | | | Voldoet | |

181

182 **Beoordeling – Stap 2**

183 In Stap 2 wordt gekeken of binnen het beschouwde vak een ander faal mechanisme ook tot scope leidt.

184 In dit geval kan dit integraal opgepakt worden. Deze stap is in de fase van het NKO niet expliciet vastge-
185 legd. In feite is stap 3 als eerste uitgevoerd.

186

187 **Beoordeling – Stap 3**188 In Stap 3 van Notitie omgang met GABI bij Sterke Lekdijk [7] wordt er gerekend met een ander zichtjaar,
189 namelijk 2035 in plaats van 2073. Daarmee wordt afgeweken van een ontwerplevensduur van 50 jaar
190 voor een “groene kering”. Voor de Sterke Lekdijk is deze notitie en dus dit afwijkende zichtjaar een uit-
191 gangspunt. Op basis van het zichtjaar 2035 met een herhalingstijd met T=10.000 is de beoordeling voor
192 GABI uitgevoerd. In Tabel 6-6 zijn de resultaten weergegeven.

193

194 *Tabel 6-6: Resultaten GABI (Stap 3, “Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk” [7])*

| Dijkpaal | Oordeel GABI | | | | |
|----------|--------------|-----|---------|-----|---------|
| 106 | voldoet | 116 | voldoet | 127 | voldoet |
| 107 | voldoet | 117 | voldoet | 128 | voldoet |
| 108 | voldoet | 118 | voldoet | 129 | voldoet |
| 109 | voldoet | 119 | voldoet | 130 | voldoet |
| 110 | voldoet | 120 | voldoet | 131 | voldoet |
| 111 | voldoet | 121 | voldoet | 132 | voldoet |
| 112 | voldoet | 122 | voldoet | 133 | voldoet |
| 113 | voldoet | 123 | voldoet | 134 | voldoet |
| 114 | voldoet | 124 | voldoet | 135 | voldoet |
| 115 | voldoet | 125 | voldoet | 136 | voldoet |
| | | 126 | voldoet | 137 | voldoet |

| | |
|-----|---------|
| 138 | voldoet |
| 139 | voldoet |
| 140 | voldoet |
| 141 | voldoet |
| 142 | voldoet |
| 143 | voldoet |
| 144 | voldoet |
| 145 | voldoet |
| 146 | voldoet |
| 147 | voldoet |
| 148 | voldoet |
| 149 | voldoet |
| 150 | voldoet |
| 151 | voldoet |
| 152 | voldoet |
| 153 | voldoet |
| 154 | voldoet |
| 155 | voldoet |
| 156 | voldoet |
| 157 | voldoet |
| 158 | voldoet |
| 159 | voldoet |

| | |
|-----|--------------|
| 160 | voldoet |
| 161 | voldoet |
| 162 | voldoet |
| 163 | voldoet |
| 164 | voldoet |
| 165 | voldoet |
| 166 | voldoet |
| 167 | Voldoet niet |
| 168 | Voldoet niet |
| 169 | voldoet |
| 170 | Voldoet niet |
| 171 | voldoet |
| 172 | voldoet |
| 173 | voldoet |
| 174 | voldoet |
| 175 | voldoet |
| 176 | voldoet |
| 177 | voldoet |
| 178 | voldoet |
| 179 | voldoet |
| 180 | voldoet |
| 181 | voldoet |

| | |
|-----|---------|
| 182 | voldoet |
| 183 | voldoet |
| 184 | voldoet |
| 185 | voldoet |
| 186 | voldoet |
| 187 | voldoet |
| 188 | voldoet |
| 189 | voldoet |
| 190 | voldoet |
| 191 | voldoet |
| 192 | voldoet |
| 193 | voldoet |
| 194 | voldoet |
| 195 | voldoet |
| 196 | voldoet |
| 197 | voldoet |
| 198 | voldoet |
| 199 | voldoet |
| 200 | voldoet |
| 201 | voldoet |
| 202 | voldoet |
| 203 | voldoet |

De beoordeling is gedaan voor een ander zichtjaar dan wat in de Strategische Nota van Uitgangspunten staat voorgeschreven, namelijk een ontwerplevensduur voor een “groene kering” van 50 jaar. Hiervoor geldt het zichtjaar 2073. In deze beoordeling van GABI is volgens de Notitie Omgang GABI bij Sterke Lekdijk het zichtjaar 2035 toegepast (andere beoordelingsronde).

Hoogtetekorten bij een HBN 0,1 l/s/m bij T=10.000 zijn:

- DP167 → 0,04 meter tekort
- DP168 → 0,02 meter tekort
- DP170 → 0,04 meter tekort

Beoordeling – Stap 4 & 5 & 6

De dijkpaal locaties 167, 168 en 170 kunnen verder beoordeeld worden met een Toets op Maat, waarbij gebruik wordt gemaakt van stap 4, stap 5 en stap 6 vanuit de Notitie GABI Sterke Lekdijk [7]. De stappen worden op dit moment binnen HDSR verder uitgewerkt. Door een DOT (Deskundig Oordeel Toets op maat) formulier in te vullen kunnen er kansen per gebeurtenis ingevuld worden door verschillende specialisten. Hierin komt het gesprek op gang tussen het Assetteam van HDSR, ontwerpers en andere specialisten waaruit blijkt waar de grote onzekerheden in de gebeurtenissenboom voor GABI voor deze drie locaties zit.

Wanneer die onzekerheden inzichtelijk zijn, kunnen concrete afspraken of ontwerpmaatregelen genomen worden. Immers gaat het om drie dijkpaal locaties waarbij een maximaal tekort van 4 centimeter is.

Voor de zomer van 2022 is vanuit het Innovatiespoor van HDSR aangegeven dat er voor ICU geen scope is voor het mechanisme GABI. In de fase van het VKA wordt de werkwijze en de resultaten die voor ICU zijn uitgevoerd door het TM gereviewed. Eventuele opmerkingen of onduidelijkheden worden in samenspraak met HDSR uiteindelijk verwerkt in het VKA.

Conclusie

Uit de beoordeling van GABI (stap 1 – stap 3) volgens de Notitie [7] is gebleken dat 3 locaties niet voldoen: DP167, DP168 en DP170. Het hoogte tekort is zeer gering, namelijk 2 tot 4 centimeter. Na uitvoering van de vervolgstap (stap 4) door Innovatiespoor HDSR is gebleken dat er vanuit ICU geen opgave voor GABI is. Binnen ICU wordt de review van deze stap 4 nog uitgevoerd tijdens VKA. De hiervoor geldende uitgangspunten voor GABI worden na afstemming met HDSR en TM tijdens het VKA opgenomen in de TUN.

Aanbevelingen en bekritisering

Voor het goedkeuren van GABI in Stap 1 dient rekening te worden gehouden met de relatief steile taluds in de huidige situatie. De standaardwaarden voor de deklaagdikte (D), effectieve cohesie (c') en wrijvingsgetal (ϕ') zijn streng. Daarnaast is de volumieke massa van natte grond dusdanig hoog dat de cohesie niet voor meer dan 50% bijdraagt aan de schuifsterkte. Daardoor mag de correctiefactor voor de teen niet worden toegepast (factor overall 1,0). Indien er aangetoond wordt dat het volumieke massa aanzienlijk lager ligt dan zou de correctiefactor mogelijk effect hebben.

Daarnaast is het mogelijk om met de huidige parameters GABI te laten voldoen door een taludverflauwing toe te passen. Daarvoor moet grofweg het talud 1 : 3,2 komen te liggen.

In stap 3 is GABI getoetst aan een HBN-eis met een toelaatbaar overslagdebiet van 0,1 l/s/m voor het zichtjaar 2035 met een herhalingsstijd van $T=10.000$. Volgens bijlage III uit de Ministeriële regeling [16] dient GABI (groep 4) beoordeeld te worden met de norm van het dijktraject, in dit geval 1/10.000 per jaar.

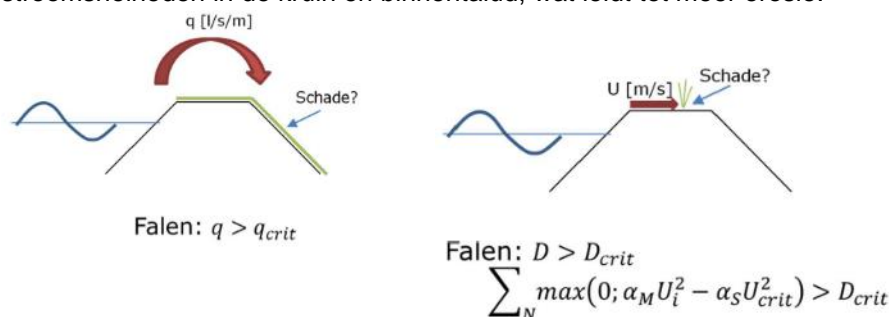
“groep 4 Toetssporen waarvoor geen probabilistische berekening of semiprobabilistische berekening met veiligheidsfactoren die voor WBI 2017 zijn afgeleid, beschikbaar zijn. Voor deze toetssporen wordt, uitgezonderd het toetsspoor macrostabiliteit buitenwaarts, niet gerekend met de faalkanseis per doorsnede of constructie. Faalkansbegroting en lengte-effect worden niet in rekening gebracht. Voor het afleiden van de hydraulische belastingen wordt de norm van het dijktraject gebruikt.”

In de Pré-Veiligheidsanalyse en de fase van Nota van Uitgangspunten (NvU) zijn de relevante dijkpalen voor het mechanisme GABI bepaald door de huidige kruinhoogtes te toetsen aan een HBN van 0,1 l/s/m met $T=41.667$. Deze Terugkeertijd is gekoppeld aan het mechanisme GEKB. De overstap van $T=41.667$ naar $T=10.000$ is op dit moment zonder onderbouwing gemaakt, maar wel correct volgens Bijlage III [16].

6.3.4 Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB)

Wijze van beoordelen

Het mechanisme GEKB is sterk gecorreleerd aan de hoogte van de kering. Deze hoogte is bepaald aan de hand van een vastgesteld Hydraulisch Belasting Niveau (HBN), waarbij HDSR een maximaal overslagdebiet van $q = 5,0$ l/s/m toelaat. De relatie tussen GEKB en het HBN is weergegeven in figuur 6-9. Hierin is te zien dat een grotere overslagdebiet en (daarmee lagere kruinhoogte) resulteert in grotere stroomsnelheden in de kruin en binnentalud, wat leidt tot meer erosie.



Figuur 6-9: Relatie HBN en GEKB

Beoordeling

Uit de beoordeling van de hoogte (zie paragraaf 2.2.1) blijkt dat er sprake is van een flinke overhoogte, wat tot lagere stroomsnelheden U in m/s leidt, waardoor GEKB minder snel faalt of de HBN-eis versoepeld kan worden.

Een versoepeling heeft geen nut, omdat de bestaande kering eenmaal op deze hoogte ligt. Dat betekent dat de kans op falen van GEKB verlaagd wordt. Zelfs in grote mate, omdat het hele deeltraject ICU zelfs voldoet aan de HBN-eis van 1 l/s/m (zie figuur 2-3). In het achtergronddocument OI2014v4 worden veilige waarden voorgeschreven “waarbij schade aan de bekleding onwaarschijnlijk is en falen praktisch is uitgesloten.” De aanvullende eisen voor een optredend overslagdebiet van 1 l/s/m zijn:

- Gesloten zode of open zode op kleilaagdikte van minimaal 0,4m
- Controle op afschuiven van de bekleding verplicht

Binnen het deeltraject ICU wordt “open zode” gehanteerd volgens de TUN [6]. Tot slot wordt in het spoor Grasbekleding Afschuiven Binnentalud (GABI, zie paragraaf 6.3.3) de tweede aanvullende eis meegenomen in de beoordeling. Oftewel het resultaat van het mechanisme GABI wordt overgenomen voor GEKB. Hiermee dienen alle locaties ter plaatse van de kruin en het binnentalud een minimale kleilaagdikte van 0,4m te hebben. In verband met uitgravingen door dieren wordt geadviseerd om daar 0,4m klei bovenop te doen, waardoor de totale minimale kleilaagdikte 0,8 meter bedraagt.

Conclusie

GEKB voldoet indien wordt voldaan aan een aanwezige kleilaagdikte van 0,8 meter in de kruin en binnentalud. Dit kan zowel in de huidige situatie als na verbetering van de kering. Het geotechnische lengteprofiel en bestekstekeningen uit de jaren '80 tonen aan deze kleilaag aanwezig is en dus wordt er voldaan aan de voorgenoemde eis. Een tweede vereiste is een positieve oordeel op GABI. Dit laatste is in paragraaf 6.3.3 uitgewerkt. Hieruit komt naar voren dat het gehele traject voldoet aan GABI nadat de drie specifieke locaties definitief zijn goedgekeurd in afstemming met HDSR.

Verwacht wordt dat aan beide eisen wordt voldaan voor het hele traject waardoor de beoordeling op GEKB ook zal voldoen.

GABI:

Uit de beoordeling van GABI volgens de Notitie [7] is gebleken dan 3 locaties niet voldoen. DP167, DP168 en DP170. Het hoogte tekort is hier zeer gering, namelijk 2 tot 4 centimeter. Uit de laatste stap van Notitie omgang GABI bij Sterke Lekdijk (concept werkwijze) is gebleken dat met een faalkansanalyse er geen opgave voor GABI is. Daarmee is ook voor het mechanisme GEKB de laatste losse eindje afgerond.

6.3.5 Reflectie en aanbevelingen

Het mechanisme GEKB kan volledig probabilistisch beoordeeld worden in Riskeer. In de Veiligheidsanalyse NvU (zonder optimalisaties) werd deze arbeidsintensieve stap als overbodig beschouwd, aangezien de kans groot was om alle locaties goed te keuren binnen het spoor GABI met de notitie Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk. Deze verwachting lijkt te zijn uitgekomen. Zie bovenstaande conclusie.

6.4 Steen

Slechts op één locatie binnen het traject van ICU bevindt zich een steenbekleding; namelijk bij de voorhavendijk. De bekleding is hier opgebouwd uit twee bekledingsvakken. Over de gehele voorhavendijk bevindt zich op en rond de waterlijn een bestorting van losse breuksteen. In de luwte van de wachtsteiger ligt direct boven de waterlijn een vak met gezette betonzuilen over een hoogte van ca. 1 m.

6.4.1 Stortsteen

De stortsteen ligt er ter bescherming van de dijk tegen een belasting uit scheepsgolven. De maximale belasting treedt dan ook op onder dagelijkse omstandigheden of licht verhoogde waterstanden. Bij maatgevende waterstanden is de scheepvaart gestremd en veroorzaakt deze geen maatgevende belasting op de waterkering.

Omdat de breuksteen is ontworpen op scheepsgolven, die windgolven vormen, die we als belasting beschouwen in het kader van de waterveiligheid geen maatgevende belasting. Op dit onderdeel is dan ook geen beoordeling uitgevoerd omdat deze niet van toepassing is.

6.4.2 Betonzuilen

Voor de betonzuilen volgen we dezelfde redeneerlijn als hiervoor beschreven voor de stortsteen. Bovendien liggen de betonzuilen in de luwte van de wachtsteiger waardoor een eventuele golfbelasting verder is gereduceerd wanneer deze golfbelasting bij de betonzuilen aan komt. Op dit onderdeel is geen beoordeling uitgevoerd, omdat deze niet van toepassing is.

6.4.3 Berekeningsresultaten Steenbekleding

Omdat de steenbekleding en stortsteen niet worden belast tijdens maatgevende omstandigheden voor de waterkering zijn voor dit onderdeel geen berekeningen gemaakt.

7 Voorland (VL)

Elk van de deelfaalmechanismen onder het hoofdspoor voorland zijn indirecte mechanismen. Dit betekent dat bij het optreden van het faalmechanisme, de waterkering niet direct bezwijkt maar wel wordt verzwakt. Indien die verzwakking groot genoeg is, neemt de kans op het optreden van een direct mechanisme zodanig toe dat de veiligheid in gevaar komt. Bij het spoor voorland gaat het om de volgende twee directe mechanismen:

1. Macrostabieliteit Buitenwaarts; de omvang van het voorland kan zover afnemen dat het uittredepunt van de glijcirkel voor STBU negatief wordt beïnvloed.
2. Piping; In de beoordeling van piping is, waar aanwezig, een kwelweglengte in het voorland aangehouden gelijk aan eenmaal de dijkbasis. Wanneer het voorland korter wordt dan die afstand, verschuift ook het intredepunt voor piping landwaarts richting de buitenteen. De afnemende kwelweglengte kan leiden tot piping.

Bij elk van de beoordelingen binnen voorland is de invloedszone van groot belang. Deze geeft namelijk de afstand vanaf de buitenteen rivierwaarts waar een reductie van het voorland negatieve invloed heeft op de directe mechanismen. Op basis van de beoordelingen van STBU en STPH is gebleken dat STPH voor deze veiligheidsanalyse overal maatgevend is. Onderstaande tabel geeft per dijkpaal aan waar het voorland beoordeeld is en hoeveel meter de invloedszone buiten de buitenteen doorloopt. Tevens is aangegeven waarom bij de betreffende dijkpaal het voorland beoordeeld is.

Tabel 7-1 Getoetste voorlandlocatie en waarom deze locatie

| Dijkpaal | Waarom deze dijkpaal |
|----------|---|
| 114 | Lang voorland maar met waterpartijen |
| 124 | Kortste voorland van omliggende profielen |
| 133 | Schaardijk langs geul met nog wel een zomerkade |
| 143 | Gevoeligheid voor profiel 146 |
| 146 | Schaardijk |
| 148 | Gevoeligheid voor profiel 148 |
| 161 | Langste voorland ter indicatie van gevolgen, met relatief lang strijklengte op zuidwesten |
| 177 | Lange strijklengte op het zuiden met gemiddelde voorlandlengte |
| 194 | Schaardijk |
| 203 | Voorland met waterpartijen |

Tabel 7-2 Getoetste voorlandlocatie met invloedzone en waarom deze locatie

| Dijkpaal | WBN [NAP+...m] | H _{m0} [m] bij norm ¹ | Maximale afslag klei [m] ² | Invloedzone vanaf de buitenteen [m] |
|----------|----------------|---|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 114 | 8,60 | 0,36 | 5 | 60 |
| 124 | 8,44 | 0,61 | 5 | 80 |
| 133 | 8,36 | 0,41 | 5 | 70 |
| 143 | 8,18 | 0,19 | 5 | 50 |
| 146 | 8,14 | 0,40 | 5 | 40 |
| 148 | 8,07 | 0,33 | 5 | 80 |
| 161 | 8,00 | 0,41 | 5 | 65 |
| 177 | 7,94 | 0,50 | 5 | 85 |
| 194 | 7,76 | 0,47 | 5 | 25 |
| 203 | 7,55 | 0,4 | 5 | 70 |

¹ De golfhoogten zijn afgeleid voor asfaltbekleding bij de $P_{eis;dsn} = 1/33.333$ per jaar. Geëxtrapoleerd naar WBN

² Afgelezen op basis van golfhoogte bij norm in figuur 22-3 in bijlage iii bij de Wettelijke Regeling [16]

Vanwege de kleine golfhoogten bij norm is de exacte waarde van de maximale afslag niet af te lezen uit de genoemde grafiek. Daarom is gekozen een maximale afslag aan te houden van 5 m wat op basis van de grafiek aan de conservatieve kant is. Het niet meenemen van afslag is ons inziens te optimistisch waardoor besloten is enige veiligheid aan te houden en 5 m extra aan te houden.

7.1 Golfafslag (VLGA)

Voor de eenvoudige toets voor golfafslag voor het voorland dienen twee stappen gezet te worden. Als eerste dient te zijn vastgesteld of golfafslag schadelijk is voor de directe mechanismen (stap E1). Als tweede dient beoordeeld te zijn of optredende golfafslag ook mogelijk is (stap E2). Indien één van beide antwoorden "nee" is dan is de faalkans verwaarloosbaar. Indien het antwoord op vraag E2 "ja" is dan dient verder beoordeeld te worden. Tabel 7-3 geeft het overzicht van de oordelen per dijkpaal. De beoordeling is gedaan op basis van de dwarsprofielen met behulp van een Excel weergave in een grafiek. Zie hiervoor Bijlage F. Golfafslag wordt gezien als niet schadelijk vanwege de grote afstand tussen de werkelijke rand van het voorland ten opzichte van de rand van het signaleringsprofiel.

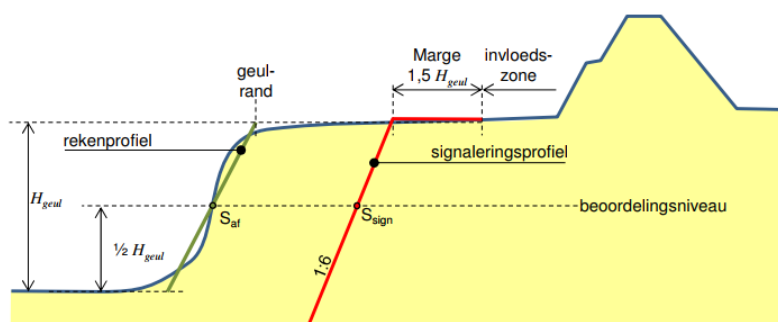
Tabel 7-3 Oordelen op VLGA

| Dijkpaal | E1 Golfafslag = schadelijk? | E2 Golfafslag is mogelijk? | Oordeel |
|----------|-----------------------------|----------------------------|---------|
| 114 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 124 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 133 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 143 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 146 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 148 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 161 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 177 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 194 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 203 | nee | n.v.t. | voldoet |

7.2 Afschuiving (VLAF)

Voor de eenvoudige toets voor afschuiving voorland dienen twee stappen gezet te worden. Als eerste dient te zijn vastgesteld of een afschuiving schadelijk is voor de directe mechanismen (stap E1). Als tweede dient beoordeeld te zijn of een optredende afschuiving ook mogelijk is (stap E2). Indien één van beide antwoorden “nee” is dan is de faalkans verwaarloosbaar. Indien het antwoord op vraag E2 “ja” is dan dient verder beoordeeld te worden. Tabel 7-4 geeft het overzicht van de oordelen per dijkpaal. De beoordeling is gedaan op basis van de dwarsprofielen met behulp van een Excel weergave in een grafiek. Zie hiervoor Bijlage F.

De eenvoudige toets stelt feitelijk vast of het rekenprofiel zich rivierwaarts bevindt van het signaleringsprofiel. Zie onderstaande afbeelding. Ook hier wordt een mogelijk afschuiving niet als schadelijk beschouwd. Immers geldt ook hier dat de afstand tussen het signaleringsprofiel en het rekenprofiel zodanig groot is dat een afschuiving geen invloed heeft op het signaleringsprofiel.



Figuur 23-2 Situatie zonder bestorting met signaleringsprofiel en rekenprofiel voor afschuiven voorland.

Tabel 7-4 Oordelen op VLAF

| Dijkpaal | E1 Afschuiving = schadelijk? | E2 Afschuiving is mogelijk? | Oordeel |
|----------|------------------------------|-----------------------------|---------|
| 114 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 124 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 133 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 143 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 146 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 148 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 161 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 177 | nee | n.v.t. | voldoet |
| 194 | ja | nee | voldoet |
| 203 | nee | n.v.t. | voldoet |

Voor stap E2 geldt dat indien aan geen van de onderstaande voorwaarden wordt voldaan, de faalkans ten gevolge van een afschuiving van het voorland verwaarloosbaar klein is. De voorwaarden zijn:

- De gemiddelde helling is steiler dan of gelijk aan 1V:2H, over een hoogte van minimaal 5 m, tenzij er sprake is van een kleilaag zonder zand.
- De gemiddelde helling is steiler dan of gelijk aan 1V:1H, over een hoogte van minimaal 5 m, mits ter plaatse van de kleilaag zonder zand.
- De totale helling (geulrand-geulbodem) is gemiddeld steiler dan of gelijk aan 1V:4,5H.

Voor het profiel bij dijkpaal 194 is voor stap E2 bepaald dat de helling van het rekenprofiel gelijk is aan 1:9,7. Daarmee voldoet het profiel aan geen van de voorwaarden voor het kunnen optreden van een afschuiving.

7.3 Zettingsvloeiing (VLZV)

Ook voor het deelfaalmecanisme zettingsvloeiing dienen enkele vragen beantwoord te worden. Als eerste wederom de vraag of een vloeiing schadelijk is voor de directe mechanismen. Vervolgens twee deelvragen met betrekking tot de mogelijkheid van optreden. Vanwege de lokale omstandigheden is voor project ICU besloten eerst te beoordelen of een vloeiing mogelijk is.

Om een zettingsvloeiing op te kunnen laten treden moeten losgepakte zandlagen aanwezig zijn met een relatief uniforme korrelverdeling van ronde korrels. Uit gegevens van de bodemopbouw, die volgen uit het recent opgeleverd geotechnisch lengteprofiel, is vast te stellen dat de toplagen die aansluiten op de geul van de Lek hier met name cohesief zijn. Daarmee is de kans op het optreden van een zettingsvloeiing verwaarloosbaar klein geworden.

Om bovenstaande meer inhoud te geven staat in onderstaande tabel alsnog de beoordeling op het eerste criterium voor het kunnen optreden van een vloeiing. Namelijk of de helling van het onderwatertalud

steiler dan of gelijk is aan 1:4 over een hoogte van minimaal 5m. Dit is stap E2 in het beoordelings-schema voor VLZV, zie figuur 24-1 van Bijlage III bij de Wettelijke Regeling [16].

Tabel 7-5 Resultaten stap E2 op VLZV

| Dijkpaal | Taludhelling onderwatertalud | Geulhoogte onderwatertalud | Oordeel |
|----------|------------------------------|----------------------------|---------|
| 114 | 1:18 | 6,3 | voldoet |
| 124 | 1:6,5 | 9,1 | voldoet |
| 133 | 1:8,5 | 6,6 | voldoet |
| 143 | 1:12 | 5,8 | voldoet |
| 146 | 1:13 | 6,3 | voldoet |
| 148 | 1:7 | 7,3 | voldoet |
| 161 | 1:7,5 | 6,8 | voldoet |
| 177 | 1:11 | 7,1 | voldoet |
| 194 | 1:10 | 6,5 | voldoet |
| 203 | 1:20 | 7,65 | voldoet |

7.4 Resultaten beoordeling voorland

Op basis van de drie deelfaalmecanismen volgt geen scope voor het versterken met betrekking tot het voorland.

8 Niet waterkerende objecten (NWO's)

In de huidige Veiligheidsanalyse van het NKO zijn geen NWO's beoordeeld. De objecten kunnen soms een grote faalkansbijdrage hebben op bepaalde mechanismen. Aangezien dit lokaal is zal dit geen effect hebben op de beoordeling van het dijkvak of Geovak, maar daaruit ontstaat wel een maatwerklocatie waar vervolgens in een later stadium in het VKA opnieuw gekeken zal worden naar voornamelijk de hoofdmechanismen (piping, kruinhoogte en grasbekleding erosie kruin en binnentalud, macrostabiliteit binnenwaarts) en andere faalmechanismen (Grasbekleding erosie buitentalud en overige). Relevant zijn alle invloedzones van de mechanismen die af te leiden zijn uit deze Veiligheidsanalyse, omdat het falen door de NWO's hierin ingepast moeten worden.

In een eerste inventarisatie zijn de objecten in kaart gebracht en inzichtelijk gemaakt met GISdata. Voorlopig zijn de volgende maatwerklocaties gemarkeerd die nader beschouwd moeten worden (kwalitatief en/of kwantitatief). Deze lijst zal uitbreiden wanneer de review van de inventarisatie heeft plaatsgevonden en de inventarisatie als compleet is beschouwd. Dit gebeurt in een vroeg stadium van de VKA fase.

Groeiende lijst met maatwerklocaties:

1. Bebouwing (NWObe)
 - a. Huis achterland en binnenberm, DP107+20
 - b. Huis achterland, DP109+00
 - c. Huis achterland, DP112+00
 - d. Huis achterland, DP133+00
 - e. Huis op het binnentalud/ binnenkruin bij DP149+40
 - f. Huis achterland, DP153+00

Er zijn meerdere locaties, waarbij bebouwing binnen het waterstaatwerk vallen. Deze lijst kan worden geclusterd. Vervolgens kan er een maatgevende casus in het VKA beoordeeld worden.

2. Begroeiing (NWObo)
 - a. Voor begroeiing zijn nog geen conclusies getrokken op basis van de eerste ronde van de inventarisatie.

9 Conclusie

9.1 Algemeen

Eindoordeel

Om te voldoen aan de waterveiligheid moeten alle faalmechanismen voldoen. Indien één van de mechanismen “voldoet niet” heeft gekregen dan is het eindoordeel van de waterveiligheid automatisch “voldoet niet”.

Enkele mechanismen zijn niet beoordeeld of beschouwd, omdat ze niet relevant of niet van toepassing zijn voor de waterveiligheid bij het project ICU. Het gaat om de mechanismen microstabiliteit, steen-/asfaltbekleding. Verder zijn Niet-Waterkerende Objecten geen onderdeel geweest van de fase van hetNKO. Overigens is in Bijlage I zijn de beoordelingen gedurende de hele verkenningsfase weergegeven in een soort van tijdlijn.

De mechanismen piping (STPH), macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts (STBU en STBI), grasbekleding erosie buitentalud (GEBU), en grasbekleding afschuiving binnentalud (GABI) zijn beoordeeld met de gedetailleerde toets en/of geoptimaliseerd met aangescherpte uitgangspunten. Deze optimalisaties en uitgangspunten zijn opgenomen in de TUN versie 5.0. Erosie kruin en buitentalud (GEKB) is alleen met de Eenvoudige Toets beoordeeld en is ook onderdeel van deze Veiligheidsanalyse. De bijbehorende uitgangspunten staan in de TUN versie 5.0.

Het oordeel per faalmechanisme is opgenomen in de volgende figuren: Figuur 8-1, Figuur 8-2, Figuur 8-3, Figuur 8-4 en Figuur 8-5. Een tabel met het oordeel per faalmechanisme en het eindoordeel per dijkpaal is opgenomen in Bijlage A. Een kaart van de waterveiligheidsopgave is weergegeven in Figuur 8-6.



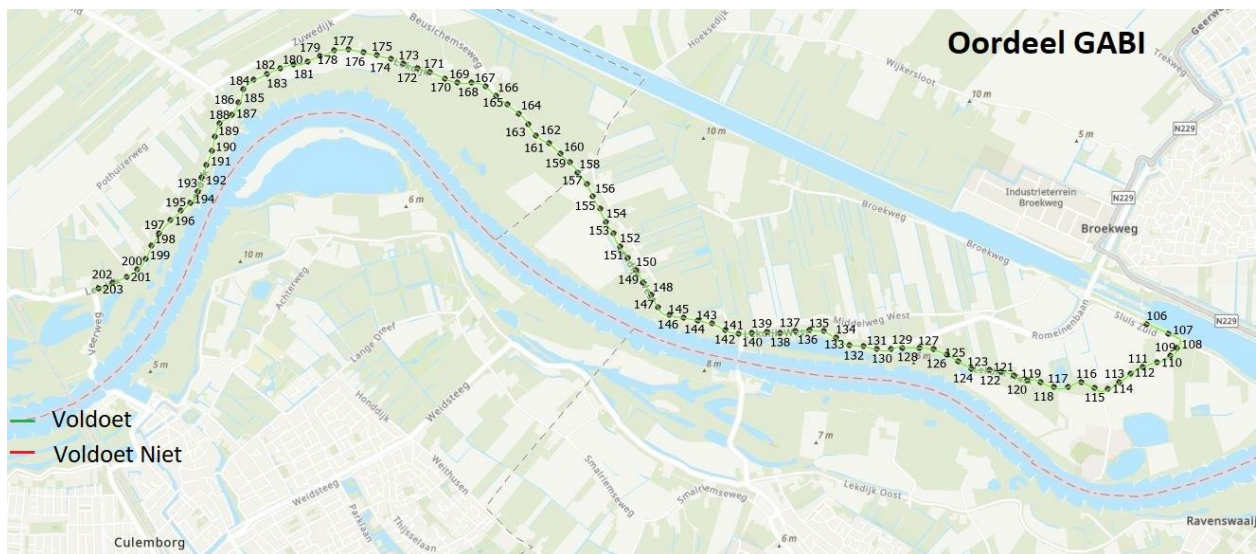
Figuur 9-1: Oordeel Stabiliteit Binnenwaarts (STBI) fase NKO.



Figuur 9-3: Oordeel Stabiliteit Buitenwaarts (STBU) fase NKO.



Figuur 9-2: Oordeel Piping (STPH) fase NKO.

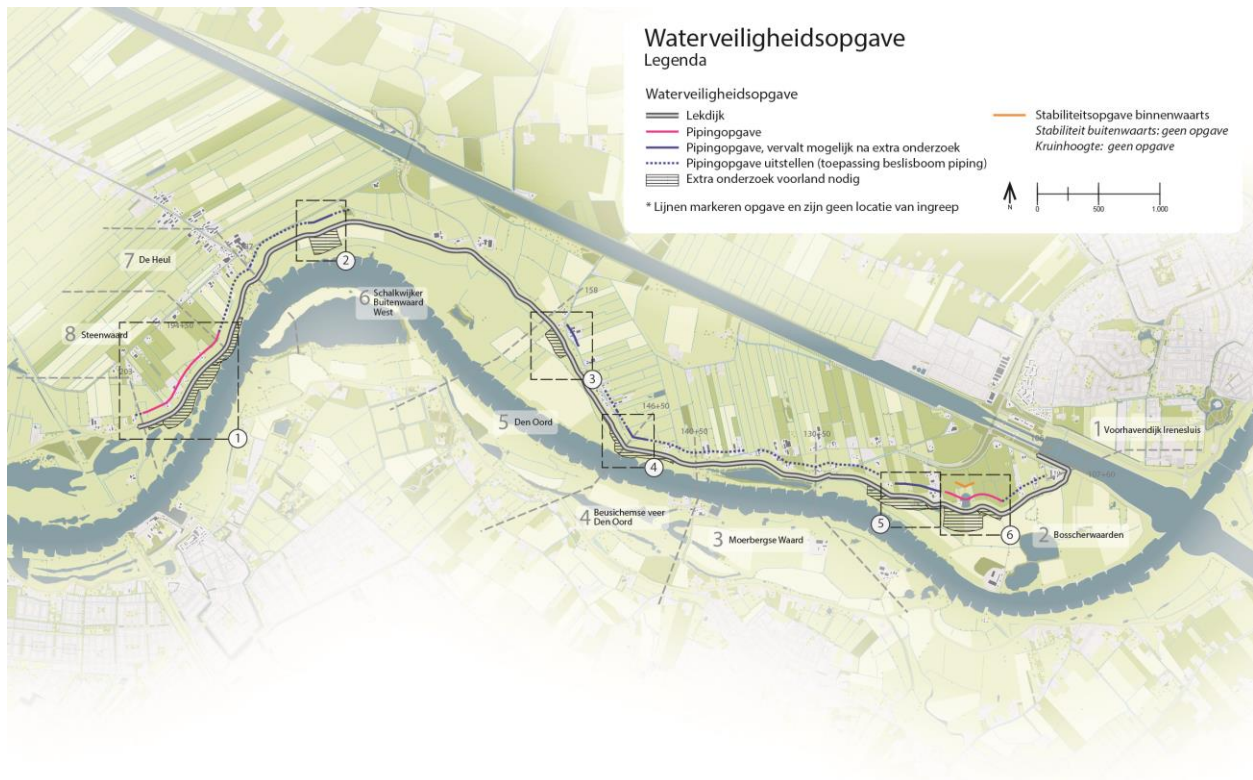


Figuur 9-4: Oordeel Grasafschuiving Binnentalud (GABI) fase NKO.



Figuur 9-5: Graserosie buitentalud (GEBU) fase NKO.

Een overzicht met het oordeel per faalmechanisme en het eindoordeel is opgenomen in Bijlage A. Het hele traject voldoet aan de faalmechanismen STBU, GEBU, GABI, GEBU, GEKB en GABU. Alle dijkvakken voldoen aan STBI met uitzondering van dijkvak 2b ter plaatse van het wiel (DP117 & DP118). Dit dijkvak is aangemerkt als maatwerklocatie. Faalmechanisme piping (STPH) draagt met 33 dijkpalen (3.3km) met een negatief oordeel het meest bij aan de totale scope. Bij 24 locaties wordt extra onderzoek in het voorland uitgevoerd om de beschikbare voorlandlengte te bepalen. Bij 7 van deze locaties is de aan te tonen kwelweglengtetekort dusdanig klein dat deze mogelijk komen te vervallen (Figuur 8-6).. Bij dijkpalen 117 & 118 valt de negatieve beoordeling van STBI samen met STPH. In totaal hebben 33 dijkpalen (3.3km) een definitief negatief oordeel op ten minste een van de faalmechanismen.



Figuur 9-6: Kaart waterveiligheidsopgave fase NKO.

9.2 Hoogte

De kruinhoogte in het zichtjaar 2073 ligt overal hoger dan het niveau dat behoort bij een overslagdebiet van 5 l/s/m. Dit betekent dat het optredende overslagdebiet overal kleiner is dan 5 l/s/m. Geconcludeerd is dat er voor ICU geen hoogteopgave is.

9.3 Macrostabiliteit binnenwaarts

Voor macrostabiliteit binnenwaarts geldt dat dijkvakken 1,2a en 2c t/m 8b voldoen aan de stabiliteitseis. Dijkvakken 1, 2a, 2c t/m 5a, 6a en 6b voldoen aan de hand van de uitgangspunten die gehanteerd zijn in de NvU. Bij dijkvakken 5b, 6c en 8a ontstaan hoge glijvlakken waarvan de uittredepunt boven de insteek van de binnenberm ligt en deze voldoen niet met de uitgangspunten van het NvU. Dijkvakken 5b en 6c worden gekenmerkt met een relatief dunne deklaag. Dijkvak 8a heeft een steil binnentalud en een hoog potentiaal in het watervoerend pakket. Deze dijkvakken voldoen samen met dijkvak 6d en 7 wel na het doorvoeren van de optimalisatieberekeningen die gedaan zijn ten behoeve van de NKO. Ook dijkvak 8b voldoet na de optimalisatieberekeningen t.b.v. het NKO. Na de optimalisatieberekeningen voldoet alleen dijkvak 2b niet. Deze locatie wordt gekenmerkt door het wiel langs de binnenteen van de kering en is aangemerkt als maatwerklocatie. Merk op dat de sommen van dijkvakken 1,2a en 7 alsnog geoptimaliseerd zijn voor consistentie met STBU.

Omdat de berekende stabiliteitsfactor van dijkvakken 6c,6d en 7 een paar procent boven de eis liggen, wordt er geadviseerd om de schematiseringsfactor te verifiëren om de veiligheidsanalyse te bekrachtigen.

9.4 Piping

Op basis van de pipinganalyse voldoen 57 van de 98 dijkpalen niet op het faalmechanisme piping, ondanks de relatief dikke deklaag langs een groot deel van het deeltraject. Dit heeft te maken met de hoge responsfactoren die zijn afgeleid middels de peilbuisanalyse. Bij de voorhavendijk van de Prinses Irenesluis (DP106 t/m 111) is geen piping opgave. Tussen de Bosscherwaarden en Den Oord (DP 112 t/m 148) wordt, zelfs met de aanwezigheid van een dikke deklaag (> 6,0 m), niet voldaan aan piping vanwege de hoge respons in de watervoerende zandlaag. Bij de Schalkwijker Buitenwaard (DP148 t/m DP 177) is, op twee dijkpalen (dijkpaal 156 en 157) na, geen piping opgave. Dit traject wordt gekenmerkt door een breed voorland en een lage respons in het watervoerend pakket. Ter hoogte van dijkpaal 156 en 157 is een tussenzandlaag aanwezig die niet voldoet aan het faalmechanisme piping. De opgave is hier echter gering met een kwelweglengte tekort van ca. 10 m. Tussen de Schalkwijker Buitenwaard en Culemborgse Veer (DP 178 t/m 203) wordt niet aan het faalmechanisme piping voldaan, ondanks dat langs een groot deel van de dijk een dikke deklaag aanwezig is (> 6,0 m). Ook dit traject wordt gekenmerkt door een hoge respons in het watervoerend pakket.

Ter optimalisatie is een nadere analyse op piping uitgevoerd aan de hand van de beslisboom piping. Hierdoor kan een groot deel van de piping opgave worden uitgesteld. De piping opgave, waarbij een versterking nodig is, zal dan gereduceerd worden tot 33dijkpalen. De piping opgave tussen de Bosscherwaarden en Den Oord (DP 110 t/m 148) bedraagt met gebruik van de beslisboom 18 dijkpalen; DP110 t/m DP114, DP126 t/m DP135, DP137 t/m DP142. De piping opgave blijft bij de Schalkwijker buitenwaard (DP148 t/m 177) ongewijzigd. Tussen Schalkwijk en Culemborgse Veer (DP 178 t/m 203) wordt de piping opgave gereduceerd tot 13 dijkpalen: 180 en 191 t/m 202.

De volgende punten worden aanbevolen ter optimalisatie in de fase van het VKA.

- Een groot deel van de piping-opgave is uitgesteld aan de hand van de beslisboom piping. Op de uitgestelde trajecten moeten beheersmaatregelen worden getroffen. De uitgestelde opgave moet in een volgende beoordelingsronde (2035) opnieuw worden beoordeeld. Een mogelijke afkeur zou de uitvoer van een versterking vereisen. Het gebruik van de beslisboom vereist daarom ook het ontwerp van een versterking om deze mogelijk in de toekomst alsnog uit te voeren.
- Voor de berekening van de kwelweglengte is de dubbele dijkbasislengte gebruikt. Een optimalisatie parallel aan de beslisboom piping is het meenemen van de aanwezige voorlandlengte. Hiervoor moet worden aangetoond dat de deklaagdikte van het aanwezige voorland ten minste 1m bedraagt. De deklaagdikte kan worden aangetoond aan de hand van geofysisch onderzoek.

9.5 Macrostabieliteit buitenwaarts

Voor macrostabieliteit buitenwaarts geldt dat alle dijkvakken voldoen. Voor de schaaldijk tussen dijkpaal 106 en 107+060 wordt ook voldaan na het uitvoeren van een faalkansanalyse voor de "val na hoogwater". Voor de twee ander belastingsituaties lijkt de Schaaldijk te voldoen, maar dit moet in overleg met HDSR nog bekrachtigd te worden; dit gaat om de gehanteerde hersteltijd na het eerste hoogwater (21 dagen) en de belastingsituatie 'extreem laagwater' wat onder 'bewezen sterkte' valt.

In het NKO zijn uitgangspunten opgesteld om de faalkansanalyse voor macrostabieliteit buitenwaarts uit te voeren. Voor de belastingsituatie "val na hoogwater" is met een faalkansanalyse aangetoond dat dijkvak 1 (dijkpaal 106 tot en met 107+060) niet tot dijkfalen of een overstrooming zal leiden. Voor de andere

belastingssituaties “Extreem laagwater” en “Extreme neerslag” is dit niet uitgevoerd, omdat dit niet aanneemelijk is dat het kan optreden:

- Extreem laagwater: het verval is (WBN – laagst gemeten waterstand ooit) = 7,1 meter
WBN = NAP + 8,77 meter, Laagste = NAP + 1,67 meter (20 en 21 januari 1985).
- Extreme neerslag: Hierbij wordt in feite de dagelijkse situatie beoordeeld. In afstemming met HDSR moet nagegaan worden of hier wel sprake is van een belastingsituatie en wat deze stabiliteitsberekening duidelijk maakt.

Deze gevoeligheden zijn in aparte faalkansenbomen weergegeven in Bijlage E, E.2.

9.6 Microstabiliteit

Voor het gehele deeltraject ICU geldt dat op basis van stap E.2. van de eenvoudige toets de dijk voldoet op het faalmechanisme microstabiliteit, omdat de waterkering een (slecht doorlatende) kleikern heeft waarvan de hoogte gelijk is aan of hoger dan de waterstand bij norm en waarvan de basis aansluit op een slecht doorlatende ondergrond.

9.7 Bekledingen

GABU

Op basis van de eenvoudige toets is geconcludeerd dat langs het gehele deeltraject ICU wordt voldaan aan het faalmechanisme GABU.

GEBU

Voor het faalmechanisme GEBU voldoen dijkpalen 106 t/m 116 aan de gedetailleerde toets. Voor de overige dijkpalen is een reststerkte analyse uitgevoerd. De reststerkte is bepaald door de horizontale afstand tussen het erosieprofiel en een aangenomen reststerkeliijn te nemen. Erosieprofielen zijn bepaald per dijkpaal aan de hand van het model opgesteld door Deltares [21]74. Uit de analyse is naar voren gekomen dat als het falen van de grasmat tot erosie van de dijk kern leidt, er alsnog voldoende restbreedte aanwezig is.

GABI

Op basis van de eenvoudige toets voldoen 38 dijkpalen aan het faalmechanisme GABI (sectie 1 – sectie 7). Vervolgens zijn 60 van de 98 dijkpalen die niet voldeden op basis van de eenvoudige toets, getoetst aan de hand van stap 1 tot en met 3 uit de “Notitie omgang GABI bij Sterke Lekdijk”.

Stap 1 (Edelman Joustra) heeft niet tot scope vermindering geleid, tenzij het talud wordt verflauwd naar 1:3,2. In Stap 2 is gekeken of er scope ontstaat vanuit andere mechanismen, zodat dit later in een nadere optimalisatie integraal opgepakt kan worden.

Binnen ICU is er weinig scope, waardoor alvast Stap 3 is uitgevoerd. Dit heeft geleid tot volledige goedkeuring op GABI op drie locaties na, namelijk dijkpaal 167, dijkpaal 168 en dijkpaal 170. In deze stap is het zichtjaar 2035 gehanteerd volgens de Notitie Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk. Normaliter wordt voor een groene kering ontworpen voor een levensduur van 50 jaar, oftewel het zichtjaar 2073, wat bij andere mechanismen nog wel van toepassing is.

Voor de drie resterende dijkpalen geldt dat de afstand tot de norm minimaal is. In de zomer van 2022 is een laatste stap in concept uitgevoerd, waarbij met een faalkansanalyse inzicht is gekregen in de dominante (faal) gebeurtenissen voor GABI. Het voorlopige resultaat is dat vanuit het Innovatiespoor van HDSR geen scope voor GABI is. Tijdens het VKA ligt de werkwijze ter review bij het TM van ICU en er

volgt eventuele afstemming met HDSR ter verduidelijking. Het definitieve resultaat wordt onderdeel van het VKA.

Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud (GEKB)

Uit de beoordeling van GEKB blijkt dat 38 dijkpalen voldoen en 60 dijkpalen niet voldoen. Deze beoordeling is tot stand gekomen door twee aanvullende eisen uit het OI2014v4 in acht te nemen.

- 1) Minimale kleilaagdikte van 0,8 meter
- 2) Er moet worden voldaan aan het mechanisme GABI

Er wordt aangenomen dat DP106 tot en met DP203 een minimale kleilaag hebben van 0,4 meter op het binnentalud en op de kruin direct naast de wegverharding. Oftewel het resultaat van GEKB komt exact overeen met het resultaat uit de beoordeling van het mechanisme GABI op basis de Notitie GABI [7].

Steen

Voor de Steenbekleding is geen beoordeling uitgevoerd. Dit is toegelicht in paragraaf 6.4 waarom dit geen invloed heeft op de waterveiligheid van de kering.

9.8 Voorland

Op basis van de drie deelfaalmechanismen die gebruikt worden voor de analyse van het voorland volgt geen scope voor het versterken met betrekking hiervan .

9.9 Niet-waterkerende objecten (NWO's)

Het is zeer onwaarschijnlijk dat NWO's tot afkeur van volledig dijkvak of geovak. Wel kunnen één of meerdere maatwerklocaties ontstaan, waarbij lokaal sprake is van verzwarende omstandigheden van bepaalde faalmechanismen. Denk aan de hoofdmechanismen (piping, kruinhoogte en grasbekleding erosie kruin en binnentalud, macrostabiliteit binnenwaarts) en andere faalmechanismen (Grasbekleding erosie buitentalud en overige).

Relevant zijn alle invloedzones van de mechanismen die af te leiden zijn uit deze Veiligheidsanalyse van het NKO. De verdere aanpak hoe de NWO's verder beoordeeld dienen te worden in het VKA wordt in september afgestemd en vervolgens opgenomen in de TUN van het VKA.

9.10 Reflectie

Reststerkte is voor het mechanisme Gras bekleding buitenwaarts (GEBU) toegepast. Dit betekent dat er voor andere faalmechanismen geen reststerkte toegepast mag worden. Reststerkte is ook toegepast bij de faalkansanalyse van STBU in dijkvak 1. Echter voldoet dijkvak 1 aan GEBU alvorens het toepassen van reststerkte in de gedetailleerde toets. Dit betekent dat de reststerkte op elke dijkpaal maximaal voor een faalmechanisme is toegepast.

Voor drie STBI (6c, 6d en 7) en vijf STBU dijkvakken (6a+b, 6d, 7, 8a en 8b) is een veiligheidsfactor een paar procent boven de eis berekend. De eis is vastgesteld op basis van een schematiseringsfactor van een buurtraject. Dit is valide geacht gegeven de uniforme bodemopbouw binnen Sterke Lekdijk. Echter zou deze schematiseringsfactor enkele procenten gunstiger/ongunstiger kunnen uitpakken wanneer traject specifieke scenario's en bijbehorende kansen worden meegenomen of wegvallen. Geadviseerd wordt om de schematiseringsfactor te verifiëren in de fase van het VKA. In [Tabel 9-1](#) zijn alle aanbevelingen in deze veiligheidsanalyse op een rijtje gezet.

Tabel 9-1: Alle aanbevelingen veiligheidsanalyse n.a.v. het NKO.

| Faalmechanisme | Aanbeveling |
|-------------------|---|
| STBI, STBU | Het gebruik van de schematiseringsfactor van buurtraject vormt een risico, omdat de berekende veiligheidsfactoren van 3 STBI en 5 STBU dijkvakken op het randje voldoet. Er wordt aanbevolen om de schematiseringsfactor te valideren aan de hand van het rekenblokje. |
| STBI | Voor STBI zijn geen BGT (Bruikbaarheidstoestand) berekeningen uitgevoerd. Dit leidt niet tot een waterveiligheidsopgave, maar een beheerdersopgave. Deze type STBI berekeningen wordt wel opgenomen in het eindproduct VKA als meekoppelkans vanuit beheer. |
| STBU | Voor de schaaldijk (tussen dijkpaal 106 en 107+060) is ook géén versterkingsopgave van toepassing, omdat is aangetoond dat een initieel buitenwaarts glijvlak niet tot dijkfalen of een overstroming leidt <u>mits het profiel tijdig (dus voor een volgend hoogwater) hersteld is</u> . Hiermee valt dit stuk schaaldijk wel onder de Zorgplicht van beheer van HDSR, waarbij een detectie en hersteltijd van 21 dagen als realistisch is beschouwd vanuit Zorgplicht. Indien deze detectie en hersteltijd als realistisch is beschouwd vanuit Zorgplicht dan geldt automatisch dat een andere belastingsituatie van extreem laagwater niet in aanmerking komt voor het verdere uitwerking in een faalkansanalyse. |
| STPH | Een groot deel van de piping-opgave is uitgesteld aan de hand van de beslisboom piping. Op de uitgestelde trajecten moeten maatregelen worden getroffen in de vorm van monitoring en calamiteitsmaatregelen. De uitgestelde opgave moet in een volgende beoordelingsronde (2035) opnieuw worden beoordeeld. Een mogelijke afkeur zou de uitvoer van een versterking vereisen. Het gebruik van de beslisboom vereist daarom ook het ontwerp van een versterking om deze mogelijk in de toekomst alsnog uit te voeren. |
| STPH | Voor de berekening van de kwelweglengte is de dubbele dijkbasislengte gebruikt. Een optimalisatie parallel aan de beslisboom piping is het meenemen van de aanwezige voorlandlengte. |
| STPH | De karakteristieke doorlatendheid kan worden geoptimaliseerd door het meenemen van anisotropie en meerlaagsheid om reductie van het kwelweglengtetekort te realiseren. |
| GABI | Vanuit het innovatiespoor van Sterke Lekdijk is aangetoond dat de werkwijze werkt. Voor ICU betekent dat er geen scope voor GABI is. Gedurende het VKA wordt de analyse met uitgangspunten ter review gelegd totdat Fugro het overneemt en dit verwerkt in de Veiligheidsanalyse en TUN. |
| GEBU | Er wordt aanbevolen om boringen uit te voeren om de erosiebestendigheid van de kleikern te bepalen. Deze moeten een erosiebestendigheid hebben van categorie 1 of 2. |
| NWO's | De Niet-waterkerende objecten worden in het VKA uitgewerkt. Het is zeer onwaarschijnlijk dat dit tot afkeur op vakniveau leidt voor bepaalde mechanismen. Het is aannemelijk dat er maatwerklocaties ontstaan waarbij één of meerder mechanismen tot afkeur leiden vanwege lokale verzwarende omstandigheden dit niet binnen de doorsnede-eis van het desbetreffende mechanisme op te lossen zijn.. |

10 Literatuur

10.1 Project specifieke documenten

- [1] Strategische Nota van Uitgangspunten, SNvU_HDSR_April_2021_C1-2
- [2] Hydraulische Randvoorwaarden Sterkte Lekdijk, 20210528 DM53PRD-#1464826-v1-Aangepaste_oplevering_Hydraulische_randvoorwaarden_DR44-1
- [3] Aanscherping veiligheidsanalyse CUB versie 2, SLD-RHD-TM-CUB-RP-TM-0138_Aanscherping veiligheidsanalyse CUBv2.0 (incl. bijlagen), 1 maart 2021
- [4] Rapportage proevenverzameling Culemborgse Veer - Beatrixsluis, SLD-RHD-TM-CUB-NA-TM-109: Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, 22 november 2019
- [5] Beoordeling binnen- en buitenwaartse macrostabiliteit, Dijkversterking Wijk bij Duurstede - Amerongen, C03011.000750: Sweco-Arcadis, 27-3-2019
- [6] Technische Uitgangspunten Notitie, TUN_C4.0, 3 januari 2022
- [7] Notitie Omgang met GABI bij Sterke Lekdijk, DM 1847068, Definitief, 25-1-2022
- [8] Grondonderzoek Sterke Lekdijk Irenesluizen-Culemborgse Veer (ICU)/(ICU-A); Rapport betreffende stijghoogtemetingen en hystereses, 02P011039-05-adv-04 (V1.0), Inpijn-Blokpoel, 16 juni 2021

10.2 Waterveiligheid

- [9] Schematiseringshandleiding Hoogte, sh_hoogte_v_2_1
- [10] Fenomenologische beschrijving, 11200574-007-geo-0005-r-fenomenologische_beschrijving_hgn_adl
- [11] Schematiseringshandleiding Bekleding, sh-grasbekleding-28-mei-2021
- [12] Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, sh-macrostabieliteit-v4-28-mei-2021
- [13] KPR factsheet werkwijze macrostabiliteit i.c.m. golfoverslag, kprfactsheetwerkwijzemacrostabieliteitbijgolfoverslagoi2014v4_v2
- [14] Beoordelingsinstrumentarium 2017, WBI 2017
- [15] Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, OI2014v4, Definitief, Februari 2017
- [16] Bijlage iii bij de Wettelijke Regeling, Sterkte en veiligheid primaire waterkeringen 2017
- [17] Invloed hoek van golfaanval op graserosie op dijken, 11203720_017, Definitief 2.0, Deltares 2019
- [18] POV PipingPortaal, POV Piping (HWBP), 15-12-2020
- [19] Factsheet Beslisboom Piping; meer nuance in de piping opgave, POV Piping (HWBP), 2019
- [20] Aanbevelingen beslisboom piping voor planuitwerking SAS, DM:1866912, 31 maart 2022
- [21] Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven, SBW-reststerkte; analyse Deltagootproeven, Deltares, referentienummer 1204200.008, 18 mei 2012
- [22] Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken, Rijkswaterstaat, TR26 - DWW-2004-057, 1 september 2004
- [23] Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij dijken, Rijkswaterstaat, Oktober 2012

Bijlage A Eindoordeel

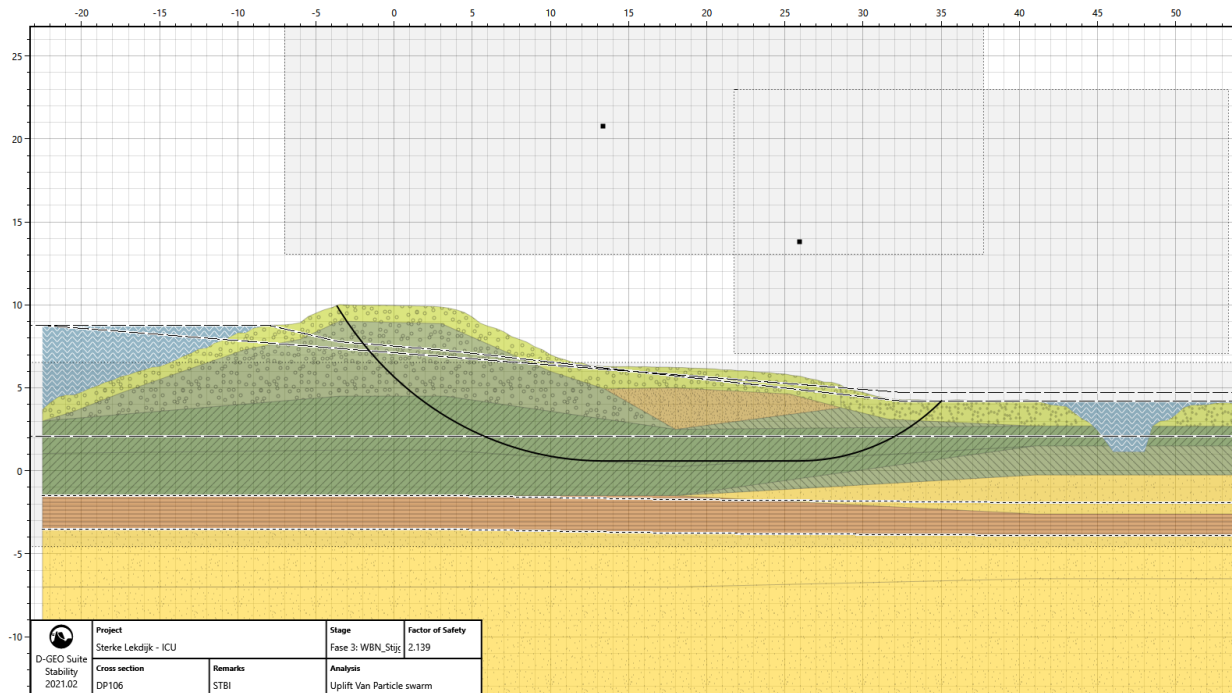
| Vak | Dijkpaal | STBI | STBU | GEBU | GABI | Piping |
|-----|----------|-----------------|---------|---------|---------|-------------|
| 1 | 106 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 1 | 107 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 108 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 109 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 110 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 111 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 112 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 113 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 114 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2a | 115 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2a | 116 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2b | 117 | Voldoet Niet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2b | 118 | Voldoet Niet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 119 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 120 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 121 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 122 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 123 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 124 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 125 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 2c | 126 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2c | 127 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2c | 128 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2c | 129 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 2c | 130 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 131 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 132 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 133 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 134 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 135 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 136 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 137 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 138 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 139 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 3 | 140 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 4 | 141 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |

| | | | | | | |
|----|-----|---------|---------|---------|--------------|-------------|
| 4 | 142 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 4 | 143 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 4 | 144 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 4 | 145 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 4 | 146 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 5a | 147 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 5a | 148 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 5a | 149 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 5a | 150 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5a | 151 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5a | 152 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5a | 153 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5a | 154 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5b | 155 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5b | 156 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 5b | 157 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 5b | 158 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5b | 159 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 5b | 160 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6a | 161 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6a | 162 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6a | 163 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6a | 164 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6a | 165 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6a | 166 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6b | 167 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet Niet | geen opgave |
| 6b | 168 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet Niet | geen opgave |
| 6b | 169 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6b | 170 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet Niet | geen opgave |
| 6b | 171 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6c | 172 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6c | 173 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6c | 174 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 175 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 176 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 177 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 178 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 179 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 180 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 6d | 181 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 182 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 183 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |

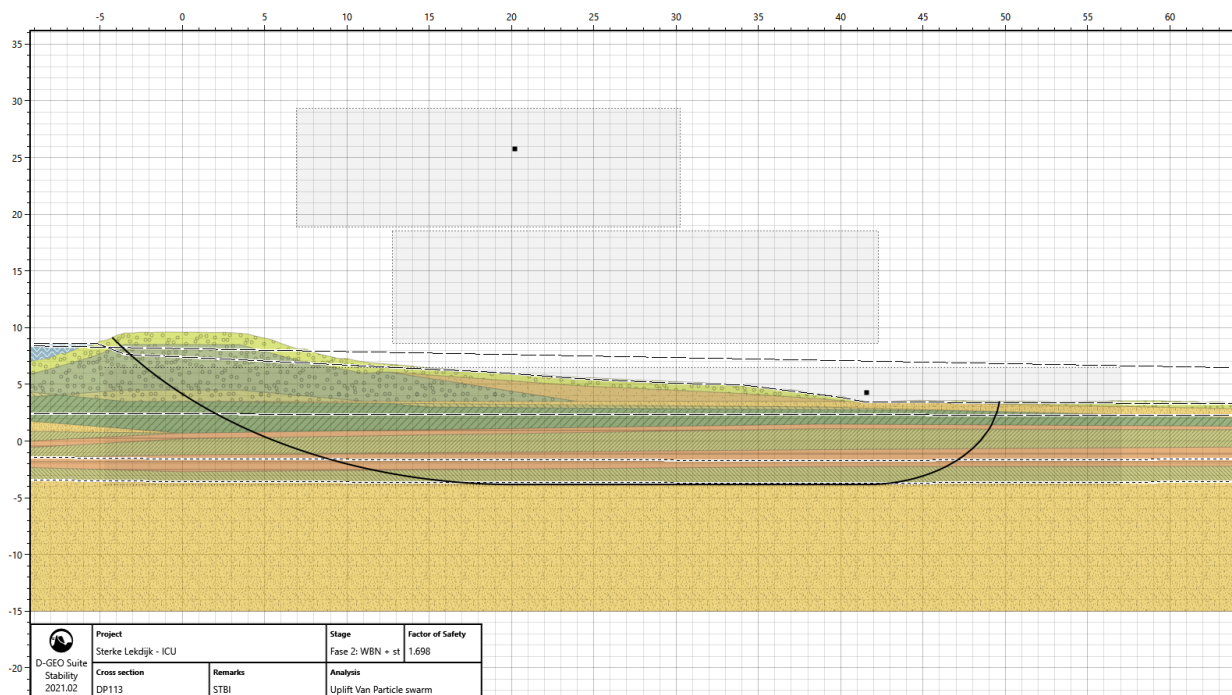
| | | | | | | |
|----|-----|---------|---------|---------|---------|-------------|
| 6d | 184 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 185 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 186 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 6d | 187 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 7 | 188 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 7 | 189 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 7 | 190 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |
| 7 | 191 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 7 | 192 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 7 | 193 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 7 | 194 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 195 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 196 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 197 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 198 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 199 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 200 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 201 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8a | 202 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | opgave |
| 8b | 203 | Voldoet | Voldoet | Voldoet | Voldoet | geen opgave |

Bijlage B Stabiliteitsberekeningen STBI

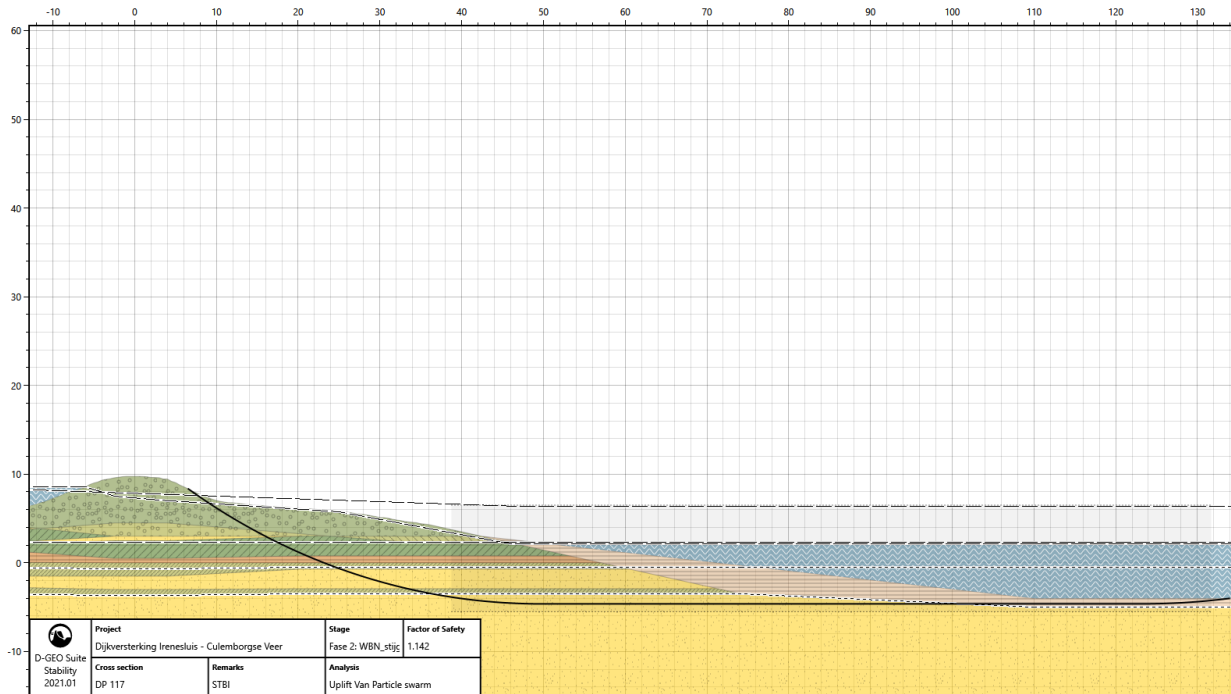
B.1 Dijkpaal 106



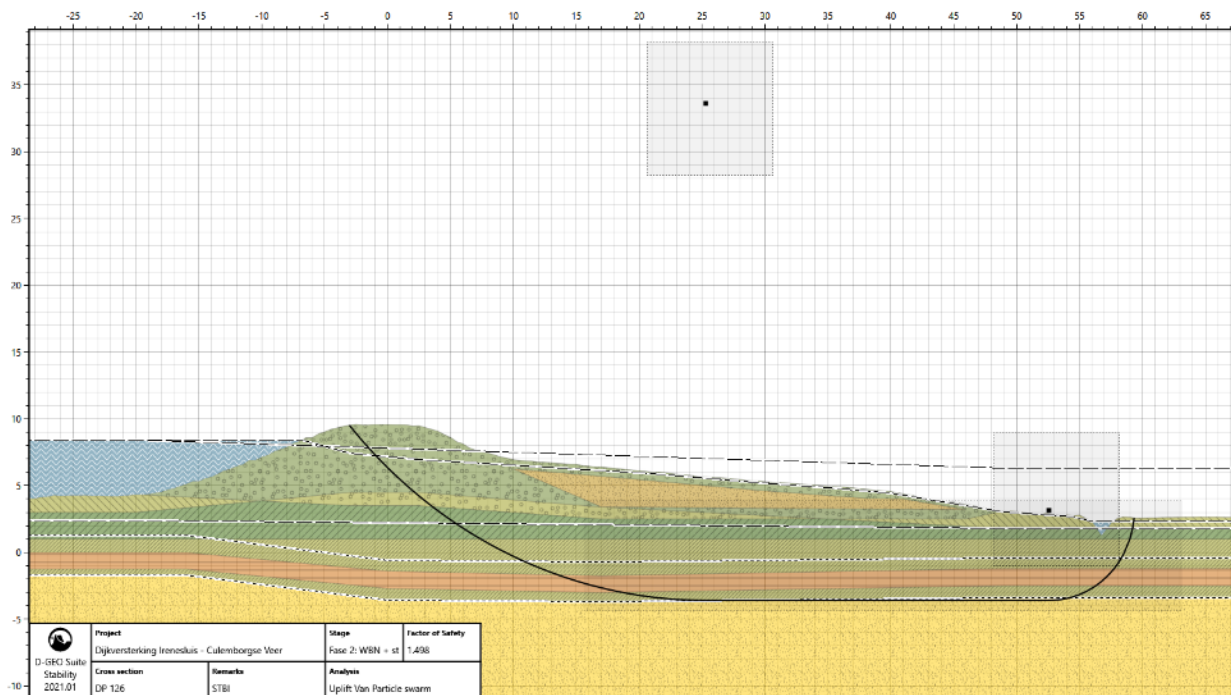
B.2 Dijkpaal 113



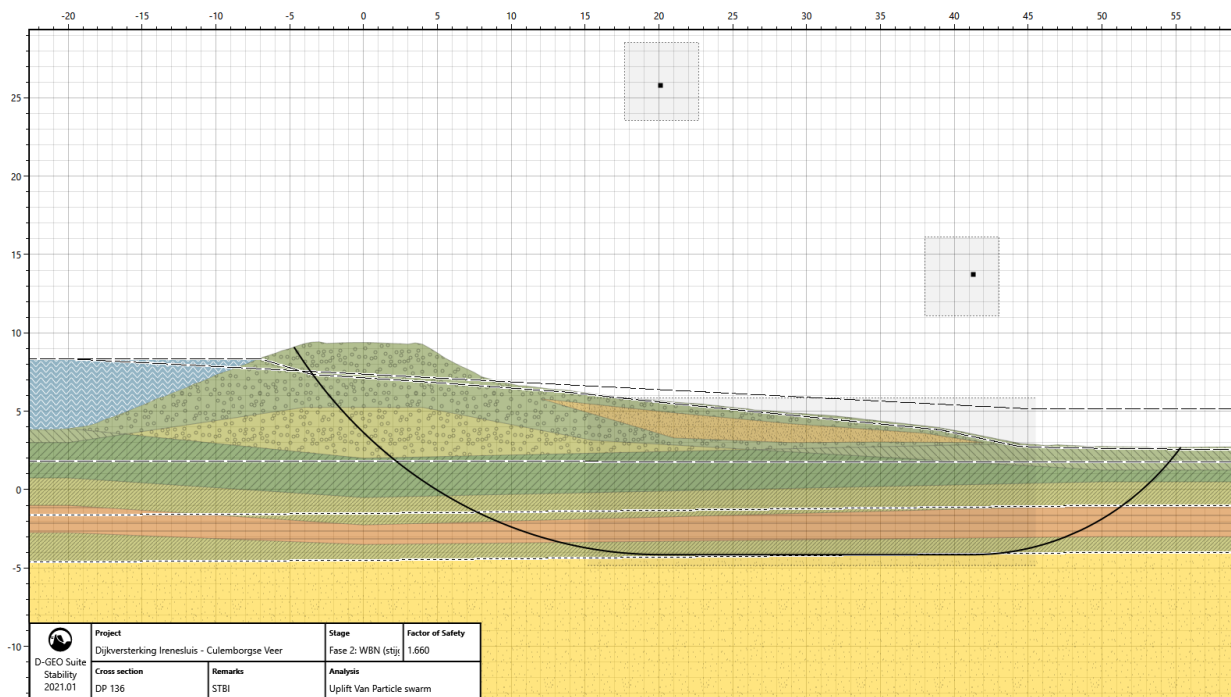
B.3 Dijkpaal 117



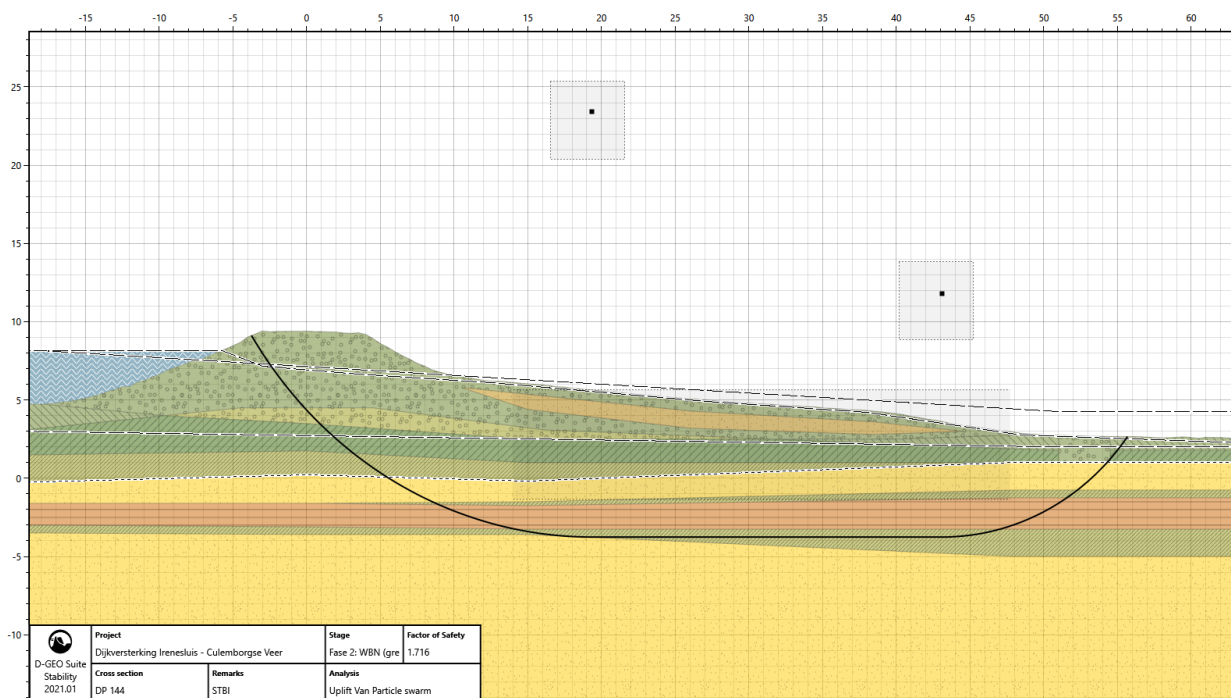
B.4 Dijkpaal 126



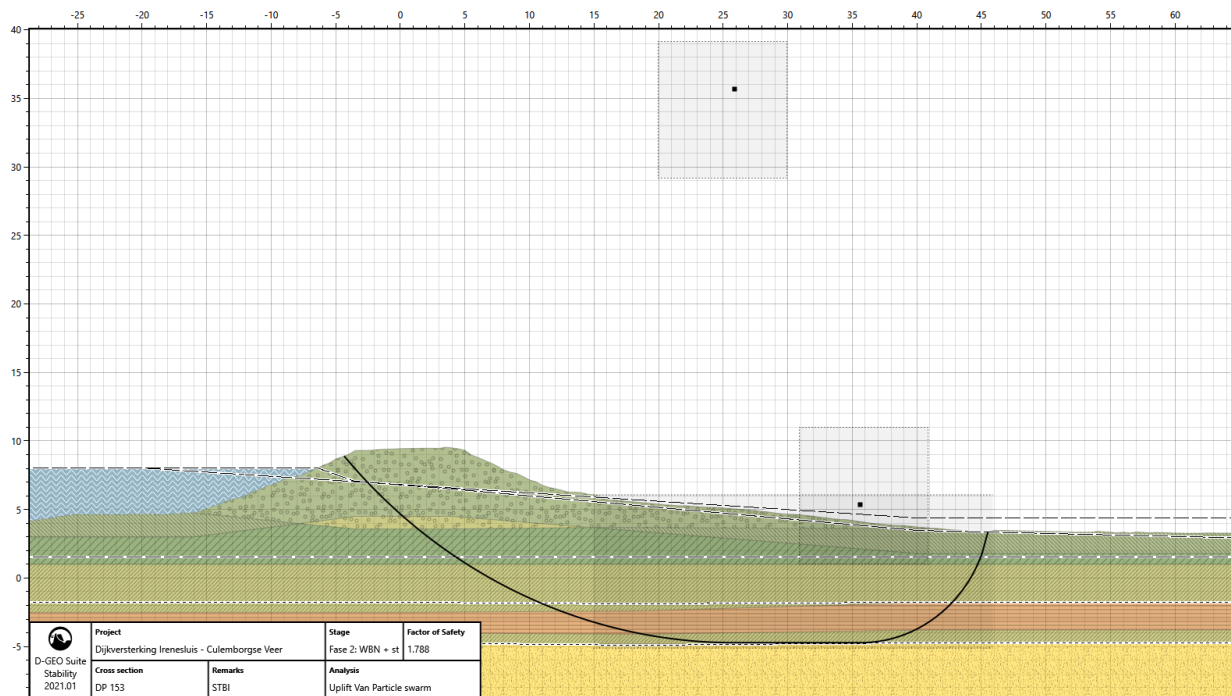
B.5 Dijkpaal 136



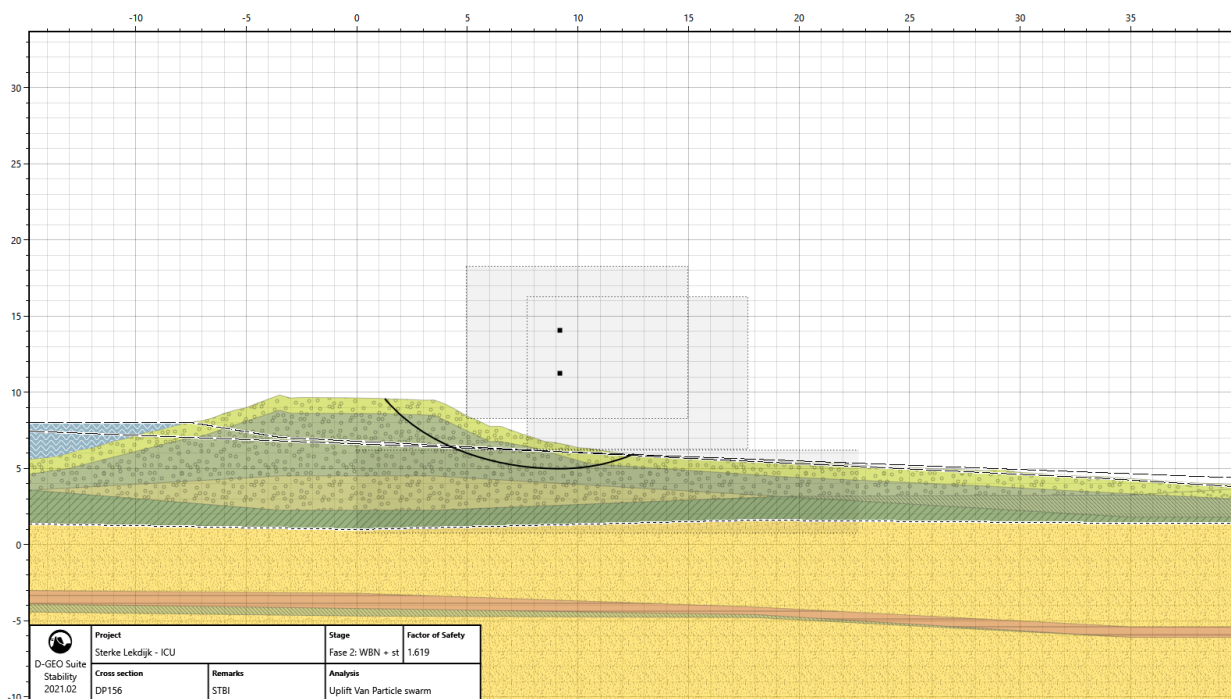
B.6 Dijkpaal 144

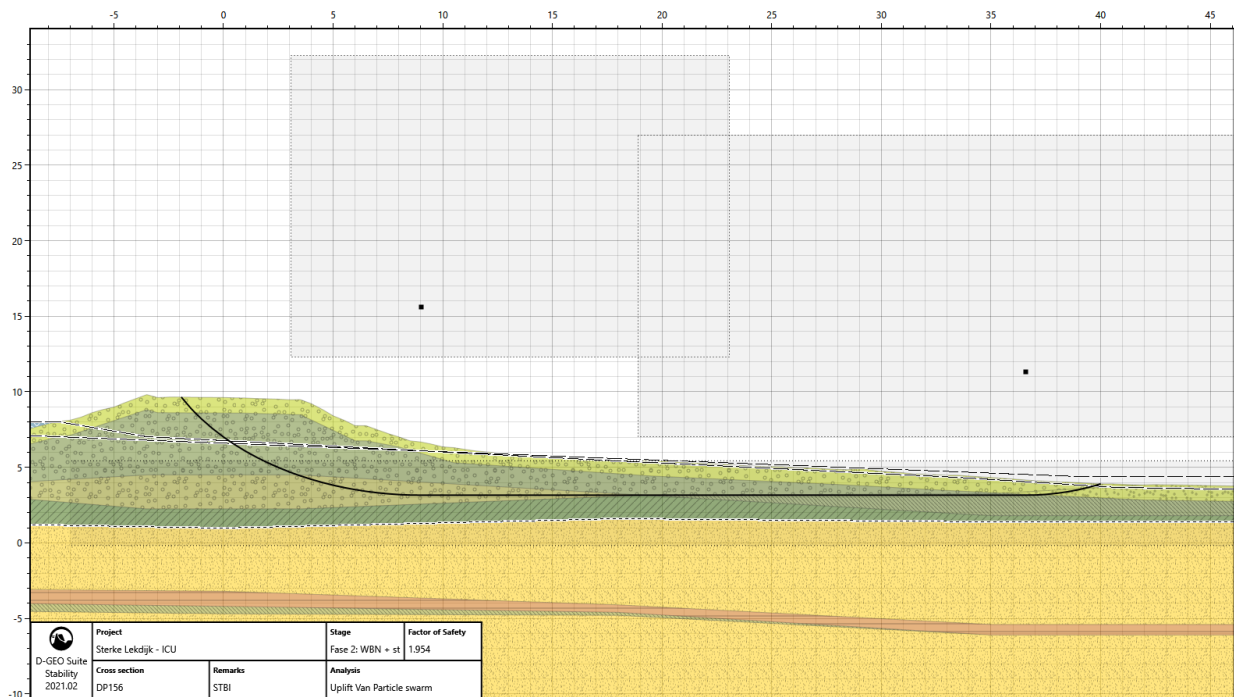


B.7 Dijkpaal 153

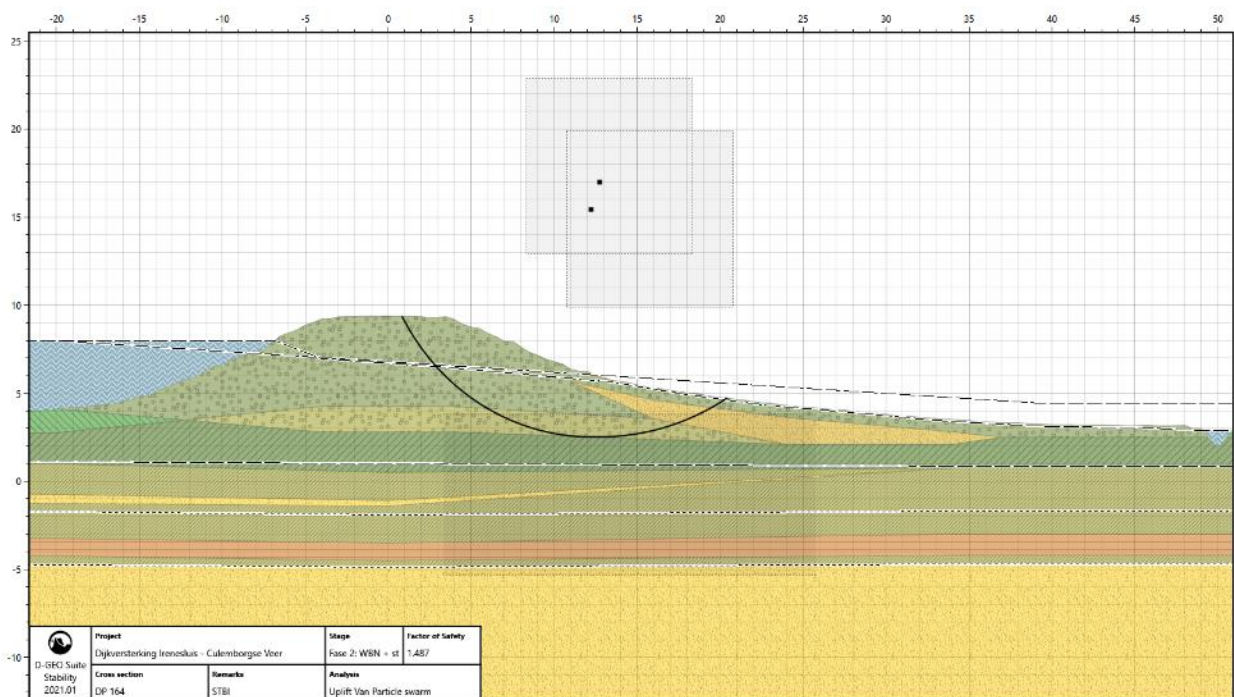


B.8 Dijkpaal 156

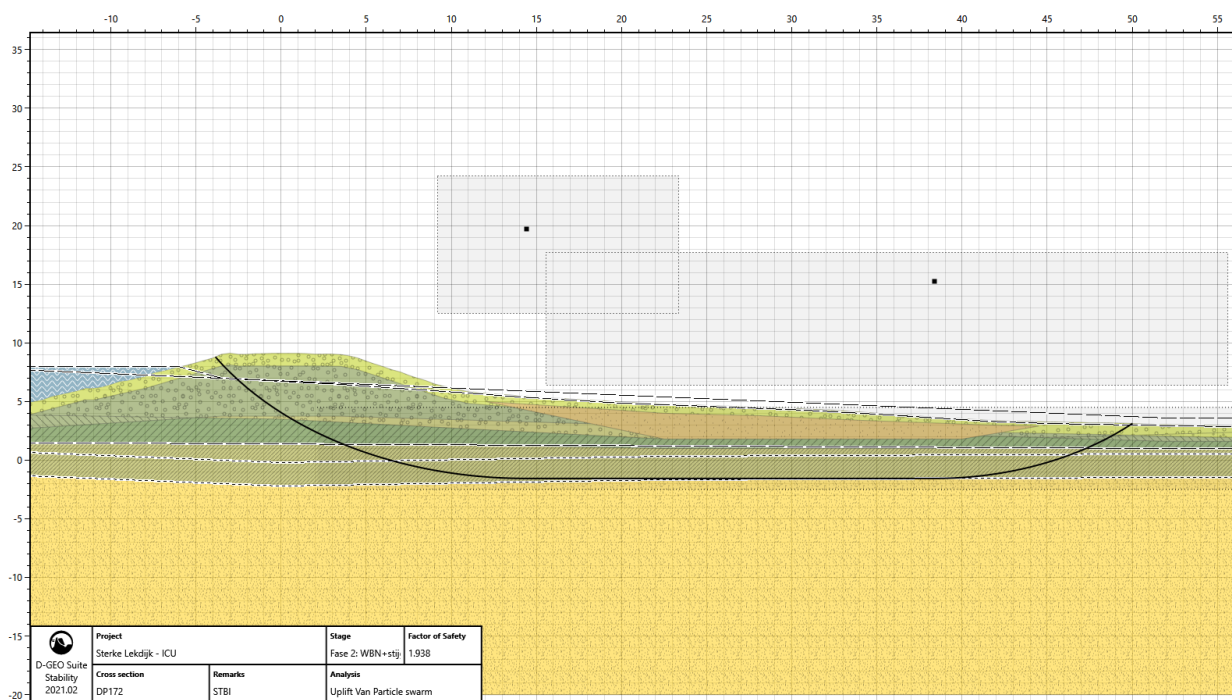
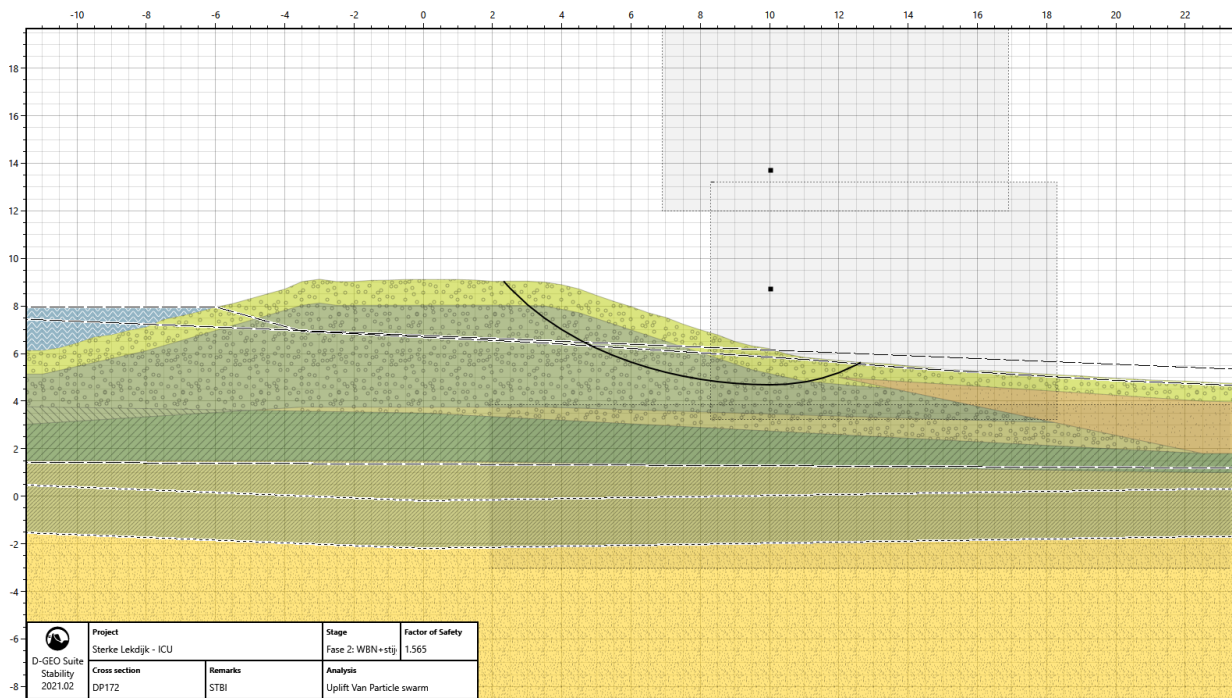




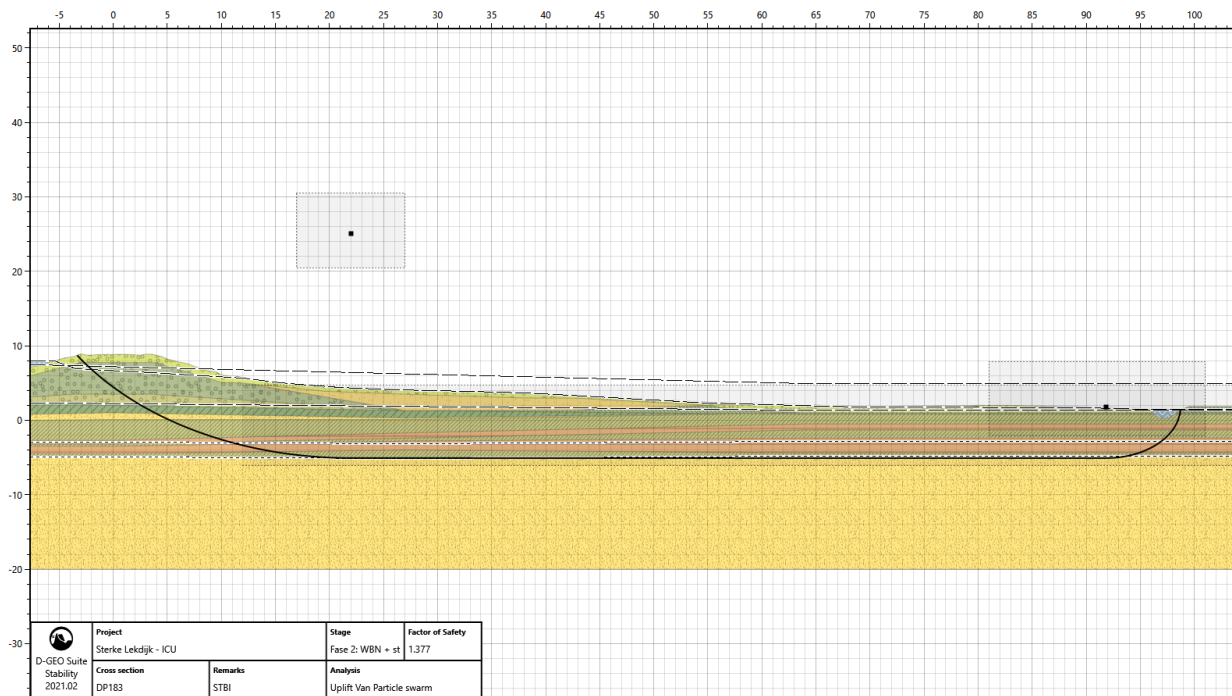
B.9 Dijkpaal 164



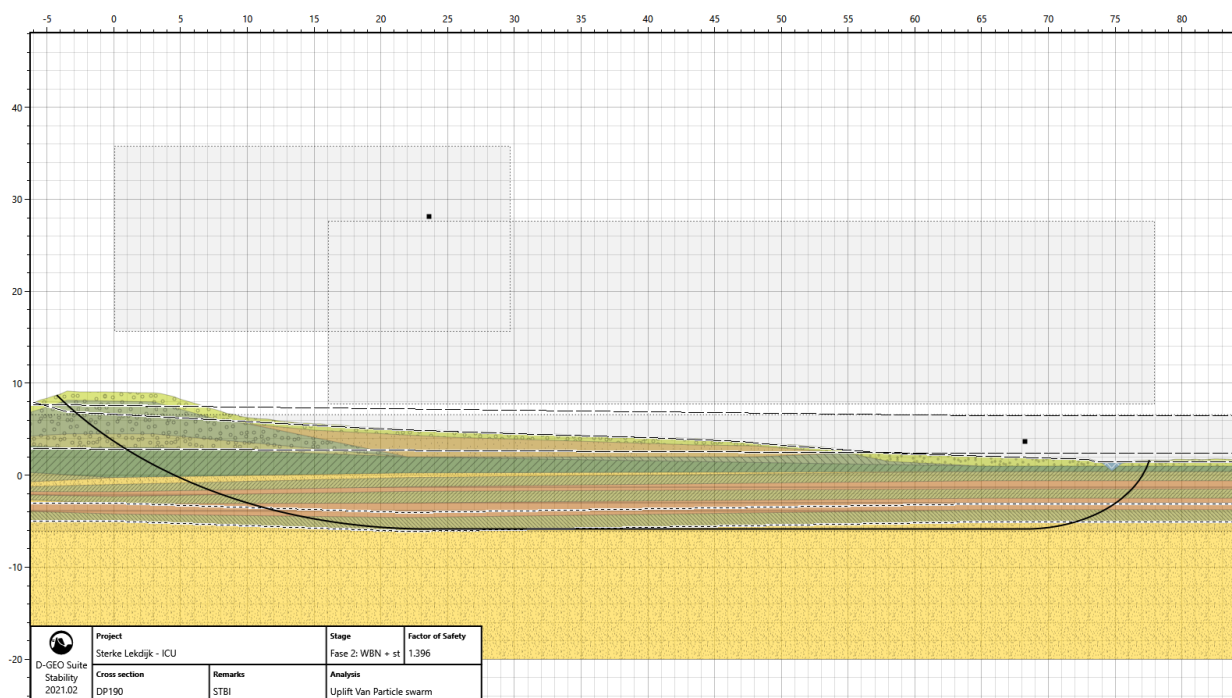
B.10 Dijkpaal 172



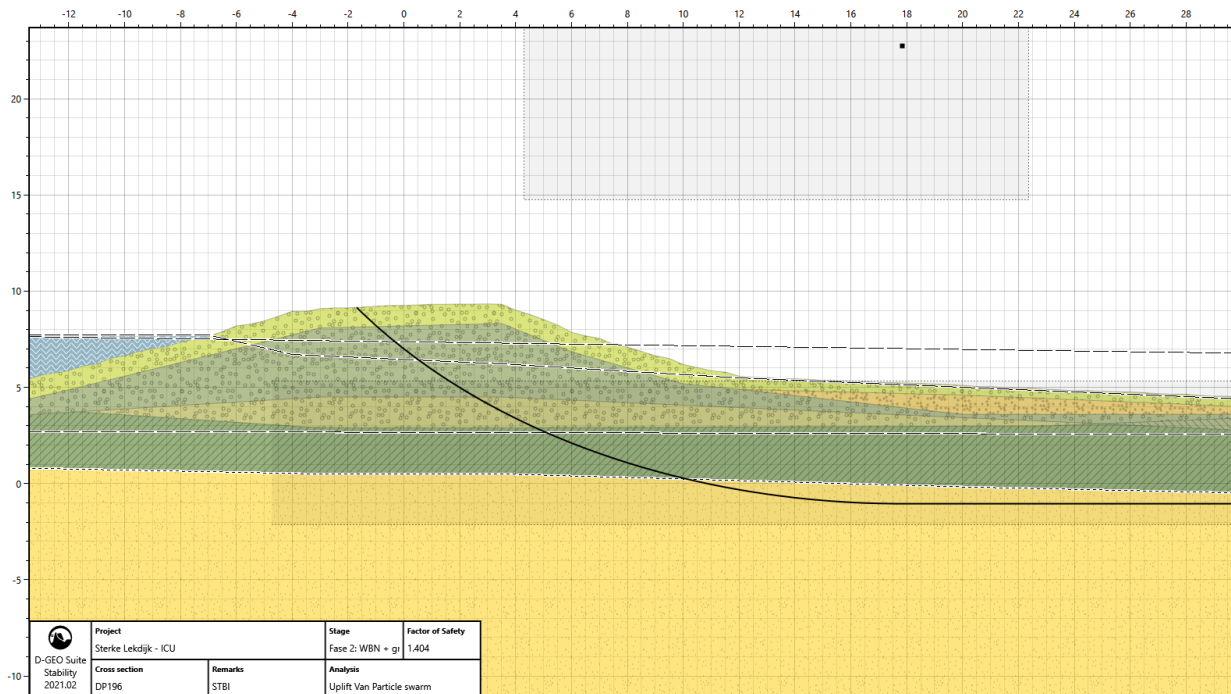
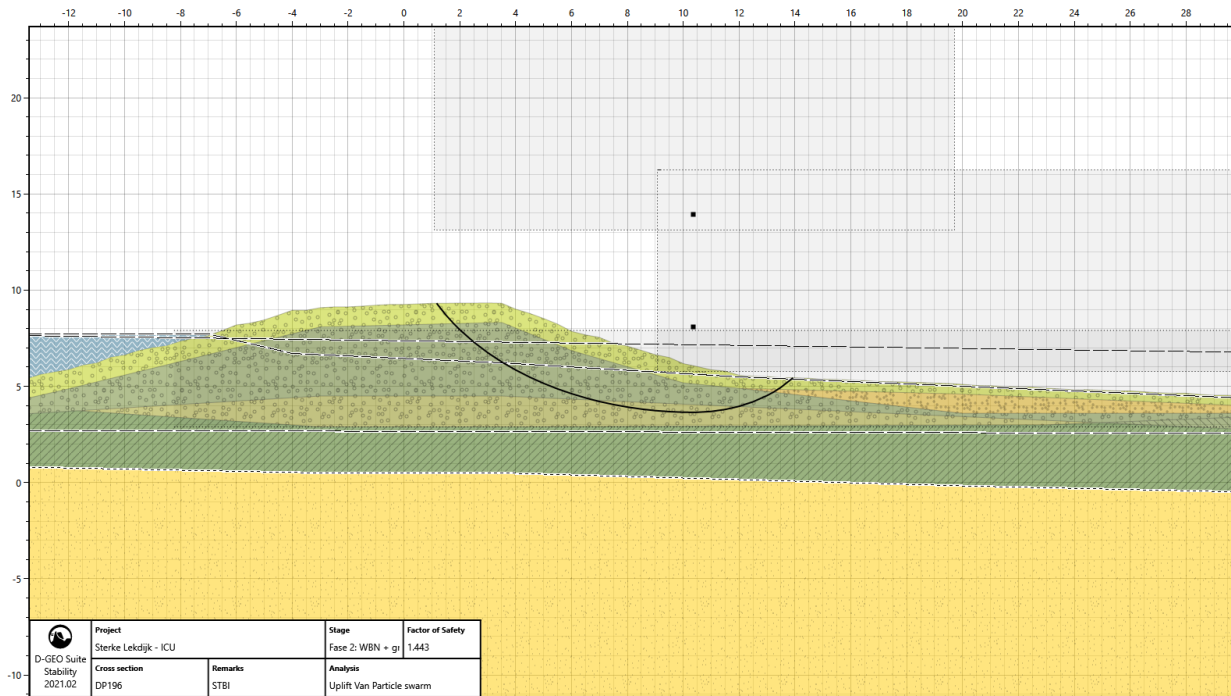
B.11 Dijkpaal 183



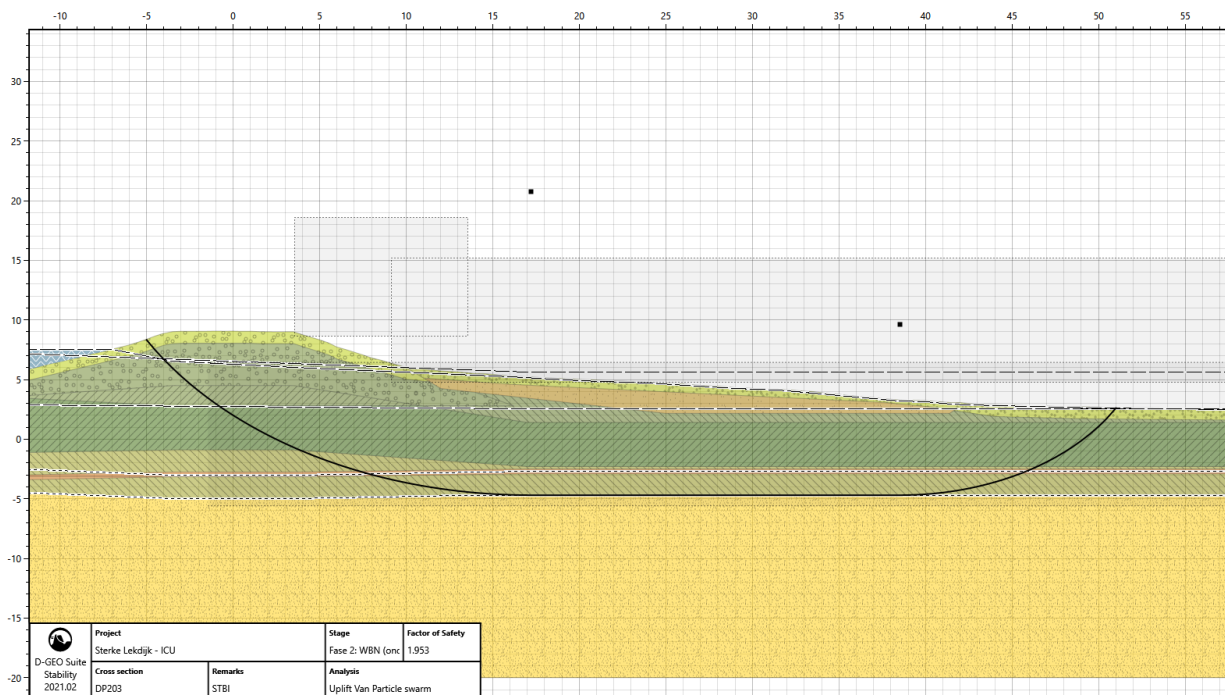
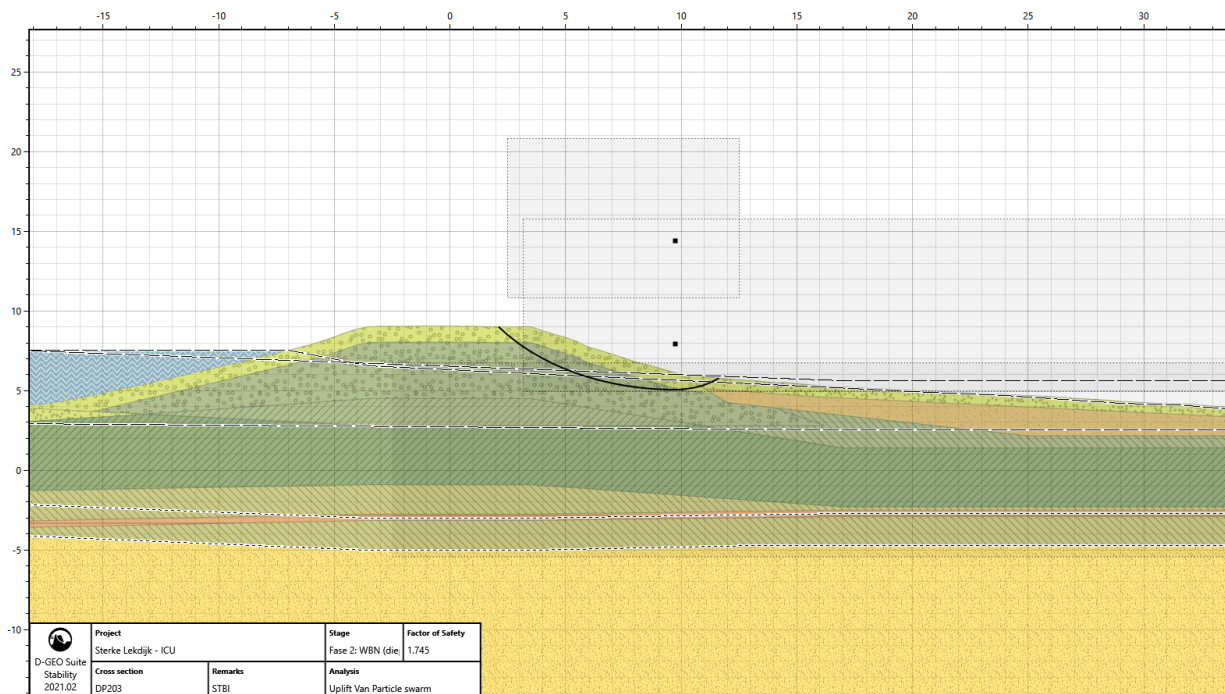
B.12 Dijkpaal 190



B.13 Dijkpaal 196



B.14 Dijkpaal 203

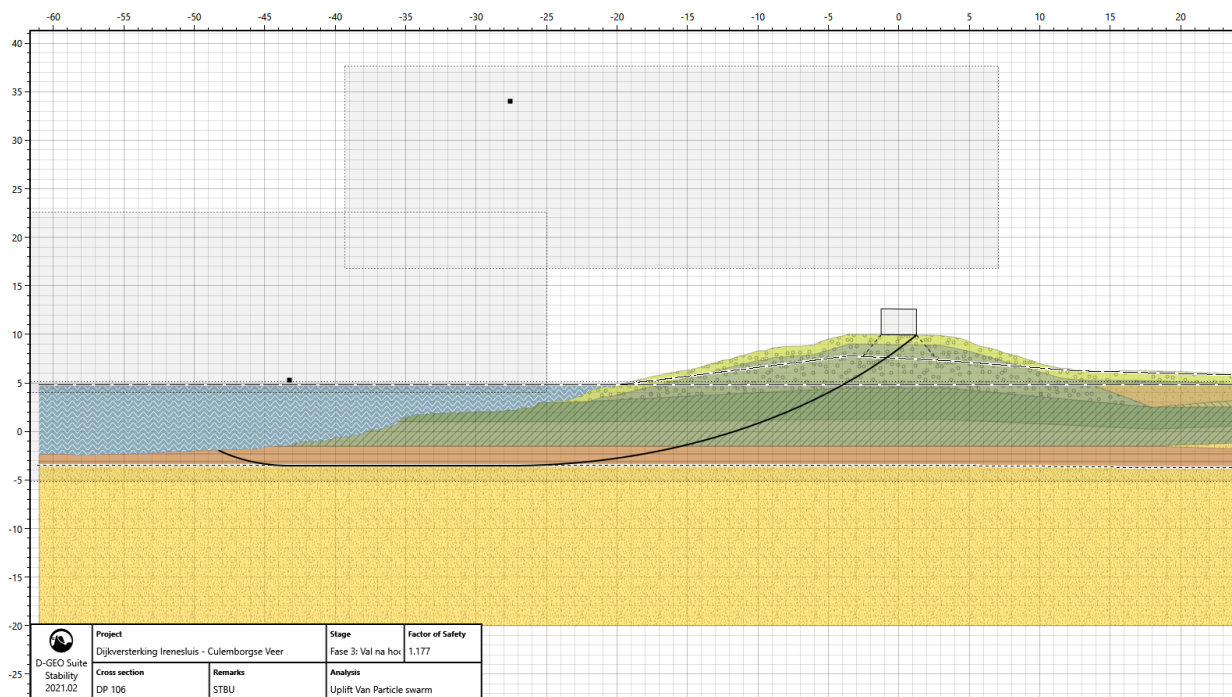


Bijlage C Berekeningsresultaten STPH

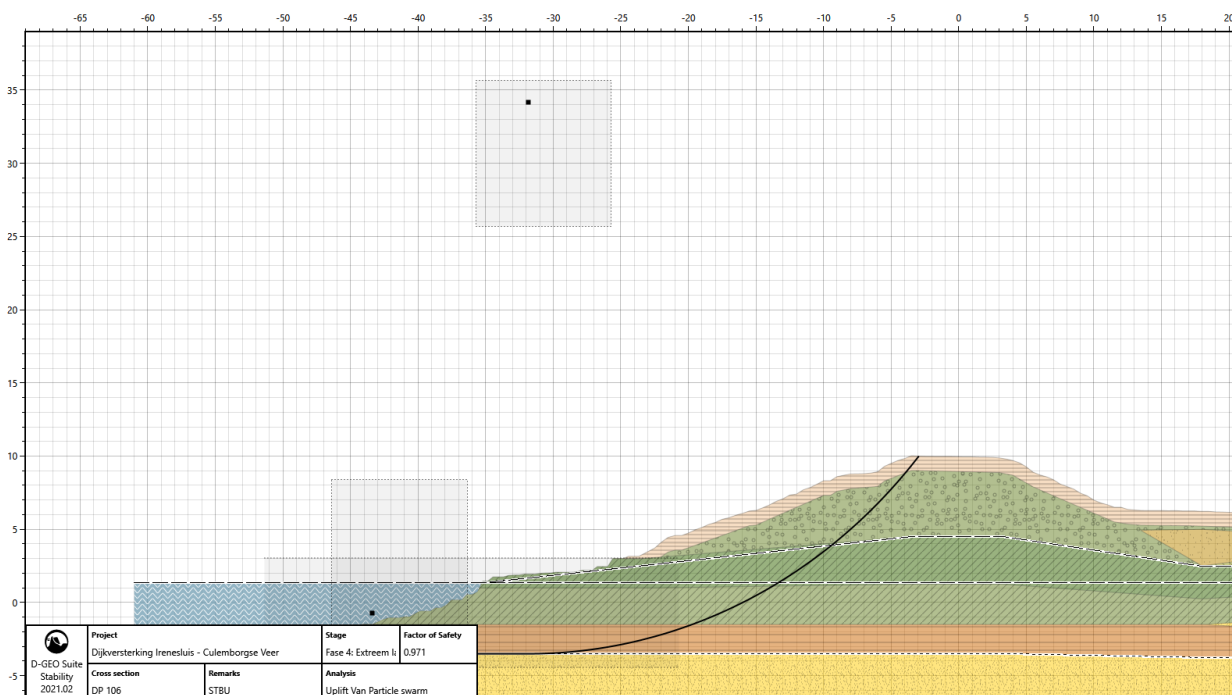
Bijlage D Stabiliteitsberekeningen STBU

D.1 Dijkpaal 106

Val na hoogwater

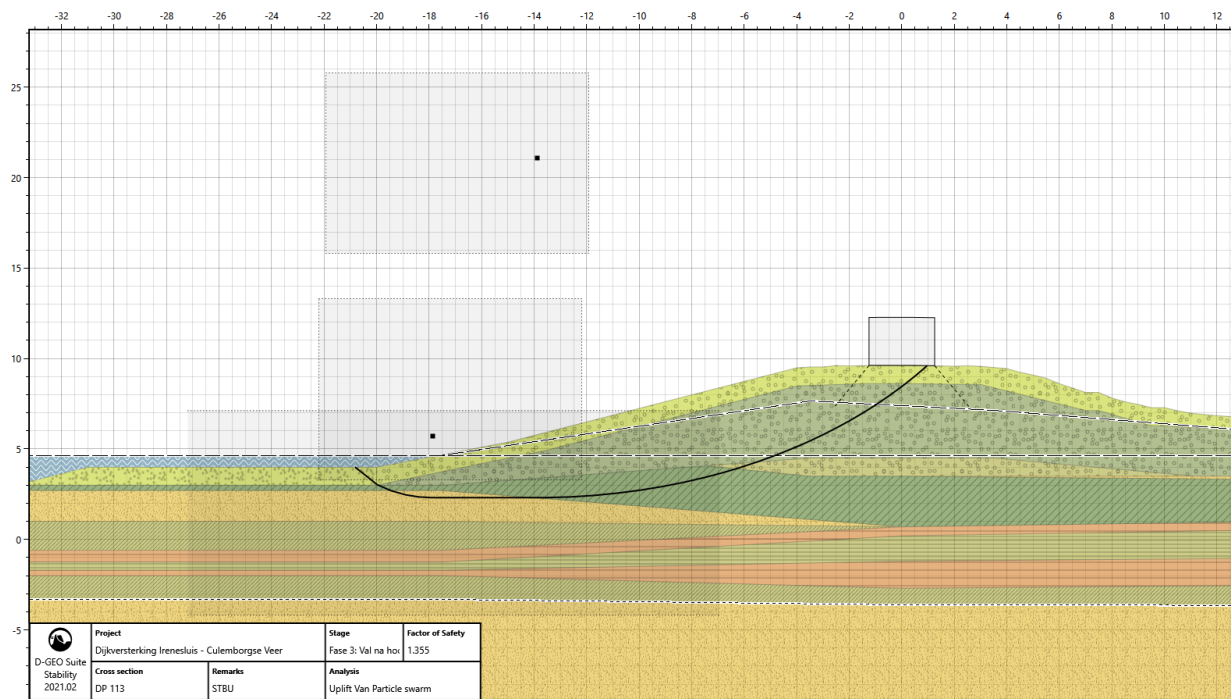


Extreem laag water

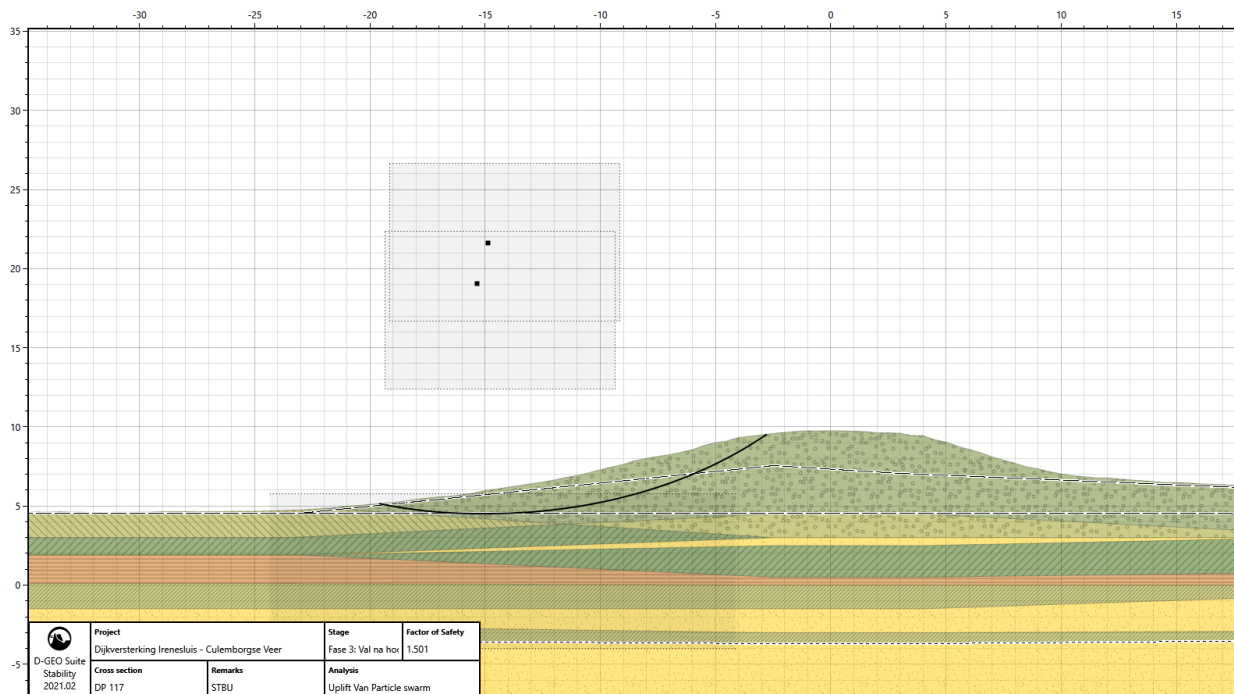


Extreme neerslag

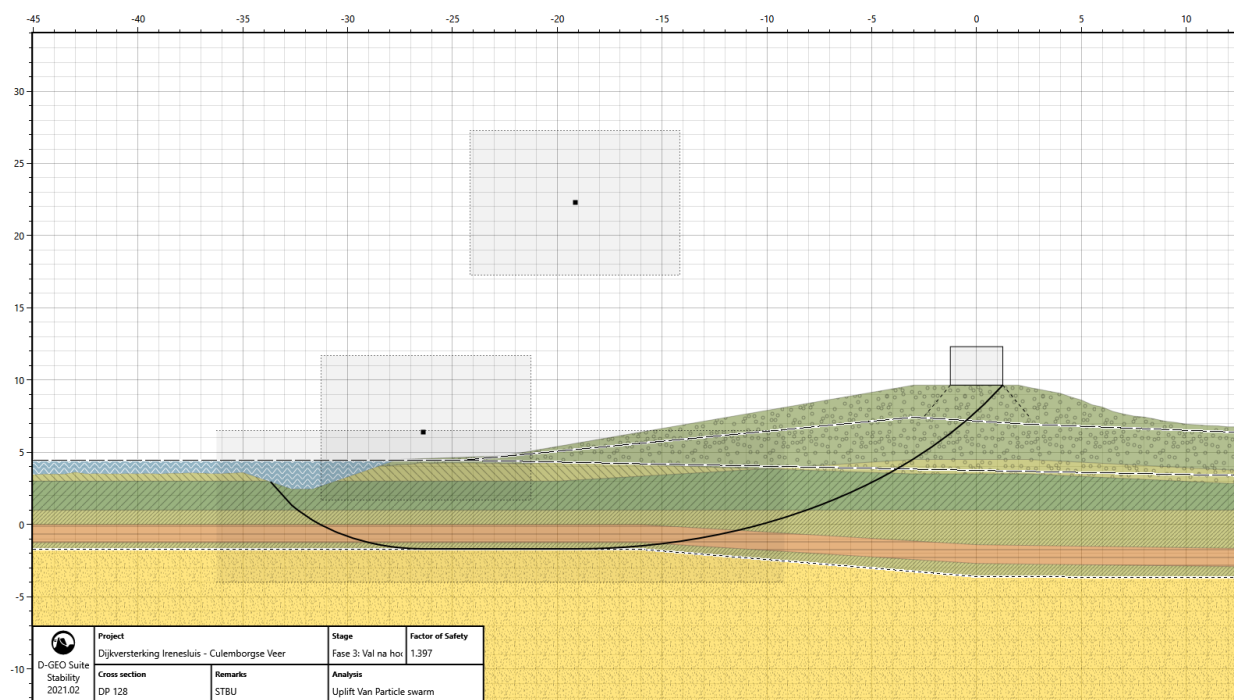
D.2 Dijkpaal 113 (geometrie buitendijks obv dijkpaal 111)



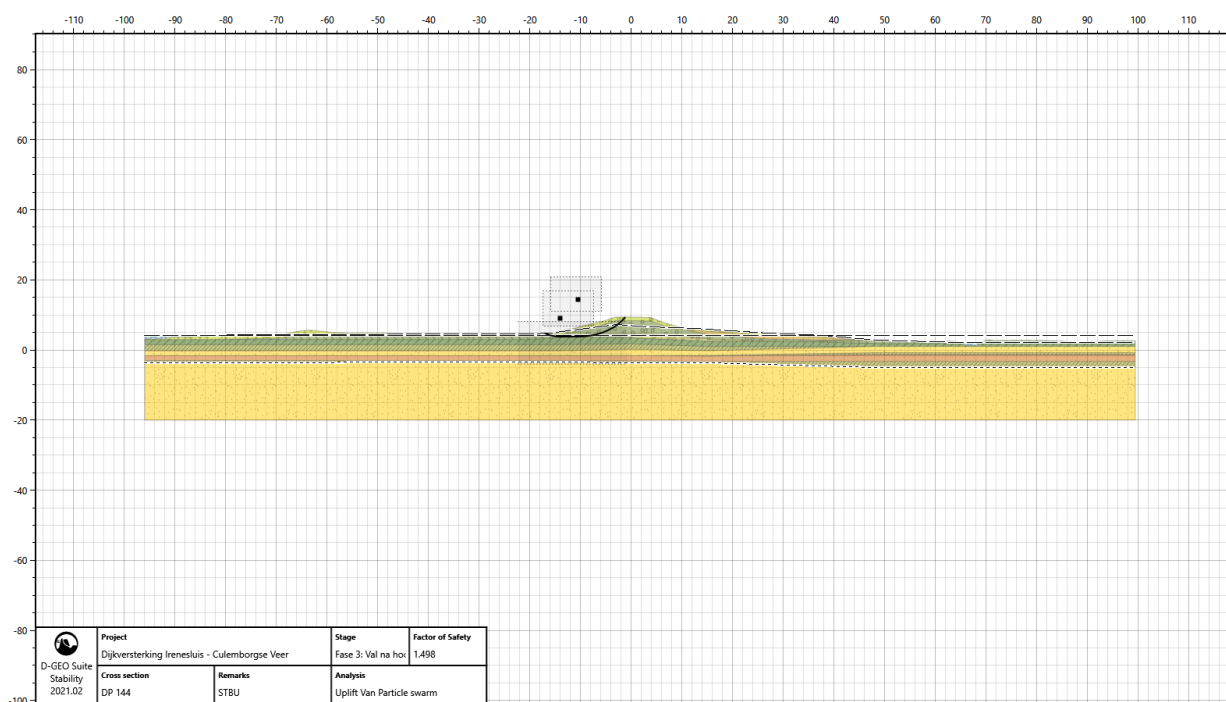
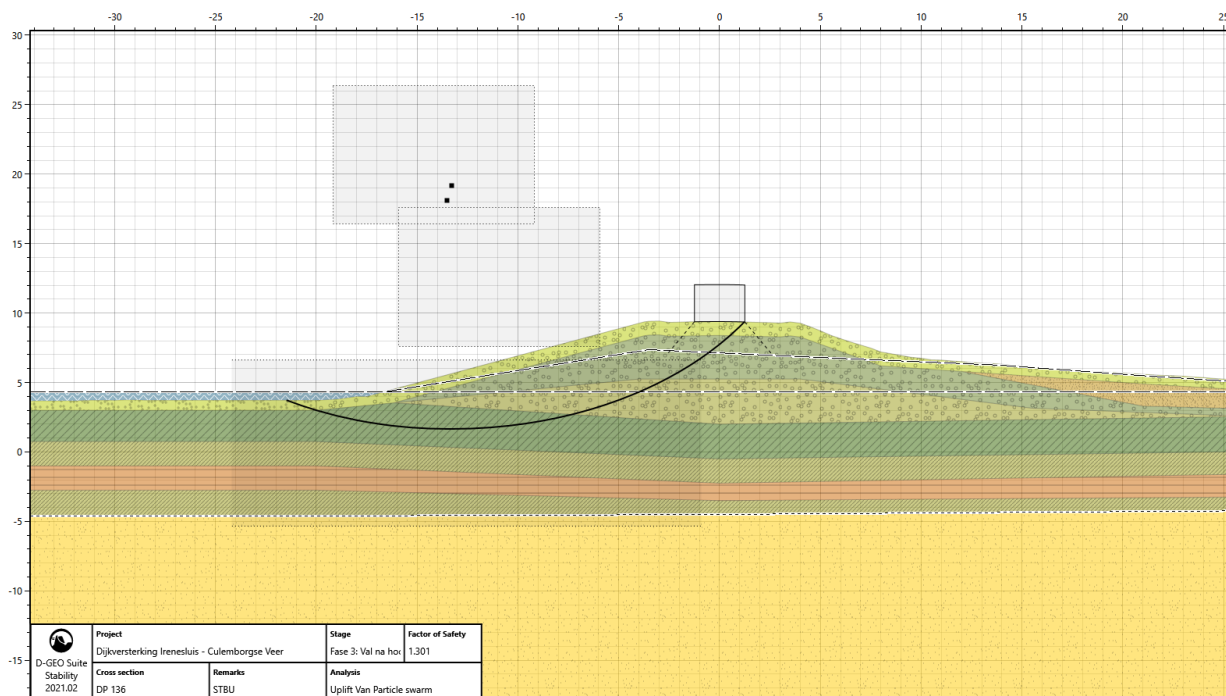
D.3 Dijkpaal 117



D.4 Dijkpaal 128

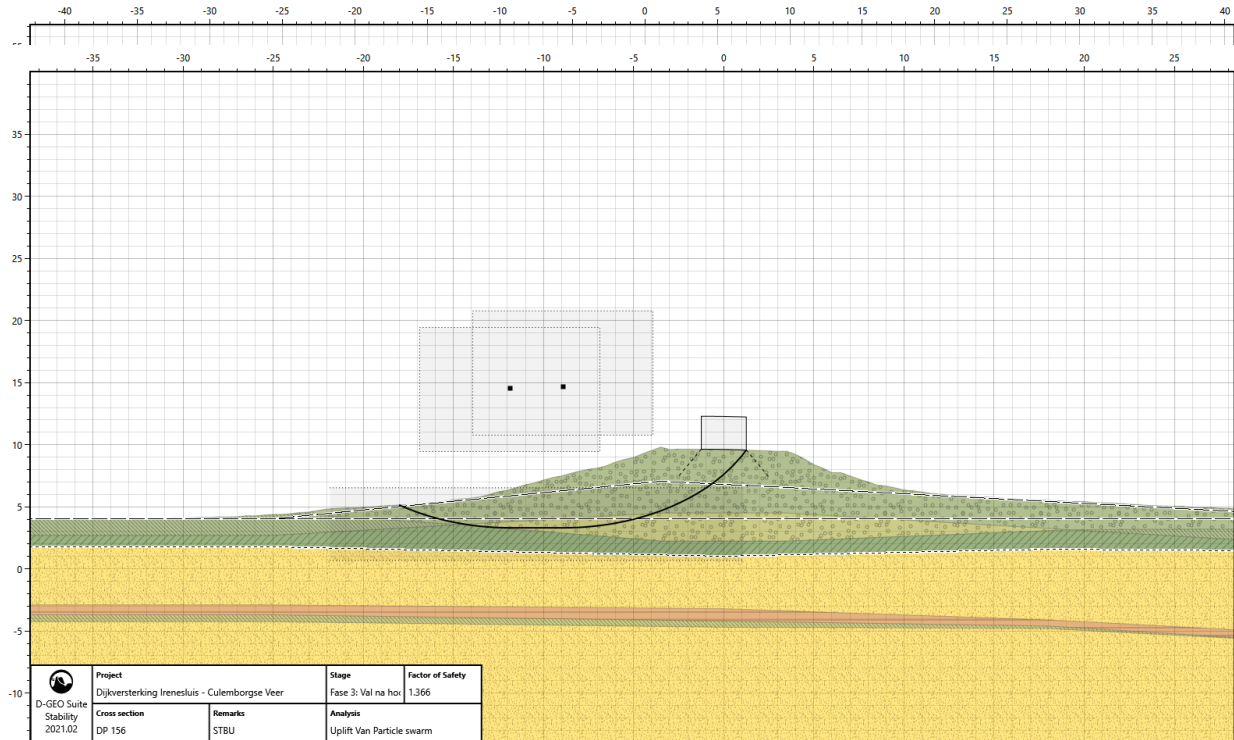


D.5 Dijkpaal 136



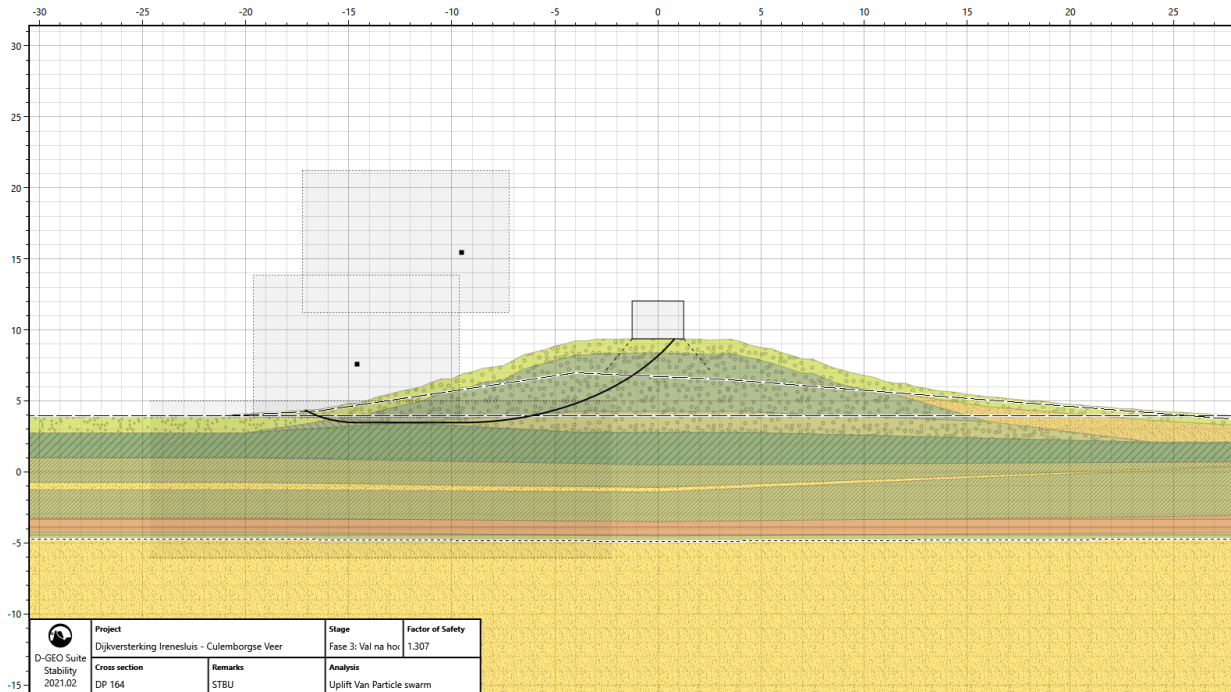
D.6 Dijkpaal 144

D.7 Dijkpaal 153

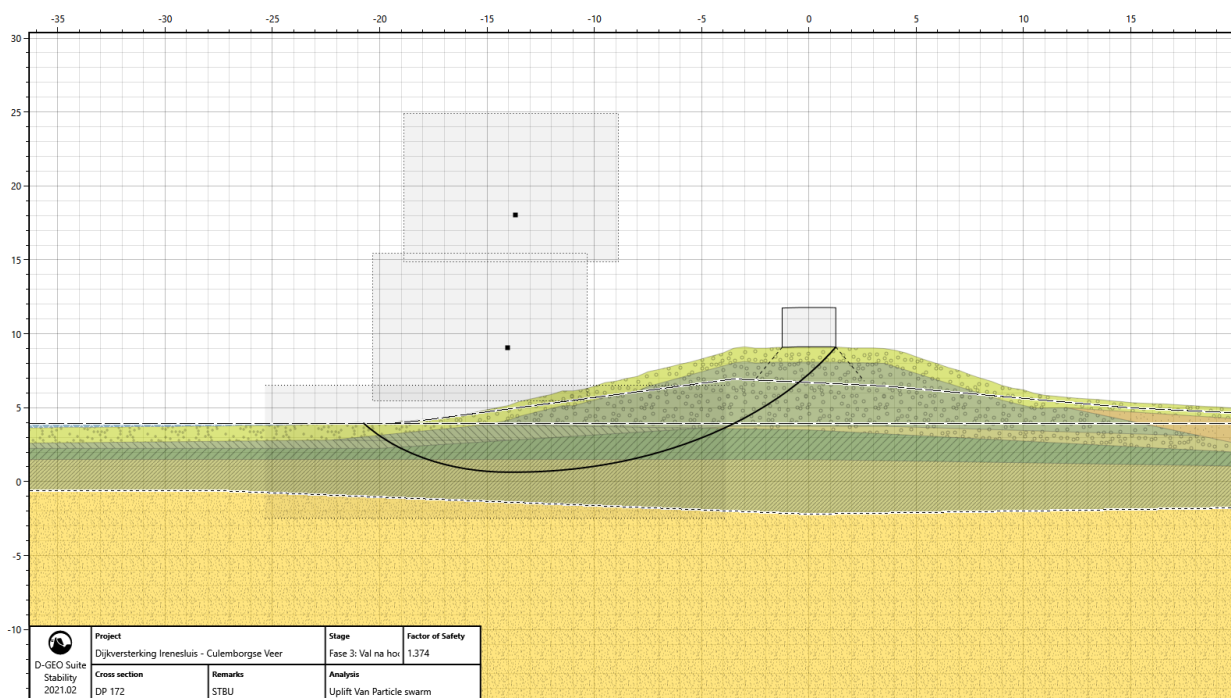


D.8 Dijkpaal 156

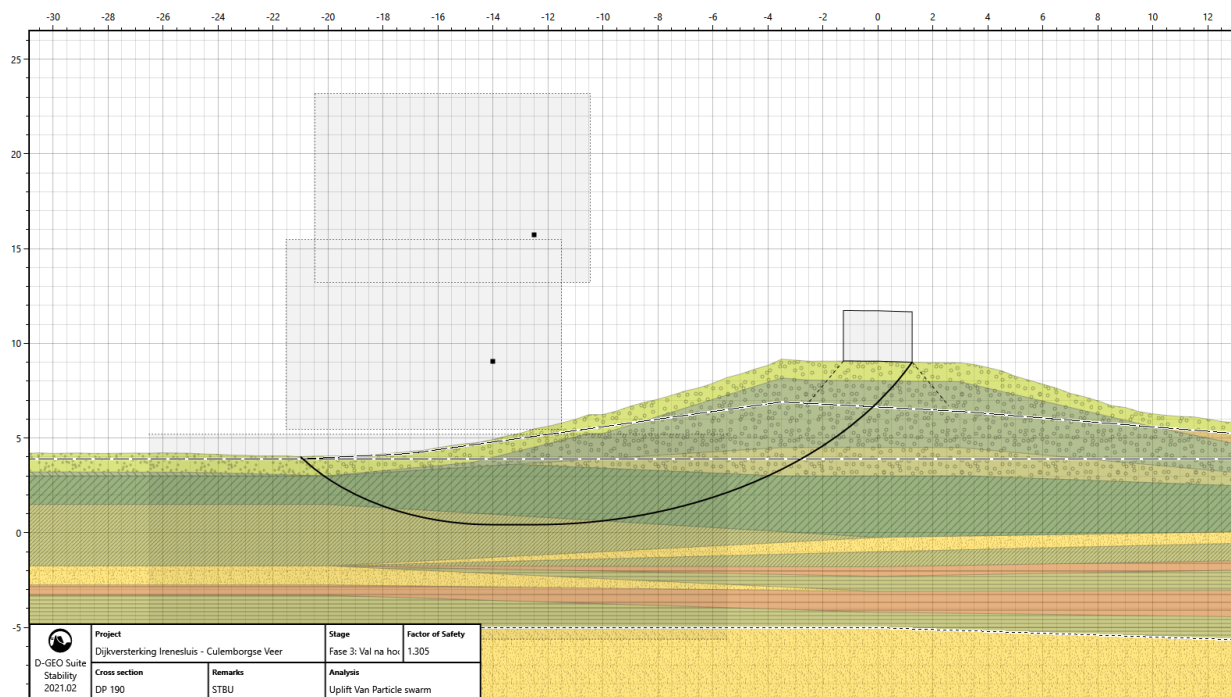
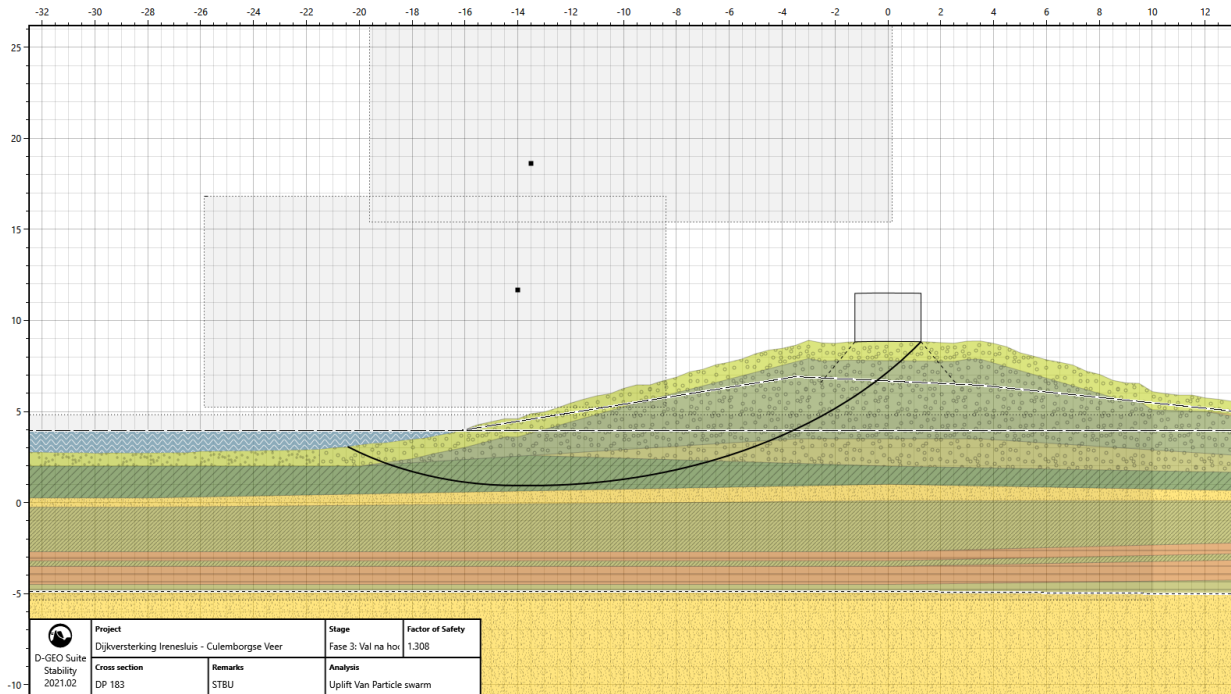
D.9 Dijkpaal 164



D.10 Dijkpaal 172

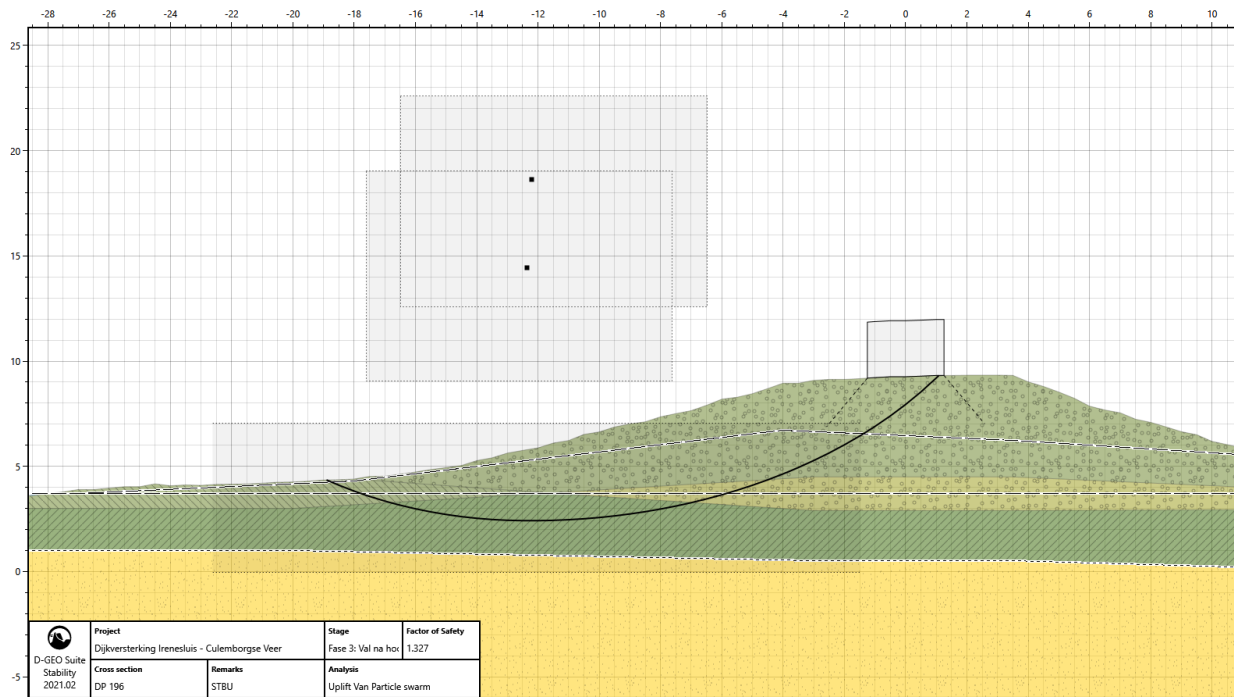


D.11 Dijkpaal 183

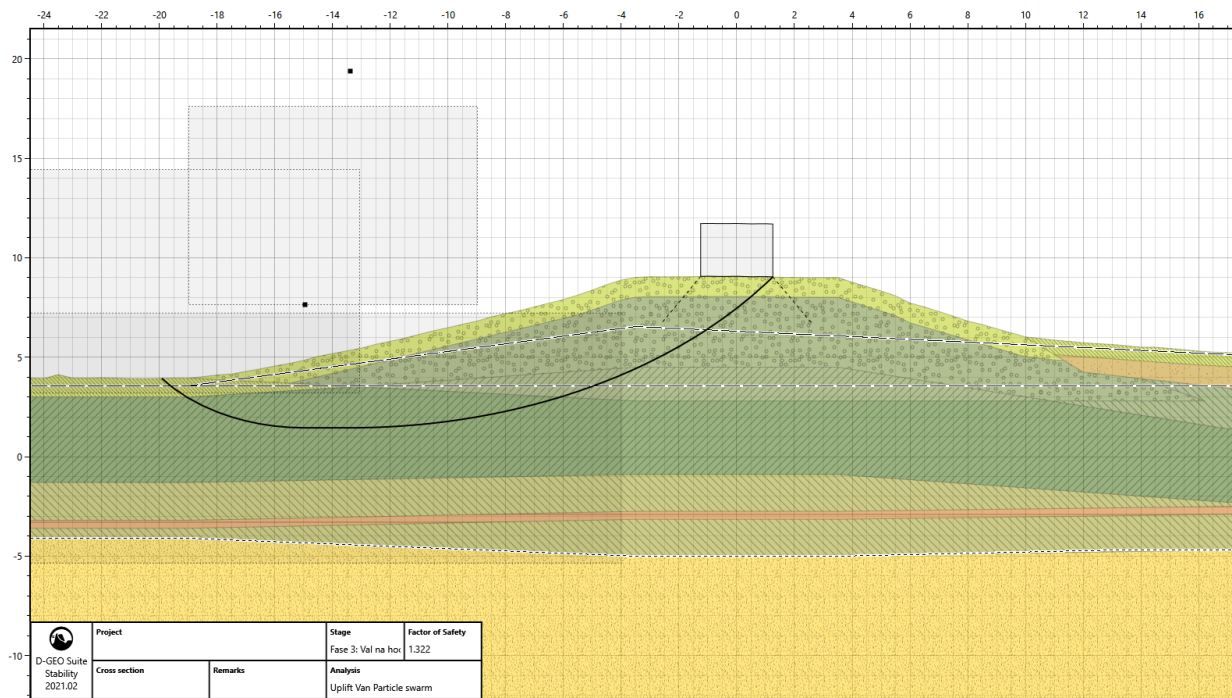


D.12 Dijkpaal 190

D.13 Dijkpaal 196

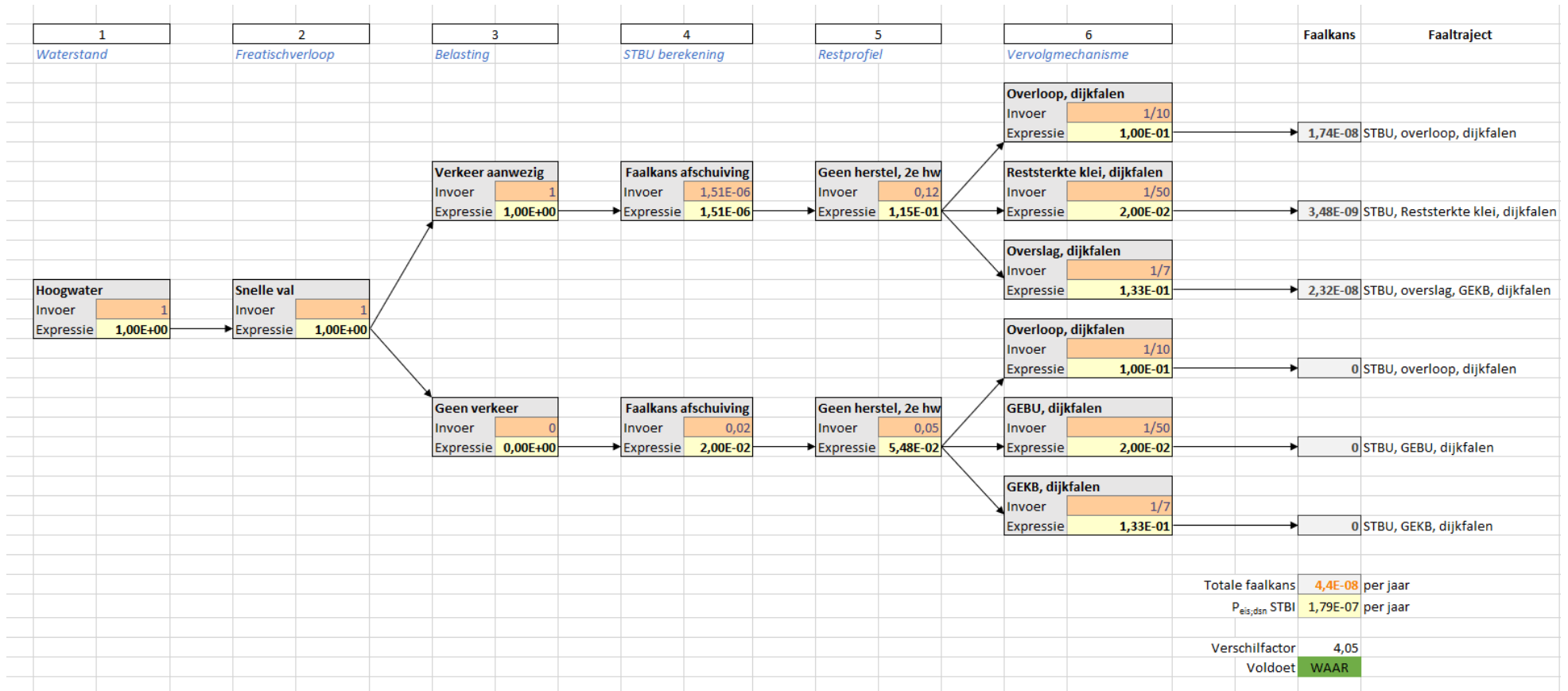


D.14 Dijkpaal 203



Bijlage E Faalkansanalyse - val na hoogwater

E.1 Dijkpaal 106 – Val na hoogwater

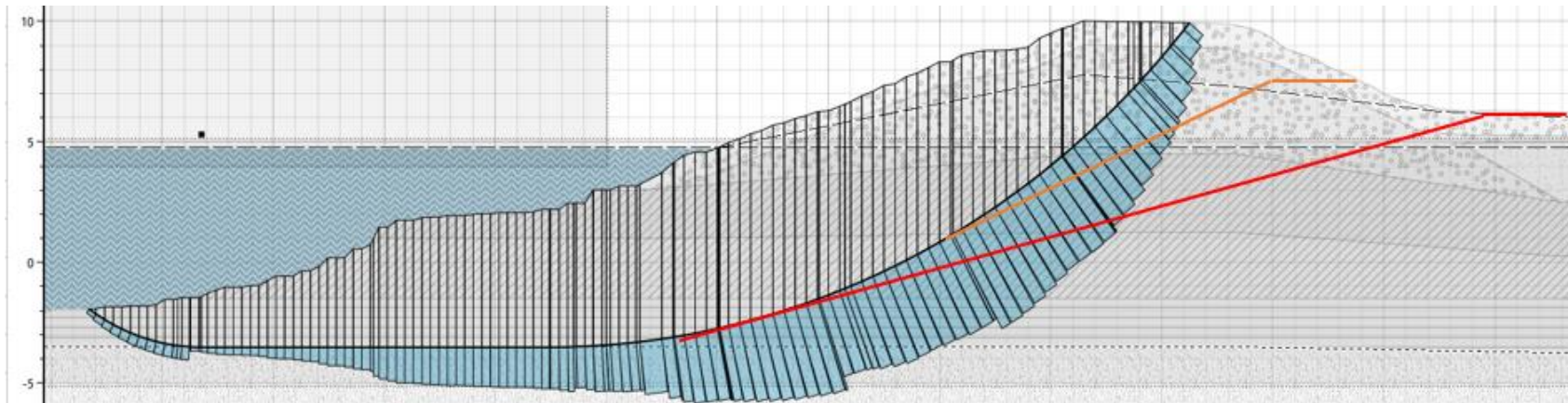


De methodiek voor de faalkansanalyse is opgenomen als bijlage in de TUN [6].

Restprofiel dijkpaal 106

Sterke Lekdijk: Nota Titel XXXXX

Na de initiële afschuiving als gevolg van een val na hoogwater, resteert er een restprofiel. De oranje lijn is een talud van 1:2, de rode lijn is een talud van 1:3.



Hydraulische randvoorwaarden Restprofiel

Paarse waarden = invoer faalkansanalyse

Buitenwaterstanden t.b.v. overloop (vervolgmechanisme) bij restprofiel

| ID | Locatie | Terugkeertijd [jaar] | 2050 | 2100 | 2073 |
|----|-------------------------|----------------------|-------|-------|------|
| 1 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 10 | 7,356 | 7,696 | 7,51 |
| 2 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 30 | 7,834 | 8,123 | 7,97 |
| 3 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 100 | 8,18 | 8,379 | 8,27 |
| 4 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 300 | 8,378 | 8,533 | 8,45 |
| 5 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 1000 | 8,531 | 8,63 | 8,58 |
| 6 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 3000 | 8,628 | 8,753 | 8,69 |
| 7 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 10000 | 8,752 | 8,815 | 8,78 |
| 8 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 30000 | 8,778 | 8,881 | 8,83 |

Kans op overslag (vervolgmechanisme) bij restprofiel

| Bij 1 op 2 talud bij restkruinhoogte van 1:2 | | | | 2050 | | 2100 |
|--|-----|-----------|-----|------|-----|------|
| | HBN | T gekozen | HBN | T | HBN | T |
| HBN | 0,1 | 7,5 | 0,1 | 10 | 0,1 | 7,5 |
| HBN | 1 | 7,5 | 1 | 11 | 1 | 7,5 |
| HBN | 5 | 7 | 5 | 7,5 | 5 | 7 |
| HBN | 10 | 7 | 10 | 7,5 | 10 | 7 |

Golfcondities buitenwaarts t.b.v. reststerkte (vervolgmechanisme) bij restprofiel

| | | | | | | | Zicht- jaar | 2073 | | |
|------------|--------------------------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------|---|----------------|-----------------|------------------|---------------|
| ID | Locatie | X-coördinaat | Y-coördinaat | Waterstands-niveau [m+NAP] | Terugkeertijd [jaar] | Belastingniveau [m+NAP]/Golfparameter [m]/[s]/Sterkte bekleding [-] | Golfhoogte [m] | Piekperiode [s] | Golfrichting [°] | Golfinval [°] |
| 3 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 2,5 | 2,22E+05 | 1,29 | 0,84 | 3,12 | 90 | 52,3 |
| 104 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 3 | 2,22E+05 | 1,3 | 0,84 | 3,13 | 90 | 52,3 |
| 205 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 3,5 | 2,22E+05 | 1,31 | 0,85 | 3,14 | 90 | 52,3 |
| 306 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 4 | 2,22E+05 | 1,32 | 0,85 | 3,15 | 90 | 52,3 |
| 407 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 4,5 | 2,22E+05 | 1,33 | 0,86 | 3,16 | 90 | 52,3 |
| 508 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 5 | 2,22E+05 | 1,34 | 0,86 | 3,17 | 90 | 52,3 |
| 609 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 5,5 | 2,22E+05 | 1,1446 | 0,7646 | 3,0046 | 90 | 52,3 |
| 710 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 6 | 2,22E+05 | 0,9784 | 0,6692 | 2,8484 | 90 | 52,3 |
| 811 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 6,5 | 2,22E+05 | 0,933 | 0,6492 | 2,813 | 90 | 52,3 |
| 912 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 7 | 2,22E+05 | 0,8876 | 0,6238 | 2,7676 | 90 | 52,3 |
| 1013 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 7,5 | 2,22E+05 | 0,8122 | 0,5538 | 2,8868 | 90 | 52,3 |
| 1114 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 8 | 2,22E+05 | 0,6868 | 0,4884 | 2,7206 | 90 | 52,3 |
| 1215 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 8,5 | 2,22E+05 | 0,4614 | 0,383 | 2,1444 | 90 | 52,3 |
| 1316 | 044-01_0113_1_LE_km0929 | 150817 | 441868 | 9 | 2,22E+05 | 0 | | | | |

E.2 Dijkpaal 106 – Gevoeligheidsanalyse faalkansenboom

Er zijn nog aparte faalkansenbomen beschikbaar waarbij enkele terugkeertijden of kansen zijn ingevuld.

| Locatie Faalkansanalyse – val na hoogwater | Safety $F_{d,i}$ [-] | Schem. F γ_b [-] | Model f. γ_d [-] | Stabf. $F_{d,i/d}$ [-] | Beta b_i [-] | Faalkans bij scenario $P_{f,i}$ [1/jaar] | Terugkeertijd → invoer faalkansanalyse T = |
|--|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|---|---|
| Dijkpaal 106 NKO | 1,18 | - | 1,06 | 1,11 | 4,67 | 1,51E-06 | 661.374 |

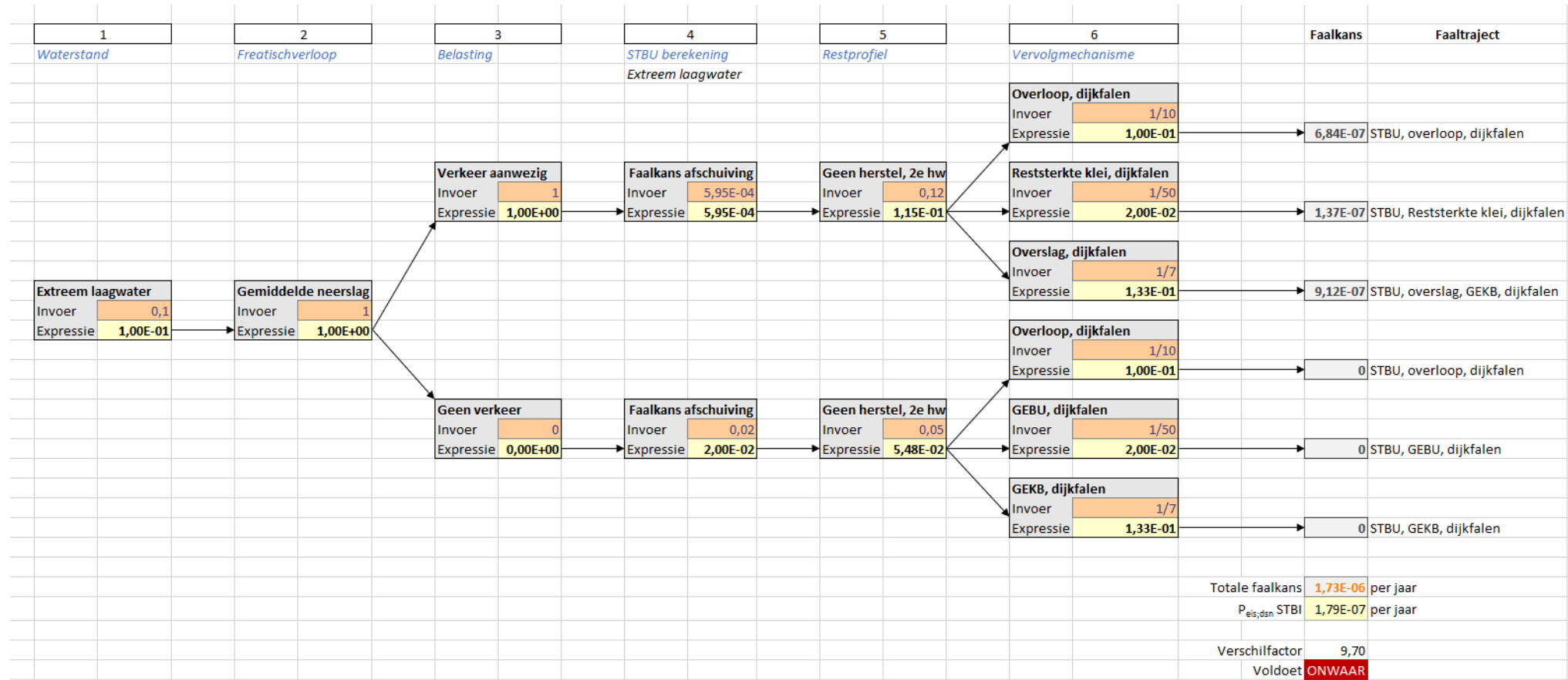
| Locatie Faalkansanalyse – Extreme neerslag | Safety $F_{d,i}$ [-] | Schem. F γ_b [-] | Model f. γ_d [-] | Stabf. $F_{d,i/d}$ [-] | Beta b_i [-] | Faalkans bij scenario $P_{f,i}$ [1/jaar] | Terugkeertijd → invoer faalkansanalyse T = |
|--|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|---|---|
| DP106 NvU | 0,92 | | 1,06 | 0,87 | 3,05 | 1,13E-03 | 882 |
| DP106 (om te voldoen) | 1,05 | | 1,06 | 0,99 | 3,87 | 5,43E-05 | 18.410 |

| Locatie Faalkansanalyse – Extreem laagwater | Safety $F_{d,i}$ [-] | Schem. F γ_b [-] | Model f. γ_d [-] | Stabf. $F_{d,i/d}$ [-] | Beta b_i [-] | Faalkans bij scenario $P_{f,i}$ [1/jaar] | Terugkeertijd → invoer faalkansanalyse T = |
|---|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|---|---|
| Dijkpaal 106 NvU | 0,90 | | 1,06 | 0,85 | 2,93 | 1,71E-03 | 584 |
| DP106 - 1/10 knoop 1 | 0,95 | | 1,06 | 0,90 | 3,24 | 5,94E-04 | 1.682 |

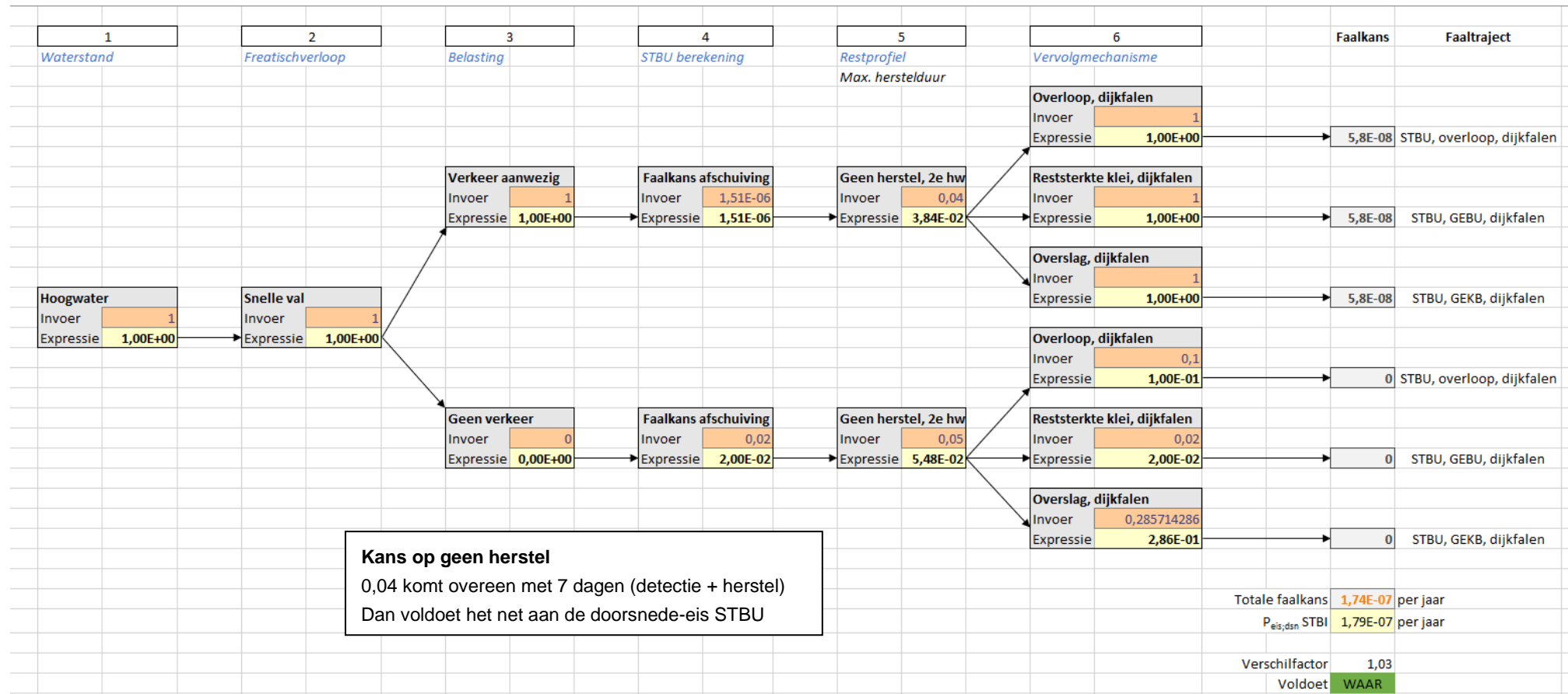
Gevoeligheidsanalyse faalkansenboom - Faaltraject (Extreme neerslag)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Faalkans | Faaltraject |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Waterstand | Freatischverloop | Belasting | STBU berekening Extreme neerslag | Restprofiel | Vervolgmechanisme | | |
| | | | | | Overloop, dijkfalen | | |
| | | | | | Invoer 1/10 | | |
| | | | | | Expressie 1,00E-01 | 6,25E-07 | STBU, overloop, dijkfalen |
| | | Verkeer aanwezig | Faalkans afschuiving | Geen herstel, 2e hw | Reststerkte klei, dijkfalen | | |
| | | Invoer 1 | Invoer 5,43E-05 | Invoer 0,12 | Invoer 1/50 | | |
| | | Expressie 1,00E+00 | Expressie 5,43E-05 | Expressie 1,15E-01 | Expressie 2,00E-02 | 1,25E-07 | STBU, Reststerkte klei, dijkfalen |
| | | | | | Overslag, dijkfalen | | |
| | | | | | Invoer 1/7 | | |
| | | | | | Expressie 1,33E-01 | 8,33E-07 | STBU, overslag, GEKB, dijkfalen |
| Gem. Waterstand | Extreme neerslag | | | | Overloop, dijkfalen | | |
| Invoer 1 | Invoer 1 | | | | Invoer 1/10 | | |
| Expressie 1,00E+00 | Expressie 1,00E+00 | | | | Expressie 1,00E-01 | 0 | STBU, overloop, dijkfalen |
| | | Geen verkeer | Faalkans afschuiving | Geen herstel, 2e hw | GEBU, dijkfalen | | |
| | | Invoer 0 | Invoer 0,02 | Invoer 0,05 | Invoer 1/50 | | |
| | | Expressie 0,00E+00 | Expressie 2,00E-02 | Expressie 5,48E-02 | Expressie 2,00E-02 | 0 | STBU, GEBU, dijkfalen |
| | | | | | GEKB, dijkfalen | | |
| | | | | | Invoer 1/7 | | |
| | | | | | Expressie 1,33E-01 | 0 | STBU, GEKB, dijkfalen |
| | | | | | | Totale faalkans 1,58E-06 | per jaar |
| | | | | | | P_{eis;dsn} STBI 1,79E-07 | per jaar |
| | | | | | | Verschilfactor 8,86 | |
| | | | | | | Voldoet ONWAAR | |

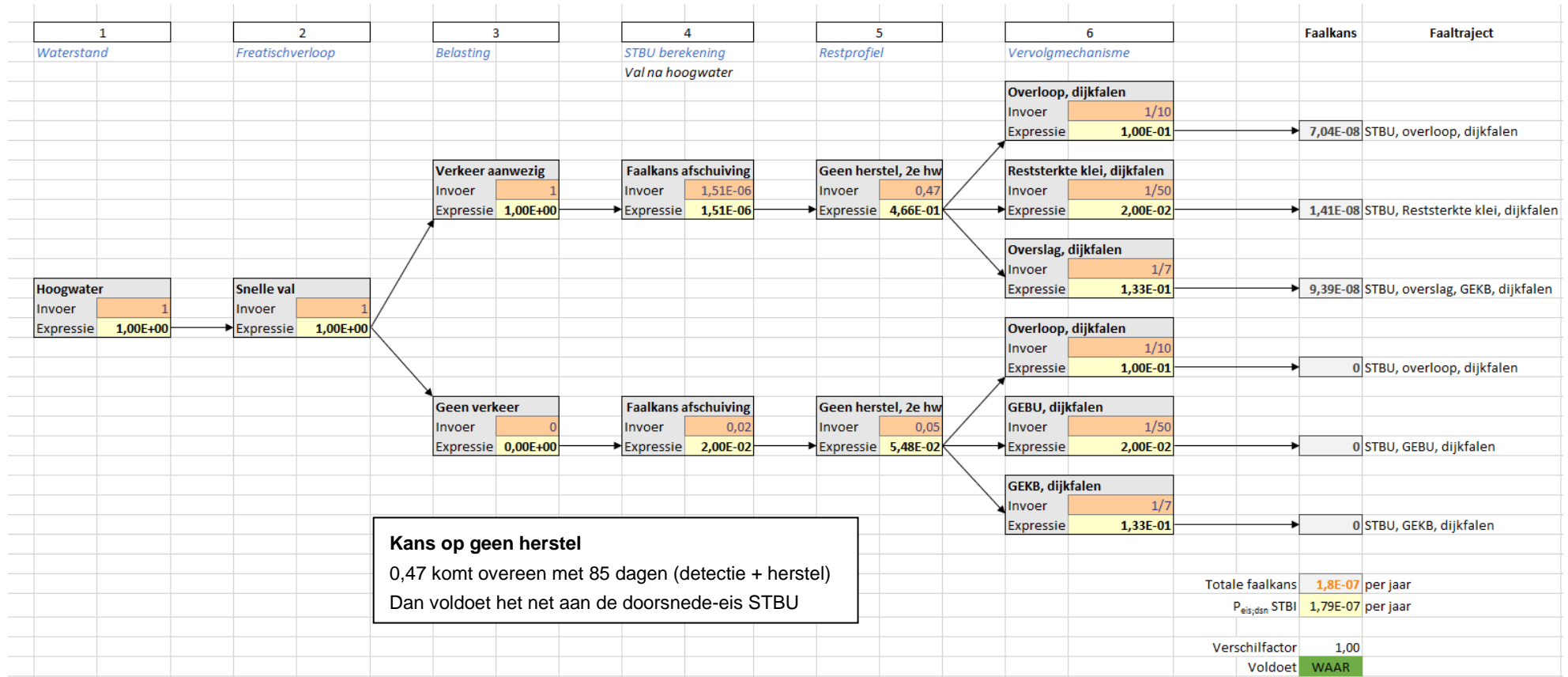
Gevoeligheidsanalyse faalkansenboom - Faaltraject (Extreem laagwater)



Gevoeligheidsanalyse faalkansenboom - Faaltraject (alle kansen 1,0, maximaal detectie en hersteltijd)

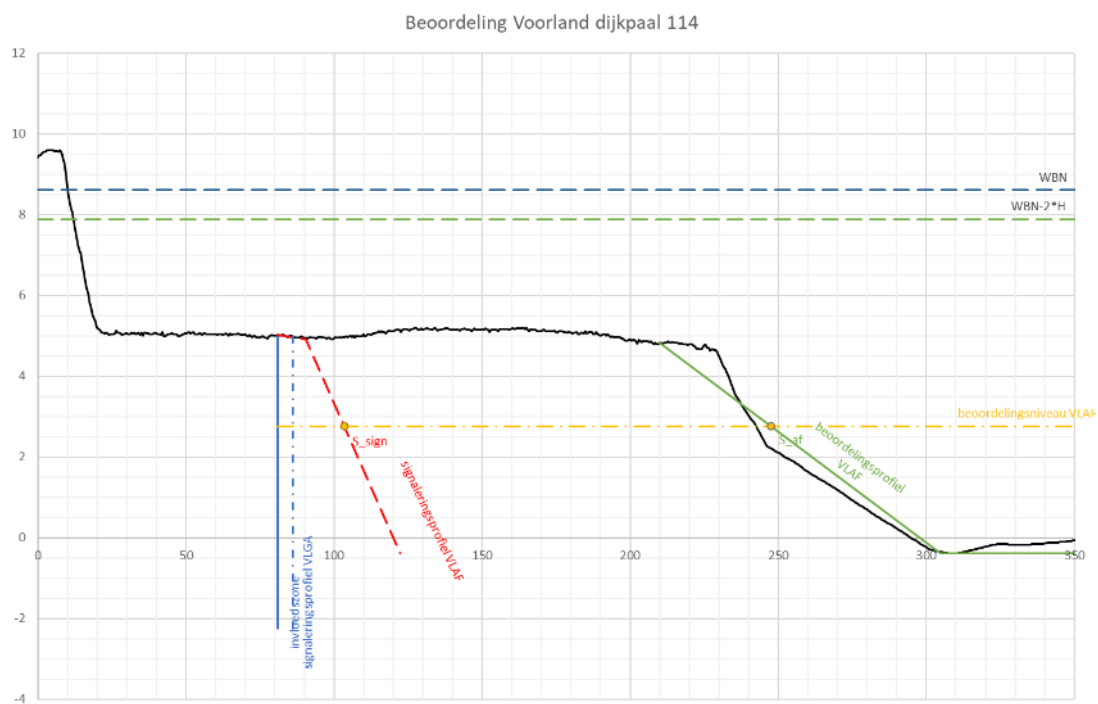


Gevoeligheidsanalyse faalkansenboom - Faaltraject (realistische kansen vervolgemechanismen, maximaal detectie en hersteltijd)

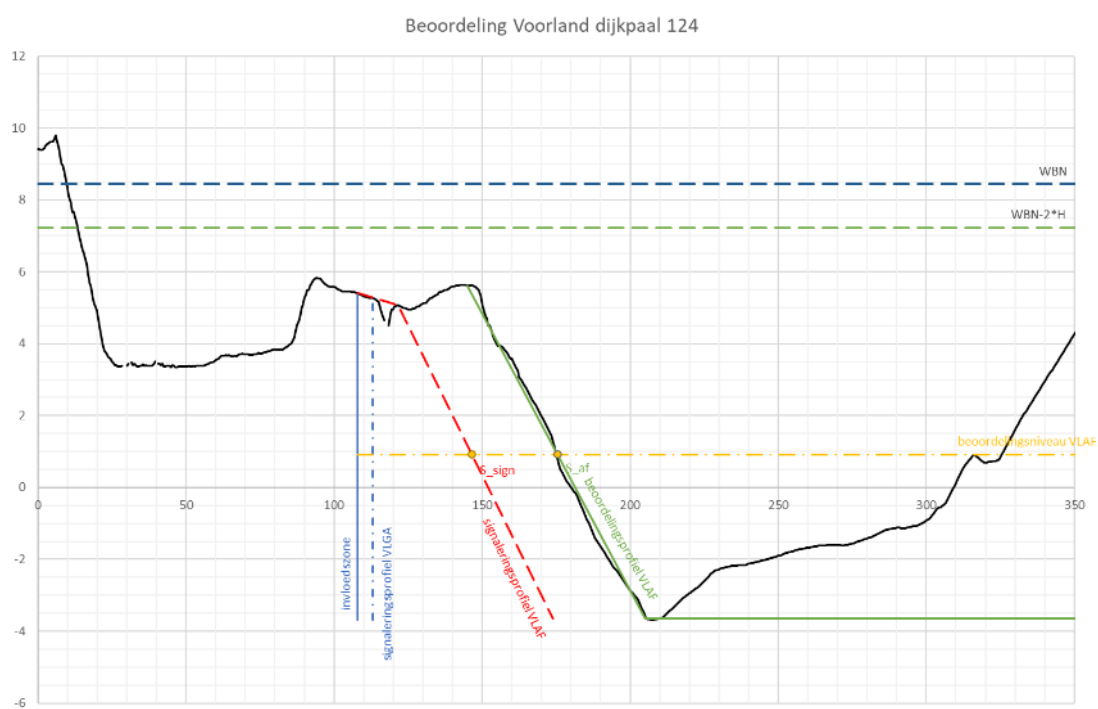


Bijlage F Beoordelingen voorland

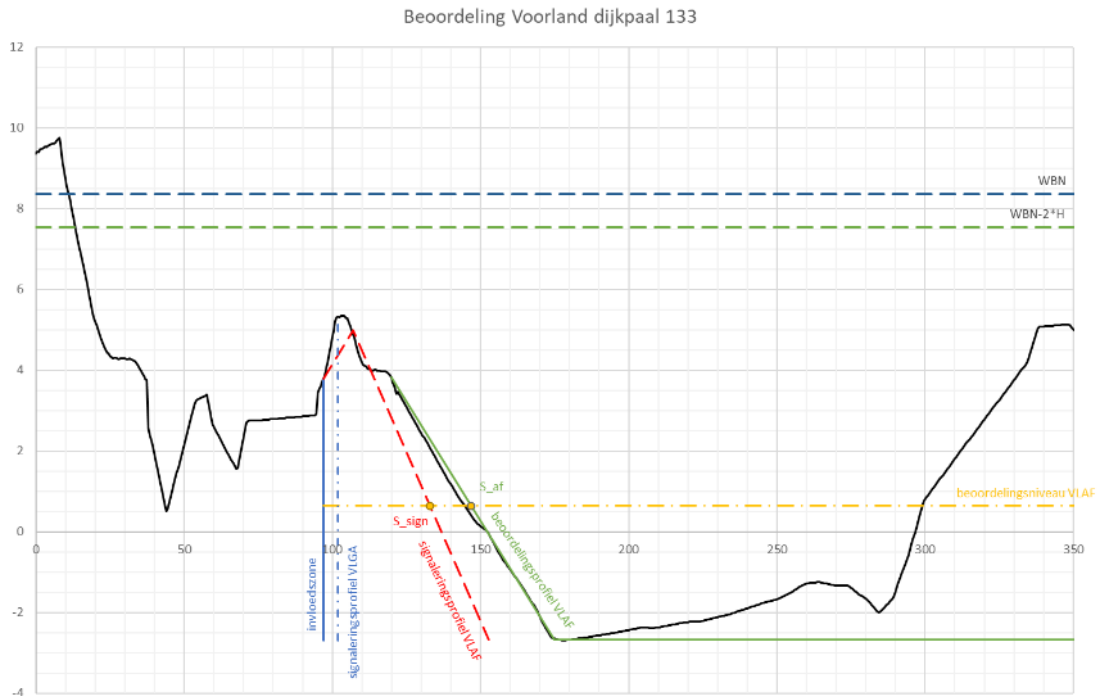
F.1 Dijkpaal 114



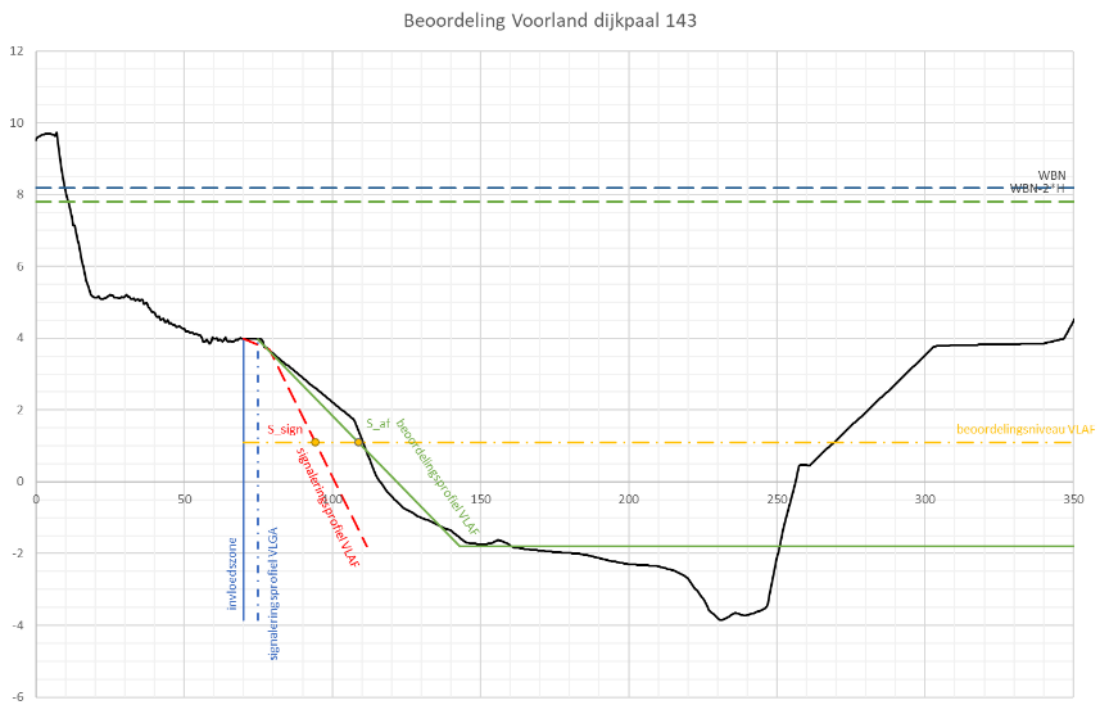
F.2 Dijkpaal 124



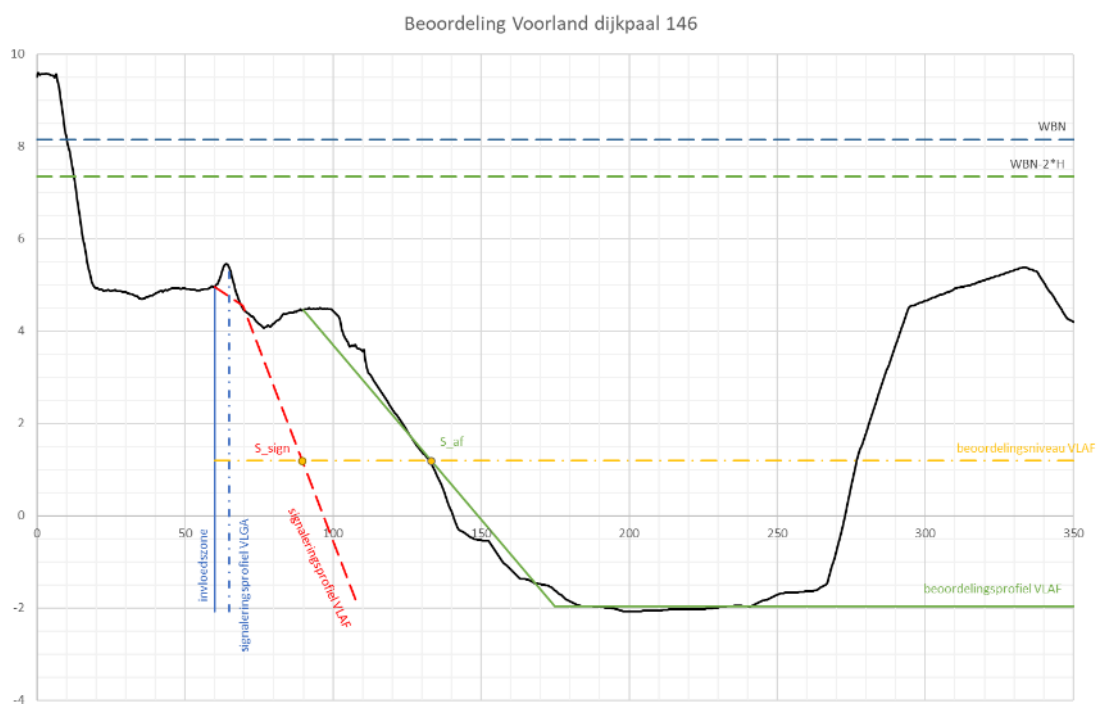
F.3 Dijkpaal 133



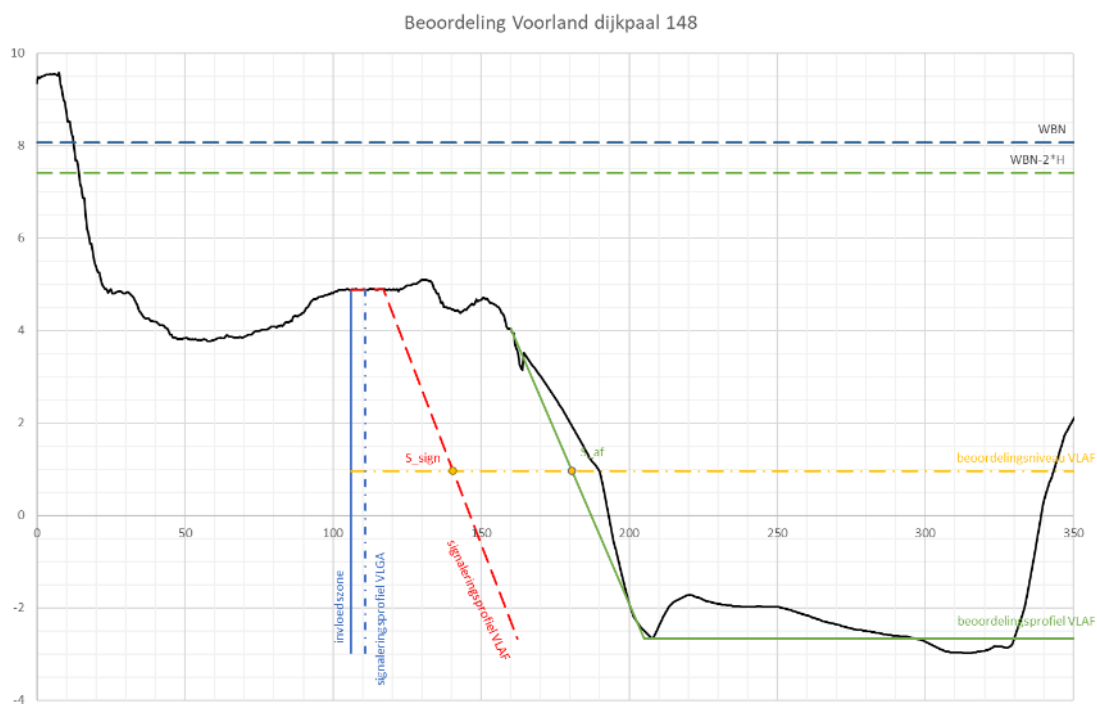
F.4 Dijkpaal 143



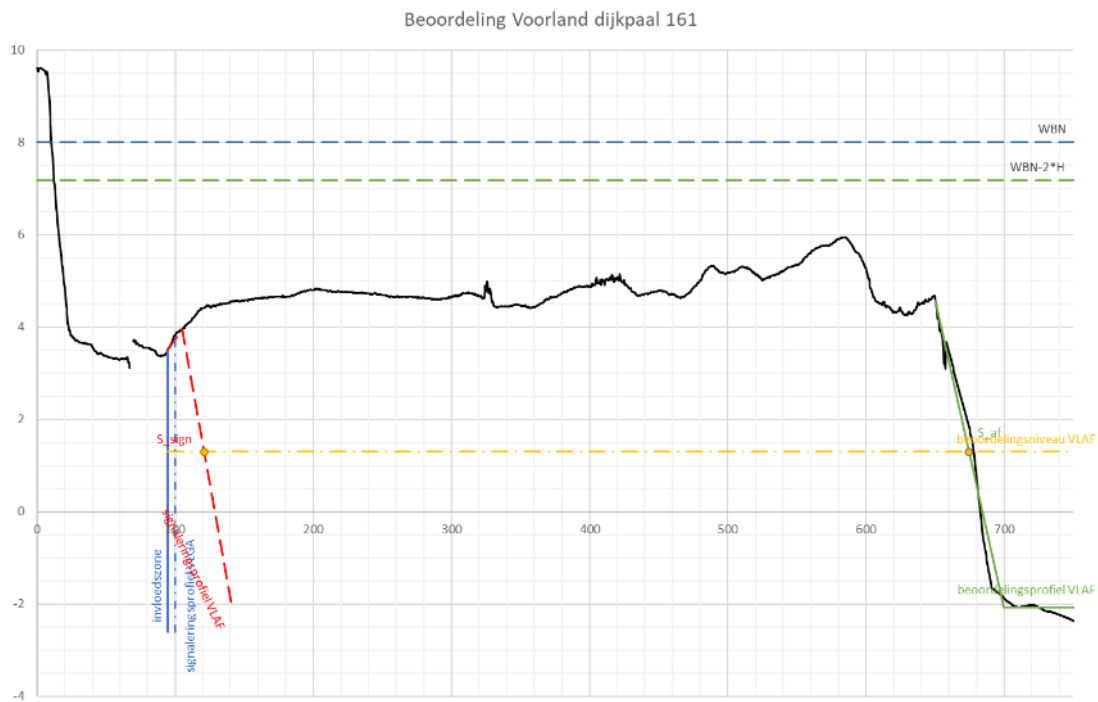
F.5 Dijkpaal 146



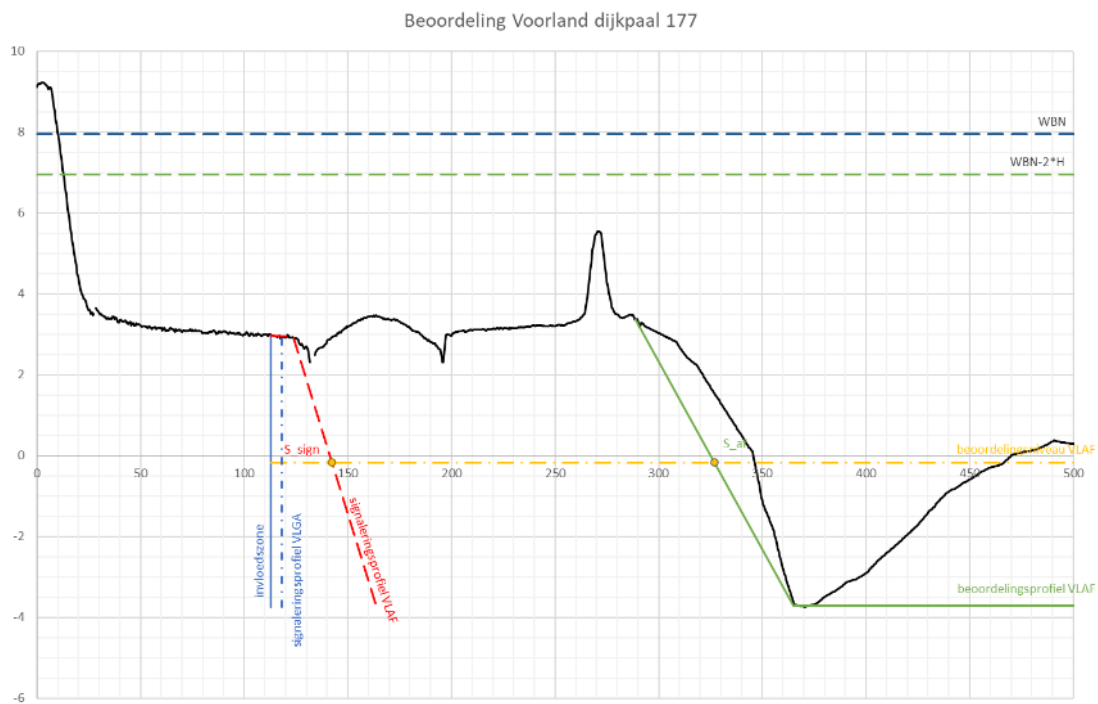
F.6 Dijkpaal 148



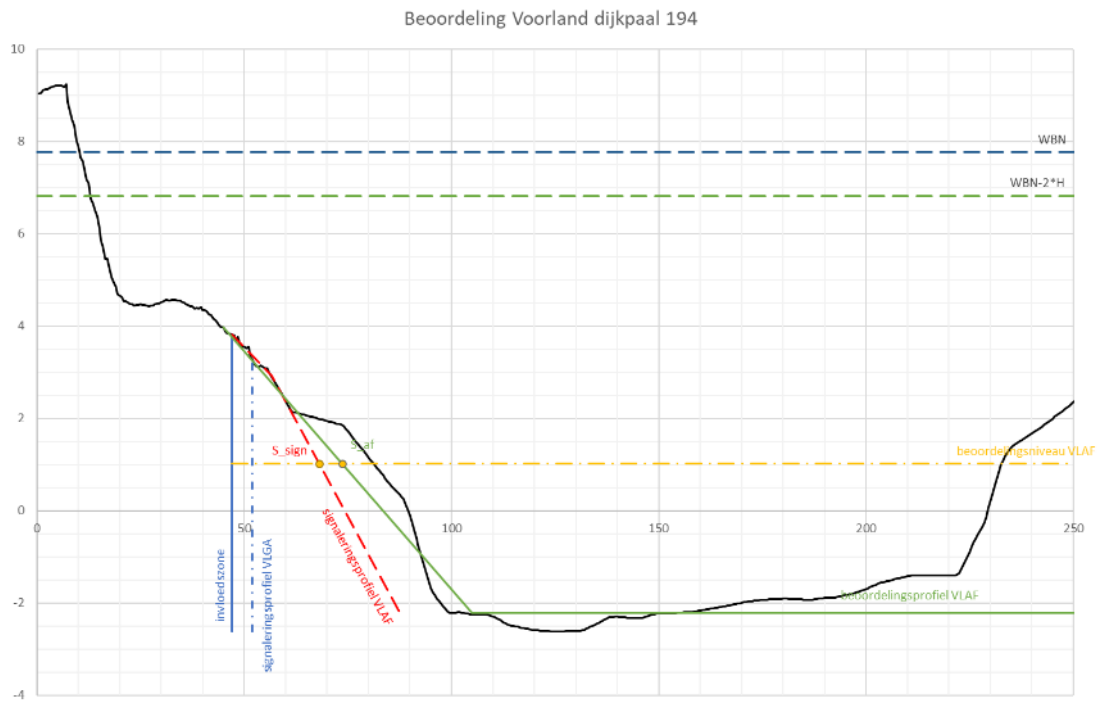
F.7 Dijkpaal 161



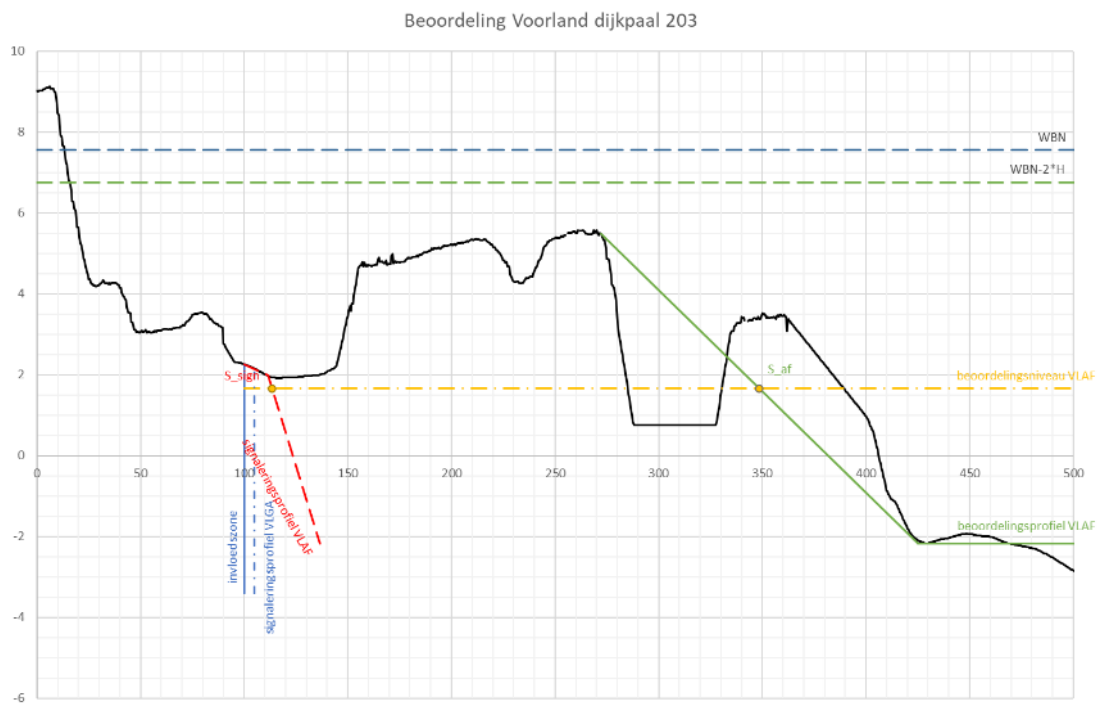
F.8 Dijkpaal 177



F.9 Dijkpaal 194



F.10 Dijkpaal 203



Bijlage G Gevoeligheidsanalyse POP

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op de geoptimaliseerde STBI sommen; DP106, DP113, DP156(diep), DP172(Diep), DP190 en DP196. De hoge en lage POP-waarden zijn bepaald aan de hand van “deskundig oordeel” en is opgesomd in het eerste tabel van Figuur G-1. De gevoeligheid is bepaald ten opzichte van de alternatieve POP-waarden gebruikt in het NKO. Er zijn 4 scenario’s verondersteld waarin steeds het aantal lagen waarin de POP-waarde verhoogd/verlaagd wordt, toeneemt (tabellen 2&3 in Figuur G-1). Hiermee kan de gevoeligheid per laag benaderd worden. De toename vindt plaats van ondiep naar diep.

Voor de sommen gelden de uitgangspunten van het NKO, waarbij alleen de POP-waarde is veranderd. De resultaten zijn gevisualiseerd aan de hand van een Tornado Chart, een balkgrafiek met de oorsprong op de veiligheidsfactor voor “Pop-waarde gebruikt” en de dikte het verschil van de scenario’s. De resultaten en eventuele opmerkingen zijn opgenomen in de volgende paragrafen.

| Laag | Pop waarde laag | Pop waarde, gebruikt | Pop waarde hoog |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| Klei dijksmateriaal ongedraineerd | 17 | 20 | 23 |
| Klei zwaar ongedraineerd | 17 | 20 | 23 |
| Klei licht ongedraineerd | 13 | 15 | 17 |
| Veen ongedraineerd | 7 | 10 | 13 |
| Klei licht onder veen | | 8 | |

Lage waarden

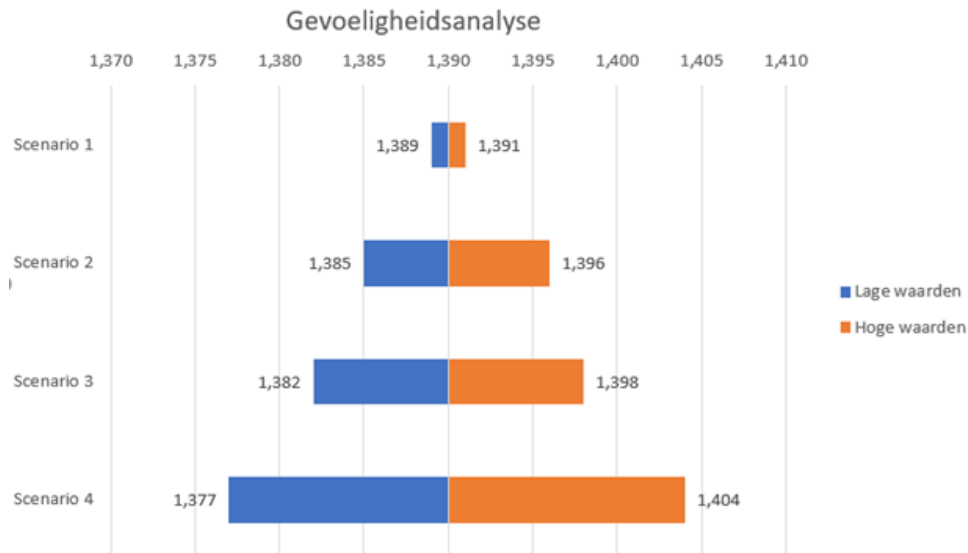
| Laag | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Klei dijksmateriaal ongedraineerd | 17 | 17 | 17 | 17 |
| Klei zwaar ongedraineerd | 20 | 17 | 17 | 17 |
| Klei licht ongedraineerd | 15 | 15 | 13 | 13 |
| Veen ongedraineerd | 10 | 10 | 10 | 7 |
| Klei licht onder veen | 8 | 8 | 8 | 8 |

Hoge waarden

| Laag | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Klei dijksmateriaal ongedraineerd | 23 | 23 | 23 | 23 |
| Klei zwaar ongedraineerd | 20 | 23 | 23 | 23 |
| Klei licht ongedraineerd | 15 | 15 | 17 | 17 |
| Veen ongedraineerd | 10 | 10 | 10 | 13 |
| Klei licht onder veen | 8 | 8 | 8 | 8 |

Figuur G-1: POP-waarden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse.

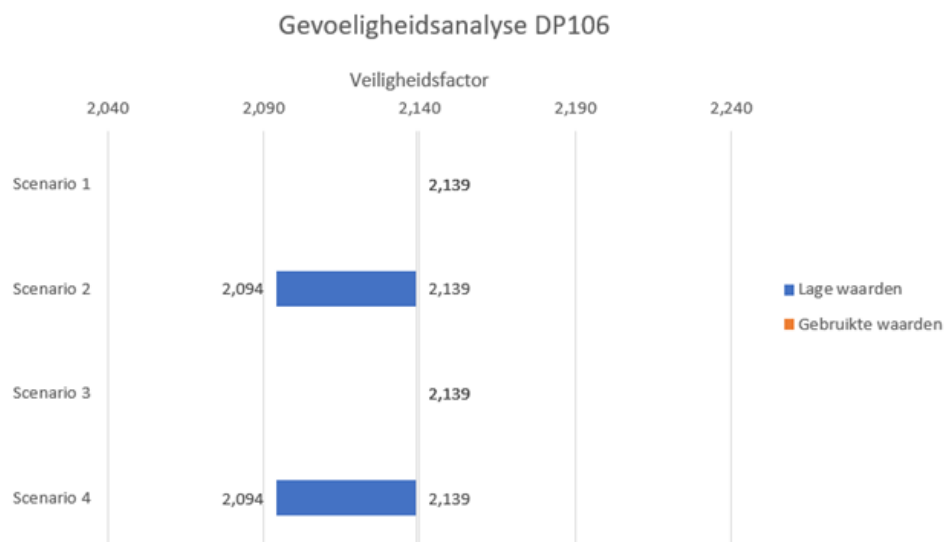
DP190



Een verlaging van alle POP-waarden (scenario 4) resulteert in 0.013 (0.9%) reductie in veiligheidsfactor. Scenario voldoet met 1.377 aan de eis van 1.37.

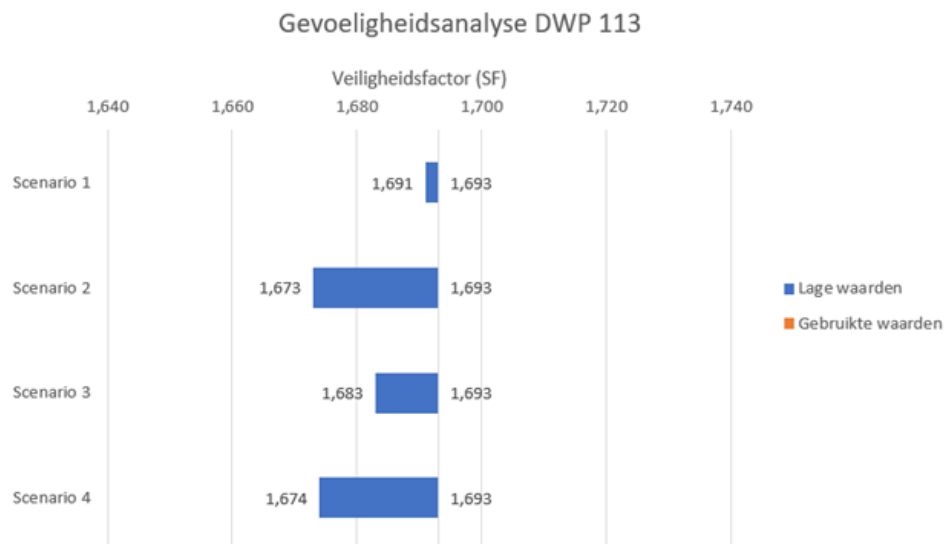
De grafiek is symmetrisch. Dit impliceert dat een eenzelfde verhoging en verlaging van de POP-waarden dezelfde verhoging of verlaging van de veiligheidsfactor veroorzaakt. Daarom is er voor de andere dwarsprofielen een analyse met alleen de lage waarden voldoende bevonden.

DP106



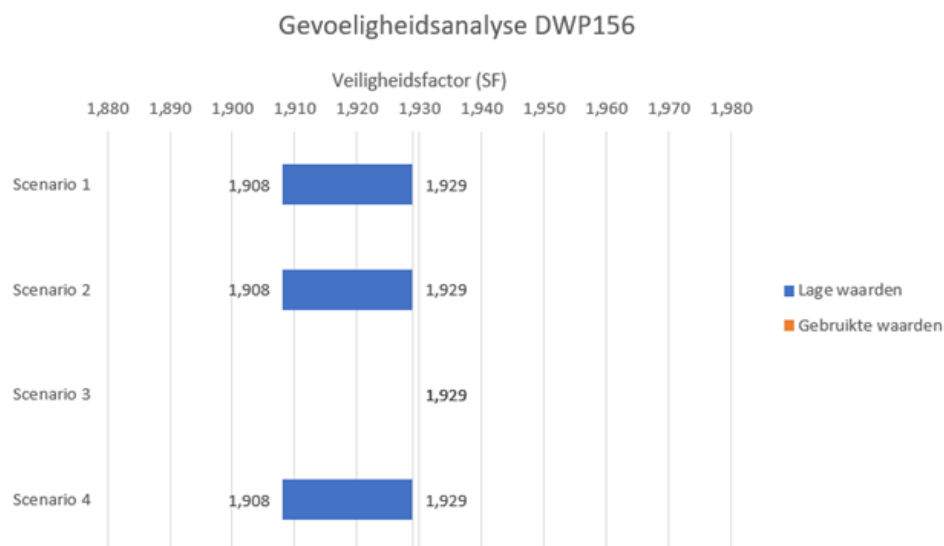
Klei, zwaar ongedraineerd is de enige laag waar het glijvlak door loopt. Scenario's 1&3 zijn niet uitgevoerd, omdat er geen Dijkmateriaal ongedraineerd en Klei licht ongedraineerd is geschematiseerd. De verlaging van de POP waarde resulteerde in een reductie van 0.045 (2,1%) in veiligheidsfactor.

DP113



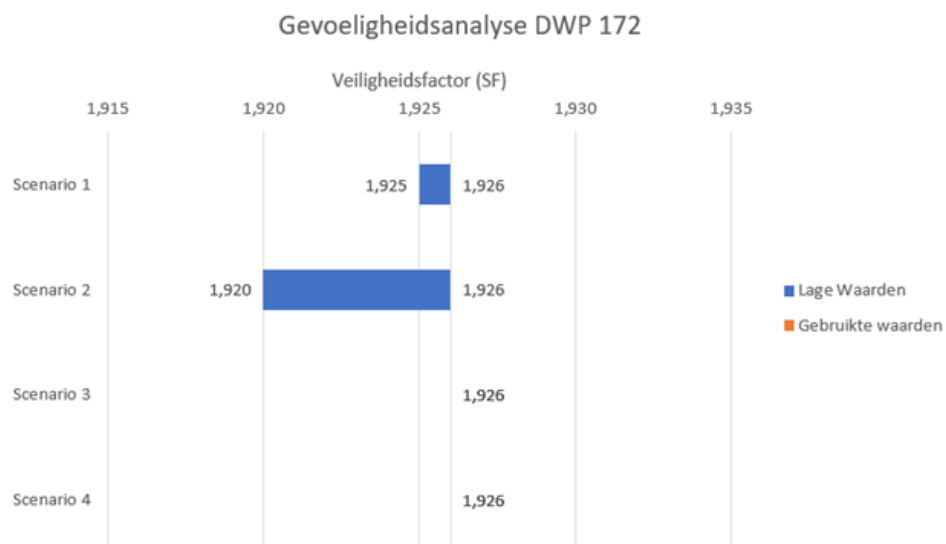
In scenario 2 is het glijvlak met de laagste veiligheidsfactor bepaald. Deze heeft een verschil van 0.020 (1.2%) ten opzichte van de som met de waarden gebruikt in het NKO.

DP156 (diep)



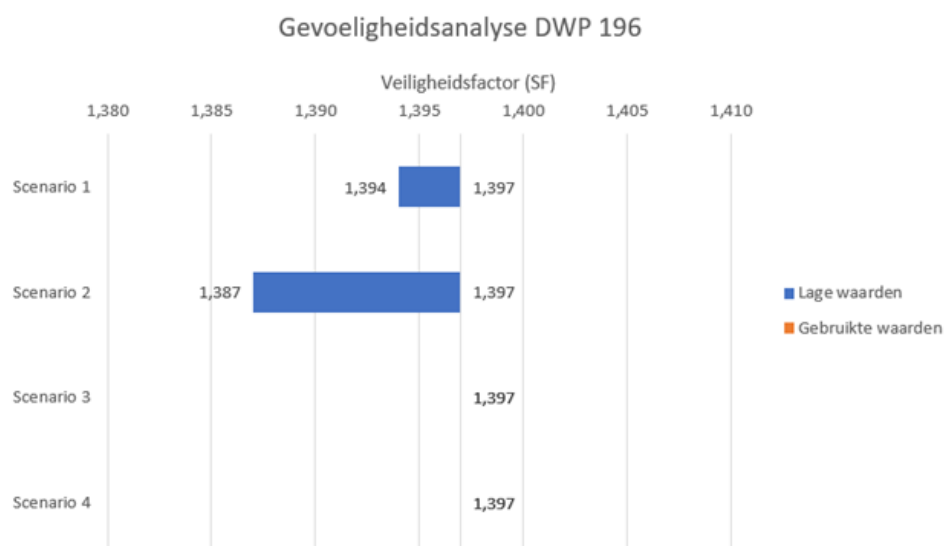
Dijksmateriaal ongedraineerd is de enige SHANSEP laag waar het glijvlak door loopt. Scenario 3 is niet beschouwd, omdat klei licht ongedraineerd niet is geschemtiseerd. De verlaging van de POP-waarde resulteerde in een reductie van 0.021 (1.1%) in veiligheidsfactor.\

DP172(Diep)



Scenario's 3&4 zijn niet beschouwd, omdat veen ongedraineerd en Klei licht ongedraineerd niet voorkomen in de schematisatie. De reductie van de POP-waarden resulteert in een reductie van 0.006(0,3%) in veiligheidsfactor.

DP196 (diep)



Scenario's 3&4 zijn niet beschouwd, omdat veen ongedraineerd en Klei licht ongedraineerd niet voorkomen in de schematisatie. De reductie van de POP-waarden resulteert in een reductie van 0.01(0,7%) in veiligheidsfactor.

Bijlage H Resultaten reststerkte analyse GEBU

| Dwarspro- fiel | Water- stand [mNAP] | Golf- hoogte [m] | Piekperi- ode [s] | Haakse In- scha- ringslengte [m] | Rest- breedte [m] | Kruin Breedte [m] | Talud Buiten |
|-------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|---|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| 117 | 8 | 0.74 | 3.31 | 0.39 | 6.8 | 7 | 4.32 |
| 118 | 7.5 | 0.84 | 3.51 | 0.77 | 2.9 | 5 | 3.53 |
| 119 | 8 | 0.81 | 3.51 | 0.68 | 1.5 | 4 | 3.67 |
| 120 | 7.5 | 0.85 | 3.55 | 0.97 | 1.3 | 5 | 3.09 |
| 121 | 7.5 | 0.95 | 3.78 | 0.93 | 1.9 | 4.5 | 3.78 |
| 122 | 7.5 | 0.82 | 3.49 | 0.74 | 2.2 | 4.5 | 3.49 |
| 123 | 7.5 | 0.82 | 3.47 | 0.79 | 4.3 | 7 | 3.33 |
| 124 | 7 | 1.08 | 3.62 | 1.52 | 1.9 | 7 | 2.80 |
| 125 | 7.5 | 0.93 | 3.73 | 0.69 | 4.9 | 5.5 | 4.40 |
| 126 | 7.5 | 0.95 | 3.75 | 1.20 | 1.7 | 6 | 3.13 |
| 127 | 7 | 0.92 | 3.69 | 1.42 | 0.8 | 6 | 2.59 |
| 128 | 7 | 0.92 | 3.68 | 1.21 | 2.1 | 6 | 2.96 |
| 129 | 6.5 | 1.003 | 3.4722 | 1.24 | 0.6 | 7.5 | 2.94 |
| 130 | 7.5 | 0.69 | 3.19 | 0.57 | 4.6 | 7 | 3.06 |
| 131 | 7 | 0.89 | 3.61 | 1.05 | 4.3 | 7.5 | 3.12 |
| 132 | 7 | 0.89 | 3.6 | 0.96 | 4.0 | 6.5 | 3.31 |
| 133 | 7 | 0.88 | 3.59 | 0.98 | 5.7 | 8.5 | 3.21 |
| 134 | 7.5 | 0.88 | 3.59 | 1.09 | 3.2 | 7.5 | 2.97 |
| 135 | 7 | 0.9 | 3.62 | 1.10 | 4.3 | 8 | 3.05 |
| 136 | 7 | 0.9 | 3.61 | 1.01 | 4.3 | 7.5 | 3.23 |
| 137 | 7 | 0.9 | 3.61 | 1.19 | 2.8 | 7 | 2.87 |
| 138 | 7 | 0.87 | 3.56 | 1.02 | 4.1 | 7.5 | 3.05 |
| 139 | 7 | 0.84 | 3.49 | 0.90 | 4.6 | 7.5 | 3.16 |
| 140 | 7 | 0.86 | 3.52 | 0.94 | 14.9 | 18 | 3.16 |
| 141 | 7 | 0.8 | 3.39 | 0.77 | 5.8 | 8 | 3.23 |
| 142 | 7.5 | 0.77 | 3.33 | 0.79 | 4.3 | 7.5 | 2.97 |
| 143 | 7.5 | 0.77 | 3.33 | 0.82 | 3.6 | 7 | 2.91 |
| 144 | 7 | 0.78 | 3.32 | 0.72 | 4.2 | 6.5 | 3.21 |
| 145 | 7 | 0.76 | 3.29 | 0.70 | 4.8 | 7 | 3.13 |
| 146 | 7 | 0.75 | 3.24 | 0.74 | 4.4 | 7 | 2.92 |
| 147 | 6.5 | 1.02 | 3.87 | 1.57 | 2.6 | 7.5 | 2.79 |
| 148 | 7 | 0.93 | 3.7 | 1.07 | 3.9 | 7 | 3.29 |
| 149 | 7 | 0.95 | 3.75 | 1.28 | 4.8 | 9 | 2.97 |
| 150 | 7 | 0.93 | 3.73 | 1.12 | 5.2 | 8.5 | 3.22 |
| 151 | 7 | 0.94 | 3.76 | 1.21 | 4.0 | 8 | 3.10 |
| 152 | 7 | 0.89 | 3.62 | 0.92 | 5.6 | 8 | 3.43 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|
| 153 | 6.5 | 1.02 | 3.93 | 1.51 | 3.4 | 8 | 2.94 |
| 154 | 6.5 | 1.02 | 3.51 | 0.25 | 3.2 | 8 | 7.00 |
| 155 | 6.5 | 1.01 | 3.49 | 1.51 | 2.0 | 7.5 | 2.53 |
| 156 | 6.5 | 1.08 | 3.65 | 1.55 | 2.2 | 7 | 2.79 |
| 157 | 6.5 | 1.15 | 4.1 | 1.76 | 2.0 | 7 | 3.02 |
| 158 | 6.5 | 1.18 | 4.16 | 1.71 | 2.9 | 7.5 | 3.18 |
| 159 | 6.5 | 1.18 | 4.15 | 1.99 | 2.0 | 8 | 2.79 |
| 160 | 6.5 | 1.22 | 4.23 | 1.98 | 2.6 | 8.5 | 2.93 |
| 161 | 7 | 0.85 | 3.54 | 0.94 | 4.2 | 7 | 3.16 |
| 162 | 7 | 0.97 | 3.83 | 1.13 | 4.1 | 7 | 3.43 |
| 163 | 6.5 | 1.08 | 4.02 | 1.50 | 1.7 | 6 | 3.20 |
| 164 | 6.5 | 1.15 | 4.11 | 1.52 | 2.4 | 6.5 | 3.37 |
| 165 | 6.5 | 1.15 | 4.11 | 2.17 | 0.3 | 7.5 | 2.48 |
| 166 | 6.5 | 1.21 | 4.22 | 1.81 | 2.0 | 7.5 | 3.13 |
| 167 | 6.5 | 1.21 | 4.22 | 1.88 | 1.0 | 7 | 3.03 |
| 168 | 6.5 | 1.04 | 3.91 | 1.72 | 3.5 | 9.5 | 2.65 |
| 169 | 6.5 | 1.05 | 3.92 | 1.47 | 2.4 | 7 | 3.08 |
| 170 | 6.5 | 1.07 | 3.98 | 1.43 | 2.4 | 6.5 | 3.26 |
| 171 | 6.5 | 1.08 | 3.99 | 1.48 | 2.7 | 7 | 3.21 |
| 172 | 6.5 | 1.07 | 3.96 | 1.43 | 2.7 | 7 | 3.24 |
| 173 | 6.5 | 1.06 | 3.94 | 1.31 | 3.0 | 6.5 | 3.42 |
| 174 | 6.5 | 1.06 | 3.94 | 1.41 | 2.9 | 7 | 3.23 |
| 175 | 6.5 | 1.02 | 3.89 | 1.44 | 4.9 | 9.5 | 3.03 |
| 176 | 6.5 | 0.98 | 3.46 | 1.20 | 3.5 | 7.5 | 2.95 |
| 177 | 7 | 0.85 | 3.59 | 0.89 | 4.1 | 7 | 3.31 |
| 178 | 7 | 0.75 | 3.41 | 0.65 | 4.7 | 7 | 3.38 |
| 179 | 7 | 0.75 | 3.4 | 0.72 | 3.7 | 6.5 | 3.15 |
| 180 | 6.5 | 0.84 | 3.24 | 0.91 | 3.2 | 6.5 | 2.87 |
| 181 | 7 | 0.71 | 3.31 | 0.65 | 7.8 | 10.5 | 3.06 |
| 182 | 8 | 0.33 | 2.02 | 0.06 | 5.3 | 7 | 3.44 |
| 183 | 7 | 0.67 | 3.25 | 0.54 | 4.0 | 6.5 | 3.09 |
| 184 | 8 | 0.26 | 2.05 | 0.23 | 3.8 | 6 | 3.58 |
| 185 | 7 | 0.65 | 3.23 | 0.46 | 5.1 | 7 | 3.25 |
| 186 | 7 | 0.65 | 3.23 | 0.43 | 7.3 | 9 | 3.36 |
| 187 | 5 | 0.79 | 3.16 | 0.21 | 4.3 | 8.5 | 5.99 |
| 188 | 7 | 0.62 | 3.13 | 0.39 | 5.5 | 7 | 3.21 |
| 189 | 7.5 | 0.54 | 2.57 | 0.13 | 6.5 | 7.5 | 3.47 |
| 190 | 7 | 0.6 | 3.07 | 0.36 | 5.0 | 6.5 | 3.13 |
| 191 | 7 | 0.61 | 3.11 | 0.35 | 5.0 | 6.5 | 3.29 |
| 192 | 7 | 0.59 | 3.07 | 0.30 | 6.1 | 7 | 3.34 |
| 193 | 6 | 0.72 | 3.02 | 0.72 | 4.7 | 7.5 | 2.62 |
| 194 | 6.5 | 0.66 | 2.85 | 0.48 | 4.5 | 6.5 | 2.81 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|------|------|------|-----|-----|------|
| 195 | 6.5 | 0.66 | 2.84 | 0.46 | 4.2 | 6 | 2.87 |
| 196 | 5.5 | 0.88 | 3.32 | 0.89 | 4.7 | 6 | 3.15 |
| 197 | 5.5 | 0.88 | 3.32 | 1.03 | 4.3 | 7 | 2.84 |
| 198 | 6 | 0.79 | 3.15 | 0.73 | 4.8 | 6.5 | 3.05 |
| 199 | 7.5 | 0.37 | 2.14 | 0.02 | 4.8 | 6 | 2.94 |
| 200 | 6.5 | 0.65 | 2.82 | 0.48 | 4.4 | 6.5 | 2.73 |
| 201 | 6.5 | 0.77 | 3.08 | 0.78 | 3.0 | 6 | 2.76 |
| 202 | 6.5 | 0.74 | 3.32 | 0.73 | 4.2 | 6.5 | 2.98 |
| 203 | 6.5 | 0.74 | 3.33 | 0.71 | 4.6 | 7 | 3.06 |

Bijlage I Resultaten reststerkte analyse GEBU

