

Invloed van het voorland op de dijk aan de Biezelingse Ham

Afstudeeronderzoek

Eindverslag van het afstudeeronderzoek over de invloed van een bepaalde vorm van het voorland van de Biezelingse Ham op de faalmechanismen van de daar achter gelegen dijk.

Afstudeerorganisatie:	Waterschap Scheldestromen
Eerste bedrijfsbegeleider:	Jelle-Jan Pieterse
Tweede bedrijfsbegeleider:	Samantha van Schaick
Onderwijsinstelling:	HZ University of Applied Sciences
Opleiding:	Civiele techniek
Eerste examiner:	A. Repko
Tweede examiner:	P. Dekker
Auteur:	Arne Vandepitte
Studentnummer:	00073832
Studiejaar:	2019 - 2020
Plaats van uitgave:	Middelburg
Datum:	5 juni 2020
Versie:	1.0
Status:	Definitief



Voorwoord

Het begrip waterveiligheid is in de afgelopen jaren een steeds belangrijkere term geworden in onze samenleving. Dit wil nog niet zeggen dat de Nederlandse burger hier elke dag van wakker ligt. Maar de overheden en veiligheidsautoriteiten werken meer en meer samen in geval van een bedreiging door hoogwater. Nederland, met name Zeeland, staat voorop op het gebied van preventieve maatregelen tegen overstromingen. Een waterkering met de vorm zoals we die nu kennen, is afgewogen tussen kosten en baten. Vanwege het intensief ruimtegebruik in Nederland, is een waterkering waarbij een overstroming onmogelijk zou zijn, nagenoeg ondenkbaar. Daarom is een constante monitoring noodzakelijk voor het behoud van de sterkte van onze waterkeringen.

Het voorland aan de Biezelingse Ham maakt onderdeel uit van de primaire waterkering. Dat wil zeggen dat het meewerkt aan de waterkerende functie van de dijk. In welke mate het voorland een invloed uitoefent op de achterliggende dijk is in dit rapport onderzocht. Gedurende 4 maanden ben ik in opdracht van de HZ University en Waterschap Scheldestromen, bezig geweest met het onderzoeken van de invloed die het voorland heeft op de dijk. In dit rapport vindt u mijn onderzoeksresultaten en aanbevelingen voor het gebied aan de Biezelingse Ham.

Het schrijven van deze scriptie is een leerrijke ervaring geweest die mij een nieuwe inkijk heeft gegeven in de wereld van dijken en waterveiligheid. Daarom zou ik graag de volgende mensen bedanken. In de eerste plaats Waterschap Scheldestromen voor het beschikbaar stellen van deze afstudeeropdracht. Daarnaast de begeleiding vanuit Waterschap Scheldestromen uitgevoerd door Jelle-Jan Pieterse en Samantha van Schaick. Tot slot wil ik graag Albert Repko bedanken voor de begeleiding vanuit de HZ University.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Arne Vandepitte

Middelburg, 5 juni 2020

Samenvatting

Aan de noordzijde van de Westerschelde onder 's-Gravenpolder, ligt het natuurgebied de Biezelingse Ham. Het is een slik dat behoort tot Natura 2000-gebied, gelegen aan de buitenzijde van een dijk die functioneert als primaire waterkering. Het hoofddoel van de dijk is het achterland beschermen tegen overstromingen. Hierbij speelt het voorland van de Biezelingse Ham een belangrijke rol. De aanwezigheid van het voorland beïnvloedt de watercondities nabij de dijk. Maar in welke mate het water zich anders gedraagt door de aanwezigheid van het voorland is niet bekend.

In de huidige procedure die Waterschap Scheldestromen hanteert voor de beoordeling van primaire waterkeringen wordt de invloed die een voorland heeft op de watercondities vaak achterwege gelaten. Omdat de invloed van het voorland niet exact gekend is, gaat men uit van het meest ongunstige scenario. De doelstelling is om de invloed die het voorland van de Biezelingse Ham uitoefent op de achterliggende dijk te onderzoeken. Er wordt gekeken naar de morfologie van het voorland en onderzocht in welke vorm het voorland het meest kan bijdragen om in combinatie met de dijk de veiligheid van het achterland te kunnen garanderen.

Dit onderzoek naar de invloed die het voorland heeft op de watercondities in het gebied is zowel een literatuurstudie als een experimenteel onderzoek. Er is informatie verzameld over de faalmechanismen waar de desbetreffende dijk mee te maken heeft en de eisen waaraan die moet voldoen. Er worden drie verschillende ontwerpen van het profiel van het voorland gemaakt, namelijk een verlaagd, een verhoogd en een steiler profiel. Daarna is bij ieder ontwerp de dijk getoetst op de faalmechanismen waar het voorland een invloed op heeft. Zo wordt de dijk voor elk ontwerp getoetst op overloop en golfoverslag, piping en macro-instabiliteit buitenwaarts. Deze resultaten worden samen met andere relevante beoordelingscriteria onderling vergeleken in een Multicriteria-analyse. Op deze manier komen de sterke en zwakke elementen van een ontwerp naar boven.

Op basis van de resultaten van de Multicriteria-analyse zijn de ontwerpen van de twee beste varianten gecombineerd. Het definitief ontwerp is een steiler profiel waarin het grootste gedeelte is verhoogd. Dit ontwerp zorgt voor een verbeterde waterveiligheid en een beperkte schade aan de natuur. Daarnaast is beschreven wat voor sediment moet worden gebruikt voor de ophoging. De uitvoering hiervan moet plaatsvinden in de wintermaanden om de vogeltrek niet te verstoren. Voor het definitief ontwerp is er verder onderzocht hoe erosie van het gebied kan worden tegengehouden door het plaatsen van een drempel uit breukstenen. Tot slot is er een overzichtstekening gemaakt van het ontwerp van het voorland en een doorsnede van het dijkprofiel aan de Biezelingse Ham.

Begrippenlijst

Achterland	Het gebied aan de landzijde van de waterkering.
Belasting	Een uitgeoefende in- of uitwendige kracht op een constructie. Onder invloed van de kracht zullen er inwendige spanningen en vervormingen optreden.
Binnentalud	Hellend vlak van het dijklichaam aan de binnendijkse zijde van de dijk (overgang van dijk naar maaiveld).
Buitenberm	Verbreiding aan de buitendijkse zijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden.
Buitentalud	Hellend vlak van het dijklichaam aan de kerende zijde.
Dijktraject	Gedeelte van een primaire waterkering dat afzonderlijk genormeerd is.
Dijkringgebied	Een gebied dat wordt beschermd tegen buitenwater door middel van een primaire kering of hoge gronden. Aangewezen in de Waterwet.
Dijkvak	Een deel van een dijktraject, ingedeeld volgens min of meer gelijke sterkte-eigenschappen en belasting.
Hydraulische belasting	Belasting op de waterkering als gevolg van de lokale waterstand en bijhorende golven.
Hydraulische randvoorwaarden	Een waterkering beheerder is verplicht elke vijf jaar de veiligheidstoestand van een waterkering te rapporteren. Voor deze toetsing dient de Minister van Verkeer en Waterstaat eveneens elke vijf jaar hydraulische randvoorwaarden vast te stellen.
Primaire waterkering	Een waterkering die beschermt tegen buitenwater. Het biedt beveiliging tegen overstroming doordat het ofwel behoort tot het stelsel dat een dijkringgebied omsluit, of voor een dijkringgebied is gelegen.
Slik	Een buitendijks getijdengebied, dat hoofdzakelijk bestaat uit zand en slib, dat tweemaal per dag droogvalt tijdens eb en onderloopt tijdens vloed.
Stabiliteitszone	De zone die bijdraagt aan de stabiliteit van de waterkering.
Toetspeil	De waterstand die wordt gebruikt voor het beoordelen van de toestand van de waterkeringen, met een bepaalde overschrijdingsfrequentie. In het toetspeil is de verwachte zeespiegelstijging verwerkt.
Voorland	Het gebied dat aansluit aan de buitenzijde van de waterkering. Het gebied kan zowel boven als onder het wateroppervlak liggen.
Waterkering	Een object met als functie het tegenhouden van water. Men onderscheidt primaire waterkeringen, regionale waterkeringen en overige. Een waterkering kan zijn: een dijk, kade of wal, een dam, een kunstwerk, duinen of hoge gronden.
Waterwet	De basis voor normen die aan watersystemen worden gesteld.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	1
Samenvatting	2
Begrippenlijst.....	3
1 Introductie	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Probleemstelling.....	6
1.3 Doelstelling.....	7
1.4 Vraagstelling	7
1.5 Beoogd resultaat.....	7
1.6 Leeswijzer	7
2 Theoretisch kader.....	8
2.1 Gebied omschrijving	8
2.2 Achtergrondinformatie	10
2.2.1 Natuurgebied.....	10
2.3 Functie dijk	11
2.3.1 Dijkopbouw	11
2.4 Faalmechanismen dijk	13
2.4.1 Faalmechanismen met betrekking op dit onderzoek	13
2.4.2 Faalmechanismen die geen betrekking hebben op dit onderzoek	14
2.5 Functie voorland.....	15
2.6 Faalmechanismen voorland	16
2.7 Randvoorwaarden	18
2.7.1 Beschermingszones	18
2.7.2 Toetsingsprocedure.....	18
2.7.3 Hydraulische belastingen	19
2.8 Programma van eisen	21
2.8.1 Functionele eisen	21
2.8.2 Technische eisen.....	21
2.8.3 Omgevingseisen	22
2.9 Ondergrondgegevens	23
3 Methode	24
3.1 Onderzoeksmethoden.....	24
3.1.1 Toepassing in dit onderzoek.....	24
3.2 Toepassing per deelvraag	25
3.3 Onderzoeksinstrumenten	25
3.3.1 MorphAn.....	25
3.3.2 Ringtoets	26
3.3.3 D-GEO Suite Stability.....	27
3.3.4 Handmatige berekeningen.....	27
4 Resultaten	28
4.1 Randvoorwaarden en eisen.....	28
4.2 Toetsing faalmechanismen bestaande situatie.....	29
4.3 Toetsing faalmechanismen ontwerpvarianten.....	30
4.3.1 Ontwerpvarianten	30
4.3.2 Toetsingsresultaten	31
4.4 Variantenstudie	32
4.4.1 Multicriteria-analyse	32
4.4.2 Resultaat Multicriteria-Analyse	32

4.5 Definitief ontwerp.....	33
4.5.1 Uitvoering.....	33
4.5.2 Drempel uit breuksteen.....	34
4.5.3 Voorland als klimaatbuffer	34
5 Discussie.....	35
6 Conclusie en aanbevelingen	36
6.1 Conclusie	36
6.2 Aanbevelingen	37
Figuren- en tabellenlijst	38
Bibliografie.....	39
Bijlagen.....	40

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Waterschap Scheldestromen beschermt de Zeeuwse bevolking tegen het water van de Noordzee en rivieren. Met behulp van een primair en secundair waterkeringssysteem zorgen ze ervoor dat stormwater vanuit de zee, rivieren of kanalen het vaste land niet kan bereiken. Ze zijn verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van een groot deel van de waterkeringen in Zeeland. Hieronder valt onder andere de beoordeling van waterkeringen. Dit is de toetsing van waterkeringen aan de hand van een bepaalde methode die is vastgesteld door het Rijk en daardoor van toepassing op heel Nederland. Op basis hiervan kan men bepalen of de waterkering voldoet aan de norm of niet en of er eventueel ingegrepen moet worden of niet.

Op onderstaande afbeelding (Figuur 1) ziet u de primaire dijk aangegeven door middel van gearceerde bekleedingsvlakken, met daarvoor het voorland van de Biezelingse Ham. Dit voorland is het gebied vanaf de buitenzijde van de dijk, tot aan de vaargeul van de Westerschelde. Het voorland is een groot slik dat tweemaal per dag onder water komt te staan tijdens vloed. De golven die op de primaire dijk terecht komen, worden al een heel stuk gereduceerd door het voorland. Deze invloed van het voorland wordt slechts beperkt meegenomen in de toetsingsmethode die wordt gebruikt om te bepalen of de dijk voldoet aan de opgelegde norm. Niet enkel golven kunnen ervoor zorgen dat de dijk bezwijkt, een dijk heeft allerlei verschillende faalmechanismen. Ook op deze faalmechanismen heeft het voorland een invloed die niet gekend is.



Figuur 1 Primaire waterkering en voorland van de Biezelingse Ham

Bron: GeoWeb, 2018

1.2 Probleemstelling

In de huidige procedure voor het beoordelen van een primaire waterkering wordt de invloed die het voorland heeft, vaak achterwege gelaten. Men weet dat het voorland van de Biezelingse Ham een invloed heeft op de faalmechanismen van de achterliggende dijk, maar men weet niet in welke mate. Daarom wil Waterschap Scheldestromen door middel van dit onderzoek meer te weten komen over de specifieke invloed die het voorland van de Biezelingse Ham uitoefent op de achterliggende dijk. Als vastgesteld kan worden dat het voorland een grote reducerende functie heeft op de dijk, kunnen dijken in de toekomst minder groot en robuust worden gebouwd, wat een grote kostenbesparing kan zijn. Ook zou het beheer van het voorland kunnen worden aangepast, als alternatief voor traditionele dijkversterking.

1.3 Doelstelling

De dijk van de Biezelingse Ham zou ongetwijfeld heel andere belastingen te verduren krijgen moest het voorland er anders uitzien of er gewoonweg niet zijn. Om de huidige sterkte van de primaire waterkering aan de Biezelingse Ham te bepalen worden eerst de faalmechanismen van zowel de dijk als het voorland vastgesteld. Hierna zal worden gekeken naar het verband tussen de faalmechanismen en de aanwezigheid van het voorland. Met behulp van verschillende softwareprogramma's kunnen deze faalmechanismen worden berekend. Voor heel wat zaken zal het voorland wellicht een positieve invloed hebben op de dijk. Welke invloeden en de oorzaak ervan, wordt onderzocht in dit afstudeeronderzoek.

1.4 Vraagstelling

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt als volgt:

Hoe kan het ontwerp van het voorland van de Biezelingse Ham geoptimaliseerd worden om de kans op voorkomen van de faalmechanismen van de achterliggende dijk zo veel mogelijk te reduceren?

De hoofdvraag wordt verdeeld in verschillende deelvragen om systematisch tot een oplossing te komen:

- a. Hoe zien de randvoorwaarden eruit en welke eisen gelden er voor de dijk?
- b. Hoe zien de belangrijkste faalmechanismen van de dijk en het voorland eruit?
- c. In welke vorm heeft het voorland de meest gunstige invloed op de dijk?

1.5 Beoogd resultaat

Dit onderzoek wordt uitgevoerd om de invloed van het voorland van de Biezelingse Ham te bepalen. Hieruit volgt het verband tussen het voorland en de faalmechanismen van de achterliggende dijk. Dit wordt berekend en gesimuleerd door gebruik te maken van verschillende software. Welke software waarvoor wordt gebruikt vindt u in hoofdstuk 3.3 'Onderzoeksinstrumenten'. Uiteindelijk wordt een beter inzicht gecreëerd in de effecten van het voorland op de achterliggende dijk en een voorstel tot verbetering van het ontwerp van het voorland. Dit onderzoek biedt de mogelijkheid om bij toetsingen van dijken in de toekomst, de invloed van andere voorlanden mee te nemen.

1.6 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 'Theoretisch kader', wordt de belangrijkste theorie uitgelegd die is gebruikt voor het oplossen van de hoofdvraag en deelvragen. Ook wordt hierin alle achtergrondinformatie gegeven die van toepassing is voor het onderzoek. Verder staan de randvoorwaarden en het programma van eisen ook in hoofdstuk 2. Hierin worden de eisen en normen beschreven waaraan de dijk en het voorland moeten voldoen om de veiligheid van het achterland te kunnen garanderen. In hoofdstuk 3 'Methode' worden de verschillende onderzoeksmethoden die zijn toegepast in dit onderzoek beschreven, samen met de onderzoeksinstrumenten die hiervoor zijn gebruikt. De uiteindelijke resultaten van het onderzoek staan in hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 5 worden de resultaten geïnterpreteerd en de beperkingen van het onderzoek vermeld. In het laatste hoofdstuk, hoofdstuk 6, staat de conclusie waarin het antwoord wordt gegeven op de hoofdvraag. Er worden enkele aanbevelingen gedaan voor eventuele verdere onderzoeken.

2 Theoretisch kader

Om tot een beter inzicht te komen waar het onderzoeksgebied zich bevindt, wordt er in het hoofdstuk 'Theoretisch kader' uitleg gegeven over het gebied. Alle benodigde achtergrondinformatie en zaken die nodig zijn om het onderzoek te kunnen uitvoeren, worden verder in dit hoofdstuk beschreven.

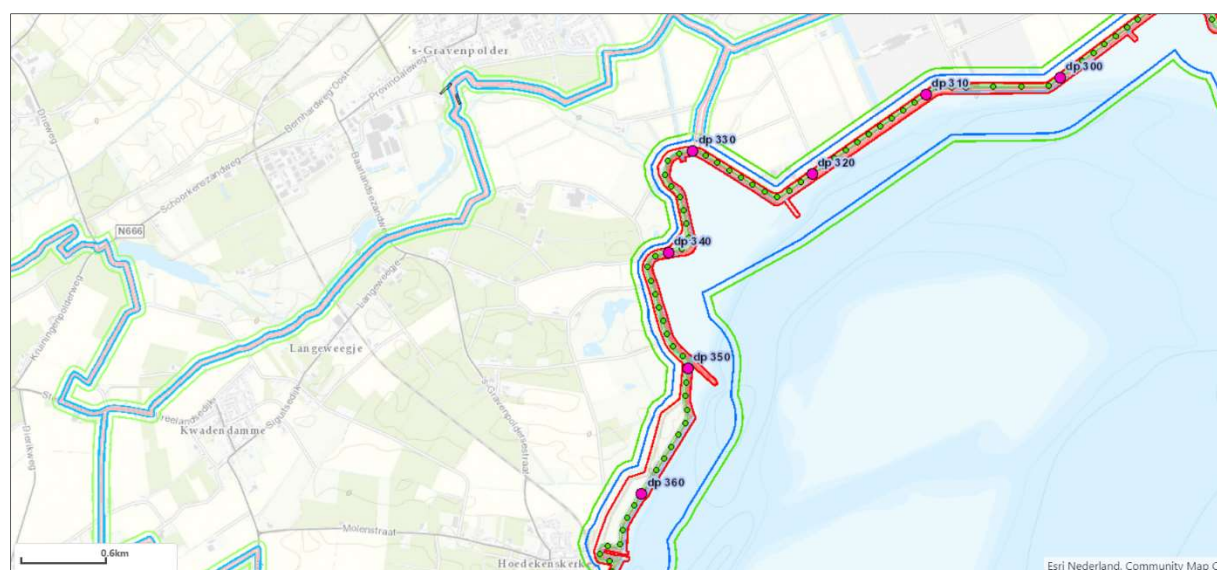
2.1 Gebied omschrijving

In een inham aan de noordelijke zijde van de Westerschelde, onder 's-Gravenpolder, ligt een slik genaamd de Biezelingse Ham (Figuur 2, Figuur 3). Aan de ene kant afgebakend door een primaire waterkering en aan de andere kant de Westerschelde. Achter de primaire waterkering liggen regionale keringen, enkele inlaagdijken en een gebied dat in beheer is van Natuurmonumenten. De primaire dijk maakt deel uit van dijkkring 30 (zie bijlage 4) Zuid-Beveland (ten westen van het kanaal door Zuid-Beveland), traject 30_3 (Figuur 16), tussen dijkpalen 323 en 349.



Figuur 2 Overzicht projectlocatie

Bron: GeoWeb, 2018



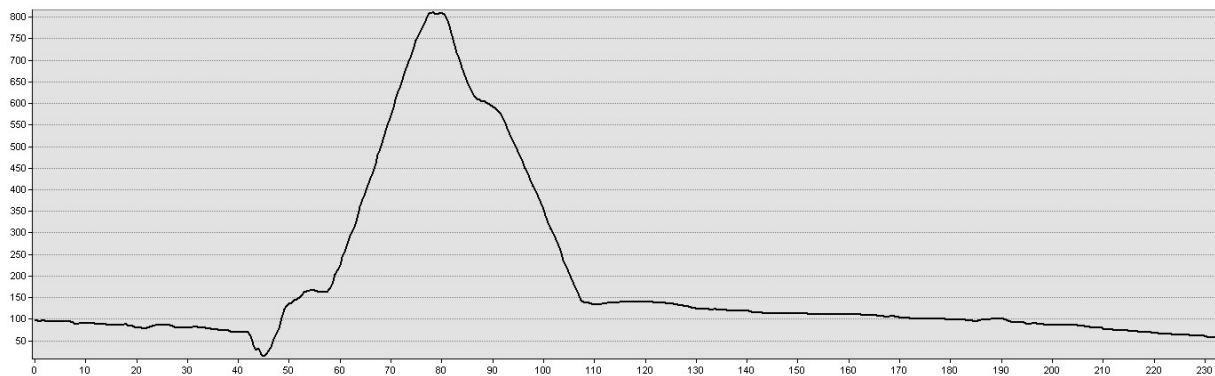
Figuur 3 Primaire en regionale waterkeringen en dijkpaalnummers

Bron: GeoWeb, 2018

Hoogtes

Op onderstaande afbeelding (Figuur 4) is een doorsnede van de dijk en een deel van het voorland te zien (de linkse zijde van de afbeelding is landinwaarts, de rechtse zijde is het voorland). De dijk aan de Biezelingse Ham heeft een maximale kruinhoogte van +8,21 m t.o.v. NAP. De laagst gemeten kruinhoogte van het betreffende dijktraject aan de Biezelingse Ham en dus de maatgevende hoogte is +7,44 m t.o.v. NAP. Het voorland begint aan de onderkant van het dijklichaam op een gemiddelde hoogte van +1.50 m t.o.v. NAP en loopt naar beneden richting vaargeul.

Informatie over de waterstanden en golfhoogtes worden beschreven in hoofdstuk 2.7.3 'Hydraulische belastingen'.



Figuur 4 Hoogteprofiel dijk

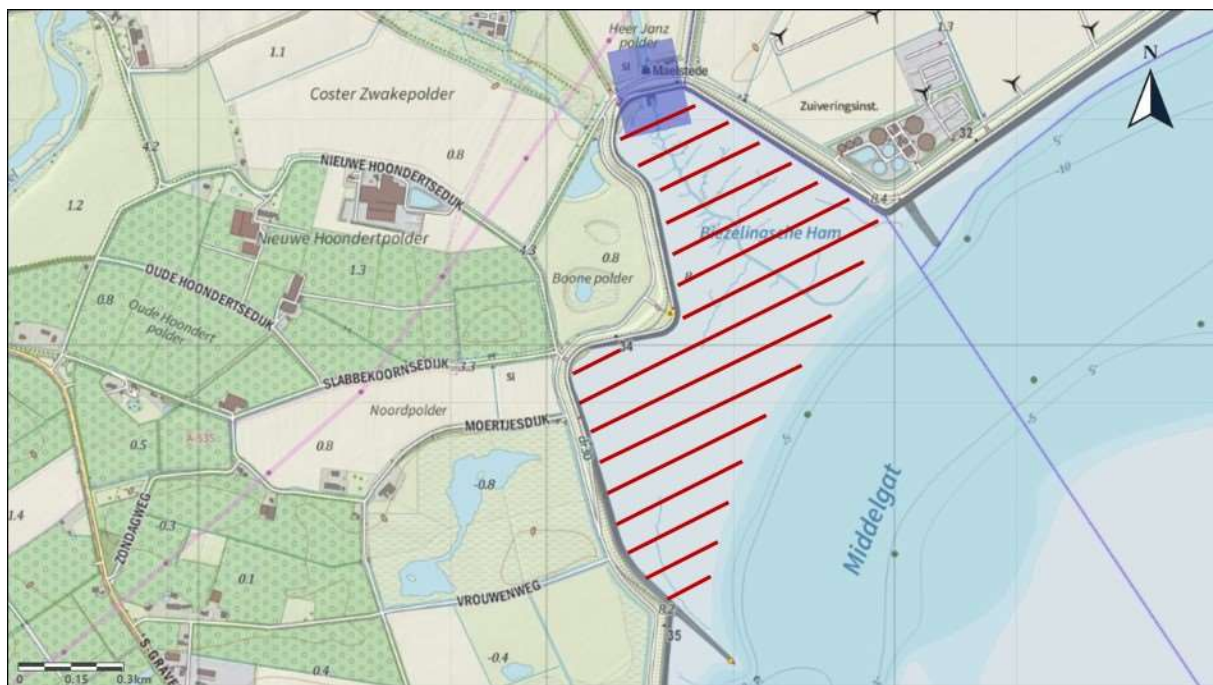
Bron: AHN, 2007

2.2 Achtergrondinformatie

In het hoofdstuk ‘Achtergrondinformatie’ wordt onder andere beschreven dat een deel van het gebied rond de Biezelingse Ham, Natura 2000-gebied is. Deze informatie is niet enkel informatief, maar is van belang voor eventuele werken of ingrepen die zouden kunnen plaatsvinden in het gebied.

2.2.1 Natuurgebied

Het natuurgebied van de Biezelingse Ham (Figuur 5, gearceerd gebied) is een buitendijks getijdengebied dat behoort tot Natura 2000-gebied. Tijdens de periode van de jaarlijkse vogeltrek is dit gebied een tussenstop voor onder andere kluten, tureluurs, de wulp etc. Een natura 2000-gebied is een beschermt Europees netwerk van natuurgebieden. Hier geldt de bescherming van de habitatrictlijn. Dit betekent dat er een vergunning moet worden aangevraagd als er een project wordt uitgevoerd in of nabij het gebied. Het te onderzoeken dijktraject is ongeveer 3100 meter lang. De waterkering beschermd de volgende poldergebieden: Willem-Annapolder (gedeeltelijk ten noorden van de Biezelingse Ham), Heer-Janzpolder, Boonepolder, Noordpolder en Hoedekenskerkepolder (ten zuiden van de Biezelingse Ham).



Figuur 5 Poldergebieden en Natura 2000-gebied in de Biezelingse Ham

Bron: GeoWeb, 2018

Slikken

Het buitendijks gebied van de Biezelingse Ham bestaat hoofdzakelijk uit slikken. Een slik is een getijdengebied dat droog komt te staan tijdens laagwater en weer onder loopt bij hoogwater. Dit gebeurt tweemaal per dag. In tegenstelling tot schorren die enkel onderlopen tijdens springtij (om de 15 dagen). Terwijl het gebied onderloopt bezinken er kleine sedimentdeeltjes. Deze vormen een vrij ondoordringbare laag waardoor er zich een donkere zuurstofloze bodem vormt. Daarom is een slikken vaak onbegroeid.

Gemaal en vispassage

In het noordelijke gedeelte van het natuurgebied bevindt zich een gemaal genaamd ‘Maelstede’ (Figuur 5, blauw gearceerd). Dit gemaal dient voor het binnenwater te spuien en buitenwater tegen te houden. Op deze manier kan het peil van het binnenwater in stand worden gehouden op het polderpeil van -2,0 m NAP in de zomer en -2,2 m NAP in de winter. Ook bevindt zich hier een vispassage. Hier moet rekening mee worden gehouden als de morfologie van het voorland verandert.

2.3 Functie dijk

Om de gevolgen van het voorland op het ontwerp van de dijk te kunnen inschatten, moet in de eerste plaats de functie van de dijk en het voorland gekend zijn. Het is ook belangrijk dat de opbouw van de dijk gekend is. Deze kennis is nodig omdat de golfoverslag, die afhankelijk is van de vorm en opbouw van de dijk, berekend moet worden in een later stadium in dit onderzoek. De functie en opbouw van de dijk wordt hieronder toegelicht.

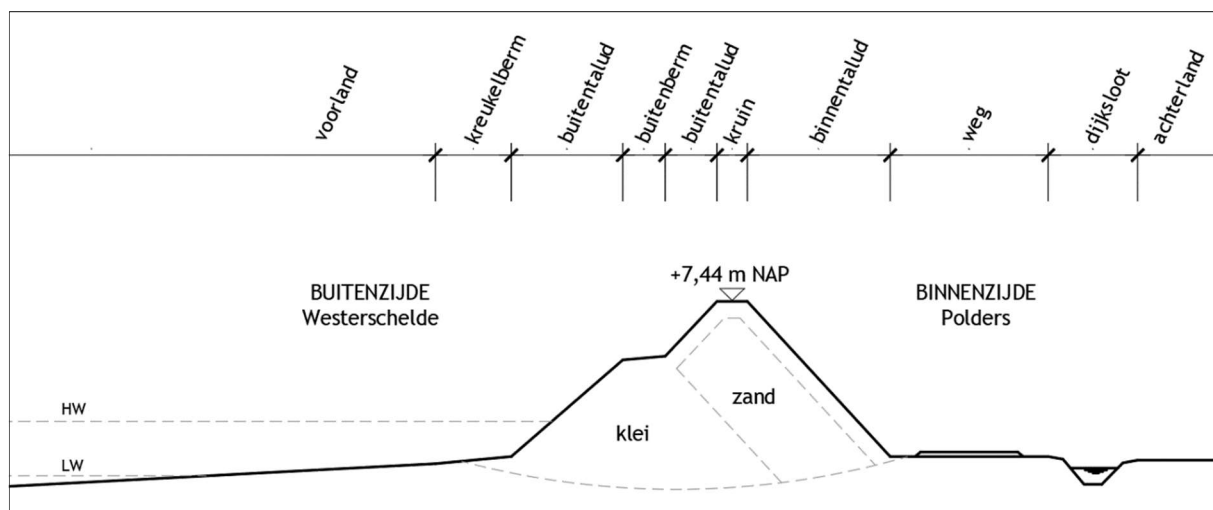
Een waterkering is een grondlichaam (dijk of duin), met als hoofdfunctie het achterliggende land beschermen tegen overstromingen, door middel van het tegenhouden van water. De dijk aan de Biezelingse Ham is een primaire waterkering. Deze dijk biedt rechtstreekse bescherming tegen het water van grote rivieren of van de zee. In deze situatie, tegen het water van de Westerschelde. Naast deze functie is de dijk voorzien van smalle wegen. Voor het grootste gedeelte zijn de wegen enkel toegankelijk voor wandelaars en fietsers. Slechts een klein gedeelte van de onderhoudsweg is afgesloten in verband met natuurbelangen, het gedeelte is enkel toegankelijk voor onderhoudsteams (Figuur 6).



Figuur 6 Afgesloten onderhoudsweg op de dijk aan de Biezelingse Ham

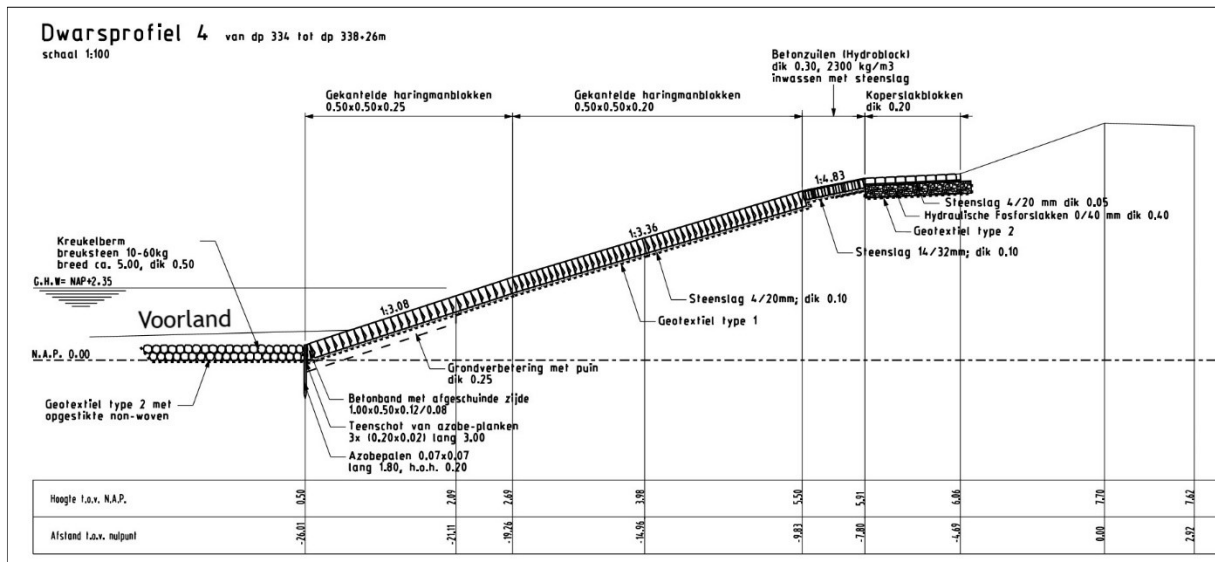
2.3.1 Dijkopbouw

De dijk aan de Biezelingse Ham is in het jaar 2001 vernieuwd. De bestaande dijk aan de Biezelingse Ham is tot aan het huidige bermniveau gevormd door de oude dijk. Hierdoor heeft de huidige dijk een grote kleikern (Figuur 7). Het overige gedeelte van het dijklichaam bestaat voornamelijk uit zand, afgedekt door een 110 cm dikke kleilaag.



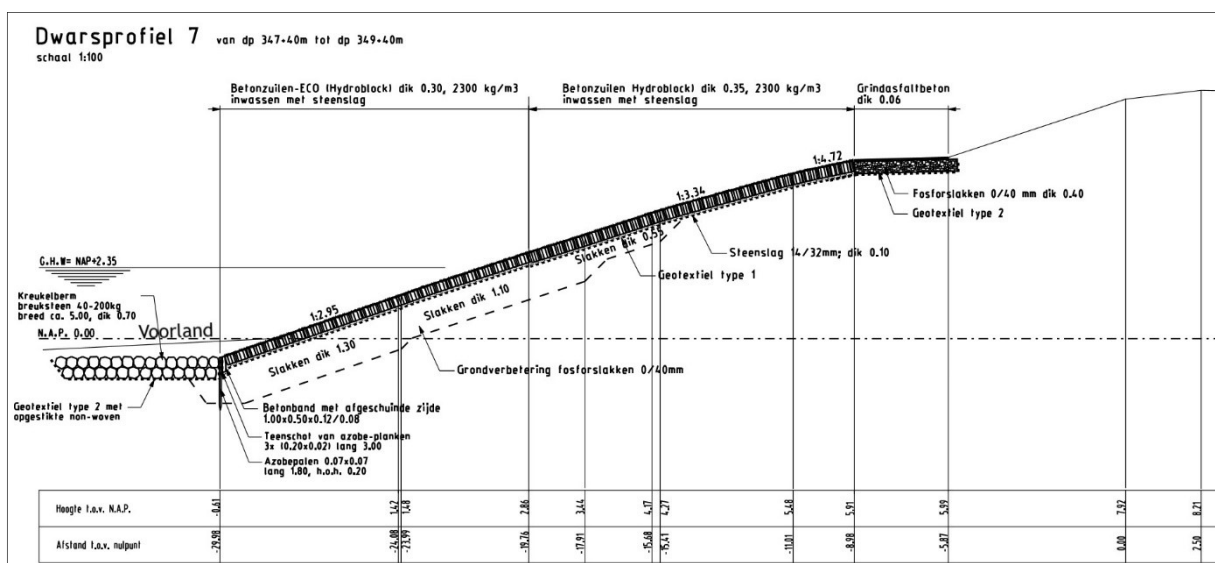
Figuur 7 Doorsnede dijk aan de Biezelingse Ham

Het grootste gedeelte van de dijk is bekleed met gekantelde haringmanblokken (Figuur 8). Boven deze gekantelde betonblokken zijn betonzuilen (hydroblocks) aangebracht die de overgang vormen naar de onderhoudstrook. Het overige gedeelte van de dijk (Figuur 9) heeft een bekleding van hydroblocks, waarvan het onderste deel is voorzien van een ecotop. De kreukelberm is opgebouwd uit breuksteen (40-200 kg, dichtheid 2650 kg/m³). Langs de buitenberm van de dijk ligt een onderhoudstrook uit koperslabblokken. Deze is afgesloten voor recreatief gebruik (Figuur 6). Het zou de vogels in het gebied te veel verstoren.



Figuur 8 Dwarsprofiel 4 ter plaatse van dp 334 tot 338, van dijk aan Biezelingse Ham

Bron: Waterschap

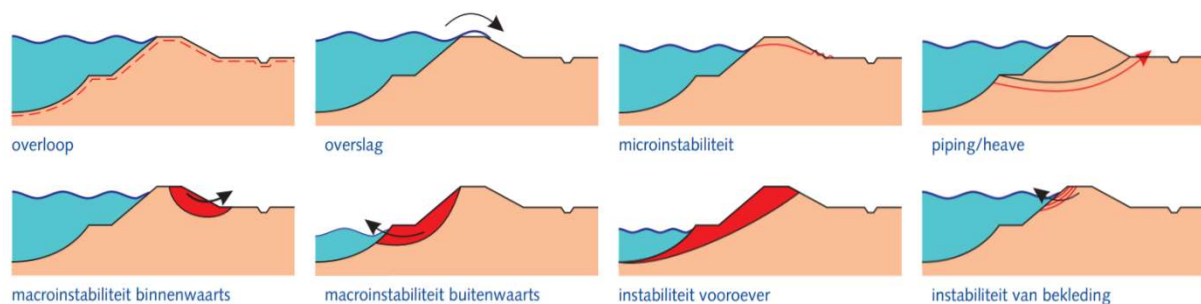


Figuur 9 Dwarsprofiel 7 ter plaatse van dp 347 tot 349, van dijk aan de Biezelingse Ham

Bron: Waterschap

2.4 Faalmechanismen dijk

Een primaire dijk kan op verschillende manieren bezwijken als gevolg van verschillende faalmechanismen (Figuur 10). Dit zijn mechanismen die ervoor zorgen dat de dijk zijn functie als waterkering niet meer kan volbrengen. Faalmechanismen kunnen op verschillende manieren tot stand komen. De belangrijkste faalmechanismen die getoetst zullen worden in dit onderzoek, worden in dit hoofdstuk toegelicht. De manier waarop de belangrijkste faalmechanismen worden getoetst wordt besproken in hoofdstuk 3.3 'Onderzoeksinstrumenten'. De faalmechanismen die geen betrekking hebben op dit onderzoek worden verder hieronder, informatief toegelicht.



Figuur 10 Faalmechanismen van een dijk

Bron: Rijkswaterstaat, 2018

2.4.1 Faalmechanismen met betrekking op dit onderzoek

Overloop en overslag / GEKB (grasbekleding erosie kruin en binnentalud)

Dat een dijk voldoet aan een bepaalde norm of niet, wordt vastgesteld aan de hand van de hoeveelheid golfoverslag. Dit is een belangrijk faalmechanisme dat bepalend is voor de sterkte van de dijk. Overloop en overslag zijn twee vergelijkbare faalmechanismen. Het verschil zit in de golfkarakteristieken en toelaatbare golfoverslagdebiet. Bij overloop is de waterstand zodanig hoog dat het water over de kruin stroomt. In het begin kan dit een kleine stroming zijn. Maar na een bepaalde tijd zal erosie van het binnentalud optreden, waardoor het proces steeds sneller en sneller zal gaan. Als de dijk verzadigd raakt met water, kan er ook afschuiving optreden. Bij overslag slaan er golven over de dijk. Dit kan een grote hoeveelheid water zijn waardoor het binnentalud erodeert. De golven zijn het gevolg van een hoge waterstand en harde wind. Het waterniveau moet dus niet tot aan het kruinniveau komen in het geval van golfoverslag.

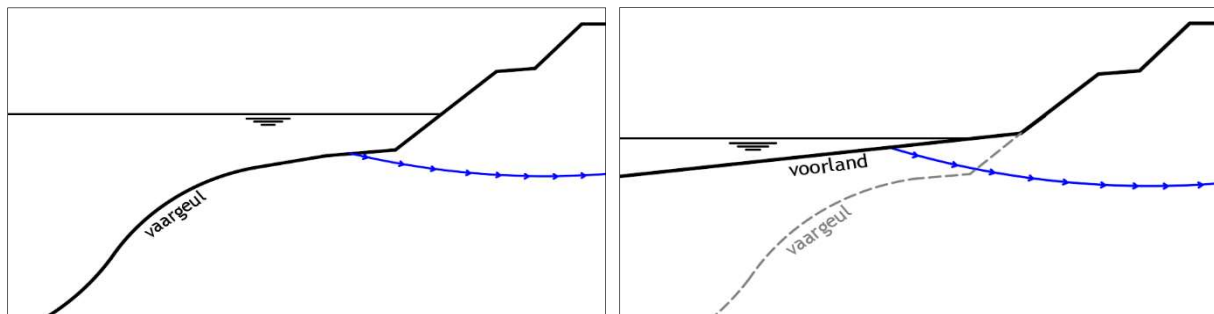
Ook op de dijk aan de Biezelingse Ham kan golfoverslag een grote invloed hebben. De grote strijklengte kan de oorzaak zijn van een grotere golfhoogte. Bij een combinatie van springtij en storm, kunnen golven van zodanige grootte zijn dat ze over de dijk heen slaan. Met als gevolg dat het binnentalud zal eroderen. De hoeveelheid overslag en de minimale kruinhoogte worden berekend met behulp van het softwareprogramma Riskeer.

Piping

Dit faalmechanisme vindt plaats onder het dijklichaam en komt voor bij een ondoorlaatbare deklaag in combinatie met een onderliggende watervoerende zandlaag. Bij hoge buitenwaterstanden treedt grondwaterstroming op tussen het grensvlak van de verschillende grondlagen. Als deze grondwaterstroming een bepaalde snelheid bereikt, wordt sediment meegenomen in de stroming. Aan de binnenzijde van de dijk komt het water en sediment naar boven. Vanaf dit moment verbreedt de pipe zich en wordt er steeds meer en meer sediment meegevoerd. Uiteindelijk zal de dijk inzakken en bezwijken. Het faalmechanisme piping wordt met een handberekening bepaald.

Het proces van piping wordt onderverdeeld in 'opdrijven en opbarsten' en 'heave'. Opdrijven en opbarsten is het scheuren van de deklaag. Heave is het verlies van korrelspanning als gevolg van de grote waterspanning ter plaatse van het uittredepunt.

De grondwaterstroming begint aan de buitenzijde van de dijk. Door de aanwezigheid van het voorland op de teen, moet het water een langere weg afleggen (schets rechts) om tot onder het dijklichaam heen te dringen. Bij cohesieve grond heeft het voorland een reducerende functie.



Figuur 11 Schets van piping zonder en met voorland

Macro-instabiliteit buitenwaarts

Dit faalmechanisme houdt in dat een gedeelte van de grond aan de binnenzijde van de dijk kan afschuiven als gevolg van te veel waterdruk en te weinig gronddruk in het dijklichaam. Het eigen gewicht van de dijk zorgt voor extra gronddruk en is dus een belangrijke factor. Als gevolg van de afschuiving zal het kruinniveau dalen. Het kan voorkomen dat na deze afschuiving de dijk nog waterkerend is. Daarom is het belangrijk de reststerkte te beschermen. Dit is de sterkte die het grondlichaam biedt, nadat de dijk is ingezakt. Door de extra druk die het voorland biedt in deze situatie, is de kans op macro-instabiliteit buitenwaarts iets kleiner dan bij een situatie zonder voorland. De macro-instabiliteit zal handmatig en met D-GEO Suite Stability worden berekend.

Instabiliteit bekleding

Bij extreem grote golven kan de dijkbekleding beschadigd raken. Het voorland bij de Biezelingse Ham overdekt het onderste gedeelte van het buitentalud en bekleding van de dijk. Op dit gedeelte kunnen golven geen invloed uitoefenen op de bekleding. Enkel op hoger gelegen delen van de dijk komen golven in contact met de bekleding. Maar door het voorland zijn de golven al gereduceerd en hebben ze een kleinere impact op de bekleding. Dit faalmechanisme wordt niet verder getoetst in dit onderzoek.

2.4.2 Faalmechanismen die geen betrekking hebben op dit onderzoek

Macro-instabiliteit binnenwaarts

Dit faalmechanisme is te vergelijken met de buitenwaartse macro-instabiliteit. Het komt voor tijdens hoogwater. De stabiliteit van de dijk wordt gesteund door het hoge water. Bij snel vallend water verdwijnt deze druk en is de waterdruk in het dijklichaam nog steeds hoog. Dan is er kans op instabiliteit. Aan de binnenzijde heeft het voorland geen invloed. Daarom heeft dit faalmechanisme geen betrekking op dit onderzoek.

Instabiliteit vooroever

Dit onderdeel is vergelijkbaar met macro-instabiliteit buitenwaarts. Een vooroever kan afschuiven en uitvloeien. De hoogte van de vooroever is bepalend voor de waterstand dat beslissend is voor het faalmechanisme. De vooroever van de Biezelingse Ham is zodanig vlak en lang, dat de kans dat de vooroever zou falen omwille van deze instabiliteit, verwaarloosbaar is.

Micro-instabiliteit

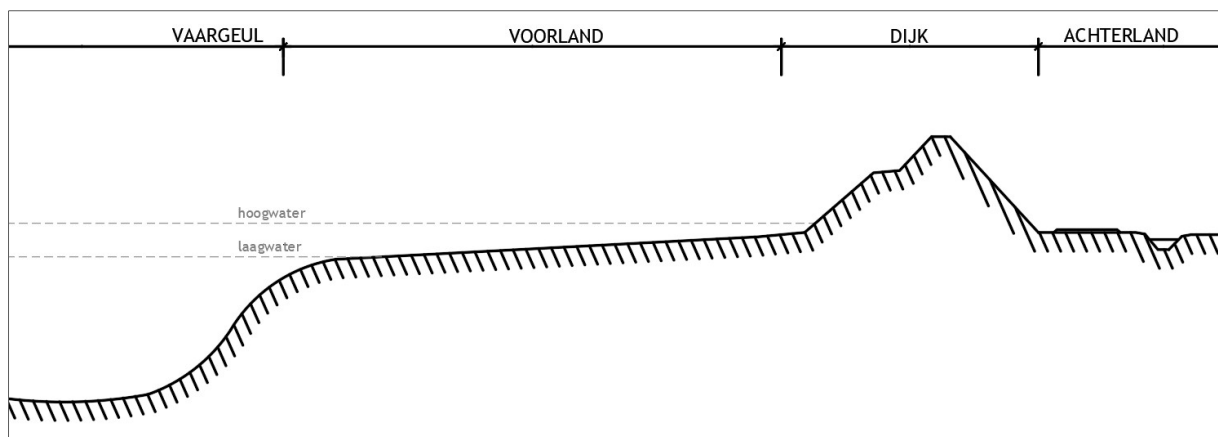
Micro-instabiliteit is erosie van het binnentalud, ten gevolge van uittredend grondwater. Tijdens hoogwater stroomt het water langzaam in het dijklichaam. De bekleding wordt hierdoor opgedrukt en er ontstaan scheuren en verzakkingen aan de binnenzijde van het dijklichaam. Dit heeft als gevolg dat als de topklaag uit klei niet dik genoeg is, het zandlichaam van de dijk kan uitspoelen, wat op zijn beurt dan weer zorgt voor kruinverlaging.

2.5 Functie voorland

In dit hoofdstuk wordt het verband beschreven tussen de faalmechanismen van een dijk en welke invloed het voorland heeft op deze faalmechanismen.

Een voorland is het gebied dat aan de waterzijde van een dijk ligt (Figuur 12). Het is vaak aangeslibd land dat vanaf de zee- of rivierbodem aansluit op de dijk. Elementen zoals stroming, golfslag en waterdruk hebben een invloed op de sterkte van het voorland. Deze belastingen worden ook wel hydraulische randvoorwaarden genoemd. Een voorland kan voor veel verschillende doeleinden worden gebruikt, namelijk: waterafvoer, bewoning, industrie, natuurgebied, recreatie etc. Deze functies zijn eerder van toepassing op grootschalige voorlanden. Het voorland aan de Biezelingse Ham is een kleinschalig natuurgebied. In deze situatie heeft het voorland vooral effect op de faalmechanismen van de dijk. Het levert een bijdrage aan de waterkerende functie en de sterkte van de dijk. De verschillende bijdrages worden hieronder opgesomd:

- golfreductie;
- extra kwelengte;
- steun voor de buitenwaartse stabiliteit van de dijk;
- drempelwerking.



Figuur 12 Schetssituatie van een voorland

De effecten van het voorland op een dijk zijn weergegeven in Tabel 1 en verder toegelicht op de volgende bladzijde.

Tabel 1 Effecten van een voorland

Herdruckt van "Voorland", door Roode N. (2019)

	golfreductie	extra kwelengte en lagere GWS	steunbermwerking	drempelwerking
Bekleding kruin & binnentalud	×			
Bekleding buitentalud	×			
Macrostabiliteit binnenkant		×		×
Macrostabiliteit buitenkant			×	
Microstabiliteit				×
Piping		×		

Golfreductie

Omdat het voorland langer is dan een normale rivieroever, worden golven gebroken voordat ze de waterkering bereiken. Dit verkleint de schade aan de dijkbekleding die door golven wordt verricht. Ook voor macrostabiliteit heeft het voorland een gunstige werking. Door de verminderde golfreductie raakt het dijklichaam minder verzadigd en het zandlichaam van het voorland biedt extra steun aan de dijk.

Extra kwellengte en lagere grondwaterstanden

Het intredepunt van de kwelstroom komt op een grotere afstand te liggen bij de aanwezigheid van een voorland. Dit verkleint de kans op het faalmechanisme piping. Hoe compacter en minder doorlatend de toplaag van het voorland is, hoe groter het effect.

Steunbermwerving

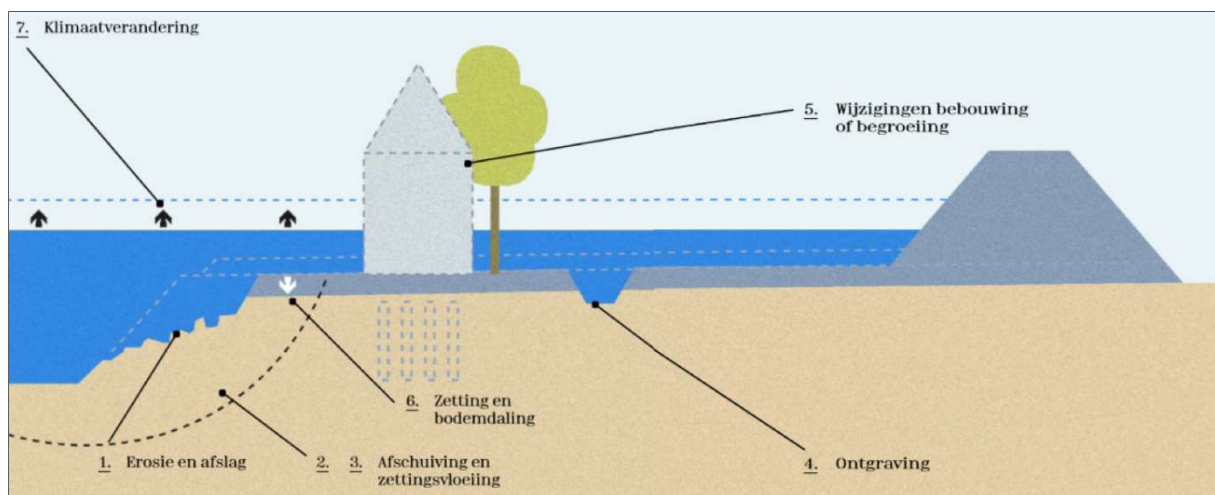
Het voorland van de Biezelingse Ham ligt relatief hoog. Hierdoor heeft het een stabiliserende functie tegenover de dijk. De kans op afschuiving van het dijklichaam verkleint omdat het voorland als een soort steunberm functioneert.

Drempelwerking

Hierbij wordt het voorland vergeleken met een soort drempel tegen overstromingen. Als een dijk bezwijkt, fungeert de doorbraak in de dijk als een soort trechter waar het water met een hoge snelheid doorstroomt. Door de aanwezigheid van een hoog gelegen voorland zal er een kleinere hoeveelheid water doorstromen. Op deze manier kan een voorland de gevolgen van een overstroming beperken of zelfs voorkomen.

2.6 Faalmechanismen voorland

Een voorland heeft op zichzelf geen directe faalmechanismen. Het kan wel eroderen waardoor de functie als steun of golfreductie op de achterliggende dijk kan verminderen. Hiernaast zijn er factoren die het positieve effect van het voorland op de dijk kunnen doen toenemen of afnemen. Deze factoren kunnen geleidelijk aan plaatsnemen of plotseling voorkomen. De belangrijkste voorbeelden van dergelijke factoren, die van toepassing zijn op dit onderzoek, worden hieronder toegelicht (Figuur 13).



Figuur 13 Bedreigingen van het effect van een voorland

Bron: Voorland, Roode N., 2019

Erosie en afslag

Dit fenomeen komt voor tijdens een periode van hoogwater. Het voorland erodeert als gevolg van golfbelasting en stroming. Erosieprocessen kunnen ook plaatsvinden gedurende een langere tijdsschaal. Op deze manier wordt het voorland verlaagt, wat negatieve gevolgen heeft in verband met overstromingskansen. Tevens kan een voorland ook sedimenteren (verhogen), wat leidt tot positieve gevolgen.

Afschuiving en zettingsvloeiing

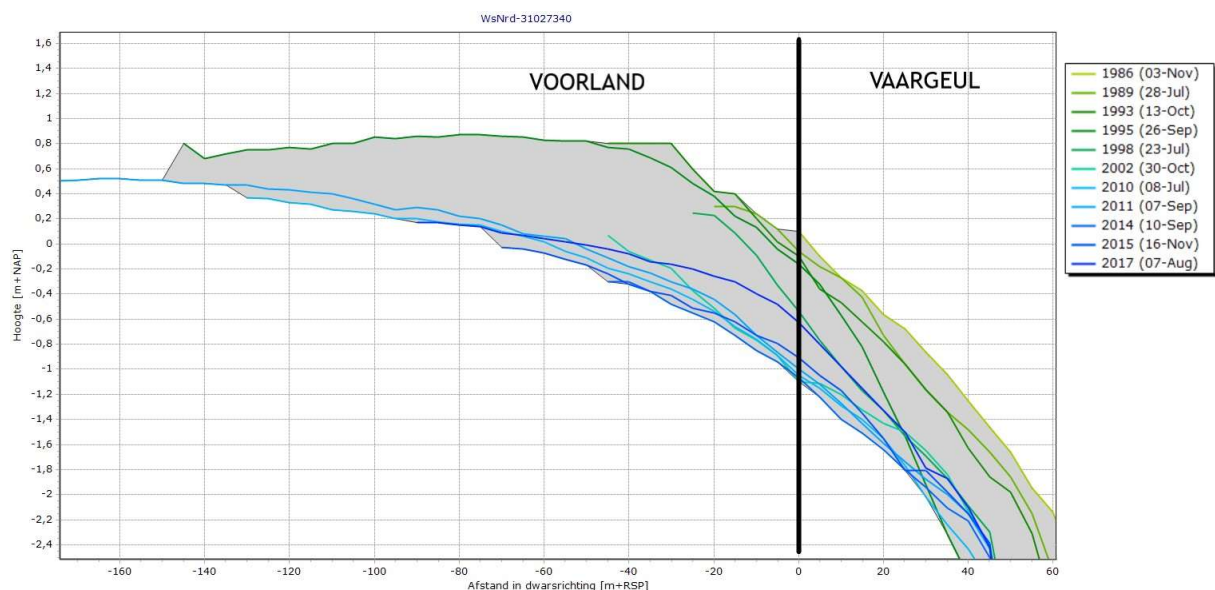
Deze effecten hebben nagenoeg dezelfde gevolgen als erosie en afslag. Het wordt veroorzaakt door een snelle waterstandsval of door toename van de belasting op het voorland. Als een deel van het voorland afschuift verkleint de oppervlakte en wordt de overstromingskans vergroot.

Klimaatverandering

Klimaatveranderingen leiden tot verhoging van de zeespiegel en grotere rivierafvoeren. Dit heeft als gevolg dat de veiligheidsbijdrage die een voorland nu heeft, zal verminderen. De specifieke effecten van de klimaatverandering worden uitgelegd in hoofdstuk 2.8.2 'Technische eisen'.

Bodemdaling

Als de hoogte van het voorland afneemt, neemt de waterdiepte toe. De golfreductie wordt beperkt en de dijk krijgt hardere golfslag te verwerken. Daarnaast neemt bij het dalen van het voorland, de steun die het voorland biedt, ook af. Hieronder (Figuur 14) staan de gegevens van het voorland van de Biezelingse Ham uit MorphAn. Hierop is de evolutie van het voorland te zien. Er is een kleine vermindering in de hoogte met ongeveer 0,8 m in 31 jaar tijd. Hieruit kan worden afgeleid dat er bij de Biezelingse Ham geen sprake is van bodemdaling, maar bodemerosie. De hoeveelheid erosie valt te verwaarlozen als faalmechanisme voor het voorland aan de Biezelingse Ham.



Figuur 14 Profielmetingen voorland

Bron: Waterschap Scheldestromen

2.7 Randvoorwaarden

2.7.1 Beschermingszones

Op onderstaande afbeelding (Figuur 15) zijn er verschillende zones rond de dijk aan de Biezelingse Ham weergegeven door middel van verschillende lijnen aan weerszijden van de dijk. Deze zones zijn wettelijk bepaald en staan elk voor een bepaalde functie (voor een volledige kaart van de Biezelingse Ham zie bijlage 5). Hieronder staan de verschillende zones toegelicht:

Legende:

—	Waterstaatswerk
—	Beschermingszone A
—	Beschermingszone B

Waterstaatsmerk: Dit vormt de feitelijke waterkering.

Beschermingszone A: Dit staat garant voor de stabiliteit van het waterstaatswerk. In deze zone is ruimte gereserveerd om verzwaring aan te brengen die nodig is om de zeespiegelstijging over een periode van 200 jaar op te vangen (profiel van vrije ruimte).

Beschermingszone B: Deze zone is bedoeld om activiteiten die een potentieel gevaar vormen voor de dijk, op grotere afstand van de waterkering te kunnen reguleren.



Figuur 15 Dijkzonering

Bron: GeoWeb, 2018

2.7.2 Toetsingsprocedure

Een dijk moet kunnen voldoen aan de opgelegde norm. De methode om te bepalen of een dijk voldoet, heet een toetsingsprocedure. Een dijk kan getoetst worden per dijktraject of per dijkvak. Een dijktraject is een gedeelte van de waterkering dat afzonderlijk is genormeerd. Een dijkvak is een deel van een dijktraject, ingedeeld volgens ongeveer gelijke sterkte-eigenschappen en belastingen.

De beoordeling van de veiligheid op primaire waterkeringen gebeurt op verschillende manieren, namelijk een eenvoudige toets of een gedetailleerde toets. In een eenvoudige toets wordt de waterkering niet geschematiseerd voor het afleiden van de hydraulische belastingen. Bij de gedetailleerde toets heeft de ligging, het profiel en de ruwheid van de kering, een invloed op de hydraulische belastingen.

Categorisering

Bij een toetsingsprocedure wordt er rekening gehouden met allerlei belastingen als gevolg van de waterstand en golfhoogte (ook wel hydraulische belastingen genoemd). Deze worden uitgedrukt in belastingparameters: duur, richting, hoogte van combinaties van waterstanden en golven. De uitkomst van een dijktoets voor een geheel dijktraject kan worden aangeduid in vijf soorten categorieën (Tabel 2) die zijn vastgesteld in WBI 2017. Als de dijk voldoet aan categorie A, voldoet de dijk aan de nodige veiligheidseisen. Daarom zal in dit onderzoek categorie A gebruikt worden bij het toetsen van een dijk.

Tabel 2 Categorieën van veiligheidsoordelen conform WBI 2017

Bron: Rijkswaterstaat

Categorie	Aanduiding categorie veiligheidsoordeel
A+	Dijktraject voldoet ruim aan de signaleringswaarde
A	Dijktraject voldoet aan de signaleringswaarde.
B	Dijktraject voldoet aan ondergrens, maar niet aan signaleringswaarde.
C	Dijktraject voldoet niet aan de signaleringswaarde en ook niet aan de ondergrens.
D	Dijktraject voldoet ruim niet aan de signaleringswaarde en aan de ondergrens.

2.7.3 Hydraulische belastingen

Onder hydraulische gegevens verstaan we de waterstanden en golfhoogtes die voorkomen in de Biezelingse Ham. Dit zijn de twee factoren die de oorzaak zijn van de faalmechanismen van de dijk en het voorland. De gegevens zijn verdeeld in 3 groepen: de waarden die astronomisch voorkomen, de gegevens die in Riskeer worden berekend en de extreme gegevens die in het verleden zijn waargenomen in Hansweert. Hieronder (Tabel 3) worden de maatgevende waarden toegelicht.

Astronomisch:

Astronomische waterstanden zijn waterstanden die dagelijks worden gemeten op vaste meetpunten. Gegevens in de Biezelingse Ham zijn er niet. In Hansweert (ongeveer 4 kilometer ten oosten van de Biezelingse Ham) zijn er wel meetpunten beschikbaar. Dit is de dichtstbijzijnde locatie waar astronomische waterhoogtes worden gemeten. De waarden in de onderstaande tabel geven de gemiddelde waarden aan die voorkomen in Hansweert. De laagwaterstand is maximaal -250 cm t.o.v. NAP, de hoogwaterstand ligt maximaal rond +300 cm t.o.v. NAP. Vanaf een waterstand van ongeveer +150 cm t.o.v. NAP ligt het voorland van de Biezelingse Ham bijna volledig onder water. De golfhoogtes die voorkomen in Hansweert zijn in normale omstandigheden niet hoger dan 100 centimeter. (Rijkswaterstaat 2019)

Maatgevende waarden (Riskeer):

De maximale (maatgevende) waarden die voorkomen bij een storm met kans van voorkomen 1/3000 per jaar (de signaleringswaarde) kunnen in het softwareprogramma Riskeer worden berekend. Het programma houdt rekening met allerlei factoren zoals: windrichting, waterdiepte, etc. Riskeer berekend de waarden op punten die ongeveer 150 meter van de dijk liggen. De golven die effectief op de dijk neerkomen zullen dus kleiner zijn dan de waarden in de tabel. De werking van het voorland is nog niet meegenomen in de waarden die Riskeer berekend.

Storm waarnemingen:

Hierin worden waarden gegeven die zijn vastgesteld in Hansweert tijdens een storm.

Tabel 3 Hydraulische gegevens

	Astronomisch	Maatgevend	Storm waarnemingen
Waterstand	laagwater: -250 cm NAP hoogwater: +300 cm NAP	max +590 cm NAP	max +446 cm in 1990
Golfhoogte	gemiddeld 100 cm	max 200 cm	Geen gegevens

Overige belastingen

Naast de hydraulische belastingen, heeft de waterkering nog te maken met andere belastingen. Deze kunnen worden omschreven als invloeden of processen die de stabiliteit van de dijk bedreigen. Voor dit onderzoek zijn deze belastingen op de dijk niet direct van toepassing. Ze worden enkel informatief toegelicht. Enkele voorbeelden van overige belastingen zijn: eigen gewicht, verkeer, scheepsgolven en aardbevingen.

Eigen gewicht

Het eigen gewicht wordt als een belasting gezien omdat dit gedeeltelijk de aanleiding is van het faalmechanisme macrostabiliteit. Tegelijk heeft het eigen gewicht ook een positieve bijdrage. De schuifweerstand langs het glijvlak onder het dijklichaam neemt toe door het eigengewicht, wat de kans op falen door piping verkleint. Het eigen gewicht hangt af van de geometrie van de dijk en de grondeigenschappen.

Verkeer

Op de dijk aan de Biezelingse Ham is verkeer niet toegelaten. Enkel in geval van onderhoud aan de dijk is belastend verkeer mogelijk.

Scheepsgolven

Scheepsgolven voeren ook een bepaalde belasting uit voornamelijk op de dijkbekleding. Er zijn drie soorten waterbewegingen als gevolg van een langsvarend schip: primaire golf, secundaire golf en stroming. Deze golven zijn meestal niet hoger dan 0,5 meter. Ze vormen dus geen bedreiging voor de dijk.

Aardbevingen

Bij het ontwerp en de toetsing van dijken wordt er geen rekening gehouden met aardbevingen. De belangrijkste reden hiervoor is omdat de combinatie van extreem hoogwater en aardbevingen twee onafhankelijke gebeurtenissen zijn. De kans dat een kering om deze reden faalt is te verwaarlozen.

2.8 Programma van eisen

Voor dit afstudeeronderzoek zijn er drie soorten eisen te onderscheiden, namelijk functionele eisen, technische eisen en omgevingseisen. De eisen waaraan de dijk en het voorland aan moeten voldoen worden hieronder toegelicht.

2.8.1 Functionele eisen

De functionele eisen van een dijk zijn de volgende:

(Bron: N. Lips)

- De dijk dient veiligheid te garanderen tegen overstromingen tot het risico, afhankelijk van de actuele faalkans, lager is dan de maximaal toelaatbare faalkans uit de Waterwet.
- Na de uitvoering van de dijk moet worden aangetoond dat de dijk over vier jaar voldoet aan de faalkans uit de Waterwet.
- De dijk moet bestand zijn tegen een overslagdebiet, afhankelijk van de bijhorende faalkans.
- De dijk moet bestand zijn tegen een overloopdebiet, afhankelijk van de bijhorende faalkans.
- De dijk dient weerstand te bieden tegen macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts.
- De dijk dient weerstand te bieden tegen piping en heave.
- De dijkbekleding dient bestand te zijn tegen erosie en/of beschadiging door hoogwater.
- De dijk dient te voldoen aan veiligheidsklasse RC1 voor grondlichamen ten aanzien van niet overstromingskans gerelateerd falen (volgens NEN9997-1).
- De dijk mag niet falen (volgens bovenstaande eisen) als gevolg van het gebruik van materieel tijdens uitvoeringswerken.
- De dijk moet gedurende zijn levensduur de minimale hoogte behouden, ondanks kans op zettingen in de ondergrond.
- De maatgevende hoogwaterstand (zie Tabel 3) is het toetspeil.
- De toetsingen moeten voldoen aan normen die zijn opgesteld in WBI2017.

2.8.2 Technische eisen

Normering

Een dijk moet aan bepaalde eisen voldoen. Per dijktraject wordt een signaleringswaarde en een ondergrens vastgelegd. Een signaleringswaarde is een soort alarmering. Als deze norm niet wordt behaald, zal de dijk niet direct bezwijken tijdens een storm. Maar er moeten maatregelen worden getroffen om de dijk terug te laten voldoen aan de norm. De signaleringswaarde wordt onder andere bepaald door de toegelaten kans om te overlijden door een overstroming, deze is vastgesteld in de Nederlandse wetgeving. De kans is voor elke burger in Nederland dezelfde, namelijk 1/100.000. Dat wil zeggen dat 1 burger op 100.000 mag overlijden door een overstroming. In deze overstromingskans wordt met verschillende factoren rekening gehouden zoals: evacuatiesnelheid, waterdiepte, instroomsnelheid, gevolgen voor de omgeving. Omdat deze in elk gebied anders zijn, zijn ook de normen voor een dijk niet overal hetzelfde.

Maximum overslagdebiet

De norm voor een primaire dijk is geen minimale hoogte boven de waterspiegel dat moet behaald worden. Een primaire dijk moet zijn norm behalen in een maximale hoeveelheid overslag. Dit is een maximale hoeveelheid water dat over een dijk heen mag lopen, voordat het binnentalud gaat eroderen met als gevolg dat de dijk bezwijkt. Bij erosie van het binnentalud moet rekening worden gehouden dat een nieuwe grasmat nog niet voldoende weerstand heeft. Binnen 4 jaar na uitvoering dient de grasmat voldoende sterk te zijn. De maximale hoeveelheid overslag wordt per dijktraject apart berekend. Want het hangt af van golfrichting, taludhelling en -bekleding van de dijk, dikte van de kleilaag, etc. Voor het dijktraject aan de Biezelingse Ham wordt gerekend met een maximaal overslagdebiet van 10 l/m/s.

De signaleringswaarde van het dijktraject 30_3 aan de Biezelingse Ham is 1/3000 (Figuur 16). Dit wil zeggen dat de dijk 1 op 3000 kans heeft per jaar, om te bezwijken.

De ondergrens van de dijk 30_3 heeft een overstromingskans van 1/1000. De ondergrens geeft de maximaal toelaatbare faalkans weer. Deze is afhankelijk van de bijhorende signaleringswaarde. Als deze waarde niet wordt behaald, moet er onmiddellijk worden ingegrepen om de dijk te versterken.



Figuur 16 Dijktraject volgens signaleringswaarde

Bron: Waterveiligheidsportaal, 2020

Zeespiegelstijging

Bij de technische eisen wordt er rekening gehouden met de verwachte veranderingen in rivierafvoer en verwachte toename van de zeespiegelstijging als gevolg van de klimaatveranderingen. Deze elementen zijn van belang voor dit onderzoek, omdat het waterniveau een invloed heeft op het voorland en de achterliggende dijk. In de KNMI '14 scenario's wordt uitgegaan van een temperatuurstijging van maximum 2,3°C rond het jaar 2050. Dit heeft rechtstreekse gevolgen op de zeespiegelstijging. De hoogste verwachtingen uit het KNMI '14 voor de zeespiegelstijging bij de Noorzeekust is 85 centimeter binnen 100 jaar ten opzichte van het huidig niveau. De invloed van deze zeespiegelstijging zal worden meegenomen in de toetsingen op de verschillende ontwerpvarianten.

2.8.3 Omgevingseisen

Effect op Natura 2000-gebied

Het voorland van de Biezelingse Ham ligt in Natura 2000-gebied. Dit is een beschermd natuurgebied waar de impact van projecten tot een minimum gehouden moet worden. Voor werken in of nabij het gebied moet een vergunning worden aangevraagd. Het verkrijgen van een vergunning hangt af van de zogenaamde effectenindicator. Met behulp van deze indicator kan men bepalen of de activiteiten schadelijke effecten hebben op een Natura 2000-gebied en indien dit het geval is, te compenseren. Als blijkt dat er moet worden ingegrepen in het ontwerp van de dijk of het voorland, moet er voldoende rekening worden gehouden met de impact op het gebied.

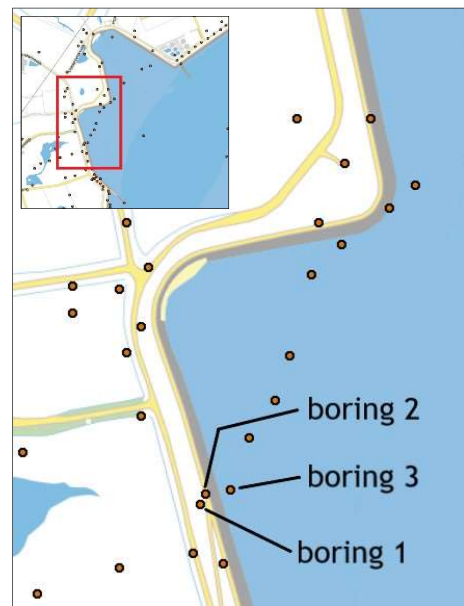
Vaargeul

De Westerschelde is een estuarium gelegen tussen Walcheren, Zuid-Beveland en Zeeuws-Vlaanderen. Het hele gebied is onderdeel van de Europese Natura 2000-wetgeving. De Westerschelde loopt vanaf de rivier de Schelde tot de monding in de Noordzee. De verbinding met de Schelde is een belangrijke connectie voor de Antwerpse haven. Er vindt dus veel scheepvaart plaats in de Westerschelde. Om de scheepvaart mogelijk te maken wordt er sinds 1895 permanent gebaggerd in het gebied. Ondanks eventuele ingrepen in het gebied van de Biezelingse Ham, moet scheepvaart in de Westerschelde mogelijk blijven.

2.9 Ondergrondgegevens

Om de macro-instabiliteit van de dijk en piping te kunnen toetsen, moeten de gegevens van de ondergrond en de dijkopbouw gekend zijn. De benodigde gegevens zijn via *DINOloket* verkregen. In bijlage 6 zijn de gegevens van de grond-monsters te zien. Hierop zijn de verschillende grondsoorten per diepte te weergegeven. Elke grondsoort heeft een specifieke cohesie die bepalend is voor de afschuifkrachten in de dijk.

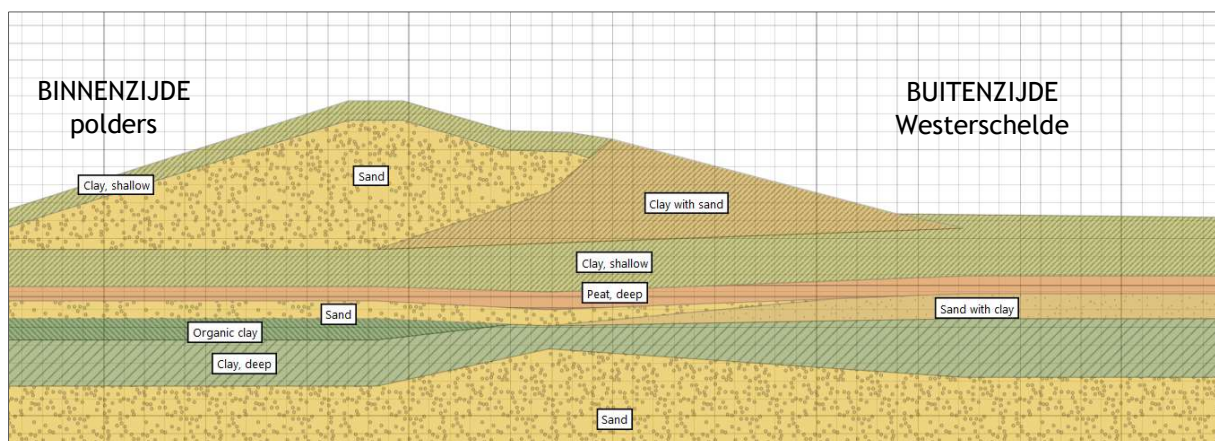
Deze grondmonsters zijn gekozen omwille van hun locatie (Figuur 17). Deze locaties bevatten namelijk de meeste nuttige en correcte informatie om de opbouw van het dijklichaam op te stellen.



Figuur 17 Locaties grondboringen
Bron: *DINOloket*, 2020

Ondergrondprofiel

In de onderstaande afbeelding (Figuur 18) is een doorsnede van een dijkprofiel aan de Biezelingse Ham te zien. Er wordt aangenomen dat de opbouw met deze grondlagen de meest voorkomende is voor het dijktraject van de Biezelingse Ham. Deze doorsnede zal gebruikt worden om de macro-instabiliteit te berekenen in D-GEO Suite Stability.



Figuur 18 Profieldoorsnede met grondlagen

3 Methode

Het hoofdstuk ‘Methode’ is geschreven om het onderzoek een duidelijke structuur te geven. De in hoofdstuk 1.4 opgestelde hoofdvraag en deelvragen worden volgens de hieronder opgestelde onderzoeksmethode van antwoorden voorzien. Het gaat over de manier waarop data wordt verzameld en hoe deze gegevens worden omgezet in resultaten.

3.1 Onderzoeksmethoden

Voor dit onderzoek is zowel kwalitatief als kwantitatief onderzoek nodig. Diepgaande informatie, waarbij gekeken wordt naar waarnemingen en subjectieve overtuigingen, behoort tot kwalitatief onderzoek. Dit wordt vaak gebruikt om bestaande theorieën te ondersteunen of aan te vullen. Enkele voorbeelden van kwalitatief onderzoek zijn de volgende:

- Simulaties: een testopstelling maken met behulp van een computerprogramma die de werkelijke situatie nabootst.
- Discussies: onderzoek onderbouwd met meningen om te vertellen waarom iets zo is.
- Experimenteel onderzoek: opgestelde varianten onderling vergelijken om tot een definitieve variant te komen.

Bij kwantitatief onderzoek probeert men feiten te achterhalen. Dit richt zich op cijfermatige informatie en hoeveelheden. Bij kwantitatief onderzoek is het belangrijk dat er zorgvuldig wordt gekeken of er voldoende informatie beschikbaar is zodat het onderzoek representatief is. Hiernaast is het ook belangrijk dat de verkregen informatie betrouwbaar is. Enkele voorbeelden van kwantitatief onderzoek zijn de volgende:

- Bronnenonderzoek: een onderzoeksmethode waarbij je bestaande datasets gebruikt die al door voorgaande onderzoekers zijn verzameld.
- Observeren: waarnemen en noteren wat je ziet door ter plaatse te gaan kijken.

3.1.1 Toepassing in dit onderzoek

Als eerste zijn de faalmechanismen van de dijk en het voorland vastgelegd en beschreven. De randvoorwaarden en eisen van de dijk zijn verzameld. Vervolgens is er gekeken naar het verband tussen de aanwezigheid van het voorland en de faalmechanismen van de dijk. Hierna wordt allerlei data van het gebied verzameld om vervolgens in simulatieprogramma's zoals Riskeer en D-Stability te verwerken. Er moeten verschillende ontwerpen bedacht en uitgewerkt worden die de realiteit van het voorland kunnen nabootsen. Aan de hand hiervan kunnen de effecten van het voorland worden vastgesteld. Deze effecten worden geanalyseerd in verband met het ontwerp van de dijk. Uiteindelijk zal er een conclusie worden gevormd die de invloed van het voorland op de dijk samenvat. Daarna worden aanbevelingen gegeven voor het ontwerp van het voorland aan de Biezelingse Ham. Tot slot worden er tekeningen gemaakt ter verduidelijking van het ontwerp van het voorland.

Variantenstudie

Alvorens een variantenstudie wordt uitgevoerd, worden drie verschillende profielen ontworpen van het voorland. De verschillende ontwerpen van het voorland worden onderling vergeleken om te bepalen welk ontwerp het beste is. Dit gebeurt aan de hand van een Multicriteria-analyse. Hierin worden beoordelingscriteria opgesteld die relevant zijn voor de afweging van de varianten. Daarna wordt een weging gegeven aan deze criteria, afhankelijk van hoe belangrijk ze zijn. De weging geeft aan hoe belangrijk het criterium is in vergelijking met de andere criteria. Tot slot krijgen de varianten een score van 1 tot 5 per beoordelingscriteria (1 = zeer negatieve invloed, 5 = zeer positieve invloed). De som van de scores (rekening houdende met de wegingsfactor) is de totale score van een variant. De variant met de hoogste totaalscore is het meest gunstige ontwerp van het voorland van de Biezelingse Ham. Voor de volledige uitwerking van de Multicriteria-analyse wordt verwezen naar Bijlage 2, Variantenstudie.

3.2 Toepassing per deelvraag

a. Hoe zien de randvoorwaarden eruit en welke eisen gelden er voor de dijk?

Aangezien de eisen en randvoorwaarden voor waterkeringen al zijn vastgesteld in de wet, wordt 'bronnenonderzoek' toegepast voor deze deelvraag. De randvoorwaarden die gelden en de belastingen die van toepassing zijn op het gebied worden beschreven in hoofdstuk 2.7 'Randvoorwaarden'. Ook wordt er beschreven aan welke normen en eisen de dijk moet voldoen om de veiligheid van het achterland te garanderen in hoofdstuk 2.8 'Programma van eisen'.

b. Hoe zien de belangrijkste faalmechanismen van de dijk en het voorland eruit?

Voor deze deelvraag worden onderzoeksmethodes 'bronnenonderzoek' en 'discussies' gebruikt. Er zijn veel verschillende soorten faalmechanismen voor een dijk en een voorland. Daarom moet er samen in overleg met Waterschap Scheldestromen bepaald worden welke faalmechanismen van toepassing zijn op dit specifiek gebied. Later wordt de dijk getoetst op de betreffende faalmechanismen. De resultaten van deze toetsingen vormen een referentie.

c. In welke vorm heeft het voorland de meest gunstige invloed op de dijk?

Om een antwoord te vormen op deze deelvraag moeten er verschillende ontwerpen van het voorland worden gemaakt. Deze varianten zullen worden getoetst op alle bepalende faalmechanismen. Aan de hand van de resultaten van deze toetsingen wordt met behulp van een variantenstudie bepaald welk ontwerp het beste is. Het ontwerp hangt af van verschillende factoren waarmee rekening moet worden gehouden. Daarom wordt in deze situatie 'experimenteel onderzoek' gebruikt.

3.3 Onderzoeksinstrumenten

Het oplossen van de deelvragen gebeurt door middel van de faalmechanismen die van toepassing zijn op de dijk te berekenen, en de invloed van het voorland op de faalmechanismen te bepalen. Dit wordt gedaan met behulp van verschillende software programma's. Hieronder wordt uitgelegd hoe de programma's werken en wat er als resultaat uit de berekeningen komt

3.3.1 MorphAn

(Versie 1.7.3.45496)

Het programma MorphAn wordt in dit onderzoek gebruikt voor de hoogteprofielen van het voorland weer te geven. Op deze manier kan er bekeken worden hoe de vorm van het voorland zich heeft geëvolueerd doorheen de afgelopen jaren.

3.3.2 Ringtoets

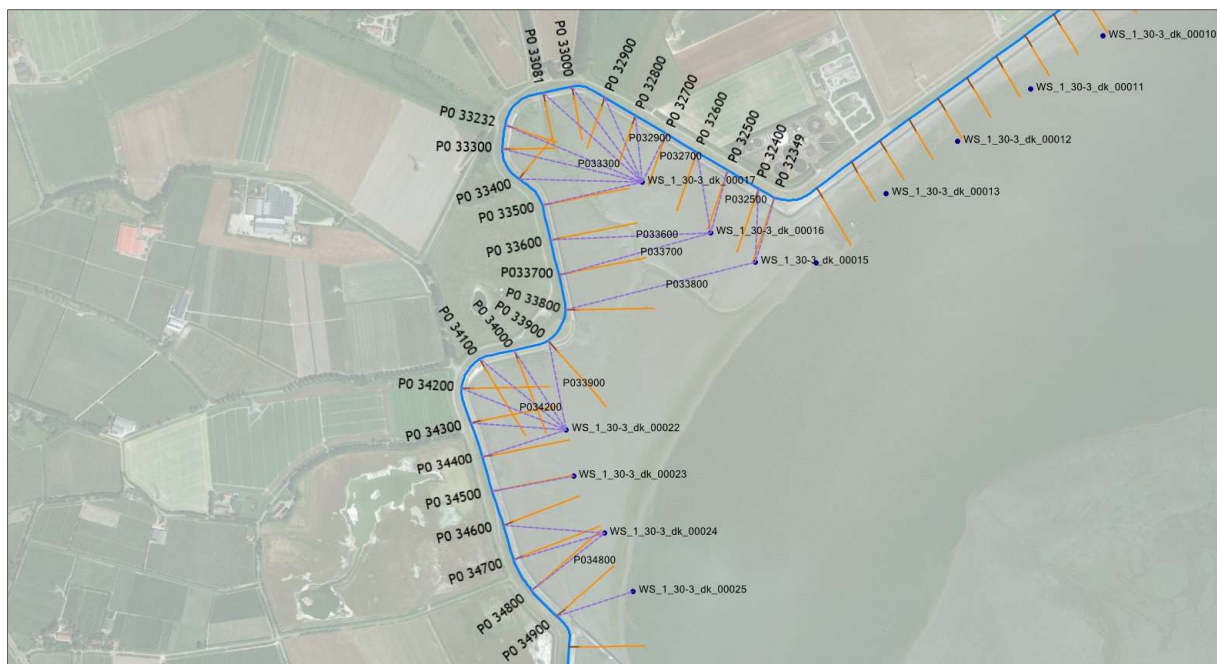
(Riskeer 19.1.1.2)

Hiermee gebeurt de toetsing van primaire waterkeringen. De dijk kan worden getoetst op verschillende faalmechanismen. Voor dit onderzoek maken we gebruik van het programma Riskeer om de GEKB te toetsen.

GEKB

Dit faalmechanisme staat voor 'grasbekleding erosie kruin en binnentalud'. De waarden worden berekend volgens de signaleringsnorm die van toepassing is op dit dijktraject, namelijk 1/3000. De berekening gebeurt eerst met maatgevende hydraulische condities en een tweede keer rekening houdend met de zeespiegelstijging als gevolg van klimaat-opwarming.

Dit programma berekent de GEKB met de meest ongunstige situaties (springtij, golven, windrichting, etc.) die kunnen voorkomen in het gebied. Als eerste worden de dijkprofielen in het gebied geladen (de oranje strepen op Figuur 19). Dit werkt als een soort profieldoorsnede in het gebied. Er zijn 27 dijkprofielen die van toepassing zijn voor de Biezelingse Ham, namelijk P0 32349 tot en met P0 34900. De paarse strepen geven aan welk hydraulisch randvoorwaardepunt aan welk dijkprofiel is gekoppeld. In de tweede stap worden de randvoorwaarden per dijkprofiel ingevoerd. Hierna kunnen de berekeningen starten.



Figuur 19 Dijkprofielen in Riskeer

Bron: Riskeer, 2020

Er komen drie verschillende resultaten uit de berekening in Riskeer.

- **Sterkte berekening:** geeft de faalkans [1/jaar] weer, samen met de maatgevende windrichting en golfhoogte. De faalkans moet voldoen aan de faalkanseis. Deze is voor heel het dijktraject 1/25.000. Deze is strenger dan de signaleringswaarde (1/3000) omdat een faalkansbegroting wordt gebruikt. Hierbij wordt rekening gehouden met het feit dat de dijk aan meerdere faalmechanismen dan enkel GEKB kan falen.
- **Overslagdebiet:** dit is de hoeveelheid overslag [l/m/s] die plaatsvindt tijdens de maatgevende storm die Riskeer berekent.
- **HBN:** (Hydraulisch Belasting Niveau) dit geeft de minimale kruinhoogte weer die nodig is om de vooraf bepaalde hoeveelheid overslag niet te overschrijden.

3.3.3 D-GEO Suite Stability

(Versie 20.2.1)

Deze software is gecreëerd voor het beoordelen en ontwerpen van de macrostabiliteit van een dijk. In dit onderzoek wordt de afschuiving langs de buitenzijde van de dijk getoetst. Dit faalmechanisme komt voor na hoogwater, doordat het gewicht van de grond (inclusief het water in het dijklichaam) te groot is en de grondspanning te klein. Bij macro-instabiliteit wordt de stabiliteit van de dijk op de slappe ondergrond gecontroleerd. De resultaten van deze berekeningen geven het momentevenwicht langs een afglijcirkel weer.

In D-Stability wordt de methode van Bishop toegepast. Hierbij wordt de minst gunstige situatie als resultaat weergegeven. Het eindresultaat moet boven de gestelde veiligheidsfactor uitkomen die afhangt van allerlei factoren in verband met het dijktraject. Voor de dijk aan de Biezelingse Ham geldt de veiligheidsfactor 1,02. Als deze waarde niet wordt behaald, zal het dijklichaam niet meteen afschuiven omdat er wordt uitgegaan van alle slechtste scenario's op hetzelfde moment. In de methode van Bishop wordt de verticale- en momentenevenwicht gecontroleerd, maar de horizontale krachten worden niet meegenomen in de stabiliteitsberekening. In het model kunnen verschillende grondlagen met elk zijn karakteristieke waarden en de waterstanden in het dijklichaam worden ingegeven. Op deze manier kan het programma rekening houden met de cohesie van de verschillende grondlagen.

3.3.4 Handmatige berekeningen

Piping

Alle benodigde piping berekeningen zullen handmatig worden uitgevoerd volgens de methode die door het Rijk is opgesteld. Hierbij wordt de schematiseringshandleiding gevolgd die beschreven staat in het rapport van Rijkswaterstaat.

Macro-instabiliteit buitenwaarts

De stabiliteit van het dijkprofiel zal eerst handmatig worden berekend en later in D-GEO Suite Stability. Bij de handmatige berekening wordt eveneens de methode van Bishop toegepast.

4 Resultaten

In het hoofdstuk ‘Resultaten’ worden antwoorden gegeven op de deelvragen die eerder in dit onderzoek zijn opgesteld. Het oplossen van de deelvragen gebeurt door de faalmechanismen die van toepassing zijn, te berekenen. Dit wordt gedaan met behulp van verschillende software programma’s. De volledige uitwerking van de resultaten en berekeningen staan in Bijlage 1 t.e.m. 3. In dit hoofdstuk staat een samenvatting van de belangrijkste resultaten van het onderzoek.

4.1 Randvoorwaarden en eisen

In dit eerste hoofdstuk van ‘Resultaten’ wordt deelvraag a beantwoord: ‘Hoe zien de randvoorwaarden eruit en welke eisen gelden er voor de dijk?’. Deze informatie moet als eerste verzameld worden voordat er met de berekeningen kan gestart worden. In hoofdstuk 2.7 en 2.8 zijn de randvoorwaarden en eisen die van toepassing zijn op dit onderzoek uitgebreid beschreven. Hieronder worden de belangrijkste items nogmaals vermeld.

Belangrijkste randvoorwaarden

Toetsingsprocedure

Een dijk moet voldoen aan een opgelegde norm. De methode om te bepalen of een dijktraject hieraan voldoet, is een toetsingsprocedure. De toetsing gebeurt in bepaalde categorieën (van A+ tot D) die zijn vastgesteld in het WBI 2017. De toetsingen die worden uitgevoerd in dit onderzoek gebeuren volgens categorie A. Hierbij voldoet het dijktraject aan de signaleringswaarde.

Hydraulische belastingen

De hydraulische belastingen waar de dijk langs de Biezelingse Ham weerstand moet tegen bieden zijn hoge waterstanden en golfbelastingen. De astronomische waterstanden zijn -2,50 m bij gemiddeld laagwater (GLW) en +3,00 m bij gemiddeld hoogwater (GHW). De belasting waarmee wordt gerekend is een stormwaterstand van +5,90 m en een maximum golfhoogte van 2,00 m.

Overige belastingen

Naast hydraulische, zijn er nog andere belastingen waar een dijk mee te maken kan hebben. Dit zijn invloeden of processen die de stabiliteit van de dijk kunnen bedreigen. De overige belastingen zijn eigen gewicht, verkeer, scheepsgolven en aardbevingen. Het eigen gewicht wordt meegenomen in de toetsing van macro-instabiliteit buitenwaarts. De andere belastingen zijn niet van toepassing voor de toetsingen die worden uitgevoerd in dit onderzoek.

Belangrijkste eisen

Normering

Een dijktraject heeft een bepaalde norm waar die aan moet voldoen. De norm bestaat uit een ondergrens en een signaleringswaarde. De ondergrens geeft de maximaal toelaatbare faalkans weer. Voor het betreffende dijktraject 30_3 is de ondergrens 1/1000. Als deze norm niet wordt behaald, moet er onmiddellijk worden ingegrepen om de dijk te versterken. De signaleringswaarde waarmee wordt gerekend voor de faalmechanismen te berekenen is 1/3000. Deze waarde is een soort alarmering. Wanneer deze waarde niet wordt behaald, is er nog tijd om maatregelen te nemen voordat de ondergrens wordt bereikt.

Zeespiegelstijging

De verschillende varianten die worden ontworpen voor het voorland worden niet enkel getoetst op de norm waar ze momenteel aan moeten voldoen, er wordt ook rekening gehouden met de toekomst. Er wordt verwacht dat de zeespiegel van de Noordzee, binnen 100 jaar gestegen zal zijn met maximum 85 centimeter ten opzichte van het huidig niveau. Naast de maatgevende condities, worden de ontwerpvarianten ook met deze waarde berekend om te kunnen bepalen of de ontwerpen geschikt zijn voor de toekomst.

4.2 Toetsing faalmechanismen bestaande situatie

Om te bepalen of de opgestelde varianten betere oplossingen zijn voor het gebied aan de Biezelingse Ham, moeten de varianten worden vergeleken met de huidige situatie. Daarom worden de toetsingen van de faalmechanismen GEKB, macro-instabiliteit buitenwaarts en piping ook toegepast op het bestaande voorlandprofiel. In dit hoofdstuk staat een samenvatting van de belangrijkste resultaten. Voor een volledige uitwerking van de berekeningen wordt verwezen naar Bijlage 1, hoofdstuk 1.

GEKB

Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud is berekend voor alle 27 dijkprofielen van de dijk rond de Biezelingse Ham. Om de resultaten te kunnen vergelijken wordt enkel gekeken naar de maatgevende resultaten. Dit zijn de dijkprofielen met de meest negatieve waarden. In Tabel 4 staan de berekende waarden met daarboven de minimum eis waaraan de dijk moet voldoen volgens de opgelegde norm.

Tabel 4 GEKB resultaten bestaande situatie

	GEKB toetsingen		
	Faalkans	Overslagdebiet	Minimale kruinhoogte
Minimum eis:	1/25.000	10 l/m/s	7,44 m
Berekende waarde:	1/153.660	0,07 l/m/s	6,26 m

Macro-instabiliteit buitenwaarts

Het faalmechanisme (STBU) is eerst handmatig berekend, daarna met behulp van het software programma D-Stability (zie Bijlage 1, hoofdstuk 1.2). Voor de berekeningen zijn de grondlagen van het dijkprofiel opgesteld aan de hand van ondergrondgegevens beschikbaar uit *DINOloket*. Deze doorsnede is aangenomen als algemene opbouw van het dijkprofiel. In tegenstelling tot de software berekening is er bij de handmatige berekening geen rekening gehouden met waterstanden in het dijklichaam als gevolg van hoogwater. De software berekening berekend ook veel nauwkeuriger dan de handberekening. De resultaten van de STBU berekeningen staan in Tabel 5. De minimum eis geeft de waarde weer die behaald moet worden om te voldoen volgens de norm.

Tabel 5 Macro-instabiliteit resultaten bestaande situatie

	Macro-instabiliteit toetsingen		
	Handberekening	D-Stability stormwaterstand	D-Stability na stormwaterstand
Minimum eis:	1,02	1,020	1,020
Berekende waarde:	1,51	1,170	0,725

Piping

De piping berekening is een handmatig uitgevoerde berekening waarbij de leklengte is berekend. Deze waarde representeert de indring van het water doorheen de waterafsluitende lagen. De leklengte is berekend omdat deze lengte een variabele is bij de verschillende ontwerpvarianten. De lengte is berekend aan de hand van de methode die beschreven staat in 'Schematiseringshandleiding piping', opgesteld door Rijkswaterstaat. Voor de volledige uitwerking van de berekening wordt verwezen naar Bijlage 1, hoofdstuk 1.4. Het voorland van de bestaande situatie heeft een leklengte van 4,90 m.

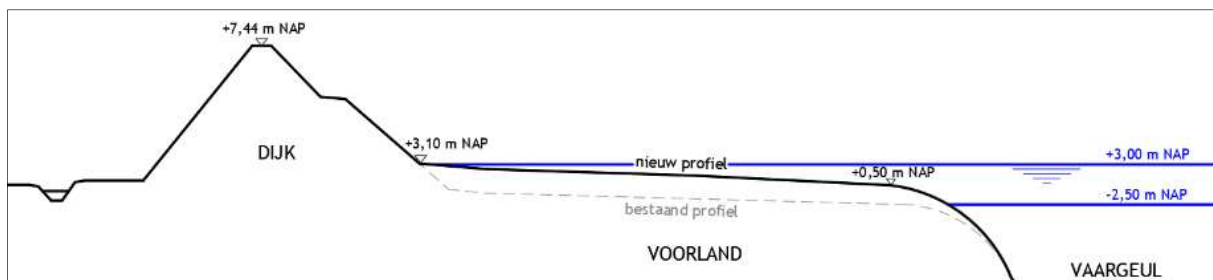
4.3 Toetsing faalmechanismen ontwerpvarianten

4.3.1 Ontwerpvarianten

Er zijn drie verschillende ontwerpen gemaakt van het profiel van het voorland van de Biezelingse Ham. De verschillende ontwerpen worden getoetst op de faalmechanismen waaraan de dijk kan falen. Op deze manier wordt bepaald welk voorlandontwerp de meest gunstige invloed heeft op de omgeving en de dijk. De verschillende ontwerpen worden hieronder toegelicht.

Variant 1: Verhoogd

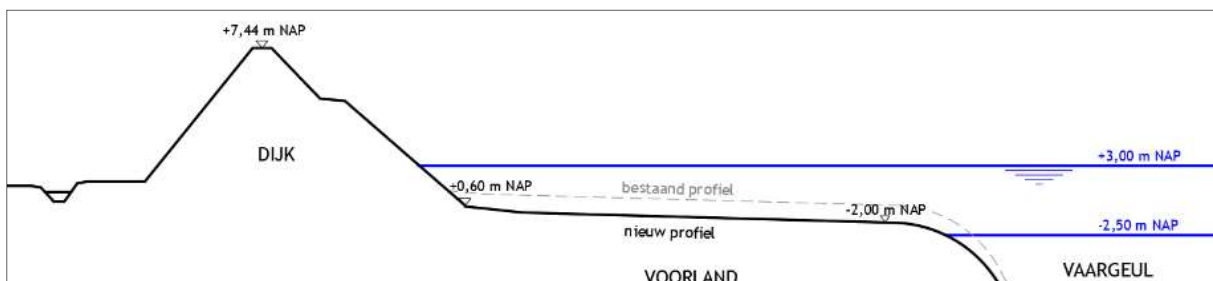
Het profiel van dit voorland (Figuur 20) wordt over de gehele oppervlakte gemiddeld verhoogd met 1,50 m. Bij deze hoogte komt het voorland nog helemaal onder water te staan tijdens gemiddeld hoogwater, maar voor een kortere periode. De waterdiepte verkleint waardoor de watercondities kalmer worden ten gevolge van de ophoging.



Figuur 20 Schets voorlandprofiel variant 1

Variant 2: Verlaagd

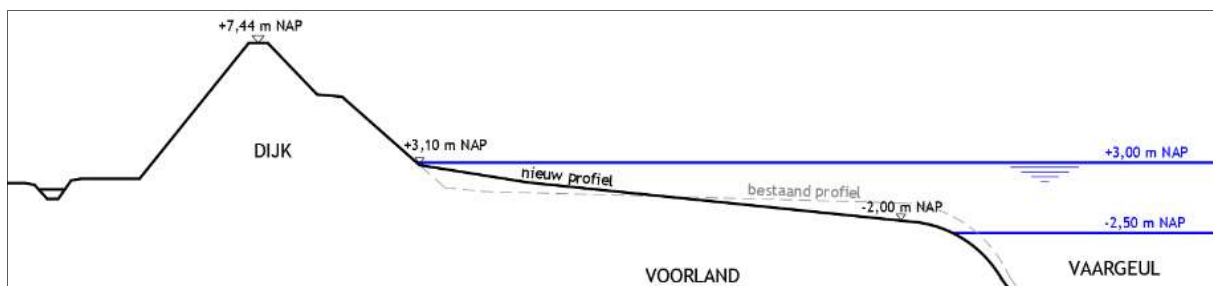
In het tweede ontwerp (Figuur 21) wordt het voorland op de gehele oppervlakte verlaagd met gemiddeld 1,00 m ten opzichte van het bestaand niveau. In deze situatie staat het voorland nog steeds volledig droog tijdens gemiddeld laagwater, maar voor een kortere periode.



Figuur 21 Schets voorlandprofiel variant 2

Variant 3: Steiler

In de ontwerpvariant met het steiler profiel (Figuur 22) worden de vorige varianten gecombineerd. Aan de kant van de vaargeul wordt het voorland 1,00 m verlaagd. Landinwaarts, aan de kant van de dijk, wordt het voorland opgehoogd met gemiddeld 1,50 m. Het profiel van het voorland heeft een grotere helling en stroomt nog steeds helemaal onder tijdens gemiddeld hoogwater.



Figuur 22 Schets voorlandprofiel variant 3

4.3.2 Toetsingsresultaten

De drie verschillende ontwerpvarianten van het voorland van de Biezelingse Ham met telkens een ander profiel worden apart getoetst op de faalmechanismen GEKB, macro-instabiliteit buitenwaarts en piping (zie Bijlage 1, hoofdstuk 2). De resultaten worden onderling met elkaar vergeleken in Bijlage 2 (Variantenstudie), om te bepalen welke variant het beste voorland profiel is. De resultaten van de toetsingen van de varianten zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Toetsingsresultaten ontwerpvarianten (algemene condities)

	variant 1	variant 2	variant 3
GEKB			
- grootste faalkans	1/160.661	1/152.680	1/138.919
- kleinste faalkans	1/1.941.269	1/1.940.480	1/1.941.170
- grootste overslagdebiet	0,02 l/m/s	0,09 l/m/s	0,05 l/m/s
- kleinste overslagdebiet	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s
- hoogste kruin	6,20 m	6,27 m	6,25 m
- laagste kruin	5,86 m	5,86 m	5,86 m
Macro-instabiliteit (D-Stability)			
- veiligheidsfactor	1,016	0,662	0,941
Piping			
- leklengte	5,94 m	4,06 m	5,94 m

Om te garanderen dat het nieuw ontwerp van het voorland ook in de toekomst zal functioneren als steun voor de dijk, zijn de drie ontwerpvarianten naast de maatgevende omstandigheden, ook getoetst rekening houdende met een zeespiegelstijging van 85 centimeter binnen 100 jaar. Enkel het faalmechanisme piping is niet opnieuw getoetst met stijgende zeespiegel (omdat de leklengte slechts een onderdeel is van de totale kwelling die voor piping van belang is. Op de kwelling zou de zeespiegelstijging wel een invloed hebben). De resultaten van de toetsingen met zeespiegelstijging staan weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Toetsingsresultaten ontwerpvarianten (met zeespiegelstijging)

	variant 1	variant 2	variant 3
GEKB			
- grootste faalkans	1/10.389	1/9.674	1/9.909
- kleinste faalkans	1/163.011	1/162.862	1/163.003
- grootste overslagdebiet	1,24 l/m/s	1,85 l/m/s	1,50 l/m/s
- kleinste overslagdebiet	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s
- hoogste kruin	7,31 m	7,35 m	7,32 m
- laagste kruin	6,71 m	6,71 m	6,71 m
Macro-instabiliteit (D-Stability)			
- veiligheidsfactor	0,995	0,650	0,927

Opmerking

Zowel bij de bestaande situatie als bij de ontwerpvarianten valt op dat de meest noordelijke profielen (tussen dijkpaal 324 en 331) de slechtste waarden hebben (zie Bijlage 7 t.e.m. 10). Hier vindt de grootste hoeveelheid overslag plaats en faalkans is het grootst. De oorzaak hiervan is dat deze dijkprofielen in het verlengde liggen met de stroming van het water waardoor er meer opstuwing plaatsvindt tegen dit gedeelte van de dijk.

4.4 Variantenstudie

4.4.1 Multicriteria-analyse

Aan de hand van de uitgevoerde toetsingen en berekeningen van de verschillende ontwerpvarianten van het voorland, kan er worden bepaald welk ontwerp het meest gunstig is voor het gebied. Dit wordt gedaan met behulp van een Multicriteria-analyse waarbij de verschillende ontwerpen onderling worden vergeleken aan de hand van opgestelde beoordelingscriteria. Dankzij de criteria wordt er rekening gehouden met de belangrijkste aspecten met betrekking tot het gebied. Voor de volledige variantenstudie en bijhorende toelichting wordt verwezen naar Bijlage 2, Variantenstudie. De gekozen beoordelingscriteria zijn de volgende:

- Waterveiligheid (waaronder piping, macro-instabiliteit buitenwaarts en GEKB);
- Natuurimpact;
- Kosten;
- Levensduur;
- Bestand tegen klimaatverandering.

Ieder beoordelingscriterium is gekoppeld aan een bepaalde weging die afhankelijk is van de relevantie. Daarna wordt voor elke variant een score gegeven per criterium. Op basis van deze scores wordt de beste ontwerpvariant bepaald. De uitgewerkte Multicriteria-analyse wordt weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8 Resultaten Multicriteria-analyse

beoordelingscriterium	weging	variant 1: ophoging	variant 2: verlaagd	variant 3: steiler
		score	score	score
piping	12,5%	4	2	4
macro-instabiliteit	12,5%	4	2	4
GEKB	15,0%	5	2	3
natuurimpact	20,0%	3	2	4
kosten	12,5%	2	4	3
levensduur	12,5%	3	4	2
klimaatverandering	15,0%	4	2	3
totale score:	100%	3,58	1,85	3,33

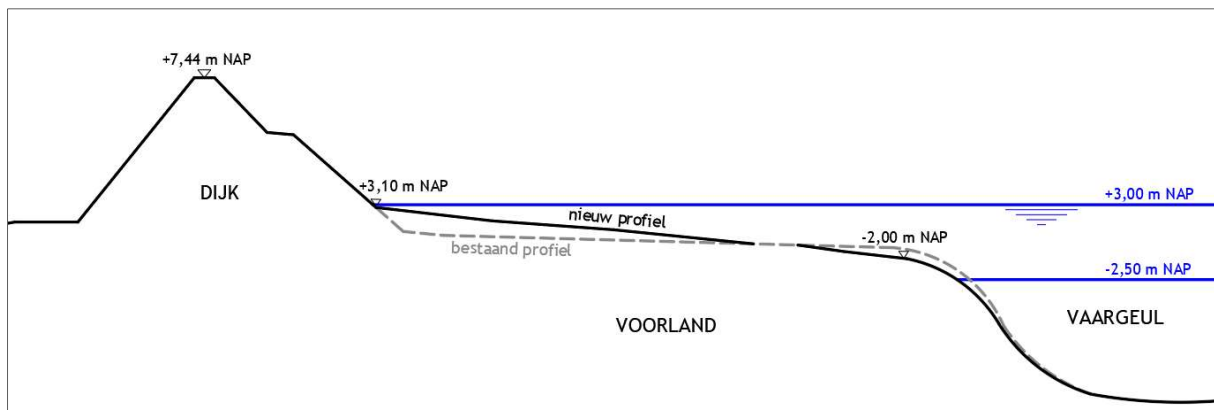
4.4.2 Resultaat Multicriteria-Analyse

Variant 1 heeft de hoogste totaalscore en is daarmee het beste ontwerp voor een nieuw profiel van de Biezelingse Ham. Variant 3 volgt dicht achter de score van variant 1. Daarom kunnen de ontwerpen van beide varianten worden gecombineerd om zo tot een beter ontwerp te komen. Dankzij de ophoging scoort variant 1 goed op het criterium waterveiligheid. Op criteria kosten en natuurimpact scoort variant 1 niet goed. Dit wordt gecompenseerd door het ontwerp te combineren met variant 3 die wel een positieve invloed heeft op de kosten en natuurimpact.

Aan de voorzijde van het voorland wordt sediment afgegraven om een steiler profiel te verkrijgen. Dit sediment wordt hergebruikt voor de ophogingen die landinwaarts in het gebied moeten gebeuren. Naast het hergebruikt sediment is nog 460.100 m³ extra sediment nodig voor de volledige ophoging (zie bijlage 11 voor de sedimentvolume indicatie). Ruim 95.500 m² in het gebied blijft ongewijzigd niveau waar de afgraving overgaat in ophoging. Het definitief ontwerp is grotendeels verhoogd voor een verbeterde waterveiligheid, gecombineerd met een steiler profiel om sediment te kunnen hergebruiken om op die manier de kosten en natuurimpact te minimaliseren. Voor een situatieschets van het ontwerp wordt verwezen naar bijlage 12, Overzichtstekening.

4.5 Definitief ontwerp

De combinatie die gemaakt wordt met ontwerpvariant 1 en 3 wordt verder uitgewerkt in het hoofdstuk 'Definitief ontwerp'. Naast het specifieke ontwerp (zie bijlage 12 voor een situatietekening) van de hoogte van het nieuw voorlandprofiel, worden er aanbevelingen gegeven die toegepast kunnen worden op het voorland. De onderwerpen die worden behandeld zijn onder andere de uitvoering. Hierin wordt het belang van het juiste sediment beschreven. Daarna wordt uitgewerkt hoe erosie van het voorland kan worden tegengehouden door gebruik te maken van breukstenen. Tot slot wordt toegelicht hoe het gebied functioneert als klimaatbuffer. Voor de volledige beschrijving wordt verwezen naar Bijlage 3, Aanbevelingen definitief ontwerp.



Figuur 23 Schets doorsnede definitief ontwerp

4.5.1 Uitvoering

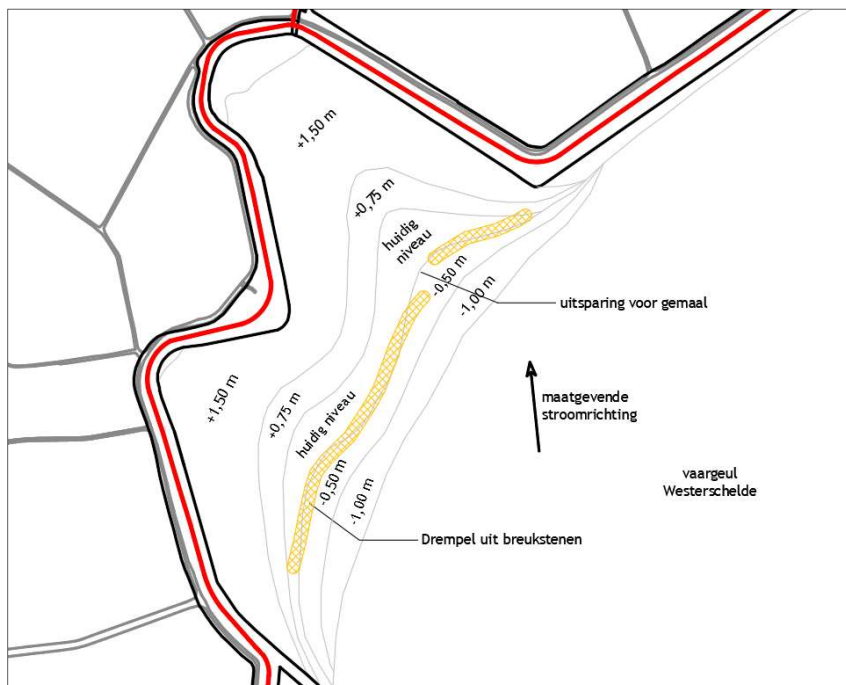
Er is ruim een half miljoen kuub sediment nodig om het voorland van de Biezelingse Ham op het gewenste niveau te krijgen. Niet elk type sediment is geschikt voor de ophoging van het voorland. Het ideale sediment dat gebruikt kan worden is baggerspecie uit de Westerschelde. Onder voorwaarde dat het sedimenttype nagenoeg hetzelfde is als het huidige sediment, namelijk zeer fijn slib / fijn zand en korrelgrootte < 75 µm. Het hergebruik van de baggerspecie uit de Westerschelde is voordelig op vlak van kosten en duurzaamheid. De winlocatie (Westerschelde) van het sediment bevindt zich op een relatief korte afstand tot de Biezelingse Ham. Dit is voordelig voor zowel milieubelasting, kosten voor transport en tijdswinst in de uitvoering. Ook voor de duurzaamheid in het gebied is het hergebruik positief. In de baggerspecie bevindt zich de basis van het voedselweb van het natuurgebied rond de Westerschelde. Door middel van het voedselrijk baggerspecie te suppleren op het voorland kan het gebied zich snel herstellen na de uitvoeringswerken, waarna het snel weer verschillende vogelsoorten aantrekt.

De periode waarin de werken worden uitgevoerd is een belangrijke factor om rekening mee te houden. In het Natura 2000-gebied van de Biezelingse Ham is de periode afhankelijk van de jaarlijkse vogeltrek. Wanneer de winterperiode bijna gedaan is trekken de vogels terug uit het zuiden en vliegen ze richting het noorden. Hierbij is de Biezelingse Ham een belangrijke rustplaats. De werkzaamheden moeten plaatsvinden in de wintermaanden tussen oktober en maart. In deze periode wordt de natuur het minst geschaad.

4.5.2 Drempel uit breuksteen

Het is vanzelfsprekend dat het voorlandprofiel zo lang mogelijk stand moet houden, maar erosie van het gebied is een natuurlijk proces dat niet tegen te houden is. Om het erosieproces te vertragen kan een drempel, bestaande uit breukstenen, op het voorland worden geplaatst. De drempel heeft als functie de waterstroming te reduceren waardoor de watercondities op het voorland kalmer worden. Hierdoor zal het erosieproces langzamer verlopen of kan er zelfs sedimentatie optreden. De drempelconstructie wordt parallel met de vaargeul aangelegd (Figuur 24). Op deze manier wordt de waterstroming die op het voorland komt het meest afgeremd. De gewichtsklasse van de breukstenen is afhankelijk van de watercondities waar ze in liggen. Voor het voorland aan de Biezelingse Ham moeten de breukstenen een sortering hebben van 40 - 200 kg (*Bron: handleiding toetsing en ontwerp, Zeeweringen*). In de drempel is een uitsparing gelaten ter hoogte van de stroomgeul, waar het water van het gemaal doorstroomt. Dat water moet te allen tijde afgevoerd kunnen worden.

De drempel dient niet enkel als 'harde' waterbouwkundige constructie, maar het levert ook een bijdrage aan de natuur. Tussen de breukstenen is de waterstroming kalm waardoor sediment bezinkt. In het sediment nestelen zich allerlei bodemdieren die als voedselbron dienen voor verschillende vogelsoorten.



Figuur 24 Situatieschets breukstenen drempel

4.5.3 Voorland als klimaatbuffer

Natuurgebieden als slikken en schorren dragen niet enkel bij aan de waterveiligheid van een gebied, ze zorgen ook voor CO₂-reductie. Het slib is in staat grote hoeveelheden koolstof op te slaan waardoor het slikkengebied zorgt voor klimaatadaptatie.

Koolstof wordt onder de vorm van CO₂ gebonden aan algen die zich in de sliblaag bevinden. Door de kleine hoeveelheid zuurstof in het dichte slib, worden de algen nauwelijks afgebroken waardoor het broeikasgas voor een lange tijd vast zit. Omdat een slikkengebied, in vergelijking met bomen, een veel langere levensduur heeft, is dit een duurzamere manier van CO₂-reductie. Ook in vergelijking met een veengebied is een slikken voordeliger. Veengebieden stoten namelijk een grotere hoeveelheid methaangas uit, wat vele malen schadelijker is dan CO₂. Door de extra hoeveelheid slib dat wordt aangebracht op het voorland, zal er een toename zijn in de opslagcapaciteit van koolstof. Naar schatting is het gebied van de Biezelingse Ham (70 ha) in staat om 49.000 ton koolstof op te slaan.

5 Discussie

Het doel van dit afstudeerproject is onderzoeken welke invloed het voorland van de Biezelingse Ham heeft op de faalmechanismen van de dijk, gelegen achter het voorland. Om deze invloed te kunnen onderzoeken zijn de faalmechanismen van de dijk, waar het voorland een invloed op uitoefent, getoetst voor zowel het bestaande voorlandprofiel als voor de profielen van drie opgestelde varianten. Op basis van deze toetsingsresultaten kan gesteld worden dat bij een herhaling van dit onderzoek, de resultaten dezelfde zouden zijn en dat daarom dit onderzoek valide is.

De resultaten van de berekeningen leidden tot het optimale ontwerp van een ophoging van het voorland in combinatie met een steiler profiel. Tijdens dit onderzoek zijn er een aantal aannames gedaan om het onderzoek te kunnen verderzetten. Dit was noodzakelijk door het gebrek aan middelen en de afbakening van dit onderzoek. De resultaten en de daaruit volgende aannames worden in dit hoofdstuk besproken.

Een resultaat in 'Riskeer' is ingedeeld volgens verschillende categorieën. De grenzen van deze categorieën zijn gedefinieerd als een faalkanseis (afhankelijk van de signaleringswaarde en de ondergrens). De categorie waarin in dit onderzoek is berekend, is categorie A, hierbij voldoet de dijk aan de signaleringseis.

De hydraulische randvoorwaarden die zijn gebruikt voor het berekenen van macro-instabiliteit buitenwaarts en piping, zijn afkomstig van het softwareprogramma Riskeer. Hierin wordt de hoogst mogelijke waterstand berekend op basis van een storm met kans van voorkomen 1/3000 per jaar (signaleringswaarde). Voor de bepaling van deze waterstanden houdt het programma rekening met factoren zoals windrichtingen, waterdiepte, etc. De berekende waterstand is +5,90 m NAP in maatgevende watercondities en +6,75 m NAP rekening houdende met de zeespiegelstijging. Deze zeespiegelstijging is manueel ingesteld op een stijging van 85 centimeter die verwacht wordt binnen 100 jaar. Deze verwachtingen zijn afkomstig van de KNMI'14-scenario's voor Nederland. Deze zijn gebaseerd op de laatste wetenschappelijke inzichten. Riskeer berekent de waarden op hydraulische randvoorwaardepunten die ongeveer 150 meter van het dijklichaam liggen. De golven die effectief tegen de dijk aankomen zullen kleiner zijn dan de waarden waarmee wordt gerekend.

Voor het berekenen van macro-instabiliteit en piping zijn verschillende doorsneden gemaakt van de dijk. Voor het opstellen van de doorsneden zijn ondergrondgegevens van grondboringen in het dijklichaam (afkomstig van DINOloket) gebruikt. Aangezien er slechts een beperkt aantal grondboringen ter beschikking waren van het dijklichaam zelf, is er aangenomen dat deze waarden gelden voor heel het dijktraject van de Biezelingse Ham. Bovendien bevindt zich onder het dijklichaam nog een doorgang van een gemaal. Dit is een kritisch punt dat specifiek onderzocht moet worden.

Voor de ophoging van het voorland is beschreven dat het aan te voeren sediment dezelfde eigenschappen moet hebben als het huidige sediment om de impact voor de natuur te beperken. Dit is een gedane aanname. Er is niet voldoende onderzoek gedaan om een specifieke sedimentsoort en de impact op de natuur te bepalen.

Door middel van bovenstaande veronderstellingen en aannames is op een zo accuraat mogelijke wijze een antwoord geformuleerd op de hoofd- en deelvragen. Voor alle faalmechanismen die berekend zijn in dit onderzoek, is de primaire dijk getoetst in de meest ongunstige en extreme situatie, waarvan de kans van voorkomen heel klein is.

6 Conclusie en aanbevelingen

Het voorland van de Biezelingse Ham is een slikken gebied dat gelegen is vóór een primaire waterkering die het achterland beschermt tegen overstromingen. Het hoog gelegen voorland zorgt ervoor dat de watercondities in het gebied veranderen. Dit beïnvloedt de manier waarop de faalmechanismen van de dijk optreden. De exacte invloed die het voorland uitoefent op de achterliggende dijk, is onderzocht in dit onderzoek. Dit is gedaan door middel van de wijzen waaraan de dijk kan falen te toetsen voor drie verschillende situaties met telkens een ander ontwerp van het voorland. Deze resultaten zijn zowel onderling als met het bestaande voorland vergeleken. Hieruit is een beste ontwerp gekomen die de meest gunstige invloed heeft op de faalmechanismen van de dijk. In dit hoofdstuk wordt de conclusie van het onderzoek en aanbevelingen voor een eventuele verdere uitwerking gegeven.

6.1 Conclusie

Om inzicht te krijgen in welke invloed het voorland heeft op de faalmechanismen van de dijk en welke vorm van het voorland het meest gunstig is voor de faalmechanismen, moet er onderzoek worden gedaan aan de hand van een bepaalde onderzoeksvraag. Deze vraag gaat als volgt:

“Hoe kan het ontwerp van het voorland van de Biezelingse Ham geoptimaliseerd worden om de kans op voorkomen van de faalmechanismen van de achterliggende dijk zo veel mogelijk te reduceren?”

Het antwoord op deze vraag is verkregen dankzij het uitgevoerde onderzoek en gaat als volgt: het ontwerp van het voorland kan geoptimaliseerd worden door het maaiveldniveau van het voorland ter hoogte van het dijktraject omhoog te brengen tot maximaal 1,50 m, in combinatie met het voorland ter hoogte van de vaargeul te verlagen met maximaal 1,00 m. Met dit voorlandprofiel wordt de kans op voorkomen van de faalmechanismen van de dijk, waar het voorland een invloed op heeft, gereduceerd. Hieronder staan de conclusies van het uitgevoerde onderzoek.

De dijk is getoetst op de faalmechanismen waar het voorland een invloed op heeft. Deze toetsingen zijn voor drie verschillende ontwerpen van het voorland herhaald. Aan de hand van de resultaten hiervan is een Multicriteria-analyse uitgevoerd. Hieruit blijkt dat het profiel van het voorland met de meest gunstige invloed op de faalmechanismen van de dijk, een combinatie is van variant 1 en 3. Dit is een combinatie tussen het gebied ophogen en het profiel van het voorland steiler maken.

Het gecombineerd ontwerp brengt de voordelen van beide varianten samen. Door het voorland op te hogen aan de kant van de dijk met gemiddeld 1,50 m, verhoogt de waterveiligheid. Hierdoor zullen de faalmechanismen golfoverslag, afschuiving (STBU) en piping minder snel voorkomen. Door het voorland aan de kant van de vaargeul te verlagen met gemiddeld 1,00 m en dit sediment te hergebruiken voor de ophoging, kan de natuurimpact in het gebied worden beperkt. Daarnaast zorgt het hergebruik van sediment ervoor dat er een kleinere hoeveelheid sediment moet worden aangevoerd voor de ophoging van het voorland. Hierdoor verminderen de kosten voor de uitvoering.

Het sediment waarmee het voorland moet worden opgehoogd, dient van dezelfde soort te zijn als het huidige sediment van de Biezelingse Ham. Dit is zeer fijn slib / fijn zand met een korrelgrootte < 75 µm (mediaan van totale sediment). Voor de volledige ophoging van het voorland is 460.100 m³ nodig, exclusief het sediment dat wordt hergebruikt.

Het nieuw profiel van het voorland van de Biezelingse Ham zal als gevolg van een natuurlijk erosieproces langzaam verdwijnen. Een drempel uit breukstenen zorgt ervoor dat dit proces wordt vertraagd. De constructie reduceert de waterstroming die afkomstig is van de Westerschelde. De drempel bestaat uit natuurlijke breukstenen met een sortering van 40-200 kg en wordt geplaatst parallel met de vaargeul.

6.2 Aanbevelingen

Voor een effectieve uitvoering waarbij het profiel van het voorland wordt gewijzigd, moeten er een aantal zaken verder onderzocht worden. Deze aanvullende informatie is nodig voor het verkrijgen van een haalbaar en realistisch resultaat in het gebied.

Herkomst sediment: om de ophoging van het voorland volledig uit te voeren is 460.100 m³ extra sediment nodig. Belangrijk is dat dit sediment nagenoeg dezelfde eigenschappen heeft als het huidige sediment. Daarom dient er een extra studie gedaan te worden om te bepalen uit welke zone in de Westerschelde het benodigde sediment gehaald kan worden.

Morfologische studie: indien de drempel uit breukstenen op het voorland geplaatst wordt, moet er rekening gehouden worden met de waterstroming in het gebied. Er kan een morfologisch model worden gemaakt waarmee een voorspelling kan worden gedaan waar sediment zal bezinken en waar het door sterke stromingen zal eroderen. Aan de hand van de studie kan bepaald worden op welke exacte locatie de drempel moet worden aangelegd.

Ondergrondgegevens: voor de berekening van het faalmechanisme macro-instabiliteit buitenwaarts is een doorsnede-profiel geschetst van het dijklichaam. Deze doorsnede is gemaakt op basis van bodemgegevens uit *DINOloket*. Er wordt aanbevolen om meerdere boormonsters te nemen, op verschillende plaatsen in de dijk, om de opbouw van het dijklichaam nauwkeuriger te kunnen bepalen. Door de extra boormonsters kunnen de afschuivingsberekeningen nauwkeuriger worden uitgevoerd.

Uitvoering: naast de periode waarin de uitvoeringswerken moeten plaatsvinden is ook de wijze waarop de werken gebeuren belangrijk. Er dient een uitvoeringsplan gemaakt te worden waarin beschreven staat op welke wijze de werken voor de ophoging en afgraving gebeuren. Hierbij moet rekening worden gehouden dat verstoring voor de flora en fauna in het gebied tot een minimum wordt beperkt.

Toepasbaarheid: de resultaten van dit onderzoek kunnen worden gebruikt voor gelijkaardige gebieden. Er kan worden onderzocht voor welke gebieden in de West- en Oosterschelde dit onderzoek kan worden gebruikt. Hiervoor moet specifiek onderzoek worden uitgevoerd om te weten aan welke eisen een gebied moet voldoen, voordat er besloten kan worden dat gelijkaardige ingrepen kunnen worden uitgevoerd.

Figuren- en tabellenlijst

Figuur 1 Primaire waterkering en voorland van de Biezelingse Ham	6
Figuur 2 Overzicht projectlocatie	8
Figuur 3 Primaire en regionale waterkeringen en dijkpaalnummers	8
Figuur 4 Hoogteprofiel dijk	9
Figuur 5 Poldergebieden en Natura 2000-gebied in de Biezelingse Ham	10
Figuur 6 Afgesloten onderhoudsweg op de dijk aan de Biezelingse Ham	11
Figuur 7 Doorsnede dijk aan de Biezelingse Ham.....	11
Figuur 8 Dwarsprofiel 4 ter plaatse van dp 334 tot 338, van dijk aan Biezelingse Ham	12
Figuur 9 Dwarsprofiel 7 ter plaatse van dp 347 tot 349, van dijk aan de Biezelingse Ham.....	12
Figuur 10 Faalmechanismen van een dijk	13
Figuur 11 Schets van piping zonder en met voorland	14
Figuur 12 Schetssituatie van een voorland	15
Figuur 13 Bedreigingen van het effect van een voorland.....	16
Figuur 14 Profielmetingen voorland	17
Figuur 15 Dijkzoning	18
Figuur 16 Dijktraject volgens signaleringswaarde	22
Figuur 17 Locaties grondboringen	23
Figuur 18 Profieldoorsnede met grondlagen	23
Figuur 19 Dijkprofielen in Riskeer	26
Figuur 20 Schets voorlandprofiel variant 1	30
Figuur 21 Schets voorlandprofiel variant 2	30
Figuur 22 Schets voorlandprofiel variant 3	30
Figuur 23 Schets doorsnede definitief ontwerp.....	33
Figuur 24 Situatieschets breukstenen drempel	34
Tabel 1 Effecten van een voorland	15
Tabel 2 Categorieën van veiligheidsoordelen conform WBI 2017	19
Tabel 3 Hydraulische gegevens.....	19
Tabel 4 GEKB resultaten bestaande situatie	29
Tabel 5 Macro-instabiliteit resultaten bestaande situatie	29
Tabel 6 Toetsingsresultaten ontwerpvarianten (algemene condities).....	31
Tabel 7 Toetsingsresultaten ontwerpvarianten (met zeespiegelstijging)	31
Tabel 8 Resultaten Multicriteria-analyse	32

Bibliografie

- AHN viewer. (z.d.). Opgehaald van AHN: <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>
- Anwd. (2019, 01 13). Opgehaald van <https://www.anwb.nl/belangenbehartiging/verkeer/veilig-tussen-de-vrachtwagens-door>
- Biezelingse Ham VN. (2020, 02 06). Opgehaald van Zeeweringenwiki: https://www.zeeweringenwiki.nl/wiki/index.php/Biezelingse_Ham_VN
- Bot, B. (2011). *Grondwaterzakboekje2011*. Nederland.
- Faalmechanisme. (2016, 02 26). Opgehaald van Deltares: <https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Faalmechanisme>
- Faalmechanismen. (2018, 05 29). Opgehaald van Helpdesk water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192764/faalmechanismen-0/>
- Gebieden data base. (2020, 02 05). Opgehaald van Symbiosys Alterra: <https://www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx?subj=procedure>
- GeoWeb 5.4. (sd). Waterschap Scheldestromen.
- Getij. (2020). Opgehaald van Rijkswaterstaat: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/waterdata/getij/index.aspx>
- Kerncijfers. (2014). Opgehaald van Rijkswaterstaat: <http://www.klimaatscenarios.nl/kerncijfers/>
- Koolstof sink. (2020). Opgehaald van Natuurlijke klimaatbuffers: <https://www.klimaatbuffers.nl/klimaatbuffers/koolstof-sink>
- MorphAn (Versie 1.7.3.45496). (sd).
- Natuurgebieden. (2020, 02 10). Opgehaald van Natuurmonumenten: <https://www.natuurmonumenten.nl/natuurgebieden>
- Normering. (sd). Opgehaald van Waterveiligheidsportaal: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>
- Ontwerpen. (2020, 02 05). Opgehaald van Helpdesk water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/ontwerpen/>
- Portaal. (z.d.). Opgehaald van Geoservices: <https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/portaal/>
- Regeling veiligheid primaire veiligheid 2017. (2016). In Rijkswaterstaat, *Procedure*.
- Regeling veiligheid primaire veiligheid 2017. (2017). In Rijkswaterstaat, *Bijlage 2 Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen*.
- Regeling veiligheid primaire veiligheid 2017. (2017). In Rijkswaterstaat, *Bijlage 3 Sterkte en veiligheid*.
- Rijkswaterstaat. (1994). In Rijkswaterstaat, *Tienjarig overzicht 1981 - 1990*. Den Haag, Nederland.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Schematiseringshandleiding piping*. Nederland: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Rijkswaterstaat. (2020, 03 27). *Helpdesk water*. Opgehaald van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192940/piping-zand-meevoerende-wellen-onderzoek/>
- Ringtoets. (sd). Riskeer (Versie 19.1.1.2).
- Tussen afluitdammen en deltadijken. (1961). In M. Wilderom, *Tussen afluitdammen en deltadijken*. De Bruin, M.P.
- Voorland. (2019). In M. B. Roode N., *Voorland*.

Bijlagen

Bijlage 1:	Resultaten
Bijlage 2:	Variantstudie
Bijlage 3:	Aanbevelingen definitief ontwerp
Bijlage 4:	Waterkeringen Dijkkringen
Bijlage 5:	Waterkeringen Zonering
Bijlage 6:	Grondboringen
Bijlage 7:	GEKB berekeningen Bestaande Situatie
Bijlage 8:	GEKB berekeningen Variant 1
Bijlage 9:	GEKB berekeningen Variant 2
Bijlage 10:	GEKB berekeningen Variant 3
Bijlage 11:	Indicatie van het sedimentvolume
Bijlage 12:	Overzichtstekening
Bijlage 13:	Doorsnede dijkprofiel en details

Invloed van het voorland op de dijk aan de Biezelingse Ham

Bijlage 1: Resultaten

Inhoudsopgave resultaten

1 Toetsing faalmechanismen bestaande situatie	3
1.1 GEKB.....	3
1.2 Macro-instabiliteit (handberekening)	6
1.3 Macro-instabiliteit (D-Stability)	10
1.4 Piping (handberekening).....	12
2 Toetsing faalmechanismen ontwerpvarianten	14
2.1 Variant 1: verhoogd voorland	14
2.1.1 Beschrijving profiel	14
2.1.2 GEKB.....	15
2.1.3 Macro-instabiliteit	17
2.1.4 Piping.....	18
2.2 Variant 2: verlaagd voorland.....	19
2.2.1 Beschrijving profiel	19
2.2.2 GEKB.....	19
2.2.3 Macro-instabiliteit	21
2.2.4 Piping.....	22
2.3 Variant 3: steiler voorland	23
2.3.1 Beschrijving profiel	23
2.3.2 GEKB.....	23
2.3.3 Macro-instabiliteit	25
2.3.4 Piping.....	26
2.4 Overzicht resultaten	27

Figurenlijst

Figuur 1 Dijkprofielen in Riskeer	3
Figuur 2 Dijkprofielen met de slechtste resultaten	5
Figuur 3 Dijkprofiel grondlagen	6
Figuur 4 Korrelspanning tegenwerkende kant.....	8
Figuur 5 Korrelspanning aandrijvende kant	8
Figuur 6 Dijkprofiel van de handberekening in D-Stability	9
Figuur 7 Grondlagen dijkdoorsnede	10
Figuur 8 Waterstanden in het dijklichaam.....	10
Figuur 9 Stabiliteitsberekening stormwaterstand	11
Figuur 10 Stabiliteitsberekening waterstand na storm	11
Figuur 11 Locatie waar de kans op piping het grootst is	12
Figuur 12 Schets doorsnede dijkprofiel Bestaande Situatie (piping)	12
Figuur 13 Profiel voorland, variant 1	14
Figuur 14 Dijkprofielen die niet aan de faalkanseis voldoen.....	16
Figuur 15 Afschuivingsberekening variant 1	17
Figuur 16 Schets doorsnede dijkprofiel Variant 1 (piping)	18
Figuur 17 Profiel voorland, variant 2	19
Figuur 18 Afschuivingsberekening variant 2	21
Figuur 19 Schets doorsnede dijkprofiel Variant 2 (piping)	22
Figuur 20 Profiel voorland, variant 3	23
Figuur 21 Afschuivingsberekening variant 3	25
Figuur 22 Schets doorsnede dijkprofiel Variant 3 (piping)	26

Tabellenlijst

Tabel 1 Karakteristieke waarden per grondlaag (NEN, 2006)	6
Tabel 2 Gemiddelde doorlatendheid van zand	12
Tabel 3 Overzicht resultaten (algemene condities)	27
Tabel 4 Overzicht resultaten (met zeespiegelstijging)	27

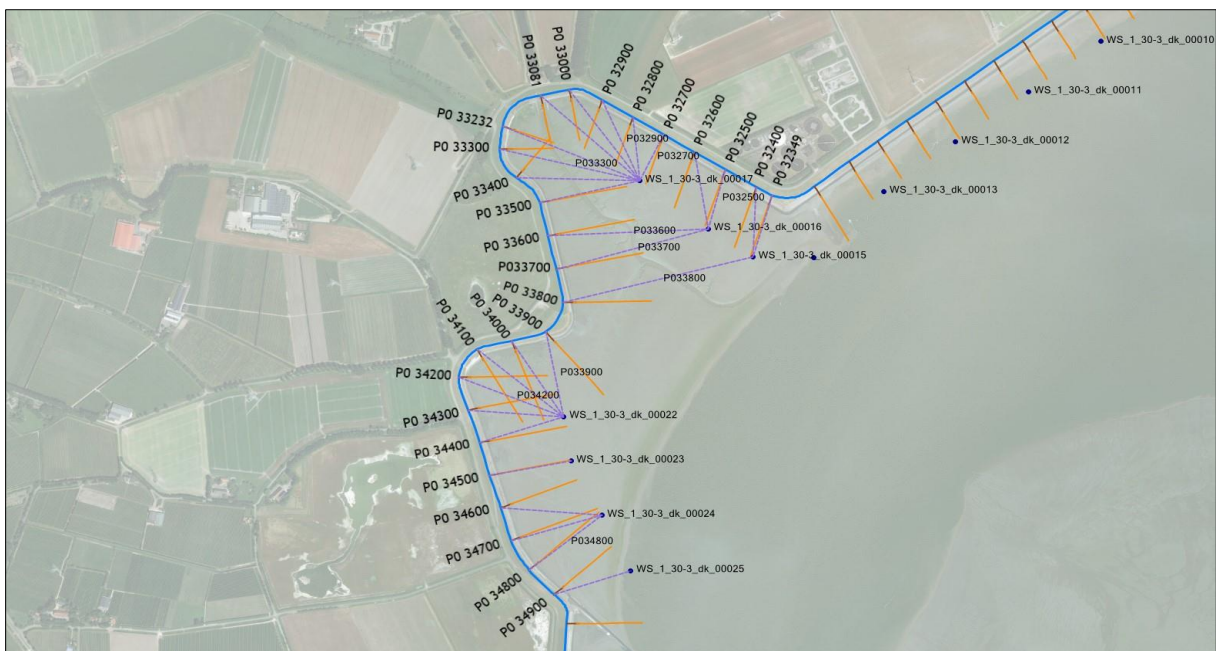
1 Toetsing faalmechanismen bestaande situatie

In dit hoofdstuk wordt een antwoord gegeven op deelvraag b. Deze luidt als volgt: “Hoe zien de belangrijkste faalmechanismen van de dijk en het voorland eruit?”. Om een antwoord te vormen op deze vraag, moeten de faalmechanismen die van toepassing zijn op de betreffende dijk, worden getoetst. In het hoofdrapport, hoofdstuk 2.8 ‘Programma van eisen’ is beschreven waaraan de dijk aan de Biezelingse Ham moet voldoen. In dit hoofdstuk staan de resultaten van de toetsingen op het bestaande dijkprofiel. Dit wordt gedaan om achteraf een referentie te vormen als het profiel van het voorland wordt veranderd.

De faalmechanismen die van toepassing zijn op het huidige dijkprofiel en verband houden met het voorland zijn overslag (GEKB), macro-instabiliteit buitenwaarts en piping. Deze zijn eerder beschreven in het hoofdrapport, hoofdstuk 2.4 ‘Faalmechanismen dijk’.

1.1 GEKB

GEKB wordt berekend in het softwareprogramma Ringtoets. De manier waarop deze berekeningen tot stand zijn gekomen staat uitgelegd in het hoofdrapport, hoofdstuk 3.3.2 ‘Ringtoets’. Voor de GEKB toetsing is voor elk dijkprofiel (Figuur 1) een faalkansberekening (op basis van een gegeven overslagdebiet), het overslagdebiet (op basis van het werkelijke dijkprofiel) en het HBN (hydraulische belasting niveau (min. kruinhoogte), op basis van het werkelijke buitentalud en een gegeven overslagdebiet) berekend. Dit wordt drie keer gedaan met telkens een ander overslagcriterium. Zolang de berekende resultaten de randvoorwaarden niet overschrijden, voldoet de dijk aan de norm.



Figuur 1 Dijkprofielen in Riskeer

Standaard wordt er gerekend met een maximum overslagdebiet van 10 l/m/s. Om te weten wat er gebeurt als er meer of minder overslag wordt toegelaten, is er ook gerekend met een maximum overslagdebiet van 4 l/m/s en 100 l/m/s. In bijlage 7 zijn alle resultaten te zien. Hieronder zijn de slechtste en beste waarden weergegeven.

Randvoorwaarden 1: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 4 l/m/s (standaardafwijking: 0,6 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/92.888
Kleinste faalkans	P0 33800	1/1.813.313
Grootste overslagdebiet	P0 32600	0,07 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33232 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	6,49 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33300, P0 33500	5,87 m

- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

In de resultaten in bijlage 7 is te zien dat P0 32349 en P032400 de grootste kruinhoogte nodig hebben. Omdat deze dijkprofielen aan de buitenste rand van het gebied liggen, waar het voorland nauwelijks invloed op uitoefent, is deze niet maatgevend en dus buiten beschouwing gelaten. Dit geldt ook voor de berekeningen met randvoorwaarden 2 en 3.

Randvoorwaarden 2: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/153.660
Kleinste faalkans	P0 33900	1/1.939.988
Grootste overslagdebiet	P0 32600	0,07 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33232 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	6,26 m
Laagst benodigde kruinniveau	P033300, P033500, P034200	5,86 m

- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

Randvoorwaarden 3: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 100 l/m/s (standaardafwijking: 10 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 34300	1/447.107
Kleinste faalkans	P0 33900	1/2.665.601
Grootste overslagdebiet	P0 32600	0,07 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33232 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	6,04 m
Laagst benodigde kruinniveau	P033300, P033500, P033600 P033700, P0 34200	5,75 m

- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

Conclusie:

Bij alle getoetste situaties voldoet heel het dijktraject aan de eisen van zowel de sterkte berekeningen, het overslagdebiet en HBN. In de resultaten valt op dat de meest noordelijke profielen (zie Figuur 2) de slechtste waarden hebben. Ze hebben de grootste hoeveelheid overslag en de grootste minimale kruinhoogte. Dit is te verklaren door de maatgevende windrichting die de opstuwing van water stimuleert waardoor de golven hoger worden. Als de wind meer naar het zuiden draait, zal de golfbelasting op de Biezelingse Ham toenemen.

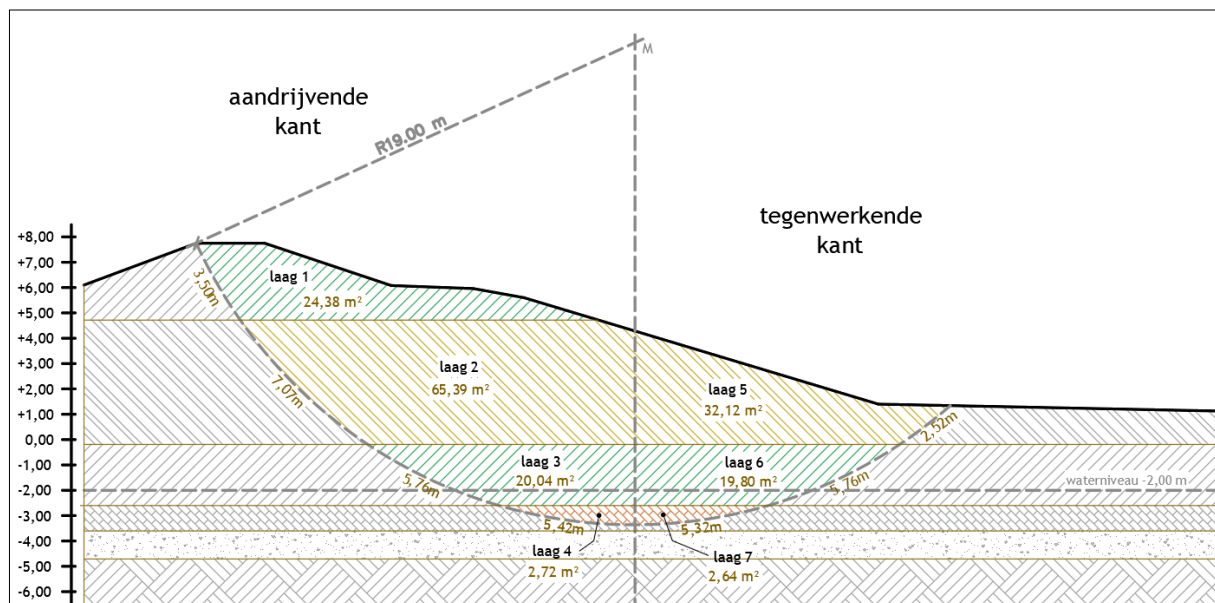


Figuur 2 Dijkprofielen met de slechtste resultaten

1.2 Macro-instabiliteit (handberekening)

Gegevens

Aan de hand van de ondergrondgegevens uit het hoofdrapport in hoofdstuk 2.9, is er een dwarsdoorsnede gemaakt van de dijk. Onderstaande afbeelding (Figuur 3) geeft een vereenvoudigde doorsnede weer van het dijkprofiel waarvan wordt aangenomen dat deze opbouw de meest voorkomende is voor heel het dijktraject aan de Biezelingse Ham. De karakteristieke waarden van de grondlagen die zijn gebruikt voor de berekeningen staan in Tabel 1 (NEN, 2006). Dit zijn representatieve parameters, vastgesteld volgens het WBI. De afglijcirkel is geschetst in AutoCAD om zo accuraat mogelijk de oppervlaktes en andere gegevens van de grondlagen te kunnen bepalen.



Figuur 3 Dijkprofiel grondlagen

Tabel 1 Karakteristieke waarden per grondlaag (NEN, 2006)

Laag	Grondsoort	Eigen gewicht $\gamma_{dr} / \gamma_{sat}$ [kN/m ³]	Afschuifhoek (φ) [graden]	Cohesie (c) [kN/m ²]	Volumieke massa (ρ) [kg/m ³]
1	klei, zwak zandig, matig	18,0 / 18,0	22,5	5	1800
2	klei, sterk zandig	18,0 / 18,0	27,5	0	1800
3	klei, zwak zandig, matig	18,0 / 18,0	22,5	5	1800
4	veen, matig voorbelast	12,0 / 12,0	15,0	2,5	1300
5	klei, sterk zandig	18,0 / 18,0	27,5	0	1800
6	klei, zwak zandig, matig	18,0 / 18,0	22,5	5	1800
7	veen, matig voorbelast	12,0 / 12,0	15,0	2,5	1300

Formules

Om de macro-instabiliteit van de dijk te bepalen, moet de veiligheidsfactor (SF) worden berekend. Dit wordt gedaan met de formule van Koppejan (zie hieronder). Als de SF-waarde groter is dan '1,02', dan zal de dijk niet afschuiven en zal het faalmechanisme dus niet plaatsvinden.

$$SF = \frac{R * \tau + M_t}{M_a}$$

SF = veiligheidsfactor [-]
R = straal afglijcirkel [m]
 τ = schuifspanning [kN]
 M_t = tegenwerkend moment [kNm]
 M_a = aandrijvend moment [kNm]

$$\rightarrow \tau = (c + \sigma_k \cdot \tan(\varphi)) \cdot L$$

c = cohesie [kN/m^2]

σ_k = korrelspanning [kN/m^2]

φ = afschuifhoek [$^\circ$]

L = booglengte [m]

$$\rightarrow M = F \cdot l$$

M = moment [kNm]

F = kracht [kN]

l = afstand zwaartepunt tot momentenlijn [m]

$$\rightarrow F = \rho \cdot A \cdot d \cdot 0,01 \text{ kN/kg}$$

ρ = volumieke massa [kg/m^3]

A = oppervlakte grondlaag [m^2]

d = dikte [m]

Berekeningen

1. Krachten:

$$F = \rho \cdot A \cdot d \cdot 0,01 \text{ kN/kg}$$

Aandrijvende krachten

Laag 1	$F = 1800 \cdot 24,38 \cdot 1 \cdot 0,01 = 438,84 \text{ kN}$
Laag 2	$F = 1800 \cdot 65,39 \cdot 1 \cdot 0,01 = 1177,02 \text{ kN}$
Laag 3	$F = 1800 \cdot 20,04 \cdot 1 \cdot 0,01 = 360,72 \text{ kN}$
Laag 4	$F = 1300 \cdot 2,72 \cdot 1 \cdot 0,01 = 35,36 \text{ kN}$

Tegenwerkende krachten

Laag 5	$F = 1800 \cdot 32,12 \cdot 1 \cdot 0,01 = 578,16 \text{ kN}$
Laag 6	$F = 1800 \cdot 19,80 \cdot 1 \cdot 0,01 = 356,40 \text{ kN}$
Laag 7	$F = 1300 \cdot 2,64 \cdot 1 \cdot 0,01 = 34,32 \text{ kN}$

2. Momenten:

$$M = F \cdot l$$

Aandrijvende momenten

Laag 1	$M = 438,84 \cdot 11,57 = 5077,38 \text{ kNm}$
Laag 2	$M = 1177,02 \cdot 7,32 = 8615,79 \text{ kNm}$
Laag 3	$M = 360,72 \cdot 4,48 = 1616,03 \text{ kNm}$
Laag 4	$M = 35,36 \cdot 1,77 = 62,59 \text{ kNm}$
Totaal	$= 15371,79 \text{ kNm}$

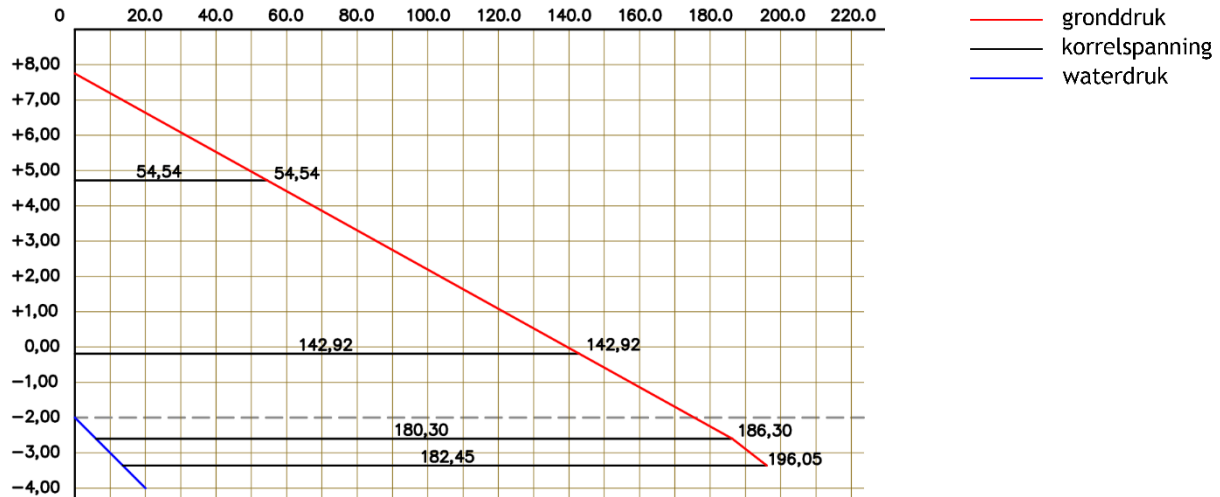
Tegenwerkende momenten

Laag 5	$M = 578,16 \cdot 4,94 = 2856,11 \text{ kNm}$
Laag 6	$M = 356,40 \cdot 4,42 = 1575,29 \text{ kNm}$
Laag 7	$M = 34,32 \cdot 1,71 = 58,69 \text{ kNm}$
Totaal	$= 4490,09 \text{ kNm}$

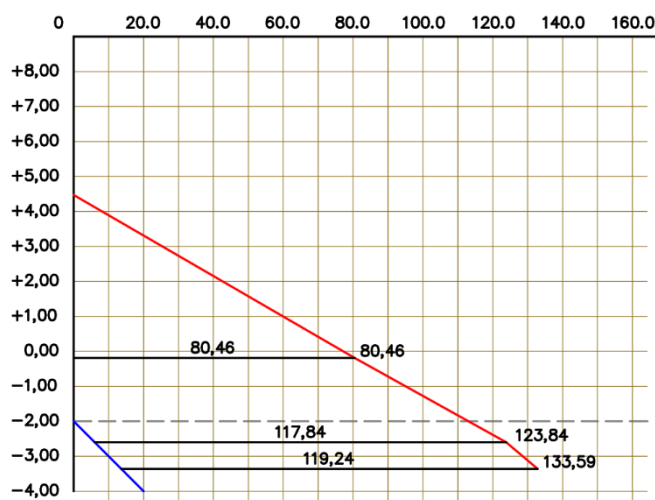
3. Korrelspanningen:

$$\sigma_k = \gamma * h$$

De korrelspanning wordt per laag apart berekend voor de aandrijvende kant en de tegenwerkende kant. Hieronder staan de grafieken van de korrelspanning van de aandrijvende (linkse) kant (Figuur 5) en van de tegenwerkende (rechtse) kant (Figuur 4).



Figuur 5 Korrelspanning aandrijvende kant



Figuur 4 Korrelspanning tegenwerkende kant

4. Schuifspanning:

$$\tau = (c + \sigma_k * \tan(\varphi)) * L$$

Om de schuifspanning te berekenen wordt de gemiddelde korrelspanning per laag gebruikt.

Laag 1	$\tau = (5 + 27,27 * \tan(22,5)) * 3,50 = 44,53 \text{ kN}$
Laag 2	$\tau = (0 + 71,46 * \tan(27,5)) * 7,07 = 263,00 \text{ kN}$
Laag 3	$\tau = (5 + 93,15 * \tan(22,5)) * 5,76 = 227,24 \text{ kN}$
Laag 4	$\tau = (2,5 + 98,03 * \tan(15,0)) * 5,42 = 144,87 \text{ kN}$
Laag 5	$\tau = (0 + 40,23 * \tan(27,5)) * 2,52 = 52,77 \text{ kN}$
Laag 6	$\tau = (5 + 61,92 * \tan(22,5)) * 5,76 = 152,73 \text{ kN}$
Laag 7	$\tau = (2,5 + 66,80 * \tan(15,0)) * 5,32 = 97,72 \text{ kN}$
Totaal	$= 982,86 \text{ kN}$

5. Veiligheidsfactor:

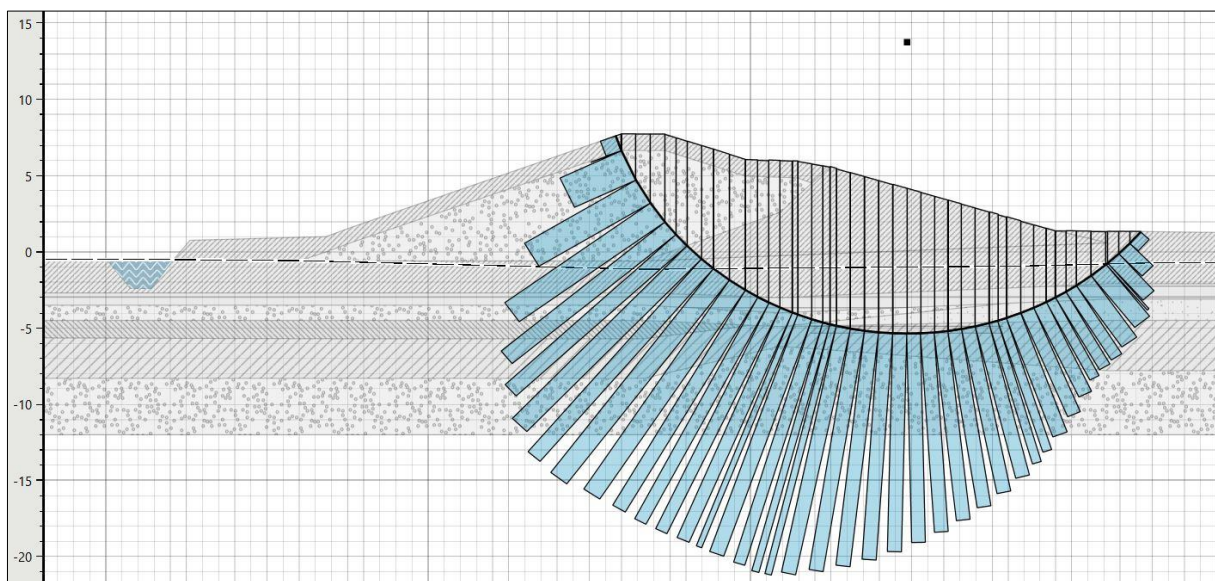
$$SF = \frac{R * \tau + M_t}{M_a}$$

$$SF = \frac{(19 * 982,86) + 4490,09}{15371,79}$$

SF = 1,51 → De veiligheidsfactor is groter dan '1,02'. Er zal geen macro-instabiliteit optreden.

Opmerking

Als controle voor de handberekening is het dijkprofiel (zoals weergegeven in Figuur 3) berekend in D-Stability met dezelfde afglijcirkel van 19,00 m (Figuur 6). Het resultaat van deze berekening is een veiligheidsfactor van 1,469. Dit komt dicht genoeg in de buurt van de veiligheidsfactor van de handberekening om te kunnen stellen dat de handberekening correct is uitgevoerd.

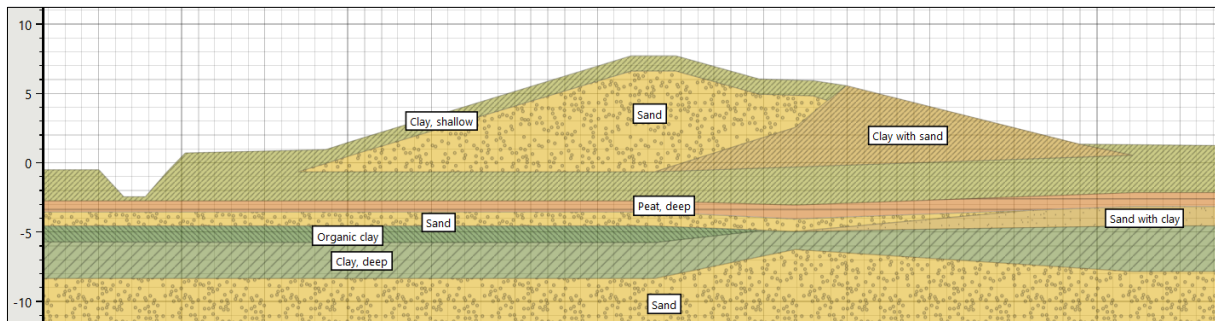


Figuur 6 Dijkprofiel van de handberekening in D-Stability

1.3 Macro-instabiliteit (D-Stability)

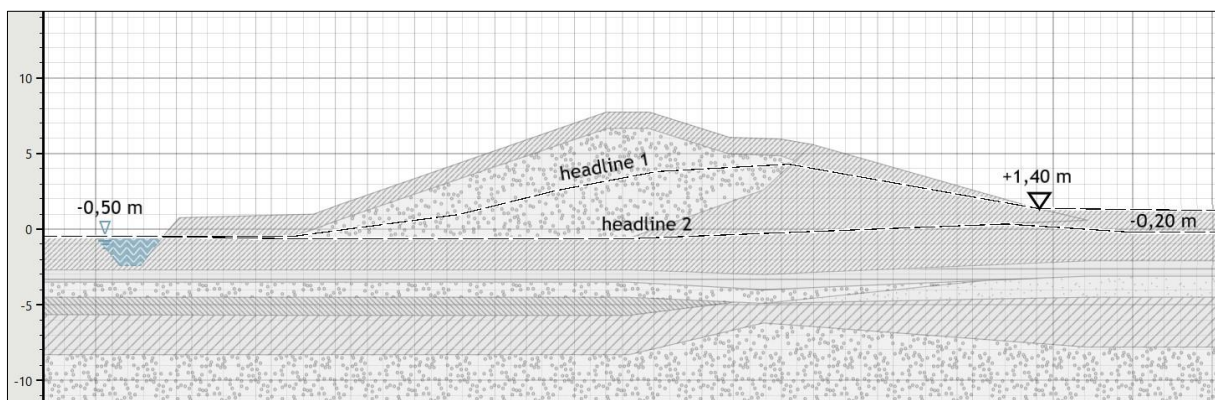
Gegevens

Om te beginnen zijn de verschillende grondlagen in D-Stability getekend (Figuur 7). Deze gegevens komen uit het hoofdstuk 'Ondergrondgegevens'. Elke grondsoort heeft zijn eigen karakteristieke parameters die vooraf zijn ingesteld door het programma zelf. Deze parameters zijn gecontroleerd of dat het realistische waarden zijn.



Figuur 7 Grondlagen dijkdorsnede

Vervolgens zijn de waterstanden in het dijklichaam getekend (Figuur 8). In tegenstelling met de handberekening zijn hier twee waterstanden getekend. Headline 1 is de freatische waterstand. Dit is de waterstand in de dijk net nadat het water buitendijks op stormniveau is geweest. Buitendijks is het waterniveau gelijk met het maaiveld: +1,40 m NAP, aan de binnenkant van de dijk is het waterniveau van het maaiveld aangehouden: -0,50 m NAP. Headline 2 is de waterspanning onder de afsluitende kleilaag (gemiddeld -0,20 m NAP).



Figuur 8 Waterstanden in het dijklichaam

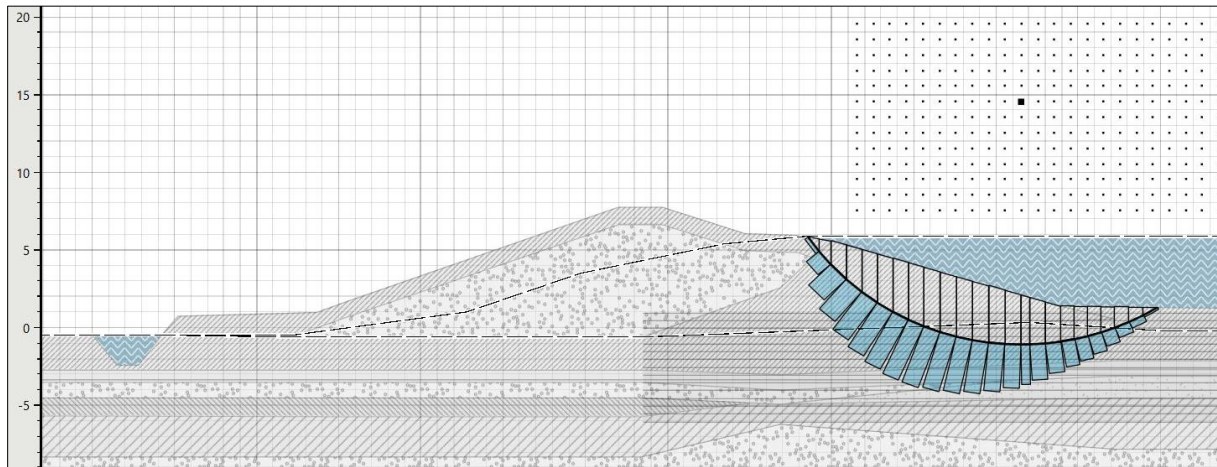
Resultaat

De dijk is getoetst op macro-instabiliteit buitenwaarts. Hierbij wordt dezelfde methode gebruikt als bij de handberekening (methode van Bishop). Het verschil met de handberekening is dat D-Stability veel nauwkeuriger werkt. Het afschuifvlak wordt in meerdere lagen verdeeld om de schuifspanning nauwkeuriger te kunnen bepalen. Er wordt ook een grid ingesteld, om de radius van het afschuifvlak op verschillende plaatsen te berekenen en vervolgens de maatgevende radius te bepalen.

Hieronder is de dijk met het bestaande voorland berekend in twee situaties met verschillende waterstanden. Dit is gedaan om te bepalen welke waterstand maatgevend is voor macro-instabiliteit buitenwaarts. In situatie 1 is het waterniveau buitendijks op stormniveau (+5,90 m NAP). Situatie 2 is bij een val na hoogwater. Dit is het buitendijks waterniveau (+1,40 m NAP) net na het stormniveau. Hierbij valt de waterdruk langs buiten op de dijk weg, terwijl het waterniveau binnen in het dijklichaam de tijd nog niet heeft gehad om te zakken. In deze situatie is de dijk het gevoeligst voor afschuiving. Deze situatie is maatgevend.

Situatie 1: Stormwaterstand

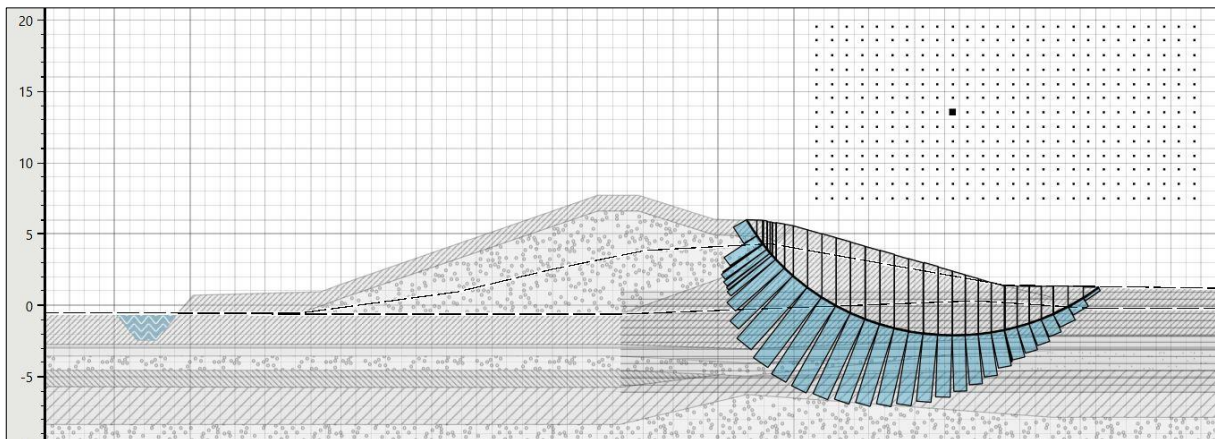
In de eerste situatie is de macro-instabiliteit berekend tijdens de maatgevende storm (Figuur 9). Buitendijks is het waterniveau +5,90 m NAP, binnendijks is de hoogte van het maaiveld aangehouden: -0,50 m NAP. De radius is 15,60 m. De veiligheidsfactor is 1,170 ($>1,02$). Er zal dus geen afschuiving plaatsvinden in deze situatie.



Figuur 9 Stabiliteitsberekening stormwaterstand

Situatie 2: Waterstand na storm

In de tweede situatie (Figuur 10) is de macro-instabiliteit berekend volgens de waterstanden in Figuur 8. Deze afbeelding geeft de waterstanden weer die voorkomen net na de maatgevende storm. Het water in de Westerschelde is dan terug gedaald tot gemiddeld niveau (+1,40 m NAP). Het water in de dijk heeft de tijd nog niet gehad om te dalen. Deze situatie heeft radius van 15,60 m en een veiligheidsniveau van 0,725 ($<1,02$). De dijk voldoet dus niet aan de faalkanseis. De oorzaak hiervan is de waterdruk aan de buitenkant van de dijk die verdwenen is als gevolg van de daling van de waterstand in de Westerschelde. Hoe meer waterdruk tegen het dijklichaam, hoe stabiel de dijk. Dit betekent niet dat de dijk sowieso zal afschuiven omdat er wordt uitgegaan van een conservatieve benadering. Zelfs als het dijklichaam zou afschuiven vormt er geen direct gevaar. Omdat het water al terug is gedaald en de afgeschoven grond een drempel vormt vóór de dijk.



Figuur 10 Stabiliteitsberekening waterstand na storm

Opmerking

De resultaten uit D-Stability komen niet overeen met de resultaten van de handberekening van afschuiving. Dit komt doordat de waterdruk in D-Stability realistischer is ingetekend dan in de situatie van de handberekening. Een andere element dat het verschil in de uitkomst veroorzaakt, is dat bij de handberekening gerekend wordt met slechts één willekeurig gekozen afglijvlak. In D-Stability worden verschillende vlakken berekend waarna het maatgevende resultaat wordt weergegeven.

1.4 Piping (handberekening)

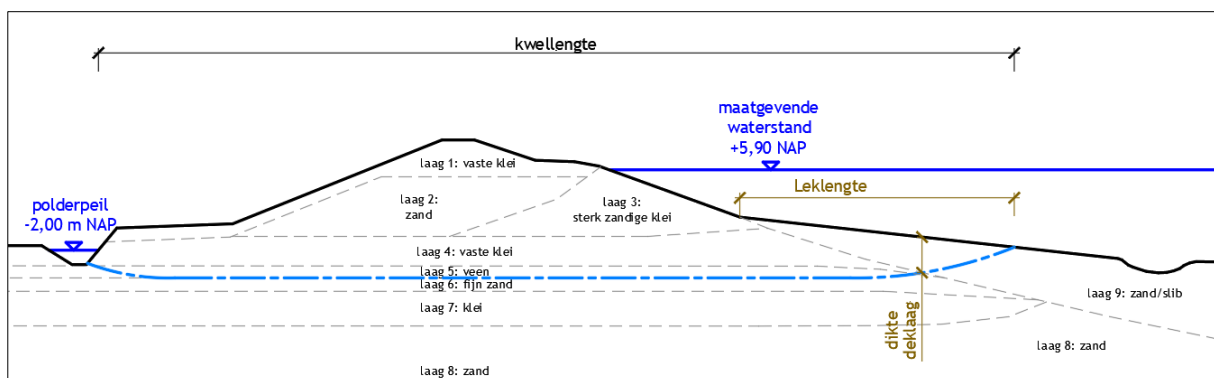
Gegevens

Water zoekt altijd de makkelijkste weg. Om deze reden moet de berekening worden gemaakt op de locatie waar piping het snelst zal voorkomen. Deze locatie (weergegeven in Figuur 11), is de plaats waar de dijk het dichtst ligt bij de geul waar water doorstroomt dat afkomstig is van het gemaal. Als het faalmechanisme piping zou optreden, is de kans het grootst dat het hier zal zijn.



Figuur 11 Locatie waar de kans op piping het grootst is

Piping treedt op onder het dijklichaam, in de zandlaag die aan de bovenzijde wordt afgesloten door een klei/veen laag. Op de locatie waar de kans het grootst is dat piping zal voorkomen, is een doorsnede gemaakt van de grondlagen (Figuur 12). In deze doorsnede zal piping voorkomen in grondlaag 6 (zeer fijn zand). Piping ontstaat aan de binnenzijde van de dijk, bij de dijksloot. Hier kan de druk van de grondlagen niet genoeg weerstand bieden tegen de waterdruk die de veen- en kleilaag omhoog duwt. Daardoor zal de grond opbarsten. Dit heeft als gevolg dat heave zal optreden. Dit zijn de zandkorrels die zich beginnen te verplaatsen door de waterdruk als gevolg van het opbarsten.



Figuur 12 Schets doorsnede dijkprofiel Bestaande Situatie (piping)

Tabel 2 Gemiddelde doorlatendheid van zand

Bron: Grondwaterboekje2011, B. Bot

korrelgrootte	zandmediaan micrometer	zonder slibfractie	zwak slibhoudend	sterk slibhoudend
uiterst fijn	63 - 105	3	2	0.5
zeer fijn	105 - 150	6	4	1
matig fijn	150 - 210	15	10	3
matig grof	210 - 300	30	20	5
zeer grof	300 - 420	55	35	10
uiterst grof	420 - 2000	250	150	50

Om te berekenen of piping optreedt onder de dijk aan de Biezelingse Ham, wordt de methode aangehouden die volgens het Rijk is opgesteld. Hierbij wordt de schematiseringshandleiding gevolgd die beschreven staat in het rapport dat door Rijkswaterstaat is opgesteld. De benodigde gegevens om de onderstaande formule in te kunnen vullen zijn waarden die met behulp van *DINOloket* en *Grondwaterboekje2011*, B. Bot zijn verkregen. De piping berekening gebeurt met een formule waarbij de leklengte wordt berekend. De leklengte representeert de indring van het water door de waterafsluitende lagen heen. Deze zal bij elke ontwerpvariant anders zijn. Enkel op deze manier kan er onderling worden vergeleken bij welke variant piping sneller zal optreden dan bij en andere.

Formule

$$\lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

Leklengte - λ [m]

De leklengte is de lengte vanaf de buitenteen van de dijk tot het intredepunt (zie Figuur 12). Het is een onderdeel van de totale kwellengte. De leklengte is de waarde die berekend moet worden omdat deze voor elke ontwerpvariant anders zal zijn.

Doorlatendheid zandlaag - k [m/dag]

De doorlatendheid is een maat voor de snelheid van water dat door de zandlaag onder het dijklichaam stroomt. De zandlaag onder de dijk van de Biezelingse Ham is matig fijn zand, zonder slibfractie. Deze grondsoort heeft een doorlatendheid van 15 m/dag.

Doorlatendheid deklaag - k' [m/dag]

De deklaag is de grondlaag die het water scheidt van de zandlaag onder de dijk (laag 9 in Figuur 12). De deklaag bestaat uit matig fijn zand en is sterk slibhoudend. De bodem bestaat uit zand dat is afgezet met lagen slib ertussen. Daarom heeft de deklaag een doorlatendheid van 2 m/dag.

Dikte zandlaag - D [m]

Dit is de dikte van de zandlaag onder het dijklichaam. Aan de hand van de ondergrondgegevens uit bijlage 6 is vast te stellen dat de zandlaag een dikte heeft van 1,00 m.

Dikte deklaag - D' [m]

De dikte van de deklaag is de dikte van de grondlaag die zich voor de dijk bevindt (Figuur 12). Aan de hand van een op schaal getekende doorsnede van het dijkprofiel is vastgesteld dat de dikte van de deklaag 3,20 m is. (de doorsnede van de grondlagen is getekend op basis van ondergrondgegevens uit DINOloket en aannames voor het exacte verloop van de grondlagen)

Berekening

$$\begin{aligned}\lambda &= \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}} \\ \lambda &= \sqrt{\frac{15 \cdot 1,00 \cdot 3,20}{2}} \\ \lambda &= 4,90 \text{ m}\end{aligned}$$

➔ De leklengte in de bestaande situatie is 4,90 m.

2 Toetsing faalmechanismen ontwerpvarianten

In het hoofdstuk ‘Toetsing faalmechanismen ontwerpvarianten’ worden drie verschillende varianten van het voorland ontworpen. Deze worden getoetst op de faalmechanismen die van toepassing zijn op de situatie. Dit wordt uitgevoerd om een antwoord te kunnen geven op deelvraag c: *“In welke vorm heeft het voorland de meest gunstige invloed op de dijk?”*. De drie verschillende varianten van het voorland worden ontworpen om de invloed van de vorm hiervan te kunnen waarnemen. Elke variant wordt apart getoetst op de faalmechanismen die van toepassing zijn op de achterliggende dijk. Op deze manier kan de vorm van het voorland worden gelinkt met de invloed die het heeft op de dijk.

Door middel van de resultaten van de toetsingen op de bestaande situatie die zijn verkregen in hoofdstuk 1 ‘Toetsing faalmechanismen bestaande situatie’, kan er worden vergeleken of de verschillende varianten van het voorland een meer of minder gunstige werking hebben op de achterliggende dijk. Het uiteindelijke doel is om de resultaten te analyseren in een variantenstudie (MCA), om zo het meest ideale voorland te verkrijgen.

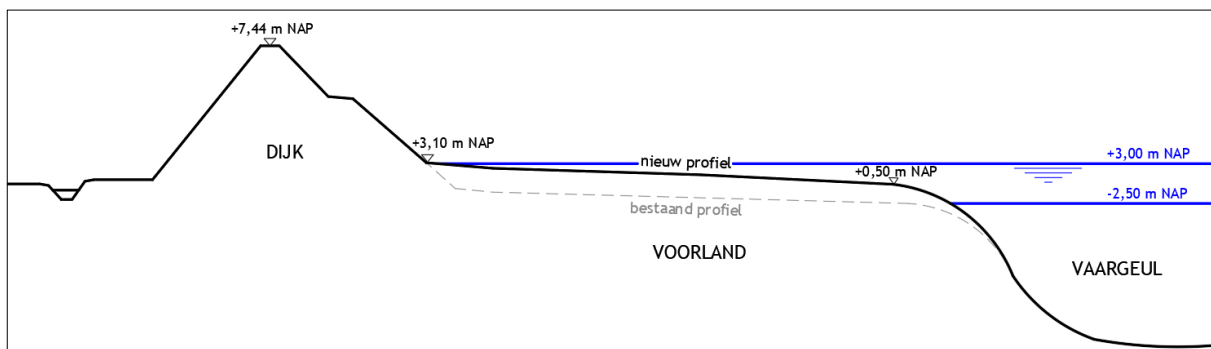
Omdat het belangrijk is om de veiligheid van het achterland ook in de toekomst te kunnen garanderen, worden de ontwerpvarianten ook getoetst in een situatie die wordt verwacht binnen 100 jaar. Dit komt overeen met een zeespiegelstijging van 85 centimeter. Bij de GEKB berekeningen in Riskeer worden de hydraulische randvoorwaarden (maximale waterstand en golfhoogte) opnieuw berekend. Daarna worden de dijkprofielen opnieuw getoetst met die nieuwe randvoorwaarden. Dezelfde hydraulische randvoorwaarden worden gebruikt voor de toetsing van macro-instabiliteit. Bij macro-instabiliteit zal het waterniveau in het dijklichaam stijgen als gevolg van de hogere zeespiegel. Daarom wordt er voor macro-instabiliteit een tweede berekening gedaan waarbij rekening wordt gehouden met de stijgende zeespiegel.

2.1 Variant 1: verhoogd voorland

2.1.1 Beschrijving profiel

In de eerste variant wordt het niveau van het voorland verhoogd met maximaal 1,50 m (Figuur 13). Op deze hoogte komt het voorland nog net helemaal onder water te staan tijdens vloed. Als het voorland nog hoger komt te liggen, zou er een gedeelte droog blijven staan tijdens GLW (gemiddelde laagwaterstand) van -2,50 m NAP en GHW (gemiddelde hoogwaterstand) van +3,00 m NAP. Dat zou een impact hebben op het natuurgebied en de dieren die er leven. Omdat de Biezelingse Ham Natura 2000-gebied is, moet er zoveel als mogelijk voorkomen worden dat menselijke ingrepen gevolgen hebben op de flora en fauna in het gebied.

Het hoger voorland zal waarschijnlijk meerdere voordelen met zich meebrengen: golfreductie, extra stabilisatie etc. Daarom wordt de achterliggende dijk getoetst op de faalmechanismen. De resultaten leest u hieronder.



Figuur 13 Profiel voorland, variant 1

2.1.2 GEKB

Voor de 'Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud' berekeningen van de eerste variant zijn de dijkprofielen twee keer getoetst. De eerste keer met standaard waarden waarmee een dijkprofiel wordt getoetst (max. overslagdebiet 10 l/m/s). De tweede keer met dezelfde waarden maar met een voorspelde zeespiegelstijging van 0,85 m binnen 100 jaar. Op deze manier kan er worden vastgesteld of de variant van het voorland in de toekomst bestand is tegen de klimaatveranderingen of niet.

Elke berekening van elk dijkprofiel (27 dijkprofielen in totaal) geeft de volgende resultaten: faalkansberekening, overslagdebiet en HBN. Voor een verklarende uitleg over deze gegevens zie hoofdstuk 3.3.2 'Ringtoets' in het hoofdrapport. De uiterste waarden van de berekeningen zijn hieronder weergegeven. Voor alle resultaten zie bijlage 8.

Randvoorwaarden 1: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 0,1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/160.661
Kleinste faalkans	P0 33900	1/1.941.269
Grootste overslagdebiet	P0 32600, P0 33081	0,02 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 32500, P0 32800 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	6,20 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33300, P0 33500, P0 34200	5,86 m

- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

In de resultaten in bijlage 8 is te zien dat P0 32349 de grootste kruinhoogte nodig heeft. Omdat dit dijkprofiel aan de buitenste rand van het gebied ligt, waar het voorland nauwelijks invloed op uitoefent, is deze niet maatgevend en dus buiten beschouwing gelaten.

Randvoorwaarden 2: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 0,1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m
Met zeespiegelstijging van 0,85 m

Als er rekening wordt gehouden met de zeespiegelstijging, zijn de waterstanden en golfhoogtes in extreme condities groter. Deze waarden zijn eerst berekend voordat de GEKB berekeningen gestart konden worden. De hydraulische belastingen (volgens categorie A) met zeespiegelstijging zijn als volgt: maximum waterstand = 6,75 m, maximum golfhoogte = 2,29 m.

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/10.389
Kleinste faalkans	P0 33900	1/163.011
Grootste overslagdebiet	P0 32600	1,24 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33300 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	7,31 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33300, P0 33500, P0 33600, P0 33700, P0 34200	6,71 m

- ➔ NIET alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

Conclusie:

Wanneer de GEKB resultaten van randvoorwaarden 1 (normale situatie zonder zeespiegelstijging) worden bekeken, is te zien dat heel het dijktraject voldoet aan de gestelde normen van de sterkte berekening, de maximum hoeveelheid overslagdebiet en HBN. Als de resultaten worden vergeleken met de resultaten van de bestaande situatie, is te zien dat variant 1 over het algemeen gunstigere resultaten heeft.

- De grootste faalkans van de bestaande situatie (1/153.660) is groter dan de grootste faalkans van variant 1 (1/160.661). Dit betekent dat de dijk in de bestaande situatie, sneller zal falen dan de dijk met het voorland van variant 1.
- De grootste hoeveelheid overslag van de bestaande situatie (0,07 l/m/s) is groter dan de hoeveelheid van variant 1 (0,02 l/m/s). Er zal dus minder overslag plaatsvinden met een voorland zoals die van variant 1, dan in de bestaande situatie.
- De hoogst benodigde kruin om te voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag is hoger bij de bestaande situatie (6,26 m) dan bij variant 1 (6,20 m). De resultaten van de kruinhoogte zullen sowieso geen problemen met zich meebrengen. Aangezien de huidige dijkhoogte minstens 7,44 m hoog is, voldoen alle berekeningen ruim aan deze waarde.

Met zeespiegelstijging:

Als de dijkprofielen worden getoetst met een zeespiegelstijging van 85 centimeter (randvoorwaarden 2), zijn er enkele profielen die niet meer aan de gestelde faalkanseis voldoen (zie bijlage 8). Deze 5 profielen (Figuur 14) zijn gelegen in het noordelijke deel van de Biezelingse Ham. Dit is te verklaren doordat de opstuwing van het water tegen de dijk het grootst is bij deze profielen.

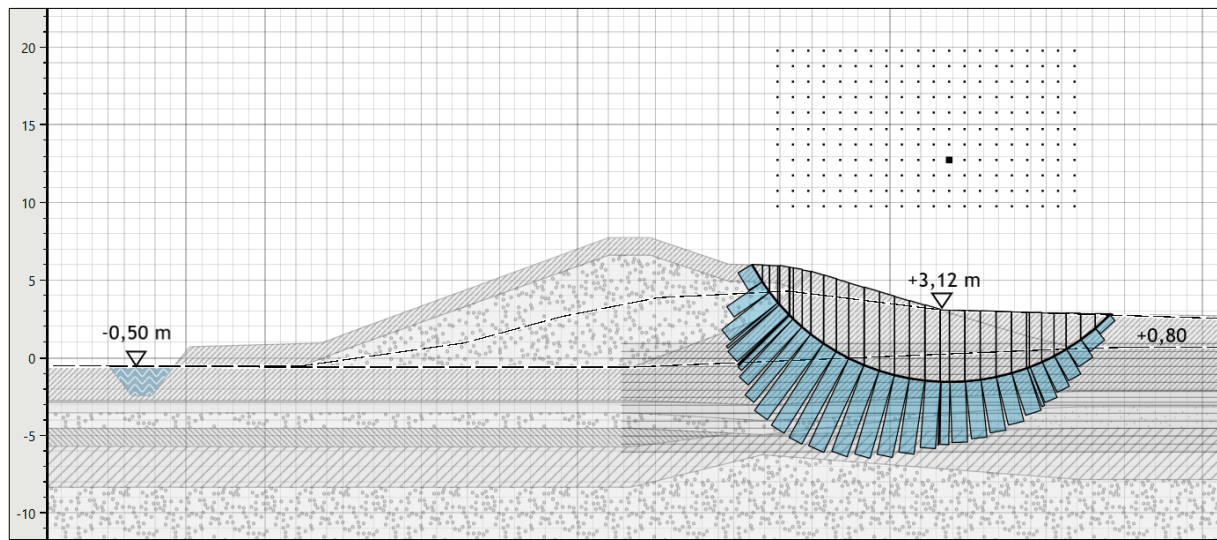


Figuur 14 Dijkprofielen die niet aan de faalkanseis voldoen

2.1.3 Macro-instabiliteit

Het voorland is verhoogd met gemiddeld 1,50 m. Hiermee komt de overgang tussen de dijk en het voorland op +3,12 m te liggen. De toetsing in D-Stability speelt zich af net na een maatgevende storm (waterniveau +5,90 m NAP). Het water buitendijks is dan terug gedaald tot maaiveld niveau (+3,12 m NAP). Omdat het voorland is verhoogd, is ook de waterstand in het dijklichaam en het voorland verhoogd tegenover NAP.

De toetsing geeft als resultaat een veiligheidsfactor van 1,016 en een radius van de afglijcirkel van 14,33 m. Dit wil zeggen dat het dijklichaam niet zal afschuiven. De veiligheidsfactor van variant 1 is hoger dan de veiligheidsfactor in de bestaande situatie (0,725), het opgehoogde voorland zorgt dus voor extra steun tegen macro-instabiliteit.



Figuur 15 Afschuivingsberekening variant 1

Als we de situatie toetsen, rekening houdende met de verwachte zeespiegelstijging binnen 100 jaar, zal de waterstand in het dijklichaam mee stijgen met de zeespiegel. In D-Stability is de waterstand in het dijklichaam hoger ingesteld. Als de situatie dan opnieuw wordt berekend, zijn de resultaten als volgt: veiligheidsfactor = 0,995 en een afglijradius = 15,33 m.

Conclusie:

De situatie met een verhoogd voorland heeft een hogere veiligheidsfactor. De dijk zal minder snel falen door macro-instabiliteit buitenwaarts dan in de bestaande situatie. Als het dijkprofiel van variant 1 wordt getoetst met een zeespiegelstijging van 85 cm, is de veiligheidsfactor kleiner en het dijklichaam gevoeliger voor afschuiving.

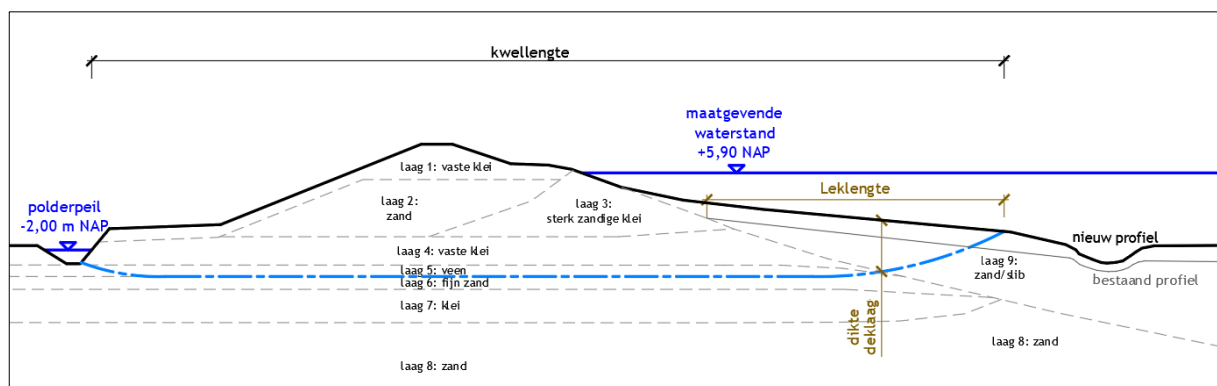
2.1.4 Piping

Voor de piping berekening van ontwerpvariant 1 verandert er slecht één factor in de formule, namelijk de dikte van de deklaag (D') (Figuur 16). Door de verhoging van het voorland is deze dikte toegenomen met 1,50 m.

$$\text{Formule: } \lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

De andere factoren blijven onveranderd:

- *Doorlatendheid zandlaag (k):* piping zal nog steeds optreden in de fijne zandlaag onder het dijklichaam. De doorlatendheid van deze grond blijft onveranderd (15 m/dag).
- *Doorlatendheid deklaag (k'):* het materiaal waarmee het voorland opgehoogd zal worden moet dezelfde grondsoort zijn als het materiaal van het huidige voorland. Dit om de verstoring in de natuur te beperken (2 m/dag).
- *Dikte zandlaag (D):* De dikte van de zandlaag onder het dijklichaam blijft onveranderd (1 m).



Figuur 16 Schets doorsnede dijkprofiel Variant 1 (piping)

Berekening:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{15 \cdot 1,00 \cdot 4,70}{2}}$$

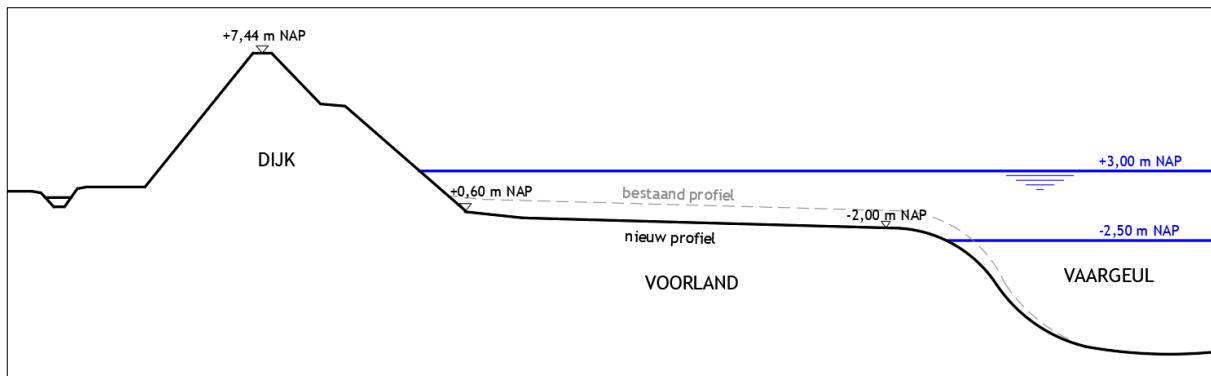
$$\lambda = 5,94 \text{ m}$$

- ➔ De leklengte van het dijkprofiel in variant 1 is 5,94 m. Dit is 1,04 m meer dan in de bestaande situatie (4,90 m). De ophoging van het voorland zorgt voor een veiligere situatie waarbij het faalmechanisme piping minder snel zal optreden dan in de bestaande situatie.

2.2 Variant 2: verlaagd voorland

2.2.1 Beschrijving profiel

Voor de tweede ontwerpvariant van het voorland wordt het niveau over heel het gebied verlaagd met maximaal 1,00 m ten opzichte van het bestaand niveau (Figuur 17). In deze situatie komt het voorland nog steeds droog te staan tijdens eb, maar voor een kortere duur. De vogels die in het gebied leven kunnen nog steeds voedsel zoeken in het slik. De veranderingen van de toetsingsresultaten van het ontwerp staan hieronder beschreven.



Figuur 17 Profiel voorland, variant 2

2.2.2 GEKB

Voor de ‘Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud’ berekeningen van de tweede variant zijn de dijkprofielen twee keer getoetst. De eerste keer met standaard waarden waarmee een dijkprofiel getoetst wordt (max. overslagdebiet 10 l/m/s). De tweede keer met dezelfde waarden maar met een voorspelde zeespiegelstijging van 0,85 m binnen 100 jaar. Op deze manier kan er vastgesteld worden dat de variant van het voorland in de toekomst weerstand biedt tegen de klimaatveranderingen.

Elke berekening van elk dijkprofiel (27 dijkprofielen in totaal) geeft de volgende resultaten: faalkansberekening, overslagdebiet en HBN. Voor een verklarende uitleg over deze gegevens zie hoofdstuk 3.3.2 ‘Ringtoets’ in het hoofdrapport. De uiterste waarden van de berekeningen zijn hieronder weergegeven. Voor alle resultaten zie bijlage 9.

Randvoorwaarden 1: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 0,1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/152.680
Kleinste faalkans	P0 33900	1/1.940.480
Grootste overslagdebiet	P0 32600	0,09 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33232 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	6,27 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33300, P0 33500, P0 33600, P0 34200	5,86 m

- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

In de resultaten in bijlage 9 is te zien dat P0 32349 de grootste kruinhoogte nodig heeft. Omdat dit dijkprofiel aan de buitenste rand van het gebied ligt, waar het voorland nauwelijks invloed op uitoefent, is deze niet maatgevend en dus buiten beschouwing gelaten.

Randvoorwaarden 2: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 0,1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m
Met zeespiegelstijging van 0,85 m

Als er rekening wordt gehouden met de zeespiegelstijging, zijn de waterstanden en golfhoogtes in extreme condities groter. Deze waarden zijn eerst berekend voordat de GEKB berekeningen gestart konden worden. De hydraulische belastingen (volgens categorie A) met zeespiegelstijging zijn als volgt: maximum waterstand = 6,75 m, maximum golfhoogte = 2,29 m.

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/9.674
Kleinste faalkans	P0 33900	1/162.862
Grootste overslagdebiet	P0 32600	1,85 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33300 - P0 33600, P0 33900 P0 34500, P0 34700, P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	7,35 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33300, P0 33500, P0 33600, P0 33700, P0 34200	6,71 m

- ➔ NIET alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

Conclusie:

Wanneer de GEKB resultaten van randvoorwaarden 1 (normale situatie zonder zeespiegelstijging) worden bekeken, is te zien dat heel het dijktraject voldoet aan de gestelde normen van de sterkte berekening, de maximum hoeveelheid overslagdebiet en HBN. Als de resultaten worden vergeleken met de resultaten van de bestaande situatie, is te zien dat variant 2 over het algemeen minder gunstige resultaten heeft.

- De grootste faalkans van de bestaande situatie (1/153.660) is kleiner dan de grootste faalkans van variant 2 (1/152.680). Dit betekent dat de dijk met het nieuwe voorland, sneller zal falen dan de dijk met het bestaande voorland.
- De grootste hoeveelheid overslag van de bestaande situatie (0,07 l/m/s) is minder dan de hoeveelheid van variant 2 (0,09 l/m/s). Er zal dus meer overslag plaatsvinden met een voorland zoals die van variant 2, dan in de bestaande situatie.
- De hoogst benodigde kruin om te voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag is bij de bestaande situatie (6,26 m) lager dan bij variant 2 (6,27 m). De resultaten van de kruinhoogte zullen sowieso geen problemen met zich meebrengen. Aangezien de huidige dijkhoogte minstens 7,44 m hoog is, voldoen alle berekeningen ruim aan deze waarde.

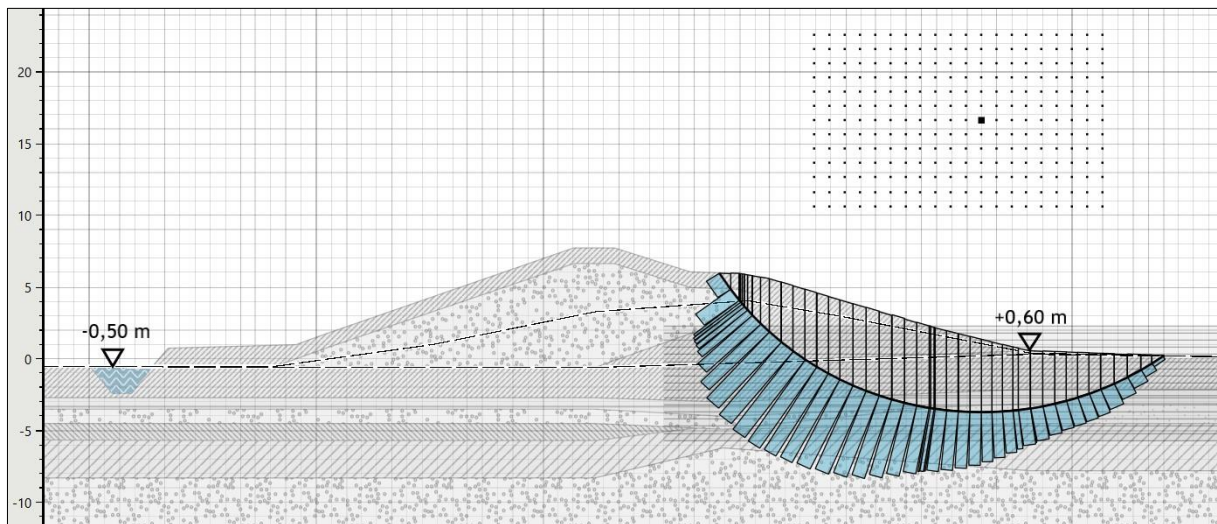
Met zeespiegelstijging:

Als de dijkprofielen worden getoetst met een zeespiegelstijging van 85 centimeter (randvoorwaarden 2), zijn er enkele profielen die niet meer aan de gestelde faalkanseis voldoen (zie bijlage 9). De profielen die niet voldoen zijn dezelfde vijf profielen als bij variant 1.

2.2.3 Macro-instabiliteit

Het voorland is verlaagd met 1,00 m. Hiermee komt de overgang tussen de dijk en het voorland op +0,60 m te liggen. De toetsing in D-Stability speelt zich af net na een maatgevende storm. Het water buitendijks is dan terug gedaald tot maaiveld niveau (+0,60 m NAP).

De toetsing geeft als resultaat een veiligheidsfactor van 0,662 en een radius van de afglijcirkel van 20,33 m. Dit betekent niet dat de dijk sowieso zal afschuiven, maar het dijkprofiel voldoet niet aan de veiligheidseis. De veiligheidsfactor van de bestaande situatie is 0,725. Er kan geconcludeerd worden dat het verlaagde voorland ervoor zorgt dat de dijk minder stevig is en er een grotere kans is op macro-instabiliteit buitenwaarts.



Figuur 18 Afschuivingsberekening variant 2

Als we de situatie toetsen, rekening houdende met de verwachte zeespiegelstijging binnen 100 jaar, zal de waterstand in het dijklichaam mee stijgen met de zeespiegel. In D-Stability is de waterstand in het dijklichaam hoger ingesteld. Als de situatie dan opnieuw wordt berekend, zijn de resultaten als volgt: veiligheidsfactor = 0,650 en een afglijradius = 20,33 m.

Conclusie:

De situatie met een verlaagd voorland heeft een lagere veiligheidsfactor. Dat wil zeggen dat de dijk sneller zal falen door macro-instabiliteit buitenwaarts dan in de bestaande situatie. Als het dijkprofiel van variant 2 wordt getoetst met een zeespiegelstijging van 85 cm, is de veiligheidsfactor kleiner en het dijklichaam gevoeliger voor afschuiving.

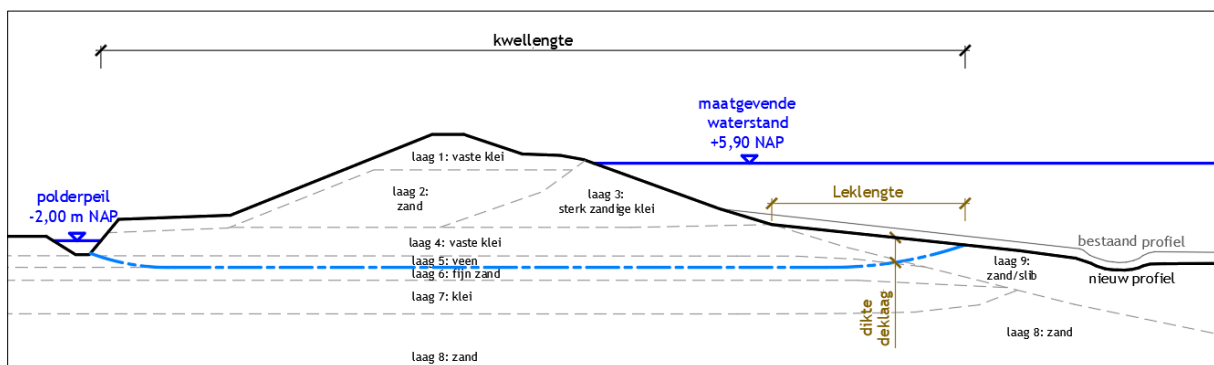
2.2.4 Piping

Voor de piping berekening van ontwerpvariant 2 verandert er slecht één factor in de formule, namelijk de dikte van de deklaag (D') (Figuur 19). Door de verlaging van het voorland is deze dikte afgenomen met 1 m tegenover het profiel van de bestaande situatie.

$$\text{Formule: } \lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

De andere factoren blijven onveranderd:

- *Doorlatendheid zandlaag (k):* piping zal nog steeds optreden in de fijne zandlaag onder het dijklichaam. De doorlatendheid van deze grond blijft onveranderd (15 m/dag).
- *Doorlatendheid deklaag (k'):* het materiaal waarmee het voorland opgehoogd zal worden moet dezelfde grondsoort zijn als het materiaal van het huidige voorland. Dit om de verstoring in de natuur te beperken (2 m/dag).
- *Dikte zandlaag (D):* De dikte van de zandlaag onder het dijklichaam blijft onveranderd (1 m).



Figuur 19 Schets doorsnede dijkprofiel Variant 2 (piping)

Berekening:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{15 \cdot 1,00 \cdot 2,20}{2}}$$

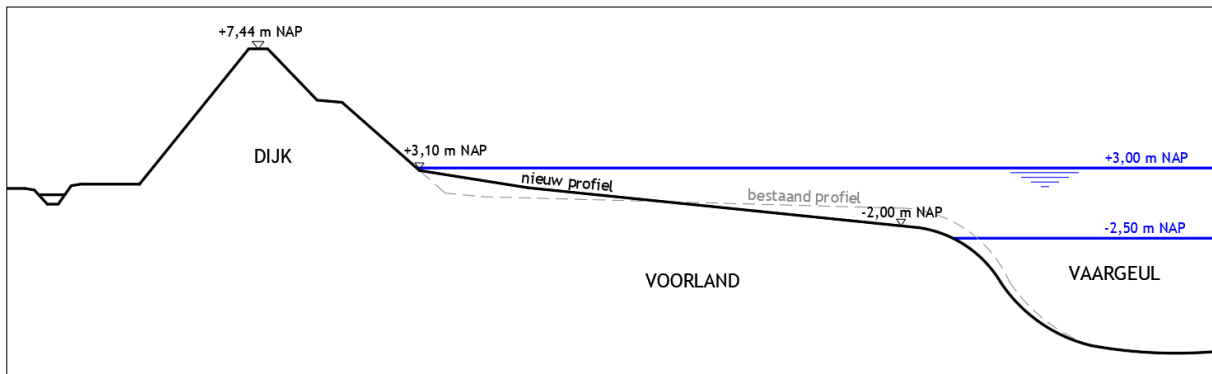
$$\lambda = 4,06 \text{ m}$$

- ➔ De leklengte van het dijkprofiel in variant 2 is 4,06 m. Dit is 0,84 m minder dan in de bestaande situatie (4,90 m). De verlaging van het voorland zorgt voor een onveiligere situatie waarbij het faalmechanisme piping sneller zal optreden dan in de bestaande situatie.

2.3 Variant 3: steiler voorland

2.3.1 Beschrijving profiel

In de derde en laatste ontwerpvariant (Figuur 20) worden de twee vorige ontwerpen gecombineerd. Aan de vaargeul is het voorland 1,00 m verlaagd. Aan de kant van de dijk is het voorland maximaal 1,50 m opgehoogd. In deze situatie komt het voorland nog steeds droog te staan tijdens eb, en stroomt het net helemaal onder water tijdens vloed.



Figuur 20 Profiel voorland, variant 3

2.3.2 GEKB

Voor de 'Grasbekleding Erosie Kruin en Binnentalud' berekeningen van de derde variant zijn de dijkprofielen twee keer getoetst. De eerste keer met standaard waarden waarmee een dijkprofiel getoetst wordt (max. overslagdebiet 10 l/m/s). De tweede keer met dezelfde waarden maar met een voorspelde zeespiegelstijging van 0,85 m binnen 100 jaar. Op deze manier kan er vastgesteld worden dat de variant van het voorland in de toekomst weerstand biedt tegen de klimaatveranderingen.

Elke berekening van elk dijkprofiel (27 dijkprofielen in totaal) geeft de volgende resultaten: faalkansberekening, overslagdebiet en HBN. Voor een verklarende uitleg over deze gegevens zie hoofdstuk 3.3.2 'Ringtoets' in het hoofdrapport. De uiterste waarden van de berekeningen zijn hieronder weergegeven. Voor alle resultaten zie bijlage 10.

Randvoorwaarden 1: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 0,1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/138.919
Kleinste faalkans	P0 33900	1/1.941.170
Grootste overslagdebiet	P0 32600	0,05 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33232 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	6,25 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33300, P0 33500, P0 34200	5,86 m

- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

In de resultaten in bijlage 10 is te zien dat P0 32349 de grootste kruinhoogte nodig heeft en P0 32400 het meeste overslag. Omdat deze dijkprofielen aan de buitenste rand van het gebied liggen, waar het voorland nauwelijks invloed op uitoefent, zijn deze niet maatgevend en dus buiten beschouwing gelaten.

Randvoorwaarden 2: Faalkanseis = 1/25.000
Maximum overslagdebiet = 10 l/m/s (standaardafwijking: 0,1 l/m/s)
Maximum kruinhoogte = 7,44 m
Met zeespiegelstijging van 0,85 m

Als er rekening wordt gehouden met de zeespiegelstijging, zijn de waterstanden en golfhoogtes in extreme condities groter. Deze waarden zijn eerst berekend voordat de GEKB berekeningen gestart konden worden. De hydraulische belastingen (volgens categorie A) met zeespiegelstijging zijn als volgt: maximum waterstand = 6,75 m, maximum golfhoogte = 2,29 m.

	Dijkprofiel	Waarde
Grootste faalkans	P0 32600	1/9.909
Kleinste faalkans	P0 33900	1/163.003
Grootste overslagdebiet	P0 32600	1,50 l/m/s
Kleinste overslagdebiet	P0 33300 - P0 33900, P0 34100 - P0 34500, P0 34700 - P0 34900	0,00 l/m/s
Hoogst benodigde kruinniveau	P0 32600	7,32 m
Laagst benodigde kruinniveau	P0 33500, P0 33600, P0 33700, P0 34200	6,71 m

- ➔ NIET alle dijkprofielen voldoen aan de gestelde faalkanseis.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag.
- ➔ Alle dijkprofielen voldoen aan de maximum kruinhoogte.

Conclusie:

Wanneer de GEKB resultaten van randvoorwaarden 1 (normale situatie zonder zeespiegelstijging) worden bekeken, is te zien dat heel het dijktraject voldoet aan de gestelde normen van de sterkte berekening, de maximum hoeveelheid overslagdebiet en HBN. Als de resultaten worden vergeleken met de resultaten van de bestaande situatie, is te zien dat variant 3 over het algemeen gunstigere resultaten heeft, enkel de faalkans is slechter.

- De grootste faalkans van de bestaande situatie (1/153.660) is kleiner dan de grootste faalkans van variant 3 (1/138.919). Dit betekent dat de dijk met het nieuwe voorland, sneller zal falen dan de dijk met het bestaande voorland.
- De grootste hoeveelheid overslag van de bestaande situatie (0,07 l/m/s) is meer dan de hoeveelheid van variant 3 (0,05 l/m/s). Er zal dus minder overslag plaatsvinden met een voorland zoals die van variant 3, dan in de bestaande situatie.
- De hoogst benodigde kruin om te voldoen aan de maximum hoeveelheid overslag is bij de bestaande situatie (6,26 m), dit is hoger dan bij variant 3 (6,25 m). De resultaten van de kruinhoogte zullen sowieso geen problemen met zich meebrengen. Aangezien de huidige dijkhoogte minstens 7,44 m hoog is, voldoen alle berekeningen ruim aan deze waarde.

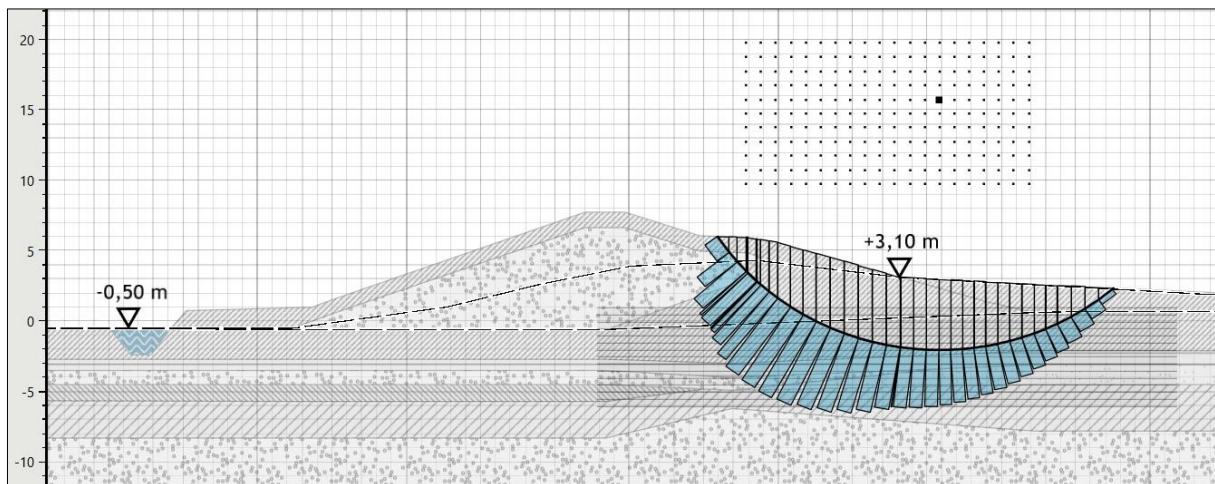
Met zeespiegelstijging:

Als de dijkprofielen getoetst worden met een zeespiegelstijging van 85 centimeter (randvoorwaarden 2), zijn er enkele profielen die niet meer aan de gestelde faalkanseis voldoen (zie bijlage 10). De profielen die niet voldoen zijn dezelfde vijf profielen als bij variant 1 en 2.

2.3.3 Macro-instabiliteit

Het voorland nabij de dijk is verhoogd met 1,50 m. Hiermee komt de overgang tussen de dijk en het voorland op +3,10 m te liggen. De toetsing in D-Stability speelt zich af net na een maatgevende storm. Het water buitendijks is dan terug gedaald tot maaiveld niveau (+3,10 m NAP).

De toetsing geeft als resultaat een veiligheidsfactor van 0,941 en een radius van de afglijcirkel van 17,83 m. Dit wil zeggen dat het dijklichaam niet zal afschuiven. De veiligheidsfactor van de bestaande situatie is 0,725. Het steilere voorland dat is opgehoogd aan de dijk heeft een grotere veiligheidsfactor en zorgt voor extra steun tegen macro-instabiliteit.



Figuur 21 Afschuivingsberekening variant 3

Als we de situatie toetsen, rekening houdende met de verwachte zeespiegelstijging binnen 100 jaar, zal de waterstand in het dijklichaam mee stijgen met de zeespiegel. In D-Stability is de waterstand in het dijklichaam hoger ingesteld. Als de situatie dan opnieuw wordt berekend, zijn de resultaten als volgt: veiligheidsfactor = 0,927 en een afglijradius = 16,83 m.

Conclusie:

De situatie met een verhoogd voorland heeft een hogere veiligheidsfactor. Dat wil zeggen dat de dijk minder snel zal falen door macro-instabiliteit buitenwaarts dan in de bestaande situatie. Als het dijkprofiel van variant 3 wordt getoetst met een zeespiegelstijging van 85 cm, is de veiligheidsfactor kleiner en het dijklichaam gevoeliger voor afschuiving.

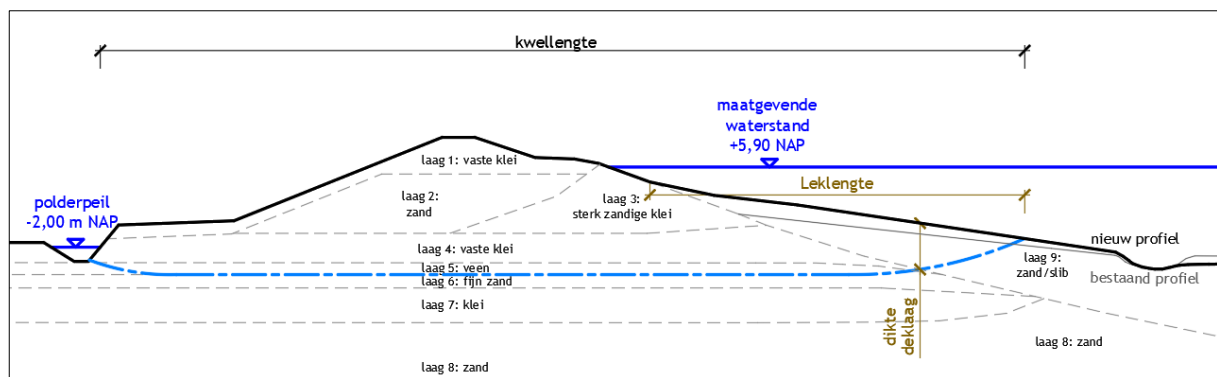
2.3.4 Piping

Voor de piping berekening van ontwerpvariant 3 verandert er slecht één factor in de formule, namelijk de dikte van de deklaag (D') (Figuur 22). Door de verhoging van het voorland nabij de dijk is dezelfde als bij de eerste ontwerpvariant, de dikte is toegenomen met 1,50 m.

$$\text{Formule: } \lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

De andere factoren blijven onveranderd:

- *Doorlatendheid zandlaag (k):* piping zal nog steeds optreden in de fijne zandlaag onder het dijklichaam. De doorlatendheid van deze grond blijft onveranderd (15 m/dag).
- *Doorlatendheid deklaag (k'):* het materiaal waarmee het voorland opgehoogd zal worden moet dezelfde grondsoort zijn als het materiaal van het huidige voorland. Dit om de verstoring in de natuur te beperken (2 m/dag).
- *Dikte zandlaag (D):* De dikte van de zandlaag onder het dijklichaam blijft onveranderd (1 m).



Figuur 22 Schets doorsnede dijkprofiel Variant 3 (piping)

Berekening:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot D'}{k'}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{15 \cdot 1,00 \cdot 4,70}{2}}$$

$$\lambda = 5,94 \text{ m}$$

- ➔ De lekengte van het dijkprofiel in variant 3 is 5,94 m. Dit is 1,04 m meer dan in de bestaande situatie (4,90 m). De gedeeltelijke ophoging van het voorland zorgt voor een veiligere situatie waarbij het faalmechanisme piping minder snel zal optreden dan in de bestaande situatie.

2.4 Overzicht resultaten

Om een duidelijk overzicht te krijgen van alle verschillende berekeningen, zijn alle resultaten die berekend zijn in algemene condities weergegeven in Tabel 3. De resultaten van de berekeningen van de ontwerpvarianten met zeespiegelstijging staan in Tabel 4. Op deze manier is duidelijk te zien welke varianten beter of slechter scoren in vergelijking met de bestaande situatie.

Tabel 3 Overzicht resultaten (algemene condities)

	bestaande situatie	variant 1	variant 2	variant 3
GEKB				
- grootste faalkans	1/153.660	1/160.661	1/152.680	1/138.919
- kleinste faalkans	1/1.939.988	1/1.941.269	1/1.940.480	1/1.941.170
- grootste overslagdebiet	0,07 l/m/s	0,02 l/m/s	0,09 l/m/s	0,05 l/m/s
- kleinste overslagdebiet	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s
- hoogste kruin	6,26 m	6,20 m	6,27 m	6,25 m
- laagste kruin	5,86 m	5,86 m	5,86 m	5,86 m
Macro-instabiliteit (D-Stability)				
- veiligheidsfactor	0,725	1,016	0,662	0,941
Piping				
- leklengte	4,90 m	5,94 m	4,06 m	5,94 m

Tabel 4 Overzicht resultaten (met zeespiegelstijging)

	variant 1	variant 2	variant 3
GEKB			
- grootste faalkans	1/10.389	1/9.674	1/9.909
- kleinste faalkans	1/163.011	1/162.862	1/163.003
- grootste overslagdebiet	1,24 l/m/s	1,85 l/m/s	1,50 l/m/s
- kleinste overslagdebiet	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s	0,00 l/m/s
- hoogste kruin	7,31 m	7,35 m	7,32 m
- laagste kruin	6,71 m	6,71 m	6,71 m
Macro-instabiliteit (D-Stability)			
- veiligheidsfactor	0,995	0,650	0,927

Conclusie

Uit de resultaten van de varianten toetsingen is af te leiden dat de vorm van het voorland effectief een invloed heeft op de functies van het voorland die een invloed uitoefenen op de faalmechanismen van de dijk (beschreven in het hoofdrapport Hoofdstuk 2.5). De GEKB berekeningen laten zien dat de hoeveelheid golfoverslag verandert naarmate het voorland stijgt of daalt. Door middel van de macro-instabiliteit berekeningen is te zien dat het voorland functioneert al steunberm. Tot slot geven de resultaten van de piping berekening weer dat de hoogte van het voorland een invloed heeft op de leklengte. De uitslag van de uitgevoerde berekeningen worden in bijlage 2, 'Variantenstudie' verder behandeld.

Invloed van het voorland op de dijk aan de Biezelingse Ham

Bijlage 2: Variantenstudie

Inhoudsopgave variantenstudie

1 Inleiding	2
2 Ontwerpvarianten	3
3 Beoordelingscriteria	4
Waterveiligheid.....	4
Natuurimpact	4
Kosten.....	5
Levensduur	5
Weerstand tegen klimaatverandering	5
4 Resultaat Multicriteria-analyse	6
Waterveiligheid.....	6
Natuurimpact	7
Kosten.....	7
Levensduur	8
Weerstand tegen klimaatverandering	8
4.1 Conclusie	9

1 Inleiding

Om een antwoord te kunnen vormen op deelvraag c: “In welke vorm heeft het voorland de meest gunstige invloed op de dijk?”, moeten de resultaten die verkregen zijn in bijlage 1 verwerkt worden in een variantenstudie. Op deze manier worden de resultaten met elkaar vergeleken. Uiteindelijk zal één variant als beste ontwerp uit de variantenstudie komen.

De variantenstudie voor het ontwerp van het voorland aan de Biezelingse Ham wordt uitgevoerd met behulp van een MCA. Een MCA (Multicriteria-analyse) is een evaluatiemethode die wordt gebruikt voor het afwegen van verschillende varianten waarna een voorkeursvariant uitkomt. Het afwegen van de varianten gebeurt op basis van gekozen beoordelingscriteria. Deze criteria krijgen een bepaalde score van 1 tot 5 (Tabel 1) afhankelijk van de relevantie op het ontwerp. Als een variant een score krijgt van 1, dan heeft deze een heel negatieve invloed. Krijgt een variant een score van 5, dan heeft deze de meest positieve invloed. De score wordt doorgerekend afhankelijk van de weging die op het criterium wordt gesteld. De weging geeft aan hoe belangrijk het criterium is in vergelijking met de andere criteria.

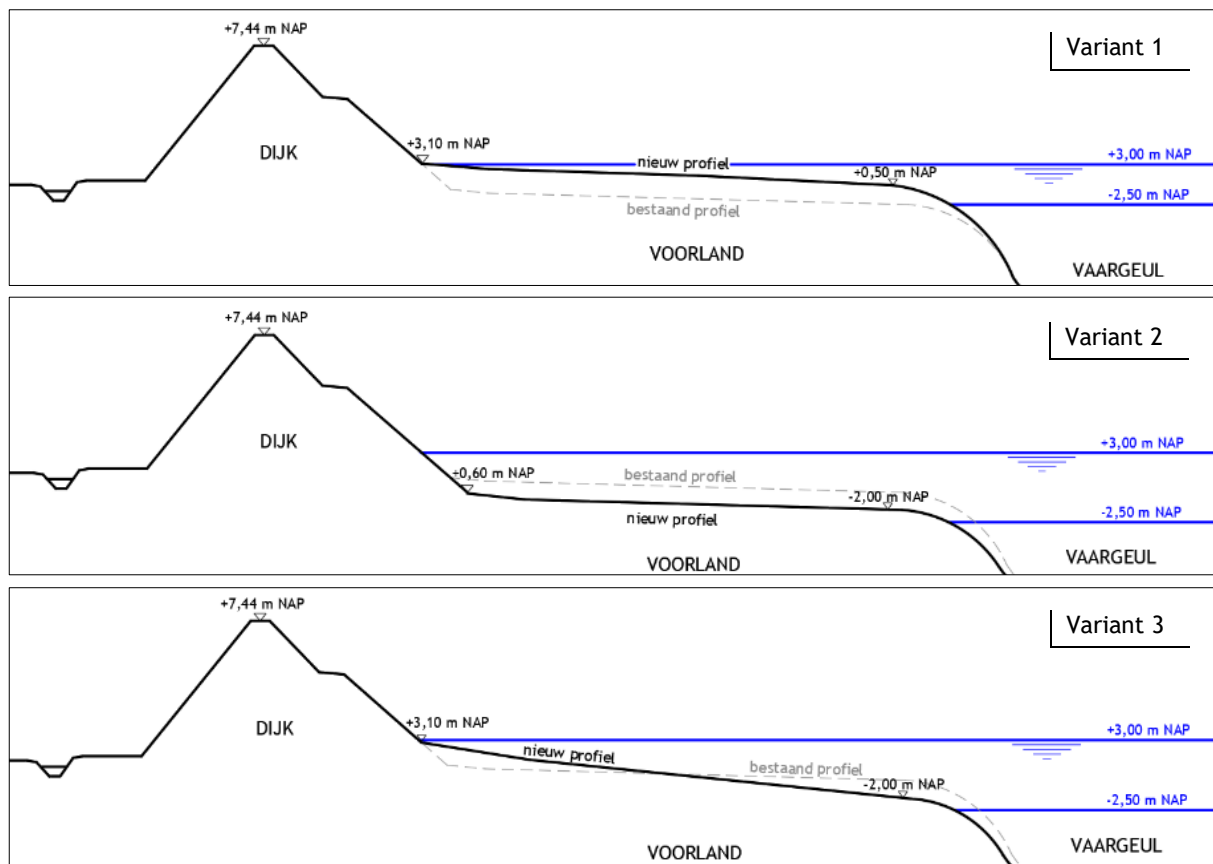
Tabel 1 Beoordelingsschaal

zeer negatieve invloed / gevolgen	negatieve invloed / gevolgen	neutraal	positieve invloed / gevolgen	zeer positieve invloed / gevolgen
1	2	3	4	5

2 Ontwerpvarianten

Er zijn drie verschillende varianten ontworpen van het voorland van de Biezelingse Ham. Deze varianten zijn apart getoetst op hun faalmechanismen in bijlage 1. Afhankelijk van de resultaten zal één ontwerp als beste uit de MCA komen. De verschillende ontwerpen worden hieronder kort toegelicht en zijn weergegeven in Figuur 1.

- *Variant 1: verhoogd.* Bij deze variant is ongeveer heel het voorland opgehoogd met 1,5 m. Hierdoor komt het grootste gedeelte van het voorland minder lang onder water te staan. Het verhoogd voorland zorgt voor kalmere watercondities in het gebied.
- *Variant 2: verlaagd.* Het voorland van variant 2 is verlaagd met gemiddeld 1,0 m. Het gebied staat voor een lagere tijd per dag onder water.
- *Variant 3: steiler.* Bij de derde variant is het profiel van het voorland steiler. Het niveau van het voorland nabij de vaargeul is verlaagd met gemiddeld 1,0 m. Het niveau bij de dijk is opgehoogd met gemiddeld 1,5 m.



Figuur 1 Doorsneden ontwerpvarianten

3 Beoordelingscriteria

Voordat de MCA kan worden ingevuld, moeten verschillende beoordelingscriteria worden opgesteld. Deze criteria zorgen ervoor dat de ontwerpvarianten worden beoordeeld, rekening houdend met de belangrijkste aspecten. In Tabel 2 staan alle beoordelingscriteria. Verder in dit hoofdstuk wordt er per criterium toegelicht waarom deze zijn gekozen en waarom ze hun bepaalde weging hebben gekregen.

Tabel 2 Beoordelingscriteria en weging

Criteria	Weging
Waterveiligheid	40%
- Piping (12,5%)	
- Macro-instabiliteit (12,5%)	
- GEKB (15%)	
Natuurimpact	20%
Kosten	12,5%
Levensduur	12,5%
Klimaatverandering	15%
Totaal:	100%

Waterveiligheid

Een dijktraject moet volgens de waterwet aan een bepaalde norm voldoen. In dit geval, een signaleringswaarde van 1/3000. Dit beschrijft met andere woorden de veiligheid die de dijk biedt voor het achterland. Door deze norm die behaald moet worden, krijgt ‘waterveiligheid’ de zwaarste weging in de MCA (40%).

Het criterium waterveiligheid wordt onderverdeeld in de verschillende faalmechanismen waaraan de dijk kan bezwijken. Dit zijn piping, macro-instabiliteit buitenwaarts en GEKB. Deze zijn per ontwerpvariant apart getoetst in hoofdstuk 2 van bijlage 1. Op basis van de resultaten krijgen de varianten hun score. De kans dat de volledige dijk bezwijkt aan piping en macro-instabiliteit is niet zo groot. Wanneer deze faalmechanismen voorkomen, is er nog tijd om in te grijpen. Bij GEKB is dat minder het geval. Dit is golfoverslag dat optreedt tijdens een maximale waterstand. In deze situatie is de kans op succesvol ingrijpen het kleinst. Om deze reden zal GEKB harder doorwegen dan de andere twee faalmechanismen (zie Tabel 2).

Natuurimpact

Aangezien het voorland van de Biezelingse Ham een Natura 2000-gebied is, mag het nieuw ontwerp van het voorland geen grote impact hebben op de natuur. De Biezelingse Ham is een voedselrijk slik en daarom een leefgebied van veel dieren. Het wordt ook gebruikt als tussenstop voor trekvogels. Deze elementen moeten zoveel als mogelijk behouden blijven. Maar omdat de vorm van het voorland veranderd zal worden, zal er ongetwijfeld wel een impact zijn.

De nieuwe vorm van het voorland kan door de veranderingen in het landschap, huidige diersoorten weggagen. Bijvoorbeeld als het voorland grotendeels van de tijd onderwater staat, dan kunnen de huidige vogelsoorten er niet meer op. Anderzijds als het voorland te lang droog staat, zal heel wat voedsel voor de vogels verdwijnen. Langs de andere kant kan het nieuwe voorland ook nieuwe kansen bieden door nieuwe diersoorten aan te trekken. De ontwerpvariant die de meest positieve bijdrage levert aan het gebied, krijgt de beste score. Natuurimpact heeft dus een grote invloed op het gebied, daarom heeft dit criterium een weging van 20%.

Kosten

Het criterium 'kosten' gaat over de kosten die gemaakt worden voor de aanleg van het nieuw voorland en de kosten voor het onderhoud en het in stand houden van het voorland op korte termijn. Dit wil zeggen de kosten van het jaarlijks beheer om bijvoorbeeld de geul van het gemaal vrij te houden.

De kosten voor de ontwerpvarianten zijn gebaseerd op de hoeveelheid sediment dat moet worden aan- of afgevoerd (zie bijlage 11). Hoe groter de hoeveelheid sediment dat verplaatst moet worden, hoe hoger de kosten en omgekeerd. Dit criterium krijgt een wegingsfactor van 12,5%. De variant met de laagste kosten krijgt de beste score.

Levensduur

Met levensduur wordt bedoeld: de tijd dat de aangebrachte veranderingen in het gebied standhouden op lange termijn. Bijvoorbeeld als een ontwerp met goede waterveiligheid-eigenschappen al na 10 jaar weg erodeert en opnieuw aangelegd moet worden, is het ontwerp voor deze situatie, vrij zinloos op lange termijn. De levensduur hangt dus samen met de kosten. Hoe sneller er opnieuw moet worden ingegrepen in het gebied, hoe duurder, maar ook hoe meer verstoring voor de natuur. Het criterium levensduur krijgt een wegingsfactor van 12,5%.

Weerstand tegen klimaatverandering

De ontwerpvarianten worden getoetst op extremere condities als gevolg van de klimaatverandering. Niet alle varianten kunnen hier evengoed weerstand tegen bieden. Hoe goed de ontwerpvarianten weerstand bieden tegen de stijgende zeespiegel is berekend in hoofdstuk 2 van bijlage 1. Een variant krijgt de beste score wanneer hij de hoogste veiligheidsfactor heeft op de macro-instabiliteit toetsing. Gecombineerd met het minst aantal dijkprofielen die niet voldoen aan de eisen bij de GEKB toetsing. Omdat het belangrijk is om ook in de toekomst de veiligheid van het achterland te kunnen garanderen, krijgt dit criterium een weging van 15%.

4 Resultaat Multicriteria-analyse

In dit hoofdstuk wordt de MCA uitgevoerd. De ontwerpvarianten worden op basis van hun resultaten die verkregen zijn in bijlage 1, beoordeeld met een score van 1 tot 5. De resultaten krijgen hun beoordeling op basis van onderlinge vergelijking. Er worden scores gegeven per beoordelingscriterium voor elke variant apart. Om de scores te onderbouwen worden in dit hoofdstuk de resultaten per beoordelingscriterium besproken.

Een overzicht van de resultaten van de Multicriteria-analyse staat in Tabel 3. De varianten hebben een score per beoordelingscriterium met bijbehorende weging. De totale score van een variant is de som van de score per criterium vermenigvuldigd met de weging.

Tabel 3 Resultaten Multicriteria-analyse

beoordelingscriterium	weging	variant 1: ophoging	variant 2: verlaagd	variant 3: steiler
		score	score	score
piping	12,5%	4	2	4
macro-instabiliteit	12,5%	4	2	4
GEKB	15,0%	5	2	3
natuurimpact	20,0%	3	2	4
kosten	12,5%	2	4	3
levensduur	12,5%	3	4	2
klimaatverandering	15,0%	4	2	3
totale score:	100%	3,58	1,85	3,33

Waterveiligheid

Piping

De piping berekening heeft de lek lengte berekend voor elk ontwerp. Deze lengte is een maat voor de doordringbaarheid van de waterremmende laag op het voorland, uitgedrukt in een afstand die het water moet afleggen door de zandlaag onder de dijk die dezelfde weerstand biedt. Hoe groter de afstand, hoe veiliger. De lek lengte bij in de bestaande situatie is 4,90 m. Ontwerpvariant 1 en 3 hebben allebei een grotere lek lengte van 5,94 m. Dat betekent dat het faalmechanisme piping minder snel zal optreden bij variant 1 en 3. Daarom krijgen deze varianten een score van 4. Ontwerpvariant 2 heeft een kleinere lek lengte dan in de bestaande situatie en is dus minder veilig. Variant 2 heeft daarom een score van 2.

Macro-instabiliteit buitenwaarts

Dit beoordelingscriterium gaat over de kans dat een deel van het dijklichaam afschuift. De kans moet uiteraard zo klein mogelijk blijven. Uit de berekeningen van macro-instabiliteit is telkens een bepaalde veiligheidsfactor gekomen. Hoe hoger deze factor, hoe veiliger. Variant 1 en 3 hebben een score van 4 gekregen omdat zij de hoogste veiligheidsfactor hebben en een hogere, en dus betere factor dan in de bestaande situatie. Variant 2 heeft een score van 2 omdat de veiligheidsfactor lager is dan in de bestaande situatie.

GEKB

Voor GEKB moet er worden gekeken naar de maatgevende elementen van de toetsing. Dit zijn: grootste faalkans, grootste overslagdebiet en hoogst benodigde kruinhoogte. De eerste variant heeft een beter resultaat op alle drie de elementen. Het is dan vanzelfsprekend dat variant 1 een score van 5 krijgt. Variant 2 heeft slechtere resultaten dan de bestaande situatie, maar niet in grote mate. Daarom krijgt variant 2 een score van 2. De derde variant heeft het slechtste faalkans resultaat, maar het overslagdebiet en de kruinhoogte is beter dan in de bestaande situatie. Daarom krijgt variant 3 een neutrale score van 3.

Natuurimpact

Variant 1 scoort een neutrale score van 3 voor dit beoordelingscriterium. De hele vlakte van de Biezelingse Ham zal worden opgehoogd waardoor de natuur wordt verstoord en het een hele tijd zal duren voordat er terug voldoende leven aanwezig zal zijn in de bodem. Daarentegen heeft de ophoging ook een positieve invloed. Het gebied zal elke dag, gedurende een langere tijd droog komen te staan, waardoor vogels en andere diersoorten meer tijd hebben om hun voedsel te vinden in de slibrijke bodem.

Variant 2 krijgt een lagere score dan variant 1. Het voorland wordt afgegraven waardoor er heel wat voedselrijk slib verloren gaat. Maar omdat het gebied elke dag gedurende een langere tijd onderwater zal staan, kan het leven in het slib zich snel herstellen. Daarentegen is er ook een nadeel dat het gebied langer onder water staat, namelijk: vogels hebben minder tijd om voedsel te zoeken in het slik.

De derde variant krijgt de beste score voor het beoordelingscriterium natuurimpact. Het gebied wordt deels afgegraven en deels opgehoogd. De tijdsduur dat het gebied droog zal staan zal dus ongeveer hetzelfde zijn als in de bestaande situatie. Dit is een positief feit, omdat dit wil zeggen dat er zo weinig mogelijk verandert. Daarnaast kan het slib dat wordt afgegraven, worden gebruikt voor de ophoging elders in het gebied. Op deze manier is het nieuwe 'opgehoogde' deel onmiddellijk voorzien van leven en voedsel voor vele diersoorten. Hierdoor ondervinden de dieren die in het gebied leven weinig last van de veranderingen. Het hergebruik van het sediment is behalve een grote kostenbesparing, ook een besparing van CO₂ en stikstofmonoxide door de verminderde hoeveelheid werken die moeten worden uitgevoerd. Om deze redenen krijgt variant 3 een positieve score van 4.

Kosten

De eerste variant heeft de slechtste score voor het criterium kosten omwille van de volgende redenen. De aanleg van het voorland zal het duurste zijn in vergelijking met de andere varianten omdat er de grootste hoeveelheid sediment verwerkt moet worden. Ongeveer 813.262 m³ sediment moet worden aangevoerd en opgespoten (zie bijlage 11 voor de bepaling van deze hoeveelheid). Omdat het voorland in de huidige situatie al in evenwicht is, zal het zich altijd terug naar de oorspronkelijke vorm willen aanpassen. Daarom zal het verhoogt voorland op regelmatige basis opnieuw verhoogt moeten worden wat ook weer grote kosten met zich meebrengt. Tot slot zal het gebied rond het gemaal regelmatig vrij gemaakt moeten worden van sediment zodat het water van de achterliggende polders altijd afgevoerd kan worden. Dit zal extra kosten met zich meebrengen. In het totaal zullen de kosten bij variant 1 het grootst zijn, daarom krijgt deze een score van 2.

In grote lijnen zullen de kosten voor de aanleg van variant 2 vergelijkbaar zijn met de kosten van variant 1. Het verschil bij variant 2 is dat hier ongeveer 695.725 m³ sediment moet worden afgegraven en afgevoerd (zie bijlage 11). Het grootste verschil van de kosten zit in het beheer op langere termijn. Het gebied rond het gemaal waar het water van de polders weg moet, zal in tegenstelling tot variant 1 minder dichtslibben. Dit moet dus minder vaak onderhouden worden. Ook het beheer van heel het gebied zal niet veel kosten met zich meebrengen omdat sedimentatie van het gebied een langzaam proces is. In het totaal zullen de kosten voor variant 2 het laagst zijn in vergelijking met de andere varianten, daarom heeft deze variant een score van 4.

De aanleg van de nieuwe vorm van variant 3 zal goedkoper zijn dan bij de andere twee varianten omdat het sediment dat wordt afgegraven, hergebruikt kan worden om het gebied enkele tientallen meters verder op te hogen (zie bijlage 11 voor de hoeveelheden). Er zullen wel kosten zijn voor het beheer nabij het gemaal. Dit zal regelmatig vrijgemaakt moeten worden om de werking te kunnen blijven garanderen. Er zullen ook kosten zijn voor de instandhouding van de vorm van het voorland. Een steiler voorland is geen natuurlijke vorm. Het voorland zal dus relatief snel vervlakken. Uiteindelijk zal de aanleg van variant 3 het goedkoopst zijn, maar het beheer voor de instandhouding het duurst. Daarom krijgt deze variant een score van 3.

Levensduur

Voor het beoordelingscriterium levensduur heeft variant 1 een score van 3. Het is een ontwerp dat voldoende weerstand kan bieden in de toekomst, wat een positief argument is. Maar variant 1 is een ontwerp dat op regelmatige basis onderhouden moet worden. Zoals al eerder vermeld is het voorland in de huidige staat in evenwicht. Dat wil zeggen dat er nauwelijks sediment verdwijnt of bijkomt. Wanneer er gemiddeld 1,5 meter sediment bijkomt, zal het relatief snel eroderen omdat het voorland altijd terug naar zijn oorspronkelijke staat wil. Het gebied zal vaak moeten worden opgehoogd. Samengevat: het ontwerp biedt bescherming voor de toekomst, maar tegen een hoge prijs, daarom heeft variant 1 een neutrale score van 3.

Variant 2 heeft de beste score bij het beoordelingscriterium levensduur omdat de vorm van dit voorland het langst zal blijven liggen in zijn positie. Het profiel van variant 2 ligt gemiddeld een meter lager dan het huidige voorland. Het profiel zal in de loop der tijd terug in de oorspronkelijke vorm sedimenteren. Maar omdat het voorland over het algemeen relatief hoog ligt, zal die sedimentatie vrij traag gebeuren. Conclusie: de levensduur van ontwerpvariant 2 is langer dan die van variant 1 en 3. Daarom krijgt variant 2 een betere score van 4.

Het steiler profiel van variant 3 is een onnatuurlijke vorm. Hiermee wordt bedoeld dat als je de natuur zijn gang zou laten gaan, dan wordt het steil profiel al snel weer gelijk getrokken door de waterstromingen. Er zal dus meer onderhoud nodig zijn aan deze variant in vergelijking met de andere twee varianten. Daarom heeft variant 3 een lage score van 2.

Weerstand tegen klimaatverandering

De ontwerpvarianten zijn op GEKB en macro-instabiliteit getoetst, rekening houdende met een stijgende zeespiegel van 85 centimeter binnen 100 jaar. Variant 1 scoort op deze toetsingen beter dan de andere varianten. Het is dus logisch dat deze variant de beste score van de drie krijgt, namelijk 4. Er is geen score van 5 gegeven aan variant 1 omdat het resultaat van de faalkans wel beter is dan die van de andere varianten, maar nog niet voldoet aan de faalkanseis van 1/25.000.

Variant 2 heeft bij alle faalmechanismen de slechtste resultaten. Deze variant zal het minst weerstand kunnen bieden tegen klimaatveranderingen. Daarom heeft variant 2 een score van 2.

De resultaten van de derde variant liggen tussen de twee andere varianten in. Variant 3 heeft betere resultaten dan variant 2, maar slechtere resultaten dan variant 1. Daarom krijgt variant 3 een neutrale score van 3.

4.1 Conclusie

De variant die met de hoogste totaalscore uit de Multicriteria-analyse komt is variant 1 met een score van 3,58. Dit is de variant die gemiddeld genomen de meest positieve invloed heeft op alle beoordelingscriteria. Op het belangrijkste beoordelingscriterium ‘waterveiligheid’ scoort variant 1 het best. Dit is van groot belang om de veiligheid van het achterland te kunnen garanderen. Op criteria natuurimpact en kosten heeft variant 1 niet de meest positieve invloed in vergelijking met de andere varianten. Dit komt onder andere omdat heel het gebied moet worden opgehoogd, wat zorgt voor veel verstoring in de natuur. De ophoging zorgt er ook voor dat de kosten voor het onderhoud behoorlijk hoog oplopen omdat het gemaal vaak moet worden vrijgemaakt.

Ontwerpvariant 3 volgt variant 1 kort op met een totaalscore van 3,33. Het grootste verschil tussen de twee varianten zijn de criteria waar variant 1 niet goed op scoort, namelijk natuurimpact en kosten. Natuurimpact heeft een hogere score omdat het creëren van het steile profiel van variant 3 minder verstoring veroorzaakt in de natuur. De kosten van variant 3 zijn lager omdat er sediment kan worden hergebruikt en er een kleinere hoeveelheid sediment moet worden aangevoerd voor de totale ophoging (zie bijlage 11 voor de hoeveelheden).

Ontwerpvariant 2, het verlaagde voorland, heeft de slechtste totaalscore in de MCA, namelijk 1,85. Op bijna alle beoordelingscriteria heeft variant 2 de meest negatieve invloed. Enkel op de criteria kosten en levensduur scoort variant 2 het best. Maar dit criteria zijn met een lage wegingsfactor en hebben dus geen grote invloed op de totaalscore.

Variant 1 ‘verhoogd voorland’ komt als beste variant uit de Multicriteria-analyse. Deze ontwerpvariant wordt in een volgend hoofdstuk verder in detail uitgewerkt en gespecificeerd.

Invloed van het voorland op de dijk aan de Biezelingse Ham

Bijlage 3: Aanbevelingen definitief ontwerp

Inhoudsopgave aanbevelingen definitief ontwerp

1	Ontwerp	2
1.1	Gecombineerd ontwerp.....	2
2	Uitvoering	3
2.1	Sedimentkeuze.....	3
2.2	Uitvoeringsperiode	4
2.3	Stroomgeul	4
3	Drempel uit breuksteen.....	5
3.1	Functie	5
3.2	Materiaal breuksteen	5
3.3	Ligging	6
4	Voorland als klimaatbuffer	7
4.1	CO ₂ -reductie	7
4.2	Werking	7
5	Toepassing van dit onderzoek.....	8
6	Bibliografie	9

1 Ontwerp

Dankzij de uitgevoerde variantenstudie is er bepaald welke vorm van het voorland van de Biezelingse Ham de meest gunstige invloed heeft op de achterliggende dijk. Maar om een duidelijk antwoord te formuleren op de hoofdvraag van dit onderzoek (*Hoe kan het ontwerp van het voorland van de Biezelingse Ham geoptimaliseerd worden om de kans op voorkomen van de faalmechanismen van de achterliggende dijk zo veel mogelijk te reduceren?*), is ontwerpvariant 1 nog niet gedetailleerd genoeg. Daarom worden de belangrijkste elementen van het ontwerp verder uitgewerkt.

1.1 Gecombineerd ontwerp

Omdat de totaalscore van variant 3 (3,33) redelijk dicht ligt bij de winnende variant 1 (3,58), zullen de ontwerpen van deze varianten worden gecombineerd. Ontwerpvariant 1 scoort door zijn positieve toetsingsresultaten vooral goed op het criterium 'waterveiligheid' en minder goed op criteria 'kosten' en 'natuurimpact'. Terwijl variant 3 net positieve gevolgen heeft op criteria 'kosten' en 'natuurimpact'. Als de sterke eigenschappen van de varianten worden gecombineerd, levert dit alleen maar voordelen op. De voordelen van variant 1 en 3 worden opgesomd:

Voordelen variant 1 - verhoogd voorland:

- Een goede waterveiligheid door de ophoging van het voorland nabij het dijkprofiel (de toetsingsresultaten van de faalmechanismen (hoofdstuk 2.1 in bijlage 1) geven weer dat de veiligheid het best gegarandeerd kan worden bij variant 1).
- Het verhoogde voorland biedt de beste bescherming tegen de verwachte zeespiegelstijging.

Voordelen variant 3 - steiler voorland:

- Omdat er sediment kan worden hergebruikt waardoor het gebied zich snel kan herstellen, heeft deze variant de kleinste natuurimpact in het gebied.
- De kosten voor de aanleg van het voorland zijn het laagst bij variant 3 omdat er sediment wordt hergebruikt.
- De vaargeul van de Westerschelde zal minder snel sedimenteren dan bij variant 1, omdat er nabij de vaargeul enkel wordt afgegraven en niet wordt gesuppleerd.

Om deze voordelen met elkaar te combineren is er een nieuw ontwerp van het voorland van de Biezelingse Ham gemaakt (zie bijlage 12, Overzichtstekening). Het ontwerp lijkt sterk op dat van variant 3. Het verschil is dat er een kleinere oppervlakte wordt afgegraven en een groter oppervlakte wordt opgehoogd om zo de veiligheidsvoordelen van variant 1 ook toe te passen.

Totaal volume afgraving:

$$1,00 \text{ m} * 81.074 \text{ m}^2 = 81.074 \text{ m}^3$$

$$0,50 \text{ m} * 80.310 \text{ m}^2 = 40.155 \text{ m}^3$$

$$\text{Totaal} = 121.229 \text{ m}^3$$

→ hoeveelheid af te graven sediment

Totaal volume ophoging:

$$0,75 \text{ m} * 97.923 \text{ m}^2 = 73.442 \text{ m}^3$$

$$1,50 \text{ m} * 338.586 \text{ m}^2 = 507.879 \text{ m}^3$$

$$\text{Totaal} = 581.321 \text{ m}^3$$

→ hoeveelheid sediment voor ophoging

Het sediment dat wordt afgegraven aan de voorzijde van het voorland kan worden hergebruikt voor de ophogingen die moeten worden uitgevoerd. Hierdoor moet een kleinere hoeveelheid sediment worden aangevoerd voor de totale ophoging (om het volledige voorland op te hogen met 1,50 m is $1.040.000 \text{ m}^3$ nodig, voor het gecombineerd profiel slechts 460.092 m^3). Naast de ophoging en afgraving is er ook een gebied van het voorland waar niets mee wordt gedaan. Dit gebied blijft op het zelfde niveau, om de overgang te maken tussen de afgraving en de ophoging. Het gebied dat op het huidige niveau blijft is 95.445 m^2 groot.

2 Uitvoering

2.1 Sedimentkeuze

Voor de ophoging die moet worden uitgevoerd op het voorland van de Biezelingse Ham, moet nog 460.100 m³ extra sediment worden aangevoerd. Het sediment dat wordt afgegraven in het gebied kan worden hergebruikt voor de ophoging, maar die hoeveelheid is niet voldoende. Omdat het voorland van de Biezelingse Ham een Natura 2000-gebied is, is het belangrijk om een goede keuze te maken voor het soort sediment dat wordt gebruikt voor de ophoging.

Door de sterke stromingen in de Westerschelde vindt er veel zandtransport plaats tussen verschillende gebieden in het estuarium. Deze wijzigingen in de sedimentvoorraad worden vastgelegd in de sedimentbalans van de Westerschelde die jaarlijks wordt opgesteld. Het zand dat wordt getransporteerd is vaak afkomstig van hoger gelegen gebieden waarna het neerslaat in lagere delen zoals vaargeulen. Omdat de Westerschelde een belangrijke verbinding is voor de haven van Antwerpen moeten de vaargeulen op regelmatige basis worden gebaggerd. Bijna elke dag wordt er sediment uit de vaargeulen gehaald zodat de grootste schepen de haven van Antwerpen kunnen bereiken, onafhankelijk of het hoog- of laagwater is. Elk jaar wordt er tussen de 9 en 10 miljoen kubieke meter sediment gebaggerd in de Westerschelde. Deze baggerspecie wordt op zorgvuldig uitgekozen stortplaatsen weer gestort. Dit kan in diepere delen van de hoofdvaargeul en op de randen van bestaande zandplaten. Een huidig probleem waar de baggerbedrijven en de Nederlandse en Vlaamse overheden momenteel mee te maken hebben, is dat er meer stortplekken nodig zijn. Op de huidige stortlocaties moet men soms te lang wachten totdat het water de specie over de Westerschelde heeft verspreid voordat er nieuwe kan worden gestort.

De baggerspecie dat afkomstig is uit de Westerschelde kan, onder bepaalde voorwaarden, worden gebruikt voor de suppletie die nodig is voor het voorland van de Biezelingse Ham. Deze voorwaarden houden in dat het sedimenttype nagenoeg dezelfde eigenschappen moet hebben als het huidige sediment. Zodat de natuur zich zo snel mogelijk kan herstellen. De eigenschappen van het sediment van de Biezelingse Ham zijn als volgt:

- Korrelgrootte: < 75 µm (mediaan van totale sediment)
- Veldtypering: slib / zeer fijn en fijn zand

Voordelen

Het hergebruik van de baggerspecie uit de Westerschelde heeft verschillende voordelen op vlak van kosten en duurzaamheid. Omdat de winlocatie van het sediment zich in de Westerschelde bevindt, is de transportafstand van de baggerspecie nooit heel groot. Dit is voordeling voor zowel de kosten van het transport, milieubelasting en de tijdswinst in de uitvoering.

Ook met betrekking op duurzaamheid heeft het hergebruik van het sediment een positieve invloed. In het sediment van de Westerschelde bevindt zich de basis van het voedselweb van het natuurgebied van de Westerschelde. In het zand en slib leven onder andere algen, bacteriën, dierlijk plankton, larven, etc. Vis, levend van deze bodemdieren, dient als voedsel voor veel soorten vogels. Doordat het voedselrijk sediment wordt hergebruikt voor de ophoging van het voorland van de Biezelingse Ham, kan de schade aan het leven in de omgeving worden beperkt. De nieuwe ophoging zal door het voedselrijk slib snel weer verschillende vogels aantrekken.

2.2 Uitvoeringsperiode

Voor de suppletie en de afgraving van het voorland van de Biezelingse Ham zijn beperkingen opgelegd wat betreft de periode in het jaar waarin gewerkt mag worden. Deze periode is afhankelijk van de jaarlijkse vogeltrek. In de winter is het voedsel in het noorden schaars. Daarom trekken veel vogelsoorten tegen het einde van de zomer richting het zuiden. In het voorjaar, wanneer de winterperiode bijna gedaan is, komen de vogels terug om te broeden. Tijdens deze trek richting het noorden, is de Biezelingse Ham een belangrijke tussenstop voor de vogels. Naast de vele vogelsoorten dient er ook rekening gehouden te worden met het bodemleven. In verband met de zaadval van schelpdieren die door sediment stortingen vernietigd kunnen worden, mag er niet gesuppleerd worden in de maanden april in mei. De periode waarin de werken van het voorland moeten worden uitgevoerd is in de wintermaanden. In deze periode wordt de natuur zo weinig mogelijk verstoord. In de winterperiode moet wel rekening gehouden worden met de waterveiligheid. De dijk mag in het stormseizoen (oktober tot en met maart) niet worden verzwakt ten gevolgen van de werkzaamheden.

2.3 Stroomgeul

Het huidige voorland is voorzien van een stroomgeul om het water dat afkomstig is van de achterliggende polders af te voeren naar de Westerschelde. Wanneer het polderpeil te hoog staat, kan het water van de polders via het gemaal afgevoerd worden richting zee. Deze geul moet op elk moment ter beschikking blijven. Het is daarom belangrijk om bij de ophoging van het voorland de ligging van de geul aan te houden. De geul kan mee worden verhoogt met de rest van het voorland, maar moet gemiddeld lager liggen om zijn functie als afvoer van het polderwater te kunnen blijven uitvoeren.

3 Drempel uit breuksteen

3.1 Functie

Het verhogen van het voorland aan de Biezelingse ham is een ingreep met een behoorlijke omvang. Wanneer er werken zoals deze worden uitgevoerd in een natuurgebied, is het de bedoeling dat de uitgevoerde werken zo lang mogelijk stand houden. Met andere woorden: de levensduur van het nieuw voorland moet zo lang mogelijk zijn om verstoring van de natuur en grote kosten voor een heraanleg te vermijden.

Om het ontwerp van het voorland zo lang mogelijk in stand te houden moet er gekeken worden naar de oorzaak die ervoor zorgt dat het voorlandprofiel verdwijnt, namelijk erosie. Erosie zorgt ervoor dat de delen van het voorland die zijn opgehoogd, jaar na jaar terug dalen. Dit proces kan worden tegengehouden door middel van een dam of drempel van breukstenen te plaatsen op het voorland.

Voor het voorland van de Biezelingse Ham wordt er gekozen voor een drempel uit breukstenen. Een dam of drempel zijn beide waterbouwkundige constructies met eenzelfde functie. De constructies hebben als doel de oever te beschermen tegen te hoge golf- of stroombelastingen of om de waterstroming te geleiden. Een drempel is een soort dam, met het verschil dat dammen onder normale omstandigheden boven het wateroppervlak uitkomen. Een drempel kan geheel onder het wateroppervlak verdwijnen.

3.2 Materiaal breuksteen

Voor breuksteen kunnen verschillende soorten natuursteen worden gebruikt, onder andere basalt, graniet, diabaas, lavasteen, kalksteen, etc. Breuksteen heeft verschillende soorten sorteringen die worden ingedeeld volgens gewichtsklassen. De gewichtsklasse van breuksteen is afhankelijk van de watercondities waar de stenen in worden geplaatst. De breukstenen die worden toegepast in de Biezelingse Ham hebben de sortering van 40-200 kg (*Bron: Handleiding toetsing en ontwerp, Zeeweringen*). Deze sortering is bepaald aan de hand van reeds uitgevoerde projecten in Knuitershoek en Baalhoek.

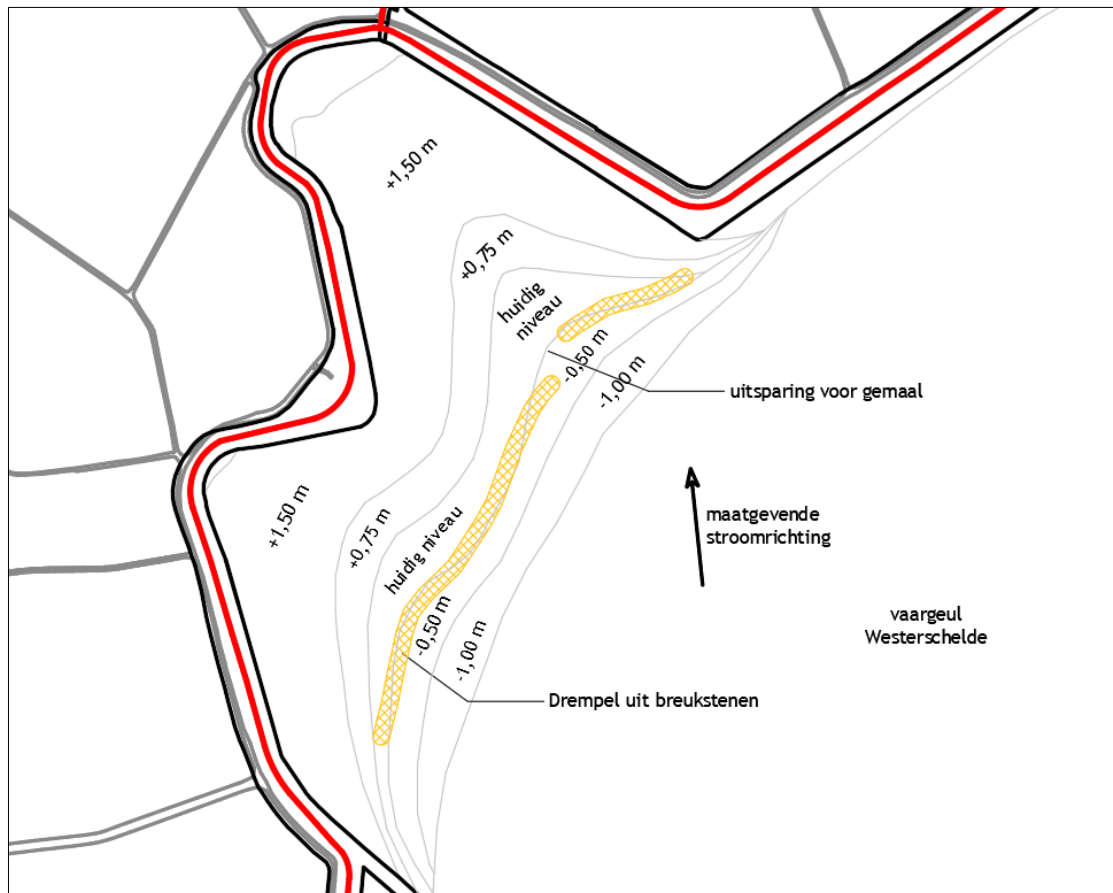


Figuur 1 Voorbeeld breukstenen

Een drempel uit breuksteen is niet enkel een ‘harde’ bouwkundige constructie, maar het levert ook een bijdrage aan de natuur. Het water tussen de breukstenen stroomt minder snel, waardoor slib bezinkt. In het slib nestelen zich allerlei beestjes die als voedsel dienen voor verschillende vogelsoorten.

3.3 Ligging

De drempelconstructie wordt parallel met de vaargeul aangelegd (zie Figuur 2). Op deze manier wordt de stroming op het voorland, die veroorzaakt wordt door het water dat afkomstig is van de Westerschelde, gereduceerd. Doordat de watercondities op het voorland kalmer zijn, zal het erosieproces van het voorland trager verlopen. Tegelijkertijd zal de vaargeul van de Westerschelde minder snel dichtslibben door het sediment dat van het voorland komt, omdat dit wordt tegengehouden door de breukstenen. Om deze laatste reden wordt de drempel geplaatst aan de rand van de zone 'huidig niveau'. Omdat er aanzanding zal plaatsvinden tegen de breukstenen, waardoor de zone errond ophooft, wordt de drempel niet geplaatst in de zone die wordt afgegraven. Anders zal het steile profiel van het voorland verdwijnen.



Figuur 2 Situatieschets breukstenen drempel

In de breukstenen drempel is een uitsparing weggelaten. Dit is bewust gedaan zodat het water dat afkomstig is van het gemaal een vrije doorgang heeft richting Westerschelde. Moest de uitsparing er niet zijn, zal de geul van de uitstroom zich verleggen, waardoor hij dichterbij het dijklichaam komt te liggen. Dit is nadelig voor de stabiliteit van het dijklichaam en het faalmechanisme piping. Aan de uiteinden van de drempel komt een hogere stroomsnelheid voor die aanzienlijke ontgroningen kan veroorzaken rondom de kop (het uiteinde) van de drempel. Deze ontgroningen zijn ongewenst omdat ze de stabiliteit van de breukstenen in gevaar brengen. Daarom kan er bij het uiteinde van de drempel een bodembescherming worden toegepast.

De plaatsing van de drempel uit breuksteen is slechts een indicatie die mogelijk toegepast kan worden op het voorland van de Biezelingse Ham. Voor een meer gespecificeerde uitwerking van de drempel uit breukstenen is uitgebreider onderzoek nodig.

4 Voorland als klimaatbuffer

4.1 CO₂-reductie

Samenwerken met de natuur wordt steeds belangrijker omdat weersomstandigheden steeds extremer worden als gevolg van de klimaatveranderingen. Al vele jaren zijn natuurbeheerders bezig met de ontwikkeling van natuurlijke klimaatbuffers. Dit zijn gebieden waarin ruimte wordt vrijgemaakt om natuurlijke processen hun gang te laten gaan. Hierdoor kunnen de gebieden meegroeien met klimaatveranderingen en kunnen ze meer water opvangen en vasthouden waardoor de hitte wordt getemperd en koolstofdioxide in de atmosfeer wordt verminderd. Het voorland van de Biezelingse Ham fungeert als een dergelijke klimaatbuffer. Niet enkel als wateropvang, maar het draagt ook bij aan CO₂-reductie door middel van koolstof op te slaan.

Werken met natuurlijke elementen is meestal goedkoper dan grote civiele werken die als bescherming dienen. Het voorland van de Biezelingse Ham zal niet enkel beter bestendig zijn tegen extremere weercondities door de verbeterde waterveiligheid. Het extra aangevoerde slib op het voorland zorgt ook voor klimaatadaptie. Slib is namelijk in staat om koolstof op te slaan. Wanneer het voorland van de Biezelingse Ham wordt opgehoogd met extra slib, wordt de capaciteit van het gebied om koolstof vast te houden vergroot.

4.2 Werking

De hoeveelheid koolstofopslag van het voorland is afhankelijk van drie factoren: netto primaire productie, input van organisch materiaal via overspoelingswater en broeikasgasemissies. Netto primaire productie bestaat uit de opslag van biomassa. Een deel hiervan sterft af en gaat naar de bodem. Het gedeelte dat achterblijft op de bodem draagt bij aan de koolstofopslag. Hiernaast wordt ook organisch koolstof dat aanwezig is in het sediment, opgeslagen. De hoeveelheid koolstof dat wordt opgeslagen moet nog gecorrigeerd worden met de natuurlijke uitstoot van broeikasgasemissies (onder andere methaan uitstoot van slikken). De netto hoeveelheid koolstofopslag is de totale hoeveelheid opslagcapaciteit waarvan de emissies worden afgetrokken.

De opslag van koolstof in een slikken gebied gebeurt ondergronds. Koolstof wordt in de vorm van CO₂ gebonden aan algen die zich in de sliblaag bevinden. Omdat er in de onderste lagen van het dichte slib vrijwel geen zuurstof zit, worden de algen nauwelijks afgebroken waardoor het broeikasgas voor een lange tijd vast zit. Omdat bomen een beperkte levensduur hebben, is dit een veel duurzamere manier van CO₂-reductie. Natuurgebieden zoals schorren en slikken kunnen gemiddeld per hectare acht keer zoveel koolstof opslaan als een hectare bos. Ook in vergelijking met veengebieden is een slikken voordeliger. Veengebieden stoten namelijk veel meer methaangas uit, een gas dat schadelijker is dan CO₂. Door de zoute omstandigheden in schorren en slikken, wordt hier nauwelijks methaan geproduceerd.

Wanneer een gebied een bijdrage wil leveren aan het ecosysteem door middel van koolstof op te slaan, moet er worden gekeken naar het gebied op lange termijn. Een toename van de koolstofopslagcapaciteit van een gebied kan enkel voorkomen wanneer een gebied ophooft. In dit geval komt er sediment (en biomassa) bij, waardoor de opslagcapaciteit vergroot. Bij een gebied dat jaar na jaar geleidelijk aan erodeert, vermindert de opslagcapaciteit en kan koolstof die in de ondergrond zit opgeslagen terug vrijkomen. Dit is een reden waarom er van het voorland van de Biezelingse Ham slechts een beperkte oppervlakte wordt afgegraven tot maximum 1,00 meter onder het maaiveld.

Naar schatting kan een gebied zoals een slik en een kwelder 700 ton koolstof per hectare opslaan. Dit is veel meer koolstof dat onttrokken wordt van de lucht dan een volgroeid bos. Het voorland van de Biezelingse Ham is ongeveer 70 hectare groot. Het gebied is in staat om 49.000 ton koolstof op te slaan.

5 Toepassing van dit onderzoek

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe dit onderzoek en de behaalde resultaten, toegepast kunnen worden in gelijkaardige gebieden. Dit gaat vooral over gebieden in de West- en Oosterschelde. Hier bevinden zich verschillende locaties waar een voorland de watercondities die tegen de dijk aankomen beïnvloedt. Het is niet enkel essentieel om de invloed die een voorland heeft te kennen om de sterkte van een dijk te berekenen. Wanneer het effect van een voorland gekend is, kan het beheer van het voorland worden aangepast, als alternatief voor traditionele dijkversterking die momenteel wordt toegepast als bescherming tegen klimaatveranderingen.

Biezelingse Ham

Het resultaat van dit onderzoek, toegepast op de Biezelingse Ham, is het profiel van het voorland steiler maken en verhogen. Hierdoor verbetert de waterveiligheid van het gebied. Bovendien wordt de last voor de natuur beperkt doordat het sediment dat wordt afgegraven, wordt hergebruikt voor de ophoging. Zo kan het bodemleven snel herstellen en verschillende vogelsoorten aantrekken.

Vereiste kenmerken

De oplossing die is toegepast bij de Biezelingse Ham kan niet zomaar overal worden gekopieerd. Een gebied (gesitueerd in de West- of Oosterschelde) moet dezelfde kenmerken hebben vooraleer een gelijkaardige oplossing kan worden toegepast. Hieronder worden deze kenmerken, die nodig zijn om dezelfde oplossing te kunnen toepassen, toegelicht.

Natuurlijk slik:

Er moet sprake zijn van een natuurlijk slik met relatief kalme watercondities. Hierin is de kans op een positief effect van het intergetijdengebied groter. Op deze manier fungeert het gebied als 'nature based solution'. Dit is het duurzaam beheren en gebruiken van de natuur om ecologische uitdagingen, zoals klimaatverandering, watervervuiling, etc., aan te pakken.

Bijdrage aan stabiliteit van de dijk:

Het voorland moet een bijdrage leveren aan de stabiliteit van de dijk. Door het voorland van de Biezelingse Ham op te hogen, komen faalmechanismen als piping, afschuiving en overslag minder snel of in mindere mate voor. Indien de intergetijdenzone geen steun biedt, zal een ophoging van het voorland ook geen extra bijdrage leveren aan het dijklichaam.

Voldoende breedte:

Het voorland moet voldoende breed zijn om efficiënt te zijn. Bij een smalle strook kan het zijn dat het effect van golfreductie of steunberm zodanig klein is dat het te verwaarlozen is.

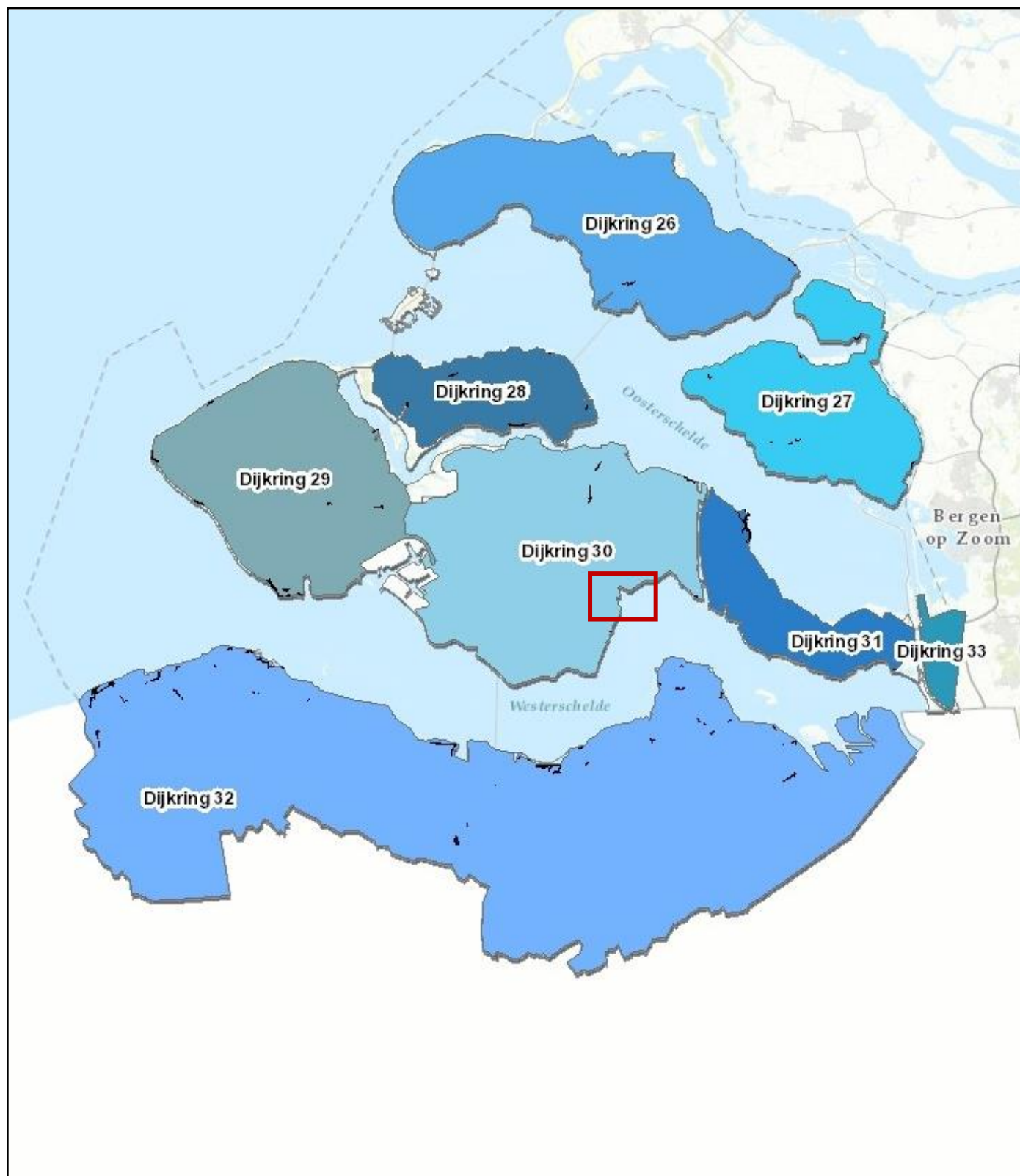
Conclusie

De bovenstaande kenmerken zijn als het ware een soort eisen waaraan een gebied moet voldoen. Het principe van een steiler en hoger voorland (zoals de Biezelingse Ham) zal waarschijnlijk vrijwel overal resulteren in een verhoogde waterveiligheid. Maar een grote factor waar rekening mee moet gehouden worden, is de natuur. Dit valt niet zomaar in een handleiding samen te vatten. Ieder gebied is uniek en heeft andere vereisten en prioriteiten, waardoor een bepaalde aanpak niet zomaar in andere gebieden is toe te passen. Er zal altijd nog specifiek onderzoek nodig zijn, wil men ervoor zorgen dat een voorland een reducerende functie heeft op de faalmechanismen van de dijk.

6 Bibliografie

-
- A. Boerema, K. v. (2018). *Ecosysteemdiensten-tool: dosis-effect relaties kwantificeren en rekenregels opstellen*. Europees fonds voor regionale ontwikkeling.
- ad zeeland. (2016, 11). Opgehaald van <https://www.ad.nl/zeeland/waar-moeten-we-heen-met-alle-baggerspecie-aeca0efd/?referrer=https://www.google.com/>
- Bosters, R. (2012). *Handleiding toetsing en ontwerp*. Zeeweringen.
- Bûtendyk, F. (2020). *Hoe een natuurgebied door massale CO2-opslag meehelpt in de strijd tegen klimaatverandering*. Opgehaald van Trouw: https://www.trouw.nl/duurzaamheid-natuur/hoe-een-natuurgebied-door-massale-co2-opslag-meehelpt-in-de-strijd-tegen-klimaatverandering-be673317/?fbclid=IwAR2NB1r1r_0qwQtVMJ9T99vriDNkOK31Fem7ZN40tFnzbdG0lwQz1DM4vrl&utm_campaign=shared_earned&utm_medium=social
- C., d. (1996). *Residuele zandtransporten in de Westerschelde*.
- CUR, S. (2000). *Breuksteen in de praktijk*. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Koolstof sink. (2020). Opgehaald van Natuurlijke klimaatbuffers: <https://www.klimaatbuffers.nl/klimaatbuffers/koolstof-sink>
- Kornman, B. (2003). *Baggeren en storten in de Westerschelde*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Onverwachte meerwaarde Schorren en Slikken in de CO2-discussie. (2020). Opgehaald van Grenspark groot Saeftinghe: <https://www.grenspark-groot-saeftinghe.eu/actueel/1562119.aspx>
- Rijkswaterstaat. (sd). *Breuksteen*. Opgehaald van Bodemrichtlijn: <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/breuksteen>
- Verachtert, R. (2019). *Natuur is een krachtig antwoord op het klimaatvraagstuk*. Opgehaald van Natuurpunt: <https://www.natuurpunt.be/nieuws/natuur-een-krachtig-antwoord-op-het-klimaatvraagstuk-20190321>
- Vroege Vogels. (2005). Opgehaald van BNNVARA: <https://www.bnnvara.nl/vroegevogels/artikelen/de-vogeltrek>

Bijlage 4 - Waterkeringen Dijkringen



Schaal:
1:400,000

Waterkeringen



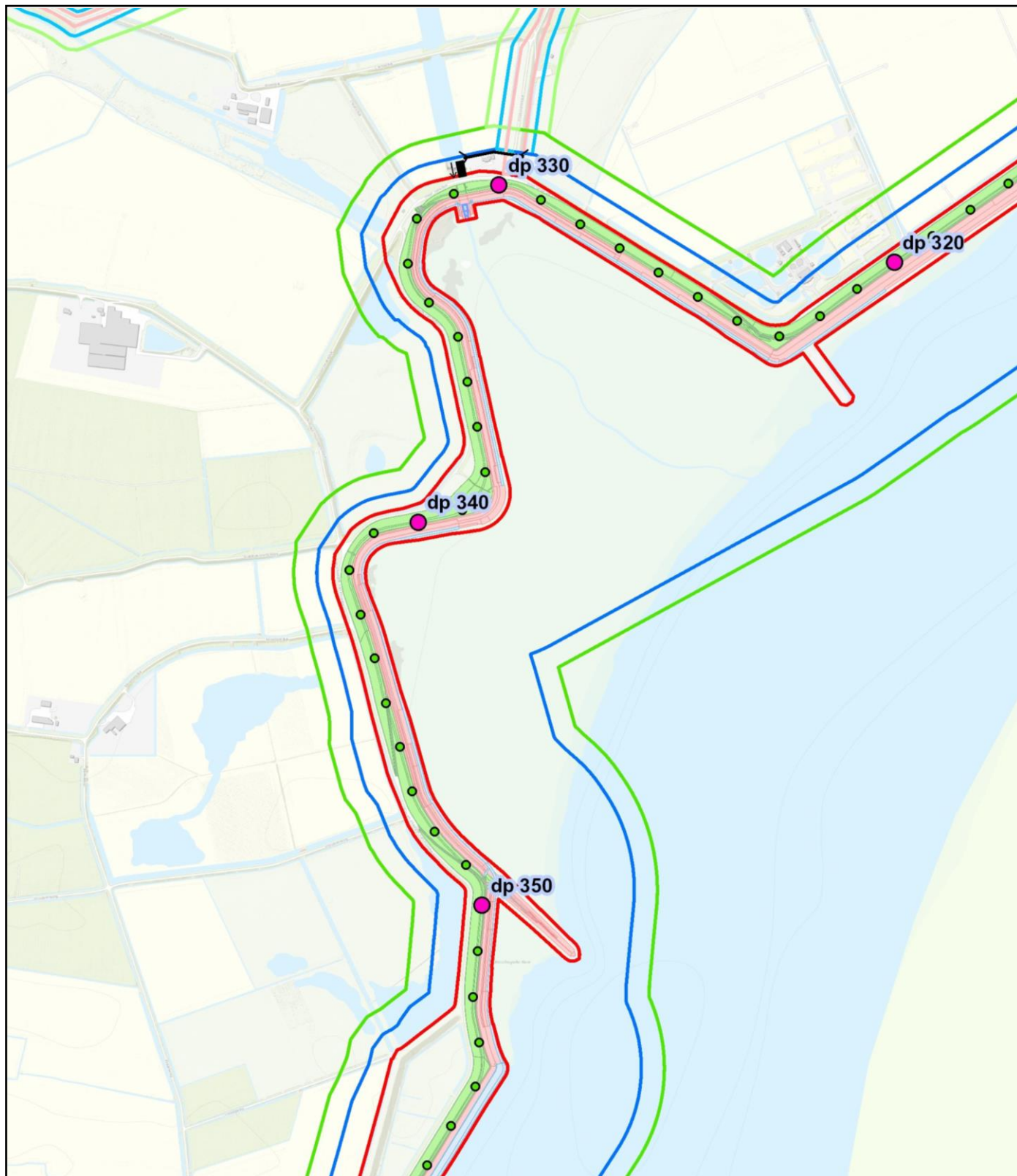
Waterschap Scheldestromen

Dijkringen

Auteur: Arne Vandepitte

Bron: GeoWeb

Bijlage 5 - Waterkeringen Zonering



Schaal:
1:12,000

Waterkeringen



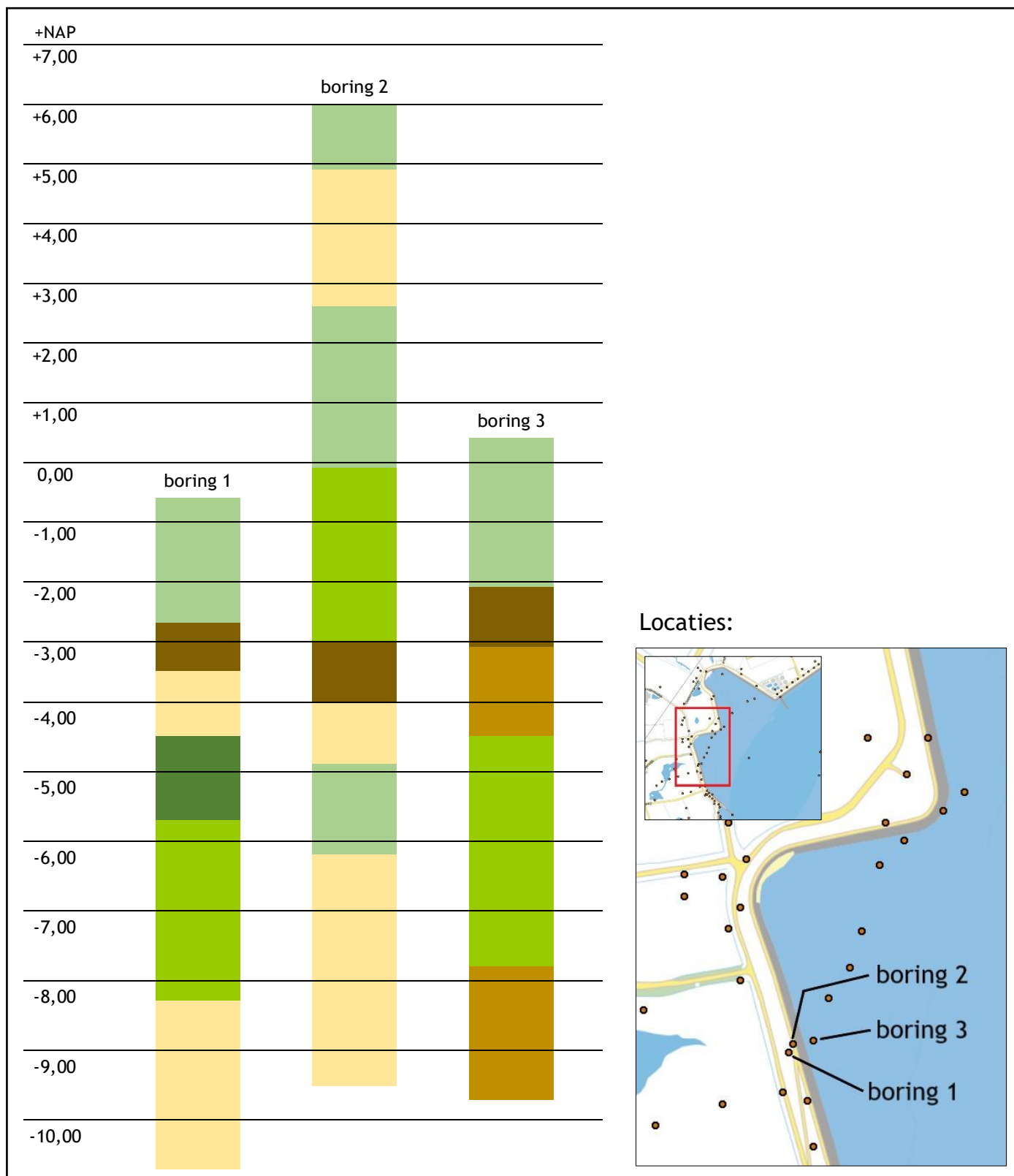
Waterschap Scheldestromen

Zonering

Auteur: Arne Vandepitte

Bron: GeoWeb

Bijlage 6 - Grondboringen



Schaal:

Grondboringen

Ondergrondgegevens

Auteur: Arne Vandepitte

Bron: DINOloket

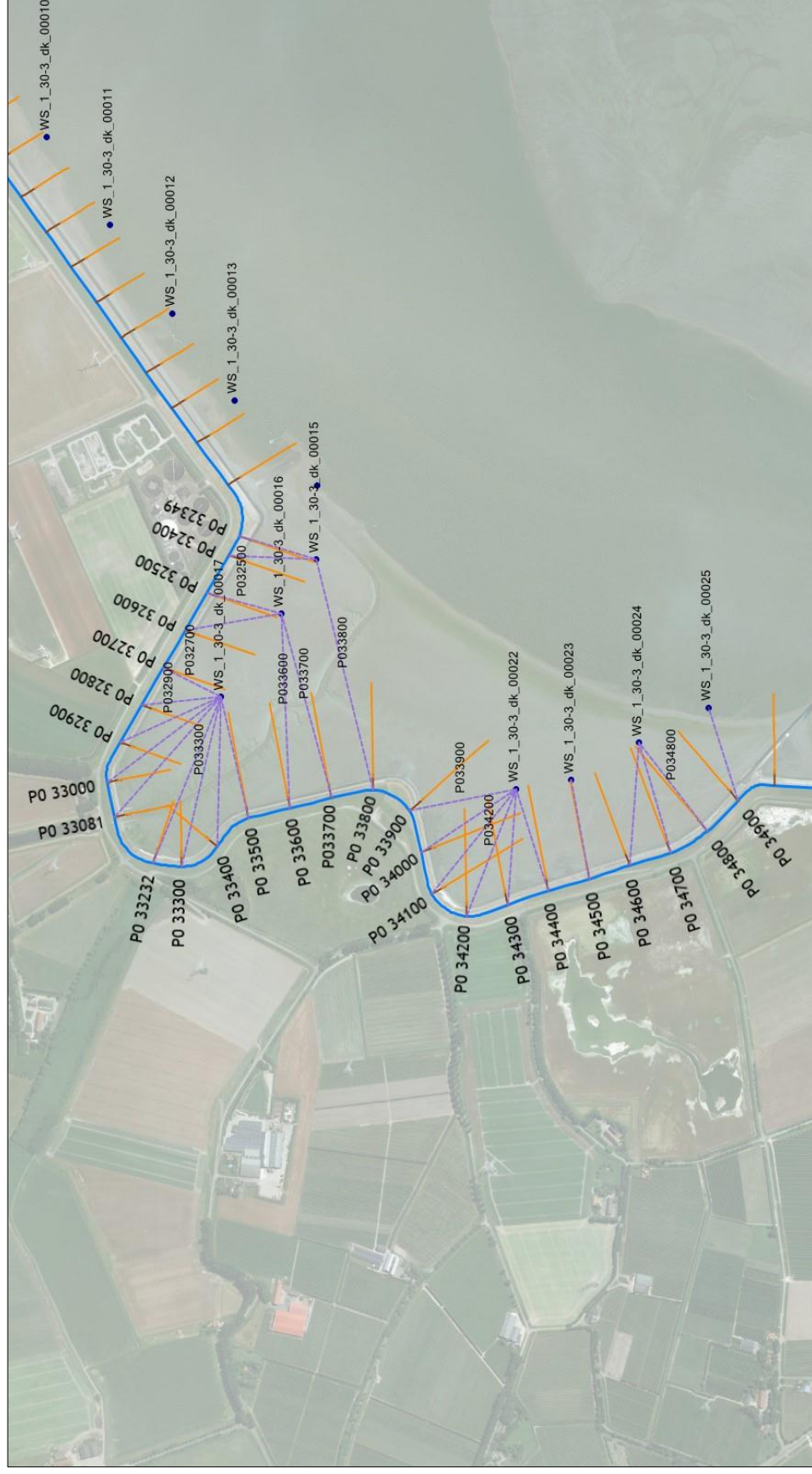
Legende:

- klei, zwak zandig, vast
- klei, organisch, matig
- Klei, sterk zandig
- Zand, schoon, matig
- Zand, sterk siltig, kleilig
- Veen, matig voorbelast



Waterschap Scheldestromen

Bijlage 7: GEKB berekeningen Bestaande Situatie (profiel overzicht)



Bijlage 7: GEKB berekeningen Bestaande Situatie (randvoorwaarden 1)

eis: 1/25.000

max: 4 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/267.678	300	1,31	0,03	240	6,43	300
P0 32400	1/188.481	300	1,26	0,06	240	6,51	300
P0 32500	1/166.607	300	1,17	0,02	240	6,44	300
P0 32600	1/92.888	300	1,13	0,07	240	6,49	300
P0 32700	1/107.616	300	1,04	0,02	240	6,34	300
P0 32800	1/148.270	300	1,07	0,01	240	6,33	300
P0 32900	1/266.055	300	1,09	0,01	240	6,32	300
P0 33000	1/605.427	270	1,64	0,01	240	6,18	240
P0 33081	1/433.890	270	1,59	0,03	240	6,17	240
P0 33232	1/627.900	300	/	0,00	240	6,01	300
P0 33300	1/830.203	300	/	0,00	210	5,87	300
P0 33400	1/360.779	330	0,82	0,00	330	5,99	330
P0 33500	1/761.002	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33600	1/829.022	300	/	0,00	180	5,88	300
P0 33700	1/782.430	300	/	0,00	180	5,88	300
P0 33800	1/1.813.313	300	/	0,00	210	5,88	300
P0 33900	1/1.854.650	300	/	0,00	240	5,96	300
P0 34000	1/1.319.096	300	/	0,00	240	6,13	270
P0 34100	1/1.328.368	300	/	0,00	240	5,99	300
P0 34200	1/1.252.170	300	/	0,00	120	5,88	300
P0 34300	1/242.336	330	1,02	0,00	120	5,91	300
P0 34400	1/340.267	300	/	0,00	120	5,91	300
P0 34500	1/1.016.800	300	/	0,00	120	5,89	300
P0 34600	1/478.548	330	1,19	0,00	120	5,99	300
P0 34700	1/647.674	330	1,16	0,00	120	6,01	330
P0 34800	1/271.799	300	1,25	0,00	120	6,06	300
P0 34900	1/1.117.077	330	1,33	0,00	120	6,04	330

kleinste faalkans	1/1.813.313	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	5,87 m
grootste faalkans	1/92.888	meeste overslag	0,07 l/m/s	hoogste kruin	6,49 m

Bijlage 7: GEKB berekeningen Bestaande Situatie (randvoorwaarden 2)

eis: 1/25.000

max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/415.902	300	1,31	0,03	240	6,32	300
P0 32400	1/292.828	300	1,28	0,06	240	6,27	300
P0 32500	1/265.580	300	1,19	0,02	240	6,23	300
P0 32600	1/153.660	300	1,16	0,07	240	6,26	300
P0 32700	1/160.301	300	1,06	0,02	240	6,17	300
P0 32800	1/222.603	300	1,09	0,01	240	6,16	300
P0 32900	1/342.854	300	1,12	0,01	240	6,16	300
P0 33000	1/827.395	300	/	0,01	240	6,14	300
P0 33081	1/595.732	300	/	0,03	240	6,01	270
P0 33232	1/672.700	300	/	0,00	240	5,93	300
P0 33300	1/864.566	300	/	0,00	210	5,86	300
P0 33400	1/445.227	330	0,84	0,00	330	5,95	300
P0 33500	1/792.737	300	/	0,00	180	5,86	300
P0 33600	1/863.290	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33700	1/814.897	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33800	1/1.887.274	300	/	0,00	210	5,87	300
P0 33900	1/1.939.988	300	/	0,00	240	5,90	300
P0 34000	1/1.527.787	300	/	0,00	240	6,03	300
P0 34100	1/1.405.440	300	/	0,00	240	5,92	300
P0 34200	1/1.304.533	300	/	0,00	120	5,86	300
P0 34300	1/282.593	300	/	0,00	120	5,89	300
P0 34400	1/381.893	300	/	0,00	120	5,89	300
P0 34500	1/1.069.898	300	/	0,00	120	5,87	300
P0 34600	1/564.701	330	1,18	0,00	120	5,95	300
P0 34700	1/796.595	330	1,23	0,00	120	5,96	300
P0 34800	1/383.186	300	1,28	0,00	120	6,03	300
P0 34900	1/1.451.229	330	1,35	0,00	120	5,99	300

kleinste faalkans	1/1.939.988	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	5,86 m
grootste faalkans	1/153.660	meeste overslag	0,07 l/m/s	hoogste kruin	6,26 m

Bijlage 7: GEKB berekeningen Bestaande Situatie (randvoorwaarden 3)

eis: 1/25.000

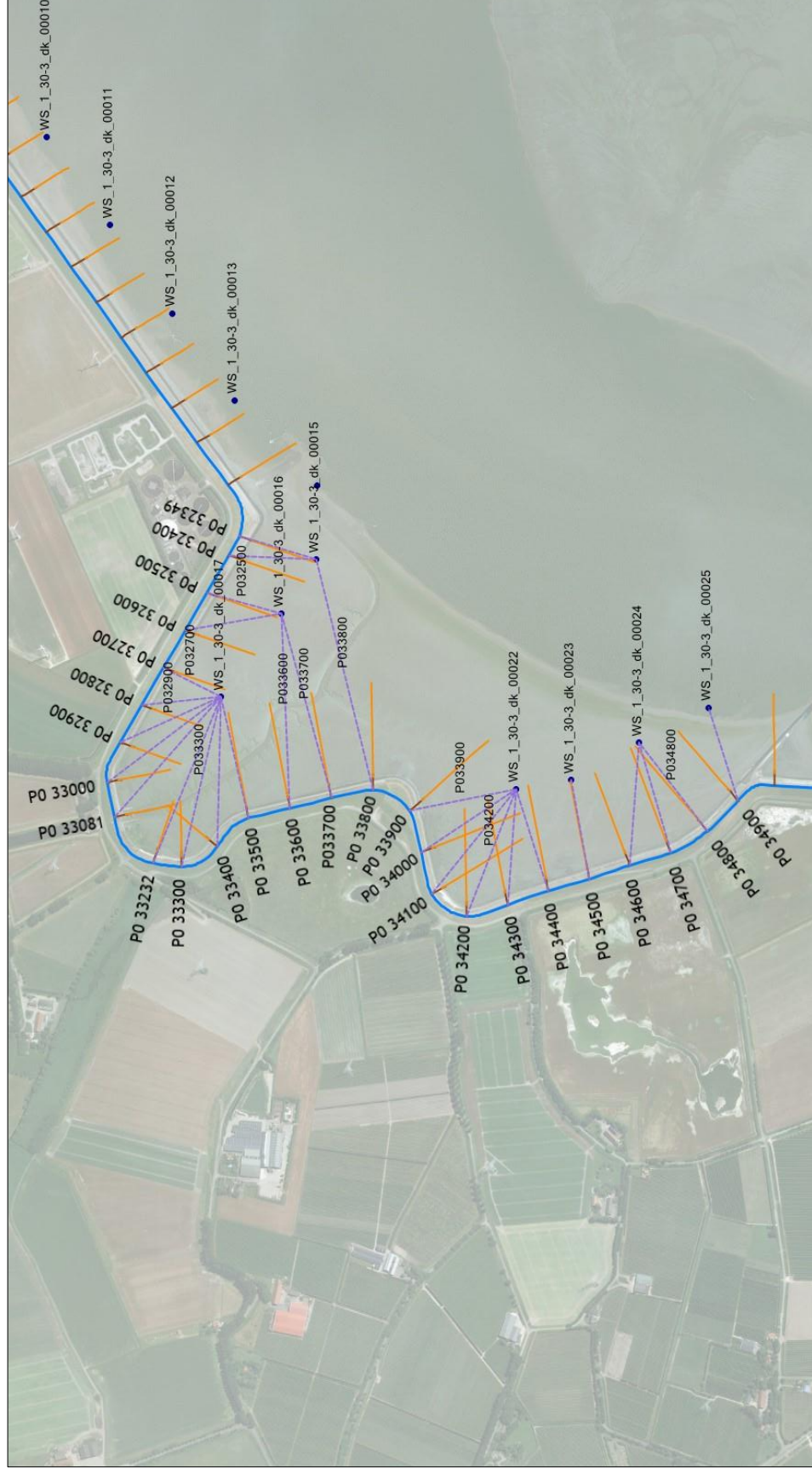
max: 100 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/1.299.001	300	1,39	0,03	240	6,07	300
P0 32400	1/892.767	300	1,38	0,06	240	6,06	300
P0 32500	1/851.400	300	1,27	0,02	240	6,03	300
P0 32600	1/494.160	300	1,23	0,07	240	6,04	300
P0 32700	1/479.722	300	1,14	0,02	240	6,00	300
P0 32800	1/661.817	300	1,18	0,01	240	5,99	300
P0 32900	1/1.018.715	300	1,22	0,01	240	6,00	300
P0 33000	1/1.575.184	300	/	0,01	240	5,84	300
P0 33081	1/1.139.798	300	/	0,03	240	5,86	300
P0 33232	1/942.394	300	/	0,00	240	5,76	300
P0 33300	1/1.189.119	300	/	0,00	210	5,75	300
P0 33400	1/855.555	300	/	0,00	330	5,80	300
P0 33500	1/1.090.810	300	/	0,00	270	5,75	300
P0 33600	1/1.186.752	300	/	0,00	270	5,75	300
P0 33700	1/1.120.524	300	/	0,00	270	5,75	300
P0 33800	1/2.582.766	300	/	0,00	210	5,76	300
P0 33900	1/2.665.601	300	/	0,00	240	5,76	300
P0 34000	1/2.403.876	300	/	0,00	240	5,81	300
P0 34100	1/1.948.476	300	/	0,00	240	5,76	300
P0 34200	1/1.791.055	300	/	0,00	120	5,75	300
P0 34300	1/447.107	300	/	0,00	120	5,77	300
P0 34400	1/589.758	300	/	0,00	120	5,77	300
P0 34500	1/1.512.421	300	/	0,00	120	5,76	300
P0 34600	1/1.066.401	300	/	0,00	120	5,80	300
P0 34700	1/1.551.649	300	/	0,00	120	5,81	300
P0 34800	1/1.053.260	300	1,38	0,00	120	5,87	300
P0 34900	1/2.947.395	330	1,43	0,00	120	5,85	300

kleinste faalkans	1/2.665.601	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	5,75 m
grootste faalkans	1/447.107	meeste overslag	0,07 l/m/s	hoogste kruin	6,04 m

Bijlage 8: GEKB berekeningen Variant 1 (profiel overzicht)



Bijlage 8: GEKB berekeningen Variant 1 (randvoorwaarden 1)

eis: 1/25.000

max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/340.412	300	1,26	0,01	240	6,32	300
P0 32400	1/271.672	300	1,27	0,01	240	6,22	300
P0 32500	1/265.009	300	1,18	0,00	240	6,19	300
P0 32600	1/160.661	300	1,15	0,02	240	6,20	300
P0 32700	1/162.906	300	1,06	0,01	240	6,15	300
P0 32800	1/224.797	300	1,09	0,00	240	6,14	300
P0 32900	1/346.922	300	1,12	0,00	240	6,13	300
P0 33000	1/845.311	300	/	0,00	240	6,11	270
P0 33081	1/604.576	300	/	0,02	240	6,01	300
P0 33232	1/675.689	300	/	0,00	240	5,89	300
P0 33300	1/864.821	300	/	0,00	210	5,86	300
P0 33400	1/445.761	330	0,83	0,00	330	5,95	300
P0 33500	1/793.010	300	/	0,00	0	5,86	300
P0 33600	1/863.545	300	/	0,00	0	5,87	300
P0 33700	1/815.177	300	/	0,00	0	5,87	300
P0 33800	1/1.887.657	300	/	0,00	210	5,87	300
P0 33900	1/1.941.269	300	/	0,00	240	5,90	300
P0 34000	1/1.492.106	300	/	0,00	240	6,03	300
P0 34100	1/1.408.827	300	/	0,00	240	5,90	300
P0 34200	1/1.304.924	300	/	0,00	0	5,86	300
P0 34300	1/268.734	300	/	0,00	0	5,89	300
P0 34400	1/377.075	300	/	0,00	0	5,89	300
P0 34500	1/1.066.665	300	/	0,00	0	5,87	300
P0 34600	1/572.318	330	1,21	0,00	0	5,95	300
P0 34700	1/787.354	330	1,20	0,00	0	5,97	300
P0 34800	1/370.009	300	1,27	0,00	330	6,03	300
P0 34900	1/1.457.216	330	1,34	0,00	120	5,99	300

kleinste faalkans	1/1.941.269	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	5,86 m
grootste faalkans	1/160.661	meeste overslag	0,02 l/m/s	hoogste kruin	6,20 m

Bijlage 8: GEKB berekeningen Variant 1 (randvoorwaarden 2, met zeespiegelstijging)

eis: 1/25.000

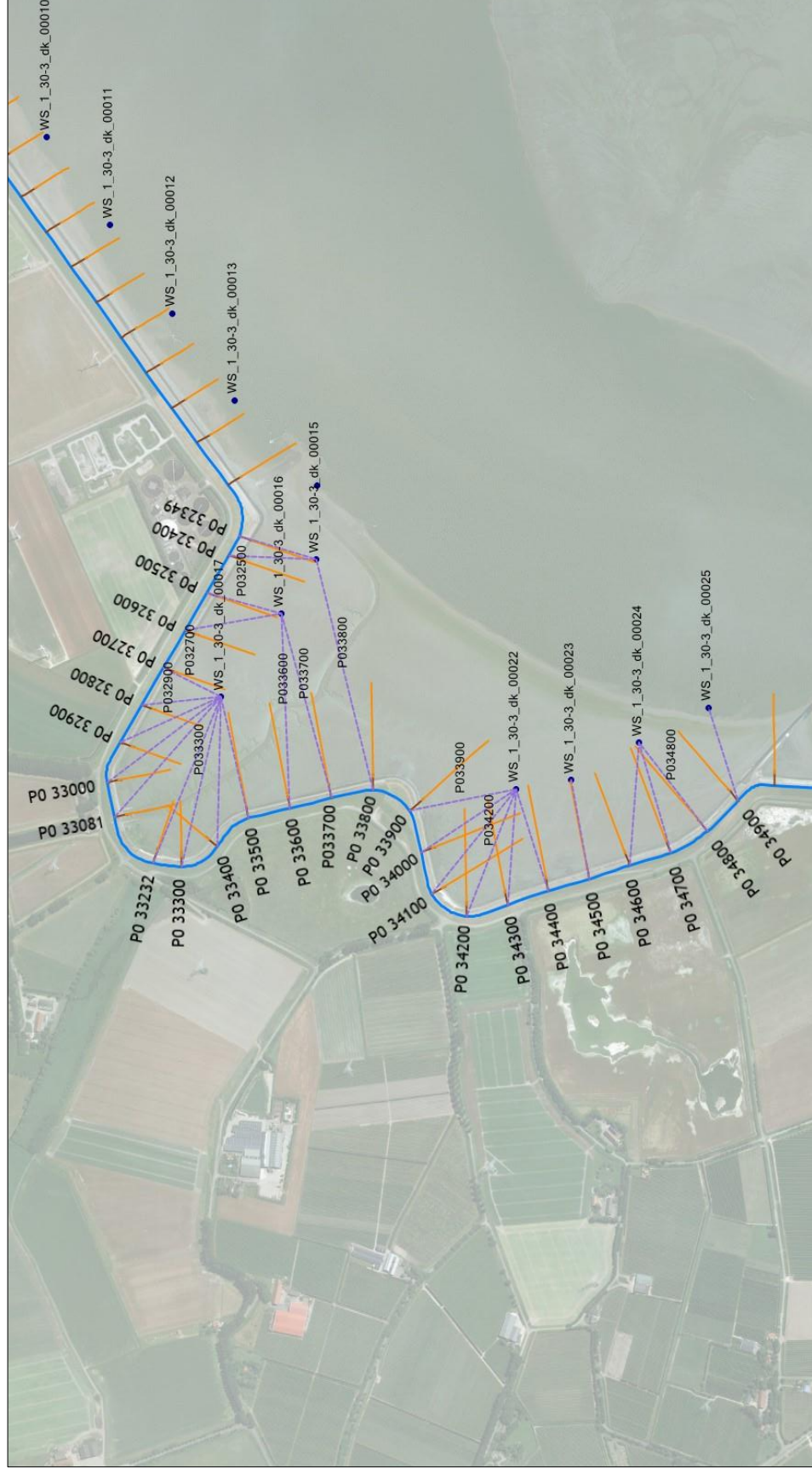
max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/27.664	300	1,09	0,26	240	7,03	300
P0 32400	1/20.974	300	1,11	0,32	300	7,23	300
P0 32500	1/18.463	300	1,01	0,41	240	7,27	300
P0 32600	1/10.389	300	0,97	1,24	300	7,31	300
P0 32700	1/11.872	300	0,88	0,68	300	7,22	300
P0 32800	1/17.188	300	0,92	0,30	300	7,19	300
P0 32900	1/26.918	300	0,95	0,12	240	7,17	300
P0 33000	1/53.799	270	1,39	0,13	240	6,89	300
P0 33081	1/37.311	270	1,38	0,19	240	6,90	270
P0 33232	1/52.228	300	/	0,02	240	6,74	300
P0 33300	1/70.525	300	/	0,00	210	6,71	300
P0 33400	1/38.008	330	0,71	0,00	330	6,79	300
P0 33500	1/64.394	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33600	1/70.758	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33700	1/66.598	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33800	1/160.433	300	/	0,00	210	6,72	300
P0 33900	1/163.011	300	/	0,00	240	6,72	300
P0 34000	1/106.084	300	/	0,00	240	6,81	300
P0 34100	1/115.061	300	/	0,00	240	6,73	300
P0 34200	1/108.632	300	/	0,00	60	6,71	300
P0 34300	1/27.008	300	/	0,00	60	6,72	300
P0 34400	1/35.544	300	/	0,00	120	6,72	300
P0 34500	1/93.296	300	/	0,00	60	6,72	300
P0 34600	1/71.911	300	/	0,00	120	6,73	300
P0 34700	1/107.538	300	/	0,00	60	6,73	300
P0 34800	1/63.489	330	1,03	0,00	330	6,86	300
P0 34900	1/142.480	330	1,14	0,00	120	6,84	300

kleinste faalkans	1/163.011	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	6,71 m
grootste faalkans	1/10.389	meeste overslag	1,24 l/m/s	hoogste kruin	7,31 m

Bijlage 9: GEKB berekeningen Variant 2 (profiel overzicht)



Bijlage 9: GEKB berekeningen Variant 2 (randvoorwaarden 1)

eis: 1/25.000

max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/400.348	300	1,30	0,04	240	6,32	240
P0 32400	1/302.665	300	1,28	0,07	240	6,25	240
P0 32500	1/226.915	300	1,19	0,03	240	6,24	300
P0 32600	1/152.680	300	1,16	0,09	240	6,27	300
P0 32700	1/160.558	300	1,06	0,03	240	6,18	300
P0 32800	1/222.810	300	1,09	0,02	240	6,16	300
P0 32900	1/343.260	300	1,13	0,01	240	6,16	300
P0 33000	1/825.325	300	/	0,01	240	6,14	300
P0 33081	1/593.110	300	/	0,03	240	6,01	240
P0 33232	1/673.126	300	/	0,00	240	5,93	300
P0 33300	1/864.821	300	/	0,00	180	5,86	300
P0 33400	1/445.910	330	0,84	0,00	330	5,95	300
P0 33500	1/793.010	300	/	0,00	180	5,86	300
P0 33600	1/863.545	300	/	0,00	180	5,86	300
P0 33700	1/815.177	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33800	1/1.887.849	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33900	1/1.940.480	300	/	0,00	240	5,91	300
P0 34000	1/1.544.248	300	/	0,00	240	6,03	300
P0 34100	1/1.405.017	300	/	0,00	240	5,92	300
P0 34200	1/1.304.924	300	/	0,00	120	5,86	300
P0 34300	1/278.916	300	/	0,00	120	5,89	300
P0 34400	1/381.059	300	/	0,00	120	5,89	300
P0 34500	1/1.071.492	300	/	0,00	120	5,87	300
P0 34600	1/593.197	330	1,20	0,00	120	5,95	300
P0 34700	1/800.904	330	1,23	0,00	120	5,96	300
P0 34800	1/388.067	300	1,28	0,00	120	6,03	300
P0 34900	1/1.453.052	330	1,36	0,00	120	5,99	300

kleinste faalkans	1/1.940.480	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	5,86 m
grootste faalkans	1/152.680	meeste overslag	0,09 l/m/s	hoogste kruin	6,27 m

Bijlage 9: GEKB berekeningen Variant 2 (randvoorwaarden 2, met zeespiegelstijging)

eis: 1/25.000

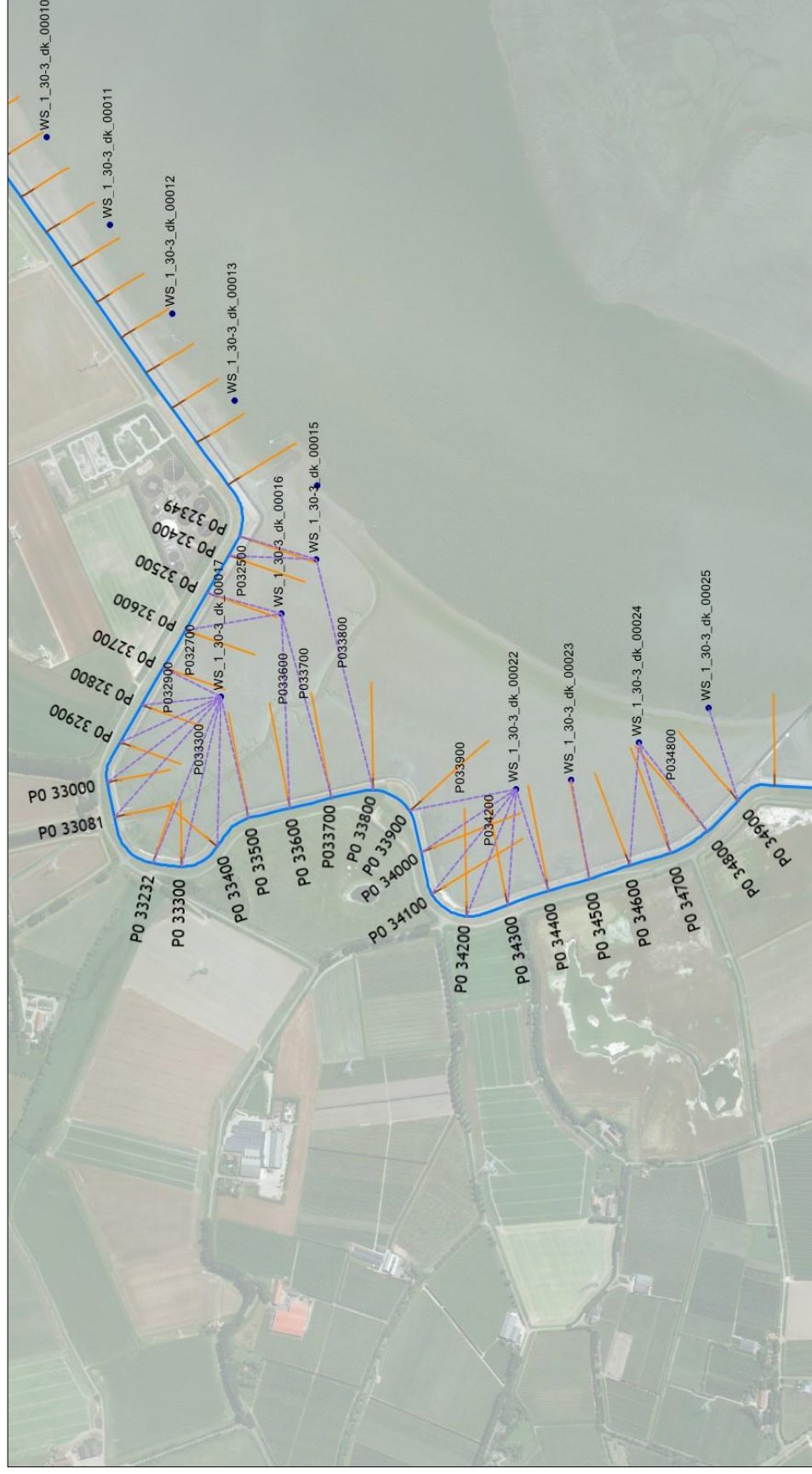
max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/52.439	300	1,06	0,39	240	7,12	300
P0 32400	1/21.101	300	1,10	0,56	240	7,23	300
P0 32500	1/17.984	300	1,01	0,69	240	7,30	300
P0 32600	1/9.674	300	0,98	1,85	240	7,35	300
P0 32700	1/11.497	300	0,88	0,91	300	7,24	300
P0 32800	1/16.764	300	0,92	0,43	240	7,21	300
P0 32900	1/26.379	300	0,95	0,21	240	7,18	300
P0 33000	1/51.595	270	1,43	0,22	240	6,91	300
P0 33081	1/36.857	270	1,39	0,28	240	6,91	270
P0 33232	1/52.103	300	/	0,04	240	6,74	300
P0 33300	1/70.522	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33400	1/38.003	330	0,71	0,00	330	6,78	300
P0 33500	1/64.391	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33600	1/70.758	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33700	1/66.600	300	/	0,01	180	6,71	300
P0 33800	1/160.455	300	/	0,01	180	6,72	300
P0 33900	1/162.862	300	/	0,00	180	6,72	300
P0 34000	1/111.866	300	/	0,02	240	6,81	300
P0 34100	1/114.193	300	/	0,02	240	6,73	300
P0 34200	1/108.632	300	/	0,01	120	6,71	300
P0 34300	1/27.278	300	/	0,03	120	6,72	300
P0 34400	1/35.682	300	/	0,02	120	6,72	300
P0 34500	1/93.325	300	/	0,00	60	6,72	300
P0 34600	1/71.889	300	/	0,02	120	6,73	300
P0 34700	1/108.130	300	/	0,00	120	6,73	300
P0 34800	1/64.603	330	1,04	0,01	120	6,86	300
P0 34900	1/142.272	330	1,14	0,00	120	6,84	300

kleinste faalkans	1/162.862	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	6,71 m
grootste faalkans	1/9.674	meeste overslag	1,85 l/m/s	hoogste kruin	7,35 m

Bijlage 10: GEKB berekeningen Variant 3 (profiel overzicht)



Bijlage 10: GEKB berekeningen Variant 3 (randvoorwaarden 1)

eis: 1/25.000

max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/362.410	300	1,26	0,02	240	6,32	300
P0 32400	1/258.202	300	1,27	0,07	240	6,25	300
P0 32500	1/236.242	300	1,16	0,02	240	6,22	300
P0 32600	1/138.919	300	1,13	0,05	240	6,25	300
P0 32700	1/162.095	300	1,05	0,02	240	6,15	300
P0 32800	1/222.365	300	1,08	0,01	240	6,14	300
P0 32900	1/336.503	300	1,11	0,01	240	6,14	300
P0 33000	1/838.319	300	/	0,01	240	6,13	270
P0 33081	1/595.674	300	/	0,01	240	6,01	300
P0 33232	1/673.389	300	/	0,00	240	5,91	300
P0 33300	1/864.821	300	/	0,00	210	5,86	300
P0 33400	1/445.526	330	/	0,00	330	5,95	300
P0 33500	1/793.010	300	/	0,00	180	5,86	300
P0 33600	1/863.545	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33700	1/815.177	300	/	0,00	180	5,87	300
P0 33800	1/1.887.370	300	/	0,00	210	5,87	300
P0 33900	1/1.941.170	300	/	0,00	140	5,90	300
P0 34000	1/1.437.960	300	/	0,00	240	6,04	300
P0 34100	1/1.408.827	300	/	0,00	240	5,90	300
P0 34200	1/1.304.989	300	/	0,00	0	5,86	300
P0 34300	1/226.215	300	/	0,00	0	5,89	300
P0 34400	1/368.360	300	/	0,00	60	5,89	300
P0 34500	1/1.062.388	300	/	0,00	90	6,28	210
P0 34600	1/521.061	330	1,19	0,00	330	5,98	300
P0 34700	1/802.241	330	1,13	0,00	120	6,01	330
P0 34800	1/339.912	300	1,25	0,00	120	6,03	300
P0 34900	1/1.457.363	330	1,34	0,00	120	5,99	300

kleinste faalkans	1/1.941.170	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	5,86 m
grootste faalkans	1/138.919	meeste overslag	0,05 l/m/s	hoogste kruin	6,25 m

Bijlage 10: GEKB berekeningen Variant 3 (randvoorwaarden 2, met zeespiegelstijging)

eis: 1/25.000

max: 10 l/m/s

max: 7,44 m

Dijkprofiel	sterkte berekening			overslagdebiet		HBN	
	faalkans [1/jaar]	maatgevende windrichting [graden]	indicatieve golfhoogte [meter]	overslagdebiet [l/m/s]	maatgevende windrichting [graden]	kruinhoogte [meter +NAP]	maatgevende windrichting [graden]
P0 32349	1/27.461	300	1,08	0,30	240	7,04	300
P0 32400	1/19.943	300	1,08	0,52	240	7,25	300
P0 32500	1/17.734	300	0,99	0,55	240	7,28	300
P0 32600	1/9.909	300	0,96	1,50	240	7,32	300
P0 32700	1/11.808	300	0,87	0,75	300	7,22	300
P0 32800	1/16.959	300	0,90	0,34	300	7,19	300
P0 32900	1/26.814	300	0,94	0,16	240	7,17	300
P0 33000	1/53.124	270	1,39	0,17	240	6,90	300
P0 33081	1/37.593	270	1,38	0,19	240	6,90	270
P0 33232	1/51.941	300	/	0,03	240	6,74	300
P0 33300	1/70.509	300	/	0,00	210	6,71	300
P0 33400	1/37.891	330	0,71	0,00	330	6,79	300
P0 33500	1/64.385	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33600	1/70.758	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33700	1/66.592	300	/	0,00	180	6,71	300
P0 33800	1/160.374	300	/	0,00	210	6,72	300
P0 33900	1/163.003	300	/	0,00	240	6,72	300
P0 34000	1/100.548	300	/	0,01	240	6,81	300
P0 34100	1/115.050	300	/	0,00	240	6,73	300
P0 34200	1/108.632	300	/	0,00	60	6,71	300
P0 34300	1/26.976	300	/	0,00	120	6,72	300
P0 34400	1/35.419	300	/	0,00	120	6,72	300
P0 34500	1/93.271	300	/	0,00	120	6,72	300
P0 34600	1/69.502	300	/	0,01	120	6,73	300
P0 34700	1/105.334	300	/	0,00	60	6,73	300
P0 34800	1/61.748	300	1,42	0,00	120	6,86	300
P0 34900	1/142.493	330	1,14	0,00	120	6,84	300

kleinste faalkans	1/163.003	minste overslag	0 l/m/s	laagste kruin	6,71 m
grootste faalkans	1/9.909	meeste overslag	1,5 l/m/s	hoogste kruin	7,32 m

Bijlage 11 - Indicatie van het sedimentvolume

De hoeveelheid sediment dat per ontwerpvariant moet worden aangevoerd of afgegraven is in kaart gebracht door middel van een grove volume indicatie. Aan de hand van het volume per variant kan er worden ingeschat hoe groot de kosten zullen zijn voor de aanleg van het nieuw voorland.

Ontwerpvariant 1 - ophoging:

In het ontwerp van variant 1 wordt het voorland van de Biezelingse Ham verhoogd met gemiddeld 1,50 m. Aan de kant van de vaargeul wordt een buffer gehouden van 50 m waar niet wordt gesuppleerd om directe sedimentatie in de vaargeul te voorkomen. Hierna wordt het gebied in geleidelijke stappen opgehoogd tot maximum 1,50 m.

Volumeberekening sediment:

$$1,50 \text{ m} * 452.589 \text{ m}^2 = 678.883,5 \text{ m}^3$$

$$1,00 \text{ m} * 96.083 \text{ m}^2 = 96.083 \text{ m}^3$$

$$0,50 \text{ m} * 76.591 \text{ m}^2 = 38.295,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Totaal} = 813.262 \text{ m}^3$$

→ hoeveelheid sediment voor ophoging

Ontwerpvariant 2 - verlaging:

In variant 2 wordt het voorland van de Biezelingse Ham verlaagd met gemiddeld 1,00 m.

Volumeberekening sediment:

$$1,00 \text{ m} * 695.725 \text{ m}^2 = 695.725 \text{ m}^3$$

$$\text{Totaal} = 695.725 \text{ m}^3$$

→ hoeveelheid af te graven sediment

Ontwerpvariant 3 - steiler:

In variant 3 wordt het profiel van het voorland van de Biezelingse Ham steiler gemaakt. Hiervoor wordt het voorland ter hoogte van de dijk opgehoogd met gemiddeld 1,50 m. Nabij de vaargeul wordt het voorland verlaagd met gemiddeld 1,00 m.

Volumeberekening sediment:

$$1,50 \text{ m} * 281.866 \text{ m}^2 = 422.799 \text{ m}^3$$

$$1,00 \text{ m} * 69.318 \text{ m}^2 = 69.318 \text{ m}^3$$

$$\text{Totaal} = 492.117 \text{ m}^3$$

→ hoeveelheid sediment voor ophoging

$$0,50 \text{ m} * 104.585 \text{ m}^2 = 52.293 \text{ m}^3$$

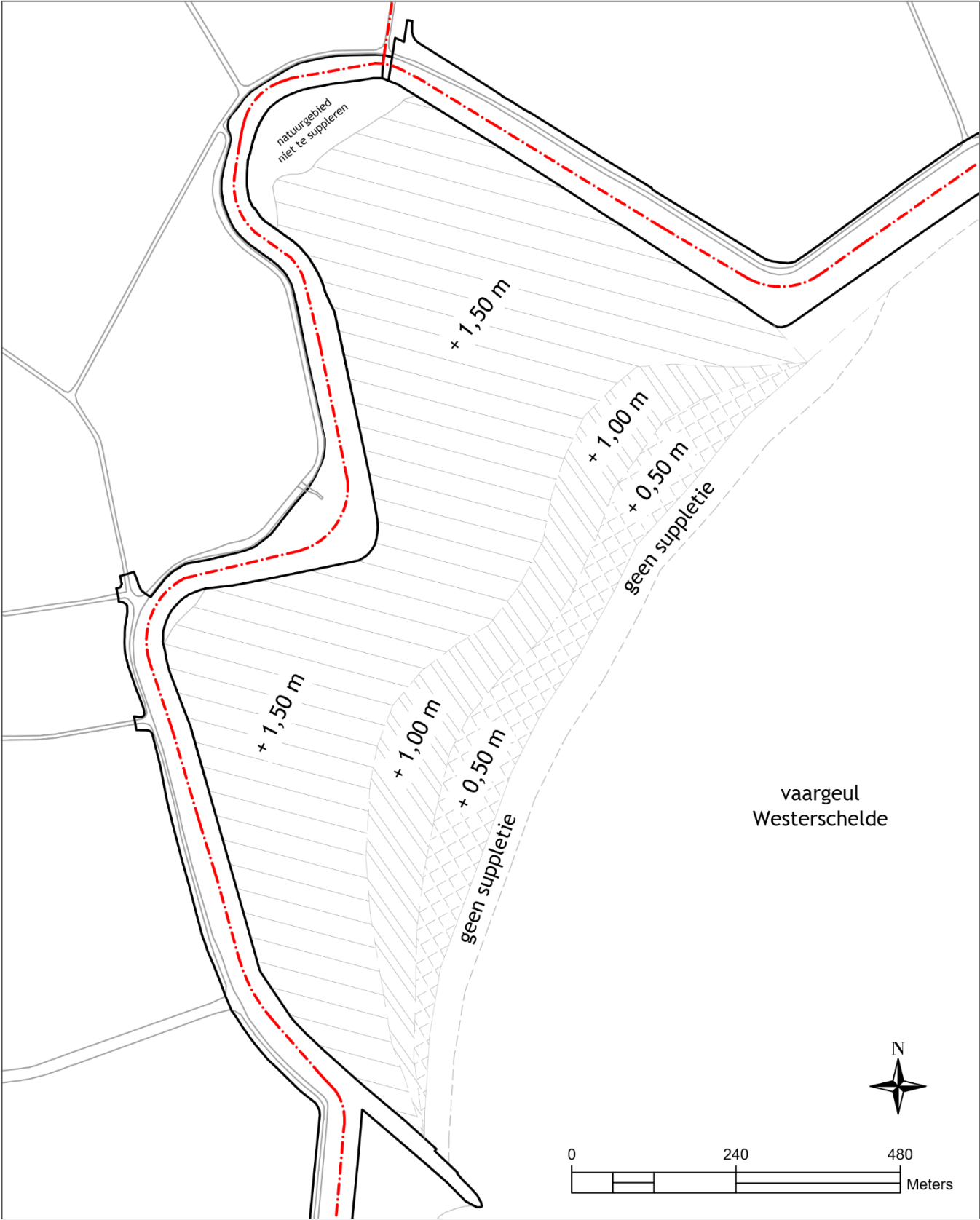
$$1,00 \text{ m} * 141.252 \text{ m}^2 = 141.252 \text{ m}^3$$

$$\text{Totaal} = 193.545 \text{ m}^3$$

→ hoeveelheid af te graven sediment

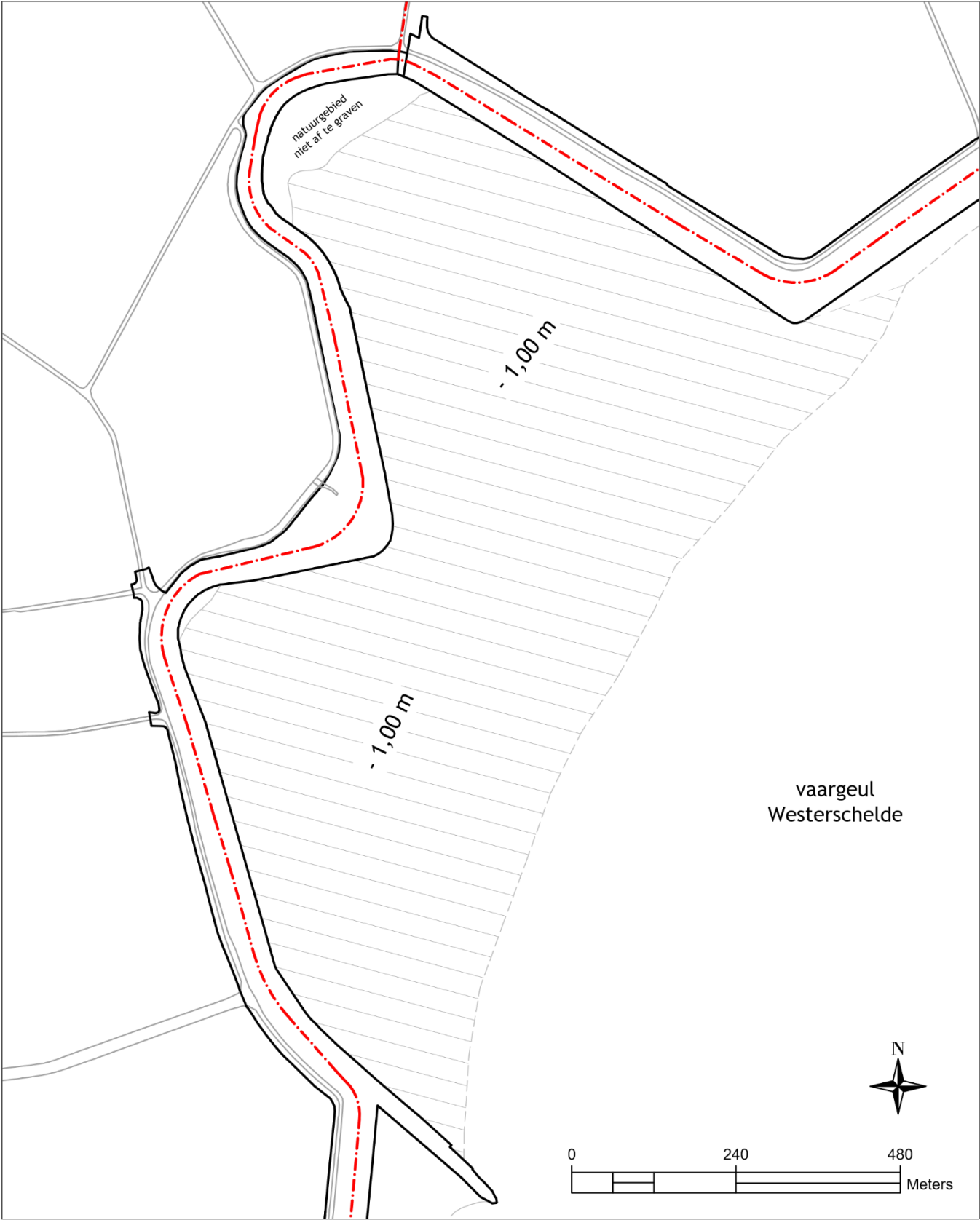
De hoeveelheid sediment dat wordt afgegraven kan worden hergebruikt voor de ophoging. Hierdoor moet er maar 298.572 m³ sediment worden aangevoerd voor de ophoging te vervullen.

Ontwerpvariant 1



	ophoging (1,50 m)	oppervlakte: 452.589 m ²	Totale hoeveelheid sediment voor ophoging: 813.262 m ³
	ophoging (1,00 m)	oppervlakte: 96.083 m ²	
	ophoging (0,50 m)	oppervlakte: 76.591 m ²	

Ontwerpvariant 2

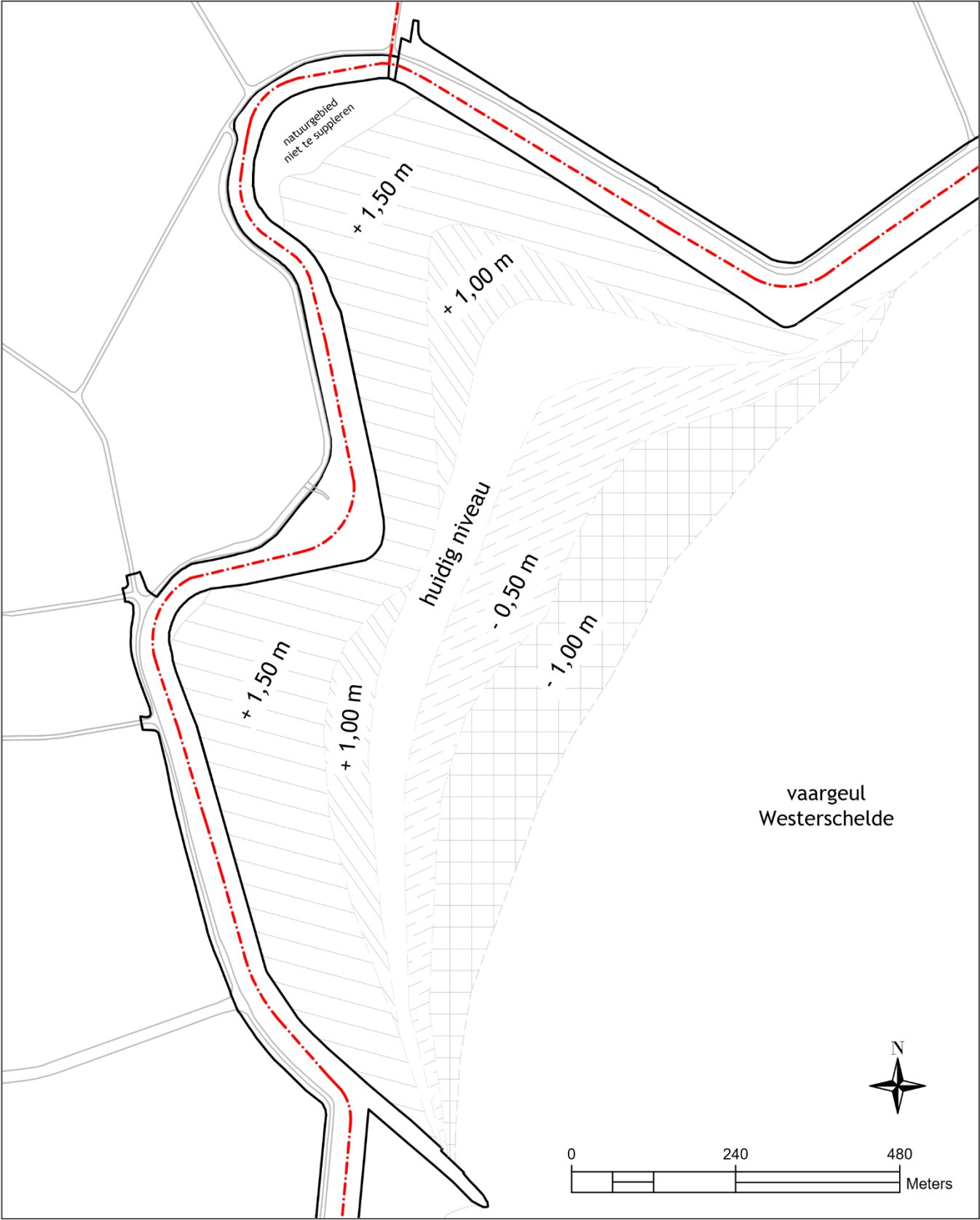


afgraving (1,00 m)

oppervlakte: 695.725 m²

Totale hoeveelheid sediment af te graven:
695.725 m³

Ontwerpvariant 3



	ophoging (1,50 m)	oppervlakte: 281.866 m ²	Totale hoeveelheid sediment voor ophoging: 492.117 m ³
	ophoging (1,00 m)	oppervlakte: 69.318 m ²	
	afgraving (0,50 m)	oppervlakte: 104.585 m ²	Totale hoeveelheid sediment af te graven: 193.545 m ³
	afgraving (1,00 m)	oppervlakte: 141.252 m ²	