



Figuur 1: Almere Duin (Koopmans, 2018)

Duinerosie in Almere Duin

Erosie indicatie van een kunstmatige duin in Almere Duin

Scriptie
10/07/2020

Auteur: N. Snoeijink
Studentnummer: s1819631
Opleiding: BSc Civiele Techniek
Onderwijsinstelling: Universiteit Twente
Externe organisatie: Waterschap Zuiderzeeland

Voorwoord

Voor u ligt de definitieve versie van mijn onderzoeksrapport. In dit rapport is onderzoek gedaan naar duïnerosie van een theoretische duin in het projectgebied Almere Duin. Dit rapport dient als indicatie voor de mogelijkheden omtrent dijkversterkingen en onderhoud in het projectgebied.

Dit onderzoek is geschreven in de nogal bijzondere tijden, midden in de uitbraak van het COVID-19 virus met als gevolg een lockdown. Ik wil daarom graag mijn begeleiders Marijke Visser van Waterschap Zuiderzeeland en Johan Damveld van Universiteit Twente bedanken voor de flexibiliteit, bereikbaarheid en bereidheid om mij te begeleiden tijdens het schrijven van dit onderzoek. Verder wil ik iedereen bij Waterschap Zuiderzeeland bedanken die mij bij dit onderzoek heeft geholpen.

Samenvatting

In de gemeente Almere wordt, als onderdeel van een bouwproject, een gebied van ongeveer 100 hectare bedekt door een zandlaag. Deze zandlaag heeft een esthetisch doel en zal de omgeving op een kustgebied doen lijken, terwijl het gebied in het zuidwesten van de Flevopolder ligt. Het aangrenzende water is het IJmeer. Volgens de huidige plannen zal deze zandlaag in de toekomst ook de dijk bedekken. Waterschap Zuiderzeeland, dat verantwoordelijk is voor de waterveiligheid in het projectgebied, ziet deze zandlaag tot op heden als leeflaag.

De leeflaag is een laag zand die niks bijdraagt aan de veiligheid van de dijk. Met het oog op de toekomst, waarin de dijk ooit versterkt of gerepareerd moet worden, is het vraagstuk opgekomen of deze zandlaag meegenomen kan worden in de sterkteberekening van de waterkering. Dat kan als toevoeging bij de huidige dijk of wellicht zelfs als vervanging. Het meenemen van de zandlaag in de sterkteberekening zal moeten leiden tot een efficiënter ontwerp van de waterkering. Dit rapport dient als een stap in die richting door een eerste indicatie te maken over het erosievolume van een duin in de omgeving van Almere Duin. De indicatie van het erosievolume is gebaseerd op de hydraulische belasting. Deze kans is gelijk aan de ondergrens van de Waterwet op de desbetreffende dijkkring (Kenniscentrum Infomil, 2020).

De erosie van een duin is in kaart gebracht door belangrijke parameters te bepalen en het erosievolume op basis daarvan te berekenen. De resultaten zijn uitgedrukt in een totaal erosievolume en de bijbehorende dimensies van het erosieprofiel. Vanwege de uniekheid van het project is niet elk erosiemodel geschikt voor het bepalen van de erosie. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van een gevoeligheidsanalyse naar de reststerkte van dijken na het falen van bekleding. Op deze manier wordt de duin als dijk kern beschouwd en kunnen golfcondities worden ingevoerd.

Voor de berekeningen van het erosiemodel zijn de helling van het buitentalud en de kruinhoogte van de duin van belang, evenals de hydraulische belasting. De duin eigenschappen zijn bepaald na het opmaken van een theoretische duin zoals deze in de toekomst gerealiseerd kan worden. De hydraulische belasting is bepaald met behulp van Hydra-NL. Dit is een wettelijk goedgekeurd instrument dat op basis van een 'locatie specifieke database met waterstanden en golven' en dijk informatie, waterstanden en golfgegevens kan bepalen bij een bepaalde terugkeertijd. De terugkeertijd is in dit geval gelijk aan de ondergrens van de overstromingskans, namelijk 10.000 jaar.

Het erosievolume is over een periode van 48 uur, dat als een veilige duur van een storm kan worden gezien (STOWA, 2015), middels de eerder bepaalde hydraulische belasting berekend. Voor een periode van 48 uur is met tijdstappen van 3 minuten het erosievolume en de erosiebreedte berekend. Het resultaat is het totale erosievolume en de bijbehorende erosiebreedte aan het einde van de storm.

Aan het einde van deze storm is, afhankelijk van de waterhoogte en de bijbehorende golfcondities, een erosievolume berekend dat varieert tussen 124 en 174 kubieke meter per strekkende meter duin (m^3/m). Dit erosievolume heeft respectievelijk een erosiebreedte van 41,6 tot 50,3 meter (m) tot gevolg. Deze erosiebreedte kan ook worden beschreven als afstand vanaf de buitenkruinlijn van de duin, deze afstand varieert van 24,0 en 27,6 meter (m).

Deze resultaten geven het belang van de huidige dijk aan. Het hoge erosievolume en de bijbehorende erosiebreedte zorgen voor een onveilige situatie in het projectgebied. In delen van het projectgebied wordt immers al op 25 meter afstand vanaf de buitenkruinlijn gebouwd. Dat de dijk in de toekomst zal worden vervangen door een duin lijkt daardoor onwaarschijnlijk.

Mogelijkheden om een sterkere duin te creëren dan de duin uit dit onderzoek zijn er wel. Het advies is om te kijken of een strand voor de duin kan worden geplaatst. Op basis van dit onderzoek kan dat de duin erosiebestendiger maken. Deze aanpassing verlaagt het erosievolume door een kleinere helling van het buitentalud. Ook helpt het strand om golfslag op te vangen, deze lagere golven leiden tot een lager erosievolume. Daarnaast is het strand een extra buffer voordat de duin zelf erodeert.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
Inhoudsopgave.....	3
Figuren- en tabellenlijst	4
Begrippenlijst	5
1. Inleiding	6
1.1. Achtergrond	6
1.2. Probleemstelling	7
1.3. Doel en onderzoeksvragen.....	7
1.4. Afbakening	8
1.5. Leeswijzer	10
2. Theoretisch kader	11
2.1. Schematisch erosieproces.....	11
2.2. Veiligheid van waterkeringen	13
2.3. Hydra-NL.....	13
3. Methodologie.....	14
3.1. Welke omgevingsparameters zijn van belang voor een erosiemodel in het projectgebied Almere Duin?	14
3.2. Hoeveel erosie treedt op in een duin in de omgeving van Almere Duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar?	17
4. Resultaten	21
4.1. Welke omgevingsparameters zijn van belang voor een erosiemodel in het projectgebied Almere Duin?	21
4.2. Hoeveel erosie treedt op in een duin in de omgeving van Almere Duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar?	23
5. Discussie	25
5.1. Aanne α_t	25
5.2. Model factors	26
5.3. Kans van 1/10.000 per jaar	26
5.4. Duinhoogte	26
5.5. Strand	27
6. Conclusie	28
7. Aanbevelingen	28
8. Literatuurlijst.....	29
Bijlagen.....	30
Bijlage A: Dijkprofiel	30
Bijlage B: Eigenschappen bekledingstype	31
Bijlage C: Berekening erosiebreedte	32
Bijlage D: Hydraulische belasting	34
Bijlage E: Bodemdiepte IJmeer	35
Bijlage G: Aanne <i>at</i>	36

Figuren- en tabellenlijst

Figuur 1: Almere Duin (Koopmans, 2018)	0
Figuur 2: Plattegrond projectgebied Almere Duin (DUIN)	6
Figuur 3: Plattegrond Almere Duin met de onderzoekslocatie in rood omcirkeld	8
Figuur 4: Golfvorming over maximale strijklengte.....	9
Figuur 5: Onderzoekslocatie.....	9
Figuur 6: Gesimplificeerd erosieprofiel (in het rood) (Deltares, 2014).....	11
Figuur 7: Gesimplificeerd erosieprofiel met enkele belangrijke parameters (Deltares, 2014).....	12
Figuur 8: Ondergrens overstromingskans per dijktraject (Waterveiligheidsportaal, 2020)	13
Figuur 9: Basisopzet Hydra-NL (Ministerie van verkeer en waterstaat, Expertise Netwerk Waterkeren, 2017).....	13
Figuur 10: Methodologie van dit onderzoek	14
Figuur 11: Hydra-NL interface (Rijkswaterstaat, 2019)	15
Figuur 12: Berekening erosievolume	17
Figuur 13: Het erosieprofiel met de benodigde parameters.....	18
Figuur 14: Erosieprofiel na buitenkruin	19
Figuur 15: Erosieprofiel na buitenkruin	20
Figuur 16: Ontwerp theoretische duin.....	21
Figuur 17: stormopbouw per waterhoogte	22
Figuur 18: Erosievolume gedurende de storm (Waterstand 0m +NAP).....	23
Figuur 19: Weergave erosieprofielen (hoogte en breedte niet op schaal).....	24
Figuur 20: Erosieprofielen in de duin	25
Figuur 21: Correctie helling terras.....	25
Figuur 22: Dijkprofiel 11, Hectometerpaal 4.0.....	30
Figuur 23: Vereenvoudigd erosieprofiel	32
Figuur 24: versimpeld Erosieprofiel	33
Figuur 25: Hoogtecijfers onderzoekslocatie (Waterschap Zuiderzeeland, 2018).....	35
Tabel 1: Duin parameters.....	21
Tabel 2: Hydraulische belastingen.....	22
Tabel 3: Correctie significante golfhoogte.....	22
Tabel 4: De maximale klifhoogte.....	23
Tabel 5: Erosievolume van het oplopende deel.....	23
Tabel 6: Terrasbreedte erosieprofiel	24
Tabel 7: Afstand tot de buitenkruin	24
Tabel 8: Eindresultaten per waterhoogte	24
Tabel 9: Correctie helling terras.....	25
Tabel 10: Model factors.....	26
Tabel 11: Erosiebreedte bij lagere hydraulische belastingen	26
Tabel 12: Parameters per bekledingstype (Duits, 2019).....	31
Tabel 13: Hydraulische belasting per waterhoogte	34
Tabel 14: Berekening helling terras	36
Tabel 15: Berekening extra erosiebreedte	37

Begrippenlijst

Erosie:

Afslijting van gesteente of grond door de werking van wind, ijs of stromend water.

Windgolven:

Door wind opgewekte golven aan de oppervlakte van water.

Strijklengte:

De afstand die wind of golven afleggen over open water.

Bekleding:

De buitenlaag van de dijk die dient als bescherming van de dijkkern.

Overstromingskans:

De overstromingskans geeft de kans op een overstroming van een dijkkring.

Overschrijdingskans:

Technische term waarmee de kans op een hogere waterhoogte dan de dijk wordt aangegeven.

Terugkeertijd:

De tijd waarin een gebeurtenis gemiddeld 1 keer voorkomt.

Talud:

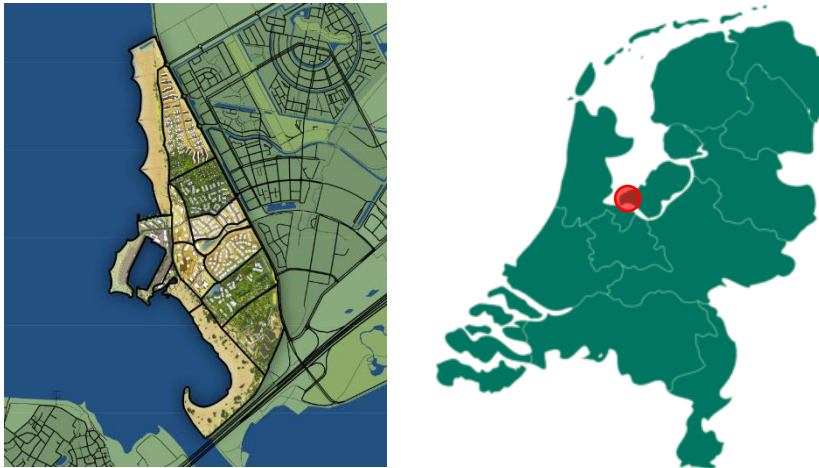
Het hellende vlak langs de dijk.

Kruin:

De top van de dijk.

1. Inleiding

Als onderdeel van een project in Almere, zal een nieuwe wijk worden gecreëerd; Almere Duin. De stad in zuidwest Flevoland is onder andere aan het uitbreiden in westelijke richting. Terwijl dit gebied eerder bekend was vanwege een haven en het evenementenstrand, zullen in dit gebied in de komende 10-15 jaar rond de 3000 woningen worden gerealiseerd (AMVEST, 2020). Het hele projectgebied zal in een stijl worden ontwikkeld die men doet denken aan een duingebied. Om dit te realiseren zullen grote delen van het 100 hectare grote projectgebied worden bedekt met zand. Deze zandlaag zal ervoor zorgen dat bewoners en bezoekers van het gebied zich in een kustgebied wanen terwijl het eigenlijk een polder midden in Nederland is. In Figuur 2 is een kaart van het projectgebied afgebeeld, daarnaast is de locatie van het projectgebied te zien op de kaart van Nederland. De plannen van de gemeente Almere brengen echter ook problemen met zich mee, onder andere op het gebied van waterveiligheid.



Figuur 2: Plattegrond projectgebied Almere Duin (DUIN)

1.1. Achtergrond

Om de ervaring van leven in een duingebied compleet te maken zijn er plannen om de dijk zelf ook te bedekken met zand. Dit is een relatief nieuw concept maar er zijn enkele voorbeelden van gelijkwaardige projecten waarbij zand is gebruikt om bestaande dijken te versterken. Deze vorm van bouwen valt onder "building with nature", waarbij de kracht van de natuur wordt gebruikt om het landschap te vormen naar onze hand. Een aantal voordelen van deze nieuwe uitgangspositie bij bouwprojecten, vallen binnen de duurzame ontwikkelingsdoelstellingen van de Verenigde Naties (Ecoshape, 2020). Voorbeelden hiervan zijn verbetering van veerkrachtigheid en aanpassingsvermogen ten opzichte van klimaatverandering. Ook kan deze bouwmentaliteit ecosystemen in het projectgebied een boost geven.

Een project dat vanuit deze uitgangspositie is ontwikkeld, is bijvoorbeeld de 'Prins Hendrik zanddijk' aan de kust van Texel. Hier is een 3 kilometer lange zanddijk geplaatst voor de reeds bestaande veelvoorkomende kleidijk (Hollands Noorderkwartier, 2019). De nieuwe dijk creëert een natuurlijke transitie tussen water en land, wat bevorderlijk is voor de natuur in de omgeving.

Ook de Houtribdijk – de dijk tussen Enkhuizen en Lelystad – wordt versterkt door deze werkwijze. Door delen van de dijk aan beide kanten te versterken met zandige oevers voldoet de dijk weer aan de veiligheidsnormen. Daarnaast wordt ook bijgedragen aan een betere waterkwaliteit in het Markermeer en krijgt natuur een kans zich te ontwikkelen in de omgeving (Rijkswaterstaat, 2020).

De bovengenoemde projecten dragen de 'building with nature' mentaliteit uit door naast veiligheid, de natuur in de buurt een boost te geven. Het waterschap heeft echter te maken met een ruimtelijke inrichtingswens in het projectgebied. Daarom wordt dit project niet op een gelijke manier aangepakt en wordt voornamelijk gefocust op veiligheid. Tot op heden wordt de zandlaag die zal worden aangelegd gezien als leeflaag die niet geen bijdrage heeft in de sterkte van de dijk, deze aanname is onder andere het resultaat van de uniekheid van dit project. Waterschap Zuiderzeeland wil graag de mogelijkheden in kaart brengen op het gebied van veiligheid. Dit zal leiden tot een efficiënter ontwerp van een dijk-duincombinatie op het gebied van veiligheid.

1.2. Probleemstelling

De aankleding van de omgeving Almere Duin zal compleet worden gemaakt door een zandlaag aan te brengen over de bestaande dijk. De zandlaag kan onzekerheid veroorzaken omtrent de veiligheid van de dijk. Het is onduidelijk of- en hoeveel extra veiligheid deze zandlaag toevoegt aan de bestaande dijk. In huidige beslissingen binnen het waterschap wordt de zandlaag gezien als een "leeflaag" die geen deel uitmaakt van de waterkering.

Omdat de zandlaag geen deel uitmaakt van de waterkering, wordt deze ook niet meegenomen in sterkteberekeningen in het geval dat de dijk versterkt of gerepareerd moet worden. Om de waterkering te versterken of repareren moet daarom de dijk eerst uitgegraven worden alvorens er werkzaamheden aan kunnen worden verricht. Dit is niet alleen prijzig maar ook inefficiënt. Deze reparaties of versterkingen kunnen noodzakelijk zijn om aan de regelgeving van de overheid te voldoen. De normen waar waterkeringen aan moeten voldoen zijn vastgelegd in de Waterwet en zijn bepaald per dijkring. In het gebied van Almere Duin is een overstromingskans van 1/10.000 per jaar de ondergrens. (Waterveiligheidsportaal, 2020)

Om veiligheid volgens deze normen in de toekomst te waarborgen op een efficiënte manier, is het waterschap geïnteresseerd in de eigenschappen en mogelijkheden van deze zandlaag. De uniekheid van de situatie zorgt er echter voor dat het waterschap niet bekend is met de mogelijkheden.

Het waterschap wil weten wat de sterkte is van deze zandlaag zodat deze zandlaag in de toekomst de huidige dijk zou kunnen versterken of zelfs in zijn geheel vervangen. Als uitgangspositie wil het waterschap daarom weten wat de sterkte is van een duin in de omgeving van Almere Duin.

Onderzoeken naar duinerosie of dijkerosie worden vaker uitgevoerd, er zijn daarom modellen beschikbaar. In de context van Almere Duin is het echter zo dat er een duin aan een meer ligt, terwijl duinen normaalgesproken in een kustgebied voorkomen. Omdat de omstandigheden waaraan de duin wordt blootgesteld anders zijn dan normaal, zijn niet alle erosiemodellen hiervoor gekalibreerd. In dit onderzoek zal daarom gekeken worden naar een model dat toegepast kan worden op de situatie in Almere Duin.

1.3. Doel en onderzoeksvragen

Waterschap Zuiderzeeland wil onderzoeken of een duin in de toekomst de huidige dijk kan vervangen. Het doel van dit onderzoek is daarom als volgt:

In kaart brengen of de dijk in Almere Duin vervangen kan worden door een duin.

Als eerste indicatie voor dat vraagstuk zal in dit rapport onderzoek gedaan worden naar het erosievolume van een duin in de omgeving van Almere Duin door een hydraulische belasting. Omdat het waterschap hierbij gebonden is aan landelijke regelgeving wordt rekening gehouden met normen die daarbij aansluiten. Dit betekent dat de hydraulische belasting een kans van 1/10.000 per jaar heeft. De hoofdvraag van dit rapport is daarom als volgt:

Hoelang erodeert een duin op de projectlocatie Almere Duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar?

Om inzicht te verkrijgen in dit vraagstuk zullen meerdere aspecten onderzocht moeten worden. Deze onderdelen zullen aan de hand van enkele deelvragen behandeld worden. De deelvragen waarin het onderzoek is opgedeeld zijn als volgt:

1. Welke omgevingsparameters zijn van belang voor een erosiemodel in het projectgebied Almere Duin?

Om het erosieproces te begrijpen zullen parameters moeten worden bepaald die de situatie in Almere duin beschrijven. Deze parameters kunnen worden opgedeeld in twee categorieën. Namelijk de parameters van de hydraulische belasting die op de duin zal werken en de eigenschappen van de duin zelf. Deze deelvraag is daarom opgedeeld in twee sub-deelvragen.

1a. Welke parameters van de duin zijn benodigd om deze te schematiseren in het erosiemodel?

De situatie die wordt gesimuleerd betreft een duin en geen dijk. Vanwege de unieke situatie van een duin aan een meer zal de duin moeten worden beschreven op een manier zodat deze conform het gebruikte model is. Voornamelijk de vorm van de duin is van belang voor duinerosie. Daarom zal dit worden onderzocht.

1b. Wat is de hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar in het projectgebied Almere Duin?

Veel duinerosiemodellen zijn gekalibreerd op een aan de kust gelegen duin. In de omgeving van Almere zullen hele andere golven en waterstanden te verwachten zijn. Daarom zullen de hydraulische belastingen worden gesimuleerd.

2. Hoeveel erosie treedt op in een duin in de omgeving van Almere Duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar?

Een erosiemodel kan worden toegepast nadat de benodigde parameters vastgesteld zijn. Door deze in het erosiemodel in te voeren kan het erosievolume onder deze omstandigheden berekend worden. Met dit erosievolume en het bijbehorende erosieprofiel kan worden bepaald hoe groot een duin moet zijn om aan de veiligheidsnormen te voldoen.

1.4. Afbakening

Dit onderzoek is gericht op het bepalen van een erosievolume in een duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar. De nieuwe wijk Almere Duin kent al veel variaties aan duinprofielen. Ook per locatie aan het Markermeer en IJmeer verschillen de golfcondities. Om variatie tegen te gaan is een specifiekere locatie binnen het projectgebied gekozen voor verdere berekeningen.

Uit onderzoek blijkt dat windgolven groeien naarmate ze een langere afstand afleggen (Lamont-Smith & Waseda, 2006). Door de ligging van Almere Duin verschilt de strijklengte waarover golven zich kunnen vormen op het IJmeer. Om rekening te houden met de hoogste golven binnen Almere Duin zal het onderzoek gericht zijn op de locatie waar dat zo is. Uitgaande van de maximale strijklengte is de locatie gekozen in het noorden van Almere Duin. De onderzoekslocatie is te zien in Figuur 3. De maximale strijklengte waarover de golven zich vormen is te zien in Figuur 4.



Figuur 3: Plattegrond Almere Duin met de onderzoekslocatie in rood omcirkeld



Figuur 4: Golfvorming over maximale strijklengte

In dit onderzoek wordt rekening gehouden met plannen van het projectgebied zoals die zijn op het moment van schrijven. Dit houdt in dat er van uit wordt gegaan dat er wensen zijn om een strand aan te leggen buiten de dijk, het 'Meerstrand'. Ook zal volgens de huidige plannen een woonwijk worden gebouwd achter de dijk. De bebouwing zal vanaf 25 meter achter de buitenkruinlijn worden gerealiseerd. Deze plannen zijn te zien in Figuur 5, dit figuur geeft het rood omcirkelde deel uit Figuur 3 uitvergroot weer.



Figuur 5: Onderzoekslocatie

Dijk- en duinstabiliteit hangen af van vele factoren. Van de mogelijke bezwijkingsmechanismes die een duin of dijk kunnen laten doorbreken zal in dit rapport alleen onderzoek gedaan worden naar het erosievolume. Daarnaast wordt aangenomen dat de waterkering stabiel is. In de erosieberekeningen zal de dijk zoals die er nu ligt worden genegeerd en zal de duin als homogene zandmassa worden beschouwd.

1.5. Leeswijzer

Dit onderzoek bestaat uit 7 hoofdstukken.

Hoofdstuk 1 is een inleiding waarin de achtergrond en probleemstelling worden benoemd en toegelicht. Ook staan hier het doel en de onderzoeksvragen van dit onderzoek.

Hoofdstuk 2 beschrijft het theoretische kader waarin dit onderzoek is uitgevoerd. Hier wordt de achtergrond van gebruikte modellen beschreven. Ook is hier wat achtergrondinformatie beschreven over de regelgeving waar in dit onderzoek rekening mee wordt gehouden.

Hoofdstuk 3 beschrijft stap voor stap de methode waarmee de onderzoeksvragen beantwoord zullen worden.

Hoofdstuk 4 benoemt de kwantitatieve resultaten van het onderzoek.

Hoofdstuk 5 beschrijft discussiepunten van dit onderzoek.

Hoofdstuk 6 beschrijft de conclusie op basis van de eerder berekende resultaten.

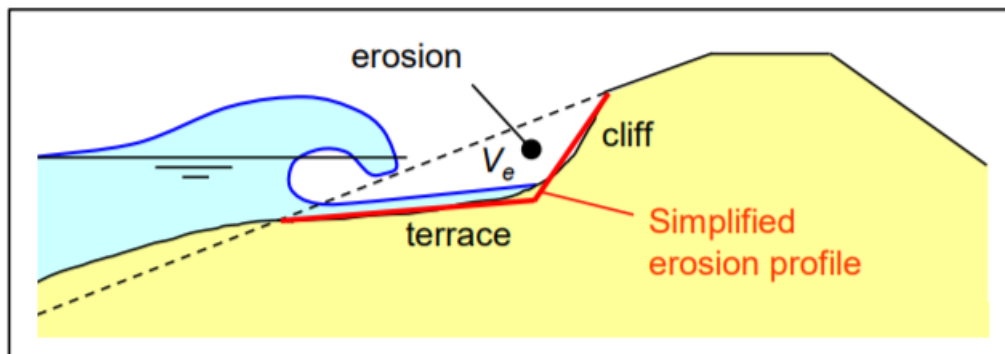
Hoofdstuk 7 bevat aanbevelingen voor eventueel verder onderzoek.

2. Theoretisch kader

Een aantal randvoorwaarden en algemene bepalingen komen voort uit regelgeving en artikelen die met dit onderzoek te maken hebben. Enkele theoretische kaders zal in dit hoofdstuk worden beschreven.

2.1. Schematisch erosieproces

Wanneer golven een duin raken, erodeert een deel van die duin. Een gesimplificeerd erosieprofiel tijdens dit proces is in Figuur 6 weergegeven.



Figuur 6: Gesimplificeerd erosieprofiel (in het rood) (Deltares, 2014)

Het erosiemodel dat gebruikt zal worden in dit onderzoek is een gevoeligheidsanalyse van Deltares (2014) naar de reststerkte van dijken na het falen van bekleding. Deze studie van Deltares is uitgevoerd in het kader van het SBW (Sterkte en Belastingen op Waterkeringen) en het onderzoeksprogramma WBI-2017 (Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium). Het doel van deze organisaties is om nieuwe veiligheidsbeoordelingsinstrumenten voor waterkeringen te ontwikkelen. In het rapport van Deltares is een analytische berekening opgesteld om de veiligheid van steenbekleding en de reststerkte te beoordelen.

Een erosievolume kan berekend worden doormiddel van een analytisch model dat is opgesteld in het rapport. Dit analytische model is tot stand gekomen doordat er formules beschikbaar of afgeleid zijn voor elke stap in het bezwijkproces. De formules over duinerosie die in het rapport zijn opgenomen zijn terug te leiden naar een onderzoeken van Klein Breteler (Deltares, 2014). In dat onderzoek werd op basis van model testen op grote schaal, in combinatie met numerieke berekeningen van duinerosie, een formule opgesteld waarmee het erosievolume kan worden berekend. Voor deze berekening van het erosievolume met deze formule zijn een aantal parameters zoals de golfhoogte, piekperiode, helling van het talud, de diepte van de klif en de breedte van het erosieprofiel nodig.

Dit model is gekozen omdat de situatie van een zandkern in de dijk te vergelijken is met de situatie in Almere Duin. Dit is zowel op het gebied van vorm en materiaal. Dit houdt in dat de laatste stappen van het dijkerosieproces worden vergeleken met het eroderen van een duin. Ook wordt in het rapport benoemd dat het rapport kan dienen als basis voor berekeningen aan de zandkern bij "bijzonder grote" dijkvolumes (Deltares, 2014).

Het erosievolume in een zandkern van een dijk kan worden berekend volgens Vergelijking 1 en is weergegeven als het rode vlak in Figuur 7. In dit figuur zijn ook enkele belangrijke parameters aangegeven.

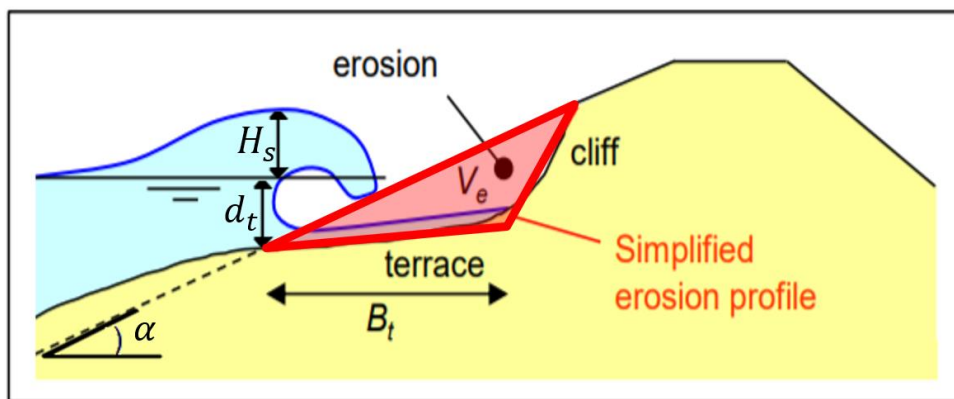
Vergelijking 1: Erosievolume (Deltares, 2014)

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = C_{m,2} * \frac{H_s^2}{T_p} \left(\frac{0,15}{S_{op}^{1,3}} + \tan(\alpha)^{0,8} * (135 - 1500 * S_{op}) * \exp\left(-0,0091 * \left(\frac{B_T}{H_s}\right)^2\right)\right)$$

Hierin is:

- V_e = Erosievolume [m^3/m]
- $C_{m,2}$ = Model factor voor het berekenen van het erosievolume in de zandlaag [-]
- H_s = Significante golfhoogte [m]
- T_p = Piekperiode [s]
- S_{op} = Golfsteilheid [-] = $H_s / (1,56T_p^2)$
- α = Gemiddelde hoek buitentalud [$^\circ$]
- B_T = Terrasbreedte erosieprofiel [m]

De 'terrasbreedte' of 'breedte van het terras' is de breedte van het erosieprofiel. De terrasbreedte geeft aan hoe ver het duin is geërodeerd. In dit rapport wordt het daarom, samen met het erosievolume, gezien als maatstaf voor de hoeveelheid erosie die plaatsvindt.



Figuur 7: Gesimplificeerd erosieprofiel met enkele belangrijke parameters (Deltares, 2014)

Nog niet benoemd is de diepte van het terras (d_t). De diepte van het terras geeft aan hoe diep de duin onder de waterhoogte erodeert. Deze parameter is benodigd om tot de juiste erosiebreedte te komen. De erosiebreedte is vervolgens weer benodigd in vergelijking 1. De diepte van het terras kan worden berekend met vergelijking 2.

Vergelijking 2: Terrasdiepte (Deltares, 2014)

$$d_t = c_{m,3} * \min\left(0,4 * \frac{V_e^{0,25}}{\sqrt{H_s}} + 0,7; 2H_s\right)$$

Hierin is:

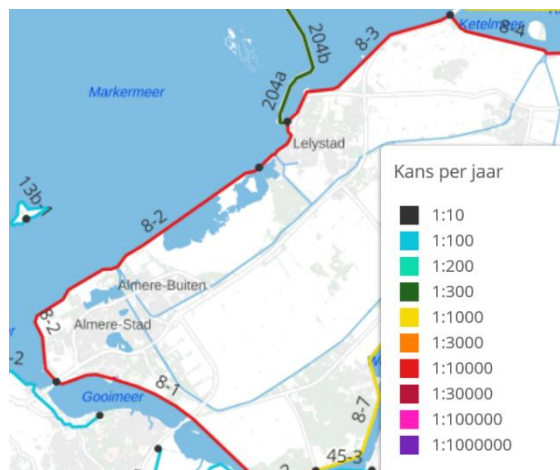
- d_t = Terrasdiepte [m]
- $c_{m,3}$ = Model factor voor het berekenen van de terrasdiepte [-]
- V_e = Erosievolume per strekkende meter duin [m^3/m]
- H_s = Significante golfhoogte [m]

Het totale erosievolume, de diepte van het terras en de erosiebreedte geven uiteindelijk een indicatie over de erosie van een duin.

2.2. Veiligheid van waterkeringen

Sinds 2017 is de technische norm voor veiligheid gewijzigd van overschrijdingskans naar overstromingskans. De eerste term geeft de kans weer op overstromen bij een bepaalde waterstand, de tweede term geeft een kans op overstromen aan door het bezwijken van de waterkering. Deze overstromingskans is dus de wettelijke norm sinds 2017 en zal ook in dit onderzoek gehanteerd worden (Kenniscentrum Infomil, 2020). Op deze manier wordt niet alleen naar de waterstanden gekeken, maar ook naar het bezwijkmechanisme erosie.

De nieuwe overstromingskans is per dijktraject bepaald. In het projectgebied Almere duin, dat onder dijktraject 8-2 valt, is de ondergrens op 1/10.000 per jaar vastgesteld. Deze ondergrens geeft de maximaal toelaatbare faalkans voor een dijktraject weer. (Waterveiligheidsportaal, 2020) Een kaart met de ondergrens van overstromingskansen is te zien in Figuur 8.

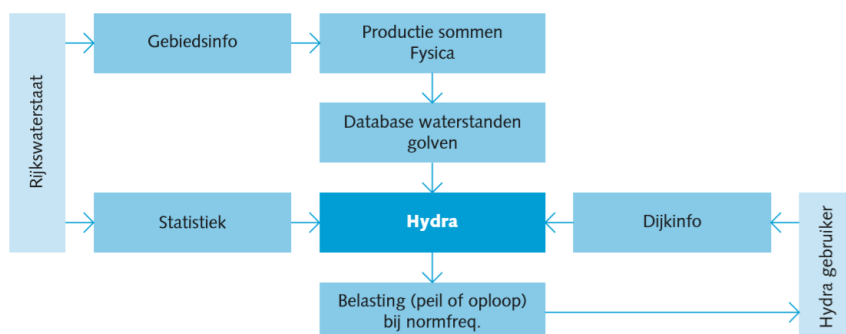


Figuur 8: Ondergrens overstromingskans per dijktraject (Waterveiligheidsportaal, 2020)

Omdat op de locatie van de duin een ondergrens voor de overstromingskans van 1/10.000 jaar geldt, zal ook een duin als primaire waterkering aan deze eis moeten voldoen. In dit rapport zal met deze ondergrens rekening worden gehouden.

2.3. Hydra-NL

Hydra-NL is een wettelijk goedgekeurd instrument dat gebruikt kan worden om hydraulische belastingen bij een bepaalde overschrijdingskans te bepalen. De hydraulische belasting bestaat uit bijvoorbeeld de waterstand, golfcondities en piekperiode. De waarden die uit dit programma komen kunnen vervolgens worden gebruikt voor de beoordeling van waterkeringen en kunstwerken van Nederland. De basisopzet van Hydra-NL is schematisch weergegeven in Figuur 9.

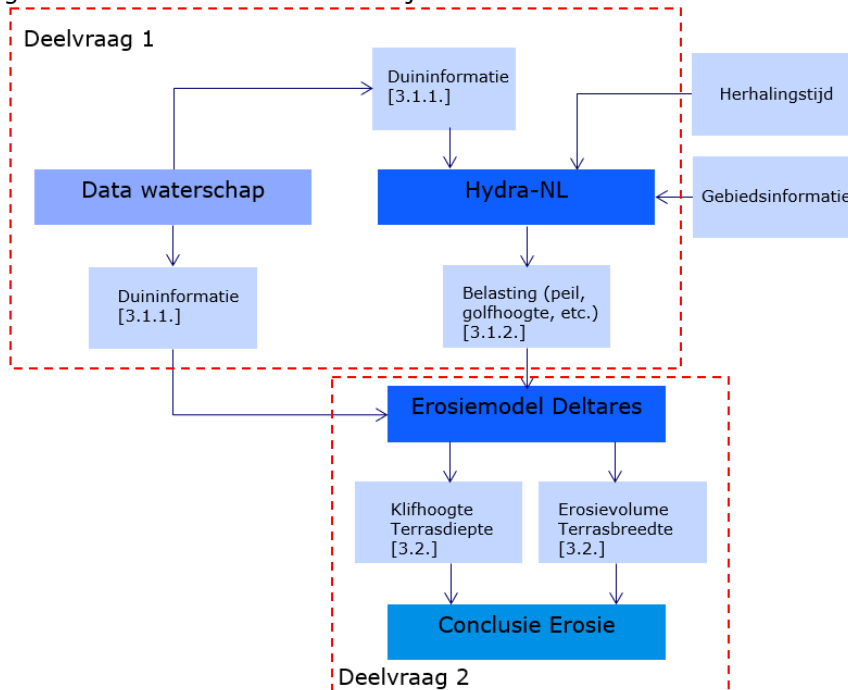


Figuur 9: Basisopzet Hydra-NL (Ministerie van verkeer en waterstaat, Expertise Netwerk Waterkeren, 2017)

In dit onderzoek zal dijk- en gebiedsinformatie worden ingevoerd zodat de belasting kan worden meegenomen in verdere berekeningen. De gebiedsinformatie die wordt ingevoerd is afkomstig van databases van Rijkswaterstaat, die conform het WBI-2017 zijn. De database die in dit onderzoek gebruikt is, is 'WBI2017 Markermeer 8-2 8-3b v02 correctie v01'

3. Methodologie

In hoofdstuk 3 zal de methodologie van het onderzoek worden beschreven. Dit zal gedaan worden aan de hand van de deelvragen, zoals die zijn opgesteld in Hoofdstuk 1.3. De combinatie van deelvragen, zal uiteindelijk leiden tot een antwoord op de hoofdvraag en tot conclusie over het erosievolume van de duin. Hoe de deelvragen zich tot elkaar verhouden is te zien in Figuur 10. De getallen in vierkante haken verwijzen naar de hoofdstukken waar deze informatie is verzameld.



Figuur 10: Methodologie van dit onderzoek

3.1. Welke omgevingsparameters zijn van belang voor een erosiemodel in het projectgebied Almere Duin?

De benodigde omgevingsparameters kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën. De parameters van de duin en de hydraulische belasting die hierop werkt. Deze zullen afzonderlijk van elkaar bepaald worden in de paragrafen hieronder.

3.1.1. Welke parameters van de duin zijn benodigd om deze te schematiseren in het erosiemodel?

De benodigde parameters van de duin zijn weergegeven als 'Duininformatie' in Figuur 10. Deze parameters hangen af van hoe de duin gerealiseerd zal worden. Omdat dit nog onzeker is, wordt gerekend met een theoretische duin. Deze duin is een combinatie van de huidige situatie en grenswaarden in het model. Ook is aangenomen dat de zandlaag die over de dijk zal worden geplaatst een dikte heeft van 1 meter. Vanaf dat punt zal de duin op gelijke hoogte het binnenland in blijven lopen. Met behulp van een dwarsprofiel is de kruinhoogte van de dijk in de huidige staat verzameld. Het gebruikte dwarsprofiel is te vinden in Bijlage A: Dijkprofiel.

In de huidige plannen van het project wordt gesproken over een klein strand dat voor de duin zal liggen. Het is echter nog maar de vraag of deze er zal komen. Het IJmeer is namelijk onderdeel van de natura 2000-gebieden in Nederland, dit betekent dat een strand in strijd kan zijn met de doelstellingen die voor dit gebied gelden (Natura 2000, 2000).

Omdat plannen onzeker zijn, is gekozen voor een minimale helling van het buitentalud volgens de grenswaarden van het erosiemodel. Dit is een helling van 1:4,55. Dat betekent dat elke 4,55m in horizontale richting, de hoogte van de duin 1 meter daalt of stijgt. Dit komt overeen met een $\tan(\alpha)$ van 0,22, de ondergrens volgens het erosiemodel.

3.1.2. **Wat is de hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar in het projectgebied Almere Duin?**

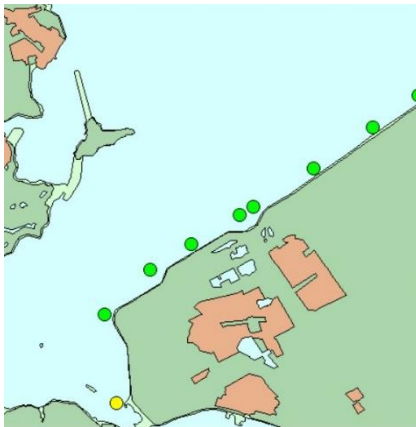
Vanwege de toegestane overstromingskansen, mag een dijk bij een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar doorbreken. Die hydraulische belasting kan veroorzaakt worden door een storm. Hoe deze hydraulische belasting bepaald wordt, is in de volgende paragrafen beschreven.

3.1.2.a. Hydraulische belasting volgens Hydra-NL

Met behulp van Hydra-NL kan de hydraulische belasting op een waterkering worden bepaald. Deze hydraulische belasting bestaat uit een waterhoogte met daarbij golfcondities. De combinatie van de waterhoogte en de golfcondities heeft een terugkeertijd van 10.000 jaar. Er zijn dus meerdere situaties die dezelfde kans op voorkomen hebben. In dit onderzoek is gekeken naar een waterhoogte die varieert tussen -0,5m +NAP en 1,5m +NAP. Met tussenstappen van 0,5m resulteert dat in 5 scenario's.

Hydra-NL geeft, na invoeren van de dijkinformatie en de gewenste terugkeertijd, de waterhoogte en golfcondities. Hydra-NL berekent dit op basis van gebied-specifieke informatie en statistiek. De gebied-specifieke informatie wordt aangeleverd als database van waterstanden en golven.

De 'waterstanden en golvendatabase' is beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat en bevat informatie over enkele uitvoerpunten in het Markermeer en IJmeer. Deze database wordt ingeladen in Hydra-NL waarna een locatie binnen dit gebied kan worden gekozen. De beschikbare uitvoerpunten zijn weergegeven als rondjes in Figuur 11. De locatie die is gekozen voor dit onderzoek is aangegeven met een geel rondje.



Figuur 11: Hydra-NL interface (Rijkswaterstaat, 2019)

De gebruiker voert de dijkinformatie in zoals bepaald in paragraaf 3.1.1. Deze kunnen worden ingevoerd als dijkprofiel waarmee Hydra-NL rekent. Verder is het nog belangrijk wat de oriëntatie van de dijk is. Dit is van belang voor de golfval. Afhankelijk van het bekledingstype heeft de golfvalshoek invloed op de significante golfhoogte. Dit is in dit geval een factor die gelijk is aan de cosinus van de invalshoek (Duits, 2019). Omdat het onderzoeken van de invloed van deze parameters buiten de scope van dit onderzoek valt is in dit onderzoek voor de basisinstelling gekozen. De gekozen bekleding heeft voor elke variabele de waarde 1. De invloed van deze variabelen is weergegeven in Bijlage B: Eigenschappen bekledingstype.

3.1.2.b. Golfcorrectie

De duin zal zich bevinden aan het IJmeer. Omdat er in het IJmeer sprake is van ondiep water is er gekeken naar de maximale significante golfhoogte in het projectgebied. Uit onderzoek van Klein-Breteler is gebleken dat er een verhouding is tussen de 'maximale significante golfhoogte op ondiep water' en de 'maatgevende waterdiepte' (Caires, 2012). De maximale significante golfhoogte is namelijk 0,532 keer de maatgevende waterdiepte. De vergelijking is weergegeven in Vergelijking 3.

Vergelijking 3: Maximale significante golfhoogte (Caires, 2012)

$$H_{s,max} = 0,532 * (-3,5 + h_A)$$

Hierin is:

$H_{s,max}$ = Maximale significante golfhoogte

h_A = Waterhoogte

3.1.2.c. Stormopbouw

De maatgevende hydraulische belasting is bepaald met behulp van Hydra-NL. Naast de hydraulische belasting is tevens de stormduur en stormopbouw belangrijk. Net als in de werkelijkheid zal in dit onderzoek een storm geleidelijk opbouwen tot zijn maximale kracht om vervolgens weer geleidelijk af te zwakken. In een leidraad voor de toetsing van veiligheid van regionale waterkeringen van STOWA (2015) is beschreven hoe die stormopbouw vormgegeven kan worden.

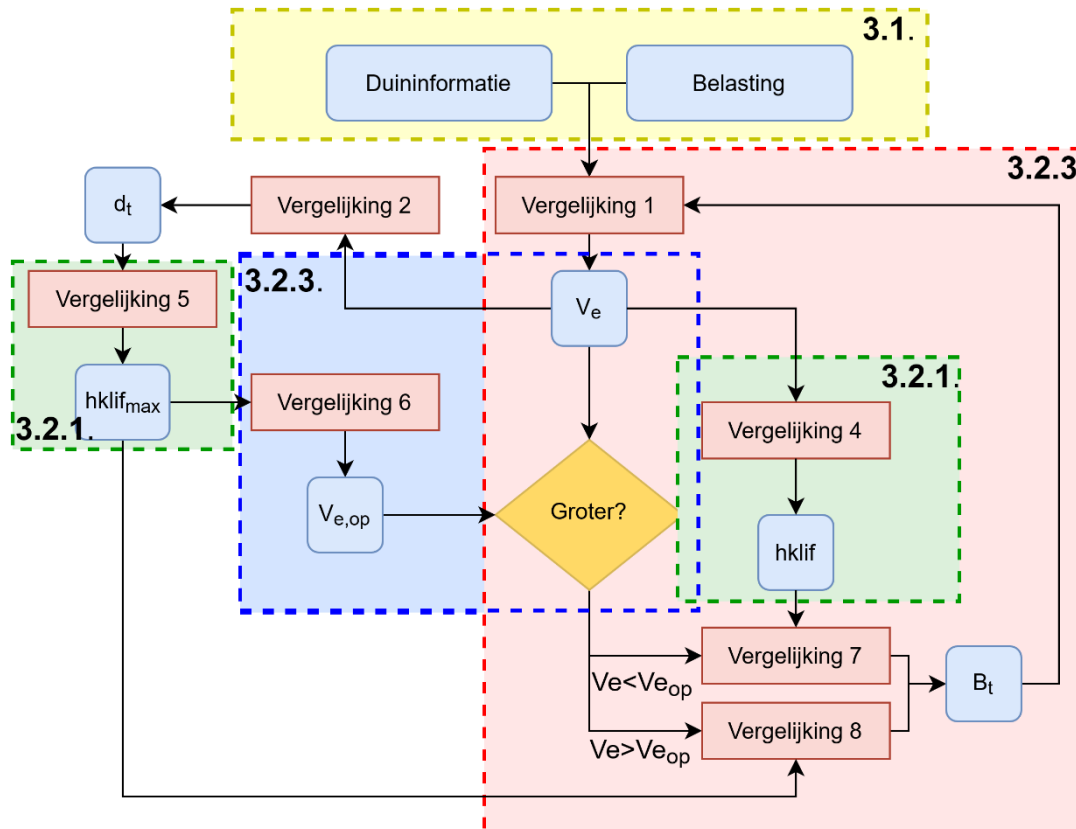
Vanwege het regionale karakter van stormen en de opbouw hiervan wordt beschreven dat een stormduur van 48 uur een veilige waar is. Het volgende verloop zou van toepassing zijn in deze 48 uur (STOWA, 2015):

- 0 tot 23 uur: Van nihil tot maatgevende hoge windsnelheid
- 23 tot 25 uur: Constante windsnelheid aan maatgevende windsnelheid
- 25 tot 48 uur: Afname windsnelheid van maatgevend hoge windsnelheid tot nihil

Als beginwaarde van de storm is met een golfhoogte van 0,5m gerekend. Deze waarde is gebaseerd op de golfcondities uit Hydra-NL bij de laagste herhalingstijd die berekend kan worden (10 jaar). Ook blijkt uit metingen van Rijkswaterstaat dat de golfhoogte op het IJsselmeer en Markermeer, de naastgelegen meren, gemiddeld ongeveer 40 centimeter is en bij krachtige wind oplopen tot 60 cm (Rijkswaterstaat, 2020).

3.2. Hoeveel erosie treedt op in een duin in de omgeving van Almere Duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar?

Met behulp van de duininformatie en de hydraulische belasting kan het erosievolume worden bepaald. Met de vergelijking voor het erosievolume wordt per tijdstap een erosievolume bepaald. De som van deze volumes is het totale erosievolume tot op dat tijdstip. De uitkomsten van die berekeningen zijn benodigd bij de volgende tijdstap. In Figuur 12 is de samenhang van berekeningen afgebeeld. De individuele berekening zijn uitgebreider uitgelegd in de paragrafen 3.2.1 tot en met 3.2.4.

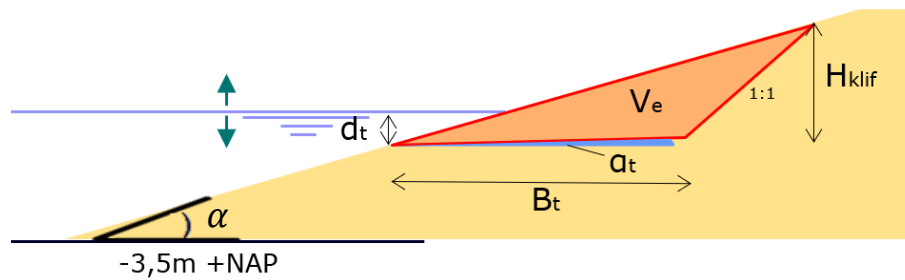


Figuur 12: Samenhang van berekeningen

Het is bekend dat de terrasbreedte op tijdstip 0, 0 is. Door dit in te vullen in vergelijking 1, kan een eerste erosievolume worden bepaald. Vervolgens kan op basis van dat erosievolume, de diepte van het terras worden berekend. De terrasdiepte kan worden berekend met vergelijking 2. Op basis van het eerste erosievolume en de diepte van het terras kan het erosieprofiel bepaald worden. De klifhoogte en de breedte van het terras kunnen van het erosieprofiel worden afgeleid. Deze waarden worden vervolgens weer meegenomen in de volgende tijdstap. Deze cyclus herhaalt zich tot het einde van de storm. Het uiteindelijke resultaat is een totaal erosievolume en de dimensies van het bijbehorende erosieprofiel.

3.2.1. De klifhoogte

Het erosieprofiel en de benodigde parameters voor de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 13. Hier is onder andere te zien dat de klif een helling van 1:1 heeft. Dit is informatie die uit het onderzoek van Deltares (2014) is overgenomen. Voor de berekening van de klifhoogte wordt het eerder berekende erosievolume en de diepte van het terras gebruikt. Met de gegevens en beschikbare vergelijkingen, kan niet elke onbekende in dit figuur opgelost worden. Hiervoor is één onbekende te veel.



Figuur 13: Het erosieprofiel met de benodigde parameters

Bekend is dat α_t de helling van het terras - naar mate het erosieproces vordert steeds kleiner wordt (Deltares, 2014). Omwille van verdere berekeningen wordt daarom aangenomen dat α_t nul is.

Aanname: $\alpha_t = 0$

Deze aanname maakt het mogelijk vergelijkingen op te stellen voor de hoogte van de klif en de breedte van het terras. Vergelijking 4 beschrijft de hoogte van de klif, uitgedrukt in het erosievolume en de gemiddelde helling van het buitentalud. De opbouw van deze vergelijkingen is beschreven in Bijlage C: Berekening erosiebreedte.

Vergelijking 4: Hoogte van de klif

$$H_{klif} = \sqrt{\sqrt{2} * V_e * \tan(\alpha)}$$

Hierin is:

- H_{klif} = De hoogte van de klif [m]
- V_e = Erosievolume per strekkende meter duin [m^3/m]
- α = Gemiddelde hoek buitentalud [$^\circ$]

Wel dient er rekening te worden gehouden met de maximale waarde voor de hoogte van de klif, deze kan namelijk niet groter worden dan het verschil tussen de bodem van het terras en de hoogte van de kruin. Dit verschil is afhankelijk van de waterhoogte en verschilt dus per situatie. De maximale klifhoogte is uitgedrukt in Vergelijking 5. Wanneer de maximale klifhoogte is bereikt zal deze constant blijven.

Vergelijking 5: Maximale klifhoogte

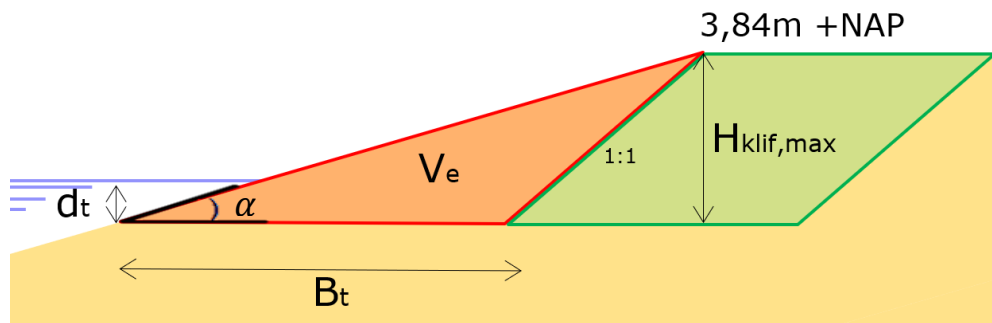
$$H_{klif,max} = H_{kruin} - H_0 + d_t$$

Hierin is:

- $H_{klif,max}$ = De maximale hoogte van de klif [m]
- H_{kruin} = De kruinhoogte [m + NAP]
- H_0 = De waterhoogte [m + NAP]
- d_t = Terrasdiepte [m]

3.2.2. Verschillende fases

Wanneer het oplopende deel is geërodeerd blijft de hoogte van de duin gelijk. Dit is wanneer de maximale kruinhoogte is bereikt. Vanaf dit punt moet de formule voor de terrasbreedte worden aangepast. In plaats van dat het erosieprofiel als driehoek verder erodeert, zal vanaf dit punt in iedere tijdstap het erosieprofiel verder groeien in de vorm van een parallellogram. De reden hiervoor is dat de helling van de klif 1:1 blijft. Dit proces is weergegeven in Figuur 14 (volgende pagina).



Figuur 14: Erosieprofiel na buitenkruin

Het erosievolume dat dit punt aangeeft kan berekend worden met behulp van Vergelijking 6.

Vergelijking 6: Erosievolume van het oplopende deel

$$V_{e,op} = \frac{\left(\frac{H_{\text{klif,max}}}{\tan(\alpha)}\right) * H_{\text{klif,max}}}{2} - \left(\frac{H_{\text{klif,max}}^2}{2}\right)$$

Hierin is:

$V_{e,op}$ = Erosievolume van het oplopende deel per strekkende meter duin [m^3/m]

α = Gemiddelde hoek van het buitentalud [$^\circ$]

$H_{\text{klif,max}}$ = De maximale hoogte van de klif [m]

3.2.3. De breedte van het terras

Met behulp van de hoogte van de klif kan de breedte van het terras worden berekend. Zoals in paragraaf 3.2.2. beschreven is, zijn er 2 verschillende vergelijkingen voor de breedte van het terras. Zolang het berekende erosievolume kleiner is dan het erosievolume van het oplopende deel, geldt Vergelijking 7.

Vergelijking 7: Terrasbreedte erosieprofiel voor het oplopende deel

$$B_{T,1} = \sqrt{2} * H_{\text{klif}} * \cos(\alpha) - H_{\text{klif}}$$

Hierin is:

$B_{T,1}$ = Terrasbreedte erosieprofiel (oplopende deel)[m]

α = Gemiddelde hoek buitentalud [$^\circ$]

H_{klif} = De hoogte van de klif [m]

Wanneer dit erosievolume is bereikt zal de vergelijking van de terrasbreedte ook worden aangepast. Vergelijking 8 is de vergelijking die vanaf dit punt gebruikt dient te worden.

Vergelijking 8: Terrasbreedte erosieprofiel na het oplopende deel

$$B_{T,2} = (\sqrt{2} * H_{\text{klif}} * \cos(\alpha) - H_{\text{klif}}) + \left(\frac{(V_e - V_{e,\text{oplopend}})}{H_{\text{klif,max}}}\right)$$

Hierin is:

$B_{T,2}$ = Terrasbreedte erosieprofiel [m]

α = Gemiddelde hoek van het buitentalud [$^\circ$]

H_{klif} = De hoogte van de klif [m]

V_e = Erosievolume per strekkende meter duin [m^3/m]

$V_{e,\text{oplopend}}$ = Erosievolume van het oplopende deel per strekkende meter duin [m^3/m]

$H_{\text{klif,max}}$ = De maximale hoogte van de klif [m]

De berekende breedte van het terras kan vervolgens weer ingevuld worden in vergelijking 1. Het doorlopen van deze berekeningen voor alle tijdstappen, zal met de bijbehorende hydraulische belastingen een totaal erosieprofiel schetsen. Dit erosieprofiel komt dan overeen met een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar.

3.2.4. De erosie landinwaarts

De berekende breedte van het terras is de afstand vanaf het aangrijppunt. Het aangrijppunt is het punt waar de erosie begint aan de buitenzijde van de duin. Omdat dit punt buiten de duin ligt kan het een vertekend beeld geven over de erosiebreedte. Met Vergelijking 9 kan de afstand van het aangrijppunt tot de buitenkruin worden berekend.

Vergelijking 9: Afstand tot de buitenkruin

$$s = \frac{H_{klif,max}}{\tan(\alpha)}$$

Hierin is:

- s = De afstand tot de buitenkruin [m]
 $H_{klif,max}$ = De maximale hoogte van de klif [m]
 α = Gemiddelde hoek van het buitentalud [°]

De erosiebreedte vanaf de buitenkruin kan vervolgens worden berekend doormiddel van Vergelijking 10.

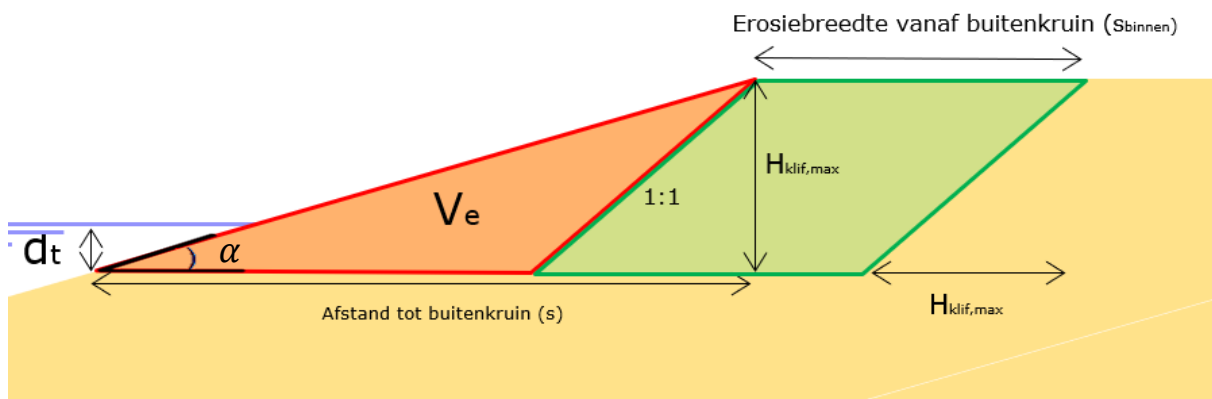
Vergelijking 10: Erosie vanaf de buitenkruin

$$s_{binnen} = B_{T,2} - s + H_{klif,max}$$

Hierin is:

- s_{binnen} = Erosiebreedte vanaf de buitenkruin
 $B_{T,2}$ = Terrasbreedte erosieprofiel [m]
 $H_{klif,max}$ = De maximale hoogte van de klif [m]
 s = De afstand tot de buitenkruin [m]

Deze formules maken duidelijk hoever de duin zal eroderen achter de buitenkruin. Het uitdrukken van de erosiebreedte ten opzichte van de buitenkruinlijn is van toegevoegde waarde omdat de buitenkruinlijn in de dwarsprofielen van het waterschap als referentielijn wordt beschouwd. In Figuur 15 is de verhouding tussen de erosiebreedtes afgebeeld.



Figuur 15: Erosieprofiel na buitenkruin

4. Resultaten

Met behulp van de eerder bepaalde parameters en vergelijkingen is een erosievolume en zijn de dimensies van het bijbehorende erosieprofiel berekend. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor vijf verschillende waterhoogtes. De resultaten van deze berekeningen zijn aan de hand van de deelvragen gepresenteerd.

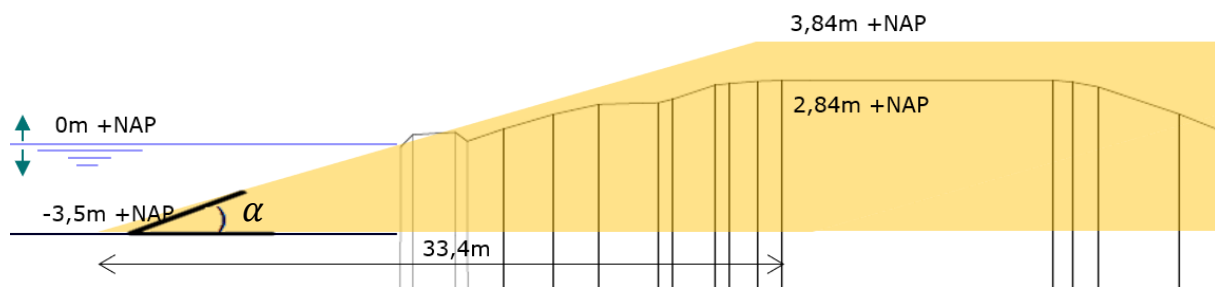
4.1. Welke omgevingsparameters zijn van belang voor een erosiemodel in het projectgebied Almere Duin?

De omgevingsparameters zijn onderzocht aan de hand van de deelvragen en zijn aan de hand van deze deelvragen gepresenteerd.

4.1.1. Welke parameters van de duin zijn benodigd om deze te schematiseren in het erosiemodel?

De parameters van de duin die van belang zijn voor het model, zijn de hoogte van de kruin en de helling van het buitentalud. Door de omgeving te bestuderen en plannen voor de toekomstige duin zijn deze parameters vastgesteld.

De kruinhoogte van de huidige dijk is 2,84m +NAP (Waterschap Zuiderzeeland, 2009). In combinatie met de zandlaag van 1 meter die geplaatst zal worden, resulteert dit in een kruinhoogte van de duin van 3,84m +NAP. De minimale helling waarvoor het erosiemodel is gekalibreerd is 1:4,55. Door deze gegevens te combineren met de huidige dijk is een theoretische duin ontworpen. Deze is in het geel geschetst in Figuur 16: Ontwerp theoretische duin. De theoretische duin is over de bestaande dijk getekend.



Figuur 16: Ontwerp theoretische duin

De parameters, gebaseerd op deze theoretische duin, zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Duin parameters

Parameter	Waarde	Eenheid
Kruinhoogte (H_{kruin})	3,84	m
Gemiddelde hoek van het buitentalud (α)	$\tan^{-1}(0,22)$	-

4.1.2. Wat is de hydraulische belasting tijdens een storm met een kans van 1/10.000 per jaar in het projectgebied Almere Duin?

De hydraulische belasting, zoals deze is berekend met Hydra-NL, is te vinden in Tabel 2. Deze resultaten zijn op basis van de ingevoerde database en duinparameters. In deze tabel is te zien hoe de significante golfhoogte (H_s) varieert per waterhoogte. Omdat de kans op een waterstand van -0,5m +NAP groter is dan een waterhoogte van 0m +NAP is de verwachte golfhoogte lager. De kans op een waterstand van 1,5m +NAP is zodanig klein dat deze de ondergrens al overschrijdt, daarom is bij een waterhoogte van 1,5m +NAP geen golfhoogte gegeven.

Tabel 2: Hydraulische belastingen

Situatie	Waterhoogte [m +NAP]	Bekleding [-]	Terugkeertijd [jaar]	Significante Golfhoogte Hydra-NL (Hs) [m]
1	-0,5	Steenzetting Blokken	10000	1,16
2	0	Steenzetting Blokken	10000	1,23
3	0,5	Steenzetting Blokken	10000	1,22
4	1	Steenzetting Blokken	10000	1,16
5	1,5	Steenzetting Blokken	10000	-

In Bijlage D: Hydraulische belasting zijn de volledige hydraulische belastingen uit Hydra-NL weergegeven. Uit deze tabel is ook de piekperiode belangrijk. Deze parameter is benodigd voor vergelijking 1, het erosievolume.

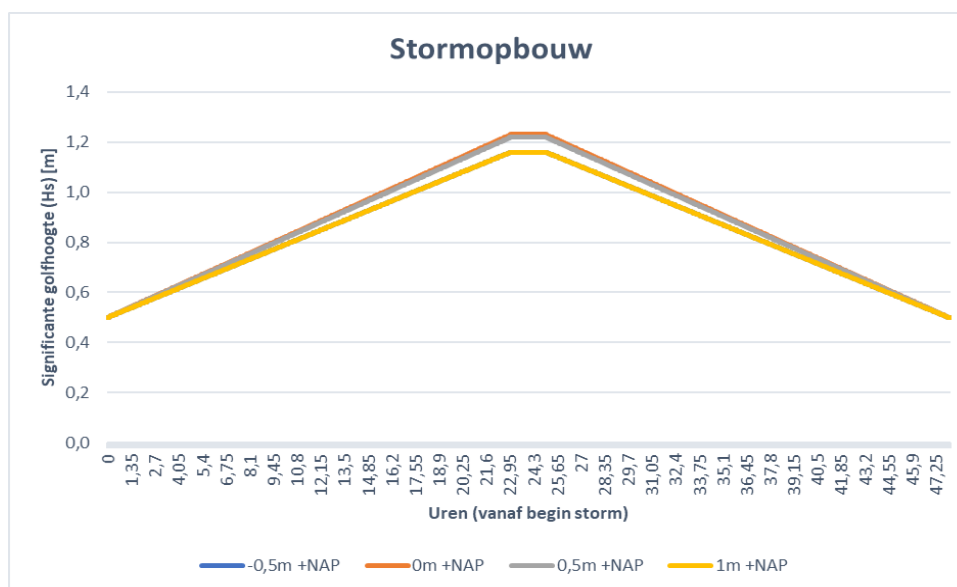
De maximale significante golfhoogte is berekend met behulp van de bodemdiepte in het IJmeer. De bodemdiepte is vastgesteld op 3,5m onder NAP. Hoe deze diepte is vastgesteld is in Bijlage E: Bodemdiepte IJmeer te vinden. In Tabel 3 is de maximale significante golfhoogte bij alle vijf waterhoogtes weergegeven. Deze waarde is in elke situatie groter dan de waarde uit Hydra-NL. Dit betekent dat de waarden uit Hydra-NL niet gecorrigeerd hoeven worden vanwege ondiep water. In verdere berekeningen zijn daarom de waarden uit Hydra-NL gebruikt.

Tabel 3: Correctie significante golfhoogte

Situatie	Waterhoogte [m +NAP]	Significante Golfhoogte Hydra-NL (Hs) [m]	Maximale significante Golfhoogte (Hs,max) [m]
1	-0,5	1,16	1,6
2	0	1,23	1,86
3	0,5	1,22	2,13
4	1	1,16	2,39
5	1,5	-	2,93

4.1.3. Stormopbouw

Het verloop van de storm bestaat uit een lineaire stijging van de minimale golfhoogte van 50 centimeter, naar de significante golfhoogte, over een periode van 23 uur. Deze golfhoogte houdt 2 uur aan, voordat deze weer lineair afzwakt tot de minimale golfhoogte. De golfhoogte is voor elke situatie, dus per waterhoogte, weergegeven in Figuur 17. Met behulp van de significante golfhoogtes is een stormopbouw gecreëerd. De significante golfhoogte is voor iedere 3 minuten (0,05 uur) bepaald.

**Figuur 17: stormopbouw per waterhoogte**

4.2. Hoeveel erosie treedt op in een duin in de omgeving van Almere Duin door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar?

Door de hydraulische randvoorwaarden in te vullen voor de gehele stormduur, zijn voor elke waterhoogte de erosievolumes en breedtes van het terras bepaald. De resultaten van de totale erosie zijn uitgewerkt aan de hand van de paragrafen uit de methode.

4.2.1. Klifhoogte

De klifhoogte is per tijdstap berekend varieert gedurende de storm. In Tabel 4 zijn de maximale klifhoogtes weergegeven per waterhoogte. De maximale klifhoogte is berekend aan de hand van de waterhoogte in de situatie, maximale terrasdiepte en de kruinhoogte.

Tabel 4: De maximale klifhoogte

Waterhoogte [m +NAP]	Kruinhoogte [m]	Maximale diepte terras [m]	Maximale Klifhoogte [m]
-0,5	3,84	2,32	6,66
0	3,84	2,46	6,30
0,5	3,84	2,44	5,78
1	3,84	2,32	5,16

4.2.2. Verschillende fases

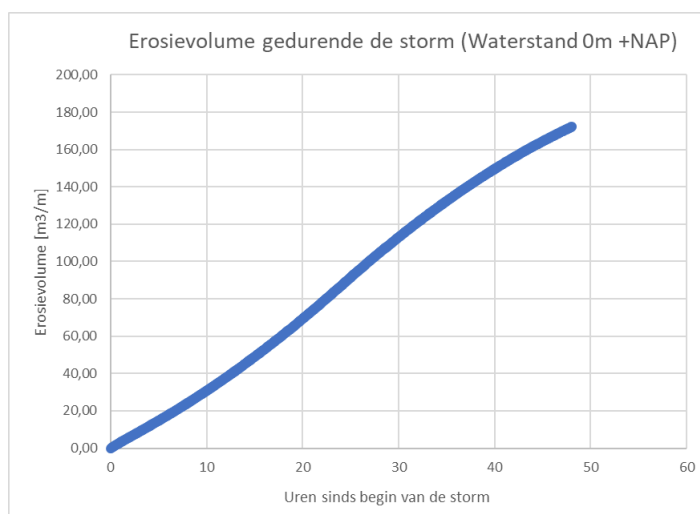
Wanneer het erosievolume groter is dan het olopende deel, verandert de vergelijking voor het bepalen van de breedte van het terras. Daarom is voor elke situatie dit erosievolume bepaald. Dit erosievolume is bepaald aan de hand van de gemiddelde hoek van het buitentalud en de maximale klifhoogte. Het erosievolume van het olopende deel is weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Erosievolume van het olopende deel

Waterhoogte [m +NAP]	Gemiddelde hoek [°]	Maximale Klifhoogte [m]	Erosievolume olopend [m ³]
-0,5	0,22	6,66	80,2
0	0,22	6,30	71,8
0,5	0,22	5,78	60,4
1	0,22	5,16	48,2

4.2.3. Breedte van het terras

Nadat alle tijdstappen zijn doorlopen is het totale erosievolume bepaald. Dit is gelijk aan de som van alle tussenstappen. Het verloop van het erosievolume gedurende de storm is afgebeeld in Figuur 18. In dit figuur is te zien dat de toename van het erosievolume groter is naarmate de hydraulische belasting groter is. Dit is in lijn met de verwachtingen volgens het model.



Figuur 18: Erosievolume gedurende de storm (Waterstand 0m +NAP)

Het totale erosievolume is weergegeven in Tabel 6. Ook zijn hier de bijbehorende breedtes van het terras te lezen. De breedte van het terras is berekend met Vergelijking 8.

Tabel 6: Terrasbreedte erosieprofiel

Waterhoogte [m +NAP]	Totaal erosievolume [m^3/m]	Terrasbreedte erosieprofiel [m]
-0,5	167	49,1
0	174	50,4
0,5	140	45,2
1	124	42,6

4.2.4. Erosie landinwaarts

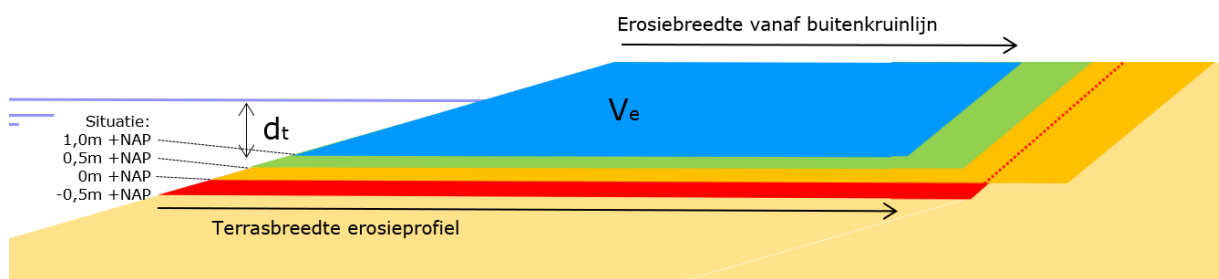
Op basis van de bovenstaande gegevens kan erosieprofiel in kaart worden gebracht. Voor de erosie landinwaarts zijn de erosiebreedte, gemiddelde hoek van het buitentalud en de afstand tot het aangrijppunt benodigd. De afstand tot het aangrijppunt is weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7: Afstand tot de buitenkruin

Waterhoogte [m +NAP]	Gemiddelde hoek buitentalud [$^{\circ}$]	Maximale Klifhoogte [m]	Afstand tot de buitenkruin [m]	Erosiebreedte vanaf buitenkruin [m]
-0,5	0,22	6,66	30,8	25,0
0	0,22	6,30	29,1	27,6
0,5	0,22	5,78	26,7	24,3
1	0,22	5,16	23,8	24,0

4.2.5. Eindresultaten

het erosievolume varieert tussen de 124 en 174 m^3/m bij de verschillende waterhoogtes. De erosiebreedte vanaf de buitenkruinlijn varieert tussen 24,0 en 27,6 meter, wat de afstand landinwaarts is. In Figuur 19 zijn de resultaten van alle situaties weergegeven. In Tabel 8 zijn de bijbehorende waarden te zien.



Figuur 19: Weergave erosieprofielen (niet op schaal)

Tabel 8: Eindresultaten per waterhoogte

Waterhoogte [m +NAP]	Erosievolume [m^3/m]	Diepte van het terras [m]	Terrasbreedte [m]	Erosiebreedte vanaf buitenkruin [m]
-0,5	167	2,32	49,1	25,0
0	174	2,46	50,4	27,6
0,5	140	2,44	45,2	24,3
1,0	124	2,32	42,6	24,0

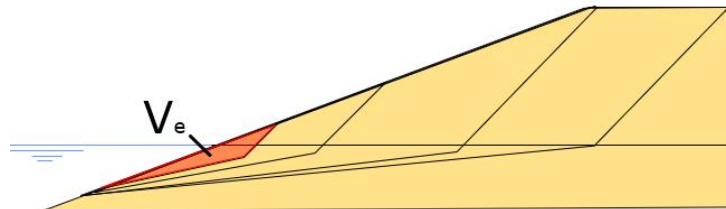
5. Discussie

In dit onderzoek zijn een erosievolume en erosiebreedte bepaald om de erosie van een duin in Almere Duin in kaart te brengen. De resultaten geven aan dat er een erosiebreedte tussen 24,0 en 27,6 meter ten opzichte van de buitenkruinlijn is. Volgens huidige plannen in het projectgebied zullen op 25 meter van de buitenkruinlijn woningen gebouwd worden.

Dit onderzoek is gedaan naar een theoretische situatie en kan daarom niet getoetst worden, de verkregen waarden tijdens dit onderzoek dienen daarom met enige bedachtzaamheid geïnterpreteerd te worden. Vanwege de unieke situatie is in dit onderzoek geprobeerd het model en de berekeningen zo dicht mogelijk bij deze situatie te brengen. Dit proces gaat samen met aannames en beperkingen. De aannames en beperkingen die in dit onderzoek van toepassing zijn zullen in dit hoofdstuk besproken en toegelicht worden.

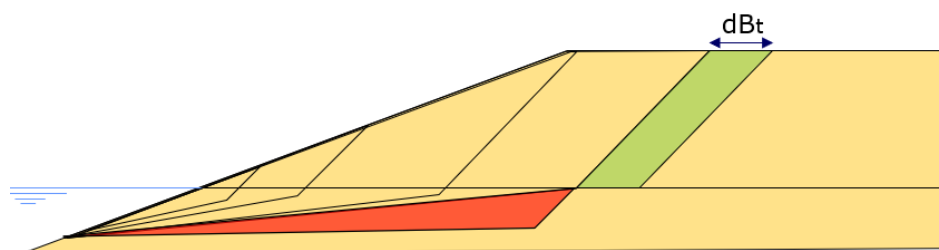
5.1. Aanname α_t

In dit onderzoek is aangenomen dat α_t gelijk is aan 0. Dit is aangenomen om verdere berekeningen aan het erosieprofiel te maken. De helling van het erosie terras is normaliter steil in het begin van het erosieproces en neemt naarmate het erosieproces verder af. Aan het einde van het erosieproces, wanneer de dijk of duin is doorgebroken, is volgens het erosiemodel van Deltares (2014) de diepte van de klif gelijk aan de waterhoogte. Dit is geïllustreerd in Figuur 20.



Figuur 20: Erosieprofielen in de duin

Het erosieprofiel uit Figuur 20 is minder breed dan het erosieprofiel dat is berekend in dit onderzoek. Dat verschil heeft invloed op het eindresultaat. Bij een grotere hoek van het terras, hetzelfde erosievolume en een gelijke maximale kruinhoogte, zal de erosiebreedte toenemen. Als indicatie voor dit verschil is het erosievolume van de rode driehoek in Figuur 21 berekend. Deze driehoek heeft als basis de totale erosiebreedte en als hoek α_t . Dit erosievolume zal, mits de overige parameters hetzelfde blijven, verder landinwaarts eroderen, dit is weergegeven als groen vierkant aan de rechterzijde in Figuur 21.



Figuur 21: Correctie helling terras (rood) met extra erosiebreedte (dBt)

Het erosievolume van de rode driehoek is per situatie weergegeven in Tabel 9. De bijbehorende extra erosiebreedte is ook in deze tabel te zien. De berekeningen zijn te vinden in Bijlage G: Aannames.

Tabel 9: Correctie helling terras

Waterhoogte [m +NAP]	Erosievolume [m ³ /m]	Extra erosiebreedte [m]
-0,5	57,0	14,8
0	61,9	16,1
0,5	55,1	14,4
1	49,4	12,9

Uit deze berekeningen blijkt dat de berekende erosiebreedte waarschijnlijk kleiner is dan deze in werkelijkheid zal zijn. Op basis van de indicatie in deze paragraaf zou de erosiebreedte tot 30% groter kunnen zijn, wanneer deze vergeleken wordt met de totale breedte van het terras.

5.2. Model factors

In het erosiemodel wordt gebruik gemaakt van model factors. Deze zijn bedoeld om berekeningen te kalibreren naar de toegepaste situatie. In dit onderzoek zijn twee van deze model factors benodigd. Namelijk, 'de model factor voor de erosiesnelheid van het zand' en 'de model factor voor de terrasdiepte'. Respectievelijk CM2 en CM3. In voorbeelden, die aan het einde van het rapport van Deltares (2014) worden uitgelicht, is de gemiddelde waardes van deze parameters te vinden. Ook is er een onzekerheid aangegeven doormiddel van de standaard deviatie. De gemiddelde waarde en de standaard deviatie van deze model factors is te vinden in Tabel 10.

Tabel 10: Model factors

<i>Model Factor</i>	<i>Gemiddelde waarde (μ)</i>	<i>Standaard deviatie (σ)</i>
<i>CM 2</i>	1	0,19
<i>CM 3</i>	1	0,15

Omdat dit onderzoek is uitgevoerd op een theoretische situatie en de uitkomsten niet gekalibreerd kunnen worden, zijn voor beide factoren de gemiddelde waarden gebruikt. Dit betekent dat de waarden uit dit verslag nog gekalibreerd moeten worden. Het is echter onbekend of de berekende waarden uit dit verslag naar boven of naar beneden gecorrigeerd moeten worden. Het aanhouden van de gemiddelde waarde voor deze model factors heeft daarom geen directe invloed op de resultaten van dit onderzoek.

5.3. Kans van 1/10.000 per jaar

In dit rapport is gerekend met een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar vanwege de waterwet. Ter indicatie is ook gekeken naar het erosievolume en de terrasbreedte bij een hydraulische belasting met een kans van 1/100, 1/50, 1/25 en 1/10 per jaar. Deze berekeningen zijn op dezelfde manier uitgevoerd als voor de situatie met een 1/10.000 kans. In plaats van deze berekeningen uit te voeren voor 5 verschillende waterstanden, is per herhalingstijd een significante golfhoogte berekend bij een waterstand van 0m +NAP. Deze waterstand resulteerde bij een herhalingstijd van 10.000 jaar de grootste hydraulische belasting.

De resultaten voor deze herhalingstijden zijn te vinden in Tabel 11. Uit deze data blijkt dat ook bij lagere hydraulische belastingen de duin al aanzienlijk erodeert. De hoge erosie bij hydraulische randvoorwaarden bij een grotere kans op voorkomen tonen aan dat een duin niet erosiebestendig is.

Tabel 11: Erosiebreedte bij lagere hydraulische belastingen

<i>Kans</i>	<i>Waterhoogte [m +NAP]</i>	<i>Significante golfhoogte [m]</i>	<i>Erosievolume [m³/m]</i>	<i>Terrasbreedte [m]</i>	<i>Erosiebreedte vanaf buitenkruijn [m]</i>
1/10	0	0,66	50	21,9	3,2
1/25	0	0,74	62	26,5	7,8
1/50	0	0,79	71	29,9	11,3
1/100	0	0,85	81	33,5	14,9
1/10.000	0	1,23	174	50,4	27,6

5.4. Duinhoogte

In dit rapport is uitgegaan van een zandlaag van 1 meter bovenop de dijk. Dit zou bescherming moeten dienen voor de dijk zonder het uitzicht vanaf het achterland te veel te verstoren. In werkelijkheid zijn hier nog geen concrete plannen voor. Een verhoging van de duin zou de totale erosiebreedte terug kunnen dringen.

Ook is in dit onderzoek aangenomen dat de duinhoogte gelijk blijft aan de binnenzijde van de duin. Door deze aanname is een eenvoudigere berekening van de erosiebreedte mogelijk. Wanneer een echte duin geplaatst zal worden is de hoogte van de duin in het achterland afhankelijk

van bebouwing en plannen in dit gebied. Een verlaging van het duin in het achterland zorgt voor een kleiner volume zand dat kan weg eroderen, hierdoor wordt de erosiebreedte groter.

5.5. **Strand**

In huidige plannen van het waterschap en de gemeente Almere wordt gesproken over een strand dat voor de duin zal liggen. Vanwege de onzekerheid van deze plannen is dit strand niet meegenomen in de berekeningen. Uit de vergelijkingen van het erosiemodel blijkt wel dat een vlakkere helling van het voorland grote invloed heeft op het erosievolume. Een strand zou golven afzwakken, voor een groter volume van de duin zorgen en dus de erosiebreedte vanaf de buitenkruinlijn verkleinen. De exacte invloed hiervan is niet onderzocht.

6. Conclusie

In de vorige hoofdstukken is een kwantitatief antwoord gegeven op de hoofd en deelvragen, op basis daarvan kan het onderzoeksdoel beantwoord worden. Het doel van dit onderzoek is in kaart brengen of de dijk in Almere Duin vervangen kan worden door een duin.

Met behulp van de belangrijke parameters van de duin, namelijk de gemiddelde helling van het buitentalud en de kruinhoogte, is een theoretische duin ontworpen. De invloed van een hydraulische belasting, die overeenkomt met de gevolgen van een storm met een kans van 1/10.000 per jaar, is vervolgens getest. Deze hydraulische belasting is bepaald door locatie specifieke informatie in Hydra-NL in te voeren. In de omgeving kunnen significante golfhoogtes verwacht worden tussen 1,16m en 1,23m, afhankelijk van de waterhoogte op dat moment.

De invloed van de hydraulische belasting op de duin is bepaald met behulp van een gevoeligheidsanalyse van Deltares (2014) naar de reststerkte van dijken na het falen van bekleding. Met deze analyse is een erosievolume en erosiebreedte bepaald voor verschillende combinaties van waterstanden en bijbehorende golfcondities. Uit de berekeningen van dit onderzoek blijkt dat door een hydraulische belasting met een kans van 1/10.000 per jaar, de erosiebreedte vanaf de buitenkruin varieert tussen 24,0 en 27,6 meter. Deze waarden horen bij een erosievolume dat varieert tussen 124 en 174 kubieke meter per strekkende meter duin.

De omvang van het erosievolume en de bijbehorende erosiebreedte van de theoretische duin geven het belang van een dijk als waterkering aan. Wanneer de waterkering enkel een duin zou zijn, zou de duin tot ver in het binnenland eroderen. Dit creëert een onveilige situatie, onder andere vanwege de bebouwing op 25 meter afstand van de buitenkruinlijn. De huidige dijk moet daarom als belangrijkste onderdeel van de waterkering gezien blijven worden.

7. Aanbevelingen

De resultaten uit dit onderzoek duiden op een hoog erosievolume van een duin in de omgeving Almere Duin. Dit is een ongunstig resultaat wat betreft de vraag of de dijk in de toekomst te vervangen is door een duin. Op basis van de resultaten uit dit onderzoek is het advies om het belang van de dijk te benadrukken in het project Almere Duin en deze ook niet te vergeten in de toekomst.

Het duin heeft niet genoeg sterkte om het totale benodigde erosievolume op te vangen. De zandlaag over de dijk zou echter wel versterking kunnen bieden aan de huidige dijk, bijvoorbeeld in de vorm als extra buffer tegen erosie. Indien het waterschap geïnteresseerd is in vervolgonderzoek is het advies te oriënteren op de mogelijkheden van een strand voor de duin. Op basis van dit onderzoek lijkt het het eenvoudigst op die manier extra sterkte te creëren. Het strand creëert een grote erosiebuffer. Ook wordt de gemiddelde helling van het buitentalud omlaag gebracht, dit zal het erosievolume ook omlaag brengen. Deze aanpak lijkt op de enigszins vergelijkbare projecten zoals die benoemd zijn in de achtergrond van dit rapport.

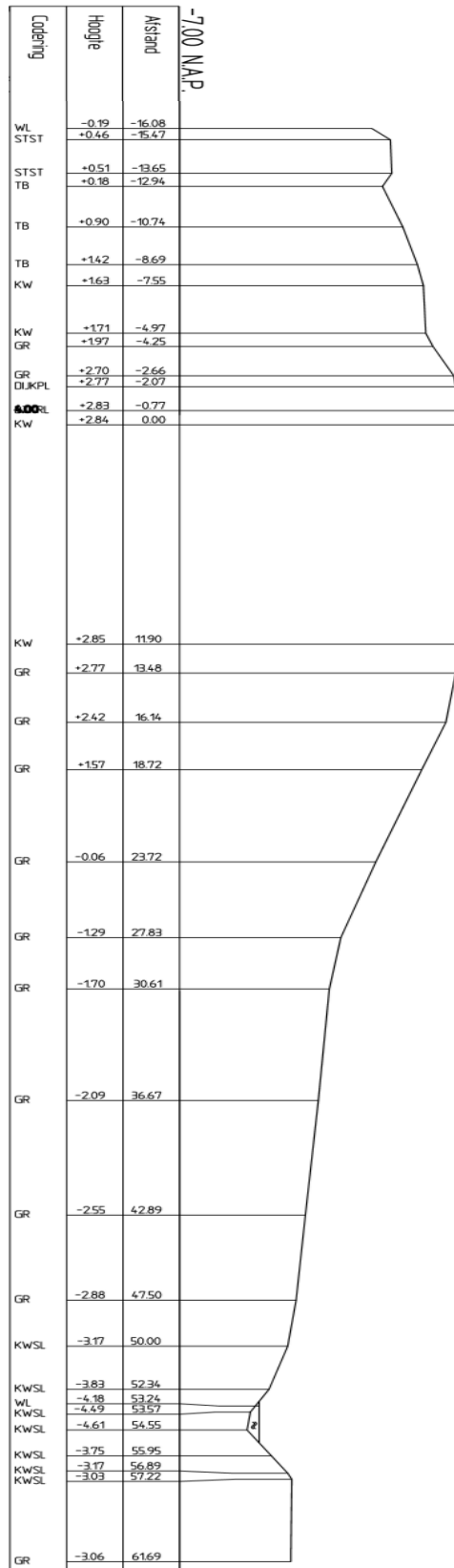
8. Literatuurlijst

- AMVEST. (2020). *Duin*. Opgehaald van Projecten: <https://www.amvest.nl/projecten/duin/>
- Caires, S. (2012). *Maximale significante golfhoogte op ondiep water*. Deltares.
- Deltares. (2014). *Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven SBW reststerkte: Analyse Deltagootproeven*. Delft: Deltares.
- DUIN. (sd). *Locatiekaart*.
- Duits, M. (2019). *Hydra-NL Gebruikershandleiding 2.7*. HKV.
- Ecoshape. (2020). *The Building with Nature philosophy*. Opgehaald van <https://www.ecoshape.org/>: <https://www.ecoshape.org/en/the-building-with-nature-philosophy/>
- Hollands Noorderkwartier. (2019). *gerealiseerd project Prins Hendrikzanddijk*. Opgehaald van hhnk: https://www.hhnk.nl/portaal/beschermen-tegen-overstroming_42380/item/gerealiseerd-project-prins-hendrikzanddijk_16789.html
- Kenniscentrum Infomil. (2020). *Primaire en niet primaire waterkeringen*. Opgehaald van Kenniscentrum Infomil: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/wetgeving/waterwet/doelstellingen/primaire-primaire/>
- Lamont-Smith, T., & Waseda, T. (2006). *Wind Wave Growth at Short Fetch*. Tokyo, Japan: Department of Environmental and Ocean Engineering, University of Tokyo.
- Ministerie van verkeer en waterstaat, Expertise Netwerk Waterkeren. (2017). *Technisch rapport: ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Den Haag: Ministerie van verkeer en waterstaat, Expertise Netwerk Waterkeren.
- Natura 2000. (2000). *Markermeer & IJmeer: Doelstellingen*. Opgehaald van Natura 2000: <http://www.natura2000.nl/gebieden/flevoland/markermeer-ijmeer>
- Rijkswaterstaat. (2018). *Het systeem van waterkeringen*. Opgehaald van Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden/zoeken-technische/@192726/typen-systeem-waterkeringen/>
- Rijkswaterstaat. (2019, november). *Hydra-NL: Probabilistisch beoordelingsprogramma voor de dijken in Nederland*. Den Haag, Zuid-Holland, Nederland.
- Rijkswaterstaat. (2020). *Doelen en resultaten*. Opgehaald van Rijkswaterstaat water: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projectenoverzicht/versterking-houtribdijk/doelen-en-resultaten.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2020). *Golven in het IJssel- en Markermeer*. Opgehaald van Rijkswaterstaat waterdata: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata-en-waterberichtgeving/waterdata/getij/golven/golven-op-het-ijsselmeer-en-markermeer.aspx>
- STOWA. (2015). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen*. STOWA, Interprovinciaal overleg, Unie van Waterschappen.
- Waterschap Zuiderzeeland. (2009, 10 01). *gemeten profielen ijmeerdijk overzicht. document 000254495*.
- Waterschap Zuiderzeeland. (2018). *Hoogtecijfers*. Lelystad, Flevoland, Nederland. Opgehaald van GeoWeb.
- Waterveiligheidsportaal. (2020). *Norm*. Opgehaald van Waterveiligheidsportaal: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>
- Waterveiligheidsportaal. (2020). *Waterveiligheidsportaal norm*. Opgehaald van Waterveiligheidsportaal: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>

Bijlagen

Bijlage A: Dijkprofiel

Figuur 22: Dijkprofiel 1.1, Hectometerpaal 4.0



Dijkprofiel 11, hectometerpaal 4.0, Waterschap documentnr. 00025495 (Waterschap Zuiderzeeland, 2009)

Bijlage B: Eigenschappen bekledingstype

De keuze van het bekledingstype beïnvloedt de hydraulische belasting. Met de vergelijkingen 11, 12 en 13. De waarden uit Tabel 12 worden ingevoerd in deze vergelijkingen. De waarden die Hydra-NL als uitvoer geeft zijn al gecorrigeerd aan de hand van deze formules. Omdat in dit onderzoek steenzetting blokken is gekozen als bekledingstype, is elke parameter 1,0.

Vergelijking 11: Significante golfhoogte correctie

$$\text{Significante golfhoogte} = \text{Golfhoogte}^a$$

Vergelijking 12: Piekperiode correctie

$$\text{Piekperiode} = \text{piekperiode}^b$$

Vergelijking 13: Factor invloed golfvalshoek

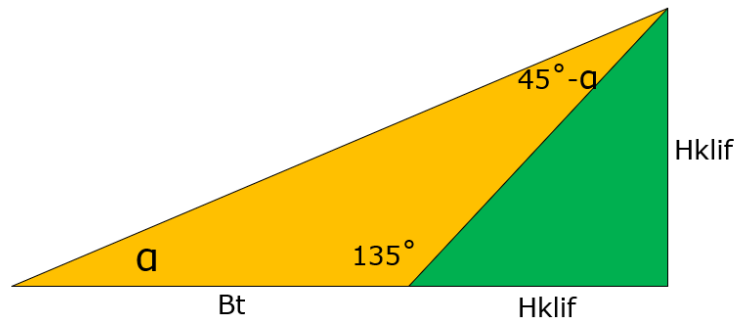
$$\text{factor invloed golfvalshoek} = \cos^c(\text{golfvalshoek})$$

Tabel 12: Parameters per bekledingstype (Duits, 2019)

Bekledingstype	a	b	c
Steenzetting betonzuilen (normale golfsteilheid)	1.0	0.4	0.8
Steenzetting betonzuilen (kleine golfsteilheid)	1.0	-0.25	0.667
Steenzetting blokken	1.0	1.0	1.0
Asfalt golfklapzone	1.0	0.0	0.0
Grasmat golfklapzone	1.0	0.67	0.0
Breuksteen (normale golfsteilheid)	1.0	0.67	1.1
Breuksteen (kleine golfsteilheid)	1.0	-0.1	1.1
Afschuiven bekleding (ondergrond klei)	1.0	0.0	0.0
Afschuiven bekleding (ondergrond zand)	0.125	1.0	0.0
Grasmat oploopzone	1.0	1.7	0.3
Grasmat golfklapzone (invloed golfvalshoek, voor ToM)	1.0	0.67	0.67

Bijlage C: Berekening erosiebreedte

In deze bijlage zijn vergelijkingen 4 tot en met 8 verder uitgewerkt. Met behulp van de bekende hoeken in Figuur 23 zijn verhoudingen tussen zijdes af te leiden. Deze verhoudingen maken het mogelijk zijden van de driehoek uit te drukken in reeds bekende parameters.



Figuur 23: Vereenvoudigd erosieprofiel

Op basis van deze gegevens is het erosie volume uitgedrukt in de zijde H_{klif} . Deze verhouding is weergegeven in Vergelijking 14. Vergelijking 14 kan vervolgens omschreven worden tot Vergelijking 15. Deze vergelijking is vervolgens om te schrijven tot Vergelijking 16, het kwadraat van Vergelijking 4 zoals deze wordt gebruikt in hoofdstuk 3.

Vergelijking 14: Erosievolume

$$Ve = 0,5 * \sqrt{2} * H_{klif} * \tan(\alpha) * \sqrt{2} * H_{klif} * \sin(135)$$

Vergelijking 15: Erosievolume

$$Ve = \frac{H_{klif} * H_{klif} * \tan(\alpha)}{\sqrt{2}}$$

Vergelijking 16: Hoogte van de klif

$$H_{klif}^2 = \sqrt{2} * Ve * \tan(\alpha)$$

Hierin is:

- H_{klif} = De hoogte van de klif [m]
- Ve = Erosievolume per strekkende meter duin [m^3/m]
- α = Gemiddelde helling buitentalud [$^\circ$]

Het maximum van H_{klif} is gelijk aan de afstand tussen de maximale diepte van het terras en de kruinhoogte. Door de hoogte van de kruin ten opzichte van de waterstand uit te drukken net als de diepte van het terras, kunnen deze waarden bij elkaar opgeteld worden. De afstand tussen de kruinhoogte en de waterhoogte kan worden berekend, door de waterhoogte in meters ten opzichte van het NAP af te trekken van de kruinhoogte in meters ten opzichte van het NAP. De opsomming van deze hoogte met de diepte van het terras resulteert in Vergelijking 5.

$$H_{klif,max} = H_{kruin} - H_0 + d_t \quad [5]$$

Hierin is:

- $H_{klif,max}$ = De maximale hoogte van de klif [m]
- H_{kruin} = De kruinhoogte [m + NAP]
- H_0 = De waterhoogte [m + NAP]
- $d_{t,max}$ = De maximale terrasdiepte [m]

Op basis van Figuur 23 is op eenzelfde manier een vergelijking voor de basis van deze driehoek opgesteld. De vergelijking voor de basis van deze driehoek, uitgedrukt in H_{klif} , is weergegeven in Vergelijking 17.

Vergelijking 17: Basis van driehoek

$$B_{T,1} + H_{klif} = \sqrt{2} * H_{klif} * \cos(\alpha)$$

Door aan beide kanten H_{klif} af te trekken ontstaat Vergelijking 7 zoals deze is gebruikt in 3.2.2.

$$B_{T,1} = \sqrt{2} * H_{klif} * \cos(\alpha) - H_{klif} \quad [7]$$

Hierin is:

$B_{T,1}$ = Terrasbreedte erosieprofiel (oplopende deel)[m]

α = Gemiddelde helling buitentalud [$^{\circ}$]

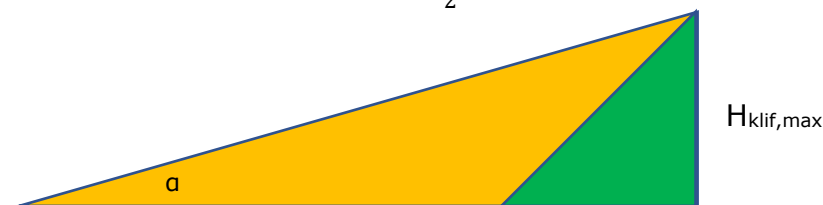
H_{klif} = De hoogte van de klif [m]

C.1 Bepaling erosievolume van het oplopende deel

Met behulp van H_{klif} en de helling van het buitentalud kan het erosievolume van het schuine deel worden bepaald. Met behulp van de Vergelijking 18, de vergelijking voor de oppervlakte van een rechthoekige driehoek, kan de oppervlakte van de complete driehoek, maar ook de groene driehoek in Figuur 24 berekend worden.

Vergelijking 18: Oppervlakte rechthoekige driehoek

$$Oppervlakte = \frac{basis * hoogte}{2}$$



Figuur 24: versimpeld Erosieprofiel

Vergelijking 19: Totale oppervlakte driehoek uit figuur 24

$$Oppervlakte\ totaal = \frac{\frac{H_{klif,max}}{\tan(\alpha)} * H_{klif,max}}{2}$$

Vergelijking 20: oppervlakte groene vlak uit figuur 24

$$Oppervlakte\ groen = \frac{H_{klif,max} * H_{klif,max}}{2}$$

Vergelijking 21: Oppervlakte gele vlak uit figuur 24

$$V_{e,oplopend} = Oppervlakte\ totaal - Oppervlakte\ groen \quad (22)$$

Het combineren van vergelijkingen 19 en 20 geeft de oppervlakte van de gele driehoek. Deze driehoek is gelijk aan het erosievolume van het oplopende deel van de duin. Het invullen van de parameters resulteert in Vergelijking 6.

$$V_{e,oplopend} = \frac{\left(\frac{H_{klif,max}}{\tan(\alpha)}\right) * H_{klif,max}}{2} - \left(\frac{H_{klif,max}^2}{2}\right) \quad [6]$$

Hierin is:

$V_{e,oplopend}$ = Erosievolume van het oplopende deel per strekkende meter duin [m^3/m]

α = Gemiddelde helling buitentalud [$^{\circ}$]

$H_{klif,max}$ = De maximale hoogte van de klif [m]

Bijlage D: Hydraulische belasting

Tabel 13: Hydraulische belasting per waterhoogte

Situatie	Waterhoogte [m +NAP]	Bekleding [-]	Terugkeertijd [jaar]	Significante Golfhoogte Hydra-NL (Hs) [m]	Maximale significante Golfhoogte (Hs,max) [m]	Piekperiode (Tp) [s]	Golfrichting [°]	Golfinval [°]
1	-0,5	Steenzetting Blokken	10000	1,16	1,6	5,3	300,7	35,7
2	0	Steenzetting Blokken	10000	1,23	1,86	5,34	303,4	38,4
3	0,5	Steenzetting Blokken	10000	1,22	2,13	4,62	307	42
4	1	Steenzetting Blokken	10000	1,16	2,39	4,32	329	64
5	1,5	Steenzetting Blokken	10000	-	2,93	-	-	-

Bijlage E: Bodemdiepte IJmeer

Met behulp van geografische informatie zijn gegevens over de dijk in zijn huidige staat verzameld. Op basis van hoogtecijfers (Figuur 25) is de huidige situatie in kaart gebracht. Uit deze gegevens blijkt dat de bodemdiepte van het IJmeer rond de 3,5m onder NAP ligt.



Figuur 25: Hoogtecijfers onderzoekslocatie (Waterschap Zuiderzeeland, 2018)

Er is weliswaar een dieper gebied te zien bij hectometerpaal 4.0, hetzelfde punt als het gekozen dwarsprofiel, maar dit is te verklaren door de nabijgelegen haven. Daarom is deze diepte niet maatgevend voor het hele gebied. Verder is weinig variatie van bodemdiepte geconstateerd, ook neemt de diepte niet veel meer toe naarmate de afstand tot de dijk groter wordt. Daarom zal 3,5 meter onder NAP als bodemdiepte worden genomen.

Bijlage G: Aanne α_t

G.1 Berekening α_t per situatie

α_t is de hoek van het terras en kan worden berekend met behulp van een aantal gegevens. Zoals beschreven in de discussie loopt het terras op van de maximale terrasdiepte tot de waterhoogte. Dit gebeurt over een afstand die gelijk is aan de terrasbreedte. De helling van het terras is daarom gelijk aan de verhouding tussen de breedte van het terras en de maximale terras diepte. De helling van het terras kan worden berekend doormiddel van Vergelijking 22.

Vergelijking 22: Hoek onder het terras

$$\alpha_t = \tan^{-1}(d_{t,max}/b_t)$$

Hierin is:

- α_t = De helling van het terras
- $d_{t,max}$ = De maximale terrasdiepte
- b_t = De terrasbreedte

Door eerder verkregen resultaten in te vullen in deze vergelijking kan de helling van het terras per waterhoogte berekend worden. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 14.

Tabel 14: Berekening helling terras

Waterhoogte [m +NAP]	Maximale terrasdiepte [m]	Terrasbreedte [m]	Helling Terras (α_t) [°]
-0,5	2,32	49,1	2,7
0	2,46	50,4	2,8
0,5	2,44	45,2	3,1
1	2,32	42,6	3,1

G.2 Berekening extra erosiebreedte

Met behulp van de erosiebreedte en de klifhoogte kan het erosievolume onder het terras worden berekend. Dit volume is in de oorspronkelijke berekening meegenomen, maar zou na de correctie verder landinwaarts eroderen. De extra breedte die erodeert kan vervolgens op basis van dat volume bepaald worden. Het erosie volume onder het terras kan worden berekend met Vergelijking 23.

Vergelijking 23: Volume onder het terras

$$V = \frac{B_t * d_t}{2}$$

Hierin is:

- V = Het volume onder het terras per strekkende meter [m^3/m]
- d_t = De diepte van het terras [m]
- B_t = De terrasbreedte [m]

Dit resulteert in de volumes zoals aangegeven in tabel 15. Door dit volume te delen door de kruinhoogte kan de extra erosiebreedte worden bepaald. Dat kan met behulp van Vergelijking 24.

Vergelijking 24: Extra erosiebreedte

$$B_{t,extra} = \frac{V}{H_{kruin}}$$

Hierin is:

- $B_{t,extra}$ = De extra terrasbreedte [m]
- V = Het volume onder het terras per strekkende meter [m^3/m]
- H_{kruin} = De hoogte van de kruin [m +NAP]

De extra erosiebreedte is ook in Tabel 15 weergegeven.

Tabel 15: Berekening extra erosiebreedte

<i>Waterhoogte</i> [m +NAP]	<i>Hoek</i> [°]	<i>Radialen</i> [-]	<i>terrasbreedte</i> [m]	<i>terrasdiepte</i> [m]	<i>Volume</i> [m ³ /m]	<i>Kruinhoogte</i> [m]	<i>Extra breedte</i> [m]
-0,5	2,7	0,05	49,1	2,32	57,0	3,84	14,8
0	2,8	0,05	50,4	2,46	61,9	3,84	16,1
0,5	3,1	0,05	45,2	2,44	55,1	3,84	14,4
1	3,1	0,05	42,6	2,32	49,4	3,84	12,9