Veiligheid overige keringen Sint-Oedenrode

Rapportage

Waterschap De Dommel

mei 2021

Titel:	Veiligheid overige keringen Droge Voeten Sint-Oedenrode
Subtitel:	Rapportage
Versie:	2.0
Document nr.:	010-19-BWZ
Datum uitgave:	19 mei 2021
Aantal pagina's exclusief bijlage:	22
Naam en adres opdrachtgever:	Waterschap De Dommel Contactpersoon: dhr. M. van den Broek Bosscheweg 56, 5283 WB Boxtel postbus 10.001
Samenstellers:	ing. R.M. (Robin) Crooij ir. L. (Levinus) Boxhoorn (kwaliteitsborging)
Externe kwaliteitsborging	Waterschap Aa en Maas
Projectleider:	ir. J.W. van Zanten
Akkoord voor uitgave:	ing. E.A. (Edwin) van Mameren
Paraaf:	

Kantoorboerderij Rustenburg
Lekdijk 15 | 4121 KG Everdingen
www.bwz-ingenieurs.nl

Ingeschreven in het handelsregister van de Kamer van Koophandel te Tiel onder nr. 30232690

Voorwoord

Het project Droge Voeten Sint-Oedenrode heeft als doel de waterveiligheid van de inwoners van Sint-Oedenrode te kunnen waarborgen. Dit wordt in dit project gerealiseerd door te komen tot een gedragen ontwerp dat is vastgelegd in een vastgesteld Projectplan Waterwet (PPWW). Omdat dit grote gevolgen heeft voor de toekomstige inrichting van de kern van het dorp bepalen participatie en inpassing dan ook in grote mate het succes van het project (Waterschap De Dommel, 2018)

Verkennend onderzoek (2018) heeft aangetoond dat diverse oevers en regionale waterkeringen over onvoldoende hoogte beschikken. Deze rapportage gaat in op de randvoorwaarden, veiligheid en inpasbaarheid van het ontwerp van de overige keringen Sint-Oedenrode. In dit document is beschreven:

- Welke locaties zijn aangewezen waar sprake is van hoogtetekort;
- De gestelde randvoorwaarden aan een overige waterkering;
- Technische uitwerking op basis van principeprofielen;
- Het ruimtebeslag voor het ophogen van de overige waterkeringen;
- De berekende stabiliteit van de ingepaste oplossingen.

Inhoud

Voorwoord ..... **iii**
1 Inleiding **1**
2 Achtergrond: Ruimte voor de Dommel **2**
2.1 Hydraulische beoordeling voorkeursvariant planfase 2018 2
2.2 Optimalisatie van de voorkeursvariant 4
2.3 Gevoeligheidsanalyse op de geoptimaliseerde voorkeursvariant 6
3 Bodemopbouw **8**
4 Randvoorwaarden overige waterkering **10**
5 Hoogteopgave **12**
6 Stabiliteit en optimalisatie **13**
6.1 Uitgangspunten en aanpak 14
7 Resultaten en ontwerpscenario's **18**
7.1 Ontwerpscenario's 18
8 Conclusies en aanbevelingen **21**
9 Verwijzingen **22**
Bijlage 1. VO ..... **v**
Bijlage 2. Stabiliteitsberekeningen ..... **vi**
2.1 Stabiliteitsberekening Lindendijk vi
2.2 Stabiliteitsberekening De Jongsingel / Brockstraat x
2.3 Stabiliteitsberekening IJsvogel xii
2.4 Stabiliteitsberekening Odapad xiv

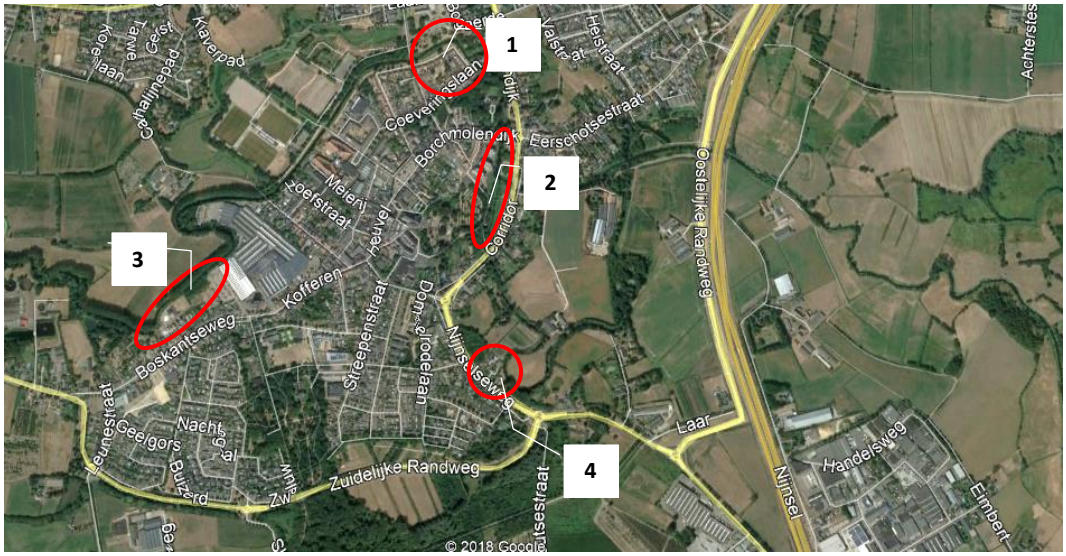
1 Inleiding

Waterschap De Dommel is verantwoordelijk voor de waterveiligheid van de inwoners binnen het beheergebied. In de huidige situatie kan dit niet worden waargemaakt en dient actie te worden ondernomen om de waterveiligheid van de inwoners te waarborgen. Op basis van verschillende onderzoeken is op bestuurlijk niveau gekozen om ruimte te creëren voor de Dommel binnen de bebouwde kern van Sint-Oedenrode. Door op verschillende locaties het doorstroomprofiel van de Dommel te vergroten wordt voldoende waterstandsverlaging behaald waardoor inundaties binnen de bebouwde kom niet meer zullen optreden. Het bottleneck-effect in Sint-Oedenrode wordt daarmee opgelost.

Enkele locaties behoeven extra aandacht, omdat uit de modelberekeningen (HKV, 2019) blijkt dat tijdens een hoogwatergolf hier onvoldoende waterstandsverlaging zal optreden en alsnog lokaal inundatie kan optreden. Het gaat hierbij om de locaties (Figuur 1):

- **(1)** Lindendijk, Brockstraat en de Jongsingel;
- **(2)** Odapad, Sluisplein en Sluisstraat (oever)
- **(3)** IJsvogel;
- **(4)** Nijnselseweg.

Het doel van dit onderzoek is ten eerste, aan de hand van nieuw verkregen inzichten, te beoordelen tot welk niveau de huidige keringen voldoen aan de eisen vanuit het beleid van Waterschap De Dommel voor overige keringen. Voor de keringen die niet aan deze eisen voldoen, geldt als doel randvoorwaarden af te leiden en een ruimtelijk inpasbaar ontwerp op te stellen



Figuur 1: Locaties waar potentieel inundatie optreedt

2 Achtergrond: Ruimte voor de Dommel

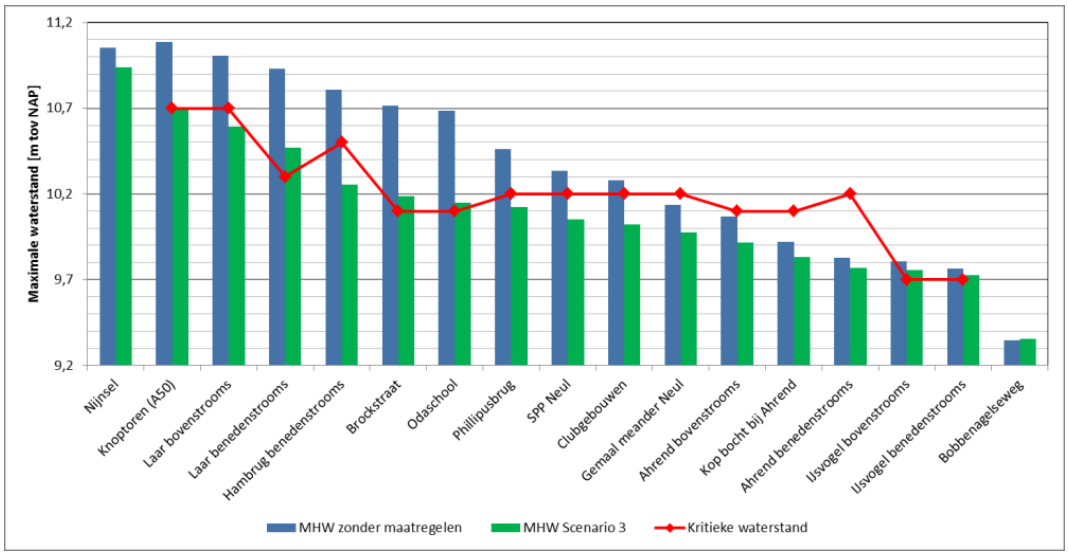
Naar aanleiding van voorgaand onderzoek heeft het bestuur van Waterschap De Dommel gekozen voor een voorkeursalternatief waarbij de bebouwde kern van Sint-Oedenrode beschermt is tegen een hoogwatergolf die eens in de 100 jaar voorkomt. In dit voorkeursalternatief wordt binnen Sint-Oedenrode ruimte gecreëerd voor de Dommel. Op verschillende locaties wordt het doorstroomprofiel vergroot en worden meanders kortgesloten middels een hoogwatergeul (zie Figuur 2).

Figuur 2: Voorkeursvariant: "Ruimte voor de Dommel in Sint-Oedenrode" (IV-Infra, 2018).

2.1 Hydraulische beoordeling voorkeursvariant planfase 2018

Genoemd voorkeursalternatief is met behulp van een SOBEK-model doorgerekend op basis van een door het KNMI bepaalde afvoer die hoort bij een terugkeertijd van 100 jaar (T=100 belasting), volgens klimaatscenario 'sterke temperatuurstijging (warm), hoge waarde luchtstromen' (WH). Dit heeft geresulteerd in een berekende maatgevend hoogwater in de Dommel, zie (IV-Infra, 2018). Figuur 3 laat zien dat het berekende maatgevend hoogwater (MHW) groter is dan de gedefinieerde kritieke waterstand. Theoretisch houdt dat in dat op deze locaties inundaties zullen ontstaan tijdens een hoogwatergolf T=100. Het gaat hierbij om de zogenoemde rekenpunten:

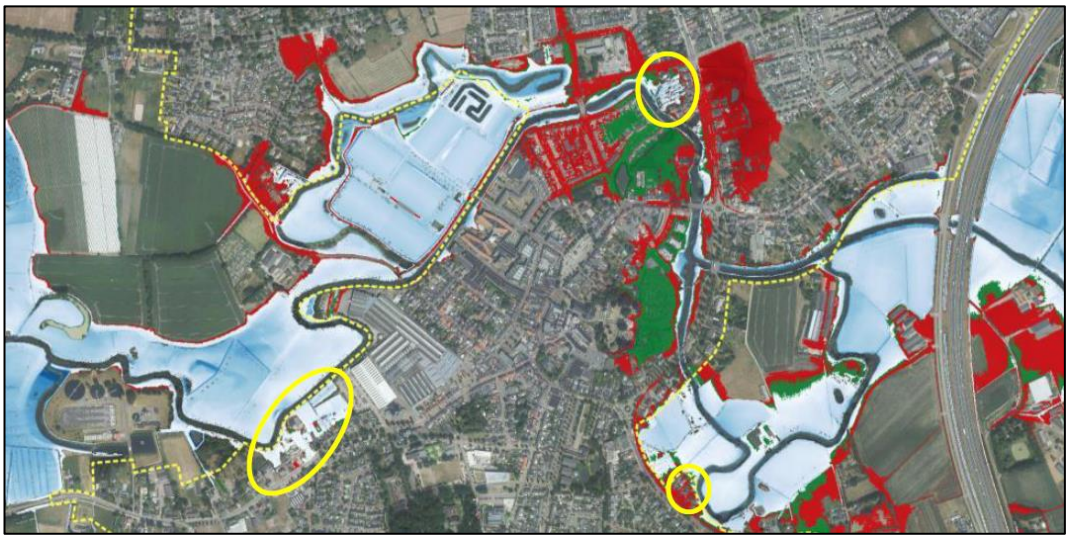
- Laar benedenstrooms *(Kering Nijnselseweg)*;
- Brockstraat en Odaschool *(Kering Lindendijk)*;
- IJsvogel bovenstrooms *(Kering IJsvogel)*.



Figuur 3: Berekende MHW's per locatie bij het voorkeursvariant "Ruimte voor de Dommel" (IV-Infra, 2018)

Daarnaast dient het watersysteem klimaat robuust te zijn. Dat betekent dat de Dommel minimaal een T=100 afvoergolf zonder inundaties moet afvoeren inclusief een afvoertoeslag van 10 procent. Deze toeslag heeft een waterstandstoename op de Dommel als gevolg.

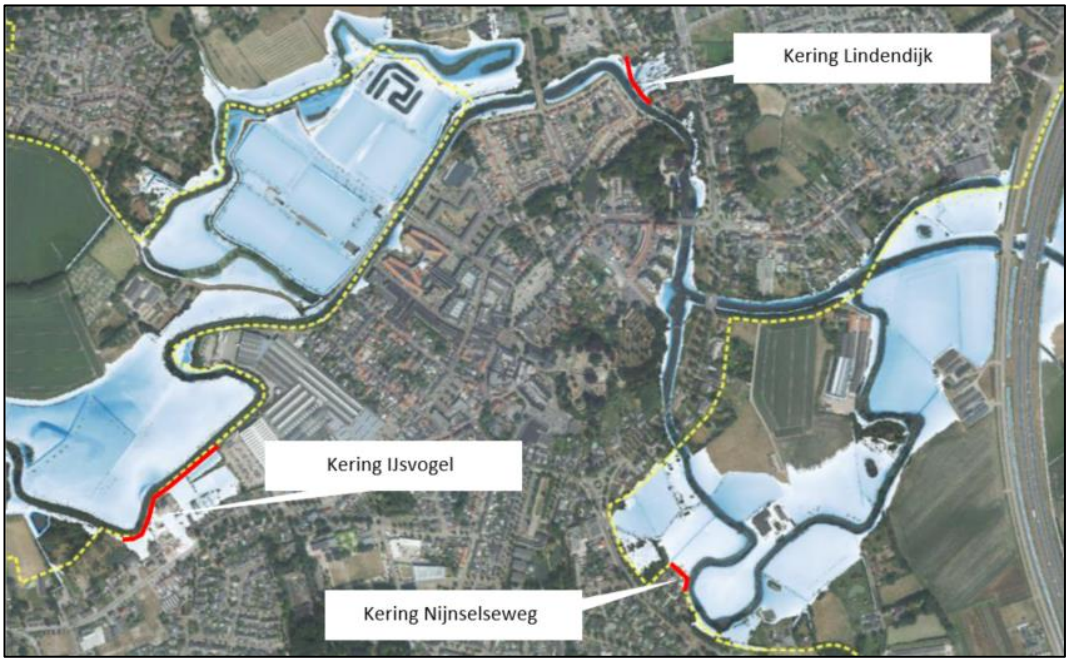
Figuur 4 laat de inundatiegebieden, en de omvang hiervan, zien bij een afvoergolf van T100 na de inrichting van de voorkeursvariant “Ruimte voor de Dommel in Sint-Oedenrode" (IV-Infra, 2018). De gele cirkels geven de locaties aan waar het water vanuit de Dommel tot aan de woningen reikt. Om deze reden behoeven deze locaties dan ook extra aandacht. In het rapport van IV-Infra wordt benoemd dat de windeffecten op deze resultaten niet zijn meegenomen.



Figuur 4: Resterende inundaties in Sint-Oedenrode na toepassing van scenario 3. Rood = oorspronkelijke inundaties / geel omcirkeld = resterende knelpunten (IV-Infra, 2018).

Uit de onderzoeksresultaten blijkt dat een kering voor de drie aangewezen plekken de beste oplossing is om inundatie bij een T=100 afvoer te voorkomen (zie Figuur 5). Door een kering langs de Lindendijk te plaatsen worden de woningen 7 t/m 19 tegen hoogwater beschermd. Een overige waterkering langs de IJsvogel voorkomt dat huisnummer 13A en 13B inunderen.

In overleg met de grondeigenaar bij de Nijnselseweg zal, los van dit project, een lokale grondophoging worden gerealiseerd en spreekt men niet over een (overige) waterkering. Om deze reden is de oplossing voor deze locatie in onderhavig onderzoek buiten beschouwing gelaten.



Figuur 5: Keringen voorkeursvariant "Ruimte voor de Dommel" afkomstig uit het vooronderzoek in 2018 (IV-Infra, 2018)

2.2 Optimalisatie van de voorkeursvariant

Op basis van voortschrijdend inzicht is door Iv-Infra, in een overleg met waterschap De Dommel, de voorkeursvariant “Ruimte voor de Dommel in Sint-Oedenrode" geoptimaliseerd (Iv-Infra, 2019). Per inrichtingsmaatregel is afgewogen welke aanpassingen wenselijk, realistisch of noodzakelijk zijn. Bij deze beslissingen zijn de volgende argumenten gehanteerd:

- De aanpassing moet inpasbaar zijn in de omgeving;
- Combinatie van aanpassingen moet resulteren in een nagenoeg vergelijkbare verlaging van maximale waterstanden als de huidige voorkeursvariant;
- Potentiële ecologische verbeteringen van bepaalde optimalisaties.

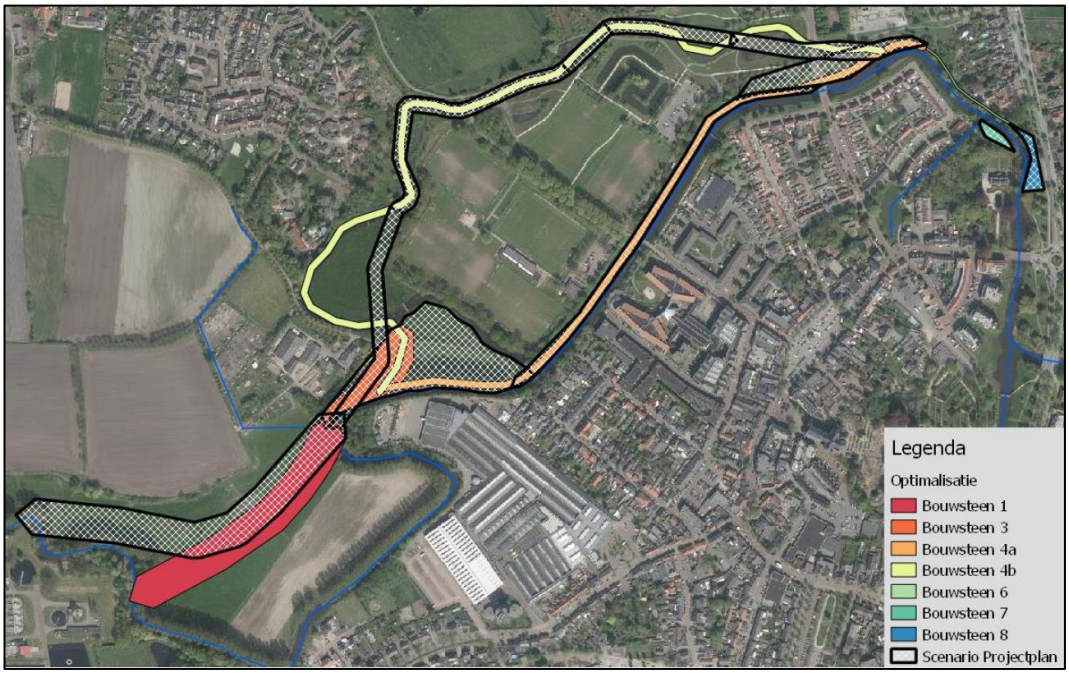
In het vooronderzoek is door Iv-Infra besloten de volgende optimalisaties door te voeren aan de eerder omschreven voorkeursscenario (Iv-Infra, 2019):

1. Aansluiting bouwsteen 1 ten oosten van de RWZI in plaats van ten noorden. Op deze wijze wordt een natuurlijke laagte in het maaiveld gevolgd en beperkt de

hoeveelheid graafwerkzaamheden. In aanvulling hierop betekent dit dat de boer minder akkerland verliest ten gevolge van de graafwerkzaamheden. Het profiel is beperkt aangepast naar een bodembreedte van 40 m met taluds van 1:5 in plaats van 50 m met taluds van 1:3;

2. Beperkte verlaging van bouwsteen 3 en Cathalijnepad deels op poten;
3. Neulmeander met een bodembreedte van 10 m. Ter plaatse van het helofyten filter is ervoor gekozen om de verlaging van het maaiveld tot +8,70 m NAP aan te houden. De huidige meandertak is nu van hoge ecologische waarde en de wens is om deze zoveel mogelijk in de huidige staat te behouden;
4. Vergroten van duiker tussen Neulmeander en Dommel naar 12 m2 en verlagen van bodemhoogte naar +7,80 m NAP;
5. Het overloopbed langs sportpark de Neul verhogen met 0,50 m en verbreden tot twaalf meter. In de huidige situatie is de waterkwaliteit van de Dommel niet bevorderlijk voor de ecologie. Door het verhogen van het bed zal het overloopbed minder vaak onderwater komen te staan. Dit geeft eventueel voor in de toekomst ruimte voor verder verbeteren van het systeem;
6. Verlenging van bouwsteen 4a (zie figuur 2) tot en met de aansluiting van de Neul op de hoofdarm van de Dommel;
7. Voor bouwsteen 5a zal dezelfde breedte worden aangehouden als bouwsteen 4a;
8. Aanpassing van kade met een verlaagd looppad tussen Odaschool en de Chinees.

Figuur 6 geeft de optimalisatie van de aanvankelijke voorkeursvariant “Ruimte voor de Dommel in Sint-Oedenrode" uit het projectplan van 2018 weer en vormt het uitgangspunt voor het project Droge Voeten Sint-Oedenrode (2019).



Figuur 6: Overzicht maatregelen uit het voorkeursscenario en uiteindelijk geoptimaliseerde aanpassingen aan watersysteem van Sint Oedenrode (Iv-Infra, 2019)

De geoptimaliseerde voorkeursvariant is opnieuw door Iv-Infra doorgerekend op basis van de T100 belasting in klimaatscenario WH van het KNMI. Door het verkleinen van de werkzaamheden ten aanzien van het doorstroomprofiel van de Dommel, wordt, aanvullend op de eerder berekende hoogte te korten, een nieuw hoogtetekort van de huidige kades berekend, namelijk:

- Bij Ahrend, door een toenemende opstuwing, circa 3 cm;
- Bij het appartementencomplex, door een toenemende opstuwing ter plaatse van de Hambrug, circa 2 cm;

Figuur 7: Rode cirkels: hoogtetekort nabij de Brockstraat/Alkemade en het appartementencomplex langs Sluisplein (Iv-Infra, 2019)

2.3 Gevoeligheidsanalyse op de geoptimaliseerde voorkeursvariant

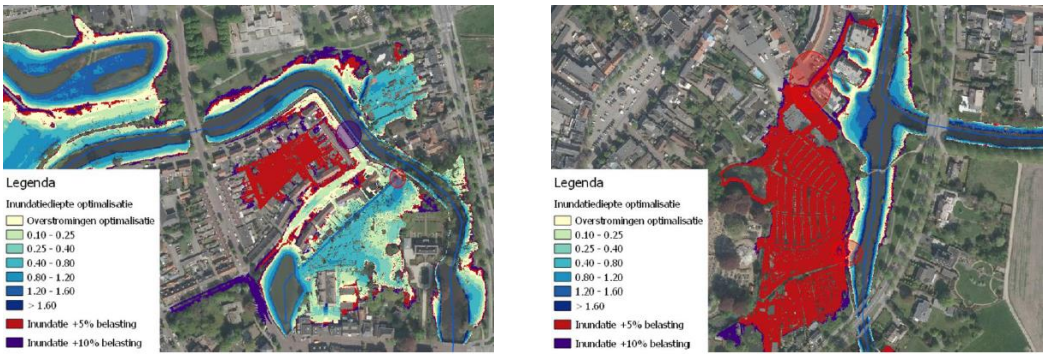
Om een beeld te krijgen van het effect van een grotere belasting op het systeem, en daarbij optredende inundaties, is besloten een gevoeligheidsanalyse van het watersysteem uit te voeren op de geoptimaliseerde voorkeursvariant (zie hoofdstuk 3). Hiervoor zijn de volgende situaties berekend:

- T100 WH met een toename van 5% van afvoergolf;
- T100 WH met een toename van 10% van de afvoergolf.

Resultaat

Bij een toename van 5% bovenop de afvoergolf T=100 ontstaat een extra knelpunt in de omgeving Hambrug. De woonwijk grenzend aan de Brockstraat inundeert door onvoldoende hoogte van het huidig oeverprofiel. Ook inundeert de begraafplaats en aangrenzende kade als gevolg van een ondergelopen parkeerplaats nabij het appartementencomplex.

Modelberekeningen laten zien dat bij een theoretische toename van 10% van de afvoergolf lokaal langs de Brockstraat de gehele oever onder water komt te staan (zie Figuur 8) (Iv-Infra, 2019).

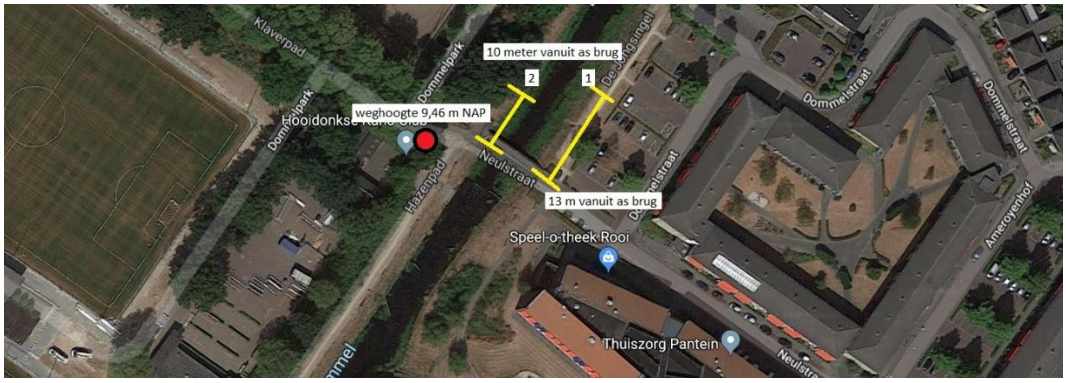


Figuur 8: Inundatie bij optimalisatie scenario i.c.m. toename belasting van 5 en 10% (Iv-Infra, 2019).

3 Bodemopbouw

Doormiddel van eerder uitgevoerd onderzoek (2008) is inzicht verkregen in de lokale bodemopbouw rondom de waterloop van de Dommel. Tussen het Dommelpark en de Dommelstraat, langs de Neulstraat, zijn twee sonderingen uitgezet (zie Figuur 9). Hieruit blijkt dat zowel de ondiepe als diepe grondlagen overwegend uit zand bestaan. Op basis van de sonderingen (IJb Geotechniek, 2008) is de bodemopbouw als volgt bepaald:

Diepte in m t.o.v. NAP	Bodembeschrijving
maaiveld tot ca. 3,0 m +	afwisselend zand en zandige kleilagen
vanaf 3,0 m +	zand, wisselende pakkingen

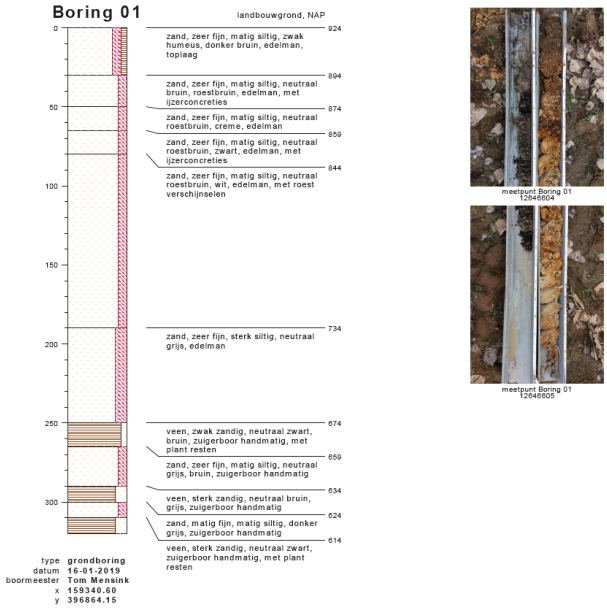


Figuur 9: Sondeeronderzoek in omgeving de Neul (IJb Geotechniek, 2008).

Doormiddel van ondiepe booronderzoeken, die recent zijn uitgevoerd door vakgroep GIV in 2018, is inzicht verkregen in de ondiepe bodemopbouw nabij de Lindendijk en de straat IJsvogel in het landschap van Rijsingen-Zuid.

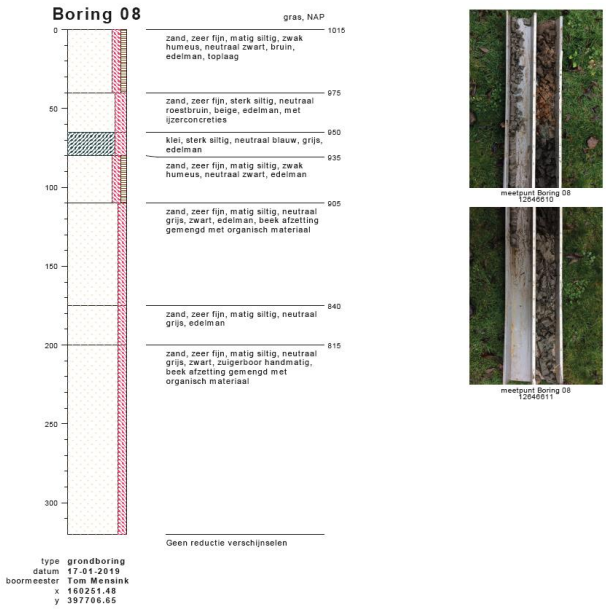
Figuur 10: Boorlocaties ondiep booronderzoek vakgroep GIV (2018)

Uit de boorgegevens is op te maken dat de ondiepe grondlagen nabij de straat IJsvogel met name uit zand bestaan. Het gaat hierbij om zeer fijn en matig siltig zand met een laagdikte van 2,5 meter. De toplaag van het zandpakket (0 tot 0,3 meter) is zwak humeus en op een diepte van 2,5 meter onder maaiveld bevinden zich enkele zwakzandige veenlagen met ieder een dikte van circa 10 centimeter dik (zie Figuur 11).



Figuur 11: Ondiep grondonderzoek nabij de straat IJsvogel op de noordelijke oever van de Dommel.

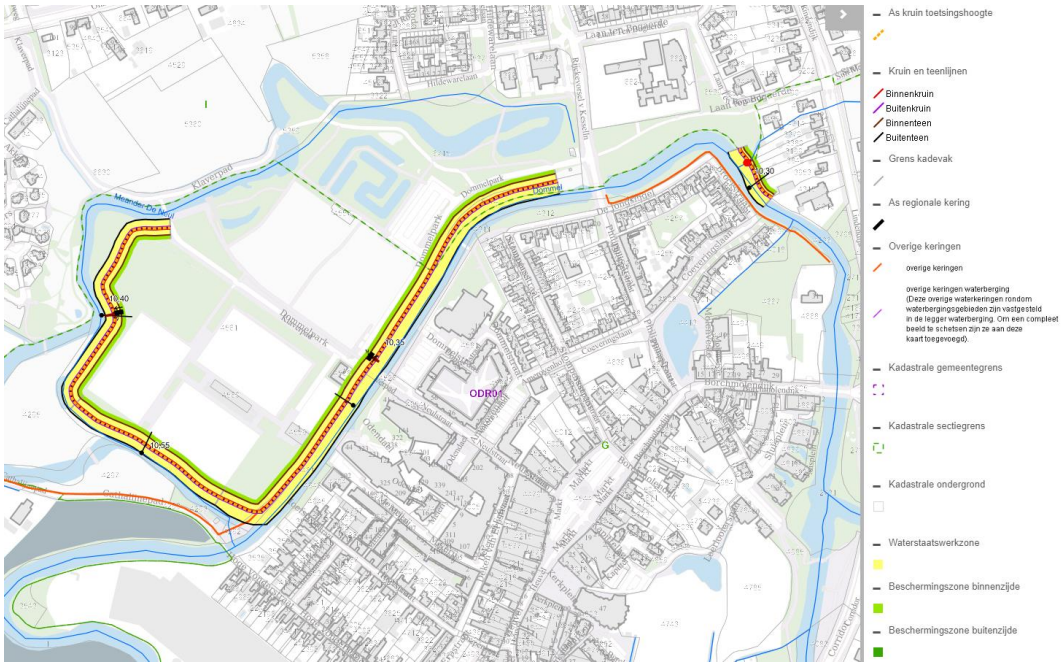
Nabij de Lindendijk bestaat de ondiepe grondopbouw met name uit zeer fijn en matig ziltig zand. De toplaag met een dikte van 0,4 meter is bestaat uit zeer fijn en matig siltig zand dat zwak humeus is. Op een diepte van 0,7 meter onder maaiveld is een sterk siltige kleilaag waargenomen met een dikte van 0,25 meter (Figuur 12).



Figuur 12: Ondiep grondonderzoek nabij de Lindendijk op de noordelijke oever van de Dommel.

4 Randvoorwaarden overige waterkering

Het Dagelijks Bestuur van Waterschap De Dommel heeft middels een notitie de regionale waterkering langs de Lindendijk afgewaardeerd tot een overige kering. De kering langs de Brockstraat betreft in de toekomst eveneens een overige kering. Daarbij is de waakhoogte voor beide keringen toegenomen van 10 centimeter naar een vereiste van 30 centimeter (Waterschap De Dommel, 2019). Dit is ook van toepassing voor de kering in de Neul.



Figuur 13: Leggerprofiel Waterschap De Dommel, regionale en overige waterkeringen (Waterschap De Dommel, 2019)

Hieronder zijn de randvoorwaarden opgenomen waaraan de overige waterkeringen minimaal moeten voldoen:

Tabel 1: Max waterstand T100 2050 W+ Modelfase 3 Optimale voorkeursvariant (maart/april 2019) (HKV Lijn in Water, 2019)

Locatie	MHW [m NAP]	Waakhoogte [m]	Minimale kruinhoogte [m NAP]
Odapad – Bovenstrooms	10,52	0,30	10,82
Appartementencomplex – Benedenstrooms	10,40	0,30	10,70
Lindendijk/Brockstraat - Bovenstrooms	10,22	0,30	10,52
Lindendijk/Brockstraat - Benedenstrooms	10,16	0,30	10,46
Jongsingel – Bovenstrooms	10,16	0,30	10,46
Jongsingel – Benedenstrooms	10,13	0,30	10,43
De Neul – Bovenstrooms	10,11	0,30	10,41
De Neul – Benedenstrooms	9,95	0,30	10,25
IJsvogel – Bovenstrooms	9,76	0,30	10,06
IJsvogel – Benedenstrooms	9,72	0,30	10,02

- Kruinhoogte bedraagt minimaal: MHW bij T100 met wind, golfoploop en de robuustheidstoeslag (waakhoogte van minimaal 30 centimeter);
- Kruinbreedte 1,5 meter;
- Uitgaande van een zandige ondergrond wordt vanuit stabiliteit een taludhelling van minimaal 1:3 aangehouden. Waterschap De Dommel stelt dat indien van bovenstaande wordt afgeweken, in verband met een ongunstig ruimtebeslag, de stabiliteit middels een berekening dient te worden aangetoond;
- Het planten van bomen in de kernzone van een waterkering is niet toegestaan. Opgaande struiken en hakhout worden wel getolereerd, indien deze goed worden onderhouden en tijdig gesnoeid. Het streven is om bestaande bomen en beplanting op voldoende afstand van de kernzone te houden. Bestaande beplanting op en nabij de waterkering zijn toegestaan, maar dienen middels een risico inschatting te worden getoetst (Brabant Keur). **Het uitgangspunt van Waterschap De Dommel is dat bomen en beplanting wijken voor de aanleg van overige waterkering**;
- Wat betreft stabiliteit is uitgegaan van een theoretisch profiel met een talud van 1:3 of flauwer tot aan het bodemprofiel van de Dommel.
- Bouwwerken mogen geen onderdeel uitmaken van de waterkerende functie (Brabant Keur).

Tevens dient bij de Lindendijk rekening te worden gehouden met de monding van een B-watergang (zie Figuur 14). De waterafvoer van deze watergang dient ten alle tijden te zijn geborgen, maar mag geen zwak element in de overige waterkering vormen.

Figuur 14: Duiding monding B-watergang in de oever van de Lindendijk

5 Hoogteopgave

De hoogte van de kades is ontworpen op basis van de gegevens zoals bekend waren op (23-10-2020). Het ontwerp is zo opgesteld dat er geen onderbrekingen in de kering zijn binnen de projectgrenzen.

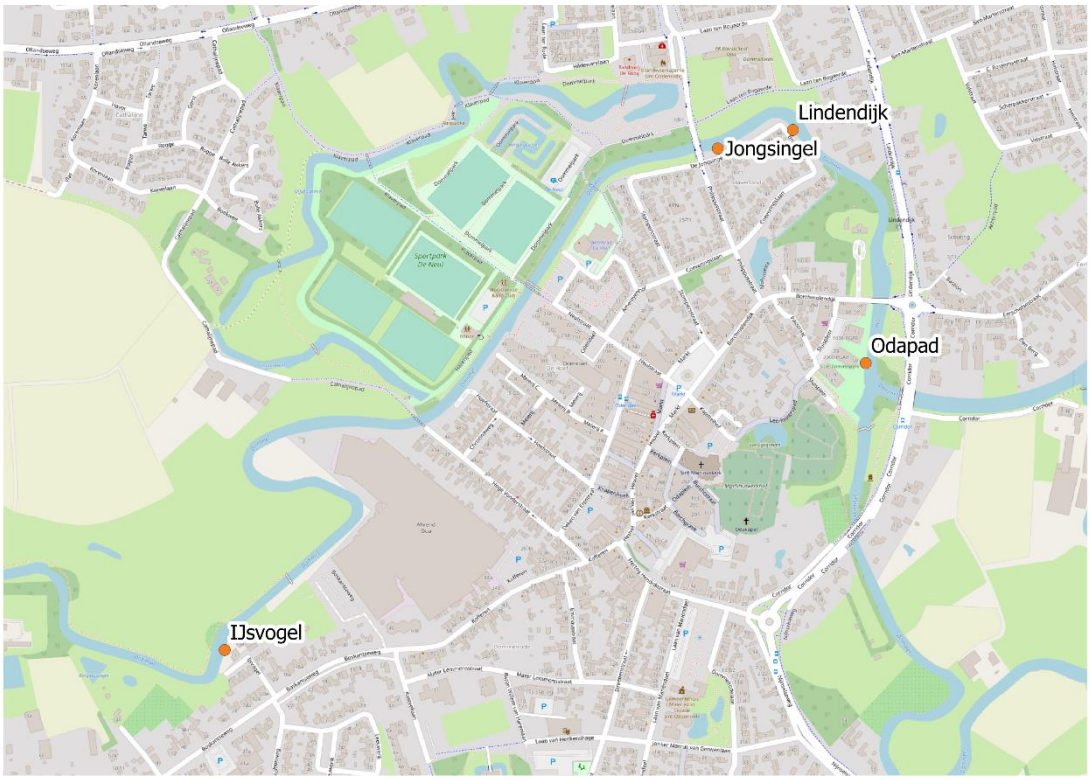
Op moment van schrijven wordt de controle van de berekende waterstanden in een hoogwatersituatie uitgevoerd. Op basis van deze controle moet het kadeontwerp worden getoetst en mogelijk worden bijgesteld. Derhalve is het niet wenselijk op dit moment een analyse uit te voeren of de kering op alle locaties op de juiste hoogte is ontworpen en of de kering op een juiste manier aansluit op de omliggende tracés. Wanneer de juiste waterstanden en de daardoor benodigde ingrepen concreet zijn, dient een dergelijke analyse (inclusief het in kaart brengen van de resultaten) te worden uitgevoerd.

6 Stabiliteit en optimalisatie

Om inundaties te voorkomen worden bestaande keringen opgehoogd (Lindendijk, De Jongsingel/Brockstraat en IJsvogel) en wordt een kering aangelegd (Odapad). De beschouwde locaties zijn weergegeven in onderstaande figuur. Aanleiding is het inzicht dat lokaal inundaties optreden bij een afvoergolf met een herhalingstijd van 100 jaar (T=100).

Doel van dit hoofdstuk is om op basis van stabiliteitsanalyses te komen tot een advies binnen welke voorwaarden de keringen dienen te worden gedimensioneerd, zodat deze voldoen aan eisen vanuit waterveiligheid. Daarbij is vooral gekeken naar de faalmechanismen macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts en hoogte. Het faalmechanisme piping is voor de beschouwde keringen niet relevant omdat de kering is opgebouwd uit zand en direct op een zandondergrond ligt. Bovendien is hoog achterland aanwezig, waardoor geen sprake is van een uittredepunt.

Beleidseisen vanuit Waterschap De Dommel ten aanzien bekledingen van overige keringen zijn niet bekend. Geadviseerd wordt bij de aanleg te borgen dat een gesloten grasmat kan ontstaan.



Figuur 15 Locaties beschouwde keringen

6.1 Uitgangspunten en aanpak

In deze paragraaf is een beschrijving van de uitgangspunten en parameters gegeven die zijn gehanteerd ten behoeve van de stabiliteitsanalyses.

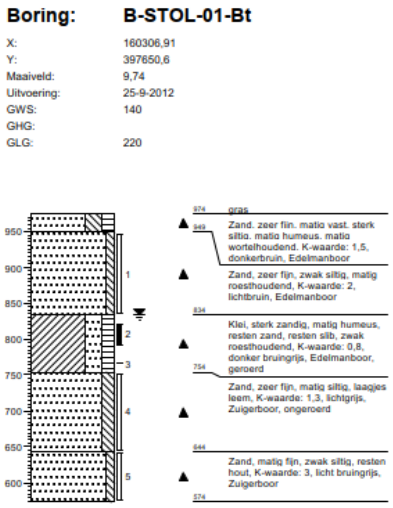
6.1.1 Gebruikte bronnen

Voor de schematisatie van de bodemopbouw, waterspanningen en bodemparameters is gebruik gemaakt van het document 'Toetsing regionale waterkeringen' (Grontmij, 2013).

De geanalyseerde profielen maken onderdeel uit van het ontwerp zoals bijgevoegd, zie bijlage

6.1.2 Bodemopbouw

Op basis van de beschikbare gegevens is geconcludeerd dat de keringen in en nabij Sint-Oedenrode grotendeels bestaan uit zand. Rondom de Neul zijn echter ook sterk zandige kleilagen en een veenlaag (met een dikte van circa 2 m) aangetroffen, in zowel een kruin- als teenboring. Ook is bij de Lindendijk een sterk zandige kleilaag aangetroffen tussen NAP +8,3 en +7,5 m, zie figuur 13.



Figuur 16 Boring in de binnenteen van de Lindendijk [2]

Voor de bodemopbouw ter plaatse van de Lindendijk is uitgegaan van de schematisatie zoals gehanteerd in de Toetsing regionale keringen [1]. Voor de overige keringen is uitgegaan van een zandige ondergrond. Vanuit de te hanteren sterkteparameters is dit een conservatieve aanname.

6.1.3 Grondparameters

De grondparameters zijn gehanteerd zoals weergegeven in de Toetsing regionale keringen (Grontmij, 2013), zie tabel 2.

Tabel 2 Grondparameters proevenverzameling De Dommel [2]

	EC/LAB	γ_n/ γ_{dr} [kN/m^3]	c_{kar} [kPa]	γ_c [-]	c_d [kPa]	φ_{kar} [°]	γ_φ [-]	φ_d [°]
Veen*1	LAB	12,5/12,5	1,5	1,35	1,1	38,8	1,15	26,7*1
Klei, humeus	EC	15,0/15,0	0,0	n.v.t.	0,0	25,0	1,30*3	19,7
Klei, siltig	LAB	17,0/17,0	8,0	1,20	6,7	26,1	1,15	23,0
Klei, zandig	LAB	18,1/18,1	2,0	1,20	1,7	29,2	1,15	25,9
Zand *2	EC	18,0/20,0	0,0	n.v.t.	0,0	30,0	1,30*3	23,9
Pleistoceen zand	EC	19,0/21,0	0,0	n.v.t.	0,0	30,0	1,30*3	23,9

*1 *Voor de aanwezige veenlagen is de karakteristieke waarde van de wrijvingshoek begrensd op 30 graden, dit is in overeenstemming met het beeld wat volgt uit de gemiddelde wrijvingshoeken op basis van de afzonderlijke Mohr-cirkels per monster.*

*2 *Doordat het zeer lastig is om ongeroerde zandmonsters te steken voor een representatieve onge-draineerde triaxiaalproef en dat uit de sonderingen blijkt dat het zand in het algemeen los tot matig vastgepakt is voor het zand een maximale karakteristieke waarde van 30 graden gesteld, conform de Eurocode [4].*

*3 *Materiaalfactor gebaseerd op veiligheidsklasse RC3 [4].*

Hierin is:

γ_n *aardvochtig volumiek gewicht;*
γ_{dr} *droog volumiek gewicht;*
γ_c/ γ_φ *materiaalfactoren cohesie en hoek van interne wrijving;*
φ_{kar} *karakteristieke waarde hoek van interne wrijving;*
φ_d *rekenwaarde hoek van interne wrijving;*
c_{kar} *karakteristieke waarde cohesie;*
c_d *rekenwaarde cohesie.*

6.1.4 Kruinhoogte

Voor de minimaal benodigde kruinhoogte is een waakhoogte van 0,3 m ten opzichte van de maatgevende hoogwaterstand (MWH) gehanteerd. Voor de vier beschouwde profielen is in onderstaande tabel aangegeven welke kruinhoogte aanwezig en benodigd is en welke kruinverhoging nodig is om aan een waakhoogte van 0,3 te voldoen.

Tabel 3 Hoogtegegevens voor de vier beschouwde profielen

Locatie	Huidige hoogte [m+NAP]	MHW [m+NAP]	Benodigde kruinhoogte [m+NAP]	Benodigde ophoging [m]
Lindendijk – DP236752	10,14	10,18	10,48	0,34
De Jongsingel – DP236749	10,27	10,13	10,43	0,16
IJsvogel – DP236102	9,69	9,74	10,04	0,35
Odapad –DP236431	10,47	10,51	10,81	0,34

Op basis van de beschouwde profielen kan worden geconcludeerd dat in de huidige situatie een kruinhoogte van bijna MHW aanwezig is. Om de gewenste waakhoogte te realiseren is een kruinverhoging van ruim 30 cm nodig. Uitzondering is De Jongsingel waar al een hogere kruinhoogte aanwezig is en een kruinverhoging van circa 10 tot 20 cm nodig is. Gezien de geringe ophogingen en de voornamelijk zandige ondergrond worden geen zettingen verwacht.

6.1.5 Waterspanningen

Het verloop van de freatische lijn en bijbehorende waterspanningen is geschematiseerd zoals weergegeven in de Toetsing regionale keringen. Voor het maatgevend hoogwater (MHW) is getoetst aan de nieuw bepaalde toetspeilen met een overschrijdingsfrequentie van 1/100 per jaar (T100).

Voor het peil na val van hoog water is de MHW verminderd met 2,38 m, gebaseerd op de gegevens zoals gebruikt in de Toetsing regionale keringen. Deze maat voor val na hoog water lijkt een absolute bovengrens waarvan niet duidelijk is waar deze op gebaseerd is. De gegevens uit de Toetsing zijn ook gebruikt om de stijghoogte in het achterland te bepalen.

Ten opzichte van een lineair verloop tussen streefpeil in de rivier en het polderpeil / de stijghoogte in het achterland is de freatische lijn ter plaatse van de kruin verhoogd met 0,5 m, als gevolg van capillaire waterdruk/opbolling. Dit wordt als een voldoende veilige waarde beschouwd voor keringen die voornamelijk uit zand zijn opgebouwd.

Voor de kadevakken die voor Droge voeten Sint-Oedenrode zijn beschouwd is aangenomen dat deze uit zand bestaan, uitgezonderd de Lindendijk.

Voor de Lindendijk is, op basis van de boring, aangenomen dat het bovenste deel van de kade uit zandige klei bestaat. Als basisschematisatie is hier uitgegaan van een lineair verloop van de freatische lijn tussen de binnenkruinlijn, op stijghoogteniveau, en het peil na val op de Dommel.

Dit betekent per locatie:

Tabel 4 Uitgangspunten in de basisschematisatie

Locatie	MHW [m+NAP]	Peil na val (MHW - 2,38m) [m+NAP]	Stijghoogte [m+NAP]
Lindendijk – DP236752	10,18	7,80	9,75
De Jongsingel – DP236749	10,13	7,75	9,00
IJsvogel – DP236102	9,74	7,36	9,00
Odapad – DP236431	10,51	8,13	9,00

6.1.6 Methode

Met het softwarepakket D-GEO Suite Stability Suite 1.1.0.0 is voor de verschillende profielen de stabiliteit (STBU en/of STBI) berekend. Voor deze overige keringen is de methode gebruikt zoals gebruikelijk voor regionale keringen (Stowa, 2015), waarbij onder andere gedraineerd wordt gerekend. Er is gerekend met het Bishop model.

De minimaal benodigde veiligheidsfactor is bepaald aan de hand van het product van de schadefactor, modelfactor en de schematiseringsfactor. Voor deze partiële veiligheidsfactoren zijn de volgende waarden aangehouden:

- Schadefactor = 0,9, behorende bij keringen met een normfrequentie van 1/100. Deze normfrequentie wordt in onderhavige analyse aangehouden vanwege de bijbehorende normwaterstand die op basis van T100 is gehanteerd. Daarbij wordt opgemerkt dat voor STBU, als indirect mechanisme, mag worden gekozen voor een (niet onderbouwde) 10% lagere schadefactor van 0,81 (Stowa, 2015);

- Modelfactor = 1,0 voor Bishop;
- Schematiseringsfactor = 1,2 conform leidraden (Stowa, 2015), deze mag onderbouwd tot 1,0 worden gereduceerd. Echter door onzekerheden in onder andere de ligging van de freatische lijn en de bodemopbouw is een reductie vooralsnog niet mogelijk.

Hiermee is gekomen tot een vereiste veiligheidsfactor van 1,08. Als een 10% lagere schadefactor wordt gehanteerd, geldt een veiligheidsfactor-eis van 0,97.

6.1.7 Input voor ontwerp

Met deze uitgangspunten is voor de betreffende keringen een ontwerp uitgewerkt dat aan de eisen vanuit waterveiligheid voldoet en tevens inpasbaar is.

7 Resultaten en ontwerpscenario's

7.1 Ontwerpscenario's

Om te komen tot een ingepast ontwerp van de kade is allereerst de huidige situatie van de kering getoetst op stabiliteit buitenwaarts. Vervolgens is de kade ontworpen op inpasbaarheid en hoogte en is deze getoetst aan de eisen wat betreft macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts.

7.1.1 Lindendijk

Uit deze toets blijkt dat het ontwerp voor stabiliteit binnen- en buitenwaarts voldoet, zie bijlage 2.1. Wel wordt opgemerkt dat er onzekerheid is over de bodemopbouw en het verloop van de freatische lijn ter plaatse van de Lindendijk. Daarom is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, zie volgende alinea.

Tabel 5: Resultaten stabiliteitsberekeningen Lindendijk

Toets	Veiligheidsfactor [-]
Huidige situatie - basisschematisatie	1,12
Ontwerp STBU - basisschematisatie	1,08
Ontwerp STBI – basisschematisatie	4,38

Een principeprofiel en het ruimtebeslag van het ingepaste ontwerp is toegevoegd in bijlage 3.

Gevoeligheidsanalyse

Vanwege onduidelijkheid over de bodemopbouw, het verloop van de freatische lijn en bodemparameters is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om het effect op de stabiliteit te bepalen. Er zijn drie scenario's onderzocht:

- *Scenario 1: hogere freatische lijn*
  Op basis van 1 boring ter plaatse van de Lindendijk is de verwachting dat (een deel van) de kade bij de Lindendijk bestaat uit klei. Vanwege de lagere doorlatendheid is het mogelijk dat het hoge water langer in de dijk achter blijft. Het effect hiervan op de stabiliteit is inzichtelijk gemaakt.
- *Scenario 2: kade bestaat uit zand met lagere freatische lijn*
  De meeste kades rondom Sint-Oedenrode, uitgezonderd rondom de Neul, bestaan uit zand. Dit zand heeft een lagere hoek van inwendige wrijving, geen cohesie en een lagere freatische lijn. De freatische lijn is het lineaire verloop vanuit het peil na val op de Dommel ter hoogte van de buitenteen naar een hoog polderpeil aan de binnenteen. Het effect hiervan op de stabiliteit is inzichtelijk gemaakt.
- *Scenario 3: de zandige (onder)grond heeft een grotere hoek van inwendige wrijving*
  Om de rekenwaarde voor de hoek van inwendige wrijving te bepalen is, op basis van Toetsing regionale keringen [2], gebruik gemaakt van een materiaalfactor van 1,3 conform Eurocode 7 risicoklasse 3 (RC3). Voor de te beschouwen kades kan echter een risicoklasse 1 worden gehanteerd met een bijbehorende materiaalfactor 1,2. Dit is in lijn met de materiaalfactoren zoals gebruikt in de Leidraad toetsen op veiligheid

regionale keringen – Module sterkte [4]. De rekenwaarde voor de hoek van inwendige wrijving, die is afgeleid bij een materiaalfactor van 1,2, is 25,7˚.

Tabel 6: Resultaten stabiliteitsberekeningen gevoeligheidsanalyse

Scenario	Veiligheidsfactor [-]
Huidige situatie - schematisatie toetsing	1,04
STBU – hogere freatische lijn (1)	1,02
STBU – zanddijk (2)	1,06
STBU – materiaalfactor (φ) 1,2	1,17

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de stabiliteit licht gevoelig is voor aanpassingen van bodemopbouw en freatische lijn. De stabiliteitsfactor verslechtert licht met 0,02 respectievelijk 0,06 en voldoet niet meer aan de norm die hoort bij een schematiseringsfactor van 1,2. Het toepassen van ongunstige schematisaties rechtvaardigt het gebruik van een lagere schematiseringsfactor van 1,1, met een bijbehorende veiligheidseis van 0,99. Daar voldoen de doorgerekende scenario's aan.

Bij het gebruik van een materiaalfactor voor de hoek van inwendige wrijving van 1,2 verbetert de stabiliteitsfactor met 0,09.

Op basis van het ontwerpberekeningen, de gevoeligheidsanalyses en een mogelijk lagere schadefactor wordt geconcludeerd dat het ontwerp voor de Lindendijk voldoet aan de eisen wat betreft macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts.

7.1.2 De Jongsingel / Brockstraat

Tegenover de Lindendijk ligt De Jongsingel, aan de overkant van de Dommel. Deze kade heeft in de huidige situatie een redelijk flauw talud. Uit de toetsing van de huidige situatie aan STBU blijkt dat dit talud voldoet. Vervolgens is de kade ontworpen op inpasbaarheid en hoogte en is deze getoetst aan de eisen wat betreft macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts. Uit deze toets blijkt dat het ontwerp op stabiliteit binnen- en buitenwaarts voldoet, zie bijlage 2.2.

Tabel 7: Resultaten stabiliteitsberekeningen De Jongsingel

Toets	Veiligheidsfactor [-]
Huidige situatie - basisschematisatie	1,12
Ontwerp STBU - basisschematisatie	1,17
Ontwerp STBI – basisschematisatie	1,55

7.1.3 IJsvogel

Aan de westkant van Sint-Oedenrode ligt het traject IJsvogel. De hier aanwezige kade heeft in de huidige situatie een redelijk flauw talud. Uit de toetsing van de huidige situatie aan STBU blijkt dat dit talud voldoet. Vervolgens is de kade ontworpen op inpasbaarheid en hoogte en is deze getoetst aan de eisen wat betreft macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts. Uit deze toets blijkt dat het ontwerp op stabiliteit binnenwaarts voldoet en op stabiliteit buitenwaarts net niet voldoet, zie bijlage 2.3.

Wat betreft ontwerp is ervoor gekozen om deze locatie verder niet te optimaliseren. Enerzijds kan worden gekozen voor een lagere schadefactor en anderzijds is een lagere schemateringsfactor van 1,1 naar verwachting goed te onderbouwen. In beide gevallen voldoet het ontwerp aan de lagere veiligheidseis.

Tabel 8: Resultaten stabiliteitsberekeningen IJsvogel

Toets	Veiligheidsfactor [-]
Huidige situatie - basisschematisatie	1,23
Ontwerp STBU - basisschematisatie	1,03
Ontwerp STBI – basisschematisatie	2,1

Een principeprofiel en het ruimtebeslag van het ingepaste ontwerp is toegevoegd in bijlage 3.

7.1.4 Odapad

Aan de zuidkant van Sint-Oedenrode ligt het traject Odapad. In de huidige situatie is hier geen kade aanwezig maar alleen een oever, zonder status. Uit de toetsing van de huidige situatie blijkt dat deze niet voldoet aan de eisen voor macrostabiliteit buitenwaarts (Fs = 0,69 waar 1,08 vereist is). Dit is enerzijds te verklaren door het steile buitentalud en anderzijds door de uitgesleten bodem van de Dommel.

De kade is ontworpen op inpasbaarheid en hoogte, wat heeft geresulteerd in een buitentalud met een helling van circa 1:2. Dit ontwerp is getoetst aan de eisen wat betreft macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts. Uit deze toets blijkt het ontwerp niet voldoet aan de eisen voor macrostabiliteit buitenwaarts (Fs = 0,85 waar 1,08 vereist is). De binnenwaartse stabiliteit voldoet wel, zie bijlage 2.4. Uit de schematisatie blijkt dat het buitentalud verflauwd zou moeten worden tot een helling van circa 1:2,7 om wel aan de eisen voor STBU te voldoen.

Tabel 9: Resultaten stabiliteitsberekeningen Odapad

Toets	Veiligheidsfactor [-]
Huidige situatie - basisschematisatie	0,69
Ontwerp STBU - basisschematisatie	0,85
Ontwerp STBI – basisschematisatie	2,25
Ontwerp STBU – buitentalud 1:2,7	1,08

Zoals eerder opgemerkt betreft de basisschematisatie van het ontwerp STBU een conservatieve schematisatie, onder andere ten aanzien van de freatische lijn, bodemopbouw en grondparameters. Om beter zicht te krijgen op de inpasbaarheid van een waterveilig ontwerp voor het Odapad is een aanvullende berekening opgesteld met daarin de volgende aanpassingen:

- Bodemhoogte De Dommel opgehoogd van NAP +5m naar NAP +6m;
- Materiaalfactor voor hoek van inwendige wrijving aangepast naar 1,2;
- Buitenwaterstand verlaagd met 0,5 m en freatische lijn hierop aangepast;
- Schematiseringsfactor van 1,1
- 10% lagere schadefactor.

Uit het berekeningsresultaat blijkt dat het ontwerp voldoet aan de eisen voor macrostabiliteit buitenwaarts (Fs = 0,96 waar 0,81 vereist is).

8 Conclusies en aanbevelingen

Stabiliteit
Op basis van knelpunten door te verwachten inundaties zijn ophogingen van keringen en een oever gewenst binnen het project Droge Voeten Sint-Oedenrode. Het betreft de locaties Lindendijk, De Jongsingel en Brockstraat, IJsvogel en Odapad. Van deze locaties is de macrostabiliteit buitenwaarts van de huidige situatie getoetst. Vervolgens is, op basis van gewenste kruinhoogte en inpasbaarheid, een ontwerp afgeleid dat voldoet aan de eisen vanuit waterveiligheid voor macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts.

Uit de stabiliteitsanalyses volgt dat de stabiliteit binnenwaarts voor alle locaties voldoet, ook na kruinophoging. Dit is naar verwachting, gezien het kleine hoogteverschil tussen kruin en 'achterland'.

Verder volgt dat stabiliteit buitenwaarts in de huidige situatie ter plaatse van de Lindendijk, De Jongsingel en Brockstraat en IJsvogel voldoet. Eveneens zijn de gewenste kruinverhogingen inpasbaar en de buitenwaartse stabiliteit voldoet daarbij aan de norm die hoort bij een overschrijdingsfrequentie van 1/100 per jaar, mits voor de locatie Odapad een schematiseringsfactor van 1,1 kan worden aangehouden. Die aanname lijkt op basis van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse plausibel.

Ontwerp
Voor het project Droge Voeten Sint-Oedenrode

Aanbevolen wordt om in de vervolgfase nader onderzoek uit te voeren om de gekozen schematisaties en het gebruik van een lageren schematiseringsfactor te verifiëren.

9 Verwijzingen

Arcadis. (2015). *Meetnet grondwater werkeenheid de Meierij.* Amersfoort: Arcadis.

Grontmij. (2013). *Toetsing regionale waterkeringen. Veiligheidstoetsing regionale waterkeringen in het beheergebied van Waterschap De Dommel.*

HKV Lijn in Water. (2019). *Max waterstand T100 2050 W+ Modelfase 3 Optimale voorkeursvariant (maart/april 2019).*

IJb Geotechniek. (2008). *3 Bruggen Sint Oedenrode Dommelpark.* Lemmer: IJb Geotechniek.

IV-Infra. (2018). *Hoogwaterbescherming Sint-Oedenrode.* Sliedrecht: Iv-Infra.

Iv-Infra. (2019). *Optimalisatie ontwerp Droge voeten Sint Oedenrode.* Sliedrecht: Iv-Infra.

Stowa. (2015). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen - Modules en bijlagen.*

Waterschap De Dommel. (2018). *Opdrachtomschrijving voor organiseren en realiseren van ontwerp, definitief projectplan en omgevingsproces.* Boxtel: Waterschap De Dommel.

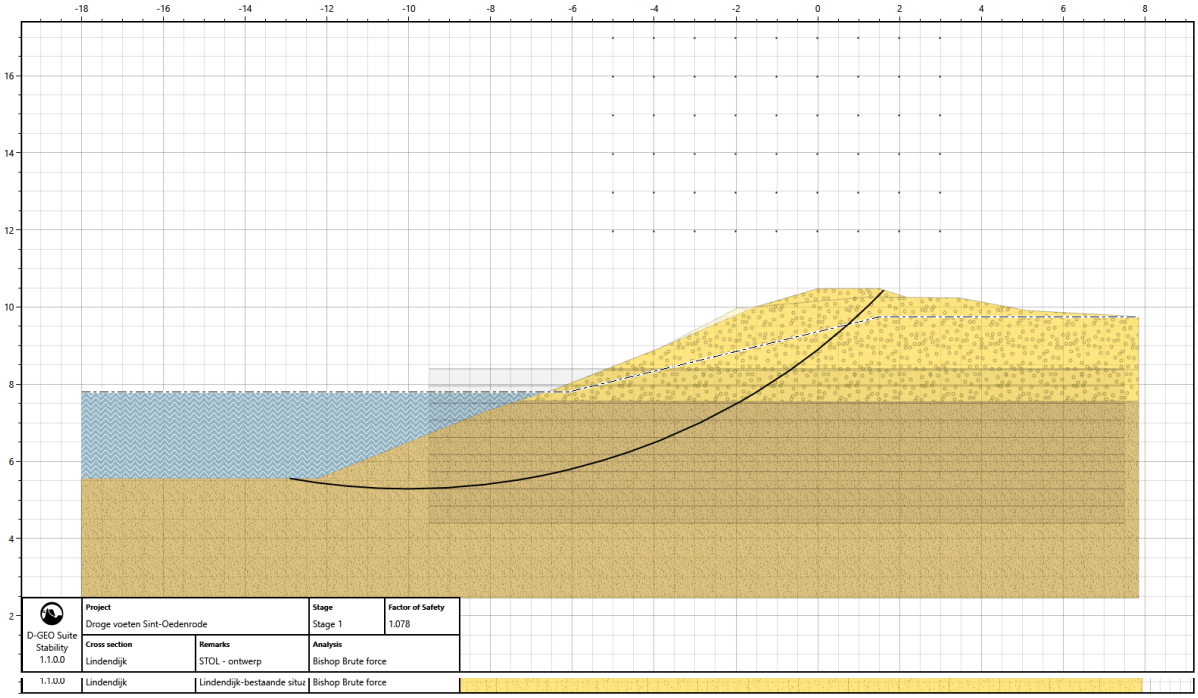
Waterschap De Dommel. (2019). Aanpak keringen Droge Voeten Sint-Oedenrode (P051418). *Aan het dagelijks bestuur* (p. 6). Boxtel: Waterschap De Dommel.

Waterschap De Dommel. (2019, 10 11). *Legger waterkering*. Opgehaald van Waterschap De Dommel: https://dommel.webgispublisher.nl/Viewer.aspx?map=Legger-waterkering&profileName=Widget#

Bijlage 1. VO

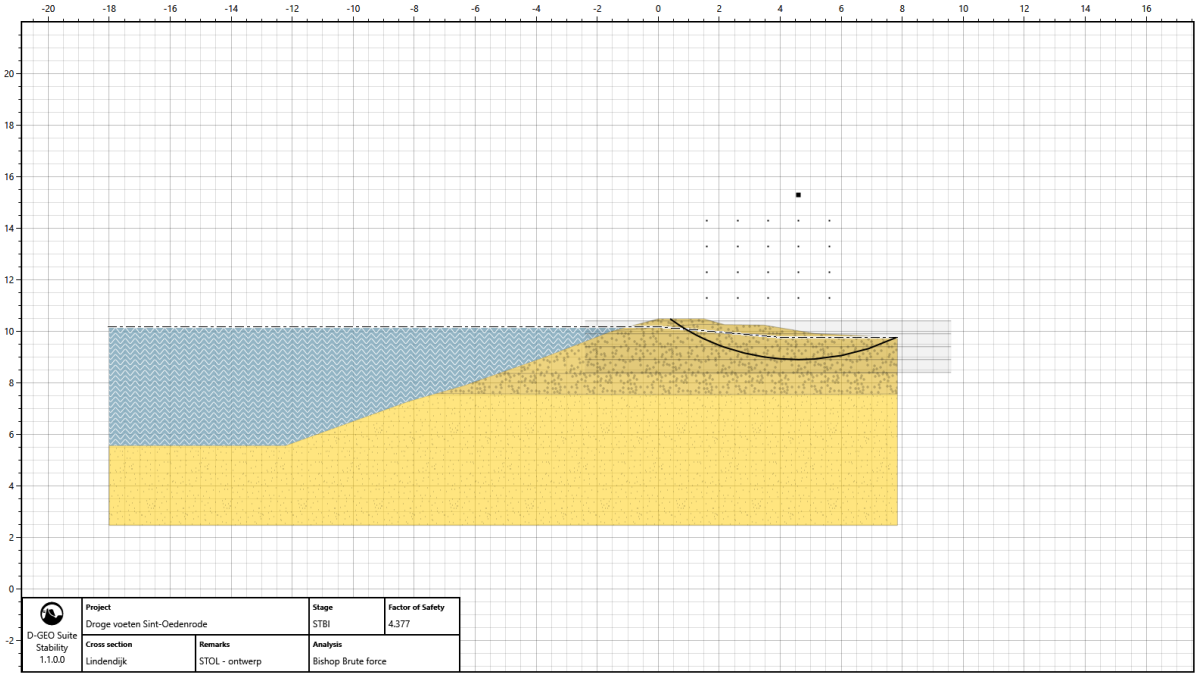
Bijlage 2. Stabiliteitsberekeningen

2.1 Stabiliteitsberekening Lindendijk



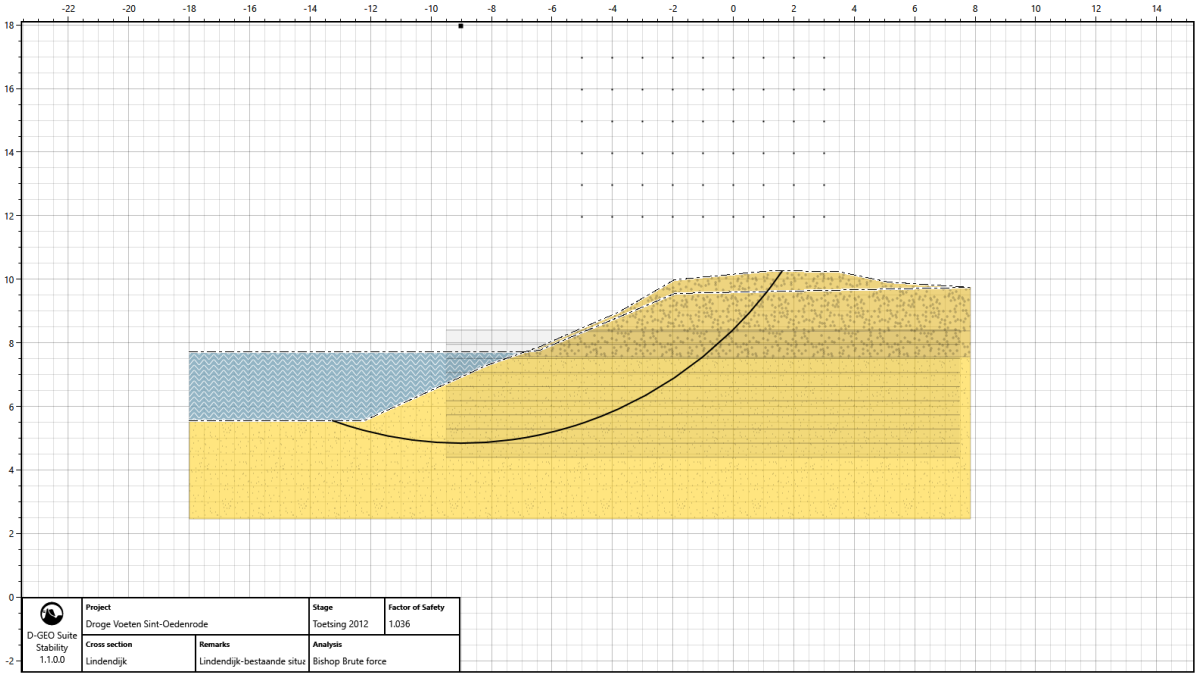
Figuur 17 Basisschematisatie huidige situatie STBU Lindendijk – Sf = 1,12

Figuur 18: Basisschematisatie ontwerp STBU Lindendijk – Sf = 1,08

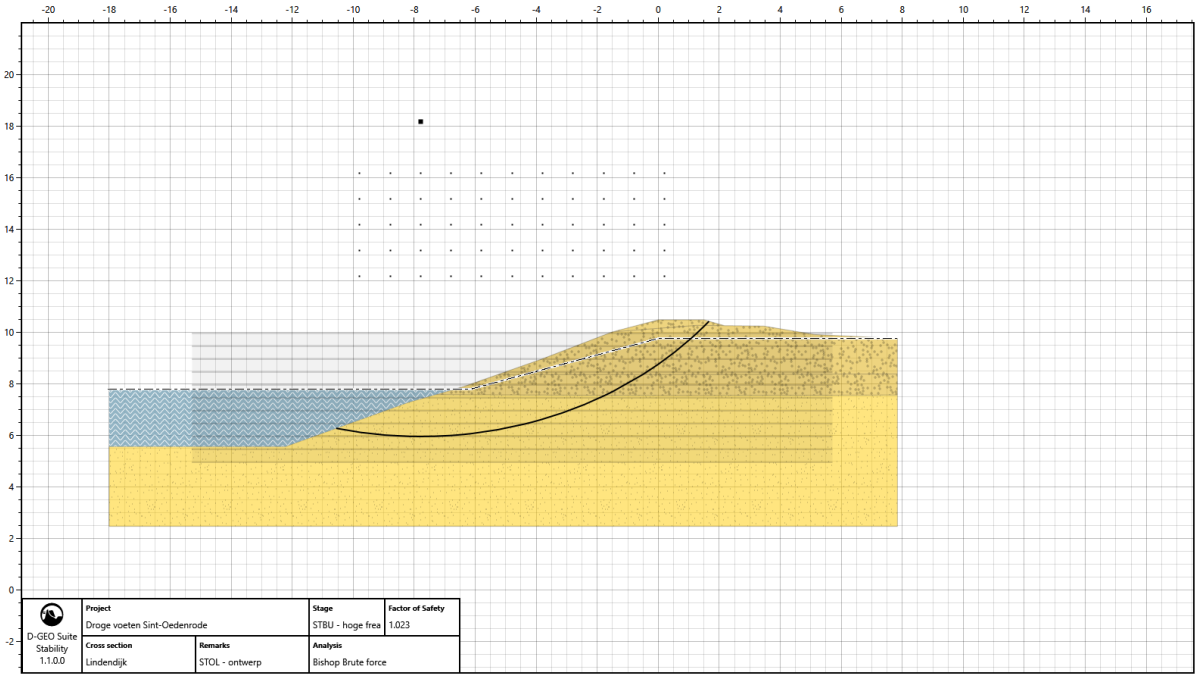


Figuur 19: Basisschematisatie ontwerp STBI Lindendijk – Sf = 4,38

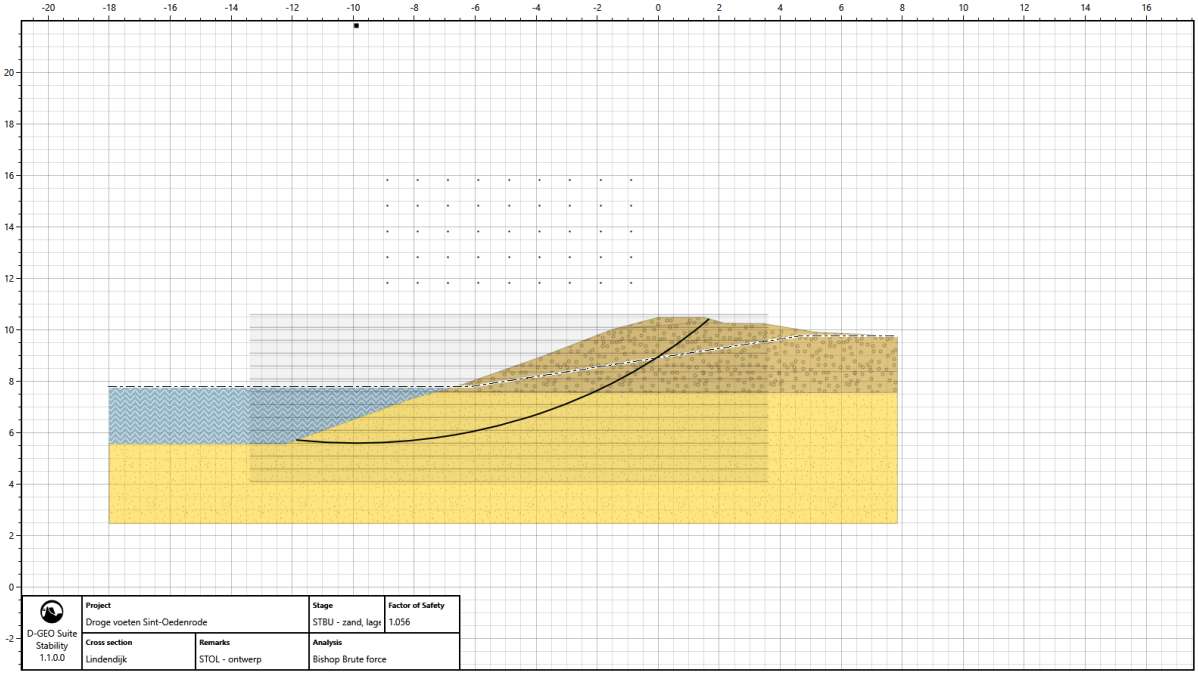
Gevoeligheidsanalyse Lindendijk



Figuur 20 Huidige situatie conform toetsing 2012– Sf=1,04

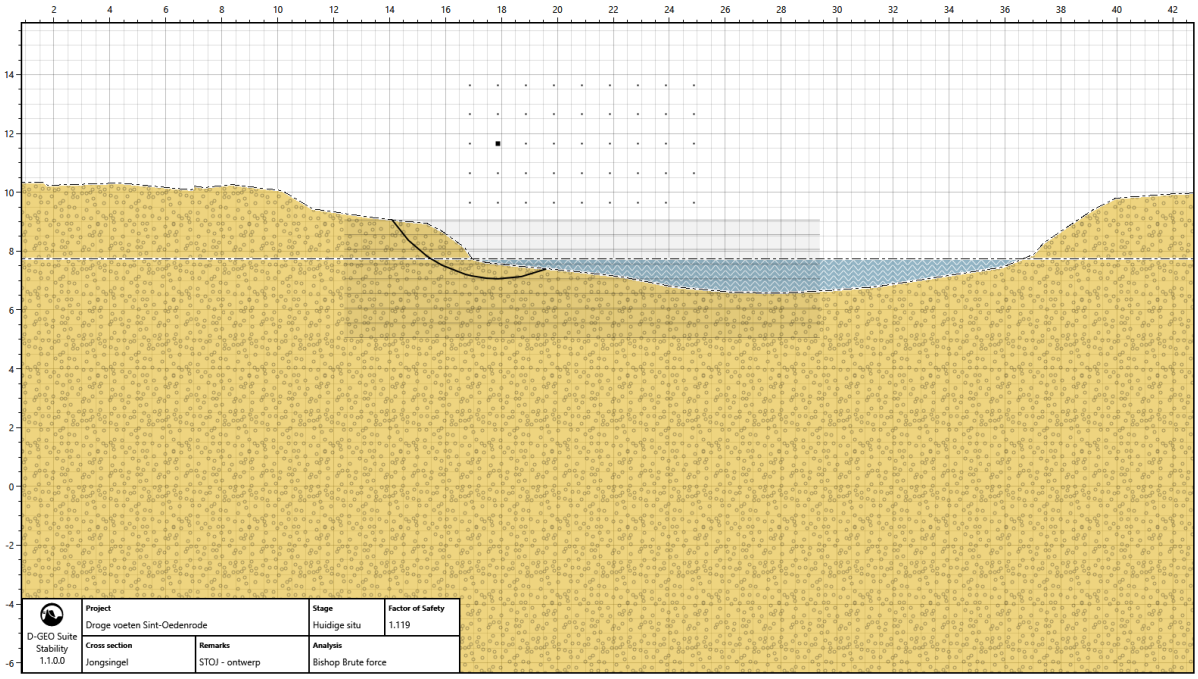


Figuur 21 STBU scenario 1 Hogere freatische lijn – Sf=1,02

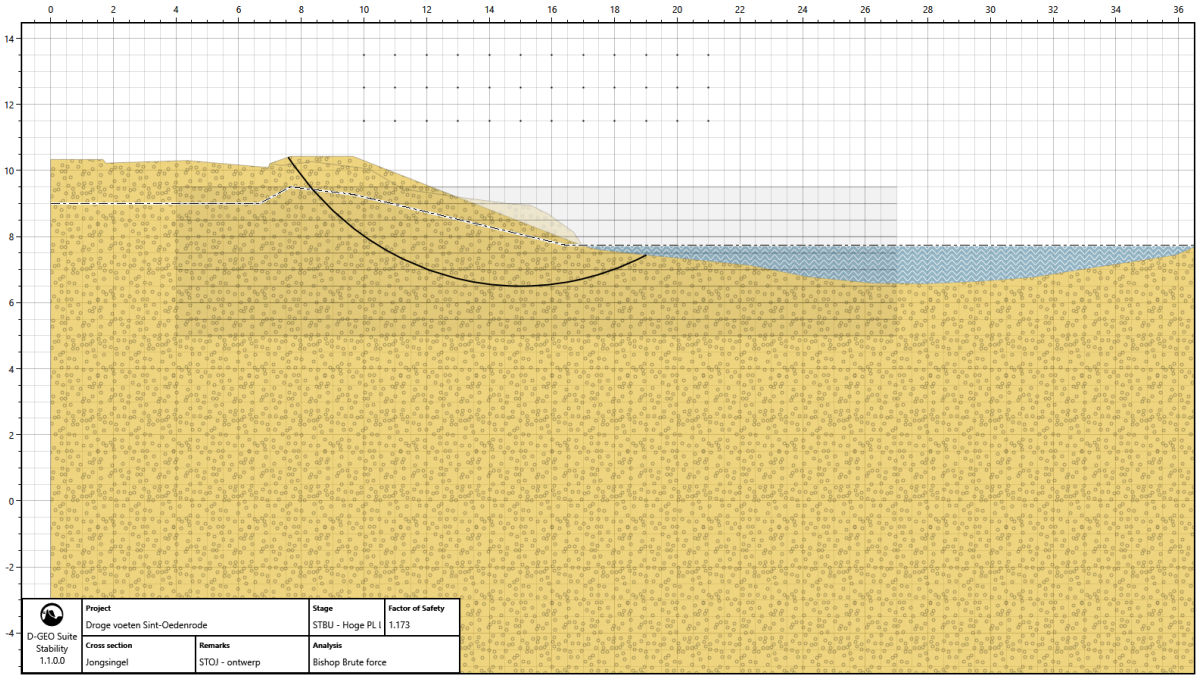


Figuur 22 STBU scenario 2 Zandkade, lagere freatische lijn – Sf=1,06

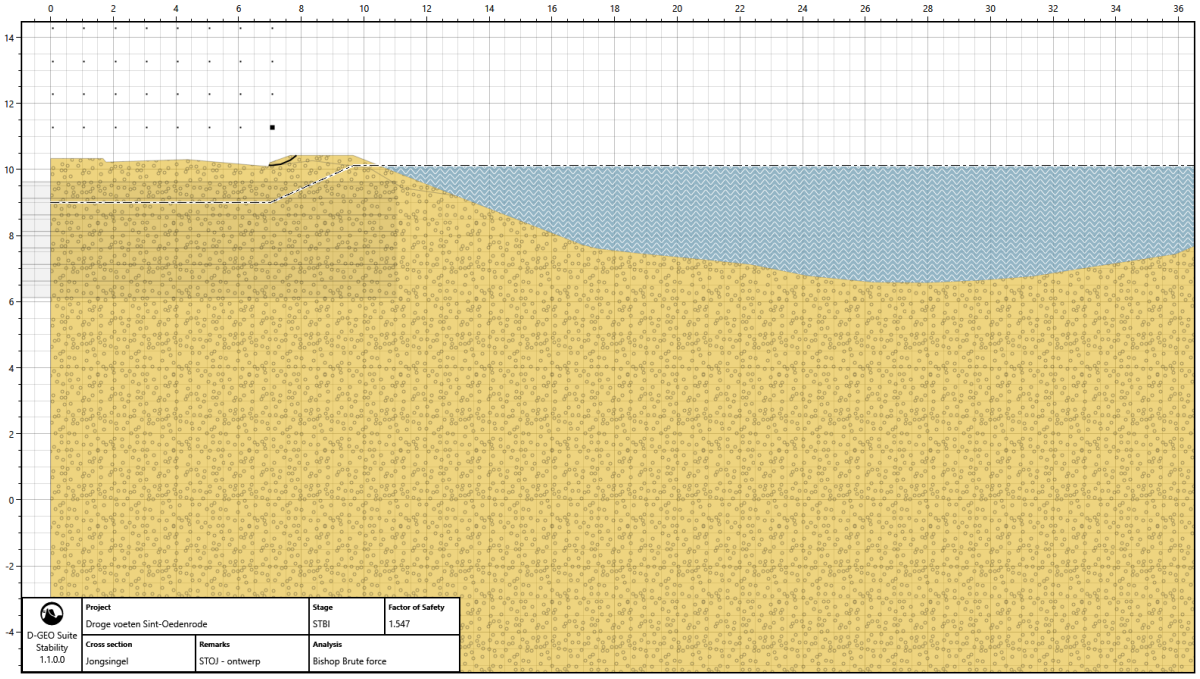
2.2 Stabiliteitsberekening De Jongsingel / Brockstraat



Figuur 23: Basisschematisatie huidige situatie STBU De Jongsingel – Sf = 1,12

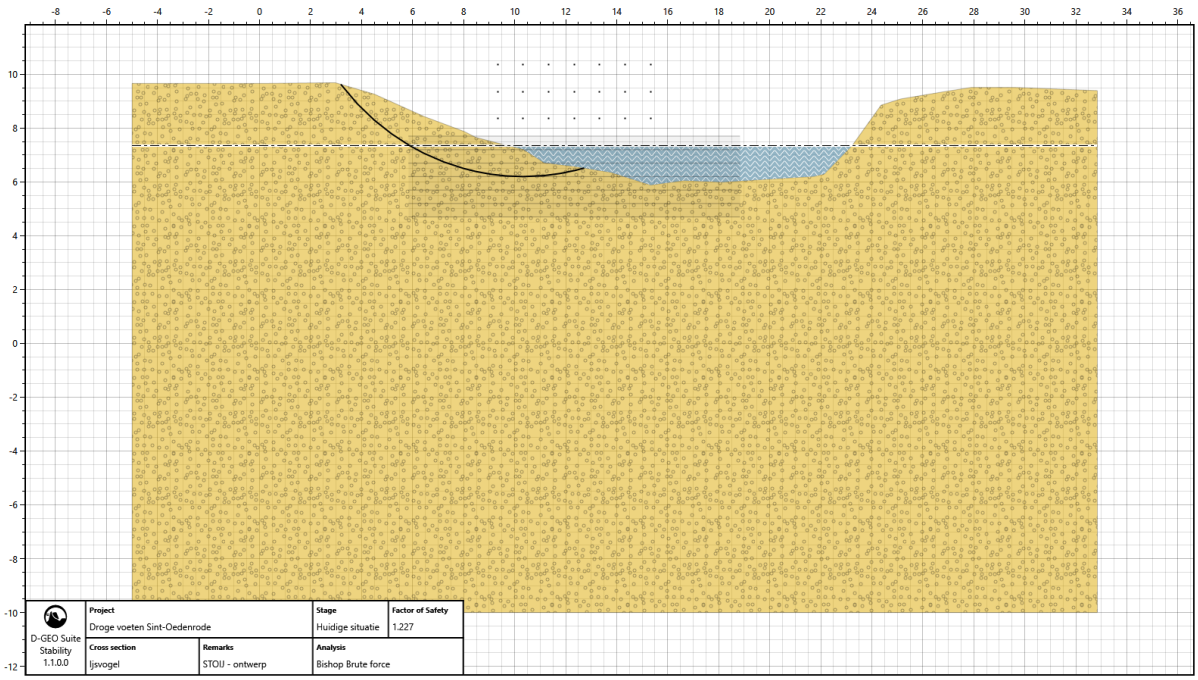


Figuur 24: Basisschematisatie ontwerp STBU Jongsingel/Brockstraat – Sf = 1,17

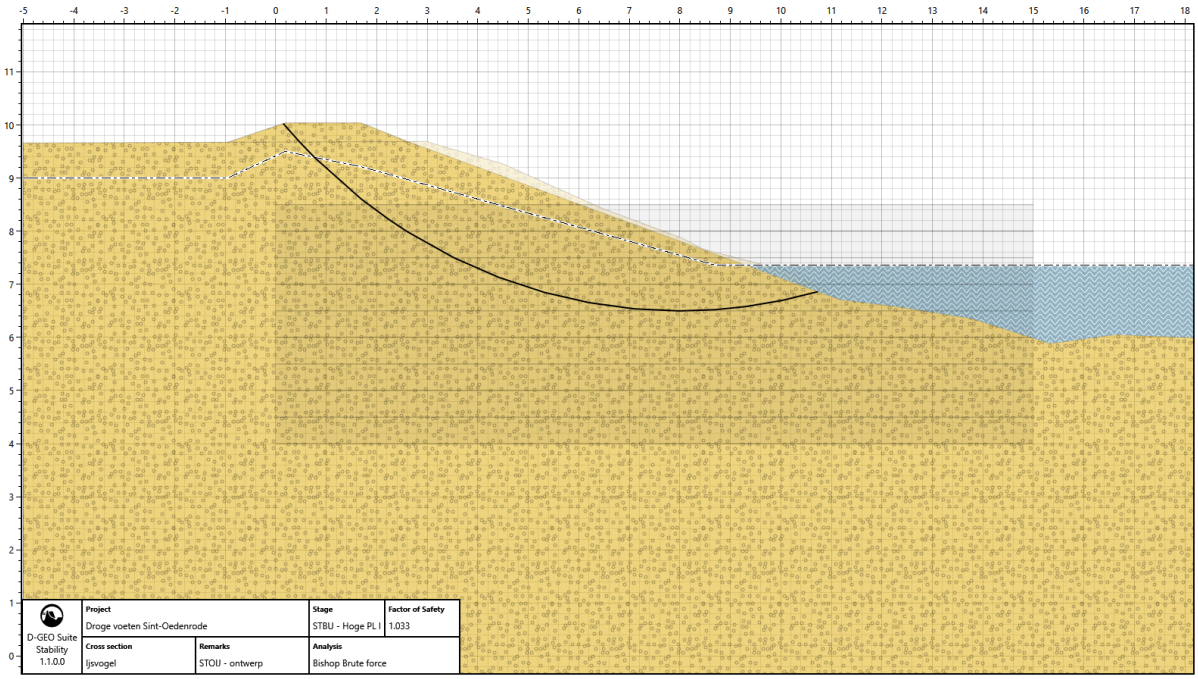


Figuur 25 Basisschematisatie ontwerp STBI Jongsingel/Brockstraat – Sf = 1,55

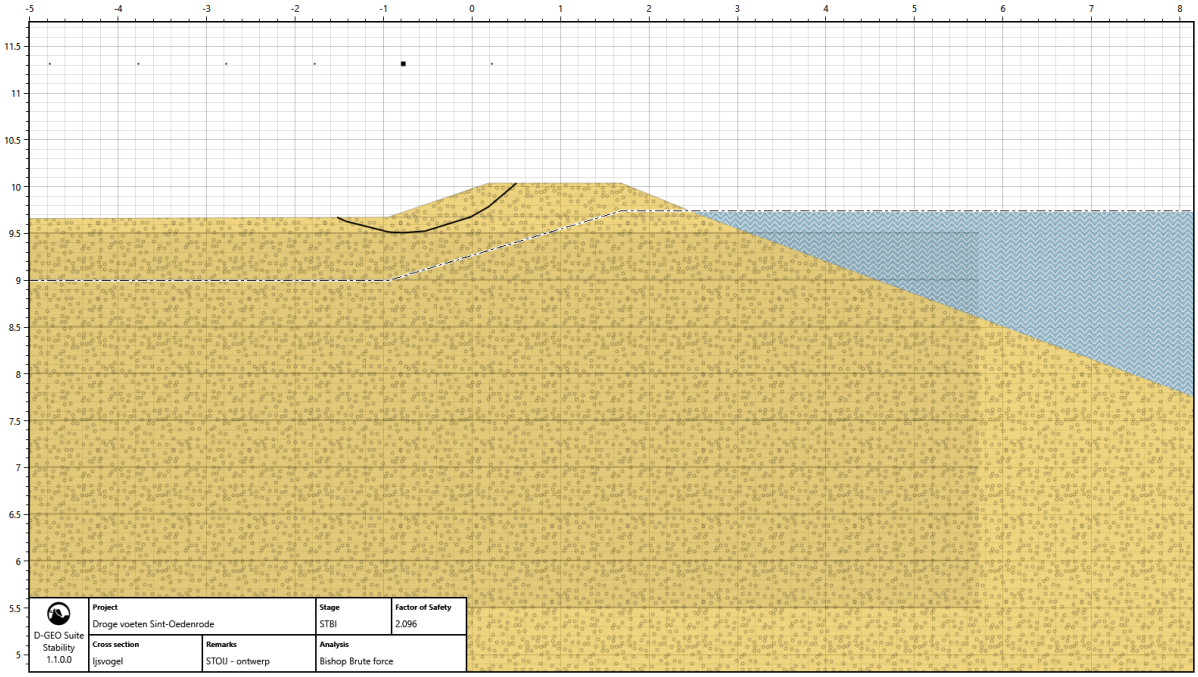
2.3 Stabiliteitsberekening IJsvogel



Figuur 26: Basisschematisatie huidige situatie STBU IJsvogel– Sf = 1,23

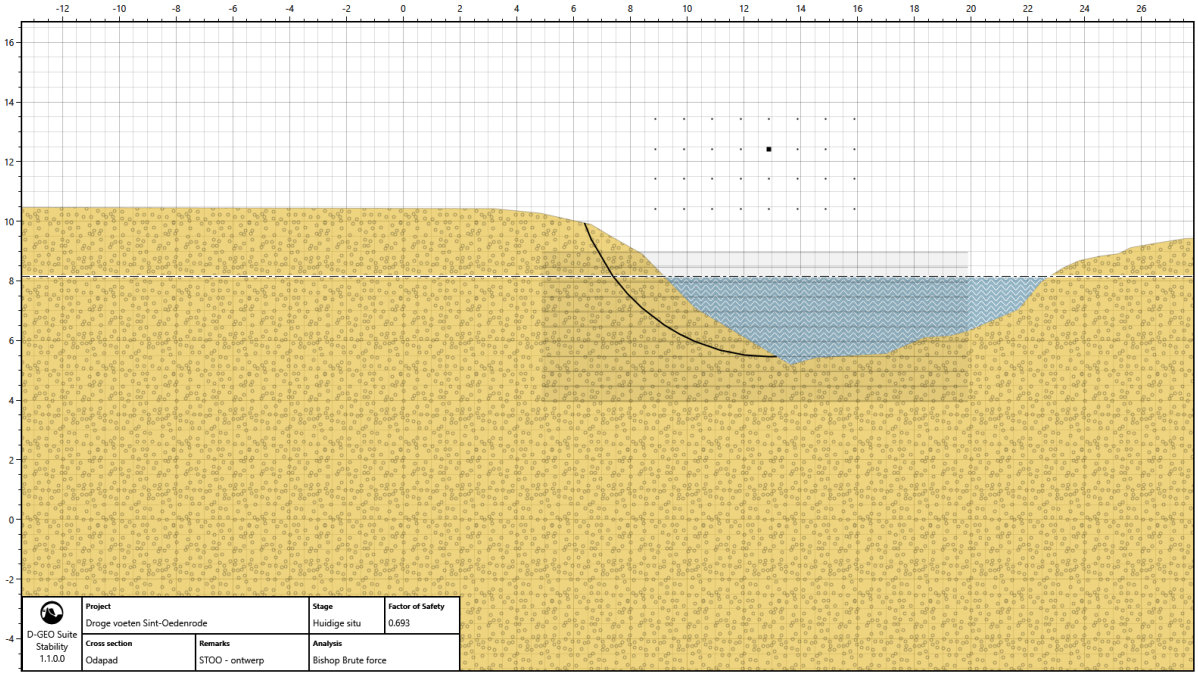


Figuur 27 Basisschematisatie ontwerp STBU IJsvogel – Sf = 1,033

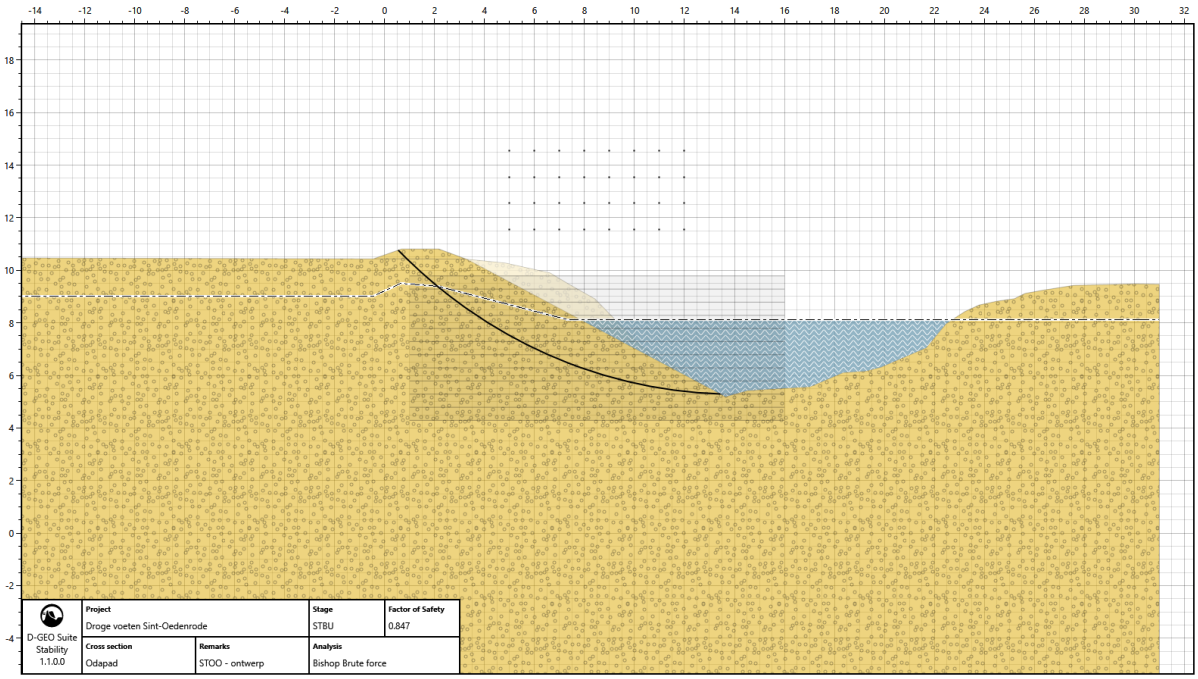


Figuur 28 Basisschematisatie ontwerp STBI IJsvogel – Sf = 2,096

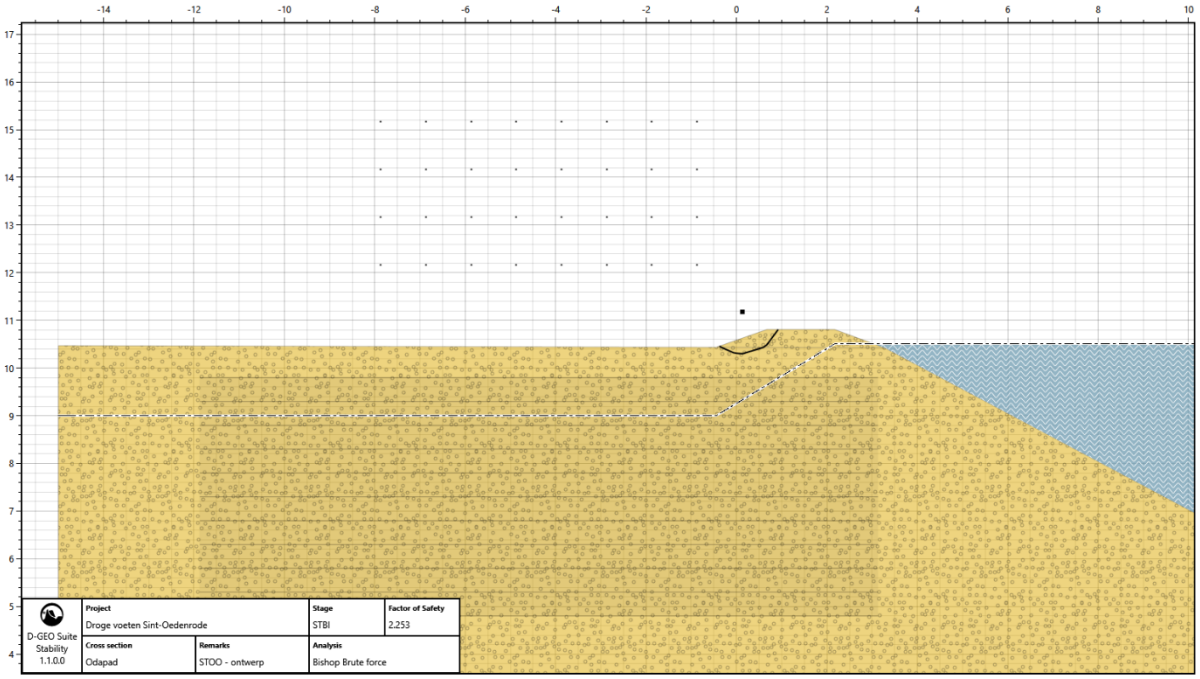
2.4 Stabiliteitsberekening Odapad



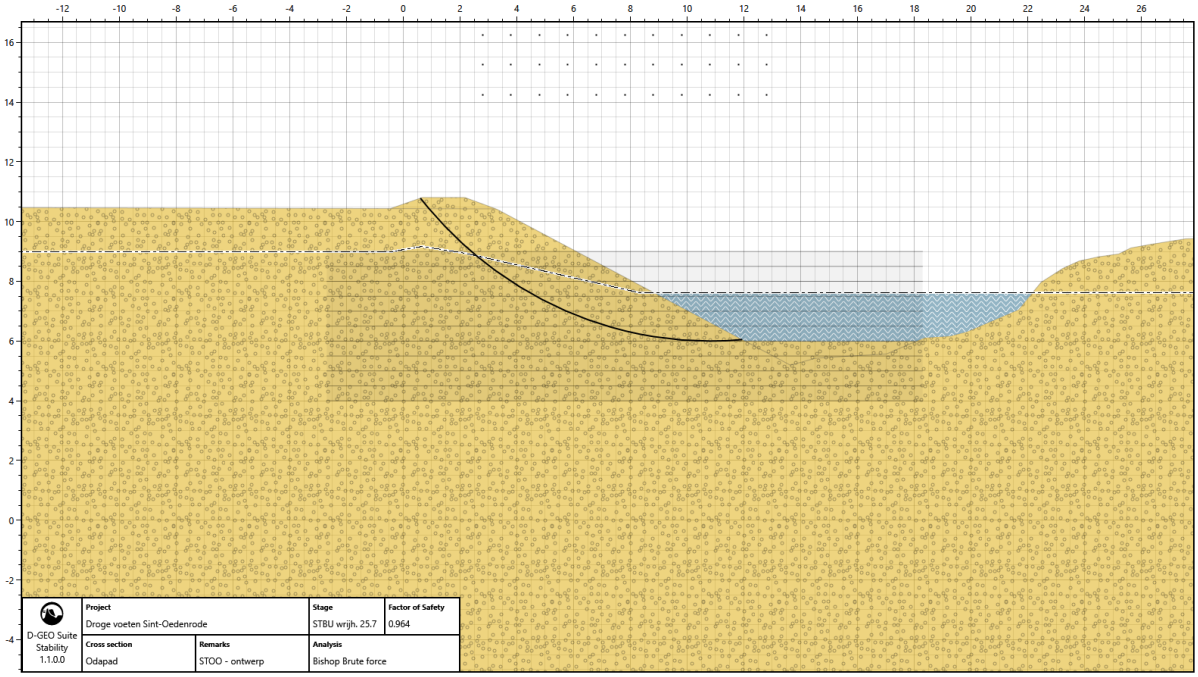
Figuur 29: Basisschematisatie huidige situatie STBU Odapad – Sf = 0,69



Figuur 30 Basisschematisatie ontwerp STBU Odapad – Sf = 0,833



Figuur 31 Basisschematisatie ontwerp STBI Odapad, binnentalud 1:2 – Sf = 2,25



Figuur 32 Doelmatig ontwerp STBU Odapad – Sf = 0,96

Gebiedsinrichting

het uitwerken van o.a. inrichtingsvisies in ontwerpen, bestekken of andere contractvormen en uitvoeringsbegeleiding

Water & Veiligheid

onderzoek, advies en beleidsondersteuning waarna ontwerp, bestek (of andere contractvorm) en uitvoeringsbegeleiding van maatregelen kunnen volgen

Infrastructuur

het uitwerken van technische ontwerpen, bestekken en uitvoeringsbegeleiding voor civiele constructies zoals wegen, bruggen en pleinen