Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together

RAPPORT

Morfologische analyse vooroever IJsselmeerdijk

Klant: Waterschap Zuiderzeeland

Referentie: BH5290-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001

Status: Definitief/00

Datum: 18 februari 2022

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX Amersfoort
Water & Maritime
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Morfologische analyse vooroever IJsselmeerdijk

Ondertitel:
Referentie: BH5290-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001
Status: 00/Definitief
Datum: 18 februari 2022
Projectnaam: IJMD
Projectnummer: BH5290
Auteur(s): Bram Evers, Anne de Beer

Opgesteld door: Bram Evers, Anne de Beer

Gecontroleerd door: Filip Schuurman, Sander Post

Datum: 18-02-2022

Goedgekeurd door: Odelinde Nieuwenhuis

Datum: 18-02-2022

Classificatie
Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoud

1 Inleiding 1

1.1 Randvoorwaarden en eisen aan een vooroever vanuit waterveiligheid en ecologie 2

2 Systeemkennis 4

2.1 Randvoorwaarden op het IJsselmeer 4

2.2 Stabiliteit en ontwikkeling van bestaande vooroevers 6

2.3 Invloed van wind gedreven stroming 9

3 Morfologische beschouwing van kansrijke varianten 11

3.1 Inleiding 11

3.2 Modelkeuze 11

3.3 Methodologie 11

3.4 Dwarstransport 12

3.4.1 Minimaal profiel A - helling van 1:10 12

3.4.2 Minimaal profiel B – horizontaal plateau op NAP 0 m 12

3.4.3 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m 14

3.4.4 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer 15

3.4.5 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m en vooroeverdam (kruin op NAP -1 m) 16

3.4.6 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer + vooroeverdam (kruin op NAP -1 m) 17

3.4.7 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + vooroeverdam (kruin op NAP 0 m) 18

3.4.8 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer + vooroeverdam (kruin op NAP 0 m) 20

3.4.9 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer (geoptimaliseerd) + vooroeverdam (kruin op NAP 0 m) 21

3.4.10 Conclusies dwarstransport 22

3.5 Langstransport 22

4 Wens vanuit ecologische plus 31

5 Verwachte beheerinspanning 32

6 Conclusies, onzekerheden en aanbevelingen 33

6.1 Conclusies 33

6.2 Aandachtspunten en onzekerheden 34

7 Referenties 36

1 Inleiding

Het traject van de IJsselmeerdijk van de Houtribdijk tot aan de Ketelbrug wordt de komende jaren versterkt. De dijkbekleding aan de buitenzijde van het dijktraject is grotendeels afgekeurd en het binnentalud van de dijk is onvoldoende bestand tegen overslaand water (hoogte-tekort). Het dijktraject kent een grote golfbelasting; bij een noordwesterstorm blaast de wind over het gehele IJsselmeer en genereert hierbij hoge golven. Het dijktraject waar die grote golfbelasting kan optreden is onder te verdelen in drie dijkvakken, met elk een eigen oriëntatie. Halverwege dijkvak 2 ligt een energiecentrale, de Maxima Centrale, aan de buitendijkse zijde. In dijkvak 2 ligt ook een overslaghaven, Flevokust, met vooroeverdam ervoor. Ten westen van dijkvak 3 ligt een jachthaven. Het traject is te zien in Figuur 1-1.

Figuur 1-1: Ligging van de IJsselmeerdijk.

Een van de opties om de dijk te versterken is de aanleg van een voorland. Doel van dit voorland is dat het golfbelasting op het huidige dijklichaam dusdanig beperkt, dat er geen verdere versterkingsopgave aan de huidige dijk overblijft. Het voorland heeft dus als primaire doel om de golfbelasting te dempen. Er zijn hierbij verschillende ontwerpopties:

1. Vorm, breedte en hoogteligging van het voorland;
2. Gebruik van opsluitconstructies: langsdammen aan meerzijde van het voorland of strekdammen aan weerszijden van het voorland kunnen gebruikt worden om het zand op zijn plaats te houden.

In de Verkenningsfase wordt het ontwerp van het voorland verder uitgewerkt en moeten de volgende vragen worden beantwoord:

- Kustdwars:
  - Hoe ziet het evenwichtsprofiel van het voorland eruit?
  - Hoeveel erosie van het voorland treedt op bij dagelijkse en bij stormcondities? Wat moet de overdimensionering zijn om de waterveiligheid op langere termijn te garanderen en wat zijn de beheerkosten?
  - Hoe hangen deze aspecten af van het voorlandontwerp (vorm/opsluitconstructies)?
- Kustlangs:
  - Hoeveel sediment wordt er richting Maximacentrale getransporteerd?
  - Hoeveel erosie van het voorland treedt op bij dagelijkse en bij stormcondities? Wat moet de overdimensionering zijn om de waterveiligheid op langere termijn te garanderen en wat zijn de beheerkosten?
  - Hoe hangen deze aspecten af van ontwerp (vorm/opsluitconstructies)?

Om deze vragen te beantwoorden, is een morfologische modelstudie naar de ontwikkeling van het voorland uitgevoerd.

1.1 Randvoorwaarden en eisen aan een vooroever vanuit waterveiligheid en ecologie

De vooroever heeft als primair doel om binnenkomende golven te breken en/of te dempen, en zo de energie uit de golven te halen. Dit resulteert in minder golfaanval op de dijk waardoor de huidige bekleding voldoet en de kruin niet opgehoogd hoeft te worden. Daarnaast is de vooroever een interessante optie omdat deze vanuit ecologie een meerwaarde kan bieden. De wensen vanuit zowel waterveiligheid als ecologie zijn hieronder weergegeven, deze bieden input aan de (minimale) afmetingen en vorm van het voorland.

Vanuit waterveiligheid zijn er verschillende opties mogelijk en kan er gevarieerd worden in de breedte en hoogte van het voorland (zie ook Figuur 1-2). Hierbij geldt dat een lager voorland breder moet zijn om hetzelfde golfbrekend en -dempend effect te hebben. Daarnaast is er onderscheid te maken tussen dijkvak 1 & 2 en 3. In onderstaande tabel zijn de **minimale** afmetingen van het voorland vanuit de waterveiligheid weergegeven. De maatgevende condities voor het ontwerp van de dijk treden op bij een 1/67.000 jaar storm.

Op het stuk dijk rondom de Maxima centrale is een vooroever geen optie. Daarom wordt in het vervolg van het rapport gekeken naar een vooroever op twee deeltrajecten: dijkvak 2-1 aan noordzijde van de Maxima centrale en dijkvak 2-2 aan zuidzijde van de Maxima centrale.

Tabel 1-1: Minimale afmetingen van het voorland in het kader van waterveiligheid.

	Dijkvak 1	Dijkvak 2	Dijkvak 3
Optie A	Helling van 1:10, aansluiting op NAP +1 m	Helling van 1:10, aansluiting op NAP +1 m	Helling van 1:10, aansluiting op NAP +1 m
Optie B	20 m breed op NAP 0 m	20 m breed op NAP 0 m	20 m breed op NAP 0 m
Optie C	50 m breed op NAP -1 m	50 m breed op NAP -1 m	20 m breed op NAP -1 m

Vanuit ecologie geredeneerd biedt een ondiep plateau (luwe zone) het meeste voordeel. Deze luwe zone is te bereiken door inzet van een vooroeverdam: op een vooroeverdam breken de meeste golven. Een voorland van 20 m breed is te smal om een significante bijdrage te leveren, de 50 m brede variant is daarom wenselijker vanuit ecologisch perspectief.

Figuur 1-2: Dijkontwerp.

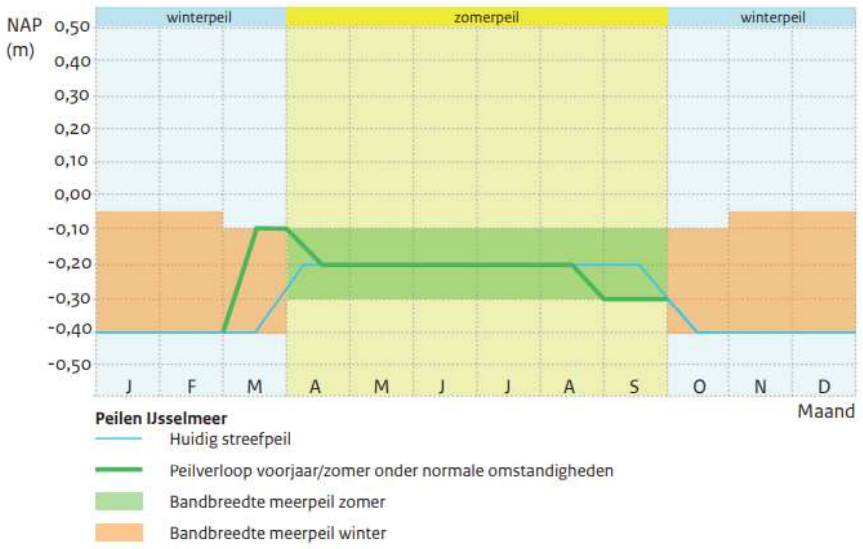
2 Systeemkennis

Bij de aanleg van zandige oplossing (zoals een vooroever) moet er rekening gehouden worden met de morfologische activiteit van deze oplossing. Over de tijd zal de vooroever veranderen als gevolg van stroming en golven, zowel tijdens de dagelijkse condities als tijdens storm. Waar we langs kusten een vrij goed beeld hebben van hoe een vooroever zich ontwikkelt, is dit voor een meer onzekerder, want in een meer ontbreekt namelijk een van de drijvende factoren getij. Het IJsselmeer is dan ook een vrij uniek systeem om een vooroever in aan te leggen. Om een goede inschatting te kunnen maken van de te verwachten morfologische activiteit kijken we daarom vooral naar de bestaande kennis van het systeem waarin de pilot Houtribdijk een waardevolle informatiebron is. Deze bestaande systeemkennis wordt in dit hoofdstuk nader toegelicht. De bestaande kennis vullen we aan met morfologische analyses en berekeningen die worden toegelicht in het volgende hoofdstuk.

2.1 Randvoorwaarden op het IJsselmeer

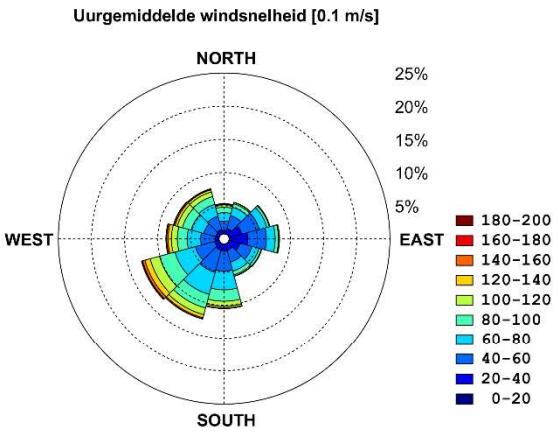
Het IJsselmeer kenmerkt zich door een redelijk uniforme “badkuip” bathymetrie, langs de randen wordt het snel dieper tot een diepte van ongeveer 5-6 meter wordt bereikt. Deze diepte is redelijk uniform over het grootste deel van het IJsselmeer.

Het waterpeil op het IJsselmeer wordt gereguleerd en is daardoor zeer constant. Het peilbesluit IJsselmeergebied is op 14 juni 2018 ondertekend door de minister van Infrastructuur en Waterstaat en in werking getreden vanaf 2019. Vanaf dat moment geldt dat het zomerpeil fluctueert binnen een bandbreedte tussen NAP -0,10 m en NAP -0,30 m (zie Figuur 2-1). Het winterpeil verandert niet: er wordt gestuurd op een ondergrens van NAP -0,40 m. Bij storm of een zware onweersbui kan de waterstand in het IJssel- en Markermeer snel veranderen. In korte tijd kan het (lokaal) tot wel 1,5 m stijgen, om vervolgens weer net zo hard te dalen. Ook bij extreme rivierafvoer kan een (langdurig) verhoogd IJsselmeerpeil optreden.



Figuur 2-1: Peil in het IJsselmeer gedurende het jaar (Rijkswaterstaat, 2018).

Winddata is beschikbaar bij Stavoren (dataset van het KNMI, beschikbaar vanaf 1981) waaruit de overheersende windrichtingen af te leiden zijn (Figuur 2-2). De overheersende windrichting komt vanuit het zuidwesten, al komen alle richtingen voor.



Figuur 2-2: Windcondities bij Stavoren (1981-2021).

Golfcondities in het IJsselmeer zijn relatief kalm tijdens dagelijkse condities. Doordat het een afgesloten meer betreft, is de strijklengte beperkt en komen er alleen lokaal gevormde golven voor. Extreme condities zijn aangeleverd door HKV voor de terugkeertijden 10 – 100.000 jaar en samengevat in Tabel 2-1. De waterstand varieert tussen NAP +1,11 en NAP +2,69 m, de significante golfhoogte tussen 1,71 en 3,7 m.

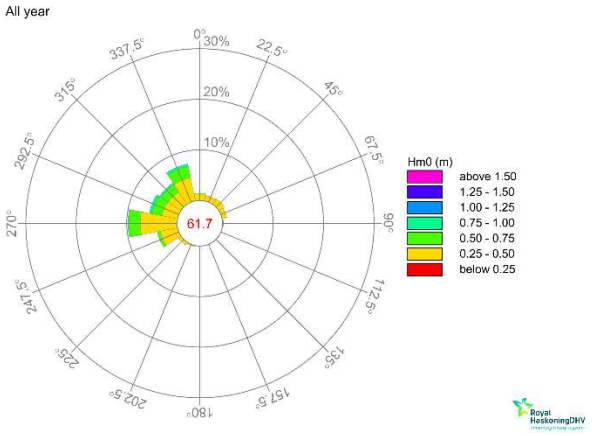
Tabel 2-1: Extreme condities.

Parameter	Terugkeertijd					
	10 jaar	50 jaar	100 jaar	1000 jaar	10.000 jaar	100.000 jaar
IJsselmeerpeil [m+NAP]	0,08	0,07	0,08	0,11	0,08	0,12
Lokale waterstand [m+NAP]	1,11	1,24	1,39	1,88	2,21	2,69
Significante golfhoogte Hm0 [m]	1,71	2,29	2,45	2,97	3,3	3,7
Golfperiode Tm-1,0 [s]	4,82	5,28	5,45	5,94	6,9	7,25
Golfrichting [graden tov Noord]	315,4	315,6	315,6	315,6	315,4	315,4

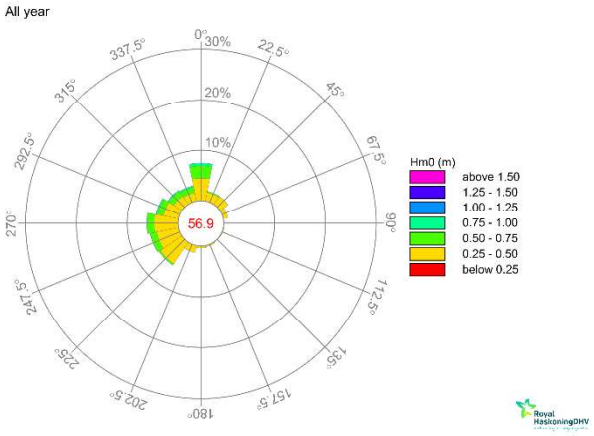
Dagelijkse golfcondities ter hoogte van de IJsselmeerdijk zijn niet beschikbaar (er zijn geen openbare golfboeien). De dagelijkse golfcondities zijn daarom met behulp van een SWAN model afgeleid aan de hand van de windcondities bij Stavoren. Hierbij is met behulp van 3 verschillende SWAN roosters (roostercel-afmetingen van 200, 75 en 25 m) de wind bij Stavoren naar de IJsselmeerdijk getransformeerd, waarbij het variërende IJsselmeerpeil mee is genomen. Resulterende golfrozen bij de verschillende dijkvakken zijn te zien in Figuur 2-3. Te zien is dat de dominante golfrichting varieert van noordwest bij dijkvak 1 tot noord-noordoost bij dijkvak 3. Let wel dat een SWAN model geen windopzet meeneemt, waardoor bij aanlandige wind er een onderschatting plaatsvindt van waterstand en golfhoogte en bij aflandige wind juist een overschatting. Het maximale IJsselmeerpeil is NAP -0,1 m, terwijl tijdens

een storm of zware onweersbui het peil lokaal tot 1,5 kan stijgen. Onder normale condities met een stevige wind kan de waterstand bij de dijk dus hoger zijn dan het maximale IJsselmeerpeil, waarmee het aangrijpingspunt hoger in het profiel ligt. Dit zal voornamelijk effect hebben wanneer dammen met bepaalde kruinhoogtes (waterstand net wel/net niet boven de dam) worden beschouwd.

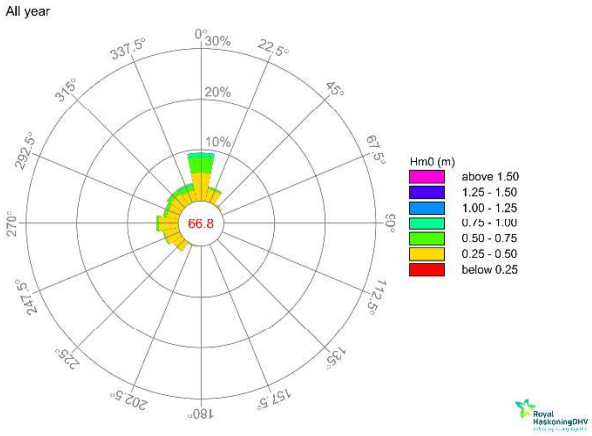
Dijkvak 1



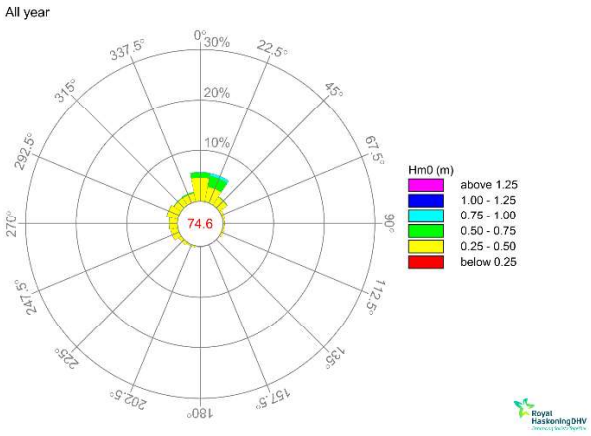
Dijkvak 2-1



Dijkvak 2-2



Dijkvak 3



Figuur 2-3: Golfrozen bij de verschillende dijkvakken.

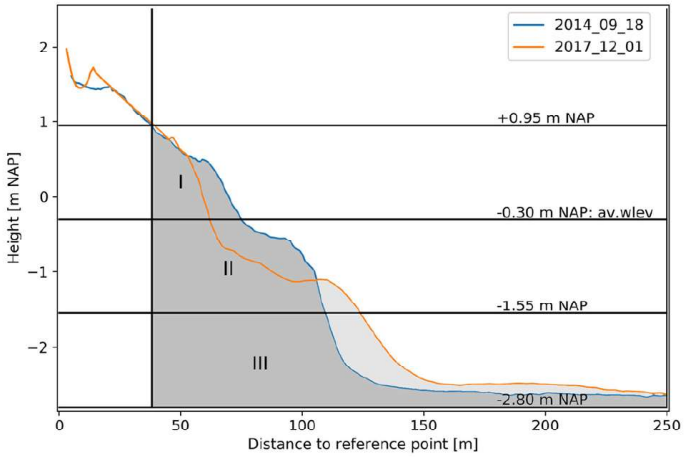
Door het stabiele waterpeil en de beperkte strijklengte is het IJsselmeer ten opzichte van een kustsysteem een typisch laag energetisch systeem zonder getijdewerking.

2.2 Stabiliteit en ontwikkeling van bestaande vooroevers

Het IJsselmeer wordt gescheiden van het Markermeer door de Houtribdijk. Hier wordt momenteel een pilot uitgevoerd waarin een zandige oplossing is toegepast (zie Figuur 2-4). In 2014 is hier een vooroever aangelegd welke sindsdien goed gemonitord wordt om te bepalen wat de ontwikkeling is. Hier zijn geen vooroeverdammen toegepast. De lessen uit deze pilot geven inzicht in welk type vooroever het meest stabiel is.

Figuur 2-4: Locatie van de zandige vooroever van de Houtribdijk.

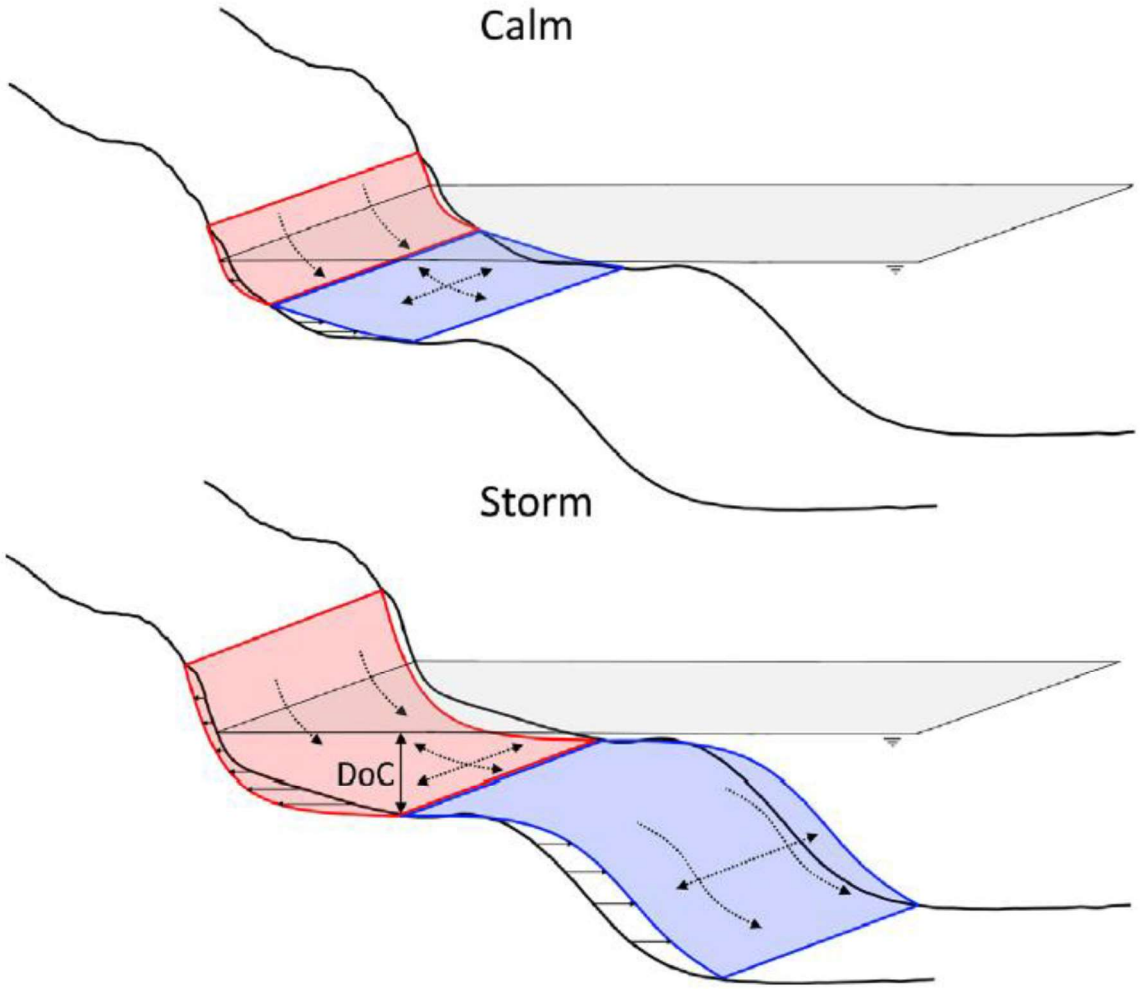
Uit de pilot blijkt dat er tot op heden nog geen evenwichtsprofiel is gevormd, de vooroevers blijven in ontwikkeling en herschikken zich zowel tijdens dagelijkse omstandigheden als tijdens stormcondities. Bij de vooroever van de Houtribdijk is geen vooroeverdam toegepast. Wel is er een duidelijke herschikking van het sediment zichtbaar over de afgelopen jaren, deze is weergegeven in Figuur 2-5Figuur 3-1.



Figuur 2-5: Vervorming van het dwarsprofiel van de vooroever bij de pilot Houtribdijk tussen 2014 en 2017, Ton et al., 2020).

Onder invloed van golven wordt sediment in beweging gebracht in zowel de langs- als dwarsrichting. In de ontwikkeling is duidelijk zichtbaar dat er zich een plateau vormt op een hoogte van ongeveer NAP -1 m. Boven in het profiel vindt er erosie plaats rondom de waterlijn en beneden in het profiel is aangroei zichtbaar: het sediment herschikt zich. Dit is ook conceptueel weergegeven in Figuur 2-6. De hoogte van het plateau is afhankelijk van het waterpeil en golfhoogte en hangt samen met de zogenaamde ‘depth of closure’: de overgang tussen het deel van het kustprofiel waar de invloed van golven op sediment transport niet meer significant is. In dit verhaal bepaalt de waterstand waar de golven aangrijpen op het

kustprofiel: bij een hogere waterstand kunnen hogere golven ontstaan en grijpen deze hoger in het profiel aan.



Figuur 2-6: Grafische weergave van de vervorming van het profiel van een vooroever in laag-energetisch en zandig milieu onder dagelijkse (calm) en extreme (storm) condities (Ton et al., 2020).

Binnen het profiel dat zich vormt, zijn er een aantal dingen belangrijk:

- Het plateau zal zich rond NAP -1 m vormen als gevolg van het waterpeil in het IJsselmeer en golfcondities;
- De breedte van het plateau hangt af van het langstransport en de aanvoer van sediment van hoger in het profiel;
- Er is geen herstel van het profiel, door de relatief diepe bodem van het IJsselmeer is elk verlies een permanent verlies. Het is dan ook verstandig te rekenen met bruto transporten in plaats van netto;
- Erosie vindt plaats rond de waterlijn, dit sediment vult het plateau aan, wanneer er geen erosie kan plaatsvinden en er dus geen aanvoer is, diept het plateau uit.

2.3 Invloed van wind gedreven stroming

In het IJsselmeer treedt er naast de golfgedreven stroming ook een windgedreven stroming op. Deze is het gevolg van opzet van het waterpeil waardoor er een horizontale circulatiestroom ontstaat. De stroming is afhankelijk van de windrichting, bathymetrie en eventuele objecten. Uit metingen langs de Houtribdijk blijkt dat de stroming uniform is qua snelheid over de diepte en een maximale snelheid van zo'n 0,3 m/s kent.

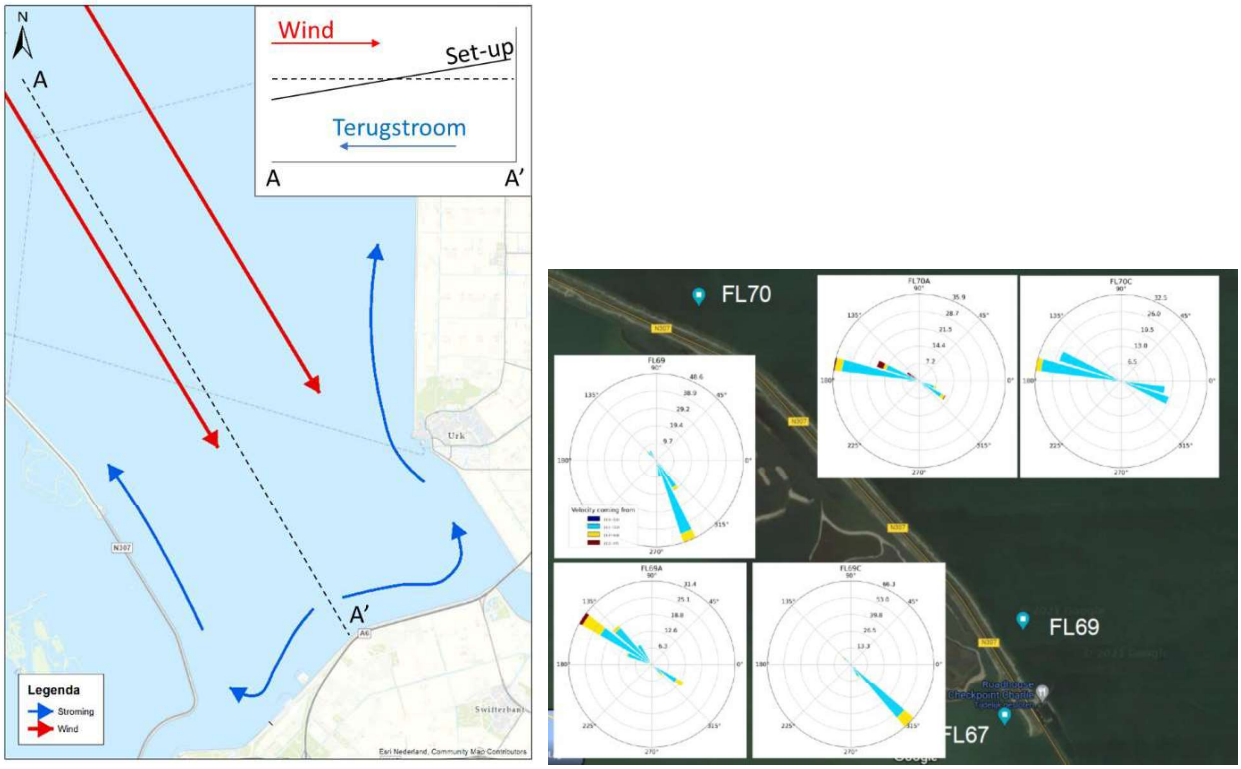
In Figuur 2-7 is de verwachte stroming op basis van gebiedskennis en expert judgement ingetekend voor de situatie met aanlandige wind (overige condities zijn verderop beschreven). Deze situatie is gekozen omdat in deze situatie de waterstand het hoogst is op de locatie van het voorland en een stroming het meeste effect zal hebben op een voorland. De stroming ontstaat langs de kust als gevolg van opzet van het waterpeil, de terugstroom volgt de contour van de kustlijn. Dit wordt bevestigd door meetpalen bij de Houtribdijk, deze laten stroming langs de kust zien. Bij objecten of dammen (zoals de Maxima centrale) is de verwachting dat er een lokale stroming in tegengestelde richting ontstaat dicht bij de kust.

Aanlandige wind
De opzet is groot door de relatief lange strijklengte. Hierdoor is er een groot waterstandsverschil waardoor er een relatief hoge stroomsnelheid verwacht wordt. De waterstand ter plaatse van het voorland is ook hoog, veel opwoeling vindt daardoor plaats hoog in profiel doordat de golven een hoog aangrijpingspunt hebben. Het zandtransport is daardoor naar verwachting ook relatief hoog als gevolg van de combinatie van opwoeling met een sterke stroming. De richting van de stroming is in het noordelijke gedeelte richting noord en in het zuidelijke gedeelte richting zuid.

Aflandige wind
De waterstand bij de IJsselmeerdijk is laag en er zijn geen golven. Er zal weinig opwoeling plaatsvinden, het sedimenttransport is daardoor naar verwachting ook beperkt. Windgedreven stroming zal tegengesteld zijn aan de situatie bij aanlandige wind.

Wind uit NO/ZW (parallel)
De opzet is kleiner door de relatief korte strijklengte, hierdoor is er een klein waterstandsverschil en een lage stroomsnelheid. De waterstand en golfhoogte ter plaatse van het voorland is gemiddeld, enige opwoeling vindt plaats in het profiel. Het transport is daardoor in verwachting ook gemiddeld als gevolg van de combinatie van enige opwoeling met een kleine stroming. De stroomrichting is richting het noorden voor NO wind en richting het zuiden voor ZW wind.

N.B. dit is slechts een conceptuele weergave van de mogelijke stroming op basis van gebiedskennis en ervaringen van de Houtribdijk. Stromingspatronen zijn van veel variabelen afhankelijk en moeten bevestigd worden aan de hand van metingen of modellering.



Figuur 2-7: Verwachte stroming langs de IJsselmeerdijk tijdens aanlandige wind (links) en gemeten stroming langs de Houtribdijk (rechts, ongepubliceerde metingen uit onderzoek van Ton., 2021).

De lessen en generieke conclusies uit de Houtribdijk pilot zijn goed toepasbaar op de vooroever oplossing van de IJsselmeerdijk, het gaat om een soortgelijke zandige oplossing in hetzelfde systeem. Bij de Houtribdijk is er echter niet gewerkt met een vooroeverdam, waar dit voor de IJsselmeerdijk wel een realistische oplossing lijkt. Het effect van constructies op de morfologie moet daarom in acht genomen worden.

3 Morfologische beschouwing van kansrijke varianten

3.1 Inleiding

Op basis van de systeemkennis vanuit de Houtribdijk, zijn verschillende alternatieven voor de vooroever van de IJsselmeerdijk beschouwd. Vanuit de waterveiligheid voldoen verschillende profielen als minimum profiel (het minimale profiel wat vanuit waterveiligheid aanwezig moet zijn ten tijde van de maatgevende storm):

- Een helling van 1:10, die aansluit op het huidige dijkprofiel op NAP +1 m;
- Een plateau van 20 m breed op NAP 0 m;
- Een plateau van 50 m breed op NAP -1 m.

Deze verschillende alternatieven worden in dit hoofdstuk morfologisch beschouwd.

3.2 Modelkeuze

Als ondersteuning van de morfologische beschouwing worden morfologische modelsimulaties gebruikt. Hiervoor is de LITPACK software gebruikt, ontwikkeld door DHI. Hierbij worden verschillende modellen gebruikt worden voor het kustlangse en het kustdwarse sedimenttransport:

- **Kustlangs:** de LITDRIFT module is gebruikt om het langstransport te bepalen. Deze module berekent het langstransport voor verschillende kustdwarse profielen onder invloed van golf- en stromingscondities. Het model bestaat uit twee delen: (1) een hydrodynamisch model om de golftransformatie richting de kust en de resulterende golfgedreven stroming te bepalen en (2) een sedimenttransportmodel om het resulterende langstransport te bepalen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat elk kustdwars profiel representatief is voor een stuk rechte kust met uniforme condities. Vervolgens zal de LITLINE module gebruikt worden om het effect van constructies op het langstransport te bepalen;
- **Kustdwars:** de LITPROF module zal gebruikt worden om het kustdwarse sedimenttransport te bepalen. Dit model beschrijft de kustdwarse profielverandering als gevolg van een tijdserie van golfcondities. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat er geen kustlangse variatie in hydrodynamische en sedimentcondities is en dat de dieptecontouren parallel aan de kust lopen.

3.3 Methodologie

Bij de modelsimulaties met de LITPACK software zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

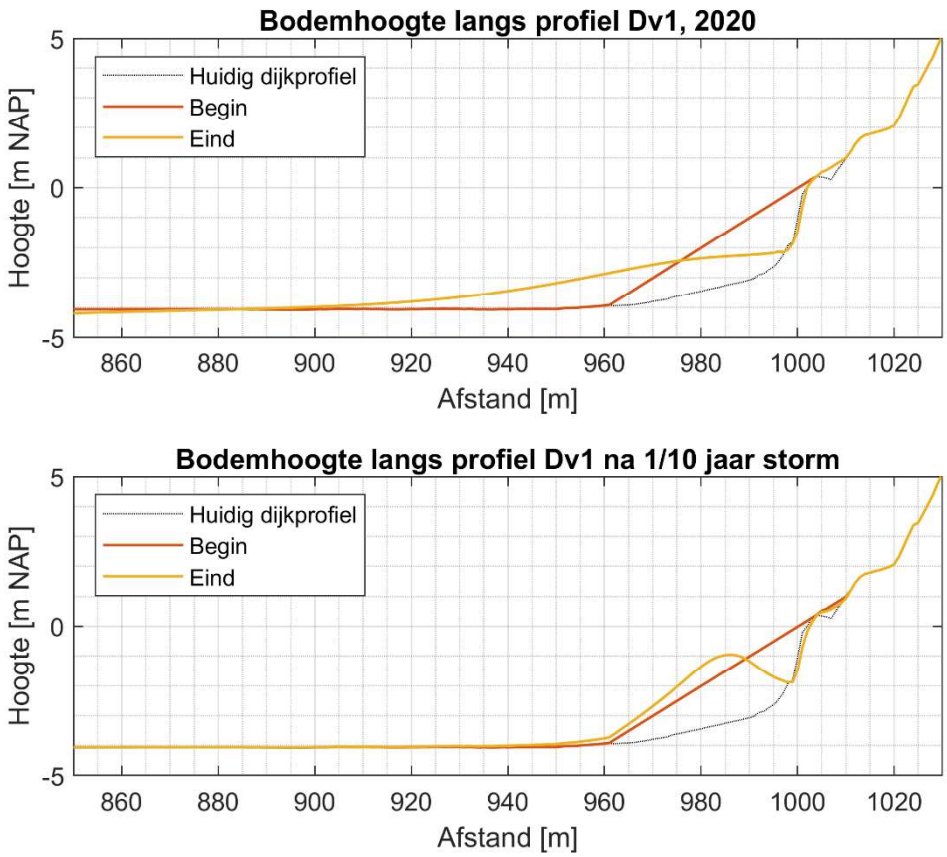
- Voor stormcondities zijn langs de IJsselmeerdijk voor de verschillende dijkvakken dezelfde condities gehanteerd, zie ook Tabel 2-1. Voor dijkvak 3, welke relatief beschut licht achter de Houtribdijk, is dit waarschijnlijk een conservatieve benadering. Een stormduur van 40 uur is gehanteerd, met een trapeziumvormig verloop van waterstand en golfhoogte en een piekduur van 2 uur;
- Voor dagelijkse condities is per dijkvak een ander golfklimaat gehanteerd, zie ook Figuur 2-3. Hierbij is het jaar 2020 beschouwd;
- Een korrelgrootte van 0,35 mm is gehanteerd. Dit is relatief grof zand. De vooroever wordt echter mogelijk afgedekt met een laagje klei en wordt daarnaast begroeid met vegetatie, beide mechanismes die sedimenttransport verminderen;
- Het huidige dijkprofiel is als niet-erodeerbare laag in het profiel opgenomen;

- De vooroeverdam is als harde constructie in het profiel opgenomen;
- Over het traject rondom de Maxima centrale en de haven wordt geen vooroever toegepast.

3.4 Dwarstransport

3.4.1 Minimaal profiel A - helling van 1:10

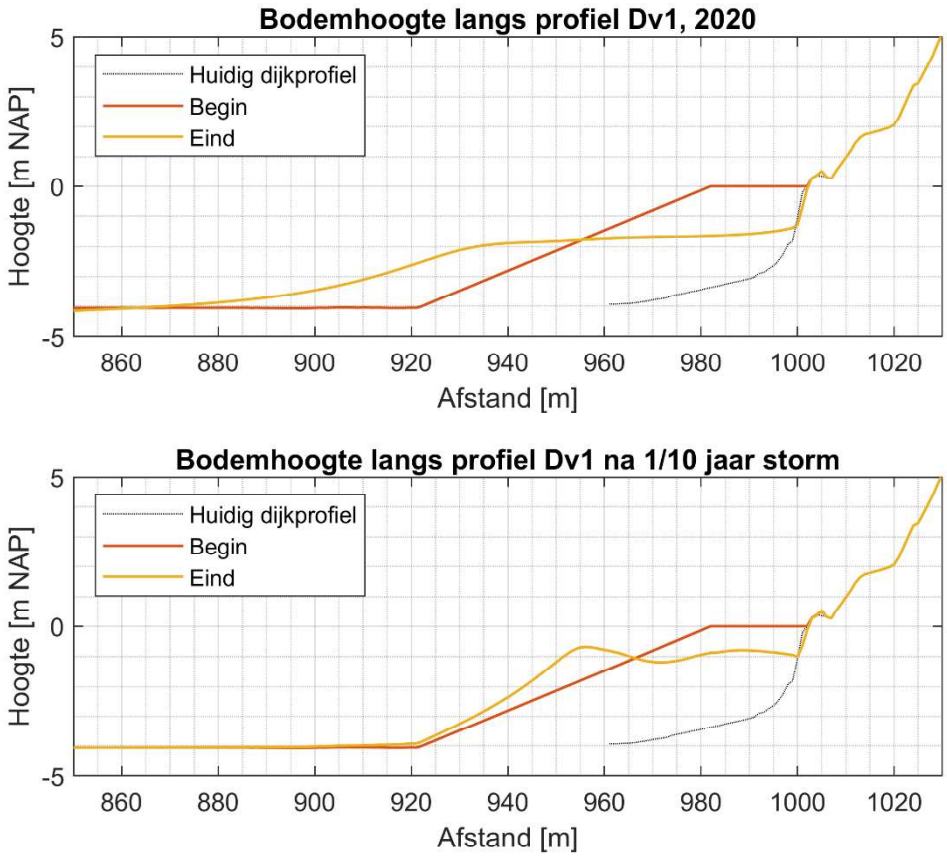
Uit ervaringen met pilots bij de Houtribdijk blijkt dat een vooroever met een uniform talud niet stabiel is en zich snel gaat vervormen. Dit wordt bevestigd door de verkennende LITPROF simulaties, zie Figuur 3-1. Zowel bij stormcondities (hier: 1/10 jaar conditie) en dagelijkse condities treedt significante vervorming in het profiel op. Zand erodeert rondom de waterlijn en wordt lager in het profiel gedeponeerd, waarbij zich een profiel met een plateau vormt. Geconcludeerd kan worden dat het minimale profiel met een helling van 1:10 en aansluiting op NAP +1 m niet leidt tot een stabiele vooroever en dat grote verliezen te verwachten zijn.



Figuur 3-1: Vervorming van het 1:10 profiel na een jaar (boven) en na een 1/10 jaar storm (onder).

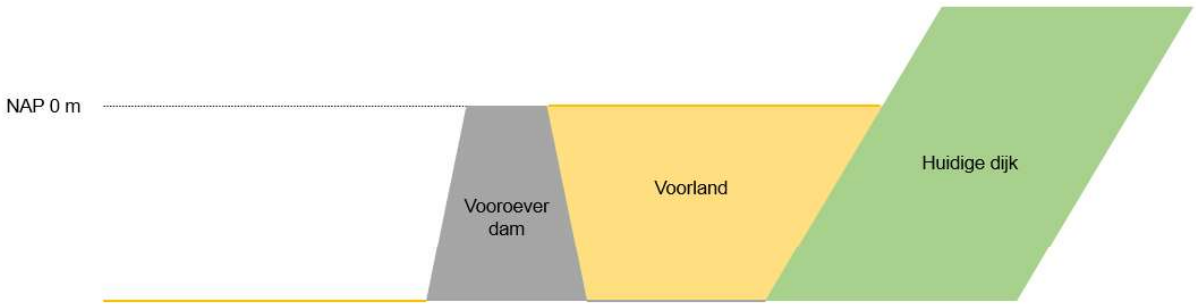
3.4.2 Minimaal profiel B – horizontaal plateau op NAP 0 m

Ook een profiel met een horizontaal plateau op NAP 0 m en een breedte van 20 m vervormt, zie Figuur 3-2. Het plateau ligt onder dagelijkse condities rondom de waterlijn en ligt dus precies in de erosiezone. Bij een 1/10 jaar storm verlaagt het plateau zich naar circa NAP -1 m, en na een jaar ligt het nog wat lager. Uitholling van het profiel wordt dan veroorzaakt door het gebrek aan zandaanvoer van hoger in het profiel, aangezien het plateau direct aansluit op het huidige dijkprofiel.



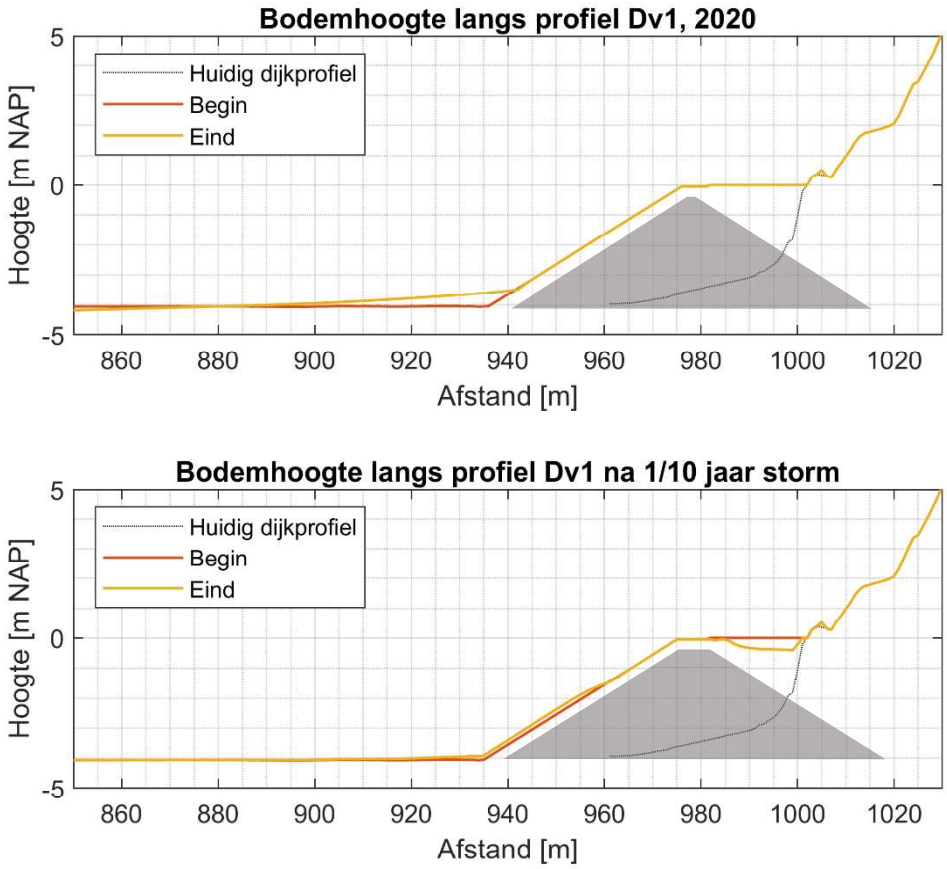
Figuur 3-2: Vervorming van het profiel met plateau op NAP 0 m na een jaar (boven) en na een 1/10 jaar storm (onder).

Toepassing van een vooroeverdam aan meerzijde van het voorland heeft een stabiliserend effect. Hier is gekeken naar een vooroeverdam met een kruinhoogte van NAP 0 m, zie Figuur 3-3.



Figuur 3-3: Schematische weergave van de vooroeverdam.

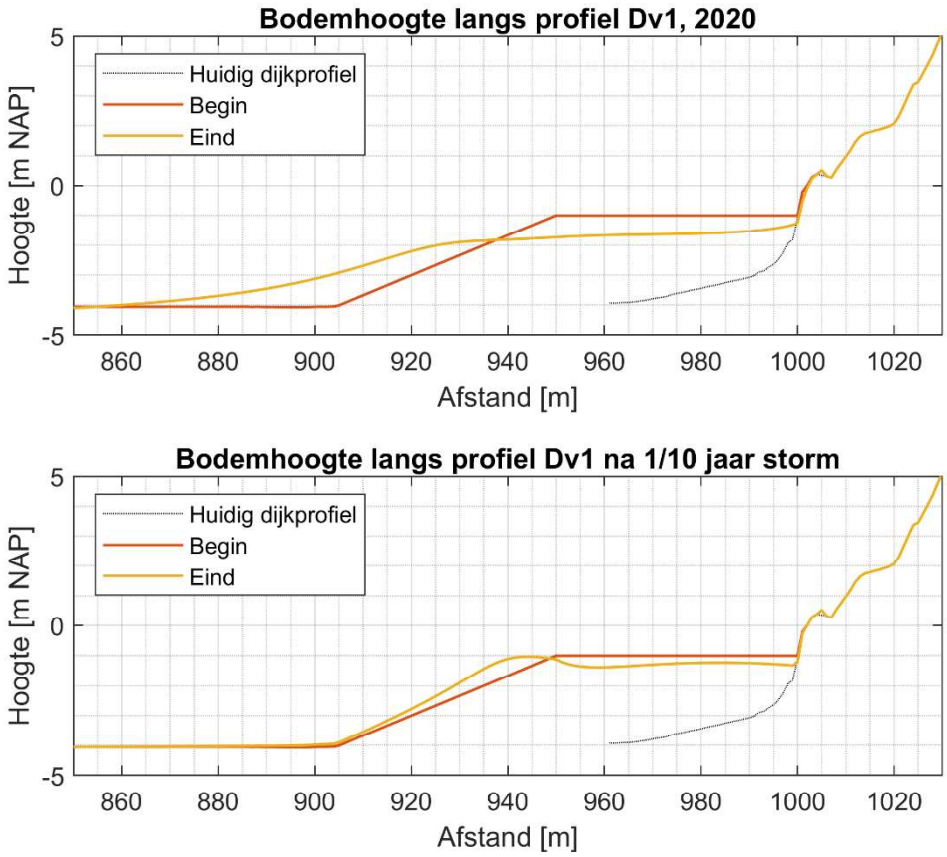
Het stabiliserende effect van de vooroeverdam is te zien in Figuur 3-4: tijdens dagelijkse condities treedt weinig vervorming van het voorland op, tijdens stormcondities vindt uitholling van het plateau achter de dam plaats. Daarnaast zorgt de dam voor een zeer smalle zand-vooroever, die weinig ecologische pluspunten heeft.



Figuur 3-4: Vervorming van het profiel met plateau op NAP 0 m en vooroeverdam na een jaar (boven) en na een 1/10 jaar storm (onder). De vooroeverdam is schematisch in grijs weergegeven.

3.4.3 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m

Uit de ervaringen met de Houtribdijk blijkt dat zich een natuurlijk plateau op NAP -1 m gaat vormen, waarvan de breedte afhangt van het langstransport en aanvoer van sediment vanuit hoger in het profiel. Uit de conceptuele LITPROF simulaties blijkt dat wanneer dit plateau direct aansluit op het huidig dijkprofiel, nog extra uitholling te verwachten is (zie Figuur 3-5). Het plateau zal na verloop van tijd dus lager komen te liggen dan de NAP -1 m die in de Houtribdijk is ontstaan. Reden hiervoor is dat er geen aanvoer van sediment vanuit hoger in het profiel is. Dit bevestigt dat buffers rond de waterlijn noodzakelijk zijn om het plateau te onderhouden of aanvullende maatregelen zoals een vooroeverdam nodig zijn om het plateau te beschermen.



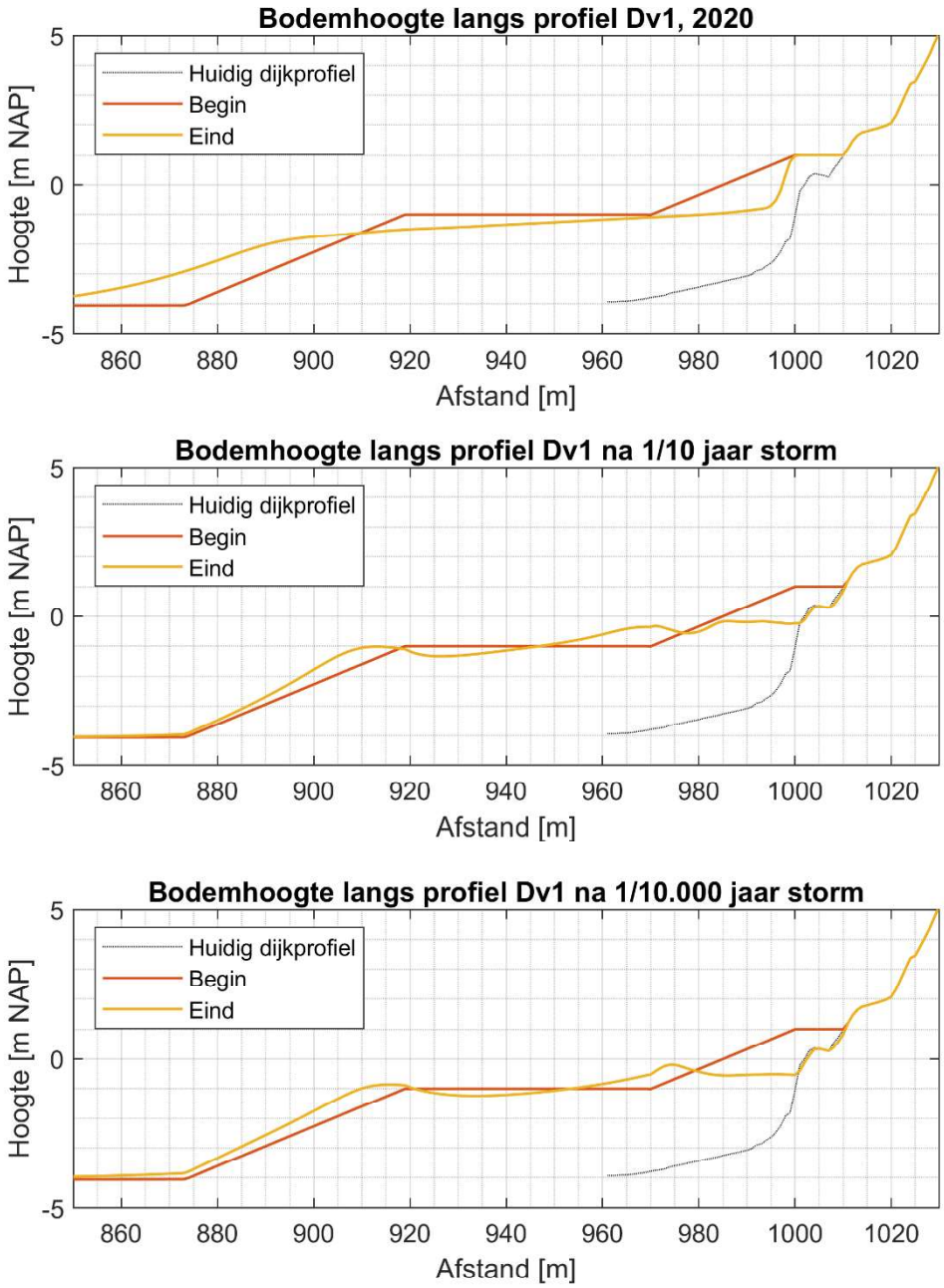
Figuur 3-5: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m na een jaar (boven) en na een 1/10 jaar storm (onder).

3.4.4 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer

In Figuur 3-6 is te zien dat wanneer een buffer van 10 m breed op NAP +1 m aanwezig is, het plateau op NAP -1 stabieler is dan zonder buffer. De buffer erodeert onder dagelijkse en stormcondities en levert zand waarmee het plateau onderhouden wordt. Bij dagelijkse condities erodeert de voorzijde van het plateau, bij een 1/10 jaar storm (waterpeil van NAP 1,11 m) vindt flinke erosie van de buffer plaats.

In Figuur 3-6 is ook de vervorming van het profiel getoond voor verschillende stormcondities: 1/10 en 1/10.000 jaar. In alle gevallen ligt de waterlijn (incl. opzet) boven de buffer. Bij een hevigere storm is meer erosie van de buffer te verwachten, waarbij na een 1/10.000 jaar storm de buffer bijna geheel is geërodeerd.

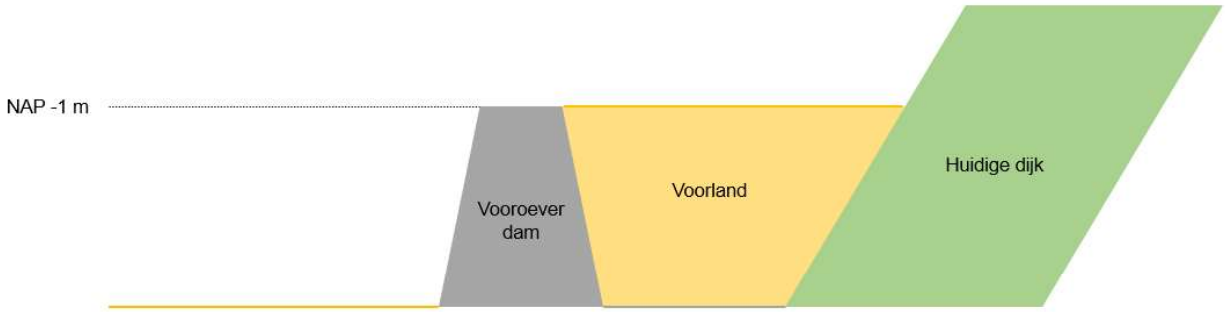
Een zandige oplossing met een plateau op NAP -1 m lijkt voor de storm condities stabiel en te voldoen, onder dagelijkse condities zien we echter teveel vervorming waardoor de oplossing niet voldoet.



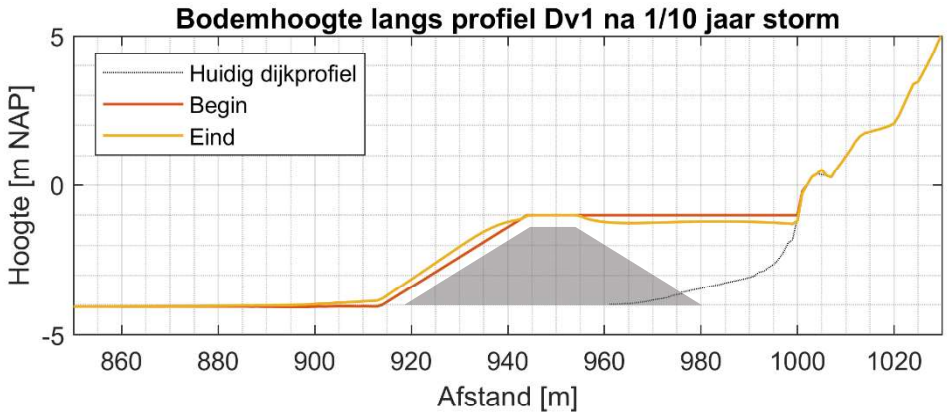
Figuur 3-6: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m + buffer van 10m breed op NAP 1 m na een jaar (boven) en na verschillende stormen.

3.4.5 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m en vooroeverdam (kruin op NAP -1 m)

Wanneer een vooroeverdam wordt toegepast met kruinhoogte op NAP -1 m en geen buffer wordt toegepast (zie Figuur 3-7), vindt onder stormcondities uitholling van het voorland plaats. Omdat de kruin van de vooroeverdam op dezelfde hoogte ligt als het voorland, kunnen golven het voorland oplopen en daar breken. Geërodeerd zand wordt aan de meerzijde van de vooroeverdam gedeponeerd.



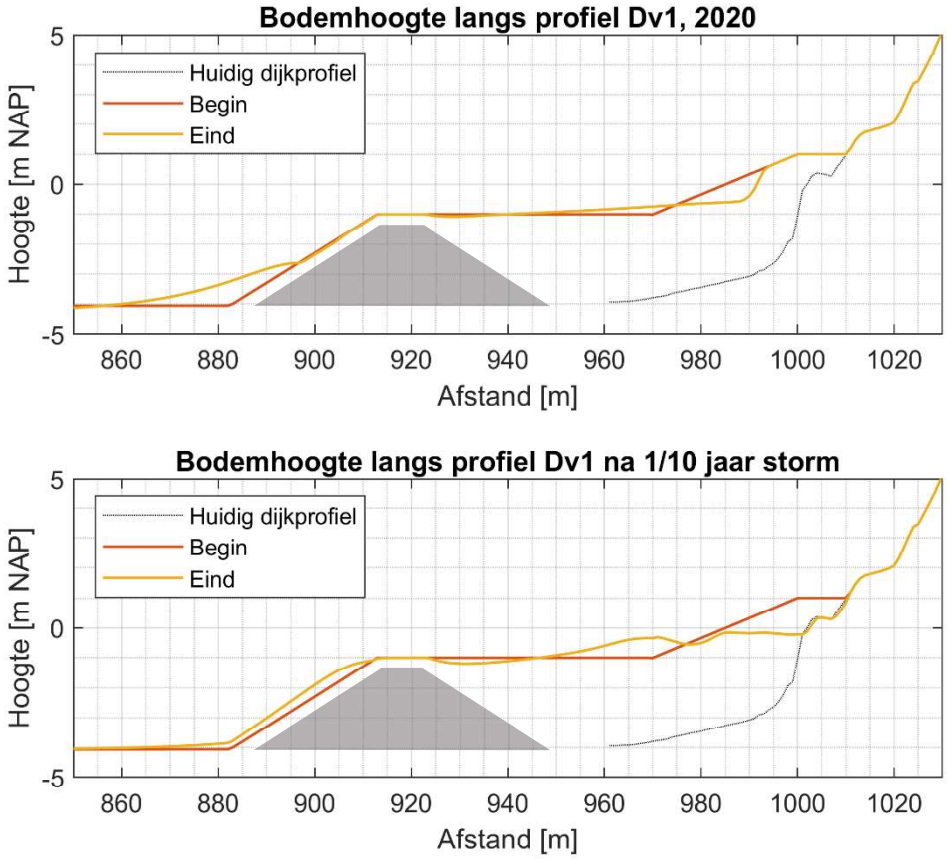
Figuur 3-7: Schematische weergave van de vooroeverdam.



Figuur 3-8: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m + een vooroeverdam na een 1/10 jaar storm. De vooroeverdam is schematisch in grijs weergegeven.

3.4.6 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer + vooroeverdam (kruin op NAP -1 m)

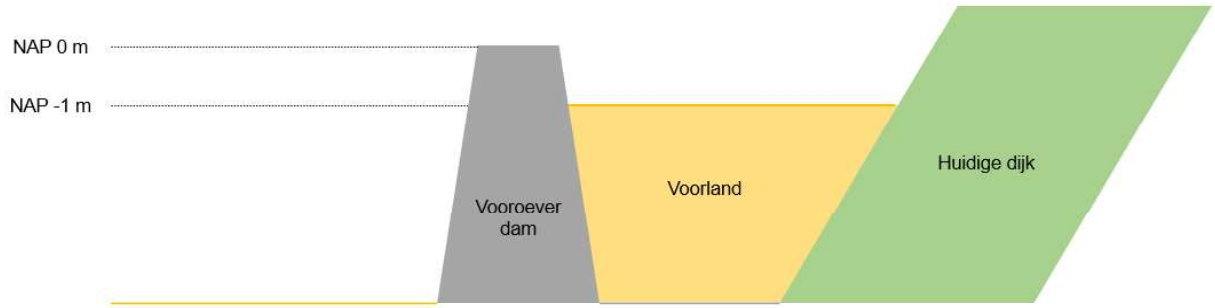
Wanneer een vooroeverdam wordt toegepast met kruinhoogte op NAP -1 m in combinatie met een buffer rond de waterlijn, vermindert de erosie van de buffer onder dagelijkse condities ten opzichte van de situatie zonder vooroeverdam, terwijl de erosie bij een 1/10 jaar storm vergelijkbaar is. Geërodeerd zand wordt aan meerzijde van de vooroeverdam gedeponeerd. De verwachting is echter dat over een langdurigere periode (>5 jaar) de buffer volledig verdwijnt en de vervorming toeneemt (vergelijkbaar met de situatie zonder buffer).



Figuur 3-9: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m + buffer van 10m breed op NAP 1 m + een vooroeverdam na een jaar (boven) en na een 1/10 jaar storm (onder). De vooroeverdam is schematisch weergegeven in grijs.

3.4.7 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + vooroeverdam (kruin op NAP 0 m)

Om het voorland op NAP -1 verder te stabiliseren kan ook een vooroeverdam met een hogere kruin worden toegepast, zoals een kruin op NAP 0 m (zie Figuur 3-10).

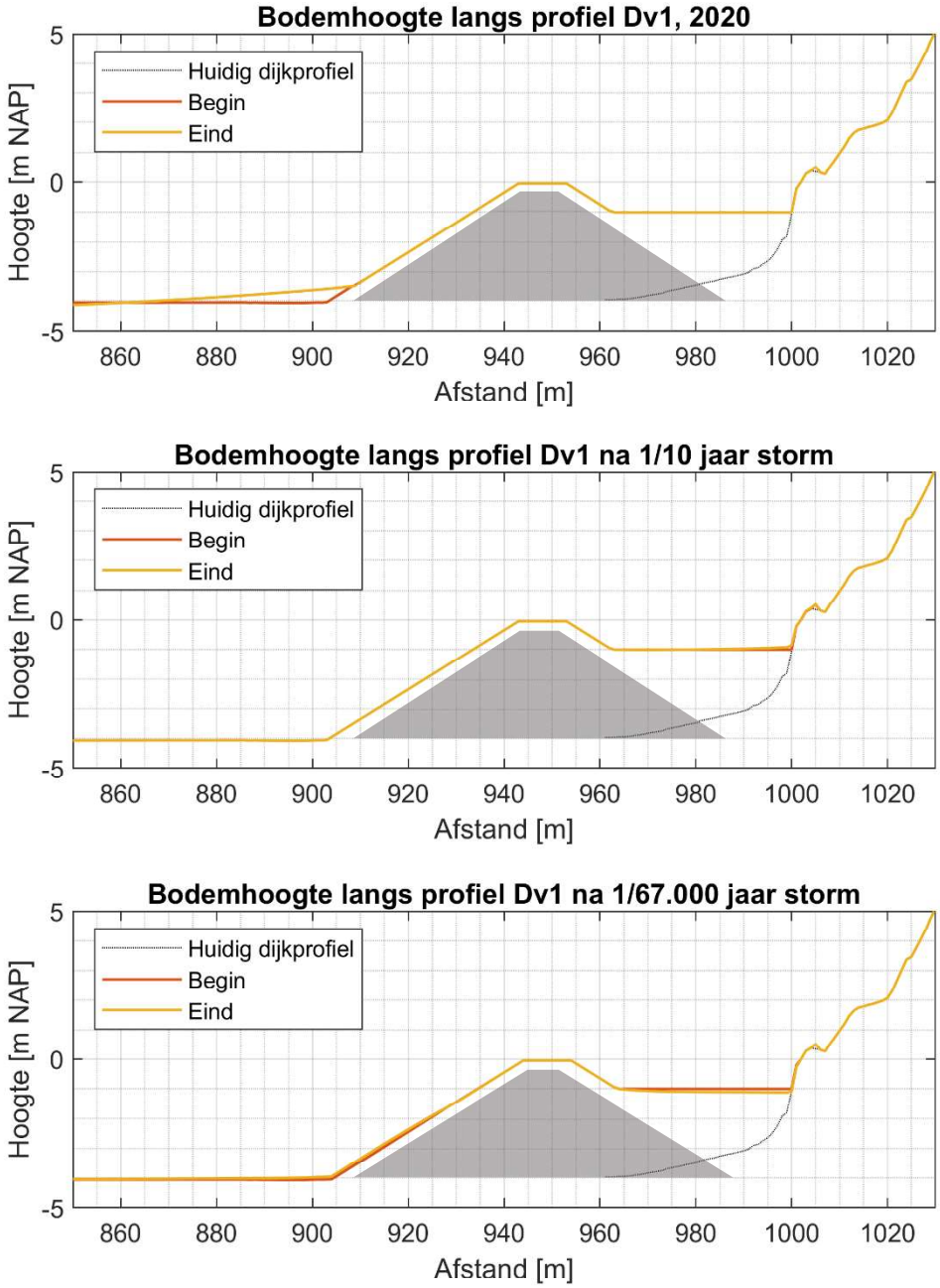


Figuur 3-10: Schematische weergave van de vooroeverdam.

Deze vooroeverdam met een kruin op NAP 0 m vermindert erosie onder dagelijkse condities verder. De golven breken op de dam. Wanneer geen buffer rond de waterlijn wordt toegepast, vindt onder dagelijkse

en 1/10 jaar stormcondities weinig erosie plaats. Onder 1/67.000 jaar stormcondities vindt lichte uitholling van het plateau plaats.

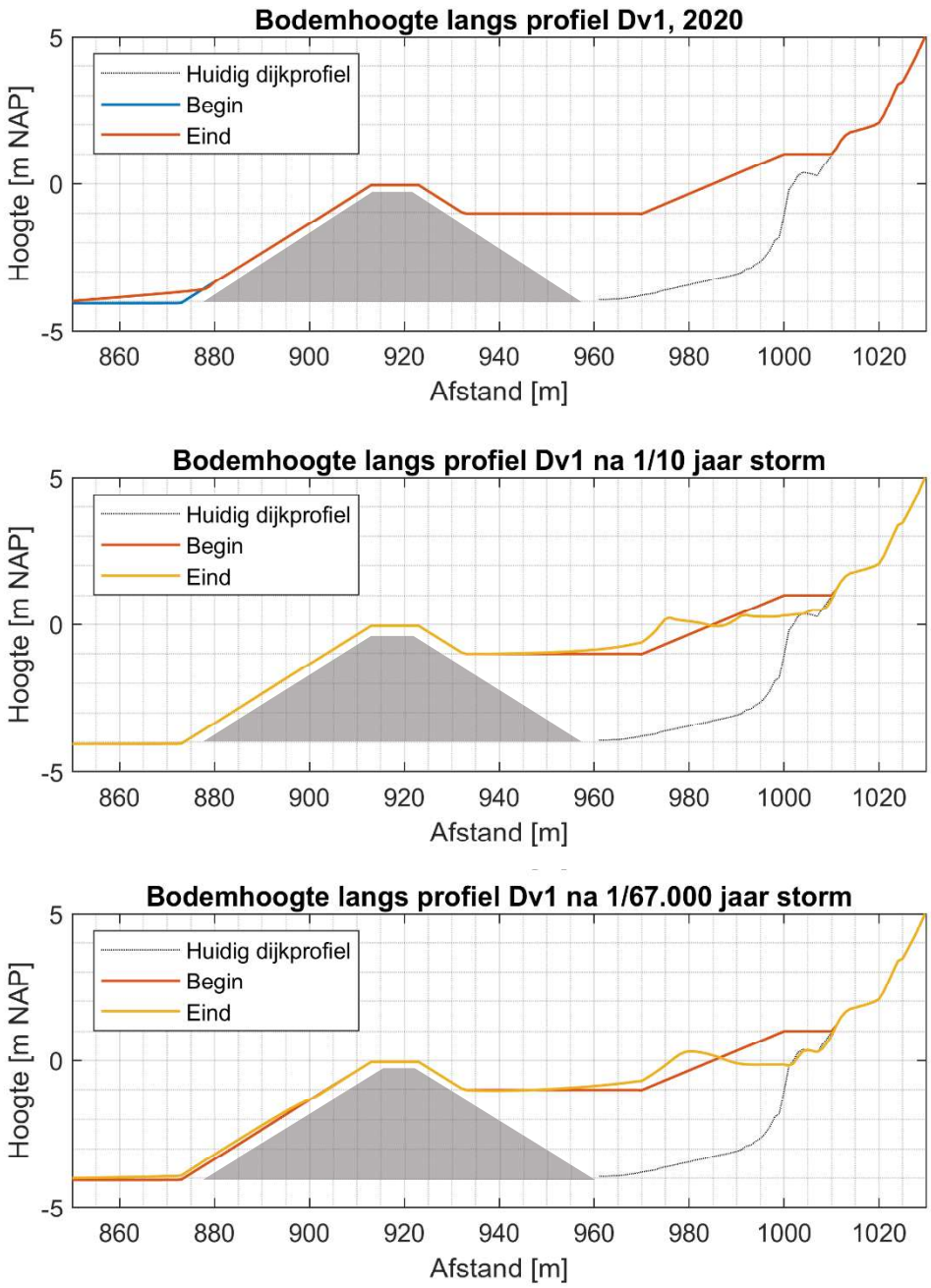
N.B. door de onderschatting van opzet en golfhoogtes tijdens aanlandige wind, vindt in werkelijkheid naar verwachting meer erosie plaats in een jaar, vooral bij aanlandige stormwind. Bij normale IJsselmeerpeilen komt de waterstand niet boven de vooroeverdam uit en slaat slechts af en toe een golf over de dam heen. Bij flinke opzet kan de waterstand af en toe boven de dam uitkomen en lopen golven het plateau op.



Figuur 3-11: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m + een vooroeverdam na een jaar (boven), na een 1/10 jaar storm (midden) en na een 1/67.000 jaar storm (onder). De vooroeverdam is schematisch weergegeven in grijs.

3.4.8 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer + vooroeverdam (kruin op NAP 0 m)

Wanneer een buffer rond de waterlijn wordt toegepast in combinatie met een vooroeverdam met kruinhoogte NAP 0 m, wordt de uitholling bij extreme stormcondities verminderd. Onder dagelijkse condities blijft de buffer redelijk stabiel, onder stormcondities treedt erosie van de buffer op. Onder dagelijkse condities wordt zand richting de dijk getransporteerd, wat aan de teen van de vooroeverdam sedimenteert. Bij 1/10 jaar condities lijkt het sediment op het plateau te blijven, terwijl bij 1/67.000 jaar condities ook zand over de vooroeverdam heen getransporteerd wordt.

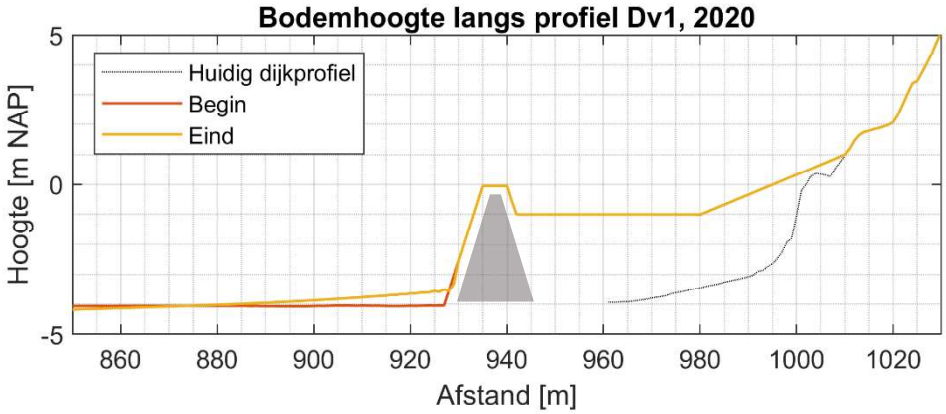


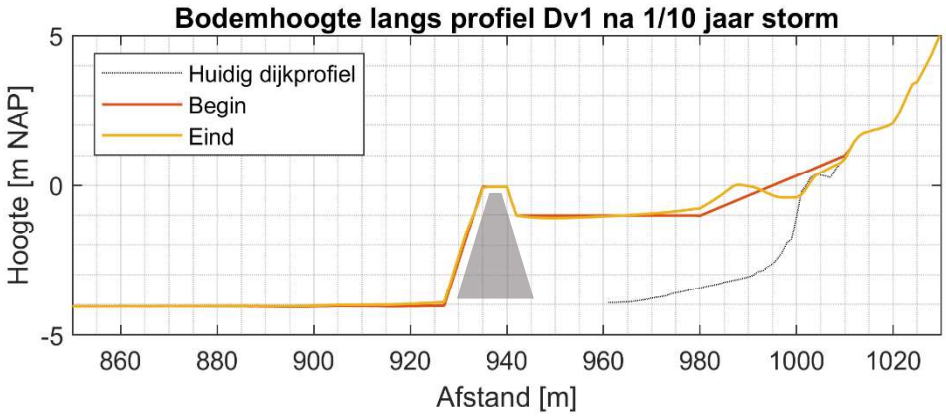
Figuur 3-12: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m + buffer van 10m breed op NAP 1 m + een vooroeverdam met kruin op NAP 0 m na een jaar (boven), na een jaar met opzet (midden) en na een 1/10 jaar storm (onder). De vooroeverdam is schematisch weergegeven in grijs.

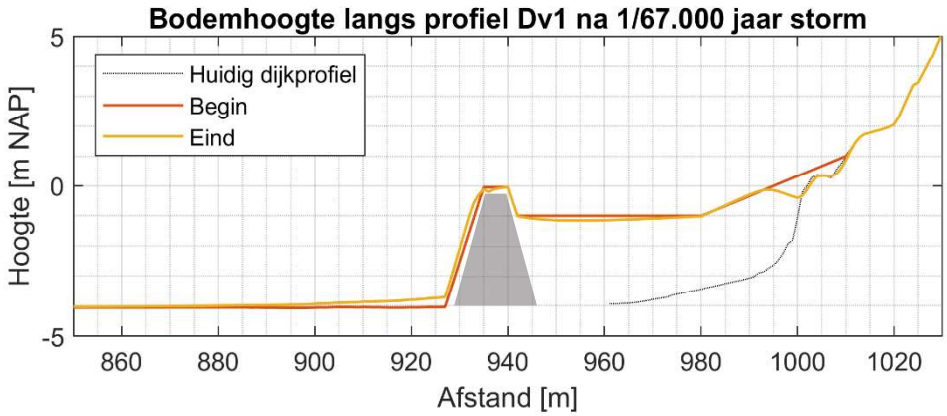
3.4.9 Minimaal profiel C – horizontaal plateau op NAP -1 m + buffer (geoptimaliseerd) + vooroeverdam (kruin op NAP 0 m)

Omdat minimaal een plateau van 50 m breed op NAP -1 m benodigd is, kan de buffer ook deels op dit plateau worden aangelegd. Dit vermindert de breedte van het voorland en daarmee het ruimtebeslag in het IJsselmeer. Daarnaast is in voorgaande paragrafen getoond dat ook zonder buffer het plateau op NAP -1 relatief stabiel is. Daarom is hier gekeken naar een kleinere buffer: met aansluiting op NAP +1 m en een helling van 1:15, welke deels bovenop het plateau ligt.

Bij een 1/10 jaar storm vindt lichte uitholling van het plateau plaats achter de vooroeverdam, de buffer erodeert en verschuift richting het plateau. Hetzelfde patroon zien we bij een 1/67.000 jaar storm, met meer uitholling en transport van zand over de vooroeverdam heen.







Figuur 3-13: Vervorming van het profiel met plateau op NAP -1 m + buffer met helling 1:15 + een vooroeverdam met kruin op NAP 0 m na een jaar (boven), na een 1/10 jaar storm (midden) en na een 1/67.000 jaar storm (onder). De vooroeverdam is schematisch weeergegeven in grijs.

3.4.10 Conclusies dwarstransport

De volgende conclusies zijn te trekken wat betreft de stabiliteit van het voorland in dwarsrichting:

- Uit de verkennende simulaties blijkt dat een vooroeverdam noodzakelijk is. Zonder vooroeverdam treedt ongewenste herprofilering op waardoor niet meer aan de waterveiligheidseisen wordt voldaan. Het voorland achter de vooroeverdam bevindt zich in een luwe zone, wat wenselijk is vanuit ecologisch perspectief;
- Een voorland met plateau op NAP -1 m is het meest stabiel, dit is ook vanuit de ervaringen met de Houtribdijk gebleken;
- Een vooroeverdam met kruin op NAP 0 m creëert een luwe zone achter de dam. Zonder buffer treedt lichte uitholling van het plateau op. Als gevolg van stormopzet kan deze uitholling sterker zijn dan volgens de modelberekeningen;
- Een buffer van 10 m breed op NAP 1 m, of met talud van 1:15 en aansluiting op NAP 1 m voorkomt uitholling;

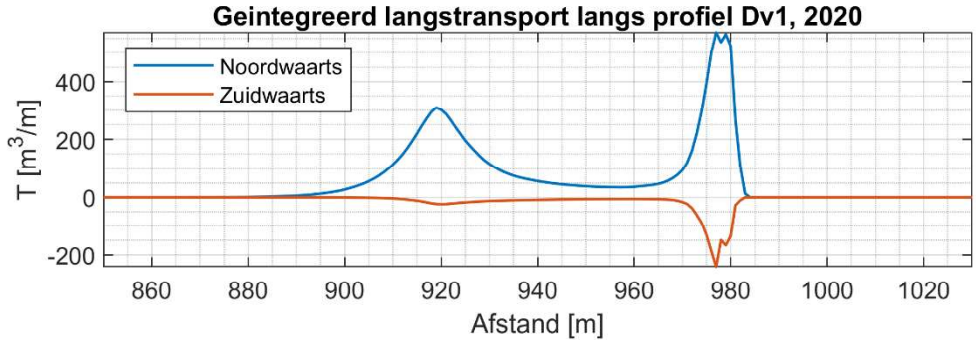
Bij de andere dijktrajecten gedraagt de vooroever zich op een vergelijkbare manier.

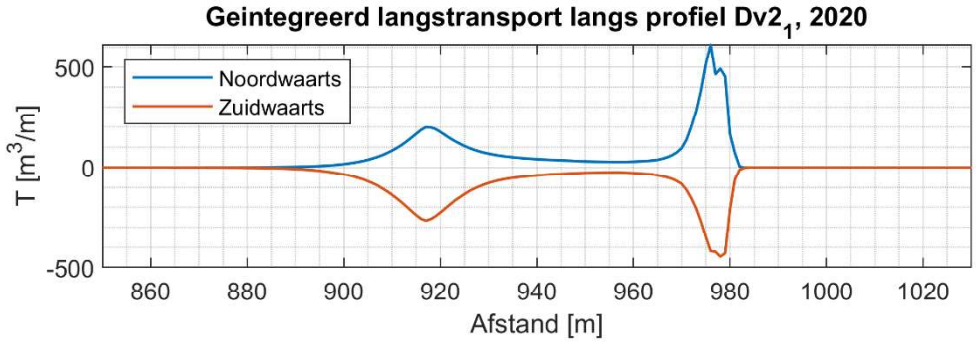
3.5 Langstransport

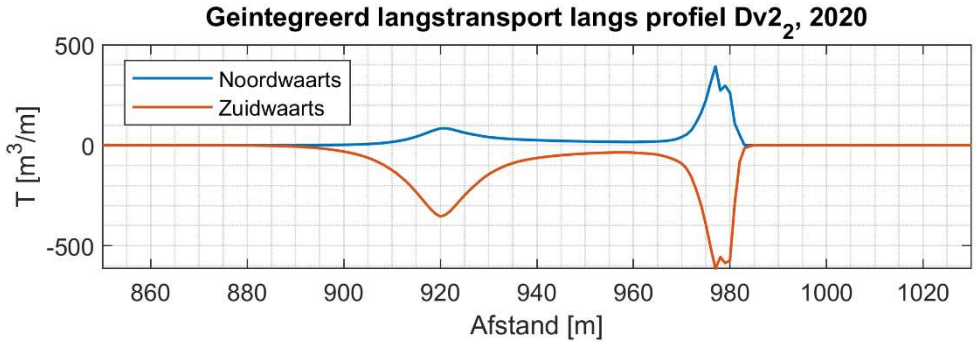
Ook in langsrichting treedt sedimenttransport op. Golven die onder een hoek invallen veroorzaken een kustlangse stroming, opgewoeld sediment wordt daarmee in langsrichting verplaatst. Opsluitconstructies zoals vooroeverdammen of strekdammen kunnen dit kustlangse sedimenttransport beperken.

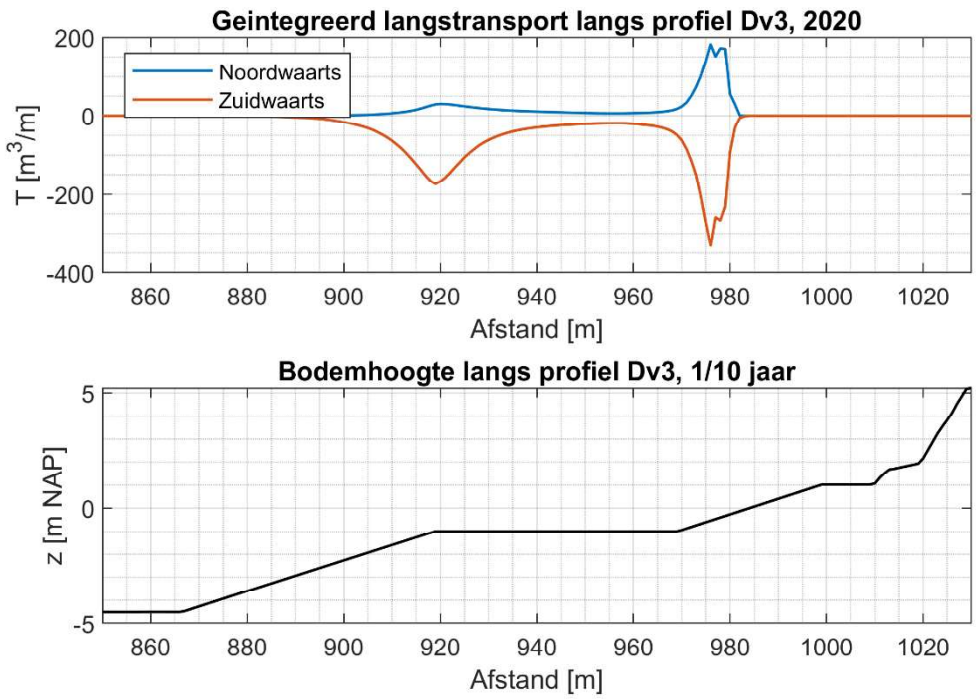
Volledig zandige vooroever
Voor een volledige zandige vooroever met 50 m breed plateau op NAP -1 m en buffer rond de waterlijn, is het langstransport langs het profiel getoond voor dagelijkse condities in Figuur 3-14. Onder dagelijkse condities zijn twee zones van langstransport te identificeren: bij de overgang naar het plateau op NAP -1 m en waar de golven definitief op de buffer breken. Duidelijk is dat bij een volledig zandige vooroever grote langstransporten te verwachten zijn en daarmee de noodzaak voor buffers. Deze buffer hoeft in principe alleen aan de bovenstroomse zijde van het voorland te liggen: het langstransport verspreidt dit zand vervolgens langs de dijk. Aangezien bij alle dijkvakken transport in beide richtingen optreedt, kan de buffer aan beide uiteindes van het voorland worden geplaatst. N.B. In onderstaande figuur is het effect

van onderbrekingen in het langstransport, zoals bijvoorbeeld rondom de Maxima centrale optreedt, niet meegenomen.









Figuur 3-14: Langstransport langs het profiel.

Effect van een vooroeverdam

Uit modelsimulaties voor het dwarstransport is gebleken dat een vooroeverdam benodigd is om het voorland te stabiliseren. Deze vooroeverdam heeft ook effect op het sedimenttransport in de langsrichting. Het effect van de vooroeverdam op de langstransporten is bepaald met conceptuele LITLINE simulaties. Hierin kan de locatie van een vooroeverdam worden gespecificeerd, maar kan de precieze layout van de dam (kruinhoogte, taludhelling, kruinbreedte, etc.) niet worden gespecificeerd.

In Figuur 3-16 is het netto langstransport langs de IJsselmeerdijk getoond voor de volgende situaties (zie ook Figuur 3-15):

1. Volledig zandig voorland met een plateau van 50 m breed op NAP -1 m en een buffer rond de waterlijn;
2. Toepassing van een vooroeverdam aan meerzijde van het voorland.

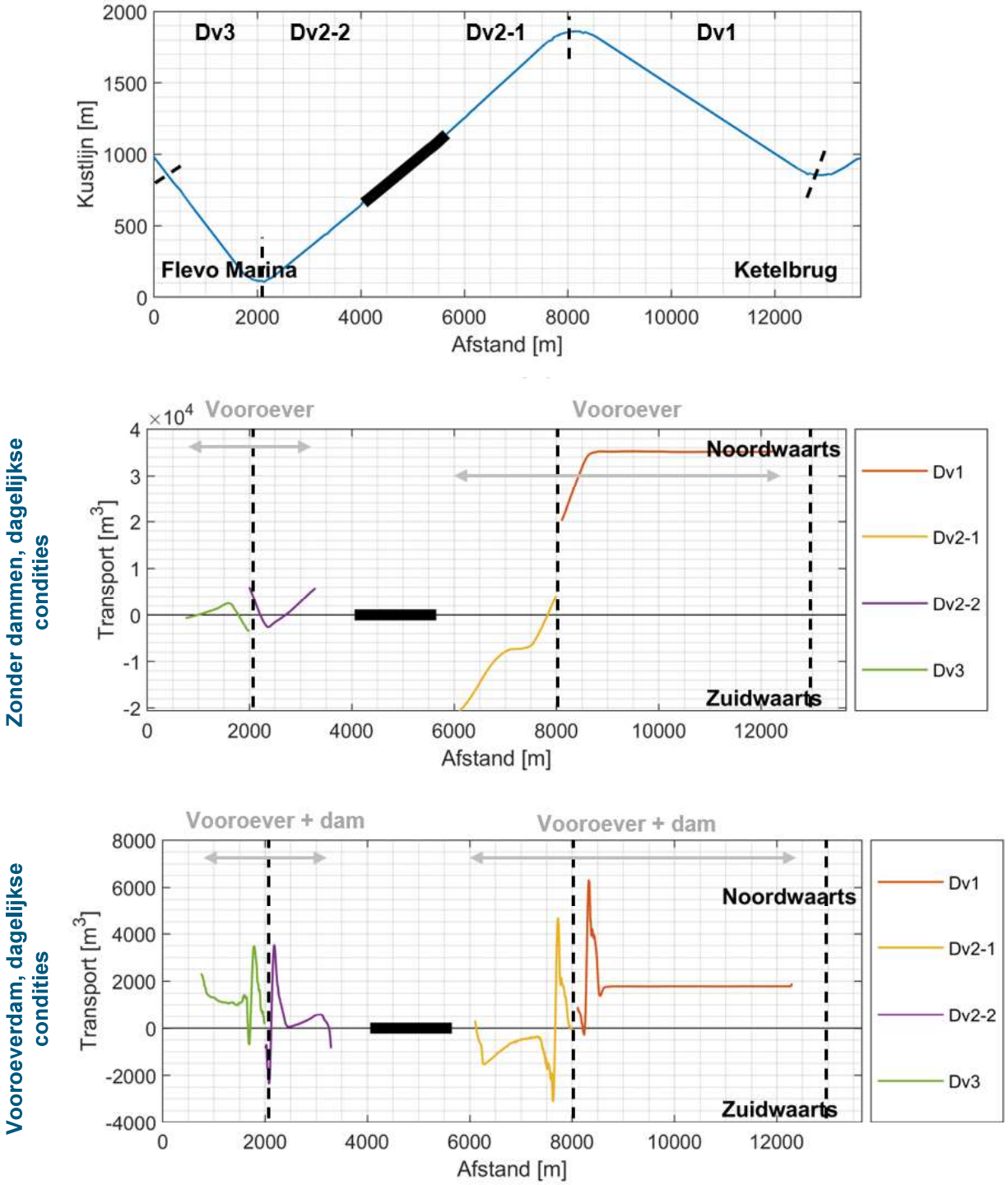
Figuur 3-15: Schematische weergave van de locatie van het voorland, de vooroeverdam (ruimtebeslag niet op schaal).

Het effect van de vooroeverdam op de langstransporten in dagelijkse condities is getoond in Figuur 3-16, dit is voor de verschillende dijkvakken (1 t/m 3, waarbij dijkvak 2 in twee delen is gesplitst) beschreven:

- Dv1: zonder opsluitconstructies is volgens de modelberekeningen een langstransport van 35.000 m³/jaar netto richting het noorden te verwachten. Het langstransport vermindert tot circa 2000 m³/jaar in geval van de vooroeverdam;
- Dv2-1: zonder opsluitconstructies is net ten noorden van de Maximacentrale een langstransport van 10.000 à 20.000 m³/jaar richting het zuiden te verwachten volgens de modelberekening. Richting de overgang met dijkvak 1 is het transport richting het noorden. Het langstransport vermindert tot circa 1500 m³/jaar in geval van de vooroeverdam;
- Dv2-2: zonder opsluitconstructies is net ten zuiden van de Maximacentrale een langstransport van 5.000 à 10.000 m³/jaar richting het noorden te verwachten op basis van de modelberekeningen. Richting de overgang met dijkvak 3 is het transport richting het zuiden. Het langstransport vermindert tot circa 1000 m³/jaar in geval van de vooroeverdam;
- Dv3: zonder opsluitconstructies is een langstransport van 3.000 m³/jaar te verwachten op basis van de modelberekeningen. Dit vermindert tot circa 1500 m³/jaar in geval van de vooroeverdam.

N.B. Het modelresultaat dat het dominante langstransport bij Dv2-1 naar het zuiden is gericht en bij Dv2-2 naar het noorden terwijl de dijkvakken dezelfde oriëntatie hebben is als volgt te verklaren: bij golven vanuit het noordwesten (komen vaak voor), treedt bij Dv2-2 transport op richting het noorden. Het stuk van Dv2-1 net ten noorden van de Maximacentrale ligt in de luwte van de Maximacentrale en minder of geen transport treedt op. Bij de minder vaak voorkomende golven uit noordoost treedt bij Dv2-1 transport richting het zuiden op, terwijl Dv2-2 dan juist in de luwte ligt. Netto leidt dit tot een zuidwaarts gericht transport net ten noorden van de Maximacentrale en een noordwaarts gericht transport net ten zuiden van de Maximacentrale.

De transporten zoals hier getoond zijn geïntegreerd over het kustdwarse profiel. De verwachting is dat het langstransport plaats vindt langs het plateau van het voorland en langs de bufferzone, waar de laatste golven breken tijdens extreme condities.

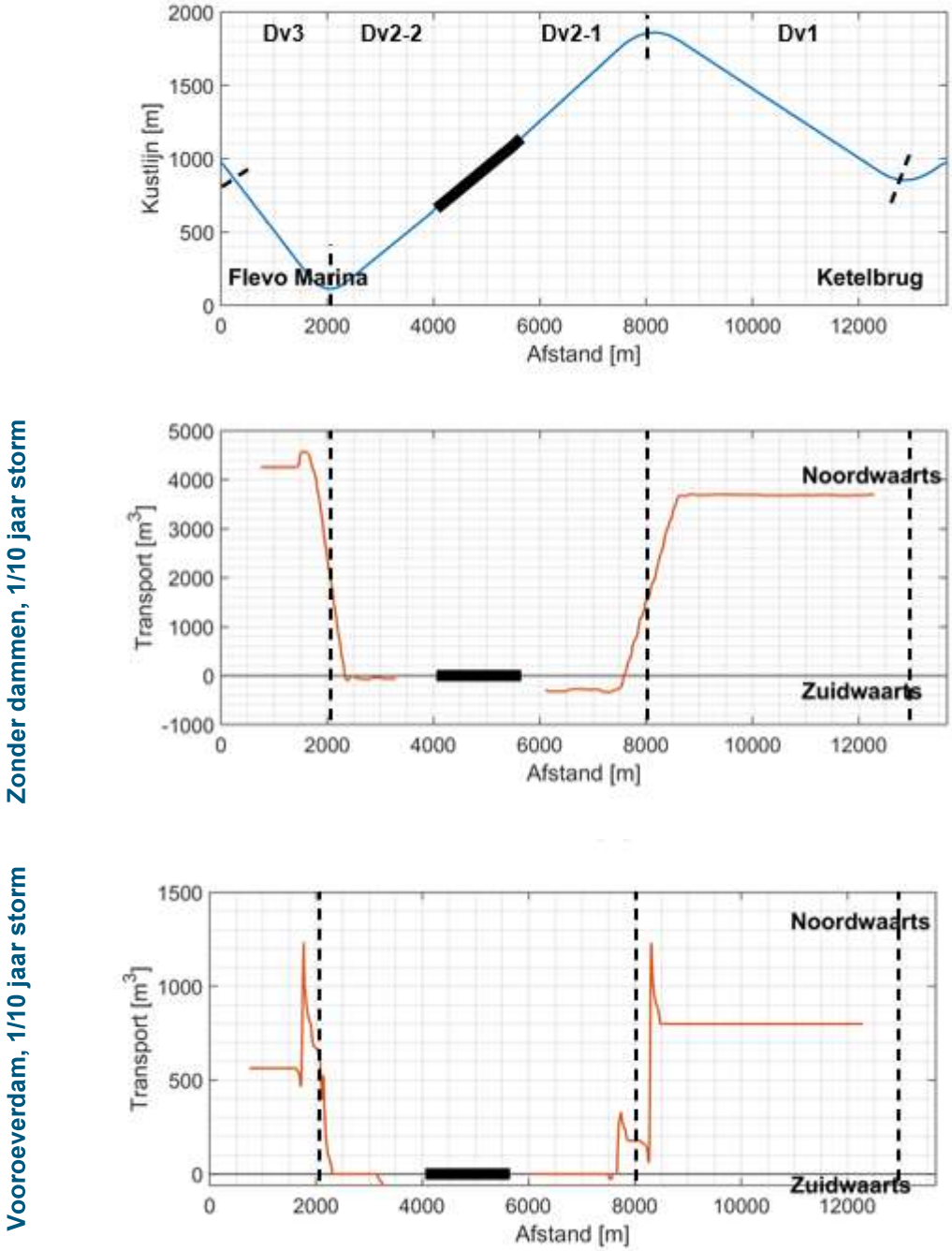


Figuur 3-16: Langstransport bij dagelijkse condities. Boven: schematisch bovenaanzicht kustlijn (NB schaal x-as en y-as niet gelijk). De zwarte balk geeft het traject rondom de Maxima centrale aan waar in het model geen vooroever is meegenomen. De gestippelde lijnen geven de grenzen aan tussen de dijkvakken. Midden: jaarlijks langstransport langs de kustlijn, zonder dammen. Onder: jaarlijks langstransport langs de kustlijn, met vooroeverdam. Positief transport staat voor netto noordwaarts transport, negatief transport staat voor netto transport in zuidelijke richting.

De langstransporten die optreden tijdens een 1/10 jaar storm zijn te zien in Figuur 3-17:

- Dv1: zonder opsluitconstructies is een langstransport in noordelijke richting van 4000 m³ gedurende de storm te verwachten volgens de modelberekeningen. Bij inzet van een vooroeverdam reduceert dit tot 800 m³;
- Dv2-1: zonder opsluitconstructies is een langstransport in zuidelijke richting van 300 m³ te verwachten volgens de modelberekeningen. De golven vallen hier praktisch loodrecht in. Dit reduceert tot circa 0 m³ bij inzet van de vooroeverdam;
- Dv2-2: zonder opsluitconstructies is een langstransport in zuidelijke richting van 100 m³ te verwachten volgens de modelberekeningen. De golven vallen hier praktisch loodrecht in. Dit reduceert tot circa 0 m³ bij inzet van de vooroeverdam;
- Dv3: zonder opsluitconstructies is een langstransport in zuidelijke richting van 4200 m³ te verwachten volgens de modelberekeningen. Dit reduceert tot circa 600 m³ bij inzet van de vooroeverdam. Het moet gerealiseerd worden dat dit een conservatieve benadering is voor dijkvak 3, aangezien deze in de beschutting ligt van de Houtribdijk.

De beschouwde stormcondities hebben een dominante richting van 314 graden Noord. Dit betekent dat ze op dijkvak 2 vrijwel loodrecht invallen en weinig langstransport geven. Een minder extreme storm vanuit een andere richting zou dus voor dit dijkvak meer effect hebben en representatiever zijn. In de jaarlijkse transporten zoals gepresenteerd in Figuur 3-16 zit wel een variatie in richting.



Figuur 3-17: Langstransport bij 1/10 jaar storm. Boven: schematisch bovenaanzicht kustlijn (NB schaal x-as en y-as niet gelijk). De zwarte balk geeft het traject rondom de Maxima centrale aan waar in het model geen vooroever is meegenomen. De gestippelde lijnen geven de grenzen aan tussen de dijkvakken. Midden: langstransport tijdens 1/10 jaar storm langs de kustlijn, zonder dammen. Onder: langstransport tijdens 1/10 jaar storm langs de kustlijn, met vooroeverdam. Positief transport staat voor netto noordwaarts transport, negatief transport staat voor netto transport in zuidelijke richting.

De langstransporten zijn samengevat in Tabel 3-1. Aangezien de vooroever in combinatie met een vooroeverdam met kruin op NAP 0 m een relatief afgesloten bak wordt, is de verwachting dat deze transporten voornamelijk binnen de bak plaatsvinden. Door de hogere ligging van de vooroeverdam is het onwaarschijnlijk dat het zand richting het meer verloren gaat. In Sectie 3.3 is een inschatting gemaakt voor de benodigde buffer om het dwarstransport te compenseren. Het langstransport zorgt ervoor dat

zand in langsrichting langs de dijk getransporteerd wordt, en gaat zo van het ene dijkvak naar het andere. Waar het langstranport geblokkeerd wordt, is een buffer nodig aan benedenstroomse zijde. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij de Maxima centrale, waar de vooroever onderbroken wordt. Aan beide kustlangse uiteindes van de vooroever kunnen zo netto verliezen ontstaan, daarom wordt het aanbevolen om op die locaties bufferzones aan te leggen. Ook in de bochten van de vooroever zijn grotere verliezen te verwachten.

Tabel 3-1: Samenvatting van de langstransporten bij toepassing van de vooroeverdam.

Dijkvak	Langstransport 1 jaar [m³/profiel]	Langstransport 1/10 jaar storm [m³/profiel]
1	2000	800
2-1	1500	0
2-2	1000	0
3	1500	600

Aan noordzijde van dijkvak 1 ligt de Ketelburg, halverwege dijkvak 2 ligt de Maxima centrale en aan zuidzijde van dijkvak 3 ligt de Flevo Marina. Hier is sedimentatie ongewenst, verdere opsluiting van de vooroever en beperking van de langstransporten wordt daarom aanbevolen.

Effect van strekdammen

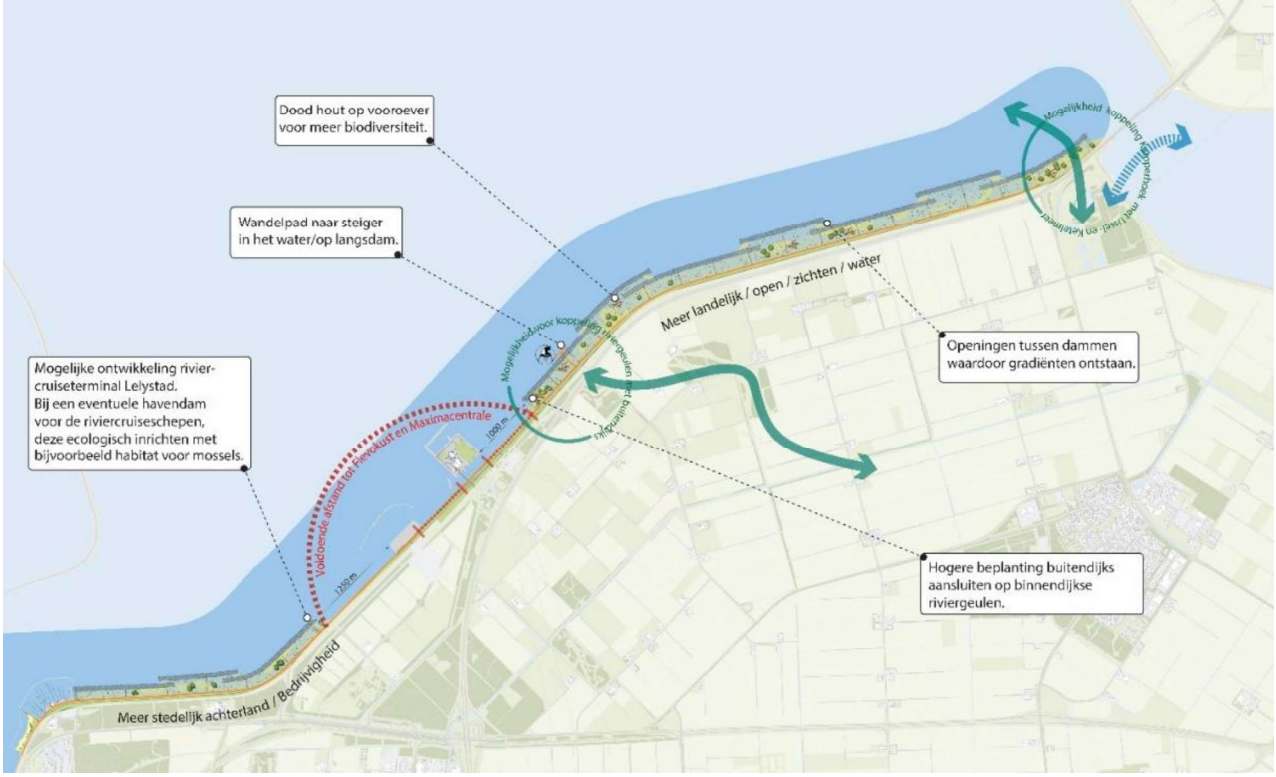
Om de verliezen aan de kopse eindes van het voorland te verminderen en om het langstransport richting Ketelbrug, Flevo Marina en de Maxima centrale te beperken, kunnen strekdammen geplaatst worden. Deze verminderen het verlies van zand uit het voorland als gevolg van langstransport. In plaats daarvan zal zand zich aan bovenstroomse zijde van de strekdammen ophopen. De aanwezigheid van de strekdammen kan de noodzaak voor langsbuffers verminderen. Naast strekdammen kunnen palenrijen om de zoveel meter langs de vooroever geplaatst worden: deze verminderen het langstransport over de vooroever en creëren verschillende secties.

Figuur 3-18: Schematische weergave van de locatie van strekdammen (ruimtebeslag niet op schaal).

4 Wens vanuit ecologische plus

Vanuit ecologisch perspectief spelen de volgende wensen wat betreft de vooroever:

- Het dynamisch aanleggen van de vooroever (variatie in bodemhoogte, spelen met diepte): hiervan wordt verwacht dat deze variaties zich gaan uiteffenen en de vooroever teruggaat naar een evenwicht;
- Het getrapt aanleggen van de langsdam (zie ook Figuur 4-1): naar verwachting gaat meer zand verloren in dwars- en langsrichting en vergt een getrapte langsdam meer beheerinspanning.



Figuur 4-1: Getrapte langsdam.

5 Verwachte beheerinspanning

De morfologische veranderingen van de vooroever zullen goed gemonitord moeten worden. Op basis van de hier uitgevoerde analyse is de basisvariant (vooroeverdam met kruin op NAP 0 m, plateau op NAP -1 m en een buffer rond de waterlijn) naar verwachting redelijk stabiel onder dagelijkse omstandigheden. Bij een 1/10 jaar storm erodeert de buffer deels. Naar verwachting moet de buffer na 5 – 10 jaar worden aangevuld. Na een extreme storm kan mogelijk extra beheersinspanning benodigd zijn. In langsrichting zijn verliezen van circa 2000 m^3/jaar te verwachten op basis van de modelsimulaties, afhankelijk van de toegepaste langsbuffer grootte is beheer nodig. Bij toepassen van strekdammen kan dit langsverlies naar verwachting geminimaliseerd worden.

Een plusvariant, waarin wensen vanuit de ecologische plus zijn meegenomen, vergen naar verwachting meer beheerinspanning. Er zullen grotere verliezen tussen openingen in de vooroeverdam optreden, daarnaast is er meer morfodynamiek op de vooroever doordat hoogteverschillen zich gaan uiteffenen.

6 Conclusies, onzekerheden en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Een van de opties om de IJsselmeerdijk te versterken is het aanbrengen van een zandige vooroever. Deze dempt en/of breekt de golven, waardoor de hoogte en bekleding van de huidige dijk niet te hoeven worden versterkt. Onder invloed van golven en stroming kan de zandige vooroever vervormen en zand wordt in dwars- (richting het IJsselmeer) en langsrichting (langs de dijk) verspreid. Inzicht in dit morfologisch gedrag is belangrijk om de haalbaarheid van een zandige oplossing te beschouwen. In dit rapport is een morfologische analyse naar een zandige vooroever beschreven.

Om aan de waterveiligheidseisen te voldoen, zijn er drie mogelijke minimale profielenvormen: een talud wat aansluit op de huidige dijk op NAP +1 m (1), een horizontaal plateau van 20 m breed op NAP 0 m (2) en een horizontaal plateau van 50 m breed op NAP -1 m (3). Vanuit ervaringen bij het zandige voorland van de Houtribdijk blijkt dat zich natuurlijk een plateau op ongeveer NAP -1 m gaat instellen, waarbij de breedte en exacte hoogteligging bepaald worden door de aanvoer van sediment in langs- en dwarsrichting. Aangezien zand wat richting het meer getransporteerd wordt, snel in relatief diep water terechtkomt en daarmee verloren gaat voor de vooroever, is een buffer rond de waterlijn nodig. Deze erodeert en vult het plateau op circa NAP -1 m aan. Zonder zo’n buffer rond de waterlijn zal het plateau zich verder uitdiepen.

De bovenstaande ervaringen vanuit de Houtribdijk worden bevestigd door conceptuele LITPROF simulaties. Een plateau wat op NAP -1 m wordt aangelegd laat minder vervorming zien dan de andere twee opties, terwijl bij afwezigheid van een buffer rond de waterlijn het plateau zich verder uitdiept. Echter, ook bij aanwezigheid van een buffer rond de waterlijn laat het profiel teveel vervorming zien onder dagelijkse condities om de waterveiligheid te kunnen garanderen. Het toepassen van een vooroeverdam is hiermee noodzakelijk.

Een vooroeverdam is ook vanuit ecologisch perspectief interessant, het creëert een luwe zone. Een vooroeverdam met een kruinhoogte van NAP 0 m in combinatie met een plateau op NAP -1 m van 50 m breed blijkt de meest stabiele optie. Onder stormcondities treedt lichte uitholling van het plateau plaats, toepassing van een buffer rond de waterlijn (aansluiting op NAP +1 m, helling van 1:15) wordt daarom ook in deze situatie geadviseerd. De aanwezigheid van de buffer staat ook wat morfodynamiek toe op het voorland, wat wenselijk is vanuit ecologisch perspectief, en is wenselijk om onzekerheden in morfologisch gedrag op te vangen. Een hogere dam is wellicht vanuit waterveiligheid een interessante optie, maar haalt alle dynamiek uit het systeem en is daarom vanuit ecologisch perspectief niet interessant.

De buffer kan het best tegen de dijk aangelegd worden, onder stormcondities zal deze buffer deels eroderen en zich over het plateau gaan verplaatsen. Een buffer die aansluit op NAP +1 m en een helling heeft van 1:15 zorgt ervoor dat uitdieping van het plateau wordt verminderd. Bij een 1/10 jaar storm erodeert de buffer maar blijft het sediment binnen de vooroeverdam. Bij een 1/67.000 jaar storm treedt ook verlies over de vooroeverdam op.

Ook in langsrichting treden verliezen op. Deze zullen voornamelijk optreden waar het langstransport wordt onderbroken, dat wil zeggen bij de kopse eindes van de vooroever of bij bochten. Op basis van de modellering gaat aan de kopse eindes van de vooroever circa 2000 m^3 per jaar verloren. Zonder verdere opsluitconstructies moeten hiervoor buffers aan de kopse eindes van de vooroever worden aangebracht. Verliezen in de langsrichting kunnen worden beperkt door de toepassing van strekdammen op de kopse eindes van de vooroever. Daarnaast beperkt dit de hoeveelheid zand die richting de Ketelbrug, Maxima

centrale en Flevo Marina worden getransporteerd. Eventuele tussenliggende constructies zoals palenrijen, kunnen in een latere fase worden toegevoegd.

6.2 Aandachtspunten en onzekerheden

Door beperkingen van de software en het unieke laag-energetische milieu van het IJsselmeer is het moeilijk om een goede inschatting te maken van het sedimenttransport. De inschatting van een maakbaar profiel zoals hierboven beschreven is er daarom een waar een aantal aandachtspunten en onzekerheden bij horen. Daarnaast zijn er een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek welke worden meegegeven voor een volgende fase van ontwerp:

- Door het relatief diepe IJsselmeer en het ontbreken van getijdewerking moet elke zandkorrel die buiten het vooroever gebied beland als verloren beschouwd worden. Waar normaal gesproken naar netto transport gekeken wordt is dat in deze situatie een onderschatting en zal er zowel naar netto als ondergrens en bruto als bovengrens gekeken moeten worden;
- De stabiliteit van de vooroever hangt sterk af van het IJsselmeerpeil, wanneer hier in de toekomst wijzigingen in plaats vinden zal dit een direct effect hebben op de stabiliteit van de vooroever. Het IJsselmeerpeilbesluit is weliswaar recent genomen en het risico op wijzigingen gedurende de levensduur van de dijk lijkt dan ook klein;
- De morfologische berekeningen zijn uitgevoerd met het model LITPACK. Zoals elk model heeft ook LITPACK een aantal beperkingen en aandachtspunten. De resultaten zijn dan ook op basis van expert judgement en onderstaande aandachtspunten in acht nemende geïnterpreteerd:
    - Er is gerekend met het IJsselmeerpeil, door storm zal het peil echter variëren door op- of afwaaiing wat effect heeft op de resultaten;
    - Er is gerekend met een sedimentgrootte van 0,350 mm, dit is vrij grof waardoor er minder transport is dan wanneer er gerekend wordt met een fijnere fractie. Daartegenover staat dat er zich in de werkelijkheid een laag fijn (kleiig) materiaal en vegetatie zal ontwikkelen op de vooroever wat zorgt voor extra stabiliteit;
    - Golfhoogtes aan de teen van de dijk worden door LITPACK onderschat door dissipatie langs het profiel;
- Daarnaast dient er bij de interpretatie van de modelleringsresultaten rekening gehouden te worden met het volgende:
    - Het model is niet gekalibreerd of gevalideerd vanwege gebrek aan data;
    - Het model kan goed gebruikt worden om verschillende scenario's relatief ten opzichte van elkaar te vergelijken (bijv. in scenario x is het langstransport 20% groter dan in scenario y);
    - Er zit grote onzekerheid in de absolute volumes en snelheden (zowel voor langs- als dwarstransport). Dit is typerend voor morfologische modelberekeningen, een onzekerheidsmarge van 100% dient in ogenschouw te worden genomen.
- Naast golfgedreven sediment transport treedt er in het IJsselmeer ook een langsstroming op als gevolg van storm opzet en scheefstand. Deze stroming kan een significant effect hebben op de morfologie en lokaal sterk variëren. Daarnaast kan door de aanwezigheid van constructies lokale terugstroming optreden;
- Er is voor het onderhoud gekeken naar zowel dagelijkse als extreme condities (1:10 jaar). Het effect van meerdere 1:1 of 1:2 jaar stormen achter elkaar is niet afzonderlijk berekend maar wordt verwacht binnen de vastgestelde bandbreedte te liggen.

Naast deze aandachtspunten zijn er een aantal aanbevelingen voor de vervolgfase;

- Om alle aspecten van transport goed in beeld te brengen zal er uitgebreider gemodelleerd moeten worden, zowel op het golfgedreven transport als het windgedreven transport (3D). Aandachtspunten hierbij zijn ook de ruimtelijke variatie langs de IJsselmeerdijk en de keuze voor stormcondities (zo zijn voor alle dijkvakken dezelfde stormcondities gehanteerd wat voor het relatief beschutte dijkvak 3 waarschijnlijk een conservatieve benadering is);
- In de toekomst zal RWS Xbeach gebruiken als toetsingsmodel voor zandige oplossingen, dit model voldoet momenteel echter nog niet voor deze complexe situatie;
- Expertsessies zijn nodig in de volgende fase om het ontwerp verder te valideren en uit te werken.

7 Referenties

Rijkswaterstaat. (2018). *Peilbesluit IJsselmeergebied.*