



Eindrapport

Dijkverkenners Rivierenland: 'Taaie dijken'

Projectgroep 2
Versie 1.0
27-01-2022

Opdrachtgevers: Jeroen Kooman, Waterschap Rivierenland, WSRL

Projectgroep 2

Gilian Koenders, Igor Mertens, Bas Verheijen

Arnhem/ Velp, Gelderland

Versie 1.0

27-1-2022

HAN; Hogeschool van Hall Larenstein/ Land en watermanagement/ Minor SRE

Schooljaar 2021/ 2022

Semester 1

Bron voorpagina: (Janssen, 2021)

Voorwoord

Voor u ligt het adviesrapport “Dijkverkenners Rivierenland: ‘Taaie dijken’”. Het onderzoek naar taatheid in dijkconstructies werd uitgevoerd door derde- en vierdejaars studenten van de Minor Sustainable River Engineering, van de Hogeschool Arnhem en Nijmegen en de Hogeschool Van Hall Larenstein. De opdracht komt vanuit Waterschap Rivierenland en in het onderzoek wordt onderzoek gedaan naar taatheid.

In het onderzoek zijn overstromingsberekeningen gedaan. De projectgroep wil Tygron bedanken die het gelijknamige softwarepakket beschikbaar stelden, Anouk Berendsen die vanuit Van Hall Larenstein advies gaf over ArcMap en Sobek en Frank den Heijer onze begeleider vanuit de HAN. Door hun ervaringen en expertise hebben ze de projectgroep kunnen voorzien van goede feedback en adviezen met betrekking tot dit project. Ondanks hun dagelijkse routine met hun eigen werk hebben zij tijd vrijgemaakt om de projectgroep verder te helpen.

Gilian Koenders

Igor Mertens

Bas Verheijen

Arnhem

27-01-2022

Samenvatting

Waterschap Rivierland verzocht deze projectgroep om onderzoek te doen of taaheid in dijken invloed heeft op de overstromingsrisico's. Momenteel zijn er drie opties voor het verminderen van het overstromingsrisico:

- 1 Rivierwaterstand verlagen;
- 2 Gevolgen achter de dijk beperken;
- 3 Dijk verhogen.

Het onderzoek moet aantonen of het taai maken van dijken een 4^{de} mogelijkheid kan zijn om het overstromingsrisico te verminderen. De vragen die aan het einde van het project worden beantwoord zijn:

- Heeft het taai maken van een dijk significant invloed op de overstromingsrisico's?
- Is het maken van een taaie dijk financieel verantwoord?

De projectgroep verstaat onder het begrip taaheid dat: "Bij een hoge waterstand het water gedurende een lange periode over de dijk loopt zonder te falen. De dijk mag wel bezwijken, echter moet het een positiever effect hebben op het risico in vergelijking tot een zanddijk".

Vanuit de opdrachtgever zijn twee verschillende dijkvakken aangeleverd waarvoor de taaheid onderzocht moet worden. In het onderzoek is een Excel-Spreadsheet gemaakt waarin de bresgroei over de tijd kan worden uitgerekend. Uit het gemaakte model zijn de invloedzones van de bresgroei duidelijk geworden en aan de hand daarvan heeft de projectgroep taaie dijkconstructies (varianten) ontworpen ten opzichte van de huidige situatie. Deze dijkconstructies zijn op het faalmechanisme overloop expres laten falen zodat de bresgroei kon worden berekend.

Voor de overstromingsrisico's is gebruik gemaakt van Tygron en Sobek waarin de overstromingshoeveelheid en doorbraak gevisualiseerd kon worden. De Sobek input komt vanuit de Excel-spreadsheet en voor Tygron is een "badkuip" gecreëerd. Vanuit die situaties zijn ontwerpen getest en uit de overstromingssimulatie zijn voor het Merwedekanaal en Dodewaard de bevindingen beschreven.

In Tabel 1 zijn van de verschillende scenario's de bijbehorende overstromingsdebieten te zien voor situatie Merwedekanaal. Bij het verhogen van de damwand bij een kleidijk nog maar 10% van het oorspronkelijke debiet uitstromen. Bij een zanddijk is dit maar 13%. Ook is het verschil tussen een klei- en zanddijk te zien. Bij een kleidijk stroomt er ongeveer tussen de 20-30% minder debiet uit.

In Tabel 2 zijn de overstromingsdebieten van de verschillende varianten voor Dodewaard weergegeven. Hierin is goed zichtbaar wat het effect van een damwand is. Doordat variant 4 & 5 eigenlijk ook als een damwand gedraagt kan voorzichtig worden opgemaakt dat een halve meter damwand een significant verschil levert. Bij een kleidijk stroomt gemiddeld 40% minder debiet uit dan bij een zanddijk.

Na de visualisatie is onderzocht wat de risico's van een doorbraak zijn. Dit is gedaan door van de overstromingen de gevolgen in euro's te berekenen deze is vervolgens vermenigvuldigd met de faalkans. Hieruit volgt het risico dat vervolgens is gedeeld door de rentevoet om het netto contant te maken. Hieruit volgt dat bij het Merwedekanaal het verhogen van de damwand zeer voordelig is.

Bij situatie Dodewaard is het verschil van een damwand nog groter. Ook het toepassen van een extra dijk is zeer voordelig.

Om te kunnen beantwoorden of het taai maken van de dijk ook financieel verantwoord is heeft de projectgroep voor de varianten uitgerekend wat de kosten zouden worden per kilometer.

Door het te vergelijken van de kosten van een dijkversterking met de het Risico bij het bezwijken van de dijk zijn de bevindingen getrokken.

Voor Merwedekanaal wordt zichtbaar dat de varianten met de hoogste kosten ook de varianten zijn met de laagste schade. Het verhogen van de damwand in combinatie met klei is de duurste optie. Dit schade van deze optie is ook de laagste. Aangezien de dijk die er nu ligt van klei is en er al een damwand ligt die dan alleen verhoogd hoeft te worden klinkt dit als een ideale keuze. Toch zijn er meer mogelijkheden om de dijk taaier te maken met minder hoge kosten. Variant 6 is hier een voorbeeld van.

Bij Dodewaard is het aanleggen van een dijk zonder de aankoop van het land relatief goedkoop ten opzichte van het zetten van een damwand. Uit 3.2 blijkt dat een extra dijk op dezelfde manier reageert als een damwand. Hierdoor is te concluderen dat een extra dijk toevoegen de beste oplossing is. Het aanleggen van een zanddijk is goedkoper dan een kleidijk, maar omdat klei beter erosiebestendig is wordt dit gezien als de meest logische keuze.

Uit de kostenberekening komt naar voren dat een investering in een taaier ontwerp een goede keuze is. In de onderstaande tabellen zijn de bevindingen van het rapport weergegeven.

Tabel 1: Overstromingsvolume van de varianten voor Merwedekanaal

Scenario	Overstromingsvolume (m ³)	Totale schade	(€/4,5%) Contante waarde	Kosten ontwerp (€/km)
0 – huidig dijk klei	276.930	€ 3.683.600	817.777	-
1 – huidig dijk zand	333.624	€ 4.242.500	942.222	-
2 – verhoogde wand klei	29.889	€ 426.390	95.555	4.210.000
3 – verhoogde wand zand	43.758	€ 426.390	95.555	1.980.000
4 – geen wand klei	996.873	€ 7.449.900	1.655.555	2.290.000
5 – geen wand zand	1.224.194	€ 7.499.900	1.655.555	1.000.000
6 – damwandtraject 10 m	252.313	€ 1.555.500	344.444	3.550.000

Tabel 2: Overstromingsvolume van de varianten voor Dodewaard.

Scenario	Overstromingsvolume (m ³)	Totale schade	(€/4,5%) Contante waarde	Kosten ontwerp (€/km)
0 - huidig dijk klei	580.000.000	€ 4.900.000.000	1.088.889	-
1 - huidige dijk zand	850.000.000	€6.600.000.000	1.466.667	-
2 - damwand klei	950.000	€ 1.600.000	356	7.000.000
3 - damwand zand	1.475.000	€ 4.300.000	956	7.000.000
4 - extra dijk klei	5.100.000	€ 19.000.000	4.222	2.000.000
5 - extra dijk zand	8.600.000	€ 47.000.000	10.444	1.600.000

Inhoudsopgave

1	Projectomschrijving.....	8
1.1	Inleiding.....	8
1.2	Aanleiding.....	9
1.3	Probleemstelling.....	9
1.4	Doelstelling.....	10
1.5	Uitvoering en aanpak	10
2	Dijkvakken	11
2.1	Merwedekanaal.....	11
2.2	Dodewaard	12
3	QuickScan berekening.....	13
3.1	Merwedekanaal.....	13
3.2	Dodewaard	14
3.3	Betrouwbaarheid.....	15
4	Invloed zones ‘taai dijken’	16
5	Software keuze.....	17
5.1	Softwareonderzoek	17
5.2	Resultaat.....	18
6	Dijkontwerpen	20
6.1	Merwedekanaal.....	20
6.2	Dodewaard	23
7	Visualisering	26
7.1	Visualisatie Merwedekanaal.....	26
7.2	Variant 0, klei met damwand 1,25 m	26
7.2.1	Variant 1 – zand met damwand 1,25 m.....	27
7.2.2	Variant 2 – klei met damwand 1,55 m.....	28
7.2.3	Variant 3 – zand met damwand 1,55 m.....	29
7.2.4	Variant 4 - klei zonder damwand	30
7.2.5	Variant 5 – zand zonder damwand	31
7.2.6	Variant 6 – Damwand elke 10 meter	32
7.3	Visualisatie Dodewaard	33
7.3.1	Variant 0 - dijklichaam klei.....	34
7.3.2	Variant 1 - dijklichaam zand.....	34
7.4	Variant 2 - damwand; dijklichaam klei	36
7.4.1	Variant 3 - damwand; dijklichaam zand.....	36
7.4.2	Variant 4 - extra dijk; dijklichaam klei.....	37
7.4.3	Variant 5 - extra dijk; dijklichaam zand.....	37

7.5	Relatie ontwerp en overstromingsvisualisatie	38
8	Gevolgen berekening	39
8.1	Merwedekanaal.....	39
8.1.1	Slachtoffers.....	39
8.1.2	Directe schade	39
8.1.3	Resultaten Merwedekanaal.....	40
8.2	Dodewaard.....	41
8.2.1	Invoergegevens en toepassing Schade Slachtoffer Module	41
8.2.2	Resultaten Dodewaard	41
8.2.3	Betrouwbaarheidsanalyse Dodewaard.....	42
9	Risicobenadering.....	43
9.1	Merwedekanaal.....	43
9.2	Dodewaard	43
9.3	Bevindingen.....	44
10	Kostenberekening	45
10.1	Kostenberekening ontwerpen Merwedekanaal	45
10.2	Kostenberekening ontwerpen Dodewaard	46
10.3	Bevindingen kostenberekening	47
11	Conclusie.....	48
11.1	Aanbevelingen.....	48
12	Bibliografie	50
12.1	Figurenlijst	51
12.2	Tabellenlijst	54
13	Bijlage.....	55
Bijlage A.	Dijkvakken keuze	56
Bijlage B.	Overige ontwerpenaspecten	60
Bijlage C.	Excel invoerwaardes Dodewaard.....	62
Bijlage D.	Visualisatie Merwede	65
Bijlage E.	Visualisatie Dodewaard	71
Bijlage F.	Schadebedragen Merwede kanaal	84
Bijlage G.	Onzekerheden Schade en Slachtoffer module	86
Bijlage H.	Schadeberekeningen Merwedekanaal	87
Bijlage I.	Schadeberekeningen Dodewaard.....	89
Bijlage J.	Kosten getallen per kilometer	90

1 Projectomschrijving

1.1 Inleiding

Een groot deel van Nederland ligt onder zeespiegel en dat maakt het land kwetsbaar voor overstromingen. Waterkeringen zoals dijken, duinen en kunstwerken beschermen het land tegen het water. Een dijk is een door de mens aangelegde waterkering.

Dit semester heeft de projectgroep zich beziggehouden met een project genaamd “Taaie dijken”. De opdracht om onderzoek te doen naar het onderwerp is gekomen vanuit Waterschap Rivierenland in combinatie met de Minor Sustainable River Engineering. In het project is er gekeken of de schade achter de dijk significant afgenomen kan worden door een dijk “taaier” te maken. Hierbij worden verschillende ontwerpen van taaie dijken geanalyseerd. De analyses zijn gericht op de mogelijkheden van de inhoud van een dijk en wat dit voor gevolgen, kosten, financiële verantwoording en risico's met zich meebrengt. Wat dit betekent lees je verder in dit rapport.



Figuur 1: Dijkdoorbraak Lowdijk 1953. (Stomp, 2011)

1.2 Aanleiding

In Nederland worden strenge eisen gesteld aan hoe hoog en zwaar een dijk moet zijn, maar niet hoe taai. Omdat de geschiedenis leert dat er geen garanties zijn om een dijkdoorbraak te voorkomen, is het belangrijk om te weten hoe een eventuele doorbraak zich gedraagt. Kom je tot je knieën in het water of staat een woning tot de 2e verdieping onder water?

Een nieuwe term die hierin onderzocht moet worden is taaiheid van dijken. Momenteel is er weinig kennis over taai dijken en wat het begrip precies inhoudt. Uit de bureaustudie die de projectgroep op het internet heeft uitgevoerd is geen eenduidige definitie te vinden van wat een taai dijk is. De betekenis van taaiheid in kleideeltjes is anders dan in een stalen balk. De projectgroep verstaat onder het begrip taaiheid dat: “Bij een hoge waterstand het water gedurende een lange periode over de dijk loopt zonder te falen. De dijk mag wel bezwijken, echter moet het een positiever effect hebben op het risico in **vergelijking tot een zanddijk**”.

Een veel voorkomend dijkontwerp op basis van een oude kleikern met zandaanvulling reageert nauwelijks taai wat betekent dat die hoogstwaarschijnlijk sneller volledig bezwijkt, maar een dijk met kleikern of slim ontworpen damwand reageert mogelijk wel taai. De ontwerprichtlijnen schrijven voor dat een nieuw dijkontwerp weer 50 jaar mee moet kunnen. De huidige ontwikkelingen op het gebied van duurzaamheid heeft invloed **op een nieuw**, want wat gebeurt er met de toegepaste materialen over 50 jaar? In de toekomstige taai ontwerpen zal hier dus wel rekening mee moeten worden gehouden.

1.3 Probleemstelling

De belasting tegen de dijk wordt groter en de economische waarde in het achterland neemt toe, hierdoor moeten de huidige dijkconstructies zwaarder worden uitgevoerd dan vroeger. Dit resulteert veelal in grotere dimensies van de dijken, die de ruimtelijke leefomgeving beïnvloeden. Het dijklichaam wordt door de ‘markt’ grotendeels opgebouwd uit zand om de kosten zo laag mogelijk te houden. De hoeveelheid klei die in de dijk wordt toegepast voldoet vaak net aan de norm. Hiermee worden de kosten zo laag mogelijk gehouden terwijl de overstromingskans wel voldoende maar vaak minimaal wordt beperkt.

Op dit moment worden er drie opties expliciet gebruikt voor het verminderen van het overstromingsrisico:

- 1 Rivierwaterstand verlagen;
- 2 Gevolgen achter de dijk beperken;
- 3 Dijk verhogen.

Tijdens dit project zal onderzocht worden of een vierde optie gecreëerd kan worden:

- 4 De dijk anders construeren.

Het probleem is dat over de haalbaarheid van optie vier op dit moment nog weinig bekend is en die optie gaat daarom onderzocht worden door de projectgroep. Het onderzoek zal zich richten op het construeren van taaiheid in een dijk. Over de taaiheid in dijken is nog weinig bekend en het begrip is niet eenduidig afgebakend. In dit onderzoek zal dit nader worden onderzocht en wordt onderzoek gedaan naar het construeren van taaiheid van dijken in twee dijktrajecten, één primaire en één regionale kering.

1.4 Doelstelling

Het doel van het project is om te onderzoeken of het overstromingsrisico significant kan worden beperkt door de constructie van de dijk taai te maken. In het onderzoek moet een constructie worden bedacht waarin je minder nadelen hebt maar gelijkwaardige of minder risico's. De vragen die aan het einde van het project worden beantwoord zijn:

- Heeft het taai maken van een dijk significant invloed op de overstromingsrisico's?
- Is het maken van een taai dijk financieel verantwoord?

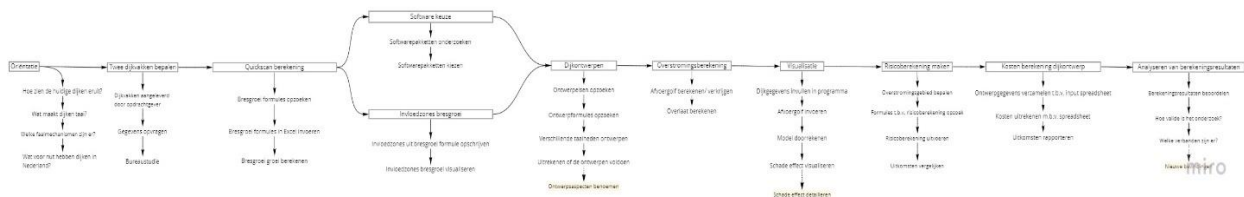
Door inzichten te krijgen in overstromingsrisico's kan beter worden ingeschat wat de effecten zijn van bepaalde ontwerpkeuzes.

1.5 Uitvoering en aanpak

Voor dit project is een aanpak nodig. Het project is dus opgedeeld in verschillen stappen die uitgevoerd gaan worden in een bepaalde volgorde. Het begint met inlezen en informatie op doen over het onderwerp. Vervolgens zijn er twee dijkvakken gekozen door de opdrachtgever. Deze dijkvakken zijn onderzocht en daarna analyses en berekeningen op los gelaten. Dijkontwerpen zijn bedacht die verschillende effecten op faalmechanismen creëren. **De volgende stap is het bestuderen van de D-stability modellen** vervolgens zijn de visualisaties gemaakt in Tygron en Sobek. Deze visualisaties geven veel inzicht in het effect van de verschillende dijkontwerpen.

Met al deze gegevens kan er gerekend worden aan de kosten. Gestart met de schadekosten en de gevolgen. Daarna de kosten van de dijkontwerpen bepaalt via KosWat. Tot slot in combinatie met de kans van bezwijken een financiële verantwoording bepaalt en geconcludeerd.

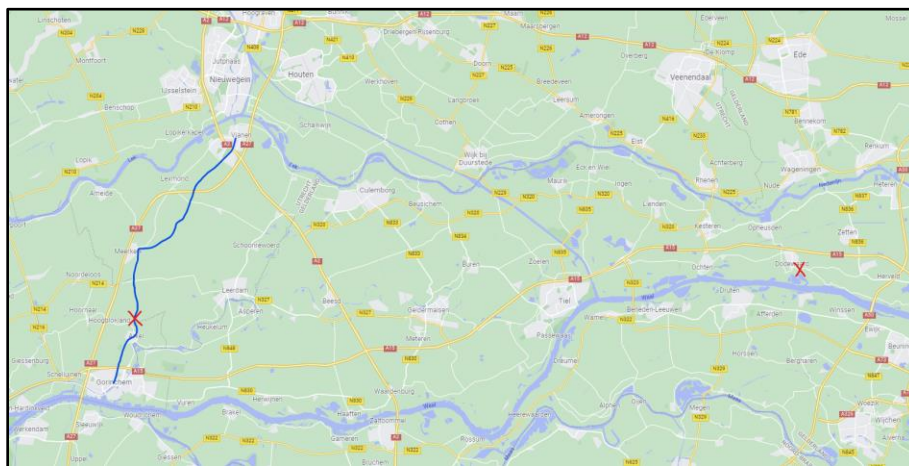
Uit eindelijk is het de puntjes op de i zetten in het rapport dat tussentijds wordt bijgehouden. Ook wordt er dan een definitieve conclusie plus samenvatting geschreven. In Figuur 2 is een schema te zien voor meer duidelijkheid.



Figuur 2: Stappenplan onderzoek.

2 Dijkvakken

De eerste stap die wordt genomen is het bepalen van de dijkvakken. De opdrachtgever heeft twee dijkvakken aangeleverd die voor hem interessant zijn. Het grote verschil tussen de twee dijkvakken is dat dat het Merwedekanaal een regionale kering is en de dijk bij Dodewaard een primaire kering. In Figuur 3 is de ligging van de twee dijken en de dijkbreuken die in dit rapport geanalyseerd worden te zien. In Bijlage A wordt meer informatie gegeven over de dijkvakken: ligging, waarde van het achterland, faalmechanismen en de aangeleverde gegevens van de opdrachtgever.



Figuur 3: Locatie dijkvakken. (Google Maps, 2021)

2.1 Merwedekanaal

Het projectgebied van het Merwedekanaal is in Figuur 3 links in het blauw weergegeven. Het rode kruis geeft de opgegeven locatie van de opdrachtgever weer. Van de dijk bij het Merwedekanaal is bekend dat het een regionale kering is. Een regionale kering is een niet-primaire waterkering die is aangewezen op basis van een provinciale verordening. Naast de hoofdfunctie, zorgen voor veiligheid, hebben regionale waterkeringen nog additionele functies zoals: wegverharding, recreatiegebied, weiland, aanlegplaats voor de (plezier-)scheepvaart of waardevol landschapselement. Deze functies sluiten aan bij de belangen van het waterschap, provincie of gemeente (Rijksoverheid, sd). Ook is het bekend dat in deze dijk een houten damwand zit op hoogte 1,25 m+ NAP, dit is op ongeveer 0,3 m onder de kruin. Het is onduidelijk voor welk faalmechanisme de houten damwand is geplaatst en of de damwand nog stand zal houden bij een mogelijke overstroming. Voor overstroming wordt een andere damwand geplaatst dan voor Piping. De reden hiervoor is dat de faalmechanismen voor overstroming en Piping op verschillende posities in de grond optreden. Piping treedt vaak diep onder de dijk (grond) op, terwijl overstroming over de dijk gebeurt.



Figuur 4: Locatie afgekeurd Merwedekanaal (Waterschap Rivierenland).

2.2 Dodewaard

Het andere dijkvak dat door de opdrachtgever is aangereikt ligt gelegen nabij Dodewaard en aan de rivier de Waal (Figuur 5). De betreffende dijk is een primaire waterkeringen en biedt bescherming tegen overstromingen uit het hoofwatersysteem. In Figuur 3 is aan de rechterkant een rood kruis weergegeven waar de projectgroep vanuit gaat dat daar de dijk doorbreekt, deze plek is het zwakste punt uit geologisch onderzoek van een al falend traject. Aan de dijk worden een ander overstromingskans per jaar gekoppeld die in de regel minder vaak mag optreden dan bij een regionale kering. De reden hiervoor is dat het overstromende gebied bij een primaire dijk grotere economische schade oplevert en dat het aantal getroffen inwoners vaak groter is. De primaire waterkering liggen aan grote rivieren die water afvoer vanuit gebergten. Dit zorgt ervoor dat smeltwater en regen grote invloed hebben op de waterstand, hierdoor zijn grote verschillen in waterpeil mogelijk in de verschillende seizoenen.



Figuur 5: Waalbanddijk gelegen te Dodewaard. (Google Maps, 2021)

3 QuickScan berekening

De volgende stap die wordt genomen is het maken van een Excel berekening voor de om meer inzicht te krijgen in de gevolgen van dijkdoorbraken. In de gemaakte Excel spreadsheet is de bresgroei formule over de tijd uitgezet, hierdoor is het mogelijk om de bres in kleine tijdsintervallen te berekenen. Met deze bresgroei is vervolgens de waterstand achter de dijk berekend. De waterstand berekening achter de dijk is minder precies dan bij een berekening met een softwarepakket, maar laat al wel een goed beeld zien in de waterdiepte van het achterland. In het Excel spreadsheet zijn de verschillen in erosiebestendigheid van zand en klei duidelijk waar te nemen door de verschillen van de toenemende waterstand in het achterland.

In de Excel spreadsheet zijn complexe zoekfuncties gebruikt voor het automatisch laten zoeken naar de juiste waarden, onder anderen om de waterhoogte te simuleren. Door dit te automatiseren zijn er kleinere integratie stappen mogelijk en dit zorgt ervoor dat het eindresultaat nauwkeuriger is.

3.1 Merwedekanaal

Voor de Excel berekeningen van het Merwedekanaal zijn er vooraf waarden bepaald:

- Dijk- en damwandhoogtes, respectievelijk 1,6 en 1,25 m+ NAP;
- Maximaal volume van het kanaal, 1.676.800 m³;
- Coëfficiënt u_c voor zand en klei, respectievelijk 0,2 en 0,5 m/s;
- Oppervlakte achterland, 2,8 km²;
- Hoogte achterland, 0 m+ NAP;
- Lengte van tijdstappen, 60 seconden;
- Initiële bresbreedte, 0,5 m.

Per tijdstap worden er verschillende berekeningen gemaakt.

Eerst wordt het volume verlies berekend met de volgende formule:

$$Q = m * B * \Delta h * \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Vervolgens wordt de nieuwe waterstand van het kanaal bepaald door van het vorige berekende debiet het volume verlies van af te halen. Daarna kan met het nieuwe debiet de juiste waterhoogte worden opgezocht met de zoekfunctie van Excel.

Met deze nieuwe waterstand wordt de nieuwe bresbreedte berekend met de volgende formule:

$$B(t) = B_0 + \frac{f_1 * g^{0.5} * \Delta h^{1.5}}{\ln 10 * u_c} * \ln \left(1 + \frac{f_2 * g}{u_c} * \Delta t \right)$$

Met als vaste waarden:

- F_1 constante voor zand en klei, respectievelijk 1,2 en 1,3;
- F_2 constante voor zand en klei beide 0,04;
- g de valversnelling, 9,81 m²/s.

3.2 Dodewaard

Bij Dodewaard zijn de volgende waarden vooraf bepaald:

- Begin afvoer Lobith, 16.000 m³/s;
- Dijkhoogte, 13,5 m+ NAP;
- Coëfficiënt u_c voor zand en klei, respectievelijk 0,2 en 0,5 m/s;
- Oppervlakte achterland, 200 km²;
- Hoogte achterland, 0 m+ NAP;
- Lengte van tijdstappen, 600 seconden;
- Initiële bresbreedte, 0,5 m.

De eerste stap is de afvoer bij Lobith omzetten naar een waterhoogte bij Dodewaard. Via Figuur 46 kan je met het debiet de waterhoogte bij Lobith aflezen. Met de volgende formule kan de waterhoogte bij Dodewaard worden bepaald:

$$H = E_1 * x^4 + E_2 * x^3 + E_3 * x^2 + E_4 * x + E_5$$

Met x de waterstand bij Lobith in m en E vaste waarden die komen uit Figuur 47.

- $E_1 = 0,002179$
- $E_2 = -0,11146$
- $E_3 = 2,08189$
- $E_4 = -15,9932$
- $E_5 = 47,74828$

De formules voor de bresgroei en het volume verlies zijn hetzelfde als bij Merwede. Omdat Dodewaard geen kanaal is maar een rivier zal er ook rekening gehouden moeten worden met het afnemen van de hoogwater afvoer. Deze afnamen is bepaald op 0,015 m³/s. (Zaag, 2019) (FutureWater, 2011)

Uit deze berekening volgt een maximale bresgroei van 287m bij een zanddijk bij een eindtijd van 85 uur. En een maximale bresgroei van 193 m bij een kleidijk bij een eindtijd van 95 uur.

In Figuur 48 is de bresgroei per tijdstap te zien. Deze tijdstappen en het bijbehorende uitstroomvolume kunnen in Sobek worden ingevoerd.



3.3 Betrouwbaarheid

Zoals eerder is aangegeven heeft de projectgroep zelf een spreadsheet gebouwd met daarin de bresgroei formule uitgezet in de tijd. Deze formules komen uit rekenregels voor waterbouwkundig ontwerpen opgesteld door medewerkers van Rijkswaterstaat¹. Uit de bresgroei formule kan de waterstand in het achterland berekend worden. Of de berekende hoogte daadwerkelijk overeenkomt hangt af van de verspreiding en het stuwen van het water. Het water kan bijvoorbeeld door een weg gestuwd worden, achter de doorbraak zou een weg kunnen liggen die één meter hoger is dan het maaiveld. Hierdoor zou achter de dijk bijvoorbeeld in plaats van de **berekenende** 0,2 meter waterdiepte door de stuwing van de weg een waterstand van 1,0 meter achter de dijk ontstaan. Dit heeft uiteraard effect op de groei van de bres.

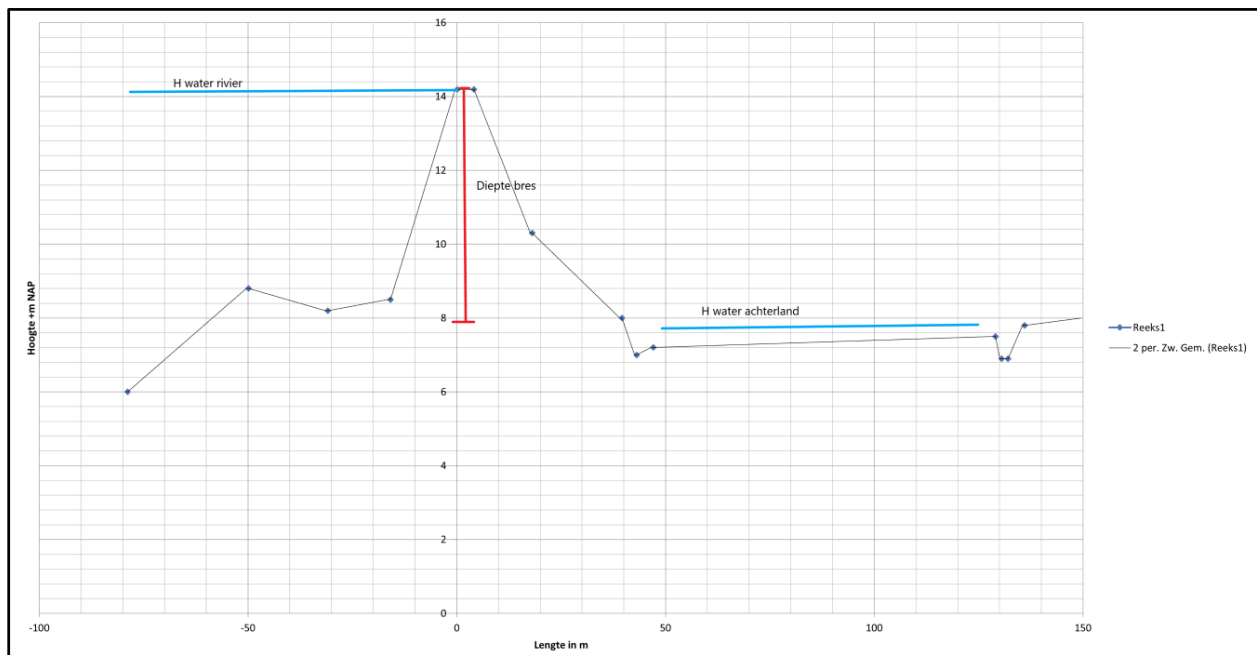
Met een extra interpolatie stap wordt na de eerste simulatie gekeken of de vooraf berekende waterdiepte in het achterland met de bresgroei formule overeenkomt met de gevisualiseerde waterdiepte uit de overstromingssimulatie. Vervolgens kan de waterdiepte opnieuw worden berekend in de bresgroei formule aan de hand van de waterdiepte uit de overstromingssimulatie. Hierdoor zal een nieuwe bresgroei snelheid ontstaan met een ander overstromingsvolume. Deze wordt daarna opnieuw ingevoerd, waarna een nieuwe overstromingssimulatie zal ontstaan. Dit zal leiden tot een hogere nauwkeurigheid in de onderzoeksresultaten.



¹ ([Ministerie van Verkeer en Waterstaat] Rijkswaterstaat, Directie Sluizen en Stuwen (RWS, SS); F.T. Heezen, 1989)

4 Invloed zones 'taaie dijken'

Uit de formule van de bresgroei komt naar voren dat de bresgroei in de diepte en in de breedte wordt beïnvloed door de erosiebestendigheid van het dijkmateriaal. In het Excel-spreadsheet is deze formule verwerkt. Het waterstandsverschil ten opzichte van voor en achter de bres staat ook in verband met de erosiebestendigheid van het dijkmateriaal. Het 'taai' laten reageren van de bres wordt dus beïnvloed door het 'uitslijten' van het materiaal en het verschil dat het water moet 'vallen'. Uit de bresgroei formule blijkt dat de bres breder zal worden als de bres niet dieper kan worden. Hierbij is de breedte van de bres niet afhankelijk van de diepte. De breedte is ook niet afhankelijk van de berm die achter de dijk ligt tenzij deze berm een zeer grote lengte heeft van enkele tientallen meters.



Figuur 6: Dwarsdoorsnede invloed zone bres.

In Figuur 6 is een dwarsprofiel weergegeven van de dijk bij Dodewaard om aan te geven waar de invloed zones zitten. In de afbeelding is de rivierwaterstand en de hoogte in het achterland aangegeven, bij een doorbraak zal in het achterland water komen te staan. Dit wordt in de berekening aangegeven als de waterstand in het achterland. Hoe hoger het verval tussen de waterstand in de rivier en de waterstand in het achterland, hoe dieper de bres zal worden vanwege de kracht waarmee het water naar beneden gaat. Daarnaast heeft de bresbreedte ook invloed op het overstromingsvolume. Hoe breder het gat hoe meer water erdoor kan stromen. Door hoogte en de breedte van de bres te kunnen beperken of langzamer te laten groeien kan er minder water doorheen en 'win' je tijd in het achterland waar het water binnen stroomt.

5 Software keuze

Om de berekeningen, ontwerpen, overstromingen en schade te berekenen heeft de projectgroep onderzoek gedaan naar verschillende softwarepakketten. Op basis van de gemaakte Excel berekening heeft de projectgroep eisen opgesteld waaraan de overstromingssoftware moet voldoen om het beoogde eindresultaat te kunnen halen. De andere pakketten komen voort uit ervaring van eerder projecten.

De projectgroep wil met de software: ontwerpen in dwarsdoorsnedes kunnen laten zien met hierin materiaal gebruik, overstromingen/ dijkdoorbraken kunnen visualiseren en schades met een programma kunnen berekenen. Hiervoor zijn meerde softwarepakketten nodig, omdat er geen programma is die het totaalpakket aanbiedt.

5.1 Softwareonderzoek

Om tot de juiste software te komen heeft de projectgroep verschillende organisaties aangeschreven die overstromingssoftware beschikbaar hebben. Via Deltares is geprobeerd om D-Hydro Suite te bemachtigen maar dit is helaas niet gelukt. Hieronder staan andere softwaremodellen waar de projectgroep om een licentie heeft gevraagd maar niet heeft gekregen:

- FME dynamic flood modeling;
- 3Di - Watermanagement;
- Infoworks;
- Lizard viewer.

Het vinden van een passend pakket is dus zo makkelijk nog niet en aan ieder pakket zitten voor- en nadelen. Hieronder staan alle softwarepakketten weergegeven en zijn scores toegekend op verschillende vlakken.

Tabel 3: Keuze afweging softwarepakketten.

Softwarepakket	Type	Verkrijgbaar (student)	Toepasbaarheid Nederland	Bresgroei formule	Gebruiks-vriendelijkheid
D-stability	Geotechnische aspecten	X	X	n.v.t.	X
Arcmap	Achtergrond kaart	X	X	n.v.t.	X
FME dynamic flood modeling	Overstroming visualisatie	X	-	X	-
3Di-watermanagement	Overstroming visualisatie	X	X	-	-
Infoworks	Overstroming visualisatie	-	X	-	-
Lizard viewer	Overstroming visualisatie	-	X	-	-
D-Hydro suite	Overstroming visualisatie	-	X	X	-
Sobek 1D-2D	Overstroming visualisatie	X	X	-	X
Tygron	Overstroming visualisatie	X	X	X	X
Schade en slachtoffer module	Schade berekening	X	X	n.v.t.	X
KosWat	Kosten ontwerp	X	X	n.v.t.	X

Toelichting tabel

In Tabel 3 is het overzicht van de softwarepakketten weergegeven waar de projectgroep een mogelijk had zag voor de toepassing binnen dit project. Deze pakketten zijn voor de verschillende doeleinden: berekeningen; geotechnische aspecten; kaart doeleinden; overstromingsvisualisaties; schadeberekening en kostenberekeningen.

Voor het project is het van belang of de software verkrijgbaar is, in Nederland te verkrijgen is en gebruiksvriendelijk is. Voor de overstromingssimulaties was hier nog een extra vereiste dat de bresgroei formule ingebouwd was of ingebouwd kon worden. Het verkrijgen van de software spreekt voor zich, maar omdat sommige pakketten buitenlands zijn is ook gekeken of het mogelijk is om dit in Nederland te runnen. Omdat het project relatief kort is om veel programma's eigen te maken is op basis van Reviews bepaald of het gebruiksvriendelijk is. Dit houdt dus in dat het makkelijker leer en bedienbaar is.

De x geeft aan dat het **goed is al dan niet mogelijk** en een - geeft aan dat het fout is al dan niet kan. Hieruit volgt voor veel softwarepakketten een logisch resultaat, maar voor de overstromingsvisualisatie was dit niet het geval. Eén van de twee softwarepakketten voor de overstromingsvisualisatie was niet voor de student verkrijgbaar. In Sobek 1D-2D kan handmatig een overstroming worden gevisualiseerd, hiervoor is een handmatige input vereist. Vanuit de QuickScan is gebleken dat dit met een **handberekening kan hier moesten** wel kleine upgrades aan worden gedaan zoals de inbouw van de afvoergolf. Het ander overstromingsprogramma is Tygron. Het programma is gebruiksvriendelijk en vanuit de helpdesk werden vragen snel beantwoord. Uiteindelijk is dus gewerkt met één programma met bresgroei formule en één programma waarin deze handmatig moest worden ingevoerd.

5.2 Resultaat

Vanuit de software keuzemodule heeft de projectgroep de benodigde software aangevraagd en kunnen krijgen zodat het kon worden toegepast in het project. Hieronder zijn de softwarepakketten weergegeven met daaronder een kleine uitleg:

- Excel;
- D-Stability;
- ArcMap;
- Sobek 1D-2D;
- Tygron;
- Schade en slachtoffer module;
- KosWat.

Software ten behoeve van berekening

Excel is gebruikt voor het maken van de Quickscan. In Excel kunnen formules worden ingevoerd en kunnen de berekeningen in veelvoud sneller worden uitgevoerd dan een handberekening.

Software ten behoeve van geotechnische aspecten

D-Stability is een programma dat vanuit de opleiding is gegeven waarin schematiseringen van onder andere dijken kunnen worden weergegeven en worden doorgerekend op het al dan niet optreden van een aantal faalmechanismen. De opdrachtgever heeft een referentie model van Merwede in D-Stability beschikbaar gesteld. Vanuit het referentiemodel kunnen de overige ontwerpen worden gemaakt. Voor Dodewaard heeft de projectgroep voor de **overzichtelijkheid ook gebruik gemaakt van D-Stability.**



Software voor kaart doeleinden

Het programma ArcMap is gebruikt voor het maken van het Sobek raster. ArcMap was alleen verkrijgbaar vanuit de Hogeschool Van Hall Larenstein en dit moest fysiek op school gebeuren. Het maken van een raster vergt veel tijd en tussenstappen. Zo moet de hoogte kaart eerst worden gedownload vanuit PDOK, dan het raster omzetten naar de juiste komma's, daarna ingevoerd in ArcMap om het op te schonen en het grid 25 x 25 meter te maken. Het verwachte overstromingsgebied kan niet als één hoogtekaart worden gedownload maar gebeurt in heel veel kleinere kaarten. Die worden stap voor stap omgezet in het afzonderlijke kleine rasters en daarna samengevoegd. Hoe groter het grid hoe meer werk het dus vergt. Vervolgens moet het worden omgezet naar AscII en dan moeten de komma's weer vervangen worden voor punten. Dit is dan ook de laatste stap voordat het kan worden ingevoerd. De afmetingen van het grid zijn door een expert vanuit school geadviseerd om de beste rekensnelheid en uitkomsten nauwkeurigheid te krijgen. De expert heeft eerder andere groepen begeleidt en het optimale grid komt voort uit een 'snelle' rekentijd met betrouwbare uitkomsten.

Software ten behoeve van overstromingssimulaties

Voor Sobek heeft de projectgroep een eigen licentie weten te bemachtigen waarna het benodigde programma gedownload kan worden. In Sobek kunnen overstroming visualisaties gemaakt worden. De input waardes moeten wel door de projectgroep worden ingevoerd. De rekentijd voor Sobek is vergeleken met Tygron lang. Waar Tygron in 30 minuten een model kan doorrekenen kan Sobek over eenzelfde soort model drie dagen doen.

Tygron is een gratis softwareprogramma waarin zeer veel simulaties kunnen worden gemaakt. Een voorbeeld hiervan is het berekenen van hittestress maar ook dijkdoorbraken. Voor scholen is een gratis licentie met een beperkt oppervlak van 1km² beschikbaar gesteld. De projectgroep heeft via de Avans (i.v.m. twee studenten die daar staan ingeschreven) een licentie weten te bemachtigen voor een ondergrond van 10km bij 10km. Er is voor twee verschillende modellen gekozen om de visualisaties te kunnen vergelijken. Het voordeel van Tygron is dat het een modernere visualisatie heeft ten opzichte van Sobek.

Software ten behoeve van Schade en slachtoffer berekeningen

De Schade en Slachtoffer module is door de projectgroep via Helpdeks water aangevraagd en heeft Helpdesk water heeft de software ook opgestuurd. Met de software kan de projectgroep de verwachte schade en slachtoffers bepalen die uit de overstromingssimulaties van Sobek komen.

Software ten behoeve van kostenberekening

Voor het bepalen van de koste voor het vervangen of vernieuwen van een dijk is gebruikt gemaakt van de Excel sheet KosWat (Frank den Heijer, 2022). KosWat **werk** met een rekenmethode ontwikkeld in 2017. Hierin kan worden aangegeven wat de prijs is per eenheid naar keuze. Ook neemt KosWat verschillende effecten mee zoals de maatregeling VZG en de maatregeling Grond. KosWat rekent niet alleen grondmaterialen uit maar ook speciale dijkmaterialen bijvoorbeeld kweldoeken, damwanden en infrastructuur. Met behulp van deze sheet kan er dus een realistische financiële verantwoording ontwikkeld worden.

6 Dijkontwerpen

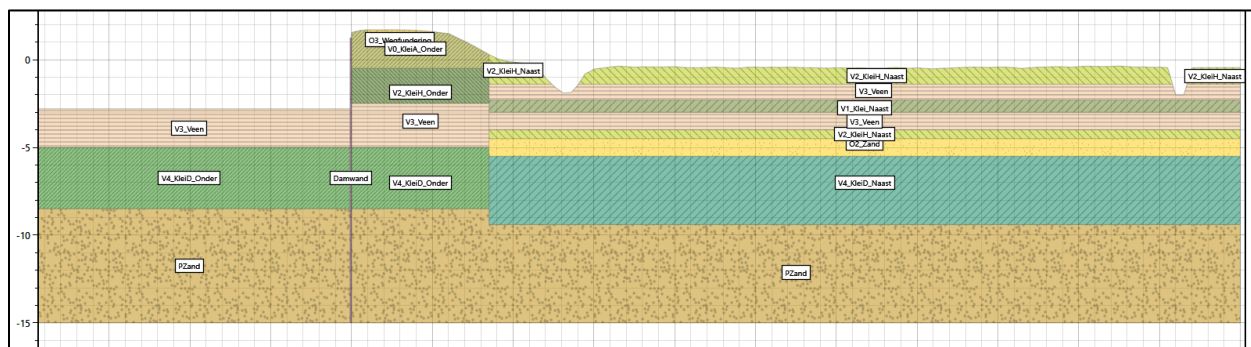
De volgende stap in het proces is het bedenken van de dijkontwerpen die 'taai' reageren in overstromingen. Deze dijkontwerpen komen voort uit de effecten van de bresgroei. De indicatoren die de bresgroei kunnen beïnvloeden zijn:

- Diepte van de bres;
- Breedte van de bres;
- Kritieke stroomsnelheden dijkmateriaal.

Op basis van het hoofdstuk Invloed zones taaie dijken zijn ontwerpen gemaakt voor de situaties in het Merwedekanaal en Dodewaard met als doel om de waterinstroom te beperken/ langzamer te laten verlopen. In Bijlage B zijn nog meer ideeën uitgewerkt met materialen die de bres kunnen beïnvloeden.

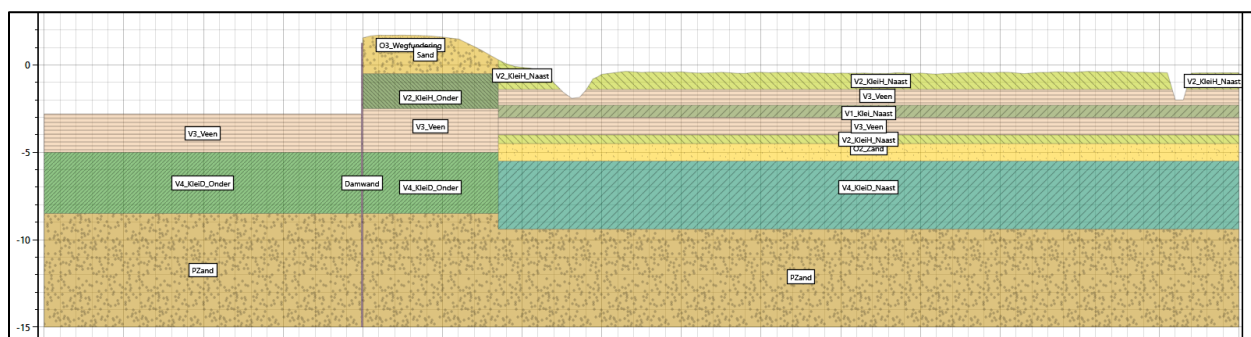
6.1 Merwedekanaal

Om de effecten van de verschillen in bresgroei te kunnen aantonen heeft de projectgroep gekozen om de huidige situatie als variant 0 te beschouwen. De huidige situatie betreft een dijk met een kern van klei en een damwand op 1,25 m+ NAP. De gegevens van de dijk zijn aangeleverd door het waterschap Rivierenland.



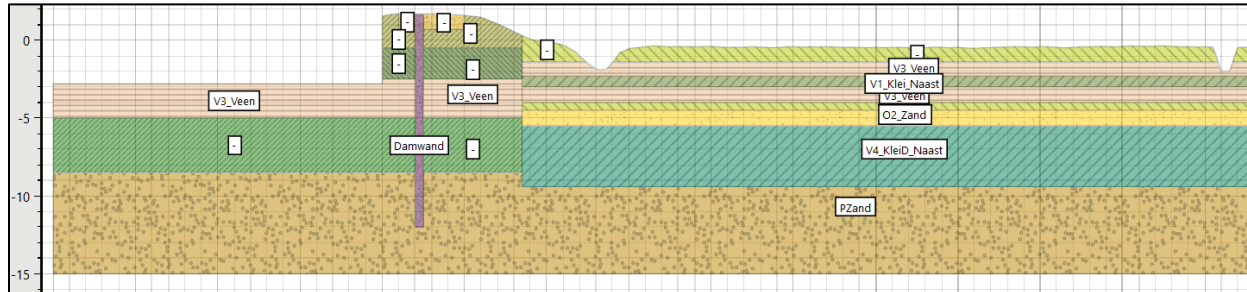
Figuur 7: Variant 0, Huidige situatie

Bij variant 1 is er gekozen om de kleikern van variant 0 te vervangen met een zandkern en om de damwand te laten staan. Hierdoor is het mogelijk om de gevolgen van een zand- of kleikern te vergelijken.



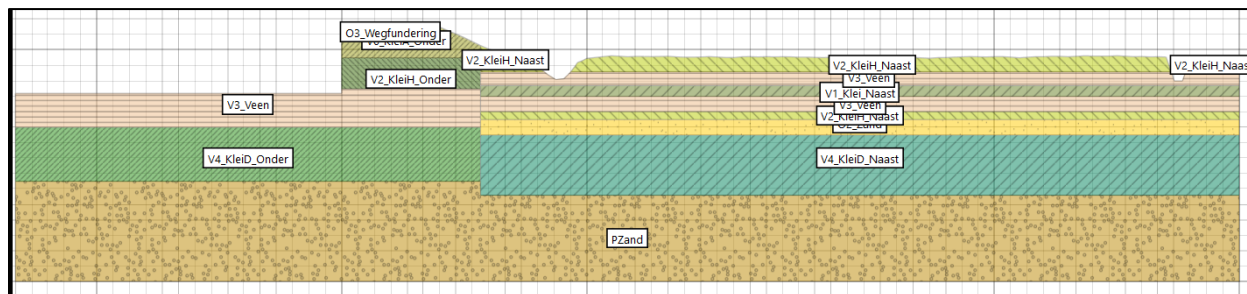
Figuur 8: Variant 1, vervangen kleikern met zandkern

Bij variant 2 en 3 is er gekozen voor een nieuwe damwand met een hoogte van 1,55 m+ NAP en respectievelijk een klei- en zandkern. Er is alleen gekeken naar het effect van het verhogen van de damwand van 1,25 m+ NAP naar 1,55 m+ NAP en niet naar de meest optimale positie van de damwand in de dijk.



Figuur 9: Variant 2 en 3, verhogen damwandhoogte

Voor de laatste twee varianten 4 en 5 is er gekozen voor een dijk zonder damwand met respectievelijk een klei- en zandkern. Hier is voor gekozen om het mogelijk te maken om inzicht te krijgen in het effect van het toepassen van een damwand.

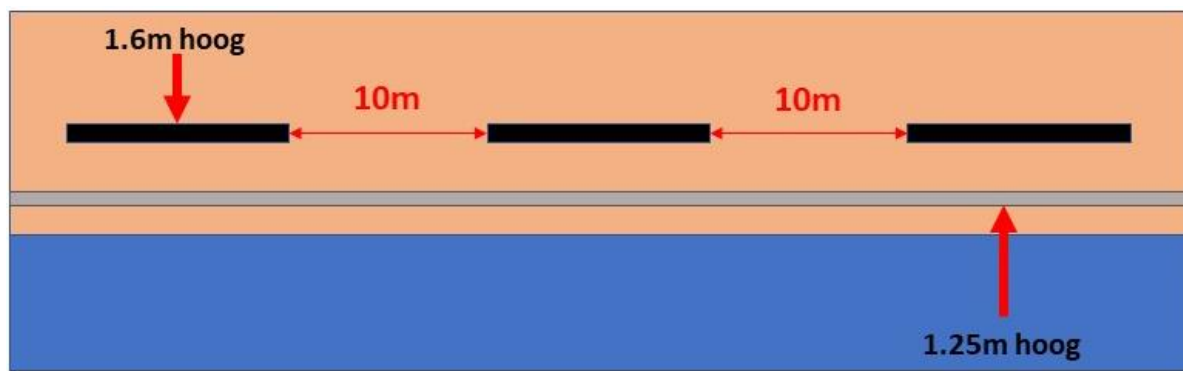


Figuur 10 Variant 4 & 5 geen damwand.

Omdat de bresbreedte een grote invloed heeft over de snelheid waarmee het water het achterland in kan stromen is bij variant 6 gekozen voor een ontwerp waarin de bresbreedte wordt beperkt. Namelijk het toepassen van damwanden die in de hoogte tot de bovenkant van de dijk lopen. Deze damwanden worden om de 10 meter neergezet. Hierdoor is de bresbreedte beperkt tot maximaal 10 meter.

De projectgroep is ervan uitgegaan dat de damwanden stabiel kunnen worden ontworpen, ook ingeval van falen van de dijk. Dit houdt in dat de damwanden ook dan niet falen. Echter zal het uitstromende water achter de bres een groot gat veroorzaken wat ertoe kan leiden dat de damwanden mee worden getrokken en dus niet meer stabiel zijn. De projectgroep is ervan uitgegaan dat er geen ander type damwand nodig is dan in normale berekeningen.

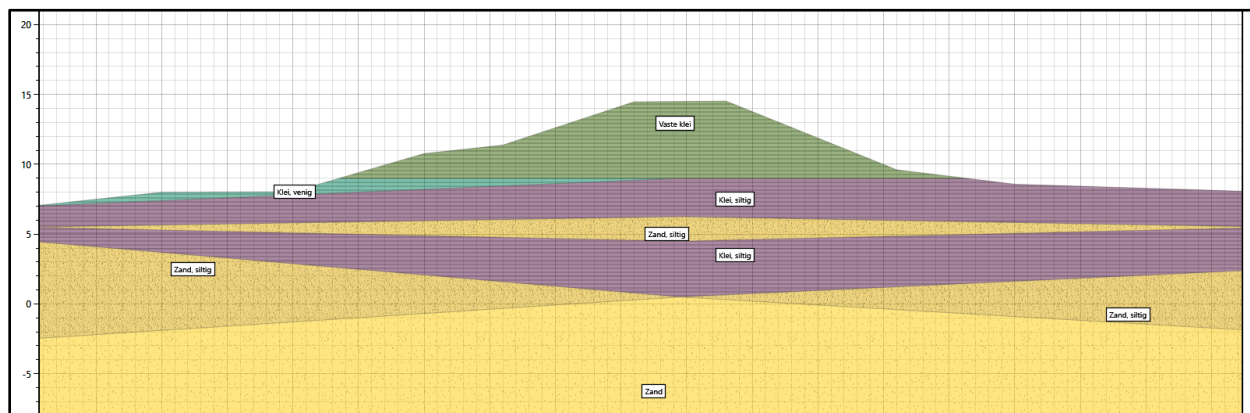
In Figuur 11 is een bovenaanzicht van dit ontwerp te zien. Er wordt bij deze variant van uitgegaan dat dit toegepast zal worden bij de huidige situatie, dus de dijk zal een kleikern en een damwand van 1,25 meter hebben.



Figuur 11: Variant 6, damwandtrajecten van om de tien meter.

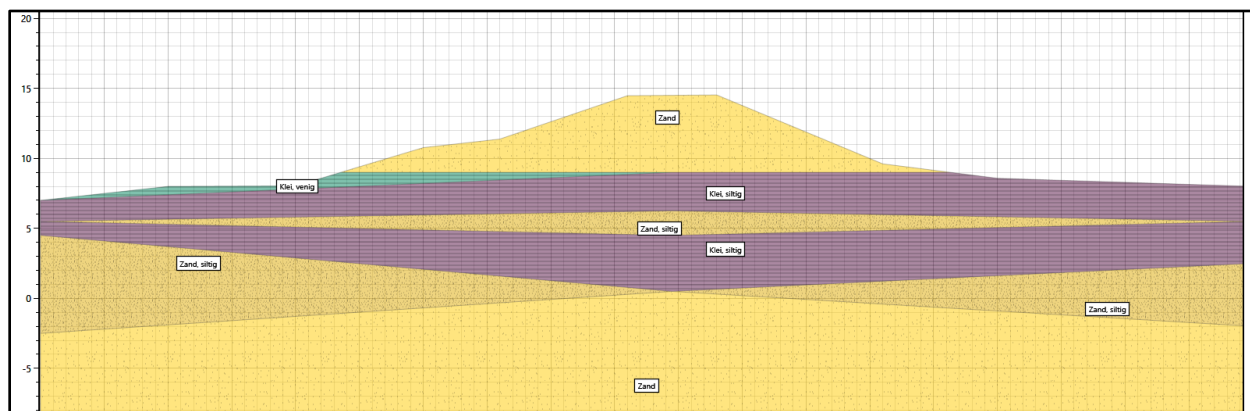
6.2 Dodewaard

Voor Dodewaard heeft de projectgroep zelf een model voor de 0 - situatie gemaakt op basis van gegevens van Arcadis (Wiertsema & Partners, 2016). Het uitgangspunt van de dijk is dat deze een hoogte heeft van 13,5 m+ NAP en het dijklichaam bestaat voornamelijk uit klei. De dijkhoogte is gekozen met behulp van de AHN-viewer en is de laagst mogelijke waarde van het gegeven dijktraject door de opdrachtgever. De schematisering is weergegeven in Figuur 12 als variant 0.



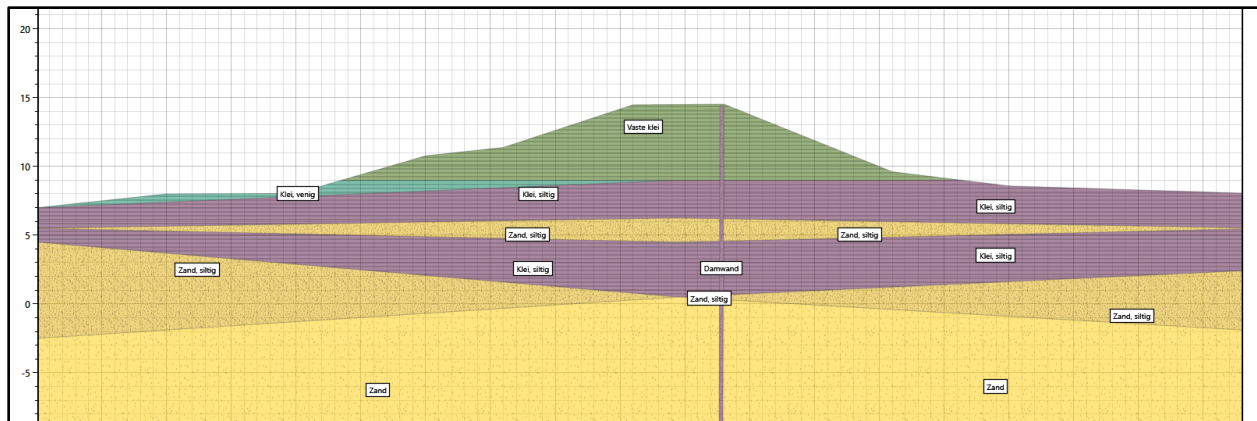
Figuur 12: Variant 0, Huidige situatie.

Om de verschillen in erosie van materialen te kunnen visualiseren en omdat dijken vaak bestaan uit zand is ervoor gekozen om ook een variant met een dijklichaam van zand door te rekenen. Het verschil met variant 0 is dat de variant in Figuur 13 een dijklichaam van zand heeft.



Figuur 13: Variant 1, vervanging zanddijk naar kleidijk.

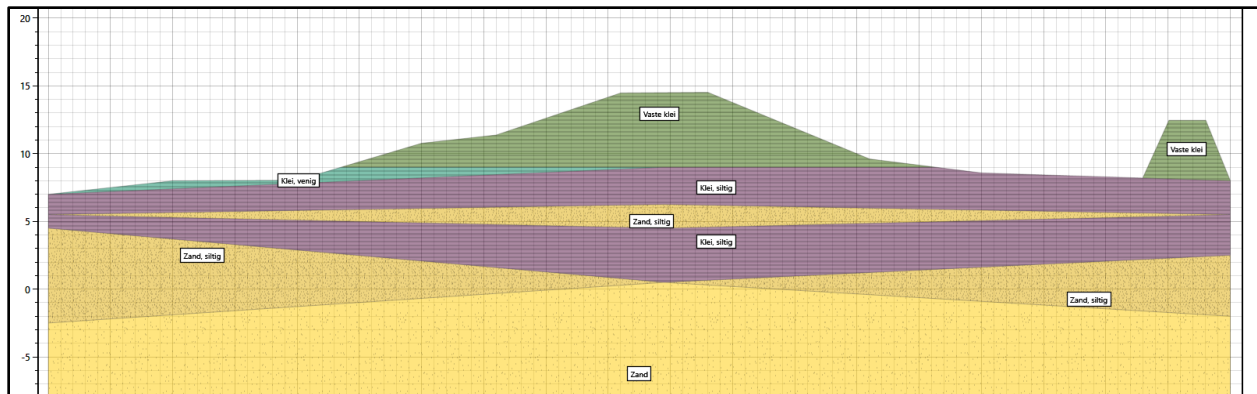
Bij variantanten 2 & 3 is ervoor gekozen om een damwand in de dijk te plaatsen. De aangenomen damwand hoogte bedraagt 12,5 meter en is 1,0 m onder de dijk kruin. De hoogte is aangenomen op basis van inzichten in de projectgroep. Variant 2 is de variant met een dijklichaam van klei en variant 3 heeft een dijklichaam van zand.



Figuur 14: Variant 2 & 3, damwand.

De projectgroep heeft in het Excel model ontdekt welke invloedparameters er zijn op de bresgroei. Eén hiervan is het waterstandverschil voor - en achter de bres. Door een extra dijk achter de bestaande dijk aan te leggen en deze dijk hydraulisch stabiel te maken. Het idee is dat de tweede dijk op een manier gedimensioneerd wordt waarin de kans van falen kleiner kan worden gemaakt dan bij de 'grote' dijk. Het voordeel zou dan moeten zijn dat het goedkoper is dat een tweede dijk wordt gebouwd dan de 'grote' dijk wordt verstevigd. Met de tweede dijk wordt de bresgroei bij bestaande dijk kunnen verminderd doordat het verval van het water wordt beperkt. Het verval wordt beperkt doordat tussen de twee dijken water komt te staan. De bres zal dan minder snel groeien totdat het waterniveau is bereikt, daarna wordt de bres niet dieper. Het water wat dan nog in de rivier zit zal als een overlaat over de tweede dijk gaan.

Het water dat tussen de dijken wordt gevuld is afhankelijk van het traject. De rivieren lopen af richting zee en dit betekent dus dat er een verhang komt te zitten in de tweede dijk. Het is mogelijk om de dijk aflopend te maken met de 'grote' dijk maar dan zal de dijk lager gelegen onderlopen als het hoger op doorbreekt. Als de dijk één vaste NAP waarde meekrijgt is de dijk overal even hoog. Het nadeel is dat de lageregelegen gebieden extreem veel moeten ophogen. Door te werken met trajecten van enkele kilometers kan dit worden voorkomen en kunnen er compartimenten worden gebouwd die onder stromen. Dit heeft de projectgroep doorgerekend. Hieronder is de situatie getekend en voor variant 4 is uitgegaan van klei en variant 5 van zand.



Figuur 15: Variant 4 & 5, tweede kleine dijk in het achterland.

De toepassing van variant 4 & 5 in de openbare ruimte zal nader onderzocht moeten worden. De huizen die dicht achter de dijk zijn gebouwd zorgen ervoor de tweede dijk moeilijk inpasbaar is omdat de huizen daar al staan. Daarnaast beïnvloeden de dorpen de uitgerekende theoretische berging en zal er waarschijnlijk met tussenbergingen moeten worden gewerkt. Voor het traject is een vaste lengte genomen zonder dat er rekening is gehouden met dorpen. Het ontwerp zal niet goed toepasbaar zijn voor Dodewaard maar kan op andere trajecten wel degelijk uitkomst bieden, daarom is het ontwerp toch meegenomen in de berekeningen. De hoogte van de dijk zal waarschijnlijk ook voor weerstand zorgen in de ruimtelijke ordening. Twee dijken achter elkaar zal minder mooi worden gevonden.

7 Visualisering

In dit hoofdstuk worden de overstromingen op basis van de verschillende varianten gevisualiseerd. Dit is voor alle situaties apart weergegeven en bij elke visualisatie wordt er uitgelegd wat er gebeurt. Tot slot worden de bevindingen van de visualisering in combinatie met de ontwerpen besproken. In de visualisering is geen rekening gehouden met tussentijds menselijk ingrijpen om de effecten van overstroming te verminderen.

7.1 Visualisatie Merwedekanaal

Voor het maken van een overzichtelijke visualisatie van de overstroming bij het Merwedekanaal is gebruik gemaakt van het softwarepakket Tygron. Ook kan er gebruikt gemaakt worden van een gebied van 10 km² wat voor de situatie bij voldoende is. Tygron gebruikt voor het berekenen van de bresgroei dezelfde formule als bij de Excel QuickScan. In Tygron is het ook mogelijk om met een attribuut de bresbreedte en diepte te meten.

Bij elke variant is er een figuur van de eindsituatie te zien na 36 uur. In Bijlage D is er voor elke variant per tijdstap de situatie te zien. De plek van doorbreken is bij elke variant hetzelfde en is aangegeven in Figuur 16 met een rood kruis.

7.2 Variant 0, klei met damwand 1,25 m

In Figuur 16 is de overstromingsvisualisatie van de huidige situatie te zien. Hierin is te zien dat het gebied wat overstroomt relatief klein is, ongeveer 0,92 km². Ook overstroomt er alleen maar weiland en geen woningen of bedrijven. Er stroomt een totaal volume van 276.930m³ het achterland in. De maximale waterhoogte in het achterland is ongeveer 30 cm.

Water Balance			
Name	Volume (m3)	Name	Volume (m3)
▼ In		▼ Out	
▼ Breach		▼ Land Surface	
Breach area klei wand	276.930 m3	Land Surface	66.915 m3
		▼ Water Surface	
		Water Surface	162.066 m3
		▼ Underground Unsaturate...	
		Unsaturated Undergro...	47.953 m3
	276.930 m3		276.933 m3
Water Balance error: 3 m3 (0%)			

Figuur 17: Waterbalans zand met damwand 1,25m.



Figuur 16: Merwedekanaal zand met damwand 1,25m.

7.2.1 Variant 1 – zand met damwand 1,25 m

Uit Figuur 18 blijkt dat bij een dijkdoorbraak met een dijk met dezelfde damwand hoogte maar een zandkern in plaats van een kleikern er meer water het achterland in stroomt. Dit blijkt ook als je naar de waterbalans van Tygron voor zand in Figuur 17 en voor klei in Figuur 19 kijkt. Namelijk 276.930m^3 bij klei tegen 334.624m^3 bij zand. Op het eerste gezicht lijkt dit niet te kunnen kloppen omdat bij Merwede er sprake is van een kanaal en de hoeveelheid water die eruit zal stromen gekoppeld is aan de damwand hoogte. Maar dit verschil is uit te leggen doordat klei zich kleveriger gedraagt dan zand. En hoe dichter de rivierwaterstand zakt tot de damwand hoogte hoe lager de kracht zal zijn die het water op de bres uitoefent. Hierdoor zal de bres niet groeien tot damwandhoogte.

Water Balance

Figuur 19: Waterbalans klei met damwand 1,25m.



Figuur 18: Merwedekanaal zand met damwand 1,25 m.

7.2.2 Variant 2 – klei met damwand 1,55 m

De overstromingsvisualisatie van variant 2 is te zien in Figuur 21. Hierin is duidelijk het effect van het verhogen van de damwand te zien. Er stroomt veel minder water uit vergeleken met een damwand van 1,25m. Namelijk maar 29.889m³ bij een verhoogde damwand tegen 276.930m³ bij een damwand van 1,25m. Dit is ook te zien in de waterbalans in Figuur 20.

Water Balance			
Name	Volume (m3)	Name	Volume (m3)
▼ In		▼ Out	
▼ Breach		▼ Land Surface	
Breach area klei wand 1.55	29.889 m3	Land Surface	4.833 m3
		▼ Water Surface	
		Water Surface	18.389 m3
		▼ Underground Unsaturated ...	
		Unsaturated Underground	6.666 m3
	29.889 m3		29.889 m3
Water Balance error: 0 m3 (0%)			

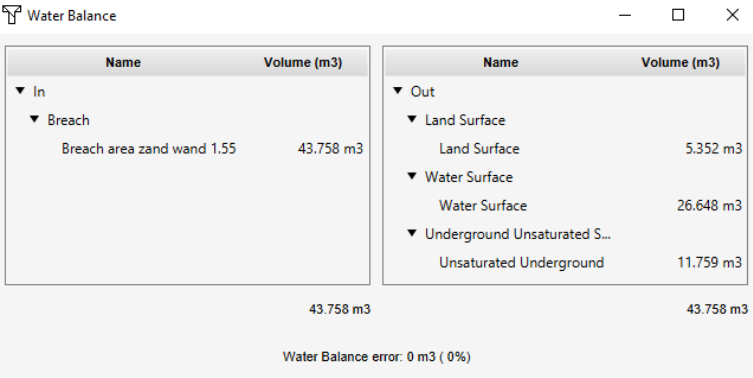
Figuur 20: Waterbalans klei met damwand 1,55m.



Figuur 21: Merwedekanaal klei met damwand 1,55m.

7.2.3 Variant 3 – zand met damwand 1,55 m

In Figuur 22 is te zien dat er bij een dijk met een verhoogde damwand en zandkern meer water uitstroomt dan bij een kleikern: 43.758m³ bij zand tegen 29.889m³ bij klei. Dit komt door hetzelfde effect omschreven in 7.2.1.



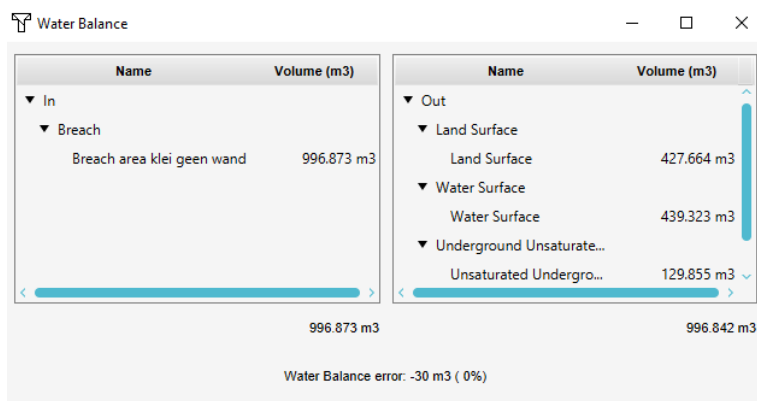
Figuur 23: Waterbalans zand met damwand 1,55m.



Figuur 22: Merwedekanaal zand met damwand 1,55m.

7.2.4 Variant 4 - klei zonder damwand

In Figuur 24 is te zien het weghalen van een damwand catastrofaal is voor de hoeveelheid water wat het achterland in stroomt. Te zien in Figuur 25 stroomt er een totaal van 996.873m³ het achterland in. Vergeleken met de huidige situatie met een damwand van op 1,25m en een volume instroom van 276.930m³ is het meer dan verdrievoudigd. Wel is ondanks de grote hoeveelheid water dat het gebied in stroomt maar één woning die nat wordt. Dit komt omdat alle andere woningen hoger liggen.



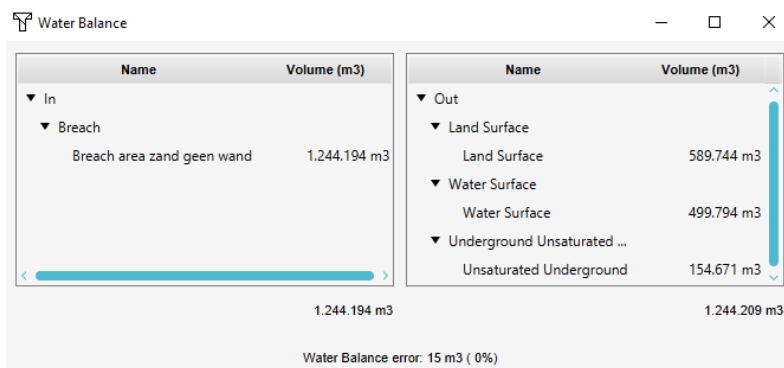
Figuur 25: Waterbalans klei geen damwand.



Figuur 24: Merwedekanaal klei zonder damwand.

7.2.5 Variant 5 – zand zonder damwand

Net zoals bij de eerdere vergelijkingen tussen klei- en zandijken is er ook bij de situatie zonder damwand bij zand meer instroom dan bij klei. 1.224.194m³ bij zand tegen 996.873 m³ bij klei. Deze extra hoeveelheid water zorgt er echter niet voor dat er meer woningen nat worden.



Figuur 27: Waterbalans zand geen damwand.



Figuur 26: Merwedekanaal zand zonder damwand.

7.2.6 Variant 6 – Damwand elke 10 meter

Bij variant 6 stroomt er vergeleken met variant 0 iets minder water in het achterland, 252.313m³ tegenover 276.930m³. In variant 6 wordt de opbouw van variant 0 gebruikt met een damwandhoogte van 1,25 meter. De damwand trajecten hebben een hoogte 1,6 meter de tussenafstand van 10 meter, hierdoor kan de bres niet groter worden dan 10 meter. De maximale diepte tot waar de bres kan groeien is 1,25 meter, maar door de beperkte bresbreedte en de cohesie van het materiaal zakt de bres niet tot 1,25 meter maar blijft het daarboven. Hierdoor stroomt er minder water in ten opzichte van variant 0.

Water Balance

Name	Volume (m3)	Name	Volume (m3)
▼ In		▼ Out	
▼ Breach		▼ Land Surface	
Breach area klei wand elke 10m	252.313 m3	Land Surface	24.357 m3
		▼ Water Surface	
		Water Surface	182.466 m3
		▼ Underground Unsaturated Stor...	
		Unsaturated Underground	45.490 m3
	252.313 m3		252.313 m3
Water Balance error: 0 m3 (0%)			

Figuur 29: Waterbalans damwand elke 10 meter.



Figuur 28: Merwedekanaal damwand elke 10 meter.

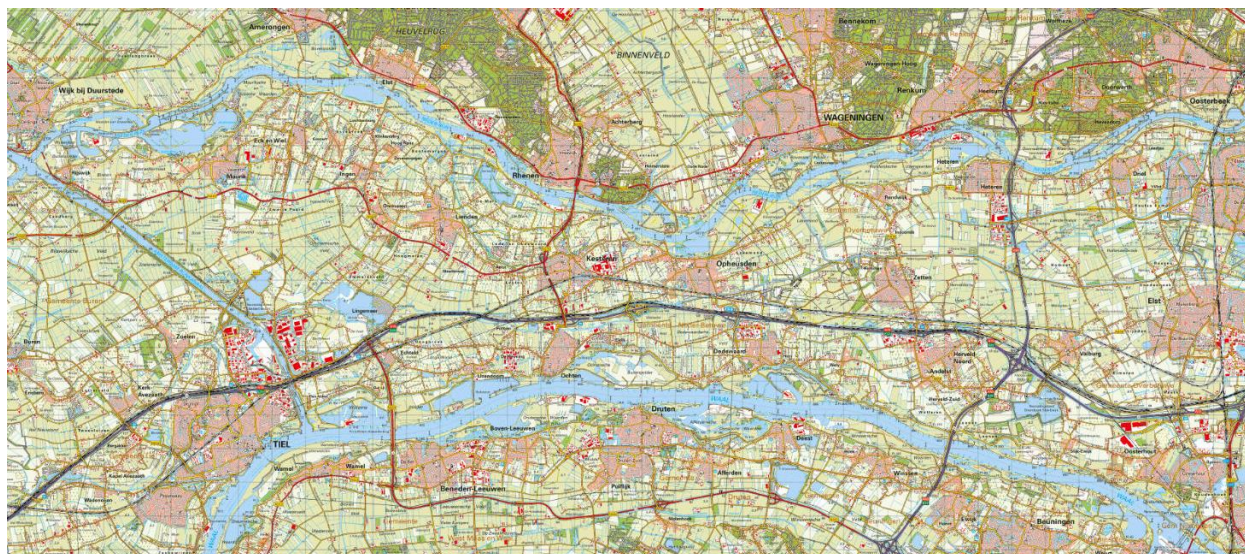
7.3 Visualisatie Dodewaard

Voor het maken van een overzichtelijke visualisatie van de overstroming bij Dodewaard is gebruik gemaakt van Sobek 1D2D. Het programma maakt gebruik van de rekenkracht van je eigen computer en dit zorgt voor een zeer lange simulatie van tot wel enkele dagen. De uitkomsten van Sobek zijn op basis van invoergegevens die zelf moeten worden aangeleverd. Hiervoor heeft de projectgroep het zelfgemaakte Excel model gebruikt. Sobek kan wel rekenen met een onbeperkt groot gebied, dit heeft wel invloed op de rekentijd. De rekentijd voor variant 0 bedroeg drie dagen.

In Figuur 30 is een legenda voor de waterdieptes ingevoegd. De tussenstappen van de overstroming zijn weergegeven in Bijlage E. In Figuur 31 is een overstromingskaart van het overstromingsgebied weergegeven.

Color	Limit	Label
	☐ 0,02	<= 0,02
	☐ 0,10	> 0,02
	☐ 0,20	> 0,10
	☐ 0,30	> 0,20
	☐ 0,40	> 0,30
	☐ 0,50	> 0,40
	☐ 0,60	> 0,50
	☐ 0,70	> 0,60
	☐ 0,80	> 0,70
	☐ 0,90	> 0,80
	☐ 1,00	> 0,90
	☐ 1,10	> 1,00
	☐ 1,20	> 1,10
	☐ 1,30	> 1,20
	☐ 1,40	> 1,30
	☐ 1,50	> 1,40
	☐ 1,60	> 1,50
	☐ 1,70	> 1,60
	☐ 1,80	> 1,70
	☐ 1,90	> 1,80
	☐ 2,00	> 1,90
	☐ 2,10	> 2,00
	☐ 2,20	> 2,10
	☐ 2,30	> 2,20
	☐ 2,40	> 2,30

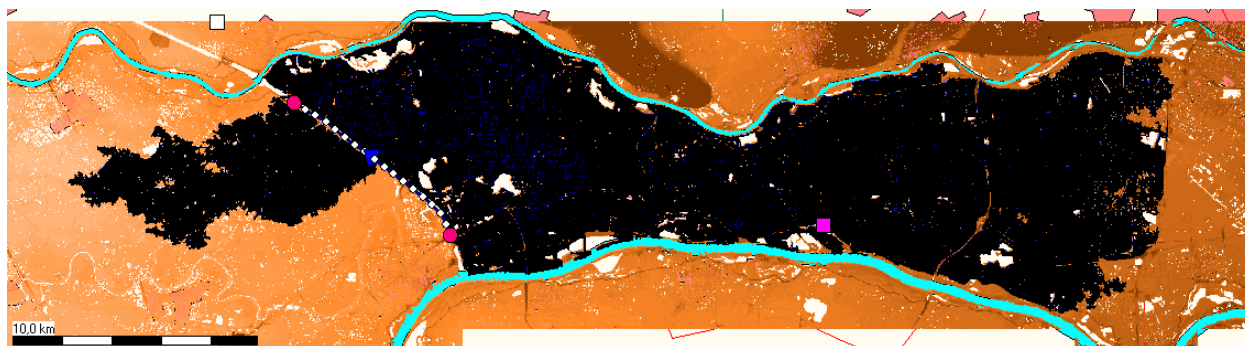
Figuur 30: Overstromingsdieptes varianten.



Figuur 31: Topografische kaart van overstromingsgebied. (Topotijdreis, 2020)

7.3.1 Variant 0 - dijklichaam klei

In Figuur 32 is de overstromingsvisualisatie van een doorbraak van een huidige dijk weergegeven. De overstroming is tot ver in het achterland merkbaar. In deze variant gaat het zelfs het Amsterdam-Rijnkanaal over. De wegen en spoorlijnen zorgen er gedurende de overstroming voor dat het water wordt gestuwd als een soort 'badkuip' en stroomt dan verder naar de volgende 'badkuip'. De wegen en spoorlijnen zorgen dus voor een onevenredige overstroming. De uitgangspunten van het model zijn in de Excel berekening weergegeven, zie Bijlage C.

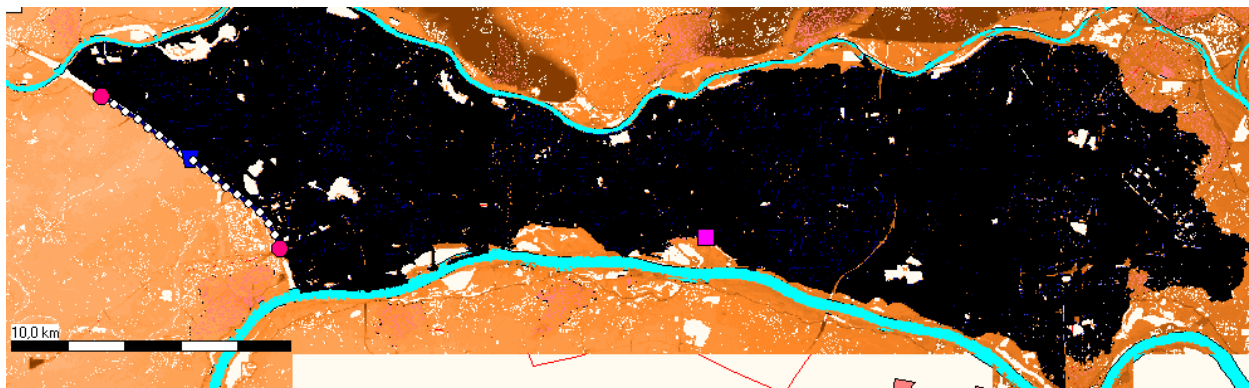


Figuur 32: Eindsituatie overstroming na 60 uur voor variant 0.

7.3.2 Variant 1 - dijklichaam zand

In Figuur 33 is de overstromingsvisualisatie voor een dijkdoorbraak van zand weergegeven. Een verschil dat meteen zichtbaar wordt is dat het water dat bij de overstroming over de dijk gaat, zeewaarts stroomt. Bij het dijklichaam van zand stroomt het de andere kant op en omhoog. De projectgroep denkt dat dit te maken heeft met het grotere volume dat in het achterland stroomt bij de zanddijk. Het water zal door de weerstand niet snel genoeg naar beneden afgevoerd worden en daardoor stroomt het omhoog.

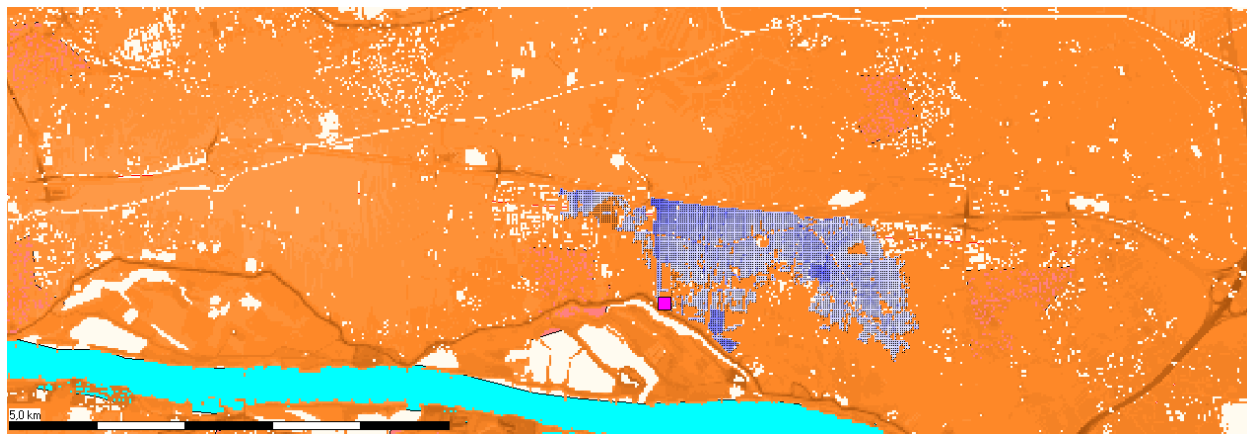
In het dijklichaam is gebruik gemaakt zand dit heeft een grotere doorlatendheid en een grotere brosheid ten opzichte van klei. Dit resulteert in een snelle eindsituatie, waarin de bres sneller groeit. Een belangrijk gegeven is dat de rivierwaterstand in verloop van de tijd afneemt. Dit is in de Excel-spreadsheet verwerkt. Als de bres in de eerste uren sneller groeit is er een hogere rivierwaterstand aanwezig en stroomt er meer water uit ten opzichte van een langzamere bresgroei. Want als de bres langzamer dieper en breder wordt zal de rivierwaterstand in de tijd dalen. Een bresdiepte van bijvoorbeeld vijf meter bij zand heeft een hogere waterstand dan wanneer bij klei een bresdiepte van vijf meter is. Dit komt doordat de waterstand afneemt in de tijd en de bres bij klei langzamer groeit.



Figuur 33: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 1.

7.4 Variant 2 - damwand; dijklichaam klei

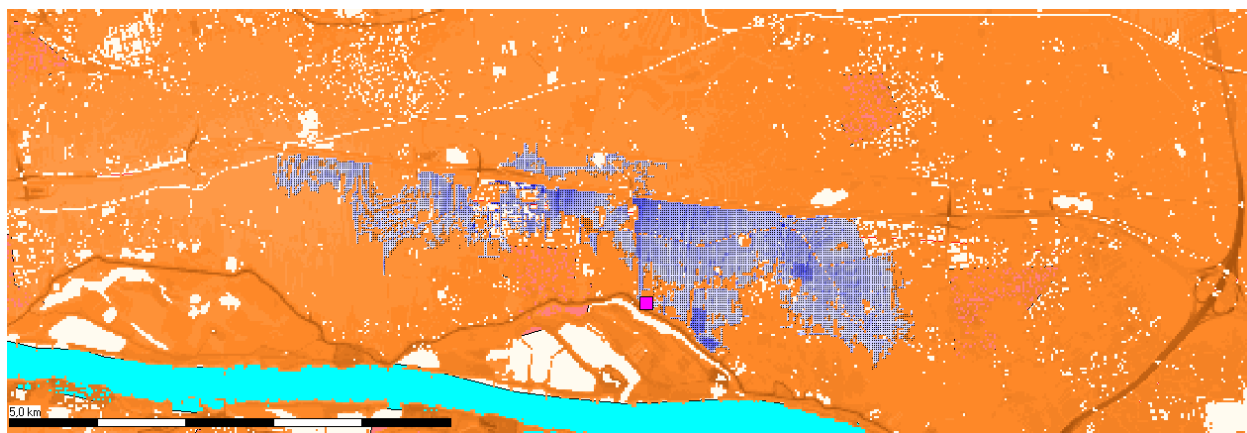
De effecten van een toepassing van een damwand met een hoogte van 12,5 meter + NAP zijn weergegeven in Figuur 34, dit is gekozen zodat de hoogte van de damwand één meter onder de kruinhoogte is. Het instroom volume neemt significant af en de gevolgen in het achterland zijn kleiner ten opzichte van de 0-situatie. Dit komt door de damwandhoogte. De hoogte van de damwand wordt de maximale bresdiepte, de bres zal dus niet dieper worden dan de bovenkant van de damwand.



Figuur 34: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 2.

7.4.1 Variant 3 - damwand; dijklichaam zand

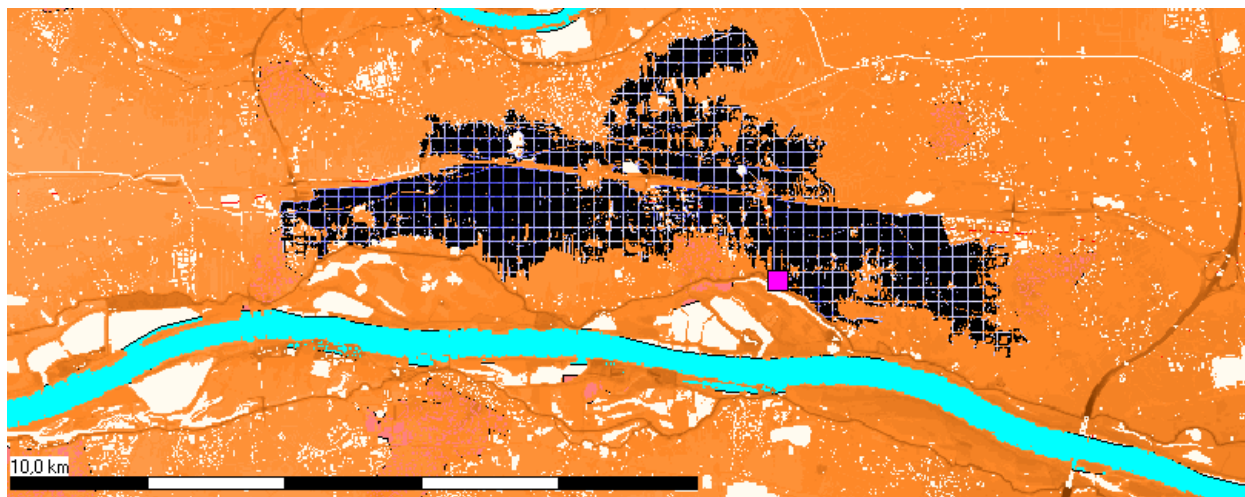
In Figuur 35 is de overstromingseindsituatie voor variant 3 weergegeven. De visualisatie laat zien dat het dijklichaam met zand meer water door laat gaan ten opzichte van een dijklichaam van klei. Dit heeft uiteraard effect op de schade die zal ontstaan in het achterland.



Figuur 35: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 3.

7.4.2 Variant 4 - extra dijk; dijklichaam klei

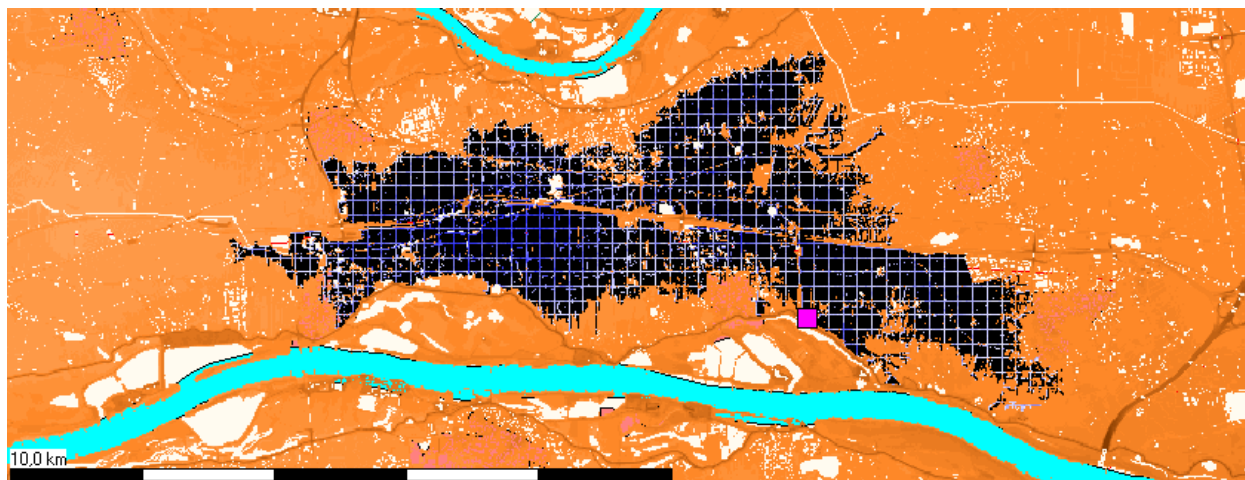
In Figuur 36 is de visualisatie van de extra dijk te zien zoals getekend in Figuur 15. Het overstromingsvolume uitgezet in de tijd, wat in Excel is uitgerekend, wordt ingevoerd in Sobek. Ervan uit gaande dat de extra dijk een **lengte van 28 kilometer is en** een tussen oppervlak van $16,3 \text{ m}^2$ kan een extra buffer ruimte van 300.000 m^3 worden gerealiseerd. Daarnaast neemt het waterpeil toe tot 12,0 meter en werkt het dus als een damwand, want de 'nieuwe dijk' kan worden geconstrueerd dat er geen bresgroei kan ontstaan.



Figuur 36: Eindsituatie overstroming na 49 uur voor variant 4.

7.4.3 Variant 5 - extra dijk; dijklichaam zand

In Figuur 37 is dezelfde simulatie uitgevoerd als voor variant 4, maar dan met een dijklichaam van zand. Het verschil in watervolume is hierin duidelijk te zien. Het wordt duidelijk zichtbaar dat een doorbraak van een dijklichaam met zand een groter effect heeft ten opzichte van een dijklichaam van klei.



Figuur 37: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 5.

7.5 Relatie ontwerp en overstromingsvisualisatie

In Tabel 4: Overstromingsvolume van de varianten voor Merwedekanaal Tabel 4 zijn van de verschillende scenario's de bijbehorende overstromingsvolume te zien voor situatie Merwedekanaal. Hierin is duidelijk het effect van een damwand zichtbaar. Zo zal er bij het verhogen van de damwand bij een kleidijk nog maar 10% van het oorspronkelijke volume uitstromen. Bij een zanddijk is dit nog maar 13%.

Ook is het verschil tussen een klei- en zanddijk te zien. Bij een kleidijk stroomt er ongeveer tussen de 20-30% minder water uit.

Tabel 4: Overstromingsvolume van de varianten voor Merwedekanaal

Scenario	Overstromingsvolume (m ³)
0 – huidig dijk klei	276.930
1 – huidig dijk zand	333.624
2 – verhoogde wand klei	29.889
3 – verhoogde wand zand	43.758
4 – geen wand klei	996.873
5 – geen wand zand	1.224.194
6 – damwandtraject 10 m	252.313

In Tabel 5 zijn de overstromingsvolume van de verschillende varianten voor Dodewaard weergegeven. In de tabel is duidelijk zichtbaar hoe de ontwerpen zich verhouden doordat het overstromingsgebied hieraan is gekoppeld. Tussen de ontwerpen wordt goed zichtbaar wat het effect van een damwand is. Doordat variant 4 & 5 eigenlijk ook als een damwand gedraagt kan voorzichtig worden opgemaakt dat een halve meter damwand een significant verschil levert.

In de erosiebestendigheid tussen de materialen klei en zand wordt zichtbaar dat klei gemiddeld genomen 40% minder water door laat stromen dan zand. Dit toont aan dat werken met een langzamer eroderend materiaal leidt tot een lager overstromingsvolume.

Tabel 5: Overstromingsvolume van de varianten voor Dodewaard.

Scenario	Overstromingsvolume (m ³)
0 - huidig dijk klei	580.000.000
1 - huidige dijk zand	850.000.000
2 - damwand klei	950.000
3 - damwand zand	1.475.000
4 - extra dijk klei	5.100.000
5 - extra dijk zand	8.600.000

8 Gevolgen berekening

De volgende stap is het berekenen van de schade voor de verschillende overstromingssimulaties die bij de verschillende ontwerpen horen. Door dit uit te rekenen kan worden bepaald hoe de verschillende ontwerpen zich onderling verhouden en wat de daadwerkelijk effecten zijn in de schade kosten. Voor de schadeberekening rekent de projectgroep de economische schade uit.

Voor de berekening bij het Merwedekanaal is gebruik gemaakt van een handberekening. Voor de schadeberekening bij Dodewaard is gebruik gemaakt van een schade slachtoffer module met behulp van invoerwaardes vanuit Sobek.

8.1 Merwedekanaal

Voor het Merwedekanaal is het schadebedrag handmatig berekent omdat de schadeberekening vanuit Tygron te ingewikkeld is om op korte termijn te leren. De uitvoergegevens van Tygron zijn niet geschikt om in andere softwarepakketten te gebruiken. De handberekening is uitgevoerd op basis van de overstromingsvisualisatie.

8.1.1 Slachtoffers

Bij de dijkdoorbraak in het Merwedekanaal overstroomt er in de ergste situatie alleen weiland en een woning. Ook is het hoogste waterpeil van de overstroming niet hoger dan 40cm. Dit zal betekenen dat het aantal slachtoffers 0 is.

8.1.2 Directe schade

Voor de directe schadeberekening bij het Merwedekanaal is een handberekening gemaakt. Hierbij is gebruik gemaakt van “Standaardmethode 2017 Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen” (Kymo Slager, 2017) (zie Figuur 110). De oppervlaktes zijn berekend met behulp van Google Maps.

Berekening

Vanuit de overstromingssimulatie is het aantal m² wat is onderstroomt uitgerekend en is aangegeven voor welke doeleinden dit wordt gebruikt, bijvoorbeeld landbouwgrond. Om te berekenen wat de uiteindelijke schade is in euro's heeft de projectgroep kostenkengetallen gebruikt van Figuur 110: Schade per m² :

- Maximale schade voor landbouwgrond bedraagt €1,83 per m²;
- Maximale schade voor getroffen woning bedraagt €1000,- per m².

De hoeveelheden vermenigvuldigt met de kostenkengetallen geeft de schade weer. Door dit voor elke variant te berekenen en per variant de schades op te tellen ontstaat een totaal schade per variant. In Bijlage H is de totale berekening weergegeven en in Tabel 6 zijn de totale kosten per variant weergegeven.

8.1.3 Resultaten Merwedekanaal

In Tabel 6 staan de totale kosten weergegeven per dijkvariant. Uit deze tabel kunnen conclusies getrokken worden over de uitkomsten van de gevolgen. Uit het vergelijking tussen variant 0 en 1 is te zien dat er minder schadekosten zijn wanneer er klei gebruikt wordt.

Variant 4 en 5 vallen op, omdat hieruit blijkt dat het verwijderen van de damwand een negatief effect heeft op de schade en ook dat het niet uitmaakt of de dijk van zand of klei is in deze situatie.

De twee laagste totaalschades uit de tabel zijn variant 2 en 3. Het verhogen van een wand is voor Merwede het meest positief als er gekeken wordt naar alleen de schadebeperking. Ook hier is te zien dat zowel klei als zand geen verschil maakt.

Al deze conclusie zijn te verklaren aan de hand van de visualisaties in dit rapport.

Tabel 6: Totale schade per variant voor het Merwede kanaal.

Varianten	Grasland m²	Bebouwing m²	Totale schade
0 – huidig dijk klei	920.000	2000	€ 3.683.600
1 – huidig dijk zand	1.125.000	2000	€ 4.242.500
2 – verhoogde wand klei	233.000	0	€ 426.390
3 – verhoogde wand zand	233.000	0	€ 426.390
4 – geen wand klei	303.000	2000	€ 7.449.900
5 – geen wand zand	303.000	2000	€ 7.499.900
6 – damwandtraject 10 m	850.000	0	€ 1.555.500

8.2 Dodewaard

Voor Dodewaard is gebruik gemaakt van het Schade Slachtoffer module, hierin wordt de overstromingssimulatie die is weergegeven in het eerder hoofdstuk gebruikt als input. De schade Slachtoffer module rekenend vervolgens zelf de uitkomst uit.

8.2.1 Invoergegevens en toepassing Schade Slachtoffer Module

Ook wordt het stroomsnelheden bestand gebruikt. De weerstand die is ingevoerd voor het model komt overeen met grasland. Het hele overstromingsgebied is op grasland gezet omdat het voor de projectgroep niet mogelijk is om elk gebied en dorp een onafhankelijke ruwheid mee te geven. Deze ruwheid wordt ook wel de Manning waarde genoemd en daarvoor is 0,02 aangehouden. Omdat de Manning waarde door de projectgroep niet variabel ingevoerd kan worden is ervoor gekozen om voor elke situatie dezelfde Manning waarde aan te houden. Hierdoor kan er toch nog worden vergeleken, maar wel met een onzekerheidsmarge. In de werkelijkheid is de Manning waarde in stedelijk- en bosrijk gebied hoger, hierdoor stroomt water minder snel door die gebieden en leidt dit tot opstuwung van het water en dus een hogere waterstand.

De Schade Slachtoffer module maakt gebruik van de uitkomsten in Sobek en de module kan vanuit de uitkomsten de schades en slachtoffer bepalen. Hierin komen alleen de gevolgen uit zonder de kansberekening. De invoer betreft de waterdieptes in het gebied en de stroomsnelheden. **Er is geen gebruik gemaakt van de stijgsnelheden bestand en de waarschuwingstijd.** Door dit in elke variant hetzelfde te laten wordt **gelijkwaardig vergeleken**. Voor het maken van de berekeningen is dan ook gebruik gemaakt van de mee geleverde gebruikershandleiding.



8.2.2 Resultaten Dodewaard

In Tabel 7 zijn de uitkomsten van de berekeningen van de varianten voor Dodewaard. In de tabel is bewust gekozen om de getroffen, slachtoffers en de totale schade weer te geven om de impact te laten zien op de omgeving.

In de tabel zijn verbanden te herkennen in de varianten tussen klei en zand. De verschillen tussen zand en klei worden groter bij een afname van het overstroomde gebied. Het effect van het toepassen van klei ten opzichte van zand is het grootst bij een kleiner overstroom gebied. De afname van de totale schade is in lijn met de afname van het overstromingsgebied.

De verschillen tussen zand en klei bij het kleinste overstromingsscenario (2&3) is een factor 2,68 van klei ten opzichte van zand. Voor het grootste scenario (0&1) betreft dit 1,34. Hoe kleiner het overlap van het overstromingsgebied hoe groter het verschil in schade. Het effect van toepassen van klei is dus het grootst bij een klein overstromingsgebied.

Tabel 7: Totale schade per variant voor Dodewaard.

Varianten	Getroffenen	Slachtoffers	Totale schade
0 - huidig dijk klei	75.490	279	€ 4.900.000.000
1 - huidige dijk zand	92.020	515	€6.600.000.000
2 - damwand klei	16	0	€ 1.600.000
3 - damwand zand	49	0	€ 4.300.000
4 - extra dijk klei	923	0	€ 19.000.000
5 - extra dijk zand	3.241	1	€ 47.000.000

8.2.3 Betrouwbaarheidsanalyse Dodewaard

Om te achterhalen of de gestelde uitkomsten van de Schade en slachtoffer Module als betrouwbaar kunnen worden aangenomen heeft de projectgroep voor één van de varianten een hand berekening uitgevoerd. Voor deze handberekening is gekeken naar variant 2 en zijn de kostenkengetallen gebruikt vanuit de Schade Slachtoffer Module. Met behulp van de overstromingsdieptes en Google Maps zijn de hoeveelheden bepaald.

Handmatige schadeberekening

De schade is benaderd door uit te rekenen wat het getroffen bebouwde gebied is en hoeveel m² landbouwgrond is ondergelopen. Hieruit volgt dat het geschatte bebouwde gebied dat onderloopt is ongeveer 1300 m² bedraagt. Het schadebedrag waarmee wordt gerekend is €1,83 per m². Het aantal getroffen huishoudens dat in het ondergelopen gebied woont betreft ongeveer 1300m²

Schadebedrag bebouwd gebied = 1300 * €1000 = €1.300.000



Figuur 38: Overstromingsvisualisatie variant 2 uitgezet in Google Maps. (Google Maps, 2021)

Het aantal vierkante meters landbouwgrond is door de projectgroep uitgerekend en komt neer op 3,5 km² (Figuur 38). Het schadebedrag waarmee wordt gerekend betreft:

Schadebedrag landbouwgrond = 3500000 * €1,83 = €6.405.000

Uit de totaalsom van 7,7 miljoen euro kan worden geconcludeerd dat dit beduidend hoger is dan de uitkomsten die komen uit de Schade Slachtoffer Module. Daarbij moet er ook rekening mee worden gehouden dat in de schadeberekening van de handberekening als uitgangspunt maximale schade is genomen. Uit de overstroming blijkt dat de waterdiepte op de landbouwgrond vaak niet hoger komt dan 0,3 meter. Uit een schatting van de projectgroep blijkt dat het water maar in 20% van het totaal aantal vierkante meters hoger komt dan 0,3 meter. Ook de schade per m² voor de woningbouw wordt te hoog aangenomen. Als uitgangspunt is genomen dat aan de woningen maar 50% van de totaal schade ontstaat. Hierdoor zal de nieuwe totaalschade uitkomen op 1,93 miljoen euro. Dit is een realistischere waarde gezien de waterdiepte en overstromingsomvang.

Vanuit de Schade Slachtoffer Module worden bestanden aangeleverd om te toetsen of de software daadwerkelijk goed werkt. Uit deze testprocedure moet de waarde komen die ook in de meegeleverde gebruikshandleiding staat weergegeven. De getallen kwamen overeen en de software werkt dus zoals het hoort. In Bijlage G zijn de onzekerheden weergegeven die in de gebruikshandleiding van de Schade Slachtoffer Module staan.

9 Risicobenadering

Om het effect van 'Taaie dijken' beter te kunnen laten zien is er gekozen om dit in een risico uit te drukken. Dit is gedaan met behulp van de volgende formule: $\text{Risico} = \text{kans} \times \text{gevolg}$. De kans van optreden staat voor het Merwedekanaal en Dodewaard vast. De gevolgen worden beïnvloed door hoeveelheid water, richting van het water en de stroomsnelheden van het water. De gevolgen zijn in een eerder hoofdstuk uitgewerkt en worden hier gebruikt om het risico te berekenen.

Voor het berekenen van de contante waarde is er een discontovoet er gekozen voor een percentage van 4,5% (MKBA, 2015).

9.1 Merwedekanaal

Voor het Merwedekanaal zijn de risico's van elk scenario uitgerekend met een kans van 1:100 (Stowa, 2020). De gevolgen zijn voor elk scenario anders en dit levert het risico op.

Tabel 8: Risicobenadering voor scenario's Merwedekanaal.

Scenario	Kans (-)	Gevolg (x 10 ⁶ €)	Risico (€)	(€/4,5%) Contante waarde
0 – huidig dijk klei	1:100	3.68	36.800	817.777
1 – huidig dijk zand	1:100	4.24	42.400	942.222
2 – verhoogde wand klei	1:100	0,43	4.300	95.555
3 – verhoogde wand zand	1:100	0,43	4.300	95.555
4 – geen wand klei	1:100	7,45	74.500	1.655.555
5 – geen wand zand	1:100	7,45	74.500	1.655.555
6 – damwandtraject 10 m	1:100	1,55	15.500	344.444

9.2 Dodewaard

Ook voor Dodewaard zijn de risico's voor elk scenario uitgerekend. De kans waarmee gerekend is betreft 1:100000 (Waterschap Rivierenland, 2017). In Tabel 9 is de risicobenadering voor Dodewaard weergegeven.

Tabel 9: Risicobenadering voor scenario's Dodewaard.

Scenario	Kans (-)	Gevolg (x 10 ⁶ €)	Risico (€)	(€/4,5%) Contante waarde
0 - huidig dijk klei	1: 100000	4.900	49.000	1.088.889
1 - huidige dijk zand	1: 100000	6.600	66.000	1.466.667
2 - damwand klei	1: 100000	1,6	16	356
3 - damwand zand	1: 100000	4,3	43	956
4 - extra dijk klei	1: 100000	19	190	4.222
5 - extra dijk zand	1: 100000	47	470	10.444

9.3 Bevindingen

Uit Tabel 8 blijkt dat het verhogen van de damwand bij situatie Merwedekanaal zeer voordelig is, de contante waarde is bijna een factor 10 lager. Een verhoogde damwand vergeleken met geen damwand is wel een factor 17 voordeliger.

Bij situatie Dodewaard is het verschil tussen wel of geen damwand nog veel groter dan bij Merwedekanaal. Namelijk ongeveer een factor 1500 bij zand en ongeveer een factor 3000 bij klei. Dit is zeer hoog en uit te leggen door het grote oppervlakte wat overstroomt bij een dijk zonder damwand. Ook het toepassen van een extra dijk is zeer voordelig. Namelijk bij een zanddijk ongeveer een factor 140 en bij een kleidijk ongeveer een factor 260.

10 Kostenberekening

Bij het construeren van een nieuwe dijk komen ook kosten kijken. In dit hoofdstuk is beschreven hoe de kosten zijn berekend, welke kosten er allemaal zijn berekend en wat de totaal kosten zijn van het veranderen van een oude dijk naar een nieuwe situatie.

10.1 Kostenberekening ontwerpen Merwedekanaal

Via KosWat zijn er gegevens ingevuld die betrekking hebben op de kosten van het versterken van de dijk bij het Merwedekanaal. Denk hierbij aan de kruinhoogte in vergelijking tot het maaiveld. De extra damwand of verhoging damwand etc. uit de rekensheet komt een waarde van €/km. Deze waardes zijn te vinden in Tabel 10 kosten versterken dijk Merwede per km. Uit de tabel valt op dat versterkingen met damwanden prijziger zijn dan zonder. De twee financieel voordeligste varianten zijn 3 en 5. Dit zijn de varianten met zand in plaats van klei.

De prijs per km ligt wat aan de lage kant. Dit komt omdat de dijk bij Merwedekanaal een klein dijkje is.

Tabel 10 kosten versterken dijk Merwede per km

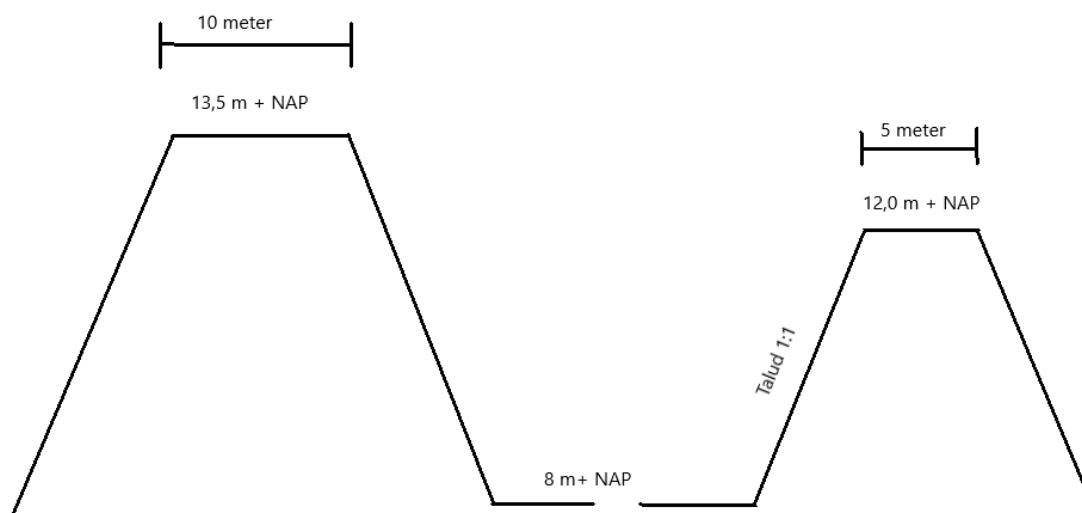
Scenario	Kosten ontwerp (€/km)
0 – huidig dijk klei	-
1 – huidig dijk zand	-
2 – verhoogde wand klei	4.210.000
3 – verhoogde wand zand	1.980.000
4 – geen wand klei	2.290.000
5 – geen wand zand	1.000.000
6 – damwandtraject 10 m	3.550.000

10.2 Kostenberekening ontwerpen Dodewaard

Voor Dodewaard zijn de kosten van de varianten in Tabel 11 weergegeven. Voor de berekeningen is gebruikt gemaakt van een KosWat Excel-spreadsheet. In dit model kunnen waardes worden aangepast en bijvoorbeeld een damwand worden ingevoegd.

Berekeningen

De uitgangspunten voor de dijkberekening bij Dodewaard is weergegeven in Figuur 39. In de afbeelding is het 'slechtste' dijkontwerp gegeven. Dit houdt in dat de dijk is doorgesneden op de laagst mogelijke plek van het traject.



Figuur 39: Dwarsdoorsnede dijk voor kostenberekening.

Voor de varianten 0 en 1 is uitgegaan dat dit een standaard situatie is. Voor varianten 3 en 4 wordt een damwand toegevoegd. Hierbij is 1/3 van de damwand van het maaiveld tot de kruinhoogte en 2/3 de grond in. Voor variant 4 is uitgerekend wat de kosten zijn voor het creëren van een extra dijk van klei. Voor variant 5 is dit uitgerekend voor zand. De eenheidsprijs voor zand is €20/m³ en voor rivierklei is dit €30/m³. Dit is alleen het bedrag voor de aanschaf. De projectgroep verwacht dat het verwerken €20/m³ is. Ter verificatie van de eenheidsprijzen is een website geraadpleegd met kostenkengetallen en is een bedrijf gebeld.

Tabel 11: Kostenversterking €/km.

Varianten	Kosten ontwerp (€/km)	Bron
0 - huidig dijk klei	-	-
1 - huidige dijk zand	-	-
2 - damwand klei	7.000.000	KosWat
3 - damwand zand	7.000.000	KosWat
4 - extra dijk klei	2.000.000	(Groep, 2022)
5 - extra dijk zand	1.600.000	(gwwkosten, 2022)

De kosten per kilometer komen overeen met de gegevens die vanuit Waterschap Rivierenland beschikbaar zijn. Deze gegevens zijn weergegeven in Bijlage J.

10.3 Bevindingen kostenberekening

Door het te vergelijken van de kosten van een dijkversterking met de het Risico bij het bezwijken van de dijk zijn er bevindingen getrokken.

Merwedekanaal

Voor Merwede **is in een oogomslag** te zien uit Tabel 10 en Tabel 6 dat de varianten met de hoogste kosten ook de varianten zijn met de laagste schade. Het verhogen van de damwand in combinatie met klei is de duurste optie. Dit schade van deze optie is ook de laagste. Aangezien de dijk die er nu ligt van klei is en er al een damwand ligt die dan alleen verhoogd hoeft te worden klinkt dit als een ideale keuze. Toch zijn er meer mogelijkheden om de dijk taai te maken met minder hoge kosten. Variant 6 is hier een voorbeeld van.



Dodewaard

Bij Dodewaard is het aanleggen van een dijk zonder de aankoop van het land relatief goedkoop ten opzichte van het zetten van een damwand. Uit 3.2 blijkt dat een extra dijk op dezelfde manier reageert als een damwand. Hierdoor is te concluderen dat een extra dijk toevoegen de beste oplossing is. Het aanleggen van een zanddijk is goedkoper dan een kleidijk, maar omdat klei beter erosiebestendig is wordt dit gezien als de meest logische keuze.

Uit de kostenberekening komt naar voren dat een investering in een taaier ontwerp een goede keuze is. De overstromingseffecten, zoals weergegeven in een eerder hoofdstuk.

11 Conclusie

De projectgroep heeft in het rapport onderzoek gedaan naar de twee onderzoeksvragen:

- Heeft het taai maken van een dijk significant invloed op de overstromingsrisico's?
- Is het maken van een taaie dijk financieel verantwoord?

Voor het Merwedekanaal kan geconcludeerd worden dat het taaier maken van de dijk significant effect heeft op de gevolgen. Financieel gezien kan er gezegd worden dat hoe duurder de dijkversterking is des te positiever de risico's worden. Hieruit komt variant 6 veelbelovend naar voren. De overstromingsrisico's worden dusdanig beperkt dat projectgroep denkt dat het loont om extra te investeren in het ontwerp.

In Dodewaard is duidelijk geworden dat de huidige dijkconstructie bij een doorbraak grote gevolgen geeft in het achterland. Een ontwerp met een damwand zorgt voor kleinere risico's in de overstroming maar is in de aanleg wel duurder. Het ontwerp waarin een extra dijk wordt aangelegd gedraagt zich het taaist omdat het dezelfde functie en daarmee de risico's van een damwand heeft. De aanlegkosten van een extra dijk is, zonder landaankoop, goedkoper dan de aanleg van een damwand. Het ontwerp is taai, maar zoals eerder is aangegeven is de toepasbaarheid bij Dodewaard waarschijnlijk niet mogelijk. Daarom adviseert de projectgroep het ontwerp met een damwand als 'taaieste' ontwerp. Het ontwerp zorgt voor dusdanig kleinere economische risico's, dat de projectgroep verwacht dat het financieel verantwoord is.

Hieronder zijn de tabellen waarin de belangrijkste waardes uit het rapport zijn samengevoegd. In deze tabellen zijn de kosten en de totale schade erg belangrijk. Door deze twee goed met elkaar te vergelijken kan de conclusie gesteld worden dat er meer variabelen zijn die bepalen welk dijkontwerp het meest ideaal is. Denk hierbij aan hoeveel budget er beschikbaar is en hoe groot is het slachtoffer verschil.

Tabel 12: Overstromingsvolume van de varianten voor Merwedekanaal

Scenario	Overstromingsvolume (m ³)	Totale schade	(€/4,5%) Contante waarde	Kosten ontwerp (€/km)
0 – huidig dijk klei	276.930	€ 3.683.600	817.777	-
1 – huidig dijk zand	333.624	€ 4.242.500	942.222	-
2 – verhoogde wand klei	29.889	€ 426.390	95.555	4.210.000
3 – verhoogde wand zand	43.758	€ 426.390	95.555	1.980.000
4 – geen wand klei	996.873	€ 7.449.900	1.655.555	2.290.000
5 – geen wand zand	1.224.194	€ 7.499.900	1.655.555	1.000.000
6 – damwandtraject 10 m	252.313	€ 1.555.500	344.444	3.550.000

Tabel 13: Overstromingsvolume van de varianten voor Dodewaard.

Scenario	Overstromingsvolume (m ³)	Totale schade	(€/4,5%) Contante waarde	Kosten ontwerp (€/km)
0 - huidig dijk klei	580.000.000	€ 4.900.000.000	1.088.889	-
1 - huidige dijk zand	850.000.000	€6.600.000.000	1.466.667	-
2 - damwand klei	950.000	€ 1.600.000	356	7.000.000
3 - damwand zand	1.475.000	€ 4.300.000	956	7.000.000
4 - extra dijk klei	5.100.000	€ 19.000.000	4.222	2.000.000
5 - extra dijk zand	8.600.000	€ 47.000.000	10.444	1.600.000

11.1 Aanbevelingen

Het onderzoek is op betrouwbaarheid getoetst zoals in het rapport is omschreven, echter moet er rekening worden gehouden dat het programma Sobek1D2D verouderd is en dat een vervangend softwarepakket (D-Hydro Suite) binnenkort op de markt komt. Het advies is om de gemaakt berekeningen te controleren met het programma dat vanuit Deltares beschikbaar zal komen.

In de ontwerpaspecten zijn enkele andere materialen beschreven waarvan de projectgroep denkt dat deze toepasbaar zijn in een dijk die hierdoor taaier kan worden gemaakt. De projectgroep heeft voor deze materialen alleen gekeken naar de verwachte erosiebestendigheid. Om over de toepasbaarheid uitsluitel te geven adviseert de projectgroep nader onderzoek te doen naar de faalmechanismen bij de toepassing van de genoemde materialen in dit rapport.

Ook is ons advies om meer onderzoek te doen naar de variant damwand om de 10 meter. Bij deze variant wordt er nu vanuit gegaan dat een standard damwand stabiel genoeg is op het moment van falen van de dijk. Dit zal onderzocht moeten worden of dat ook echt zo is. Als een **standard** damwand niet stabiel genoeg is en er een speciale damwand geplaatst moet worden zullen de kosten ook stijgen.

De laatste aanbeveling is om dieper onderzoek te doen naar de waardes uit Tabel 1 en Tabel 2. Door dieper op deze resultaten in te gaan en hier een onderzoek op zich van te ontwikkelen kan hier een ideaal dijkontwerp tot stand komen.



12 Bibliografie

- [Ministerie van Verkeer en Waterstaat] Rijkswaterstaat, Directie Sluizen en Stuwen (RWS, SS); F.T. Heezen. (1989). *Waterloopkunde; rekenregels voor waterbouwkundige ontwerpen*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- FutureWater. (2011). *Berekening van de rivierwaterstanden rond* . Wageningen: FutureWater.
- Google Maps. (2021, Juni). *Google Maps*. Opgehaald van www.google.nl:
<https://www.google.nl/maps/@51.9119711,5.3264819,11.25z?hl=nl>
- Groep, J. (2022, Januari 26). *Kostengegevens rivierklei*. (G.Koenders, Interviewer)
- gwwkosten. (2022). *kostengegevens grond*. Opgehaald van gwwkosten.nl: https://www-gwwkosten-nl.saxion.idm.oclc.org/Bemalingen,_grondwerken,_drainage/Grondwerken/Leveren_grond/kostengegevens-Kostenkengetallen/2884212.htm
- Janssen, G. (2021, Februari 5). *www.rd.nl*. Opgehaald van Dorpskerk Dodewaard nu aan de waal:
<https://www.rd.nl/artikel/912742-dorpskerk-dodewaard-nu-aan-de-waal>
- Kymo Slager, D. W. (2017, april 28). *Standaardmethode 2017 Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen*. Opgehaald van Deltares : <https://www.helpdeskwater.nl>
- MKBA. (2015). *Disconteren / Discontovoet*. Opgehaald van <https://www.mkba-informatie.nl/mkba-basics/abc-van-de-mkba/disconteren-discontovoet/>
- Rijksoverheid . (sd). *Regionale waterkeringen*. Opgehaald van Rijksoverheid :
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/regionale/>
- Smit, M., & Snip, O. (1995). *Vorbereiding van een bresgroeiexperiment in het Zwin 1994*. Delft: TU Delft.
- Stomp, O. (2011, December 21). *Wordpress.com*. Opgehaald van Dijkdoorbraak:
<https://olafstomp.wordpress.com/2011/12/21/dijkdoorbraak/>
- Stowa. (2020). *De veiligheidsbenadering regional kering*. Amersfoort: STOWA.
- Topotijdreis. (2020). *Luchtfoto*. Opgehaald van www.topotijdreis.nl:
<https://www.topotijdreis.nl/?datatype=maps>
- Waterschap Rivierenland. (2017). *Veiligheidsanalyse dijkversterking Nederbetuwe*. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- Waterschap Rivierenland. (sd). *Aangeleverde gegevens*. Waterschap Rivierenland.
- Waterschap Rivierenland. (sd). *Foto dijktraject Merwedekanaal*. Waterschap Rivierenland.
- Waterschap Rivierenland. (sd). *Wat zijn de kosten van een dijkversterking?* Opgehaald van www.waterschaprivierenland.nl: <https://www.waterschaprivierenland.nl/wat-zijn-de-kosten-van-een-dijkversterking>
- Wiertsema & Partners. (2016, November 23). *Lengteprofiel DD286 - DD310*.
- Zaag, A. v. (2019). *Zijn STBU* . De Bilt; Enschede: Sweco; Universiteit Twente.
- Zwet, J. v. (2016, Juni 27). *Bresgroei formule*. Opgehaald van slideshare.net:
<https://www.slideshare.net/deltaesssoftwaretdagen/04-dsdnl-2016-dhydro-symposium-1d2d-belgische-maas-en-bresgroeimodule-joost-van-der-zwet-hkv-lijn-in-water>

12.1 Figurenlijst

Figuur 1: Dijkdoorbraak Lowdijk 1953. (Stomp, 2011)	8
Figuur 2: Stappenplan onderzoek.	10
Figuur 3: Locatie dijkvakken. (Google Maps, 2021)	11
Figuur 4: Locatie afgekeurd Merwedekanaal (Waterschap Rivierenland).	11
Figuur 5: Waalbanddijk gelegen te Dodewaard. (Google Maps, 2021)	12
Figuur 6: Dwarsdoorsnede invloed zone bres.	16
Figuur 7: Variant 0, Huidige situatie	20
Figuur 8: Variant 1, vervangen kleikern met zandkern.....	20
Figuur 9: Variant 2 en 3, verhogen damwandhoogte	21
Figuur 10 Variant 4 & 5 geen damwand.	21
Figuur 11: Variant 6, damwandtrajecten van om de tien meter.	22
Figuur 12: Variant 0, Huidige situatie.	23
Figuur 13: Variant 1, vervanging zanddijk naar kleidijk.	23
Figuur 14: Variant 2 & 3, damwand.	24
Figuur 15: Variant 4 & 5, tweede kleine dijk in het achterland.	25
Figuur 16: Merwedekanaal zand met damwand 1,25m.	26
Figuur 17: Waterbalans zand met damwand 1,25m.....	26
Figuur 18: Merwedekanaal zand met damwand 1,25 m.	27
Figuur 19: Waterbalans klei met damwand 1,25m.....	27
Figuur 20: Waterbalans klei met damwand 1,55m.....	28
Figuur 21: Merwedekanaal klei met damwand 1,55m.	28
Figuur 22: Merwedekanaal zand met damwand 1,55m.	29
Figuur 23: Waterbalans zand met damwand 1,55m.....	29
Figuur 24: Merwedekanaal klei zonder damwand.	30
Figuur 25: Waterbalans klei geen damwand.	30
Figuur 26: Merwedekanaal zand zonder damwand.	31
Figuur 27: Waterbalans zand geen damwand.	31
Figuur 28: Merwedekanaal damwand elke 10 meter.....	32
Figuur 29: Waterbalans damwand elke 10 meter.	32
Figuur 30: Overstromingsdieptes varianten.	33
Figuur 31: Topografische kaart van overstromingsgebied. (Topotijdreis, 2020)	33
Figuur 32: Eindsituatie overstroming na 60 uur voor variant 0.....	34
Figuur 33: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 1.....	35
Figuur 34: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 2.....	36
Figuur 35: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 3.....	36
Figuur 36: Eindsituatie overstroming na 49 uur voor variant 4.....	37
Figuur 37: Eindsituatie overstroming na 48 uur voor variant 5.....	37
Figuur 38: Overstromingsvisualisatie variant 2 uitgezet in Google Maps. (Google Maps, 2021)	42
Figuur 39: Dwarsdoorsnede dijk voor kostenberekening.....	46
Figuur 40: Luchtfoto gegeven dijktraject. (Topotijdreis, 2020)	56
Figuur 41: Veiligheidsoordeel dijktraject. (Waterschap Rivierenland)	57
Figuur 42: Schematisering van dijktraject dat is afgekeurd. (Waterschap Rivierenland).....	58
Figuur 43: Foto langs afgekeurd dijktraject. (Waterschap Rivierenland)	59

Figuur 44: Fasen van bresgroei. (Smit & Snip, 1995)	60
Figuur 45: Schematisering fase bresbreedte. (volgorde oplopend) (Zwet, 2016)	61
Figuur 46 Verband debiet & waterhoogte Lobith.....	62
Figuur 47 E waarden.....	62
Figuur 48 Excel Dodewaard	64
Figuur 49: Variant 0 48:00	65
Figuur 50: Variant 0 1:48	65
Figuur 51 : Variant 0 5:24.....	65
Figuur 52: Variant 0 12:36.....	65
Figuur 53: Variant 0 23:36	65
Figuur 54: Variant 1 5:24	66
Figuur 55: Variant 1 12:36	66
Figuur 56: Variant 1 48:00	66
Figuur 57: Variant 1 1:48	66
Figuur 58: Variant 1 23:36	66
Figuur 59: Variant 2 12:36	67
Figuur 60: Variant 2 23:34	67
Figuur 61: Variant 2 1:48	67
Figuur 62: Variant 2 5:24	67
Figuur 63: Variant 2 48:00	67
Figuur 64: Variant 3 5:24	68
Figuur 65: Variant 3 12:36	68
Figuur 66: Variant 3 48:00	68
Figuur 67: Variant 3 1:48	68
Figuur 68: Variant 3 23:36	68
Figuur 69: Variant 4 12:36	69
Figuur 70: Variant 4 5:24	69
Figuur 71: Variant 4 1:48	69
Figuur 72: Variant 4 48:00	69
Figuur 73: Variant 4 23:35	69
Figuur 74: Variant 5 5:24	70
Figuur 75: Variant 5 12:36	70
Figuur 76: Variant 5 23:34	70
Figuur 77: Variant 5 48:00	70
Figuur 78: Variant 5 1:48	70
Figuur 79: Variant 0; t=1 uur.....	71
Figuur 80: Variant 0; t=6 uur.....	71
Figuur 81: Variant 0; t=12 uur.....	71
Figuur 82: Variant 0; t=24 uur.....	72
Figuur 83: Variant 0; t=36 uur.....	72
Figuur 84: Variant 0; t=48 uur.....	72
Figuur 85: Variant 0; t=60 uur, einde.....	72
Figuur 86: Variant 2; t=1 uur.....	75
Figuur 87: Variant 2; t=6 uur.....	75
Figuur 88: Variant 2; t=12 uur.....	75
Figuur 89: Variant 2; t=24 uur.....	76

Figuur 90: Variant 2; t=36 uur.....	76
Figuur 91: Variant 2; t=48 uur, einde.....	76
Figuur 92: Variant 3; t=1 uur.....	77
Figuur 93: Variant 3; t=6 uur.....	77
Figuur 94: Variant 3; t=12 uur.....	77
Figuur 95: Variant 3; t=24 uur.....	78
Figuur 96: Variant 3; t=36 uur.....	78
Figuur 97: Variant 3; t=48 uur, einde.....	78
Figuur 98: Variant 4; t=1 uur.....	79
Figuur 99: Variant 4; t=6 uur.....	79
Figuur 100: Variant 4; t=12 uur.....	80
Figuur 101: Variant 4; t=24 uur.....	80
Figuur 102: Variant 4; t=36 uur.....	80
Figuur 103: Variant 4; t=49 uur, einde.....	81
Figuur 104: Variant 5; t=1 uur.....	82
Figuur 105: Variant 5; t=6 uur.....	82
Figuur 106: Variant 5; t=12 uur.....	82
Figuur 107: Variant 5; t=24 uur.....	83
Figuur 108: Variant 5; t=36 uur.....	83
Figuur 109: Variant 5; t=48 uur, einde.....	83
Figuur 110: Schade per m ² (Kymo Slager, 2017).....	84
Figuur 111: Kostengetallen per kilometer. (Waterschap Rivierenland, sd).....	90

12.2 Tabellenlijst

Tabel 1: Overstromingsvolume van de varianten voor Merwedekanaal	5
Tabel 2: Overstromingsvolume van de varianten voor Dodewaard.....	5
Tabel 3: Keuze afweging softwarepakketten.....	17
Tabel 4: Overstromingsvolume van de varianten voor Merwedekanaal	38
Tabel 5: Overstromingsvolume van de varianten voor Dodewaard.....	38
Tabel 6: Totale schade per variant voor het Merwede kanaal.	40
Tabel 7: Totale schade per variant voor Dodewaard.....	41
Tabel 8: Risicobenadering voor scenario's Merwedekanaal.....	43
Tabel 9: Risicobenadering voor scenario's Dodewaard.....	43
Tabel 10 kosten versterken dijk Merwede per km	45
Tabel 11: Kostenversterking €/km.....	46
Tabel 12 variant 0 - klei met damwand 1,25 Merwede.....	87
Tabel 13 variant 1 - zand met damwand 1,25 Merwede.....	87
Tabel 14 variant 2 - klei met damwand 1,55 Merwede.....	87
Tabel 15 variant 3 - zand met damwand 1,55 Merwede.....	87
Tabel 16 variant 4 - klei zonder damwand Merwede	88
Tabel 17 variant 5 - zand zonder damwand Merwede.....	88
Tabel 18 variant 6 – damwand elke 10 meter	88
Tabel 19: Variant 0 - dijklichaam klei: Schade en slachtoffers Dodewaard.	89
Tabel 20: Variant 1 - dijklichaam zand: Schade en slachtoffers Dodewaard.	89
Tabel 21: Variant 2 - damwand 12 m; dijklichaam klei: Schade en slachtoffers Dodewaard.....	89
Tabel 22: Variant 3 - damwand 12m; dijklichaam zand: Schade en slachtoffers Dodewaard.....	89
Tabel 23: Variant 4- extra dijk 12m; dijklichaam klei: Schade en slachtoffers Dodewaard.....	89
Tabel 24: Variant 5 - extra dijk 12m; dijklichaam zand: Schade en slachtoffer Dodewaard.	89

13 Bijlage

Voor snelkoppelingen kunt u hieronder op de 'woorden' in de eerste kolom klikken. Om de snelkoppeling te gebruiken moet u eerst op uw toetsenbord 'Ctrl' ingedrukt houden alvorens u op het 'woord' klikt. Achter het woord staat de inhoud van het hoofdstuk vermeld en daarachter het paginanummer.

Bijlage A	Dijkvakken keuze	56
Bijlage B	Overige ontwerpenaspecten	60
Bijlage C	Excel invoerwaardes Dodewaard	62
Bijlage D	Visualisatie Merwede	65
Bijlage E	Visualisatie Dodewaard	71
Bijlage F	Schadebedragen Merwede kanaal	84
Bijlage G	Onzekerheden Schade en Slachtoffer module	86
Bijlage H	Schadeberekeningen Merwedekanaal	87
Bijlage I	Schadeberekeningen Dodewaard	89
Bijlage J	Kosten getallen per kilometer	90

Bijlage A. Dijkvakken keuze

In dit hoofdstuk worden de dijkvakken die aangeleverd zijn door de opdrachtgever weergegeven en toegelicht. In het eerste gesprek dat gevoerd was met de opdrachtgever heeft de projectgroep gevraagd of de opdrachtgever voorkeuren heeft. De opdrachtgever heeft de projectgroep de volgende dijktrajecten gegeven:

- Neder Betuwe;
- Merwedekanaal.

Neder Betuwe

Een van de dijkvakken voor het project ligt gelegen nabij Dodewaard en aan de rivier de Waal. In *Figuur 40* is de lengte van het dijkvak aangegeven en de ligging. De betreffende dijk is een primaire waterkering en biedt bescherming tegen overstromingen uit het hoofdwatersysteem. Een eventuele doorbraak van een primaire waterkering heeft desastreuze gevolgen met zeer grote, maatschappelijke impact. Het Rijk stelt daarom de waterveiligheidsnormen voor de primaire waterkeringen vast en houdt toezicht op de staat van de waterkeringen. Primaire dijken moeten grotere verschillen in peil kunnen keren.

De dijk ligt nabij het dorp Dodewaard, dat in de gemeente Neder-Betuwe ligt, en heeft ongeveer 4500 inwoners. In Dodewaard ligt ook een inactieve kerncentrale en wordt naar verwachting rond 2045 ontmanteld. De kerncentrale ligt vlak voor de dijk, nabij DD300 en DD310 in *Figuur 41*. Direct achter de dijk bij Dodewaard zijn huizen gelegen die ervoor zorgen dat achter de dijk weinig ruimte beschikbaar blijft. Voor de dijk ligt een uiterwaarde. Deze uiterwaarde ligt er al sinds ongeveer 1850, toen hebben ze dijken aangelegd die nu op dezelfde plek ligt maar ondertussen in de loop van de jaren wel is verhoogd.



Figuur 40: Luchtfoto gegeven dijktraject. (Topotijdreis, 2020)

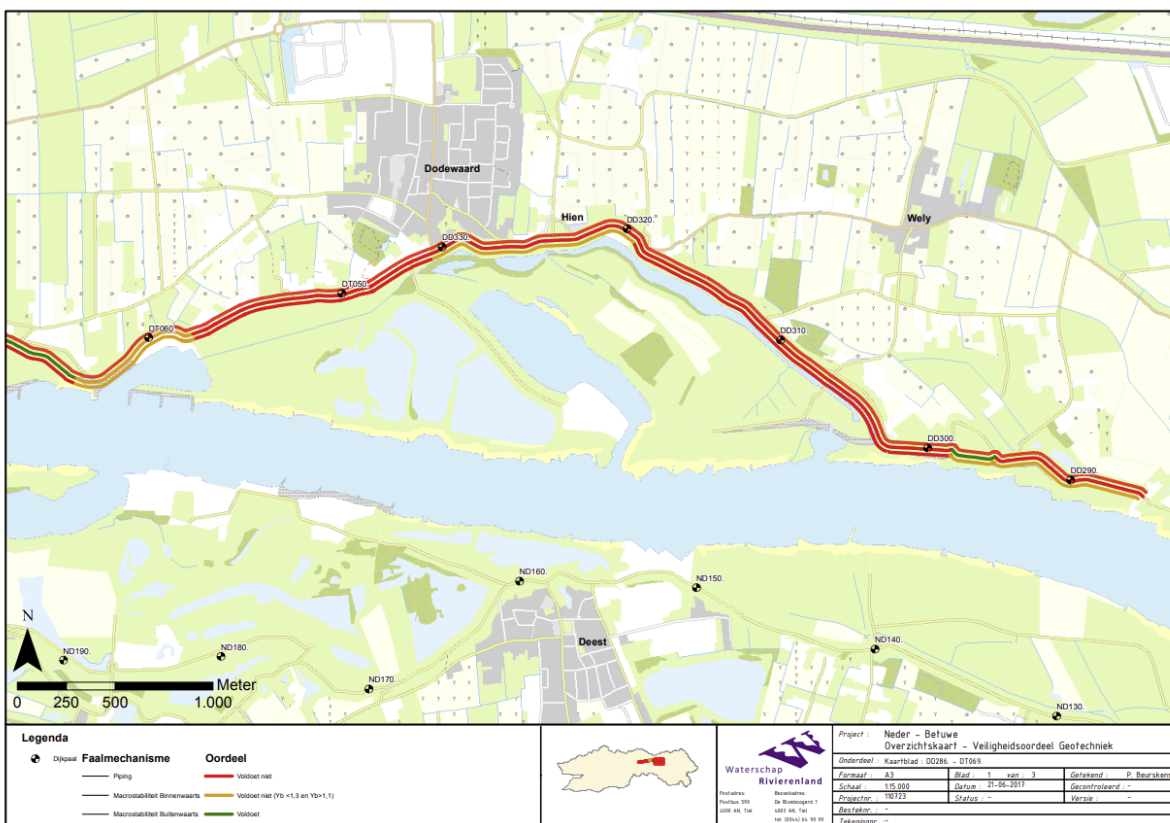
In 2017 zijn de veiligheidsnormen voor dijken verscherpt, hierop is de dijk opnieuw doorgerekend. Dit komt mede door nieuwe inzichten in de modellering van faalmechanismen. Uit de berekeningen komt naar voren dat de dijk op de volgende faalmechanismen onvoldoende scoort:

- Piping;
- Macrostabieliteit binnenwaarts;
- Macrostabieliteit buitenwaarts.

Op sommige stukken in het dijktraject voldoet de dijk nog wel, maar over het geheel niet. Daarom is er geen rekening gehouden met kleine trajecten maar wordt het hele dijktraject beschouwd.

In de aangeleverde gegevens van de opdrachtgever heeft de projectgroep onderzocht welke gegevens beschikbaar zijn. De gegevens die de opdrachtgever beschikbaar heeft gesteld heeft betreffen:

- Dwarsdoorsneden van dijken;
- Grondsonderingen en boringen;
- Veiligheidsoordeel van het dijktraject;
- Faalmechanisme berekeningen;
- Faalmechanisme uitkomsten.



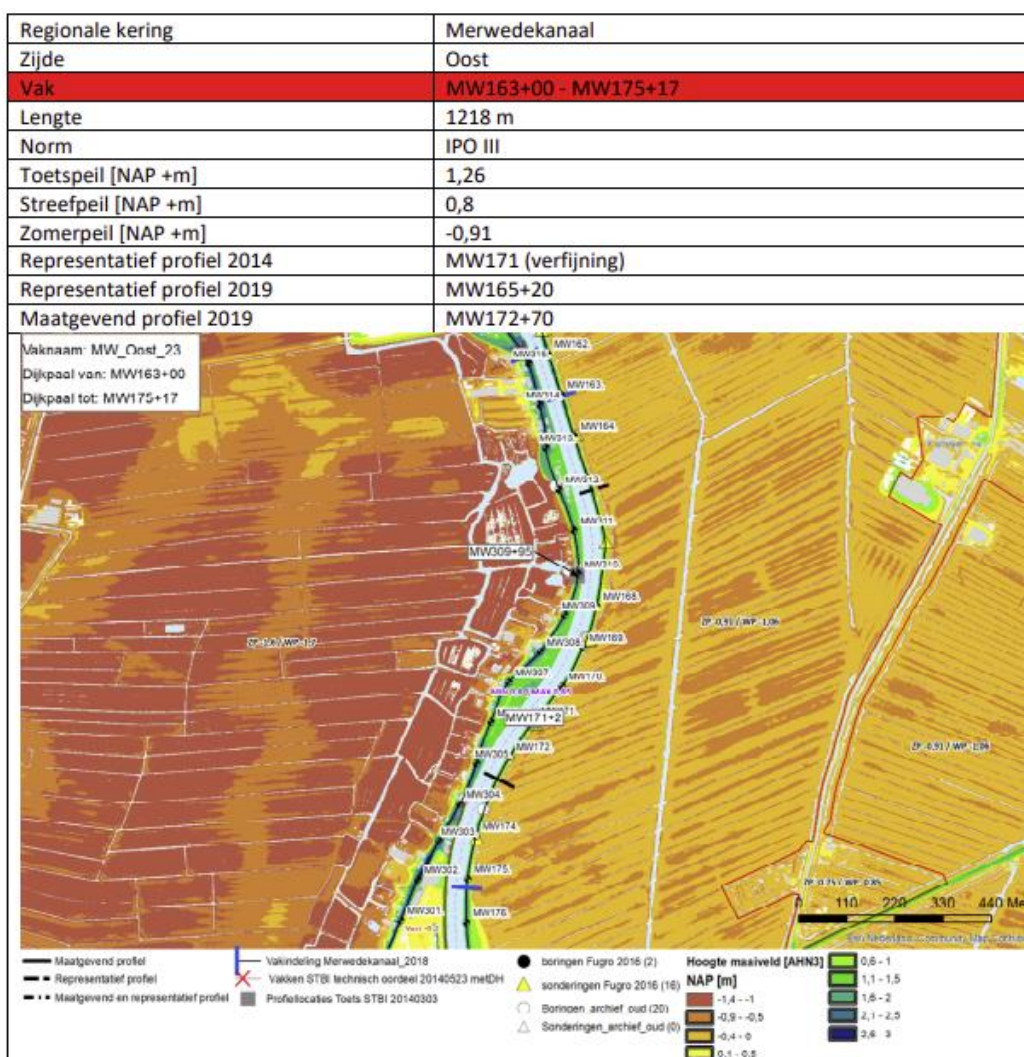
Figuur 41: Veiligheidsoordeel dijktraject. (Waterschap Rivierenland)

Merwedekanaal

Het tweede dijkvak voor het project ligt gelegen tussen Vianen en Gorinchem. Hiertussen stroomt het Merwedekanaal. In Figuur 42 is de ligging van het dijktraject aangegeven. Het traject waar het om gaat is in de figuur aan de rechterkant weergegeven. De kering is een regionale kering en de provincie normeert deze waterkeringen en houdt het toezicht op deze waterkeringen. Een doorbraak van een regionale waterkering heeft veelal minder desastreuze gevolgen dan een doorbraak van een primaire waterkering. Voor de regionale keringen is de norm uitgedrukt in de jaarlijkse kans van voorkomen van de hoogwaterstand die nog veilig gekeerd moet kunnen worden, rekening houdend met golven en andere belastingen.

De kering ligt in de gemeente Nieuwland, provincie Utrecht, en achter de dijk ligt landbouwgrond met een daarbij behorende boerderij. De gronden achter de kering zijn lager gelegen en de boerderijen liggen iets hoger. Het kanaal heeft aan weerszijde een sluis die in verbinding staat met een andere watergang.

2.23 Vaknaam: MW_Oost_23



Figuur 42: Schematisering van dijktraject dat is afgekeurd. (Waterschap Rivierenland)

Het Merwede traject is in 2012 getoetst en groten deel afgekeurd. Daaropvolgend is de Merwededijk getoetst op stabiliteit en hoogte, waarbij de uitgangspunten zoals vak indeling en schematisatie op traceerbare wijze zijn vastgelegd. De hoogte van de dijk bij een golfhoogte van 40 cm voldoet niet aan de gestelde norm. Dit houdt in dat het traject moet worden aangepast zodat het aan de normen voldoet.

In de aangeleverde gegevens van de opdrachtgever heeft de projectgroep onderzocht welke gegevens beschikbaar zijn. De gegevens die de opdrachtgever beschikbaar heeft gesteld heeft betreffen:

- Dwarsdoorsneden van dijken;
- Grondsonderingen en boringen;
- Veiligheidsoordeel van het dijktraject;
- D-stability modellen;
- Berekeningsresultaten van dijkpalen.



Figuur 43: Foto langs afgekeurd dijktraject. (Waterschap Rivierenland)

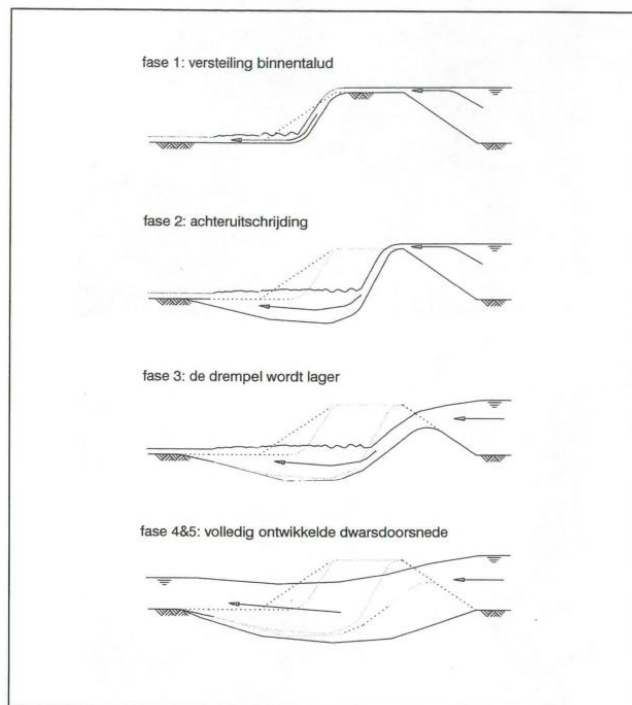
Bijlage B. Overige ontwerpenaspecten

Op basis van de invloedzones heeft de projectgroep nagedacht wat er ontwerptechnisch mogelijk is om de bresgroei te beperken.

Bresdiepte

De bresdiepte zou met behulp van *damwanden (houten/ stalen)* op een maximale hoogte gehouden kunnen worden. Als de damwand bijvoorbeeld op 12 m+ NAP wordt aangebracht, dan zou de bresbodem niet verder kunnen zakken dan deze waarde.

De bresdiepte wordt beïnvloed door het verval van het water en de erosiebestendigheid van het materiaal. Om bijvoorbeeld zand niet te verplaatsen kan een *geotextiel* worden aangebracht. Dit laat wel water door maar zorgt niet voor uitspoeling. Op een grotere schaal kan worden gedacht aan *stortsteen*. Dit robuuste materiaal wordt niet snel verplaatst en zal dan ook een remmende factor hebben op de bresgroei omdat het steen niet wegspoelt. *Klei* heeft bijvoorbeeld een lagere stroomsnelheid waarboven erosie plaatsvindt dan zand. Dit resulteert dan ook in een langzamer groeiende bres.

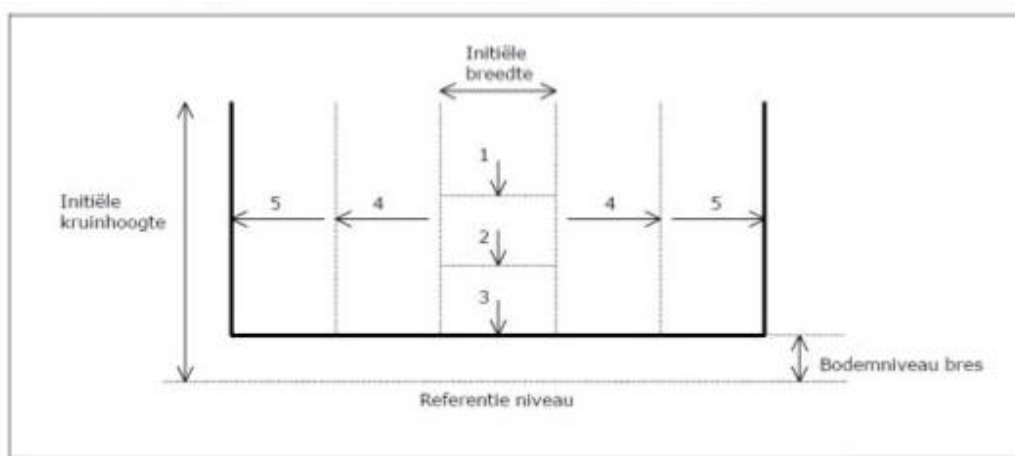


Figuur 44: Fasen van bresgroei. (Smit & Snip, 1995)

Bresbreedte

De bresbreedte groeit eigenlijk aan de hand van hetzelfde principe als de bresdiepte. Dit houdt in de erosiebestendigheid dus ook weer de bepalende waarde is. Een materiaal dat nu al op de dijk ligt en de stroomsnelheid beperkt is *asfalt*. Dit materiaal reageert elastisch en kan dus mee vervormen, maar kan op den duur breken. De geschiktheid voor Dodewaard is dan ook twijfelachtig. *Beton* daarentegen “knap” en daarin streed geen vervorming op tot het punt van breken. Je kunt dus moeilijk inschatten wanneer het gaat breken maar beton is wel zeer sterk. Niet voor niets worden de grote waterbouwkundige constructies van gewapend beton gemaakt.

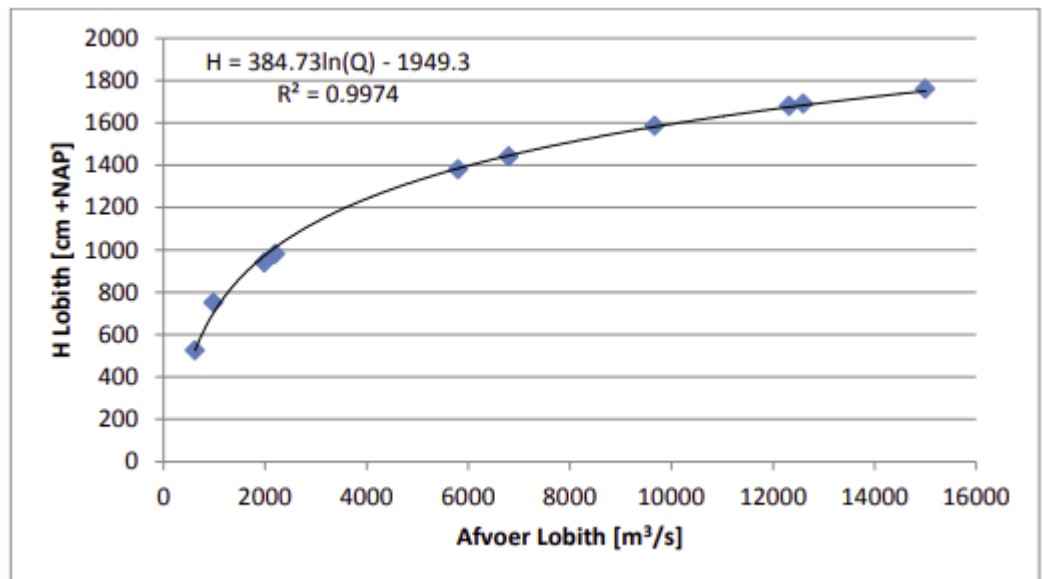
De bresbreedte beperken zou ook kunnen door *damwand trajecten*. Dit kunnen bijvoorbeeld trajecten zijn van tien meter damwand, daarna tien meter niks en dan weer tien meter damwand. Het idee is dat hierdoor de bresbreedte maar een maximale waarde kan aannemen en er dus langzamer water uit zou stromen.



Figuur 45: Schematisering fase bresbreedte. (volgorde oplopend) (Zwet, 2016)

Bijlage C. Excel invoerwaardes Dodewaard

Q	h lobith
4000	11.49
4500	11.9725
5000	12.455
5500	12.9375
6000	13.42
6500	13.79
7000	14.16
7500	14.53
8000	14.9
8500	15.1275
9000	15.355
9500	15.5825
10000	15.81
10500	15.995
11000	16.18
11500	16.365
12000	16.55
12500	16.715
13000	16.88
13500	17.035
14000	17.19
14500	17.3325
15000	17.475
15500	17.6175
16000	17.76



Figuur 46 Verband debiet & waterhoogte Lobith

Rapportage		Betrekkingslijnen Rijntakken versie 2018				P190201R
Km-raai		Emmerich	Lobith	Pannerdense_Kop	Nijmegen_haven	Dodewaard
Drempel 1		851.9/853.3	862.18	867.22	884.87	901.375
Drempel 2		9.3	18	8.7	9.3	9
		9.5		10	10.75	10.5
Laag	c0				2.658000E-03	-5.210722E-03
	c1				-1.665887E-01	8.742038E-02
	c2	5.397474E-02			2.961226E+00	-1.019853E-01
	c3	-1.694211E+00		8.801646E-03	-1.970355E-01	-3.355919E+00
	c4	1.990410E+01		8.749235E-01	4.841634E+01	1.435134E+01
	c5	-1.028127E+02	1.000000E+00	1.141507E-01		
	c6	2.043379E+02	0.000000E+00			
midden	d0			6.364913E-02	-1.104527E-01	-6.236707E-04
	d1			-1.807240E+00	3.392270E+00	4.597420E-02
	d2			1.802124E+01	-3.373465E+01	1.810496E-01
	d3	9.472000E-01		-5.351574E+01	1.163544E+02	5.304710E-01
	d4	1.884600E+00				
Hoog	e0			1.799658E-03	2.176402E-03	
	e1	3.695042E-03		-5.135837E-04	-9.478102E-02	-1.114562E-01
	e2	-1.218563E-01		1.054107E-02	1.839693E+00	2.081891E+00
	e3	2.301967E+00		9.144335E-01	-1.473026E+01	-1.599319E+01
	e4	-3.155686E+00		-6.308085E-02	4.797417E+01	4.774828E+01

Figuur 47 E waarden

Pagina 63 van 90

Tijd (sec) step per 30 min	Zand	Klei	m3/s rivier zand	m3/s rivier klei	Waterland zand	waterland klei	Zand	Klei	H _{water}	H _{land}	Zand	Klei
0	0	0	9600	9600	12.76591208	12.76591208	200000000	200000000	0	0	4.966	4.965912077
60	22.06	22.06	9569.07	9569.07	12.72900241	12.72900241	200000000	200000000	0.000	0.000	4.929	4.94862861
1200	387.84	200.32	9194.41	9381.94	12.51576291	12.58492903	200000000	200000000	0.001	0.001	4.715	4.78426191
1800	683.12	379.67	8890.26	9193.71	12.34856586	12.41403354	200000000	200000000	0.003	0.002	4.545	4.61227213
3600	933.71	520.10	8613.05	9026.66	12.19068482	12.41403354	200000000	200000000	0.012	0.006	4.379	4.607546548
5400	1105.12	655.30	8415.02	8864.84	12.09964802	12.2525059	200000000	200000000	0.022	0.012	4.278	4.440121196
7200	1274.27	741.62	8219.25	8751.90	11.97316211	12.2525059	200000000	200000000	0.025	0.019	4.148	4.433446655
9000	1405.29	861.10	8061.61	8605.80	11.91205308	12.09964802	200000000	200000000	0.038	0.027	4.074	4.278388868
10800	1546.88	973.20	7893.40	8517.08	11.82297877	12.09964802	200000000	200000000	0.052	0.035	3.971	4.244530106
12600	1654.21	1028.33	7759.44	8385.32	11.76323612	11.94243533	200000000	200000000	0.067	0.044	3.896	4.098062411
14400	1764.35	1064.40	7622.69	8322.64	11.70306204	11.94243533	200000000	200000000	0.083	0.054	3.820	4.088482801
16200	1860.47	1155.69	7499.95	8204.73	11.61526383	11.94243533	200000000	200000000	0.100	0.064	3.716	4.078081594
18000	1920.36	1245.58	7413.43	8088.22	11.58662485	11.79383833	200000000	200000000	0.117	0.076	3.670	3.918274395
19800	2015.64	1256.72	7291.53	8050.45	11.53024973	11.79383833	200000000	200000000	0.135	0.087	3.595	3.906963887
21600	2077.52	1334.20	7203.04	7946.35	11.50248722	11.79383833	200000000	200000000	0.154	0.099	3.549	3.894956069
23400	2155.64	1410.21	7098.29	7843.73	11.44125222	11.79383833	200000000	200000000	0.173	0.112	3.468	3.882264177
25200	2192.97	1484.68	7034.34	7742.64	11.4111378	11.64421145	200000000	200000000	0.193	0.125	3.418	3.719275203
27000	2251.54	1463.70	6949.15	7736.99	11.35186656	11.64421145	200000000	200000000	0.213	0.138	3.339	3.706101904
28800	2271.90	1526.70	6902.17	7647.37	11.35186656	11.64421145	200000000	200000000	0.234	0.152	3.318	3.692361563
30600	2347.75	1588.21	6799.71	7559.24	11.2938085	11.64421145	200000000	200000000	0.253	0.166	3.239	3.678067655
32400	2354.14	1648.18	6766.70	7472.65	11.26521092	11.50248722	200000000	200000000	0.276	0.181	3.189	3.521509814
34200	2385.91	1604.79	6708.30	7489.42	11.23688863	11.50248722	200000000	200000000	0.297	0.195	3.140	3.507066997
36000	2412.14	1654.90	6655.45	7412.69	11.2083253	11.50248722	200000000	200000000	0.319	0.210	3.090	3.492172599
37800	2433.06	1703.58	6607.91	7337.39	11.2083253	11.50248722	200000000	200000000	0.341	0.226	3.068	3.476840353
39600	2483.65	1750.81	6530.54	7263.54	11.15348282	11.50248722	200000000	200000000	0.364	0.241	2.990	3.461038068
41400	2460.64	1796.57	6527.10	7191.17	11.15348282	11.35186656	200000000	200000000	0.385	0.258	2.968	3.294293312
43200	2502.53	1717.98	6458.58	7243.13	11.12617146	11.50248722	200000000	200000000	0.408	0.273	2.918	3.4294521
45000	2505.53	1880.87	6428.96	7053.62	11.12617146	11.35186656	200000000	200000000	0.430	0.290	2.896	3.261903626
46800	2540.79	1792.98	6367.08	7114.89	11.09909075	11.35186656	200000000	200000000	0.453	0.306	2.846	3.24576677
48600	2536.31	1827.74	6344.94	7054.01	11.07223206	11.35186656	200000000	200000000	0.476	0.323	2.796	3.229321635
50400	2528.02	1860.19	6326.44	6994.44	11.07223206	11.35186656	200000000	200000000	0.499	0.339	2.773	3.21257992
52200	2553.66	1891.84	6274.35	6936.17	11.04558683	11.35186656	200000000	200000000	0.522	0.356	2.724	3.195553342
54000	2538.88	1922.19	6262.51	6879.20	11.04558683	11.0883253	200000000	200000000	0.545	0.374	2.701	3.035219585
55800	2559.13	1818.23	6215.64	6956.54	11.01914665	11.35186656	200000000	200000000	0.568	0.390	2.651	3.16188934
57600	2538.45	1977.18	6209.70	6770.96	11.01914665	11.0883253	200000000	200000000	0.591	0.408	2.629	3.001060847
59400	2553.76	1865.84	6167.48	6855.68	11.01914665	11.0883253	200000000	200000000	0.614	0.425	2.579	3.044269315
61200	2527.76	1887.16	6167.15	6807.75	10.99290315	11.0883253	200000000	200000000	0.636	0.442	2.557	2.967283837
63000	2538.60	1907.39	6129.68	6760.89	10.99290315	11.0883253	200000000	200000000	0.659	0.459	2.534	2.950117292
64800	2547.68	1926.56	6093.98	6715.10	10.9668481	11.0883253	200000000	200000000	0.682	0.476	2.485	2.932778221
66600	2514.75	1944.68	6100.30	6670.37	10.9668481	11.0883253	200000000	200000000	0.705	0.494	2.462	2.915272614
68400	2510.96	1961.74	6056.48	6586.47	10.9668481	11.0883253	200000000	200000000	0.727	0.513	2.439	2.897670468
70200	2523.63	1977.77	6038.18	6558.03	10.94097335	11.07223206	200000000	200000000	0.750	0.531	2.391	2.743220024
72000	2484.76	1850.52	6050.42	6684.67	10.94097335	11.0883253	200000000	200000000	0.773	0.546	2.368	2.86316583
73800	2485.14	2005.84	6023.43	6502.72	10.94097335	11.07223206	200000000	200000000	0.795	0.564	2.346	2.708512798
75600	2484.18	1873.16	5997.76	6608.78	10.9045887	11.0883253	200000000	200000000	0.817	0.581	2.292	2.828254797
77400	2430.98	2030.20	6024.35	6425.13	10.94097335	11.07223206	200000000	200000000	0.839	0.599	2.232	2.673382549
79200	2478.59	1892.31	5950.11	6356.39	10.9045887	11.07223206	200000000	200000000	0.861	0.616	2.248	2.65435178
81000	2422.23	1900.32	5979.85	6501.77	10.9045887	11.07223206	200000000	200000000	0.883	0.633	2.206	2.639248904
82800	2416.27	1907.55	5959.19	6467.91	10.9045887	11.07223206	200000000	200000000	0.905	0.650	2.204	2.622080928
84600	2409.30	1914.04	5939.54	6434.81	10.87818906	11.07223206	200000000	200000000	0.927	0.667	2.152	2.604854606
86400	2349.37	1919.78	5972.86	6402.44	10.9045887	11.07223206	200000000	200000000	0.948	0.685	2.162	2.587576599
88200	2392.70	1924.86	5902.35	6370.80	10.87818906	11.07223206	200000000	200000000	0.969	0.702	2.109	2.570251641
90000	2330.38	1929.11	5938.60	6339.87	10.87818906	11.07223206	200000000	200000000	0.990	0.719	2.088	2.552891445
91800	2319.78	1932.73	5922.58	6309.63	10.87818906	11.07223206	200000000	200000000	1.011	0.737	2.067	2.5354969
93600	2308.44	1935.67	5907.30	6280.07	10.87818906	10.94097335	200000000	200000000	1.032	0.754	2.046	2.348681766
95400	2296.39	1786.84	5892.73	6402.28	10.87818906	11.07223206	200000000	200000000	1.053	0.770	2.026	2.501994337
97200	2283.67	1939.50	5878.83	6223.00	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.073	0.788	1.974	2.353280152
99000	2217.13	1787.20	5918.55	6348.59	10.87818906	11.07223206	200000000	200000000	1.095	0.805	1.985	2.448451204
100800	2256.73	1941.01	5852.53	6168.25	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.113	0.821	1.934	2.319725463
102600	2188.86	1785.61	5893.78	6297.03	10.87818906	10.94097335	200000000	200000000	1.133	0.837	1.845	2.303654986
104400	2227.61	1784.08	5828.40	6271.94	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.153	0.853	1.894	2.287598243
106200	2158.40	1782.11	5871.00	6247.29	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.173	0.869	1.875	2.271559286
108000	2142.71	1779.60	5860.07	6223.08	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.192	0.885	1.855	2.255426204
109800	2126.62	1776.86	5840.53	6199.30	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.211	0.901	1.836	2.239559328
111600	2110.18	1773.61	5839.36	6175.93	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.230	0.917	1.817	2.223587825
113400	2093.40	1769.97	5829.52	6152.95	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.249	0.933	1.798	2.207658106
115200	2076.31	1765.94	5819.99	6130.35	10.81632594	10.94097335	200000000	200000000	1.268	0.949	1.749	2.191764624
117000	2055.30	1761.55	5864.37	6108.13	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.286	0.965	1.762	2.179319717
118800	2041.78	1756.79	5801.27	6086.27	10.81632594	10.94097335	200000000	200000000	1.304	0.981	1.712	2.160099601
120600	1970.12	1751.69	5846.31	6064.74	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.322	0.997	1.725	2.144334391
122400	2006.35	1746.50	5783.46	6043.56	10.81632594	10.94097335	200000000	200000000	1.340	1.012	1.677	2.128618075
124200	1934.17	1740.50	6022.69	6022.69	10.84714949	10.94097335	200000000	200000000	1.357	1.028	1.690	2.112953538
126000	1970.20	1734.44	5766.37	6002.13	10.816							

Bijlage D. Visualisatie Merwede

In deze bijlage is per variant de overstroomingssimulatie op momenten 1:48 – 5:24 -12:36 -23:34 en 48:00 te zien.

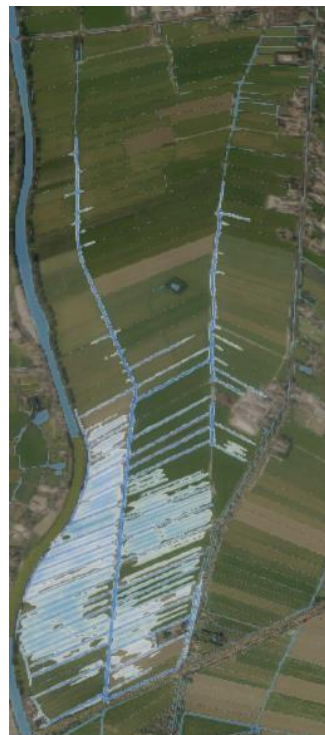
Variant 0



Figuur 50: Variant 0 1:48



Figuur 51 : Variant 0 5:24



Figuur 52: Variant 0 12:36



Figuur 53: Variant 0 23:36



Figuur 49: Variant 0 48:00

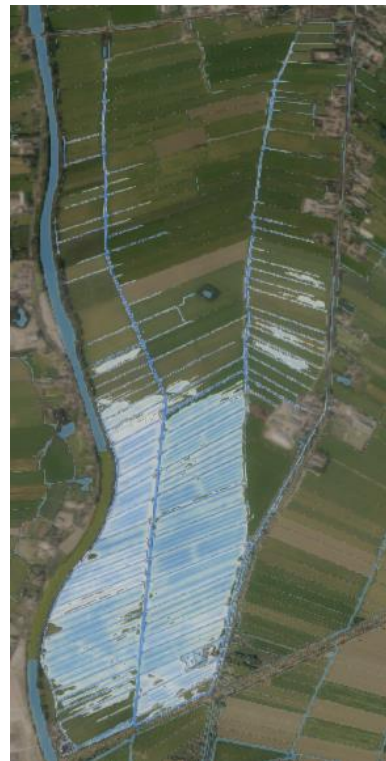
Variant 1



Figuur 57: Variant 1 1:48



Figuur 54: Variant 1 5:24



Figuur 55: Variant 1 12:36



Figuur 58: Variant 1 23:36



Figuur 56: Variant 1 48:00

Variant 2



Figuur 61: Variant 2 1:48



Figuur 62: Variant 2 5:24



Figuur 59: Variant 2 12:36



Figuur 60: Variant 2 23:34



Figuur 63: Variant 2 48:00

Variant 3



Figuur 67: Variant 3 1:48



Figuur 64: Variant 3 5:24



Figuur 65: Variant 3 12:36



Figuur 68: Variant 3 23:36



Figuur 66: Variant 3 48:00

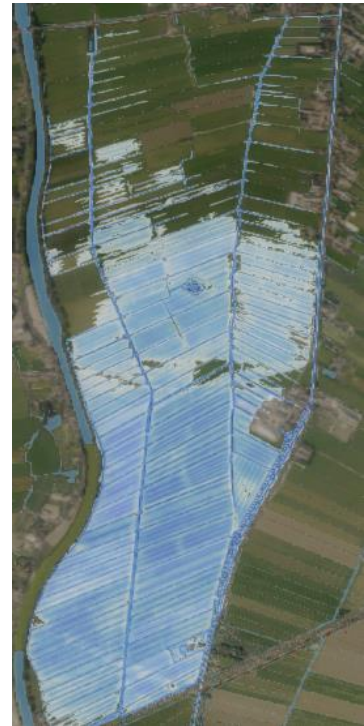
Variant 4



Figuur 71: Variant 4 1:48



Figuur 70: Variant 4 5:24



Figuur 69: Variant 4 12:36



Figuur 73: Variant 4 23:35

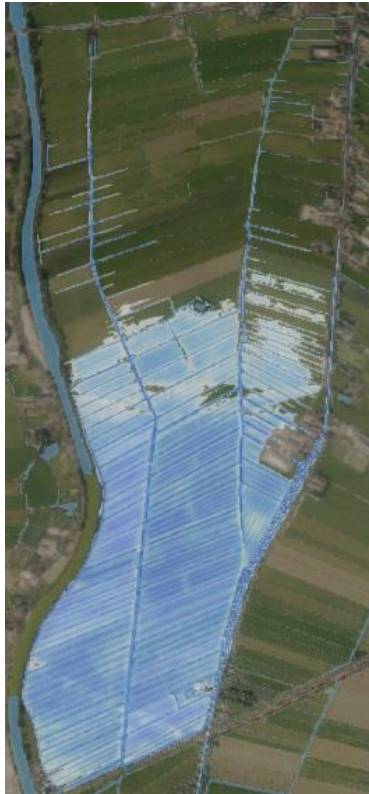


Figuur 72: Variant 4 48:00

Variant 5



Figuur 78: Variant 5 1:48



Figuur 74: Variant 5 5:24



Figuur 75: Variant 5 12:36



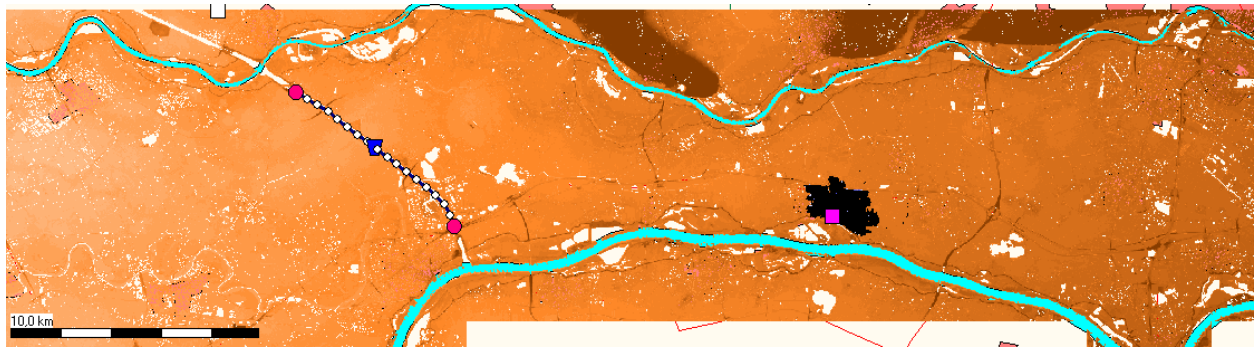
Figuur 76: Variant 5 23:34



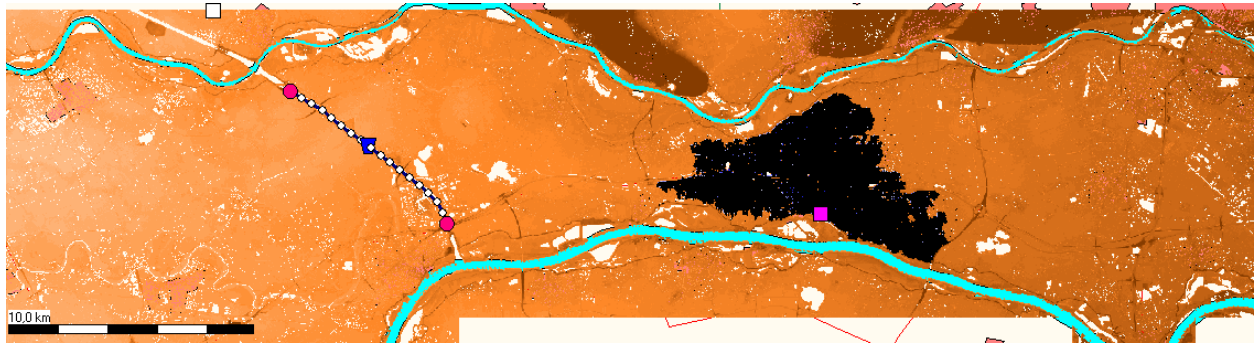
Figuur 77: Variant 5 48:00

Bijlage E. Visualisatie Dodewaard

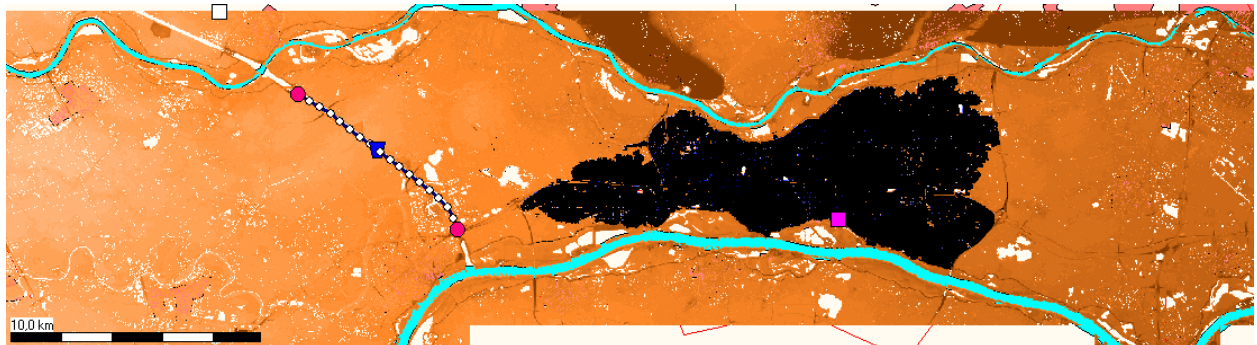
Variant 0 - dijklichaam klei



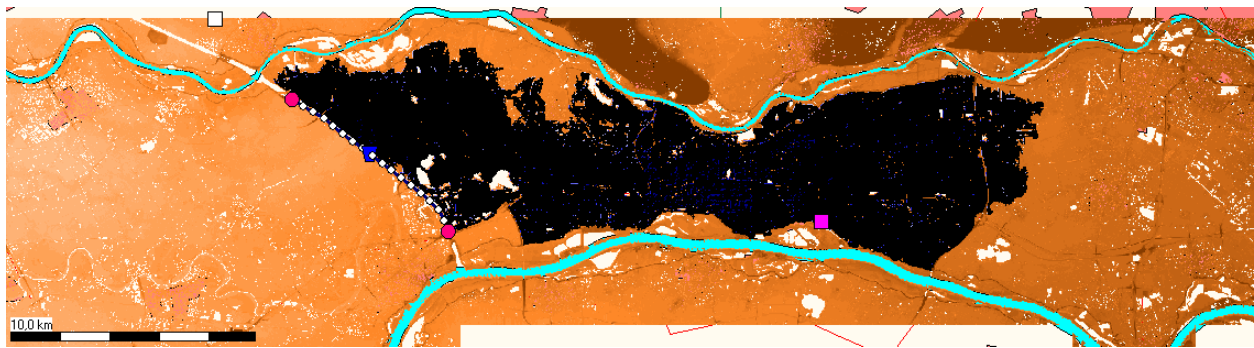
Figuur 79: Variant 0; t=1 uur.



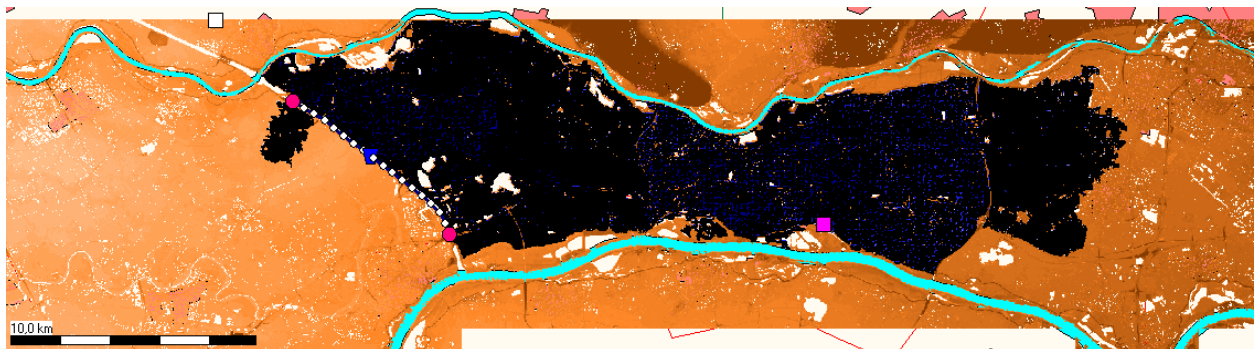
Figuur 80: Variant 0; t=6 uur.



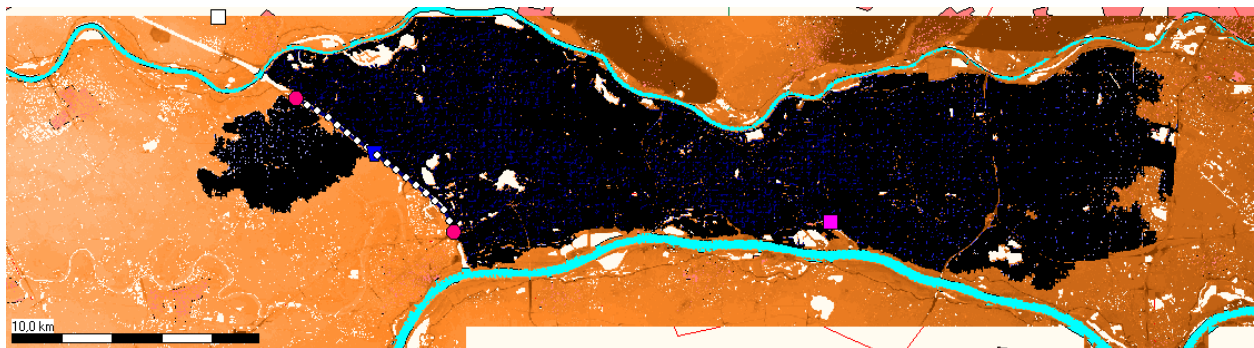
Figuur 81: Variant 0; t=12 uur.



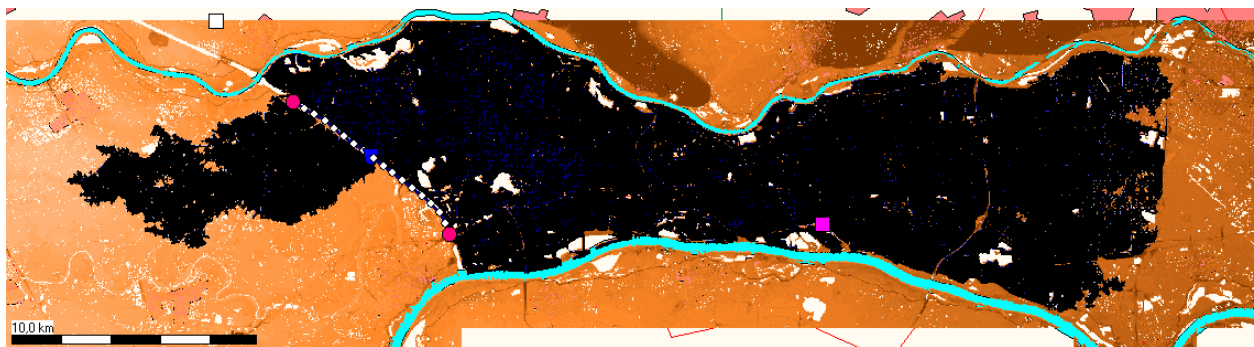
Figuur 82: Variant 0; t=24 uur.



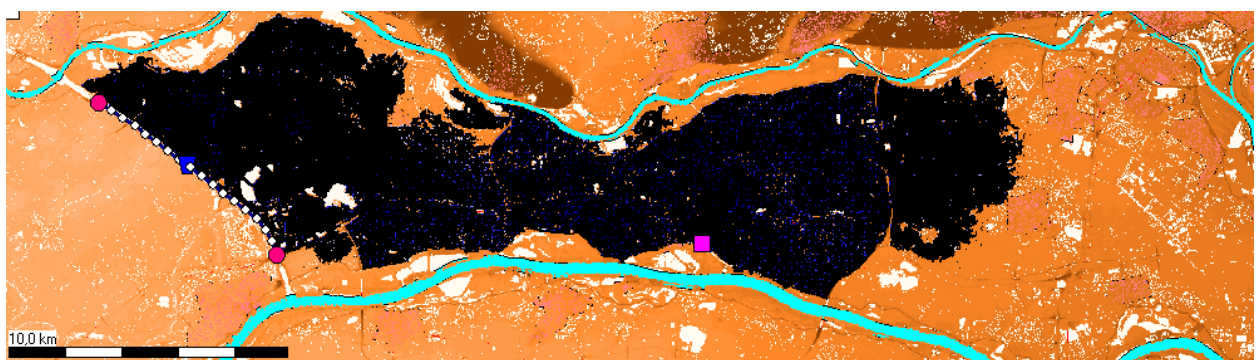
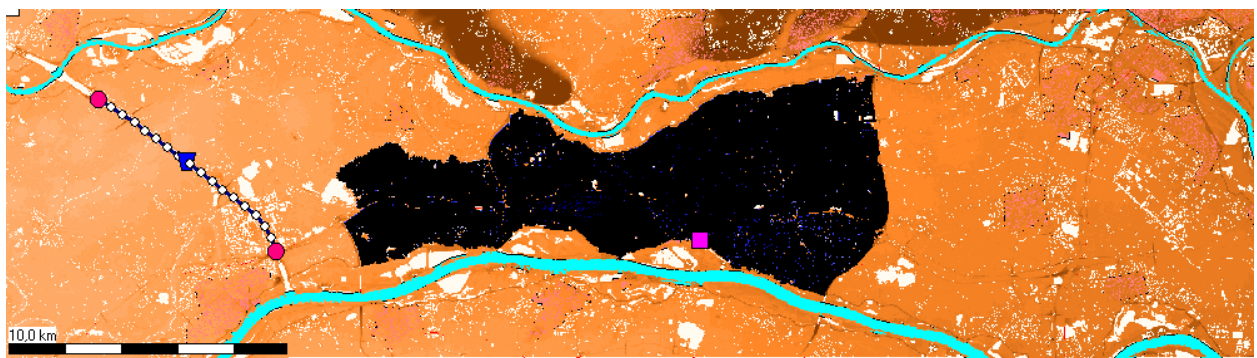
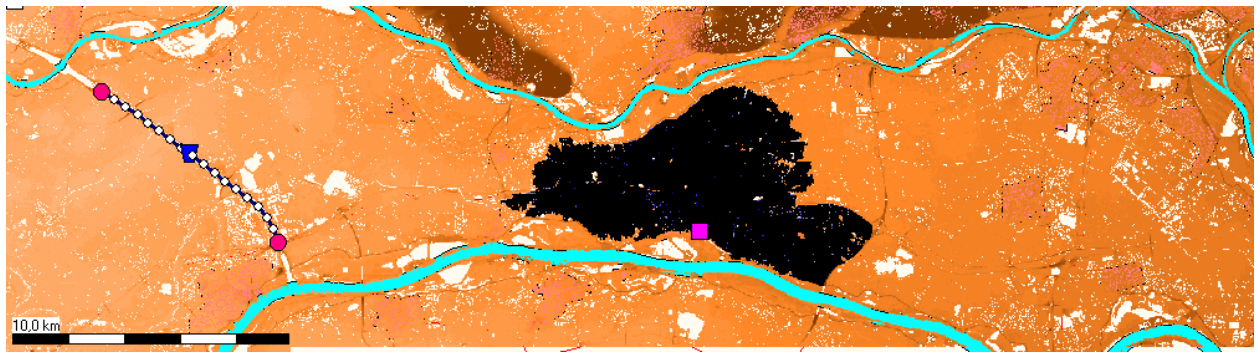
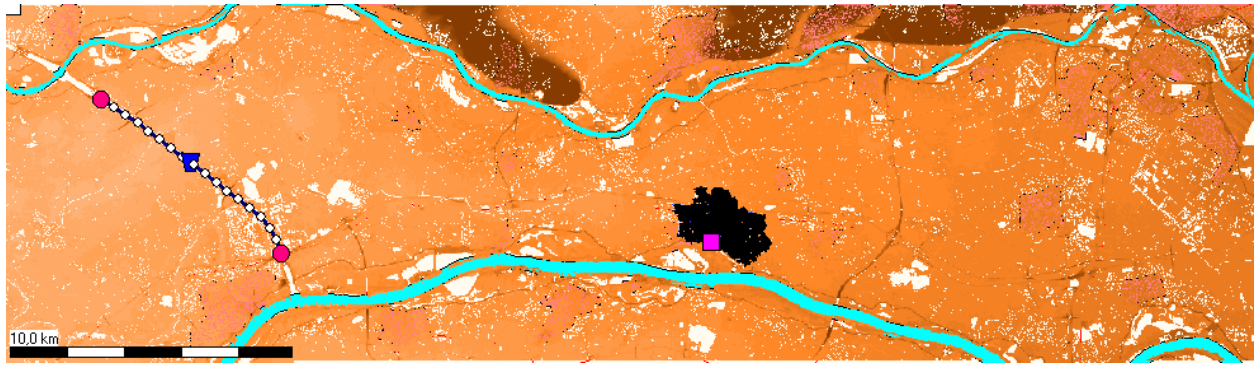
Figuur 83: Variant 0; t=36 uur.

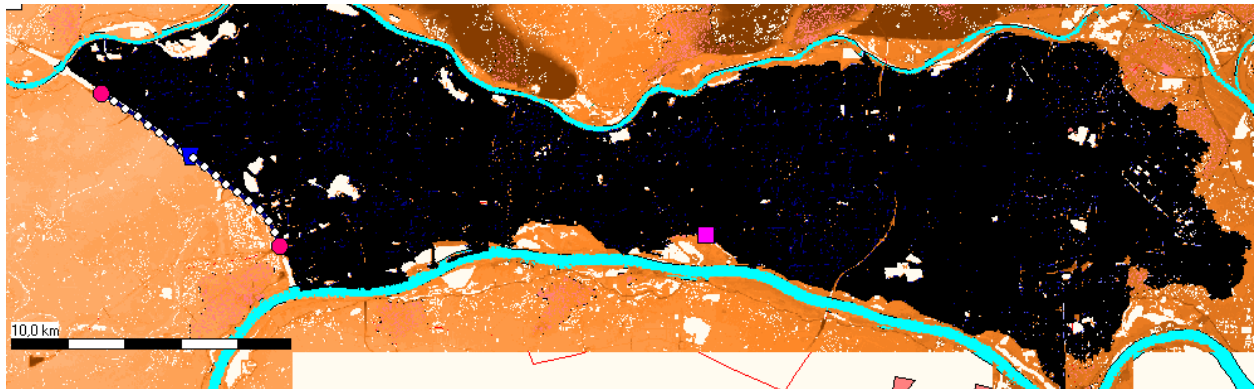
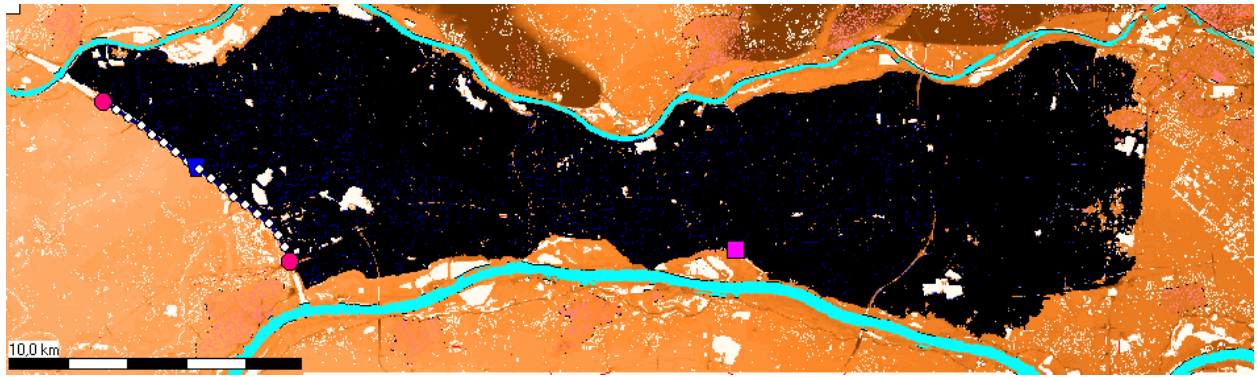


Figuur 84: Variant 0; t=48 uur.



Figuur 85: Variant 0; t=60 uur, einde.

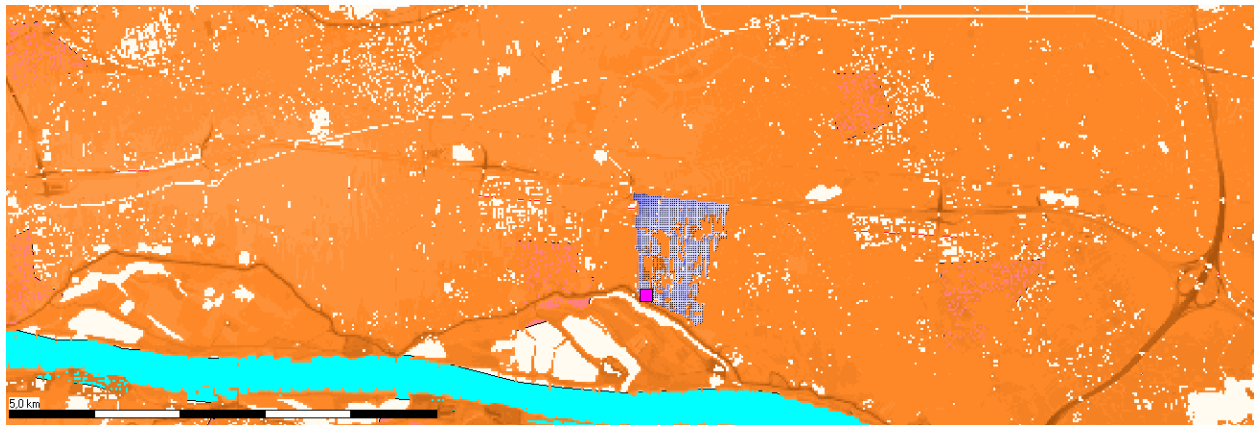




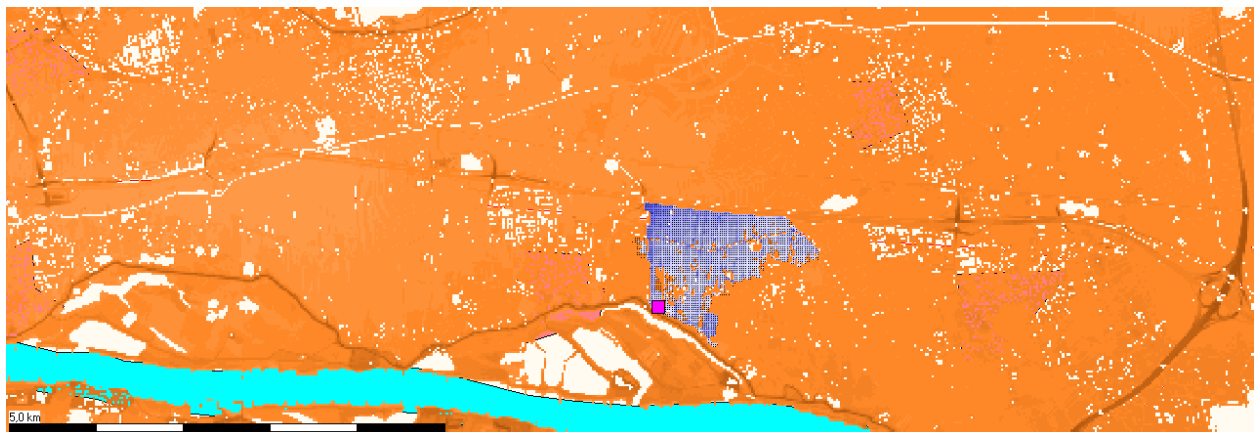
Variant 2 - damwand 12m; dijklichaam klei



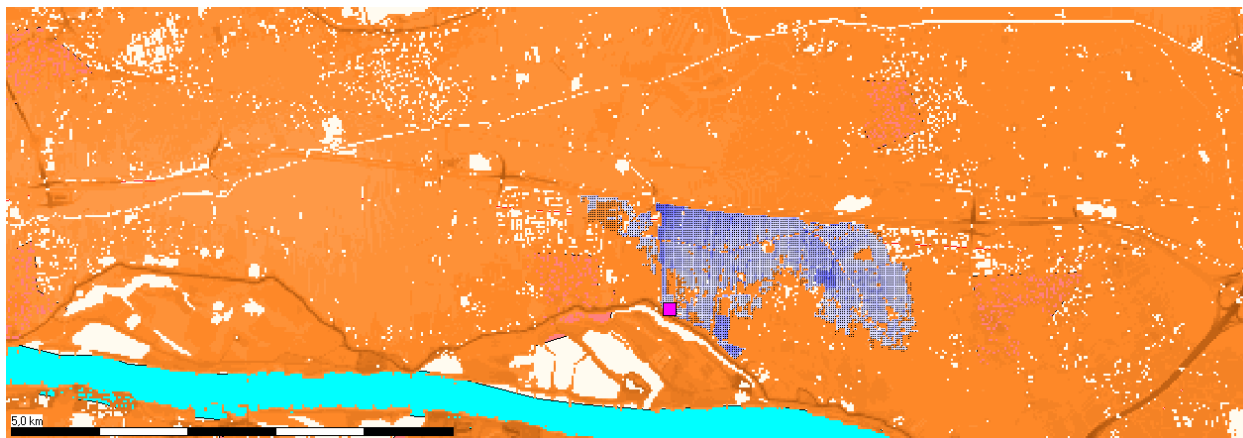
Figuur 86: Variant 2; t=1 uur.



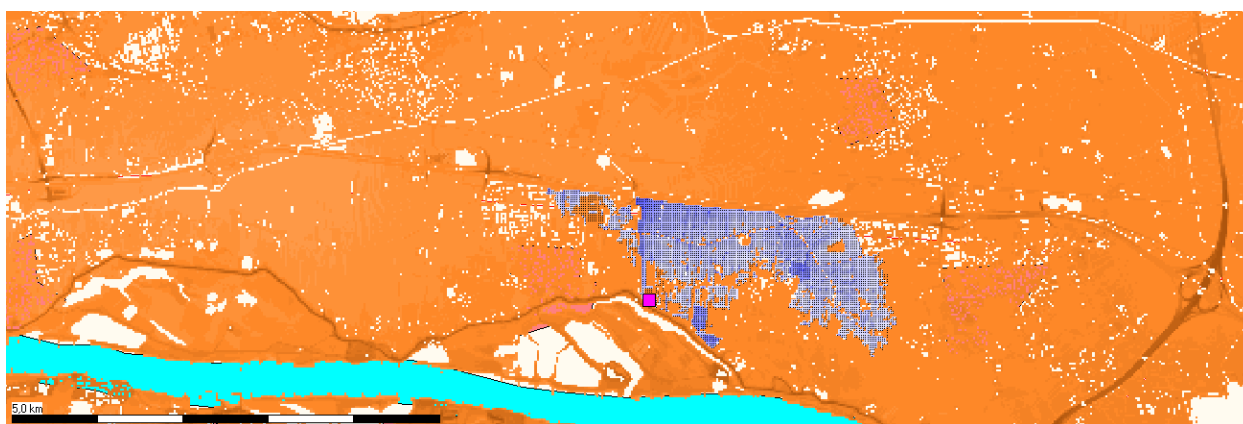
Figuur 87: Variant 2; t=6 uur.



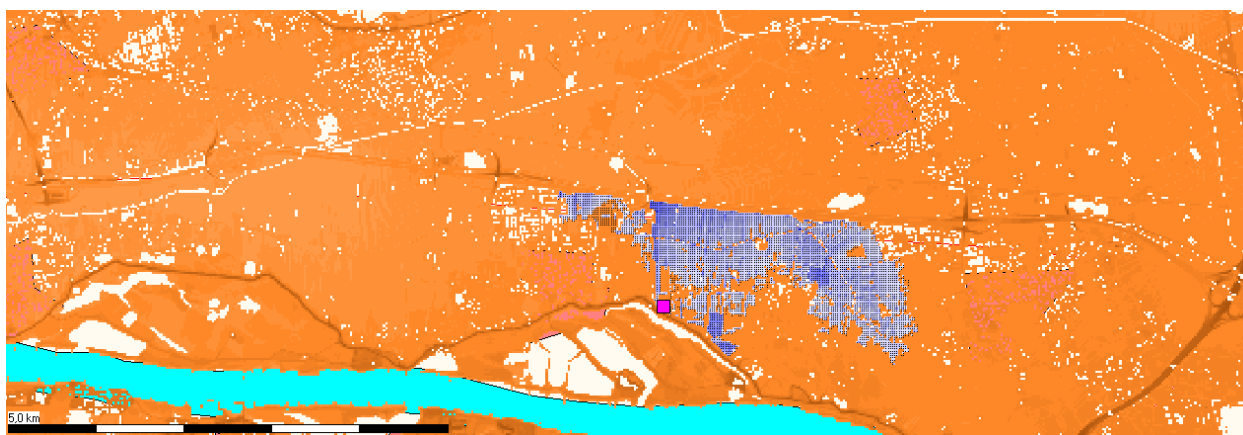
Figuur 88: Variant 2; t=12 uur.



Figuur 89: Variant 2; t=24 uur.



Figuur 90: Variant 2; t=36 uur.

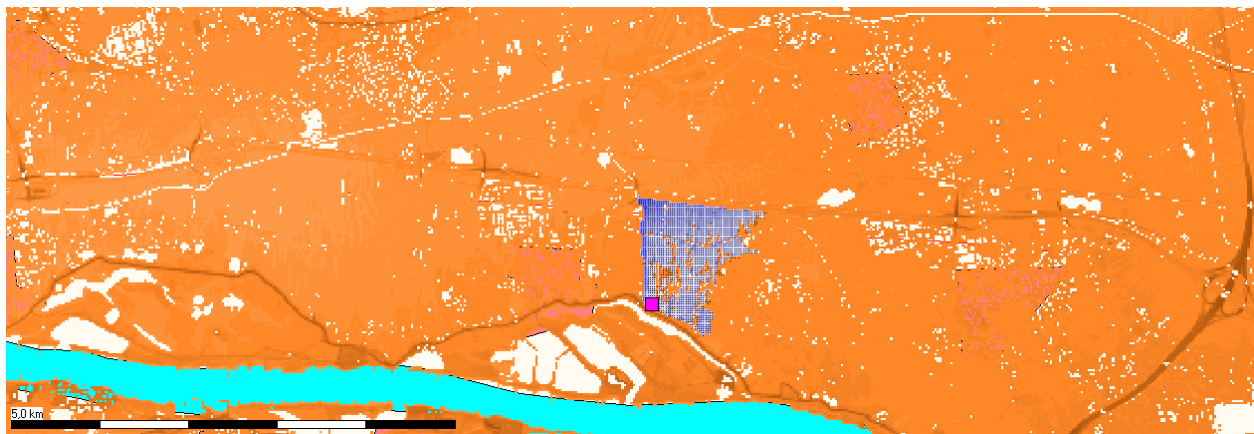


Figuur 91: Variant 2; t=48 uur, einde.

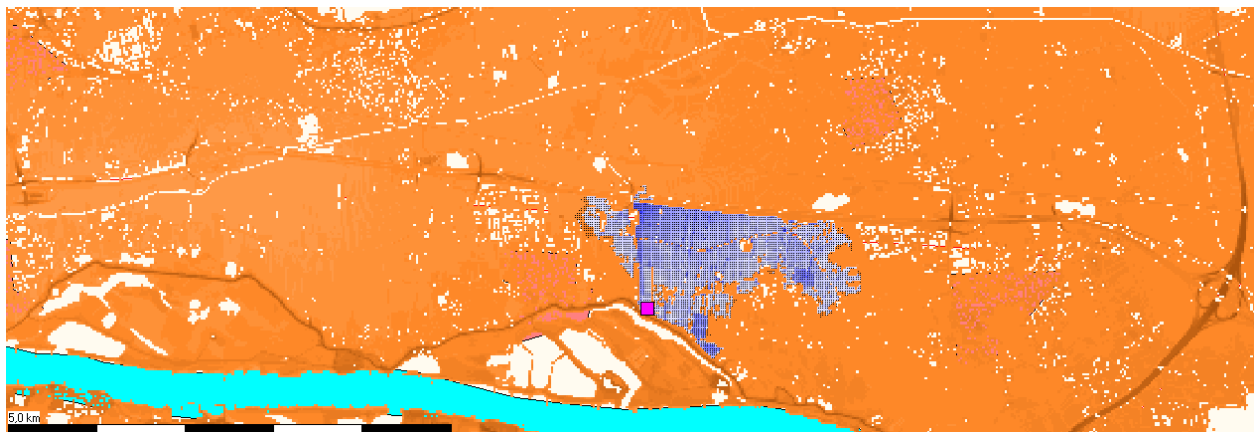
Variant 3 - damwand 12m; dijklichaam zand



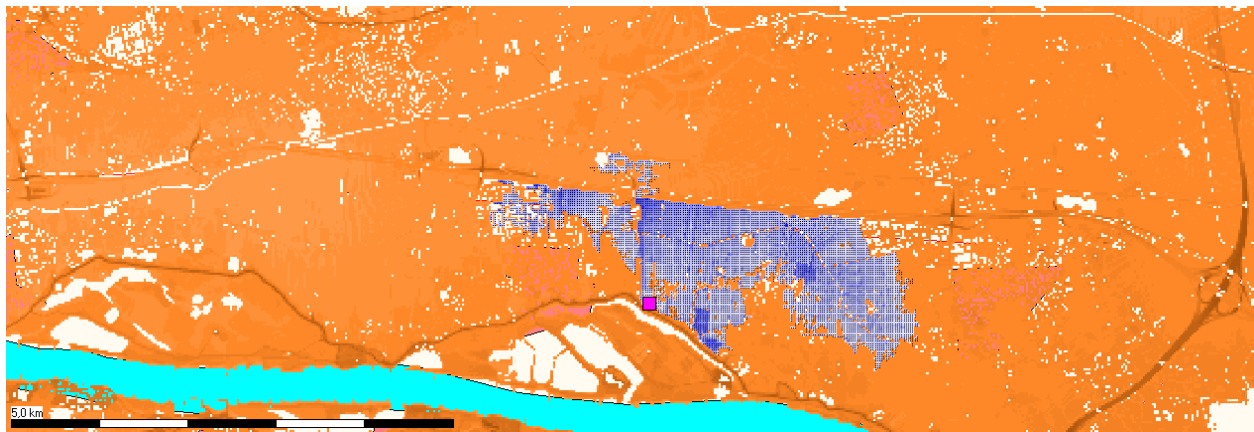
Figuur 92: Variant 3; t=1 uur.



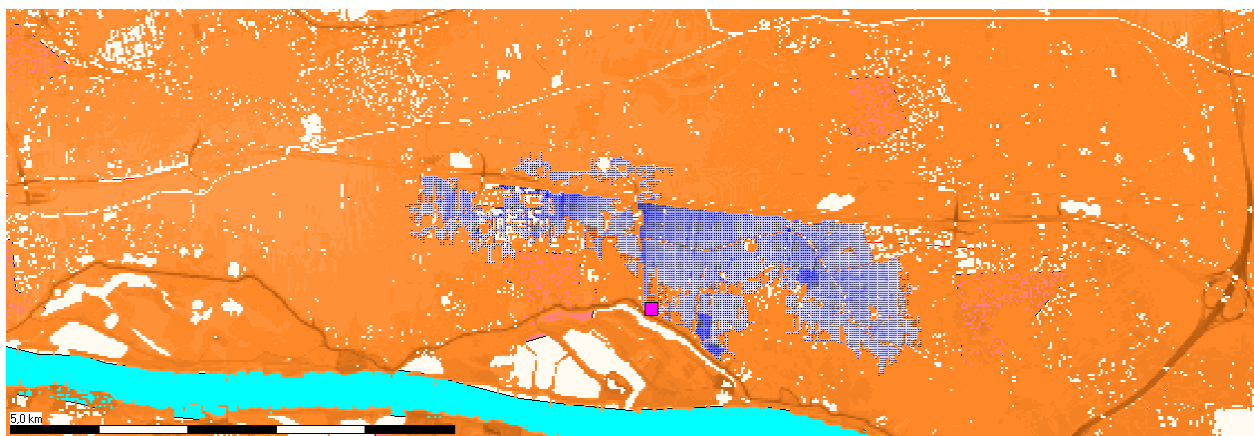
Figuur 93: Variant 3; t=6 uur.



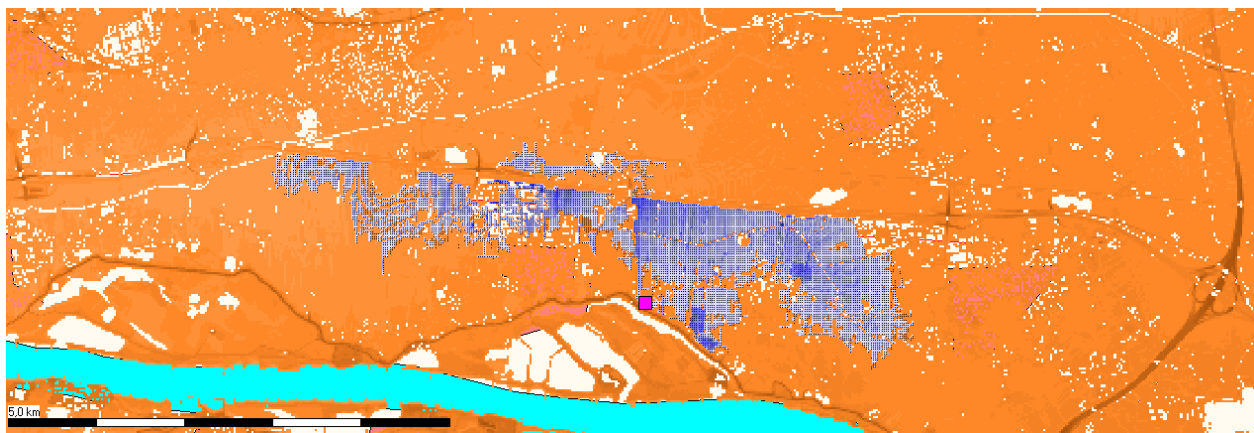
Figuur 94: Variant 3; t=12 uur.



Figuur 95: Variant 3; t=24 uur.

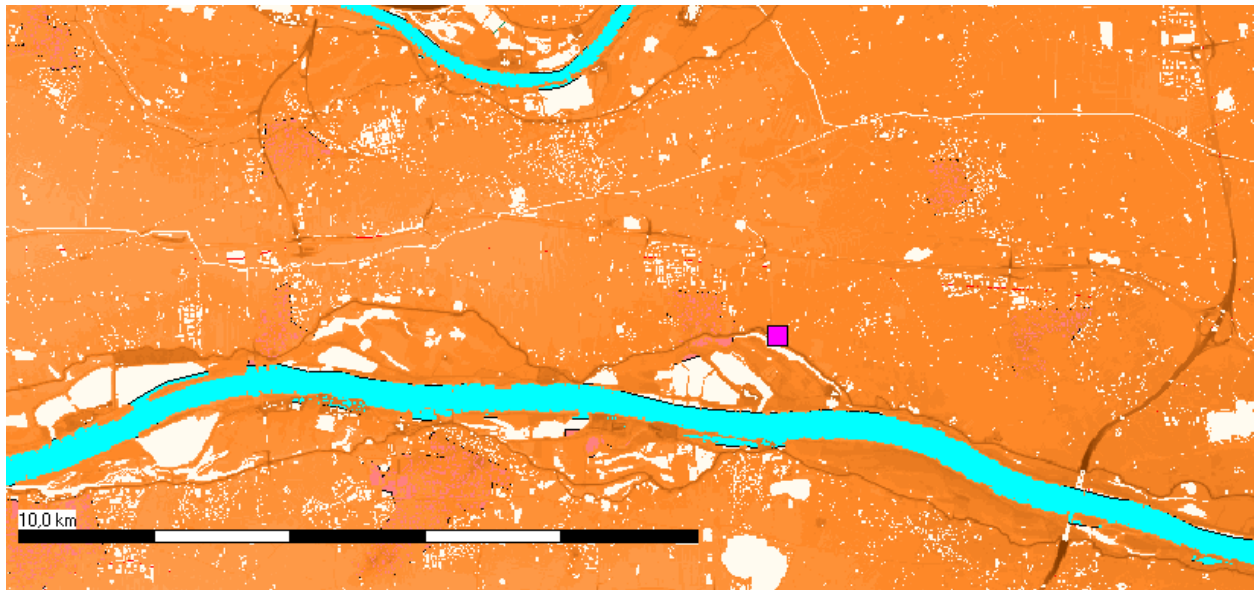


Figuur 96: Variant 3; t=36 uur.

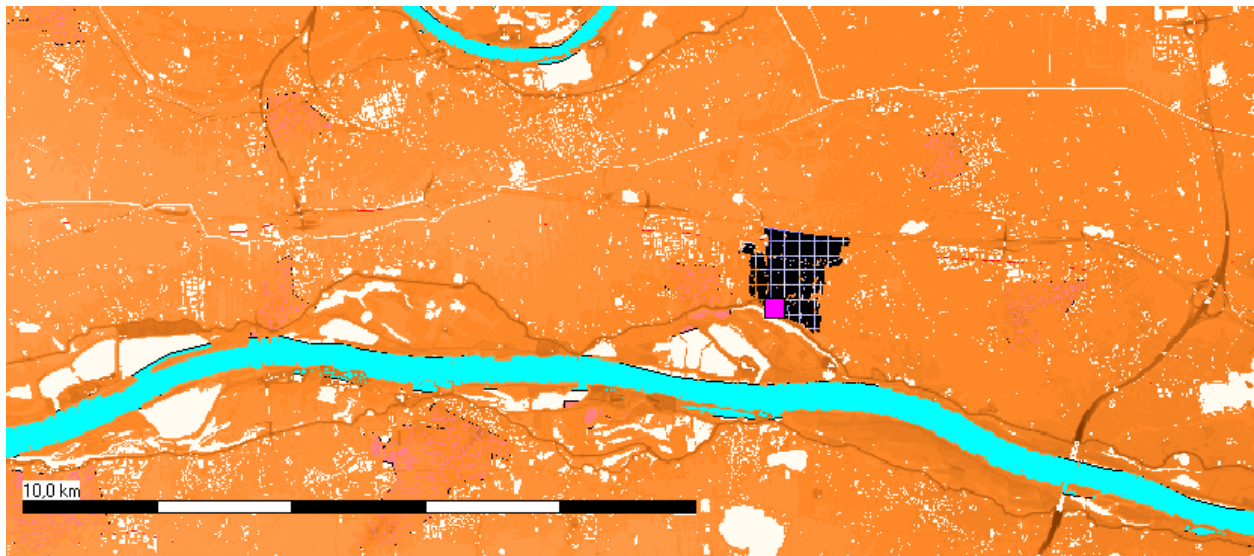


Figuur 97: Variant 3; t=48 uur, einde.

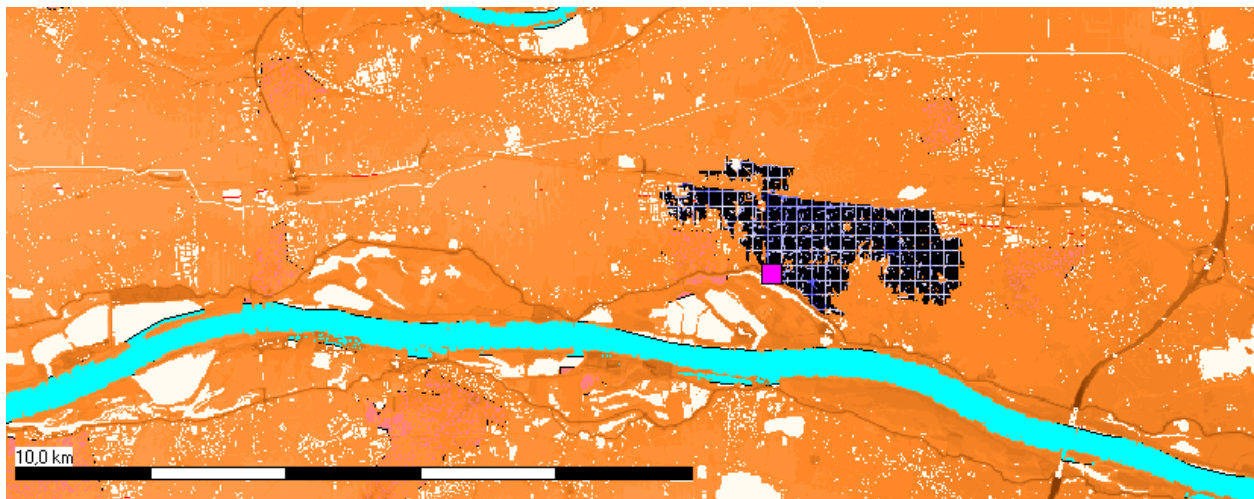
Variant 4 - extra dijk; dijklichaam klei



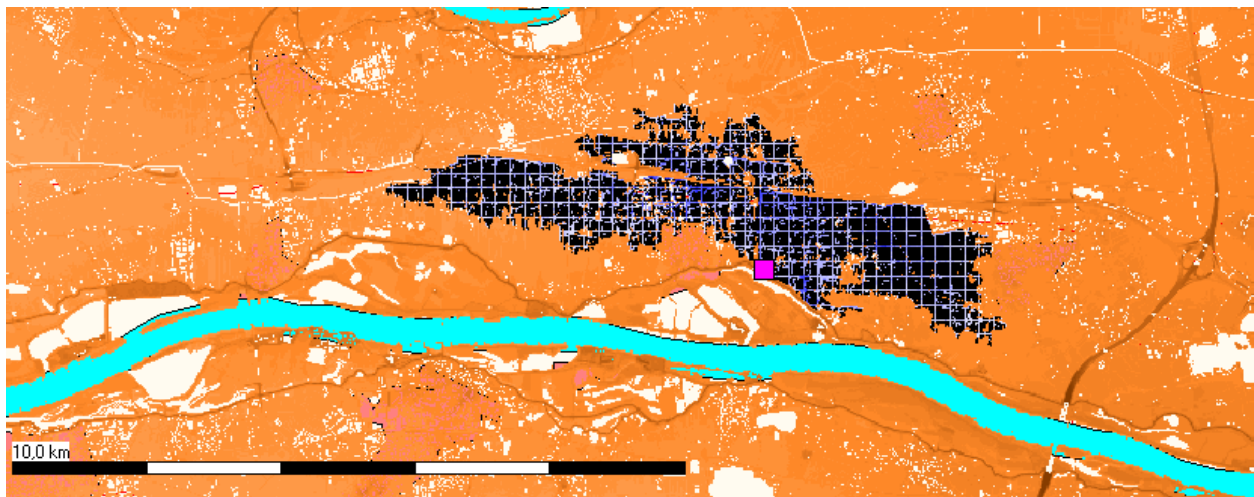
Figuur 98: Variant 4; t=1 uur.



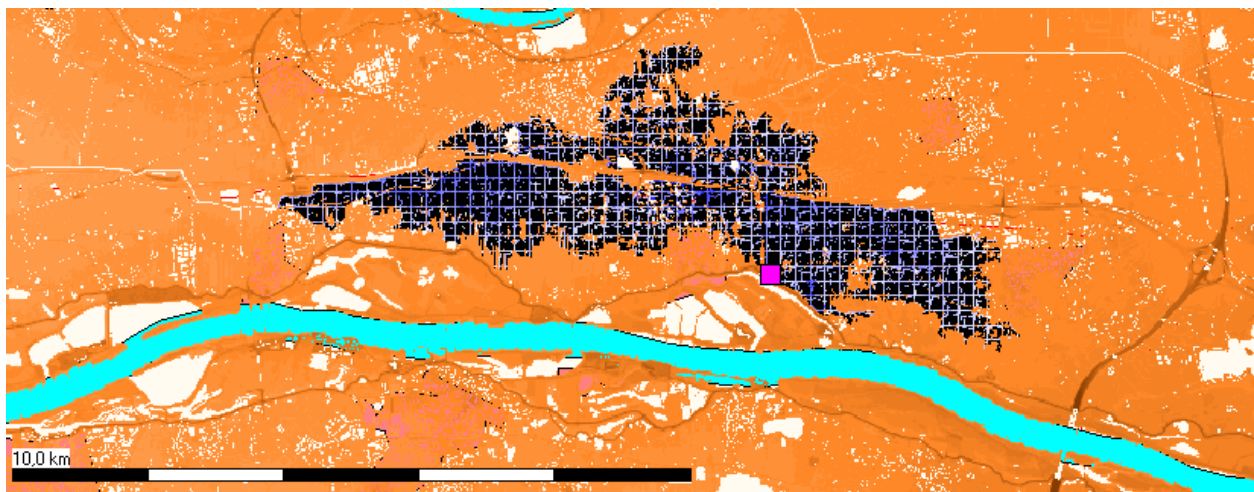
Figuur 99: Variant 4; t=6 uur.



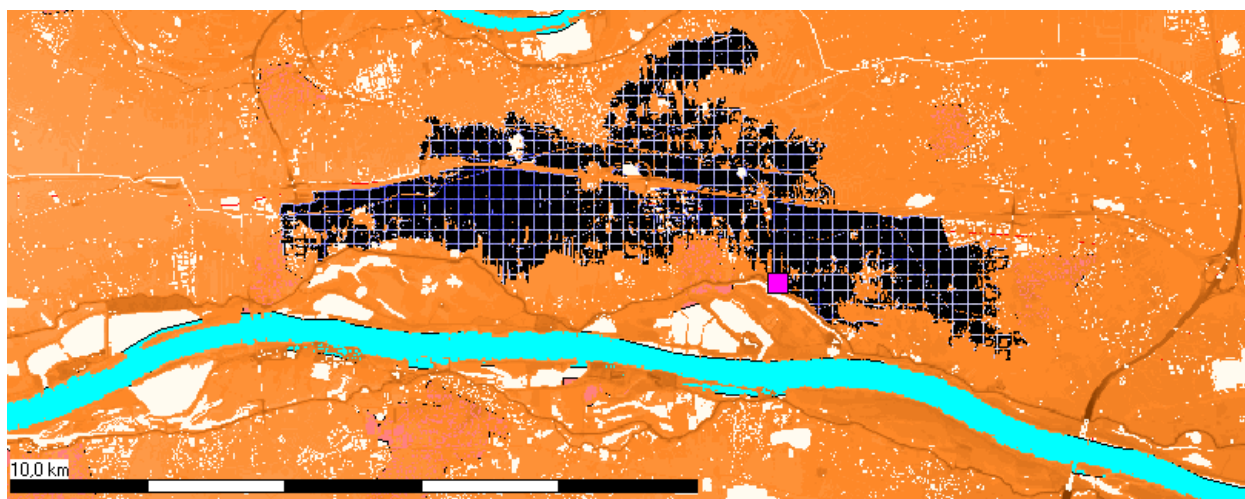
Figuur 100: Variant 4; t=12 uur.



Figuur 101: Variant 4; t=24 uur.

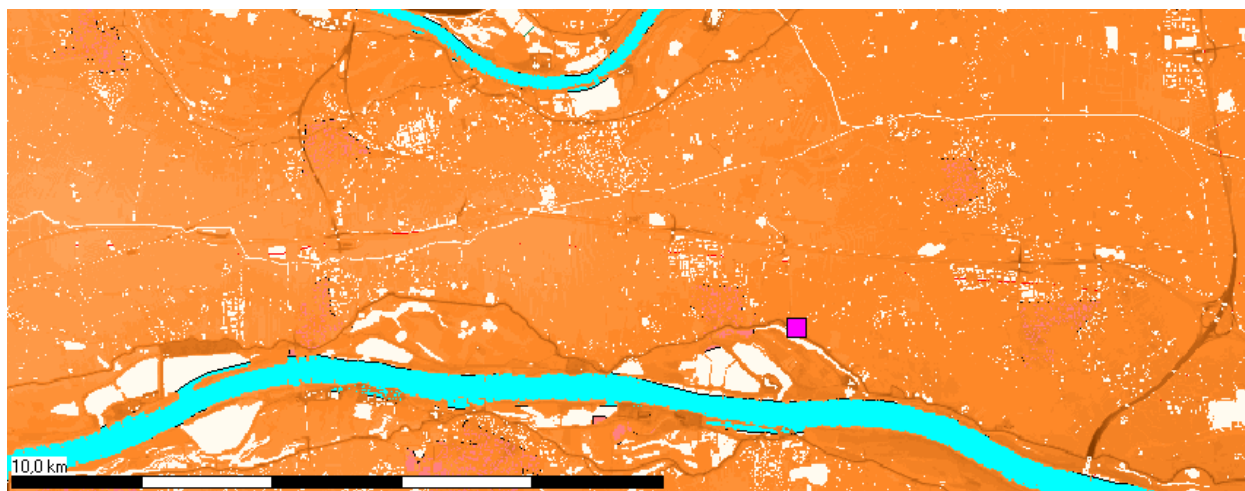


Figuur 102: Variant 4; t=36 uur.

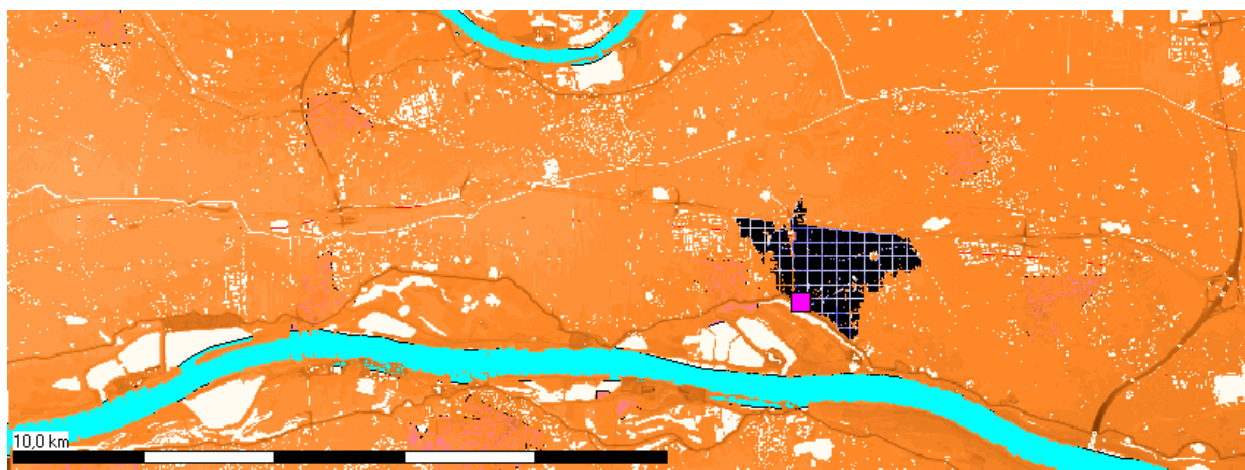


Figuur 103: Variant 4; t=49 uur, einde.

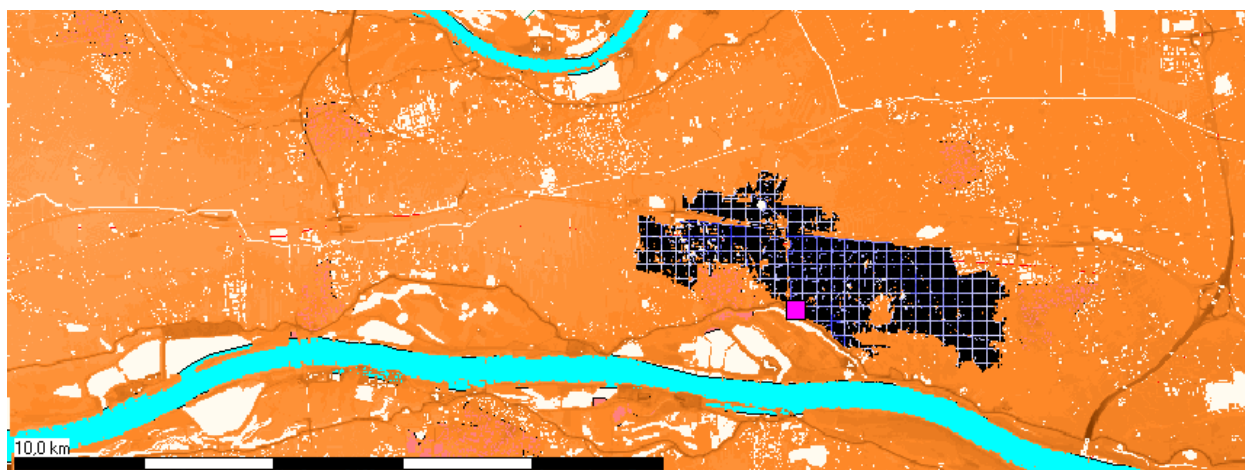
Variant 5 - extra dijk; dijklichaam zand



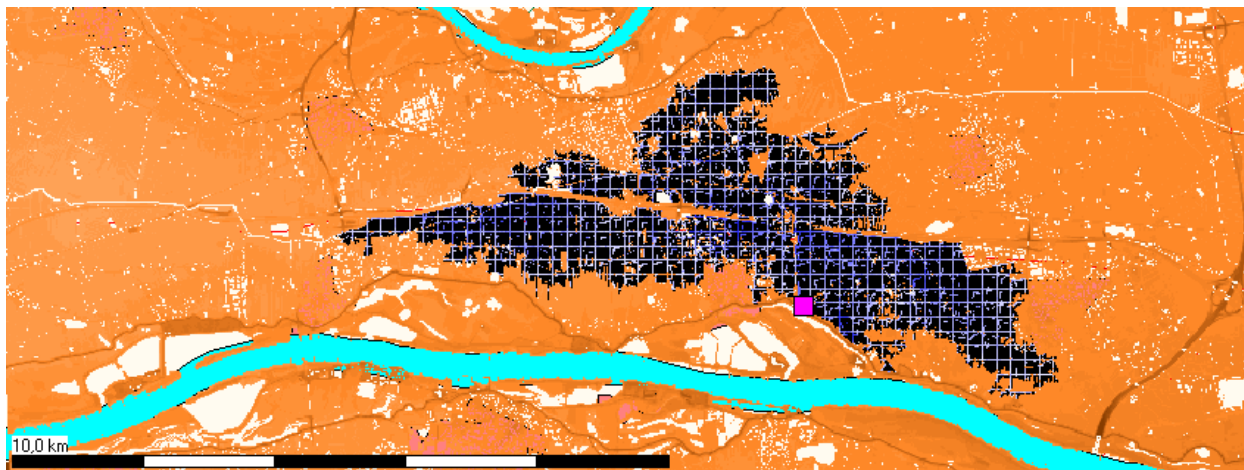
Figuur 104: Variant 5; t=1 uur.



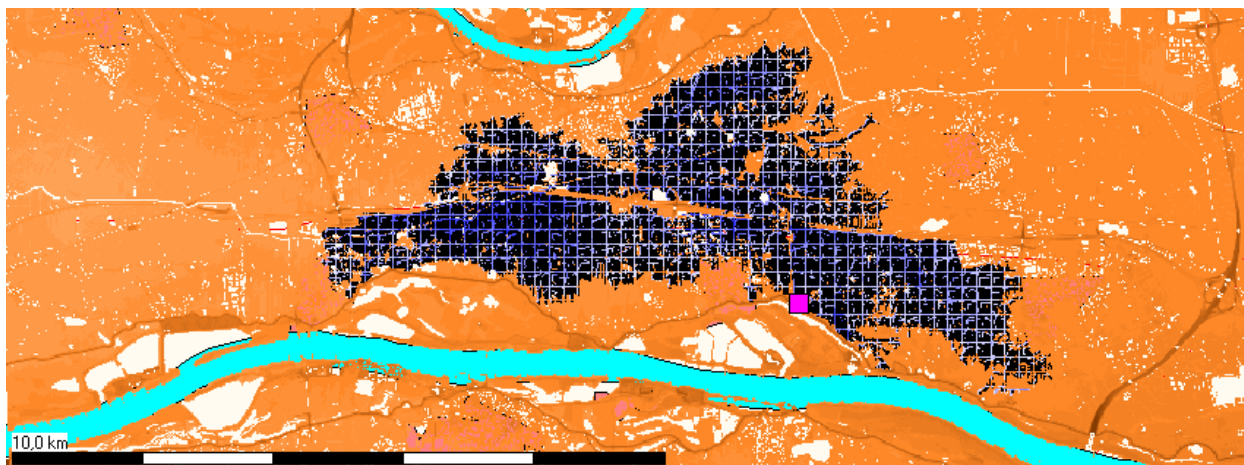
Figuur 105: Variant 5; t=6 uur.



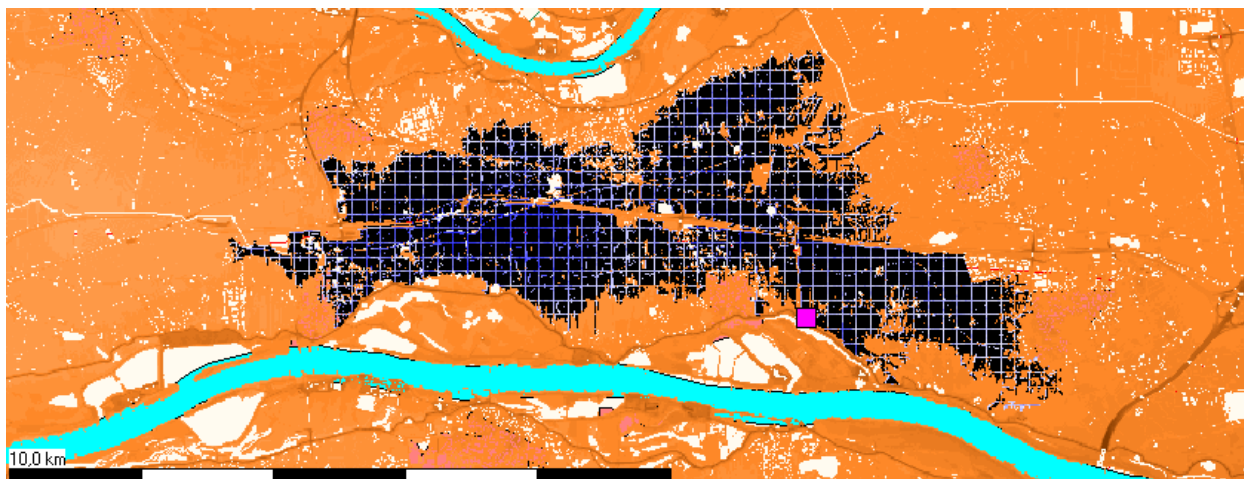
Figuur 106: Variant 5; t=12 uur.



Figuur 107: Variant 5; t=24 uur.



Figuur 108: Variant 5; t=36 uur.



Figuur 109: Variant 5; t=48 uur, einde.

Bijlage F. Schadebedragen Merwede kanaal

Maximale schadebedragen met uitzondering van de speciale objecten heeft elke categorie een maximaal schadebedrag. Deze maximale schadebedragen zijn bepaald op basis van de CBS macro-cijfers per sector op nationaal niveau (De Bruijn et al. 2015). Tabel 4.1 geeft de maximale schadebedragen welke gebruikt worden in SSM2017.

Tabel 4.1 Maximale schadebedragen per schadecategorie per eenheid (in euro's, excl. btw)

	Eenheid	Directe schade	Uitval Bruto	Uitval Netto
Bedrijven				
Bijeenkomst	m ²	168	145	132
Gezondheidszorg	m ²	1.974	1.125	1.055
Industrie	m ²	1.497	808	700
Kantoor	m ²	1.283	1.107	942
Onderwijs	m ²	993	183	162
Sport	m ²	102	54	46
Winkel	m ²	1.508	334	276
Woningen				
Eengezinswoningen – opstal	m ²	1.000		
Eengezinswoningen – inboedel	object	70.000	10.665	
Begane grond appartementen – opstal	m ²	1.000		
Begane grond appartementen – inboedel	object	70.000	10.665	
Eerste verdieping appartementen – opstal	m ²	1.000		
Eerste verdieping appartementen – inboedel	object	70.000	10.665	
Hogere verdieping appartementen – opstal	m ²	1.000		
Hogere verdieping appartementen - inboedel	object	70.000	10.665	
Infrastructuur				
Rijkswegen	m	1.770		
Autowegen	m	1.200		
Overige wegen	m	327		
Spoorwegen – elektrificeert	m	5.400		
Spoorwegen – non-elektrificeert	m	5.400 ⁶		
Overige				
Landbouw	m ²	1,83		
Glastuinbouw	m ²	49		
Stedelijk gebied	m ²	59,65		
Extensieve recreatie	m ²	10,79		
Intensieve recreatie	m ²	13,29		
Vliegvelden	m ²	146		
Vervoermiddelen	object	7.942		
Gemalen	object	911.600		
Zuiveringsinstallaties	object	13.240.000		

Figuur 110: Schade per m² (Kymo Slager, 2017)

Binnendijkse schade-en slachtoffermethode

Binnen SSM2017 worden voor de volgende hoofd-en deeltcategorieën schade en slachtoffers berekend. Voor elke categorie is een schadefunctie gedefinieerd, een maximaal schadebedrag bepaald en zijn de geografische gegevens verzameld.

Categorie	Directe schade	Bedrijfsuitval	Schadefunctie	Maximale schade		
				Direct	Bruto	Netto
Bedrijven				in € / m ²		
Bijeenkomst	x	x	Winkel	168	145	132
Gezondheidszorg	x	x	Kantoor	1974	1145	1025
Industrie	x	x	Industrie	1565	808	700
Kantoor	x	x	Kantoor	1283	1107	942
Onderwijs	x	x	Kantoor	993	183	162
Sport	x	x	Industrie	102	54	46
Winkel	x	x	Winkel	1508	334	276
Woningen				in € / m ² en € / object		
Eengezinswoningen – opstal	x		Eengezinswoningen - opstal	1000		
Eengezinswoningen – inboedel	x	x	Eengezinswoningen - inboedel	70000	10665	
Begane grond app. – opstal	x		Begane grond - opstal	1000		
Begane grond app. – inboedel	x	x	Begane grond - inboedel	70000	10665	
Eerste verdieping app. – opstal	x		Eerste verdieping – opstal	1000		
Eerste verdieping app. – inboedel	x	x	Eerste verdieping – inboedel	70000	10665	
Hogere verdieping app. – opstal	x		Hogere verdieping – opstal	1000		
Hogere verdieping app. – inboedel	x	x	Hogere verdieping – inboedel	70000	10665	
Infrastructuur				in € / m		
Rijkswegen	x		Infrastructuur	1770		
Autowegen	x		Infrastructuur	1200		
Overige wegen	x		Infrastructuur	327		
Spoorwegen (non-electrisch)	x		Infrastructuur	1350		
Spoorwegen (electrisch)	x		Infrastructuur	5400		
Overig landgebruik				in € / m ² en € / object		
Landbouw	x		Landbouw	1,83		
Glasiuinbouw	x		Landbouw	49		
Stedelijk gebied	x		Infrastructuur	59,65		
Extensieve recreatie	x		Landbouw	10,79		
Intensieve recreatie	x		Landbouw	13,29		
Vliegvelden	x		Landbouw	146		
Vervoermiddelen	x		Auto	7942		
Gemalen	x		Gemalen	911600		
Zuiveringsinstallaties	x		Zuiveringsinstallatie	1.324 m		
Inwoners						
Slachtoffers	x		Slachtoffers	nvt		

Daarnaast worden ook het aantal getroffen kwetsbare objecten bepaald: woonverblijf, hotel/pension, onderwijsinstelling, ziekenhuis/tehuis, publieksgebouw, kantoor/bedrijf, ander object, rijksmonumenten, IPPC-bedrijven, zwemwaterlocaties, drinkwaterlocaties en Natura2000 gebieden.

Bijlage G. Onzekerheden Schade en Slachtoffer module

In deze bijlage staan de onzekerheden die in de Schade en Slachtoffer module staan omschreven.

3.6 Niet meegenomen posten

SSM2017 bevat niet alle mogelijke manieren waarop schade kan ontstaan tijdens een overstroming. Posten zoals evacuatiekosten, schoonmaak, nazorg, verstoorde infrastructuur, afhandelingskosten, schade aan de natuur en culturele waarde worden niet meegenomen. Voor kosten-batenanalyses zouden dit soort posten eigenlijk wel meegenomen moeten worden. In de WV21 studie voor het normeren van de primaire waterkeringen is er daarom een opslagfactor toegepast op de resultaten van de voorganger van SSM2017 (HIS-SSM). Voor HIS-SSM werd een opslagfactor van 1,6 aanbevolen in de WV21 studie. In SSM2017 zijn sommige elementen die in deze 1,6 zitten expliciet meegenomen, maar er is nog steeds een opslagfactor nodig. Deze nieuwe benodigde opslagfactor is 1,42. De motivatie hiervoor is terug te vinden in bijlage A.

Bijlage A: Opslagfactor niet meegenomen posten

In de onderstaande tabel is een overzicht te zien van de opslagfactor voor niet meegenomen posten zoals afgeleid in bijlage D van de WV21 studie voor de normering van primaire waterkeringen. Voor meer informatie zie bijlage D van WV21 en het achtergrondrapport van SSM-2017.

Posten die via een opslag meegenomen worden	Opslag op schade volgens WV21	Opgenomen in SSM2017	Nieuwe opslagfactor
Kosten van hulpverlening, evacuatie, opruiming en nazorg	10%	0%	10%
Schade van directe en indirecte bedrijfsuitval	9-19%	100%	0%
Indirecte effecten van doorsnijding van infrastructuur	2 – 14%	0%	2 – 14%
Overige (afhandelingskosten, uitval van woningdiensten, doorsnijding nutsleidingen en communicatieverbindingen, langetermijnpact op het investeringsklimaat, LNC waarden, onbekende posten)	19 – 17%	20%	14 - 15%
Risicopremie	10%	0%	10%
Totaal - middenpunt	60%		42%
Factor	1,6		1,42

De opslagfactor van 1,4 die ook in WV21 werd aanbevolen om economische groei en prijspeil wijzigingen mee te nemen komt ook te vervallen. Deze wijzigingen waren namelijk voor de periode 2000 tot 2011. Het huidige prijspeil van SSM2017 is 2011 en de economische waarden komen uit 2014. Voor sommige projecten zou het nodig zijn om deze waarden op een vergelijkbare manier bij te stellen.

Bijlage H. Schadeberekeningen Merwedekanaal

Tabel 14 variant 0 - klei met damwand 1,25 Merwede

variant 0	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	920000,00	€ 1,83	€ 1.683.600,00
	woningen	1.955,00	€ 1.000,00	€ 1.955.000,00
				€ 3.683.600,00

Tabel 15 variant 1 - zand met damwand 1,25 Merwede

variant 1	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	1250000,00	€ 1,83	€ 2.287.500,00
	woningen	1.955,00	€ 1.000,00	€ 1.955.000,00
				€ 4.242.500,00

Tabel 16 variant 2 - klei met damwand 1,55 Merwede

variant 2	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	233000,00	€ 1,83	€ 426.390,00
	woningen	0,00	€ 1.000,00	€ 0,00
				€ 426.390,00

Tabel 17 variant 3 - zand met damwand 1,55 Merwede

variant 3	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	233000,00	€ 1,83	€ 426.390,00
	woningen	0,00	€ 1.000,00	€ 0,00
				€ 426.390,00

Tabel 18 variant 4 - klei zonder damwand Merwede

variant 4	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	3030000,00	€ 1,83	€ 5.544.900,00
	woningen	1.955,00	€ 1.000,00	€ 1.955.000,00
				€ 7.449.900,00

Tabel 19 variant 5 - zand zonder damwand Merwede

variant 5	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	3030000,00	€ 1,83	€ 5.544.900,00
	woningen	1.955,00	€ 1.000,00	€ 1.955.000,00
				€ 7.499.900,00

Tabel 20 variant 6 – damwand elke 10 meter

variant 6	oppervlaktes	m ²	kosten per m ²	totaal kosten
	landbouwgrond	850000,00	€ 1,83	€ 1.555.500,00
	woningen	0,00	€ 1.000,00	€ 0,00
				€ 1.555.500,00

Bijlage I. Schadeberekeningen Dodewaard

Tabel 21: Variant 0 - dijklichaam klei: Schade en slachtoffers Dodewaard.

Totaal schade	4900000	euro (x1000)
Totaal slachtoffers*	279	personen
Totaal getroffen	75490	personen
*ZONDER evacuatie		

Tabel 22: Variant 1 - dijklichaam zand: Schade en slachtoffers Dodewaard.

Totaal schade	6600000	euro (x1000)
Totaal slachtoffers*	515	personen
Totaal getroffen	92020	personen
*ZONDER evacuatie		

Tabel 23: Variant 2 - damwand 12 m; dijklichaam klei: Schade en slachtoffers Dodewaard.

Totaal schade	1600	euro(x1000)
Totaal slachtoffers*	0	personen
Totaal getroffen	16	personen
*ZONDER evacuatie		

Tabel 24: Variant 3 - damwand 12m; dijklichaam zand: Schade en slachtoffers Dodewaard.

Totaal schade	4300	euro(x1000)
Totaal slachtoffers*	0	personen
Totaal getroffen	49	personen
*ZONDER evacuatie		

Tabel 25: Variant 4- extra dijk 12m; dijklichaam klei: Schade en slachtoffers Dodewaard.

Totaal schade	19000	euro(x1000)
Totaal slachtoffers*	0	personen
Totaal getroffen	923	personen
*ZONDER evacuatie		

Tabel 26: Variant 5 - extra dijk 12m; dijklichaam zand: Schade en slachtoffer Dodewaard.

Totaal schade	47000	euro(x1000)
Totaal slachtoffers*	1	personen
Totaal getroffen	3241	personen
*ZONDER evacuatie		

Bijlage J. Kosten getallen per kilometer

Methoden en kosten per kilometer

Methode	Kosten per kilometer
Methode 1: Dijk van zand en klei	Ca. € 5 - € 10 miljoen Afhankelijk van omvang versterking
Methode 2: Kistdam (zelfstandig kerende oplossing)	Ca. € 15 miljoen
Methode 3: Dijk met zand en klei, en met bijvoorbeeld een damwand	Ca. € 6 - € 11 miljoen Afhankelijk van omvang versterking
Methode 4: Dijk met zand en klei, en met een verticale piping-oplossing (bijvoorbeeld verticaal zanddicht geotextiel)	Ca. € 7 - € 12 miljoen Afhankelijk van omvang versterking

Figuur 111: Kostengetallen per kilometer. (Waterschap Rivierenland, sd)