

**Rekenmodel voor kleierosie  
bij variërende waterstand**





## **Rekenmodel voor kleierosie bij variërende waterstand**

Dorothea Kaste  
Mark Klein Breteler

1209832-010



**Titel**

Rekenmodel voor kleierosie bij variërende waterstand

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
RWS-WVL	1209832-010	1209832-010-HYE-0001	31

**Trefwoorden**

reststerkte, klei, erosie

**Samenvatting**

In het kader van het onderzoek van WTI-2017 is een model ontwikkeld voor het berekenen van de erosie van een kleilaag (Kaste en Klein Breteler, 2014). Dit model is onlangs toegepast op de kleibekleding van de Emanuelpolderdijk (PBZ, 2013) en daarbij is opgevallen dat het model niet goed omgaat met een variërende waterstand.

Het rekenmodel berekent de erosie van de kleilaag (en de zandkern) van een dijk, bijvoorbeeld na het bezwijken van de steenzetting. Daartoe wordt de gehele stormduur in tijdstappen opgedeeld. Per tijdstap wordt de erosie van de tijdstap bepaald en gesommeerd. Dit levert uiteindelijk het erosieprofiel. Hoewel het rekenmodel ook kan werken met de zandkern, wordt in dit rapport de aandacht gericht op de kleilaag.

Gebaseerd op de methode van PBZ (2013) is er nu een nieuwe aanpak opgesteld zodat het rekenmodel beter omgaat met een variërende waterstand. Daarvoor is het talud in horizontale stroken opgedeeld en wordt per strook de cumulatieve erosie bijgehouden. De erosie per tijdstap wordt alleen toegevoegd aan de stroken in de belaste zone.

In dit rapport wordt de aanpak voor het omgaan met een variërende waterstand toegelicht. De bijgekomen stappen in het rekenmodel zijn genoemd en uitgelegd. Ook zijn er meerdere testcases doorgerekend, waaruit blijkt dat de nieuwe aanpak goed werkt. Echter zijn er helaas onvoldoende metingen, waarmee het model geverifieerd kan worden. Daardoor moeten we voor de beoordeling van het resultaat voornamelijk terugvallen op engineering judgement.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat en het Waterschap Scheldestromen.

Contractueel is Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

**Referenties**

Waterdienst zaaknummer 31094141 / 45002226348 van 2 juni 2014

Contactpersoon Waterdienst: dhr. K. Saathof

Contactpersoon Projectbureau Zeeweringen van RWS: dhr. Y. Provoost

# Deltares

**Titel**




Rekenmodel voor kleierosie bij variërende waterstand

**Opdrachtgever**  
RWS-WVL

**Project**  
1209832-010

**Kenmerk**  
1209832-010-HYE-0001

**Pagina's**  
31

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2014	Dorothea Kaste		Paul van Steeg		Marcel van Gent	
2	jan. 2015	Dorothea Kaste		Paul van Steeg		Marcel van Gent	

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Probleembeschrijving</b>	<b>3</b>
2.1	Het bestaande rekenmodel	3
2.2	Beperkingen van het bestaande rekenmodel bij een variërende waterstand	5
2.3	Doelstelling voor dit onderzoek	7
<b>3</b>	<b>Aanpassingen van het rekenmodel voor een variërende waterstand</b>	<b>9</b>
3.1	Aanpak	9
3.2	Stap 1: Vastleggen van stroken voor het dijktaalud	11
3.3	Stap 3: Iteratie voor het vaststellen van de grootte van de belaste zone	11
3.3.1	Iteratiestap 1: Eerste aanname van de belaste zone	12
3.3.2	Iteratiestap 2: Eerste aanpassing van belaste zone gebaseerd op al aanwezig erosievolume	12
3.3.3	Iteratiestap 3: Tweede aanpassing van belaste zone gebaseerd op al aanwezig erosievolume	12
3.3.4	Iteratiestap 4-6: Herhaling van Iteratiestap 3	13
3.4	Stap 4: Invloed van al aanwezige erosie onder de belaste zone	13
3.5	Stap 5 t/m 7: Bereken het erosievolume in de belaste zone en bepaal erosieprofiel	15
3.6	Stap 8: Opsplitsen van het erosievolume in stroken en bepalen van erosiediepte per strook	15
3.7	Stap 9: Aangepaste controle op doorbraak kleilaag (falen kleilaag) en op doorbraak dijk (falen dijk)	19
<b>4</b>	<b>Testcases en voorbeelden</b>	<b>21</b>
4.1	Testcase 1: constante waterstand en constante golfeigenschappen	21
4.2	Testcase 2: variërende waterstand en constante golfeigenschappen	22
4.3	Testcase 3: variërende waterstand en variërende golfeigenschappen	23
4.4	Invloed van de strookhoogte	24
4.5	Narekenen van een modelproef in de Deltagoot	25
4.6	Beperkingen van het nieuwe rekenmodel	27
<b>5</b>	<b>Samenvatting en conclusies</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>31</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Testcases 1 t/m 3 in detail</b>	<b>A-1</b>
A.1	Hydraulische gegevens	A-1
A.2	Erosieprofielen in tijdreeksen	A-3





## 1 Inleiding

In het kader van het onderzoek van WTI-2017 is een model ontwikkeld voor het berekenen van de erosie van een kleilaag onder golfaanval (Kaste en Klein Breteler, 2014). Dit rekenmodel is onlangs toegepast op de kleibekleding van de Emanuelpolderdijk en daarbij is opgevallen dat het model niet goed omgaat met een variërende waterstand. Een variërende waterstand valt voornamelijk te verwachten bij getijdegebieden en bij stormvloed. Het is van belang dat in deze gebieden het model correct omgaat met een variërende waterstand.

Het model berekent de erosie van de kleilaag (en de zandkern) van een dijk, bijvoorbeeld na het bezwijken van de steenzetting. Daartoe wordt de gehele stormduur in tijdstappen opgedeeld. Per tijdstap wordt de erosie van de betreffende tijdstap bepaald en opgeteld bij alle voorgaande stappen. Dit levert uiteindelijk het erosieprofiel. Bij een variërende waterstand wordt altijd met de gehele erosie gerekend alsof ze bij de waterstand van de actuele tijdstap is opgetreden. Daardoor wordt een onjuist erosieprofiel met afwijkende erosiediepte verkregen.

Hoewel het rekenmodel ook kan werken met de zandkern, wordt in dit rapport de aandacht gericht op de erosie van de kleilaag.

Tijdens het voorspellen van de erosie van de kleibekleding van de dijk van de Emanuelpolder is door PBZ (2013) gewerkt aan een alternatief model wat beter rekening houdt met de variërende waterstand. Hun ideeën zijn gebruikt voor het opstellen van de huidige aanpak in deze studie, maar die methode heeft ook een aantal tekortkomingen waardoor deze niet één op één hier gebruikt kon worden.

In het kader van het project “Advisering Steenbekleding 2014-2015” (activiteit B5) is het rekenmodel aangepast zodat het beter omgaat met een variërende waterstand. Daarvoor is het talud in horizontale stroken opgedeeld en wordt per strook de cumulatieve erosie bijgehouden. De erosie per tijdstap wordt alleen toegevoegd aan de stroken in de belaste zone.

In dit rapport wordt de aanpak voor het omgaan met een variërende waterstand toegelicht. De toegevoegde stappen in het rekenmodel zijn genoemd en uitgelegd. Ook zijn er meerdere testcases gepresenteerd.

Het rekenmodel is nu in staat om de erosie van een kleitalud met eventuele berm te berekenen. In de toekomst kan het uitgebreid worden zodat ook de invloed van de kruin en het binnentalud correct wordt meegenomen.

### Leeswijzer

In het navolgende hoofdstuk (Hoofdstuk 2) wordt het probleem uitgebreid beschreven. In Hoofdstuk 3 zijn de aanpassingen voor een variërende waterstand gegeven.

In Hoofdstuk 4 zijn enkele voorbeelden en testcases getoond. De beperkingen van de nieuwe aanpak is beschreven in Paragraaf 4.6.

Een samenvatting van het gehele rapport is gegeven in Hoofdstuk 5.



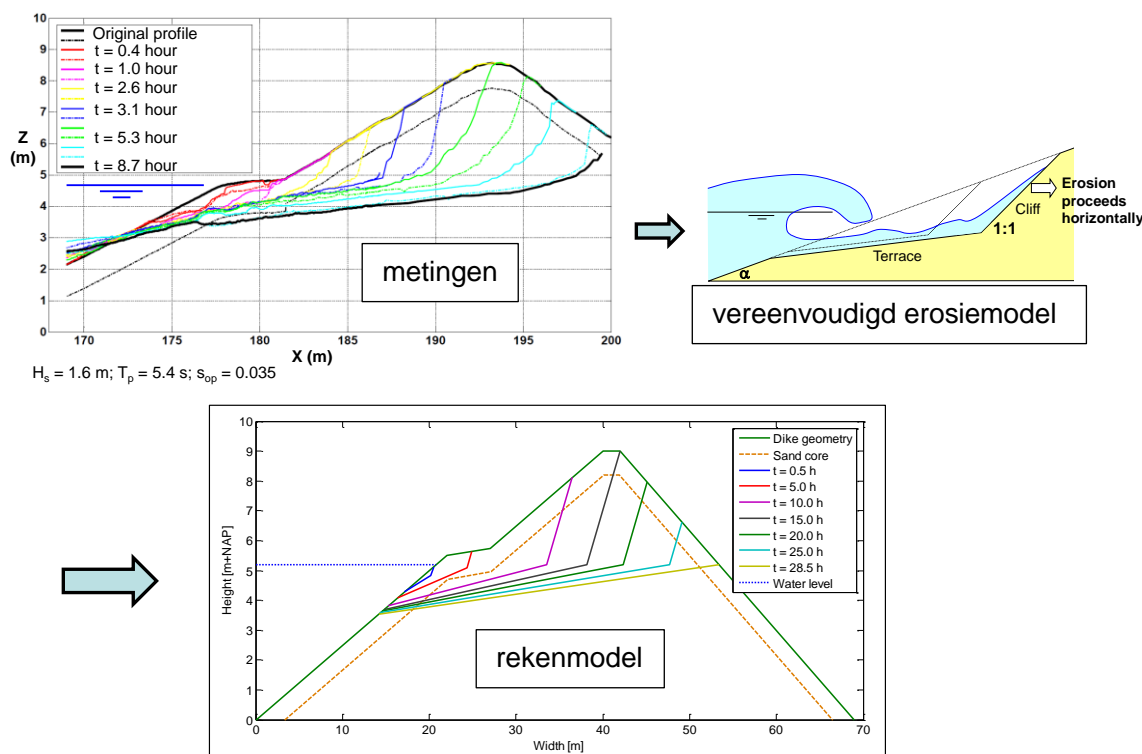
## 2 Probleembeschrijving

### 2.1 Het bestaande rekenmodel

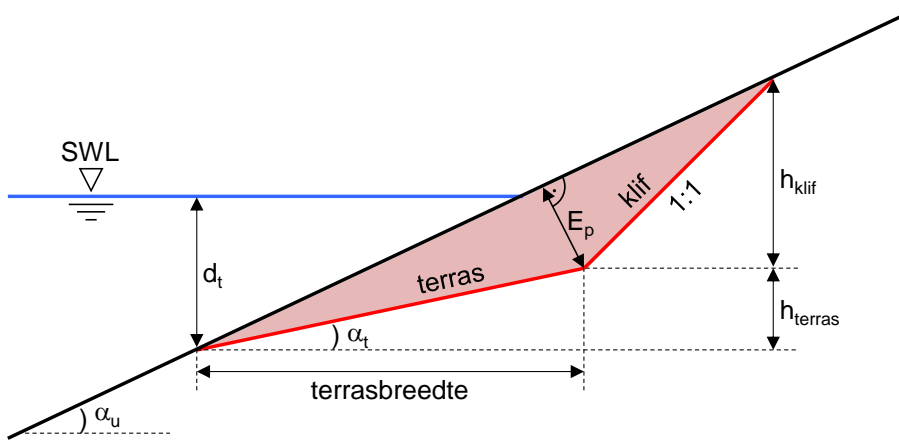
In het kader van het onderzoeksprogramma SBW (Sterkte en Belastingen op Waterkeringen) en WTI-2017 (Wettelijk Toetsinstrumentarium), Cluster 5, Dijkbekledingen, is een rekenmodel opgesteld om de reststerkte van een dijk onder golfbelasting te bepalen (Kaste en Klein Breteler, 2014). Dit rekenmodel berekent de erosie van een dijk met een kleilaag en een zandkern. Hoe dit rekenmodel is ontwikkeld is hieronder beschreven.

Om de erosie van een dijk onder golfbelasting te onderzoeken zijn grootschalige fysische modelproeven uitgevoerd (Klein Breteler et al, 2012). Op basis daarvan zijn formules opgesteld met betrekking tot de erosiesnelheid van de kleilaag en de erosiesnelheid van de zandkern van een dijk. Verder is er ook een vereenvoudigd erosiemodel bepaald, met een flauw erosieterras en een steile erosieklif. Ook is er een formule bepaald voor de diepte van de erosievoet ten opzichte van de waterstand ( $d_t$ ). Het erosieprofiel is geschematiseerd zoals in Figuur 2.2 is getoond.

Het vereenvoudigde erosiemodel is vervolgens opgenomen in bovengenoemd rekenmodel (zie ook Figuur 2.1). Het rekenmodel kan worden gebruikt om de erosie van een kleilaag en zandkern te berekenen voor een vereenvoudigd dijkprofiel met een berm. In het huidige onderzoek richten we ons op de erosie van de kleilaag. De formules zijn gebaseerd op proeven met gestructureerd klei, met een kleilaag dikte van ten hoogste 2 à 3 m. Als er berekeningen worden uitgevoerd voor dikkere kleilagen of een hele kleidijk, dan wordt de erosie aanzienlijk overschat, omdat de klei dieper in de dijk veel erosiebestendigheid is.



Figuur 2.1 Ontwikkeling van het bestaande rekenmodel



Figuur 2.2 Schets van het erosieprofiel met enkele definities van het geschematiseerd erosieprofiel (met  $\alpha_u$  = taludhelling ondertalud,  $\alpha_t$  = helling van het erosieterras,  $h_{\text{terras}}$  = hoogte van het erosieterras,  $h_{\text{klif}}$  = hoogte van de erosieklif,  $E_p$  = erosiediepte haaks op het initiële talud,  $d_t$  = verticale afstand tussen waterstand en voet van het erosieprofiel)

De bovengenoemde aanpak werkt goed zolang de waterstand en de golfcondities constant zijn. Voor een variërende waterstand en/of golfcondities is in het rekenmodel een benadering gebruikt om de erosie in een dijk in tijdstappen te berekenen. Daarbij zijn per tijdstap een constante waterstand en constante golfeigenschappen aangehouden. Ook het vereenvoudigde erosieprofiel wordt per tijdstap opnieuw bepaald. Een documentatie van het rekenmodel is te vinden in Bijlage A.5 van het rapport van Kaste en Klein Breteler (2014).

De formule voor het berekenen van de erosie in klei is onlangs aangepast op basis van een groot aantal simulaties met het programma ComFLOW en vergelijkingen met grootschalige modelonderzoeken (Mourik, 2015). Deze aangepaste formule is ook opgenomen in het bestaande rekenmodel, zonder het rekenmodel verder te veranderen. De erosie is volgens de nieuwe formule afhankelijk van het al aanwezige erosievolume.

De in het bestaande rekenmodel gebruikte formules zijn na deze wijziging:

- voor de erosiesnelheid in de kleilaag (Mourik, 2015):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[ 1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_{e0}}{H_s^2} \right] \cdot \left[ 16,4 \cdot (\tan \alpha)^2 \right] \cdot \left[ \min \left( 3,6 ; \frac{0,0061}{s_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot \left[ 1,7 \cdot (H_s - 0,4)^2 \right]$$

mits  $H_s > 0,4$  m;

voor  $H_s \leq 0,4$ :  $\partial V/\partial t = 0$

(2.1)

met:

$\partial V_e$  = toename erosie in een tijdstap [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]

$\partial t$  = grootte van de tijdstap [h]

$c_e$  = erosiecoëfficiënt voor de kleisoort (zie hieronder) [-]

$V_{e0}$  = reeds aanwezig, gecorrigeerd erosievolume in de belaste zone [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]

$H_s$  = significante golfhoogte [m]

$\tan \alpha$  = taludhelling [-]

$s_{op}$  = golfsteilheid  $s_{op} = \frac{H_s}{1,56 \cdot T_p^2}$  [-]

$T_p$  = golfperiode van de piek van het golfspectrum [s]

De erosiecoëfficiënt voor het type klei is vastgelegd voor klei en keileem van gestructureerd materiaal. Onderstaand zijn de waarden gegeven voor het gemiddelde  $\mu$  en de variatiecoëfficiënt  $V$  (met  $V = \sigma/\mu$ , met  $\sigma$  = standaardafwijking) van de erosiecoëfficiënt:

- klei met zandgehalte < 40% en organische stof gehalte < 5%:  
 $\mu(c_e) = 0,55$ ;  $V(c_e) = 0,25$
- keileem met zandgehalte < 60% en organische stof gehalte < 5%:  
 $\mu(c_e) = 0,35$ ;  $V(c_e) = 0,27$
- voor de erosiesnelheid in de zandkern (Klein Breteler et. al, 2012):

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{H_s^2}{T_p} \left( \frac{0,15}{s_{op}^{1,3}} + (\tan \alpha)^{0,8} \cdot (135 - 1500 \cdot s_{op}) \cdot \exp \left( -0,0091 \cdot \left( \frac{B_t}{H_s} \right)^2 \right) \right) \quad (2.2)$$

met:

$B_t$  = terrasbreedte (horizontale afstand tussen het beginpunt en het eindpunt van het erosieterras) [m<sup>3</sup>/m]

- voor de diepte van de voorzijde van het erosieprofiel (terras) t.o.v. de waterstand  $d_t$  (Klein Breteler et. al, 2012):

$$d_t = \min \left\{ 0,4 \frac{V_e^{0,25}}{\sqrt{H_s}} + 0,7 ; 2H_s \right\} \quad \text{mits } H_s > 0,5 \quad (2.3)$$

met:

$d_t$  = Diepte onder water van het snijpunt van het originele dijkprofiel en het erosieterras [m]

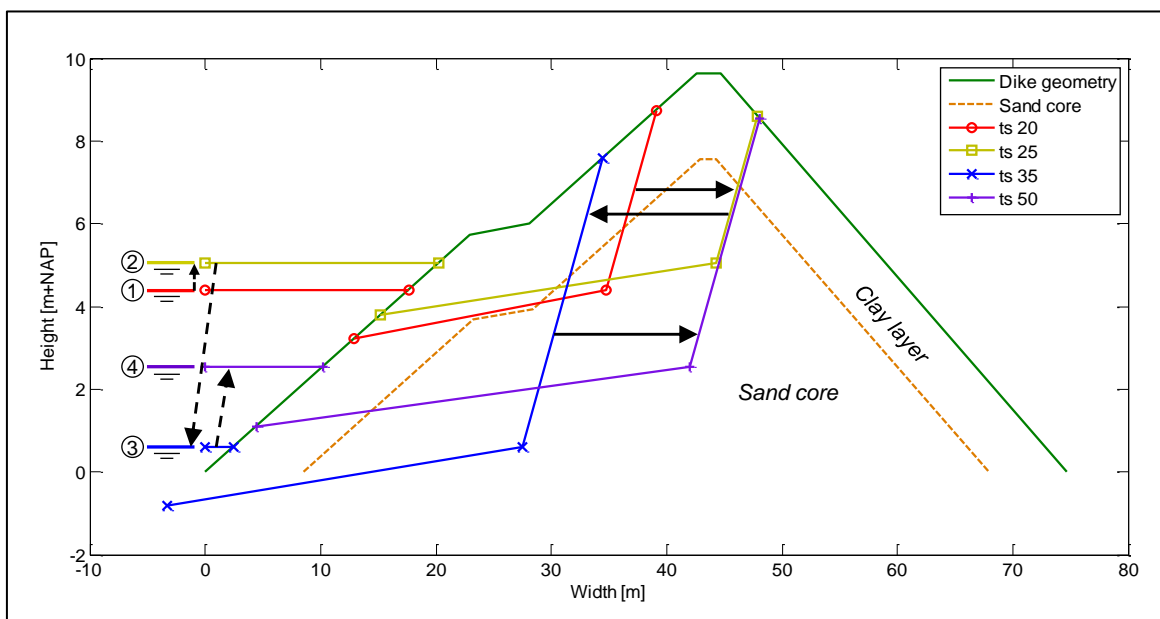
$V_e$  = erosievolume [m<sup>3</sup>/m]

## 2.2 Beperkingen van het bestaande rekenmodel bij een variërende waterstand

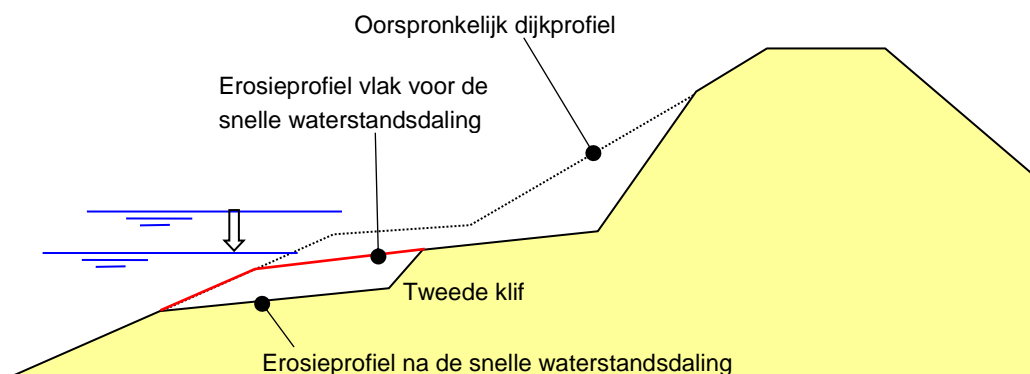
Het bestaande rekenmodel (Kaste en Klein Breteler, 2014) is opgezet voor een constante waterstand en is minder geschikt voor een variërende waterstand. In het bestaande rekenmodel wordt de cumulatieve erosie volledig verdisconteerd in het erosieprofiel van de laatste waterstand, hetgeen niet overeenkomt met de werkelijkheid. Het bestaande rekenmodel verschuift de al aanwezige erosie altijd mee met de waterstandsverandering, alsof het cumulatieve erosievolume bij de waterstand van de actuele tijdstap is opgetreden (zie Figuur 2.3). Dit geeft een overschatting van het erosievolume en de erosiediepte, omdat het erosievolume eigenlijk verdeeld moet zijn over de verschillende waterstanden. De erosiediepte, en dus de snelheid waarmee de dijk erodeert, wordt daardoor overschat.

In werkelijkheid zal de erosie, die opgetreden is bij een bepaalde waterstand, in die betreffende zone blijven en zal er bij een stijgende waterstand boven deze zone een nieuwe erosie aan het reeds bestaande erosieprofiel toegevoegd worden. Dit is geïllustreerd voor een dalende waterstand in Figuur 2.4 en voor een stijgende waterstand in Figuur 2.5 (Kaste en Klein Breteler, 2014).

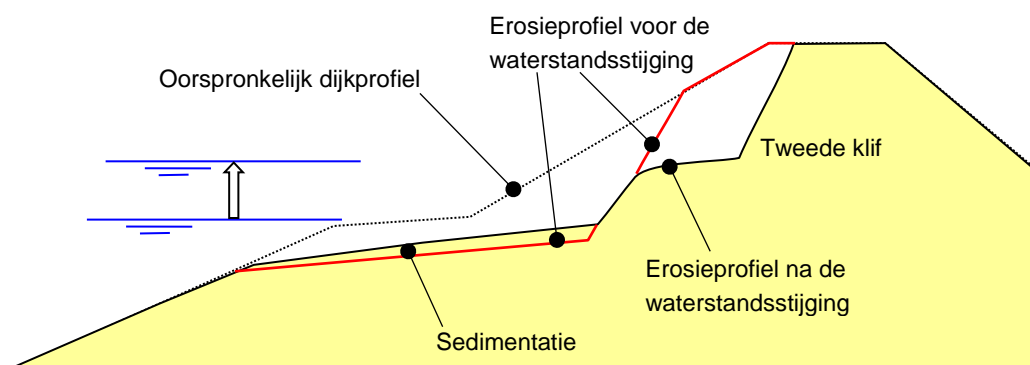
Er zijn in het verleden berekeningen met het bestaande rekenmodel uitgevoerd voor situaties waarbij er een variërende waterstand was. Omdat verwacht wordt dat de maximale erosiediepte volgens het bestaande rekenmodel wordt overschat, kan worden aangenomen dat het rekenmodel in dit geval een conservatief resultaat opleverde (het rekenmodel gaf dus een grotere erosiediepte dan in werkelijkheid op zal treden).



Figuur 2.3 Probleem van de variërende waterstand in het bestaande rekenmodel



Figuur 2.4 Vermoedelijk erosieprofiel na een snelle daling van de waterstand



Figuur 2.5 Vermoedelijk erosieprofiel na een snelle stijging van de waterstand

### **2.3 Doelstelling voor dit onderzoek**

In het kader van dit onderzoek is het bestaande rekenmodel aangepast voor een variërende waterstand. Daarvoor is een groot deel in de code toegevoegd (zie Hoofdstuk 3). Het huidige rapport geeft de uitleg voor deze aanpassingen. Omdat er onvoldoende empirische data is, waarmee het rekenmodel voor een variërende waterstand kan worden geverifieerd, zijn er testcases gepresenteerd, aan de hand waarvan de nieuwe aanpak kan worden beoordeeld op basis van engineering judgement.





### 3 Aanpassingen van het rekenmodel voor een variërende waterstand

In dit hoofdstuk zijn de aanpassingen van het rekenmodel voor een variërende waterstand uitgelegd en in detail beschreven. De eerste paragraaf beschrijft de aanpak in zijn geheel. In de daarop volgende paragrafen zijn de aanpassingen in detail beschreven.

#### 3.1 Aanpak

In de door PBZ (2013) opgestelde methode voor het omgaan met een variërende waterstand wordt het talud in horizontale stroken opgesplitst en wordt voor elke tijdstap de erosie in de belaste stroken berekend en de bijkomende erosie per tijdstap alleen op belaste stroken gesommeerd. De belaste stroken samen vormen de belaste zone, welke is gedefinieerd als de zone tussen de waterstand in de betreffende tijdstap en het snijpunt van het erosieprofiel met het originele talud ( $d_t$ , zie Figuur 2.2). De diepte van het snijpunt wordt berekend met de opgestelde formule van Klein Breteler et al (2012). Deze methode is een belangrijke verbetering om met een variërende waterstand om te gaan, omdat hiermee netjes wordt bijgehouden hoeveel erosie er in elke zone optreedt.

De wijze waarop dit is uitgewerkt, kan echter verder verbeterd worden, omdat de belaste zone nauwkeuriger kan worden ingeschat. De belaste zone is afhankelijk van de golfbelasting en kan zich ook boven de waterstand uitstrekken, terwijl ze zich volgens de methode van PBZ alleen onder water bevindt en alleen afhankelijk is van de parameter  $d_t$ . De erosie in de betreffende tijdstap is in de methode van PBZ niet afhankelijk van de reeds ontstane erosie, want er werd gebruik gemaakt van de formules uit Klein Breteler et al (2012). Met de nieuwe formule voor de erosie van de klei van Mourik (2015) is deze wel afhankelijk van de reeds aanwezige erosie en moet deze bepaald worden met een schatting van de belaste zone.

Het idee van het opdelen van het talud in stroken en het beschouwen van de belaste zone is daarom overgenomen, maar de verdere uitwerking is verbeterd.

In de methode van PBZ (2013) worden bovendien twee methoden toegepast om de erosiediepte aan het eind van de storm te berekenen. In de eerste methode wordt de erosiediepte afhankelijk van het erosievolume per strook berekend. In de tweede methode wordt met het totale erosievolume een geschematiseerd erosieprofiel bepaald (zie Figuur 2.2) bij de waterstand waar de meeste erosie is opgetreden. Daarvan kan de erosiediepte worden bepaald.

De tweede methode blijkt onnauwkeurig te zijn, omdat er met het gehele erosievolume een erosieprofiel bepaald wordt, net zoals bij het oorspronkelijke rekenmodel. Dit is bij een variërende waterstand niet juist, omdat de erosie over het hele talud verdeeld is. De eerste methode is wat dit betreft beter, omdat afhankelijk van het erosievolume de erosiediepte per strook bepaald wordt. Daarom is deze methode ook toegepast in het vernieuwde rekenmodel.

Om met een variërende waterstand goed om te gaan, wordt in navolging van PBZ (2013) de dijk in horizontale stroken opgedeeld. Afhankelijk van de waterstand wordt de belaste zone bepaald. Vervolgens wordt gekeken hoe groot het al aanwezige erosievolume in de belaste zone is ( $V_{e0}$ ). Dit is nodig omdat de erosie in de komende tijdstap afhankelijk is van de reeds

ontstane erosie in de betreffende zone in de vorige tijdstappen. Met het berekende erosievolume wordt een geschematiseerd erosieprofiel bepaald en daarmee wordt de erosie over de stroken verdeeld. Daarmee wordt de gemiddelde erosiediepte per strook berekend. Deze kan worden gebruikt om te controleren of de kleilaag al is doorbroken.

Opgemerkt wordt dat de erosiediepte in deze rapportage gedefinieerd is als de horizontale afstand tussen het oorspronkelijke profiel en het geërodeerde profiel ( $d_e$ , zie Figuur 3.5), tenzij anders vermeld. Deze definitie is in het rekenmodel handiger, gezien de opzet om met horizontale stroken te werken. Aan het eind van het rekenproces moet dit omgerekend worden naar een erosiediepte haaks op het talud, omdat dit in de praktijk gebruikelijker is ( $E_p$ ).

### Rekenprocedure

Net als in het bestaande rekenmodel van Kaste en Klein Breteler (2014) wordt in het nieuwe rekenmodel de erosie in tijdstappen berekend. Hoe de erosie in detail wordt berekend per tijdstap is echter aangepast en hieronder beschreven. Het opdelen van de storm in aparte tijdstappen is gelijk aan het bestaande rekenmodel. De opzet om te rekenen met tijdstappen met constante waterstand en golfcondities komt overeen met de wijze waarop de toetsing van grasbekledingen wordt uitgevoerd.

De volgende stappen worden in het rekenmodel uitgevoerd:

- 1 Voordat het erosievolume in tijdstappen wordt berekend, wordt het talud opgedeeld in horizontale stroken (zie paragraaf 3.2).

De stappen 2 t/m 9 worden in een loop voor elke tijdstap uitgevoerd, totdat de hele storm is doorgerekend, of totdat Stap 9 in falen resulteert en de berekening afgebroken wordt:

- 2 Bepaal hydraulische belasting voor deze tijdstap ( $h$ ,  $H_s$ ,  $T_p$ ) (zoals bij bestaand rekenmodel).
- 3 Bepaal belaste zone in 4 iteratiestappen (zie paragraaf 3.3).
- 4 Bepaal invloed van het al aanwezige erosievolume onder de belaste zone op de terrasbreedte (zie paragraaf 3.4).
- 5 Bepaal het al aanwezige erosievolume in de belaste zone ( $V_{e0}$ ) (zie paragraaf 3.5).
- 6 Bepaal erosievolume dat bij deze tijdstap erbij komt ( $\Delta V_e$ ) (zoals bij bestaand rekenmodel, maar nu met het net bepaalde al aanwezige erosievolume  $V_{e0}$ ).
- 7 Bepaal geschematiseerd erosieprofiel met het cumulatieve erosievolume (zoals bij bestaand rekenmodel).
- 8 Splits het erosievolume op en verdeel het over de stroken en bepaal de erosiediepte ( $d_e$ ) per strook (zie paragraaf 3.6).
- 9 Check of de kleilaag, of de dijk, al is doorbroken (zie paragraaf 3.7).

Het rekenmodel is nu in staat om de erosie van een kleitalud met eventuele berm te berekenen. In de toekomst kan het uitgebreid worden zodat ook de invloed van de kruin en het binnentalud correct wordt meegenomen.

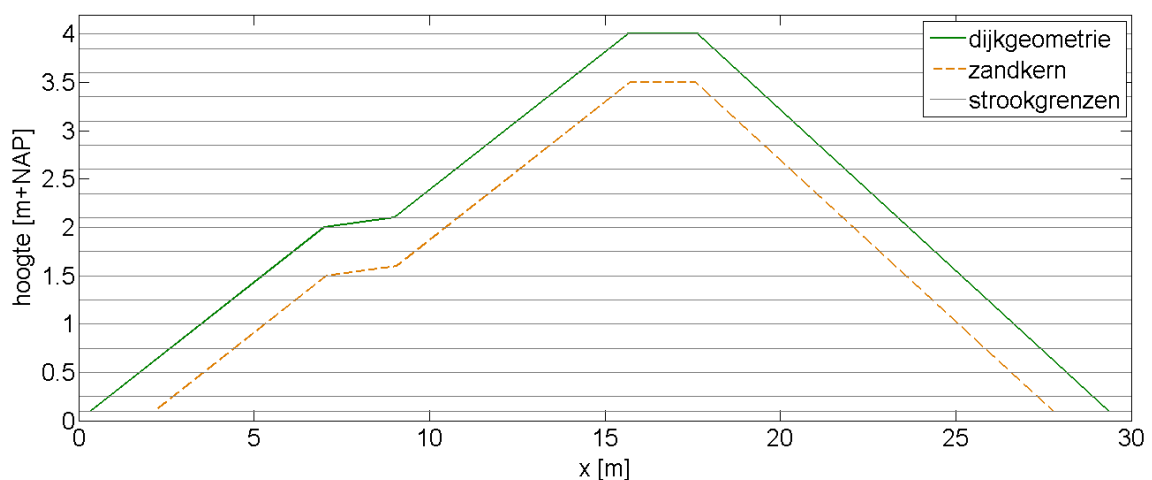
### 3.2 Stap 1: Vastleggen van stroken voor het dijktaalud

Voor de nieuwe aanpak voor het rekenmodel wordt het talud in horizontale stroken opgedeeld. De strookhoogte  $h_{\text{strook}}$  is in principe vrij te kiezen maar is gelijk voor iedere strook ongeacht de eventueel verschillende hellingen van de taluddelen. Er wordt voorlopig aanbevolen om met een strookhoogte van  $h_{\text{strook}} = 0,25$  m te rekenen. De invloed van de gekozen strookhoogte is binnen bepaalde grenzen gering (zie paragraaf 4.4).

De strookhoogte wordt zodanig aangepast dat de bepalende knikpunten van de dijkgeometrie, dus de teen, het begin- en eindpunt van de berm en de kruin, precies op de strookgrenzen vallen. Dit is goed te zien in Figuur 3.1 in het voorbeeld voor een strookhoogte van 0,25 m met een kleine dijk. Het verschil tussen de begin- en de eindpunt van de berm is kleiner dan de gewenste 0,25 m, zodat de strookgrenzen direct op de begin en eind van de berm worden gelegd. Ook de onderste strook aan de teen van de dijk en de bovenste strook aan de kruin zijn kleiner dan de gewenste maat, zodat de stroken overeenkomen met de geometrie.

De hoogten (z-waarden [m+NAP]) van de ondergrens van de stroken en de strookhoogten worden in oplopende volgorde van de teen van de dijk tot de kruin opgeslagen.

De opgetreden erosie wordt vervolgens verdeeld over de stroken, zodat elke belaste strook een deel van de erosie toebedeeld krijgt (zie Stap 8 in Paragraaf 3.6).



Figuur 3.1 Voorbeeld voor het vastleggen van de stroken voor het dijktaalud

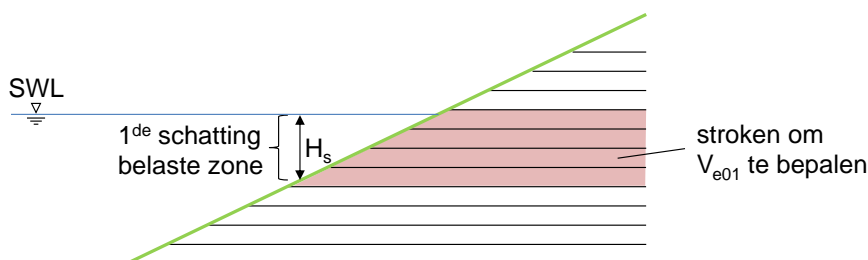
### 3.3 Stap 3: Iteratie voor het vaststellen van de grootte van de belaste zone

In de vorige paragraaf is toegelicht hoe het dijkprofiel in stroken wordt opgedeeld. In deze paragraaf wordt beschreven hoe de belaste zone per tijdstap wordt bepaald.

De belaste zone is enerzijds afhankelijk van de golfcondities en anderzijds van de reeds ontstane erosie in deze zone. Daarom wordt de belaste zone in vier iteratieve stappen bepaald, die in het navolgende zijn toegelicht.

### 3.3.1 Iteratiestap 1: Eerste aanname van de belaste zone

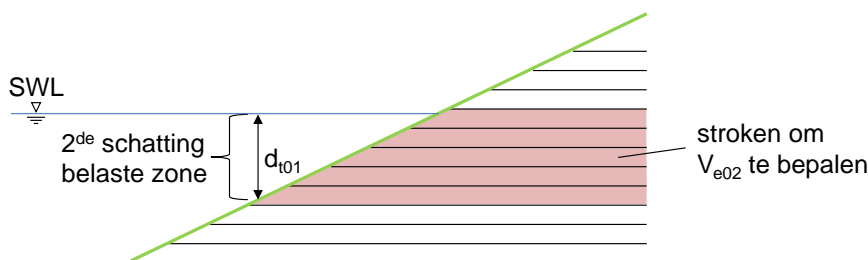
De eerste schatting van de belaste zone is van de waterstand ( $h$ ) tot één significante golfhoogte onder de waterstand ( $h - H_s$ ). Daarmee wordt een eerste schatting van het al aanwezige erosievolume  $V_{e01}$  in deze zone bepaald (erosie aan het eind van tijdstap  $i-1$ , zie Figuur 3.2). Om het al aanwezige erosievolume te berekenen worden de erosievolumen van de stroken in de belaste zone opgeteld. Vervolgens wordt hiermee de eerste schatting van de  $d_t$  (namelijk  $d_{t01}$ ) berekend. De definitie van  $d_t$  is weergegeven in Figuur 2.2 en wordt volgens de formule van Klein Breteler et al (2012) berekend, zie Formule (2.3).



Figuur 3.2 Voorbeeld van het vastleggen van de belaste zone in Iteratiestap 1

### 3.3.2 Iteratiestap 2: Eerste aanpassing van belaste zone gebaseerd op al aanwezig erosievolume

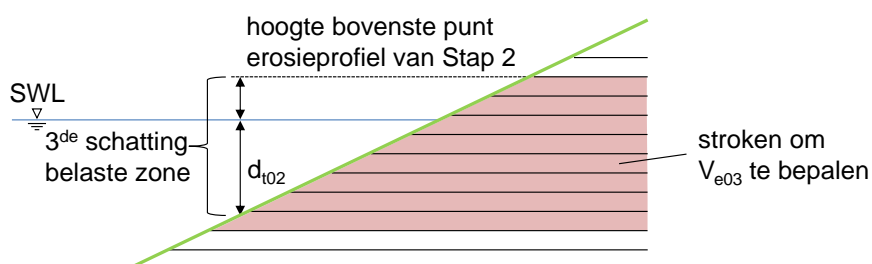
De verbeterde schatting van de belaste zone is nu van  $h$  tot  $h - d_{t01}$ . Daarmee wordt de nieuwe schatting van  $V_{e0}$  bepaald ( $V_{e02}$ ) en wordt de tweede schatting van  $d_t$  ( $d_{t02}$ ) berekend. Daarmee wordt een geschematiseerd erosieprofiel bepaald, dat zich ook kan uitstrekken tot boven de waterlijn.



Figuur 3.3 Voorbeeld van het vastleggen van de belaste zone in Iteratiestap 2

### 3.3.3 Iteratiestap 3: Tweede aanpassing van belaste zone gebaseerd op al aanwezig erosievolume

De derde schatting van de belaste zone is nu vanaf het bovenste punt van het in Stap 2 bepaalde erosieprofiel tot het laagste punt ( $h - d_{t02}$ ). Het reeds aanwezige erosievolume  $V_{e03}$  en de  $d_{t03}$  in deze belaste zone worden gebruikt om het erosieprofiel opnieuw te bepalen.



Figuur 3.4 Voorbeeld van het vastleggen van de belaste zone in Iteratiestap 3

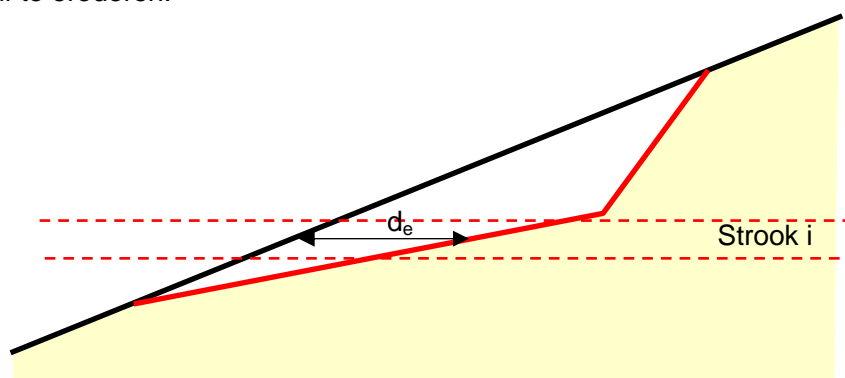
### 3.3.4 Iteratiestap 4-6: Herhaling van Iteratiestap 3

Voor de uiteindelijke schatting van de belaste zone wordt Iteratiestap 3 nog drie keer herhaald. De schatting van de belaste zone wordt hierdoor nog nauwkeuriger. De uiteindelijke schatting van de belaste zone wordt in de volgende stappen gebruikt.

## 3.4 Stap 4: Invloed van al aanwezige erosie onder de belaste zone

In de vorige paragraaf is toegelicht hoe de belaste zone is bepaald. In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe de erosie onder de belaste zone ook invloed heeft op de bijkomende erosie. Met deze informatie wordt het aanwezige erosievolume gecorrigeerd, wat in Stap 5 wordt gebruikt (zie Paragraaf 3.5).

De erosiesnelheid is afhankelijk van de vorm van het reeds ontstane erosieprofiel. Naarmate het volume in dit profiel groter is, zal ook de terrasbreedte groter zijn. Een breed terras zal er voor zorgen dat de golven breken boven het terras en nog maar weinig kracht over hebben om de klif te eroderen.



Figuur 3.5 Definitie van erosiediepte

Bij een constante waterstand zijn de terrasbreedte (zie Figuur 2.2 voor een definitie) en het erosievolume duidelijk gerelateerd in het geschematiseerde profiel: de erosiediepte ( $d_e$ , zie Figuur 3.5) is ongeveer evenredig met  $\sqrt{V_e}$ . Doordat het erosieprofiel bij een vaste waterstand steeds dezelfde vorm blijft behouden, blijft deze vaste relatie altijd bestaan. Bij een stijgende waterstand ontstaat echter een andere situatie. Het talud kan dan bijvoorbeeld van onder tot boven min of meer gelijkmatig eroderen en schrijft als het ware parallel in landwaartse richting. Dit maakt dat een groot erosievolume niet gepaard hoeft te gaan met een grote terrasbreedte. Bij een variërende waterstand is de terrasbreedte kleiner dan bij een constante

waterstand bij gelijk totaal erosievolume, omdat de erosie over het talud verdeeld is. Daardoor zal de bijkomende erosie in een bepaalde tijdstep groter zijn dan bij een vaste waterstand.

Om dit effect te verdisconteren wordt het oorspronkelijke talud in horizontale richting naar achteren verschoven over een afstand die overeenkomt met de gemiddelde erosiediepte van het talud in een bepaald bereik onder de belaste zone. Vervolgens wordt het reeds opgetreden erosievolume bepaald uitgaande van dit verschoven talud. Aangenomen wordt dat een terras voornamelijk invloed heeft op de erosie omdat de golven erop breken. Dat maakt dat het erosieprofiel relevant is tot ongeveer  $2H_s$  onder de waterlijn, omdat deze zone bepalend is voor het breken van de golven. Berekeningen met de onderkant van de zone tot  $h-1,7H_s$  en  $h-2,5H_s$  laten zien dat er geen grote afwijkingen zijn (3-4% verschil voor de loodrechte erosiediepte).

Om de grootte van deze verschuiving te berekenen wordt een zone onder de uiteindelijke schatting van de belaste zone uit Iteratiestap 4 (zie Paragraaf 3.3) tot het niveau  $h - 2H_s$  beschouwd. In deze zone wordt in elke strook gekeken hoeveel erosie er al is opgetreden in de voorgaande tijdstappen. De erosiediepte  $d_e$  in al deze stroken wordt vervolgens gemiddeld:  $d_{e,mean}$  (zie ook Figuur 3.6). Met deze waarde wordt het oorspronkelijke talud in horizontale richting naar achteren verschoven en wordt het al aanwezige erosievolume gecorrigeerd tot  $V_{e,S,corr}$ . Zodoende wordt alleen het erosievolume meegeteld wat achter het verschoven talud ligt. Voor het gecorrigeerde erosievolume in de stroken geldt:

$$V_{e,S,corr} = \min(V_{e,S} - d_{e,mean} \cdot h_{strook}; 0) \quad (3.1)$$

met:

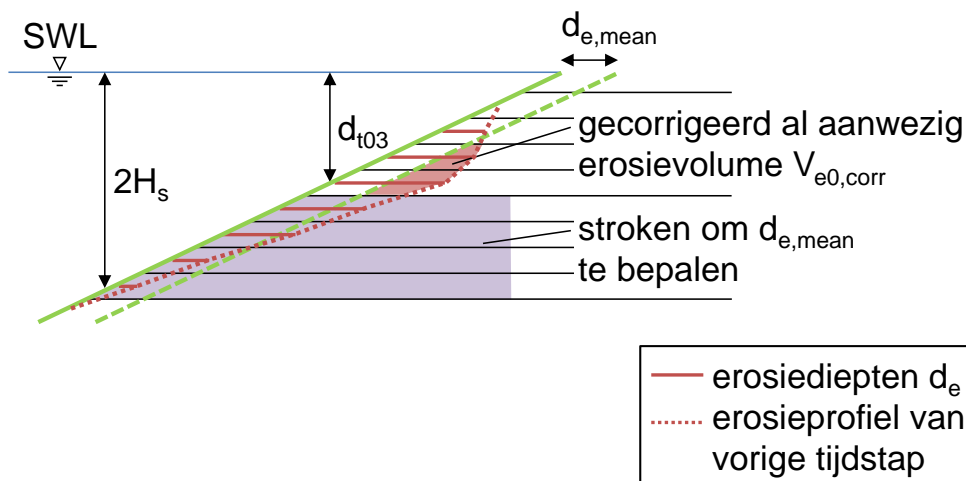
$V_{e,S,corr}$  = erosievolume per strook, gecorrigeerd voor de invloed van de al aanwezige erosie [ $m^3/m$ ]

$V_{e,S}$  = erosievolume per strook (ongecorrigeerd) [ $m^3/m$ ]

$d_{e,mean}$  = gemiddeld erosiediepte in de zone onder de belaste zone tot  $h-2H_s$  [m]

$h_{strook}$  = hoogte van de stroken [m]

Deze correctie wordt alleen gebruikt in de beschouwde tijdstep en wordt niet opgeslagen. In een latere tijdstep wordt de correctie opnieuw bepaald.



Figuur 3.6 Voorbeeld van corrigeren van het erosievolume door het talud in horizontale richting te verschuiven

### 3.5 Stap 5 t/m 7: Bereken het erosievolume in de belaste zone en bepaal erosieprofiel

Met de bepaalde belaste zone wordt nu het al aanwezige erosievolume in die zone bepaald. Dit wordt gedaan met het gecorrigeerde erosievolume  $V_{e,S,corr}$ . Daarbij worden de gecorrigeerde erosievolumen gesommeerd (zie Formule (3.2)), als ze in de belaste zone liggen.

$$V_{e0,corr} = \sum_{\substack{i \text{ van bovenzijde belaste zone} \\ i \text{ van onderzijde belaste zone}}} V_{e,S,corr,i} \quad (3.2)$$

met:

$V_{e0,corr}$  = reeds aanwezig, gecorrigeerd erosievolume in de belaste zone [ $m^3/m$ ]

$i$  = nummer van de stroken [-]

$V_{e,S,corr,i}$  = gecorrigeerd erosievolume voor een bepaalde strook  $i$  [ $m^3/m$ ]

Met het al aanwezige, gecorrigeerde erosievolume  $V_{e0,corr}$  wordt dan de erosie bepaald, die bij deze tijdstap erbij komt:  $\Delta V_e$ . Dit wordt met de formule van Mourik (2015) voor de erosie in klei berekend, die in paragraaf 2.1 in formule (2.1) is gegeven. In plaats van de variabele  $V_{e0}$  wordt nu  $V_{e0,corr}$  gebruikt.

Om het erosieprofiel te bepalen wordt echter het NIET-gecorrigeerde erosievolume  $V_{e0}$  in de belaste stroken gebruikt om het erosievolume  $V_e$  te berekenen, zie onderstaande formule:

$$V_e = V_{e,0} + \Delta V_e \quad (3.3)$$

met:

$V_e$  = erosievolume in de belaste zone van de beschouwde tijdstap, waarmee het erosieprofiel wordt bepaald [ $m^3/m$ ]

$V_{e,0}$  = reeds aanwezig (niet-gecorrigeerd) erosievolume in de belaste zone [ $m^3/m$ ]

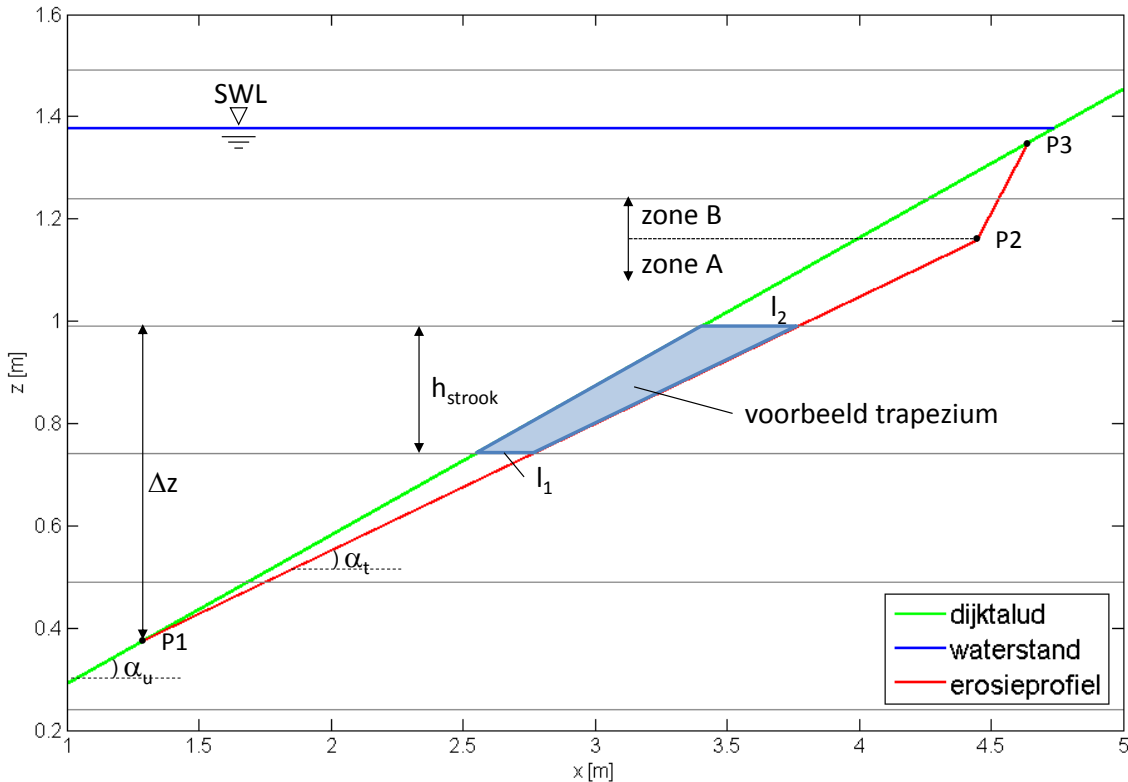
$\Delta V_e$  = in deze tijdstap bijkomend erosievolume (o.b.v. Formule (2.1)) [ $m^3/m$ ]

Met het erosievolume van de beschouwde tijdstap  $V_e$  wordt het geschematiseerde erosieprofiel bepaald. Hiervoor wordt het niet-gecorrigeerde erosievolume gebruikt omdat het erosieprofiel de hele erosie moet bevatten, ook datgene dat er al was voordat het gecorrigeerd werd. Van het erosieprofiel wordt de gehele geometrie bepaald, zoals in Figuur 2.2 is te zien. Ook de x- en z-waarden van de drie maatgevende punten van het erosieprofiel worden berekend. Deze worden in de navolgende paragraaf gebruikt.

### 3.6 Stap 8: Opsplitsen van het erosievolume in stroken en bepalen van erosiediepte per strook

Het erosievolume wordt over de belaste stroken verdeeld en opgeslagen. Daarvoor wordt het geschematiseerde erosieprofiel gebruikt. Een voorbeeld hiervoor is getoond in Figuur 3.7.

Om het verdelen van het erosievolume over de stroken simpeler te maken, wordt het erosieprofiel opgedeeld in twee zones: zone A en zone B, met de grens tussen beide op het knikpunt tussen het erosieterras en de erosieklif.



Figuur 3.7 Voorbeeld voor het opsplitsen van het erosievolume in een strook

Door de strookgrenzen en het erosieprofiel wordt de geërodeerde oppervlakte in trapezia opgedeeld. Om de erosie per strook te kunnen berekenen, moet van elk trapezium het oppervlak bepaald worden. Dit is afhankelijk van de lengten van de onder- ( $l_1$ ) en bovenkant ( $l_2$ ) van het trapezium. Voor zone A is de lengte van de bovenkant van het trapezium:

$$l_2 = \Delta z \cdot (\cot \alpha_t - \cot \alpha_u) \quad (3.4)$$

met (zie Figuur 3.7):

- $l_2$  = lengte bovenkant van het trapezium [m]
- $\Delta z$  = afstand in z-richting van de bovengrens van het trapezium naar punt P1 [m]
- $\alpha_t$  = helling van het erosieterras [°]
- $\alpha_u$  = helling van het dijktaalud [°]

Deze formule is alleen geldig voor een recht dijktaalud zonder berm.

In de meeste gevallen is de hoogte van het trapezium gelijk aan de strookhoogte, behalve in de stroken waar de punten P1, P2 en P3 in liggen. Voor deze stroken moet de afstand tussen het punt en de daarboven, resp. beneden, liggende strookgrens worden bepaald.

Met de afmetingen van het trapezium kan het volume per strook worden bepaald:

$$A_T = \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot h_T \quad (3.5)$$

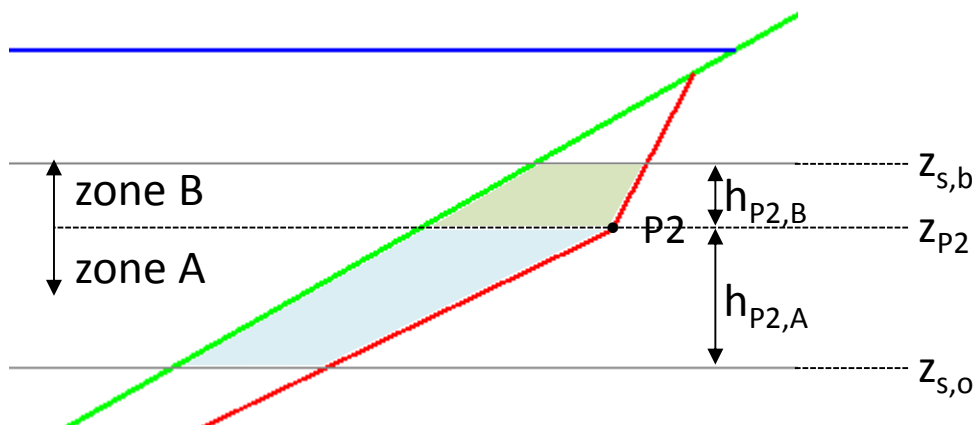
met:

- $A_T$  = oppervlak van het trapezium [m<sup>2</sup>]



- $l_1$  = ondergrens van het trapezium [m]  
 $l_2$  = bovengrens van het trapezium [m]  
 $h_T$  = hoogte van het trapezium [m]

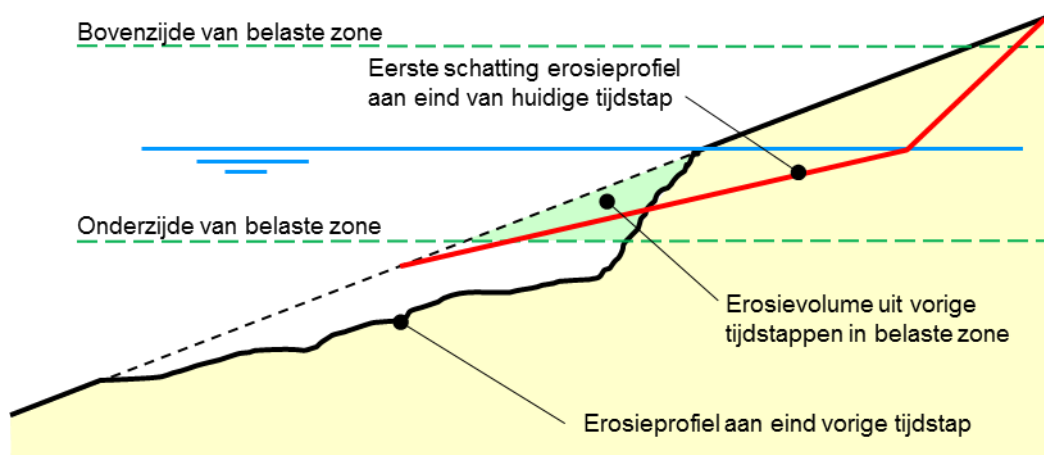
Voor zone B wordt op dezelfde wijze te werk gegaan. Opgelet moet worden bij de strook waar punt P2 in ligt, zijnde het knikpunt tussen erosieterras en erosieklif. In deze strook liggen er in feite twee trapezia en moeten de hoogtes van beide trapezia met de z-waarde van P2 worden berekend, zie Figuur 3.8 met  $z_{P2}$  als de hoogte van P2,  $z_{s,0}$  als de hoogte van de ondergrens van de strook waar punt P2 in ligt en  $z_{s,b}$  als de hoogte van de bovengrens.



Figuur 3.8 Voorbeeld van het opsplitsen van het erosieprofiel in de strook waar het knikpunt tussen het erosieterras en de erosieklif in zit

De methode om het erosievolume op te splitsen is eveneens op een talud met berm toe te passen. Omdat de berm precies in een of meerdere stroken ligt, ontstaan er ook trapezia.

De bijkomende erosie per strook in de huidige tijdstap (profiel i) moet vervolgens opgeteld worden bij de reeds ontstane erosie tijdens de voorafgaande tijdstappen (profiel i-1). Hier ontstaat echter het probleem dat het nieuw berekende erosieprofiel slecht aansluit op het erosieprofiel van de vorige tijdstappen. Dit is onderstaand nader toegelicht.

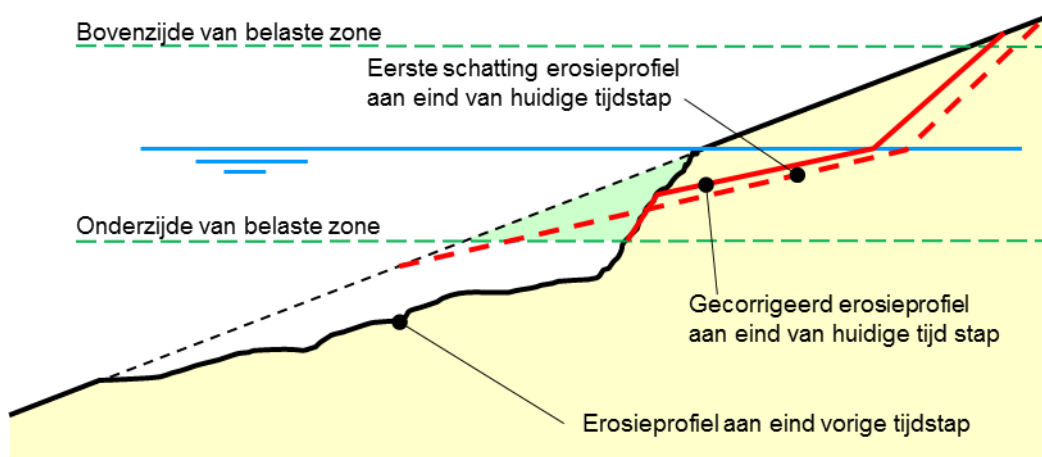


Figuur 3.9 Eerste schatting van het erosieprofiel aan het eind van de huidige tijdstap

De reeds aanwezige erosie aan het eind van de vorige tijdstap (erosieprofiel i-1), voor zover aanwezig in de belaste zone, wordt gebruikt als startpunt ( $V_{e0}$ ) voor het berekenen van de

erosie in de huidige tijdstep. Dit is het groene oppervlak in Figuur 3.9. Vervolgens wordt een eerste schatting berekend van erosieprofiel *i* (rode lijn), met de geschematiseerde vorm. Er valt te zien dat er lokaal minder erosie kan zijn volgens het erosieprofiel *i*, dan de aanwezige erosie volgens profiel *i*-1. In de figuur is bijvoorbeeld te zien dat op het niveau van de onderzijde van de belaste zone er al flink wat erosie was (profiel *i*-1), terwijl volgens de eerste schatting van erosieprofiel *i* er maar heel weinig erosie zou moeten zijn.

Hiervoor moet gecorrigeerd worden, omdat we ervan uitgaan dat er geen sedimentatie in het erosieprofiel plaatsvindt. Ook is aangenomen dat het erosieprofiel altijd ongeveer dezelfde vorm heeft. Dat houdt verband met de kracht van de golven, die geconcentreerd is rond de waterlijn. Ter hoogte van het terras hebben de golven nauwelijks kracht om erosie te veroorzaken. Ook boven de klif kunnen de golven nauwelijks erosie veroorzaken. Daar waar er in profiel *i*-1 al meer erosie was dan volgens de eerste schatting van erosieprofiel *i*, wordt ervan uitgegaan dat er geen extra erosie is ten opzichte van het erosieprofiel *i*-1. In Figuur 3.10 is dit weergegeven. Hier volgt profiel *i* dus de lijn van profiel *i*-1, als de eerste schatting van het profiel *i* links van profiel *i*-1 ligt. Vervolgens wordt het erosieprofiel *i* evenwijdig zeewaarts verschoven om te zorgen dat het bijkomende erosievolume in de huidige tijdstep klopt met het berekende bijkomende erosievolume  $\Delta V_e$ . Dit wordt gedaan in een iteratie, om de juiste mate van verschuiving te berekenen.



Figuur 3.10 Gecorrigeerd erosieprofiel aan het eind van de huidige tijdstep

Uiteindelijk wordt de horizontale erosiediepte  $d_e$  bepaald, als de gemiddelde erosiediepte per strook. Dit wordt in feite in elke tijdstep opnieuw berekend voor alle stroken:

$$d_{e,S} = \frac{V_{e,S}}{h_{strook}} \tag{3.6}$$

met:

- $d_{e,S}$  = horizontale erosiediepte, opgeslagen per strook [m]
- $V_{e,S}$  = erosievolume, opgeslagen per strook [ $m^3/m$ ]
- $h_{strook}$  = strookhoogte [m]

### 3.7 Stap 9: Aangepaste controle op doorbraak kleilaag (falen kleilaag) en op doorbraak dijk (falen dijk)

Met de nieuwe aanpak kan heel gemakkelijk de check op doorbraak van de kleilaag, of de dijk, worden uitgevoerd. Omdat de erosiediepten per strook worden opgeslagen, kan hiermee direct worden gecontroleerd of de erosiediepte al groter is dan de horizontale kleilaagdikte. Omdat de erosiediepte hier de horizontale afstand is tussen het oorspronkelijke profiel in een bepaalde strook en het geërodeerde profiel, wordt dit vergeleken met de horizontale kleidikte:  $d_c/\sin\alpha$ .

Ook een doorbraak van de dijk kan gemakkelijk worden gecontroleerd. Daarvoor wordt de gemiddelde breedte van de dijk ter hoogte van het midden van de strook bepaald. Het falen van de dijk is gedefinieerd als de situatie waarbij er zoveel erosie is dat de waterstand boven het resterende dijkprofiel staat.

Opgemerkt moet worden dat voor de erosiediepte de gemiddelde erosiediepte per strook wordt genomen.



## 4 Testcases en voorbeelden

Voor het beoordelen van de nieuwe code zijn een aantal testcases doorgerekend, waarvan er drie zijn gerapporteerd in dit rapport. Testcase 1 heeft een constante waterstand en constante golfeigenschappen. Testcase 2 is met een variërende waterstand, maar met constante golfeigenschappen. Testcase 3 heeft een variërende waterstand en variërende golfeigenschappen. Een overzicht is weergegeven in Tabel 4.1. Er zijn in totaal elf testcases doorgerekend, met verschillende hydraulische randvoorwaarden. Een ervan is met een talud met berm gedaan, met de hydraulische input van Testcase 3. Daarbij is de bermhoogte op de maximale waterstand gekozen, zoals gebruikelijk bij een dijkontwerp. Bij alle testcases is op basis van engineering judgement geconcludeerd dat het rekenmodel nu veel beter werkt dan vóór de aanpassingen.

Tabel 4.1 Overzicht testcases

Testcase	Waterstand	Golfeigenschappen	Paragraaf
1	constant	constant	4.1
2	stormverloop met getij	constant	4.2
3	stormverloop met getij	variërend (afhankelijk van waterstand)	4.3

Verder is in dit hoofdstuk ook de invloed van de strookhoogte uitgelegd (zie Paragraaf 4.4).

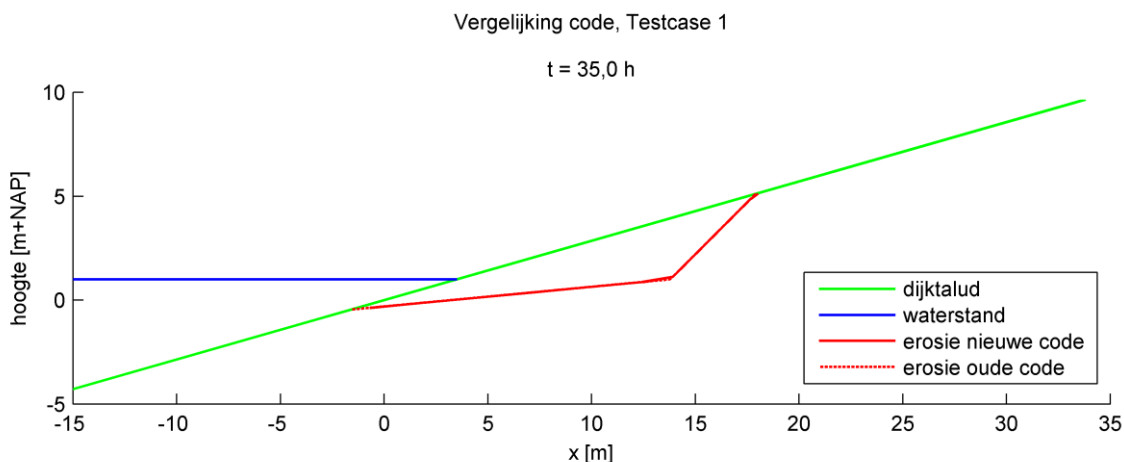
In Paragraaf 4.5 is een grootschalige modelproef nagerekend, waarbij verschillende waterstanden zijn aangehouden.

In Paragraaf 4.6 zijn de beperkingen van het rekenmodel genoemd en aanbevelingen gegeven.

### 4.1 Testcase 1: constante waterstand en constante golfeigenschappen

De eerste testcase is gedaan met een constante waterstand en constante golfhoogte en golfperiode. Er is gerekend met een waterstand van  $h = 1,0$  m, een significante golfhoogte van  $H_s = 1,5$  m en een golfperiode van  $T_p = 4,9$  s, dus met een golfsteilheid van  $s_{op} = 4\%$  (zie ook Figuur A.1).

Deze testcase is gekozen om te controleren of de nieuwe methode voor een constante waterstand dezelfde resultaten oplevert als de oude methode. Aan de hand van Figuur 4.1 is te zien dat dit inderdaad het geval is. Het ontstane erosieprofiel na afloop van de storm heeft dezelfde afmetingen: de lijnen liggen perfect op elkaar. De erosie voor een tijdreeks met stappen van 5 uur is te zien in Bijlage A.2.1. Omdat het erosieprofiel met de gemiddelde erosiediepten per strook wordt getekend, is de knik tussen het erosieterras en de erosieklif niet helemaal perfect en sluit het erosieprofiel niet altijd helemaal aan op het dijktalud. Dit beïnvloedt de kwaliteit van het eindresultaat echter niet.



Figuur 4.1 Vergelijking van de bepaalde erosieprofielen met de nieuwe code en de oude code voor Testcase 1 met een constante waterstand en constante golfeigenschappen na 35 uur

De resultaten voor de erosiediepte haaks op het dijktaalud  $E_p$  (zie Figuur 2.2) en het totale erosievolume  $V_e$  zijn gegeven in Tabel 4.2. Aan de hand van deze waarden is te zien dat de resultaten van het nieuwe model in dit voorbeeld goed overeenkomen met de resultaten van het oude model.

Tabel 4.2 Resultaten voor de erosiediepte haaks op het dijktaalud en het erosievolume voor Testcase 1 berekend met de oude en de nieuwe code

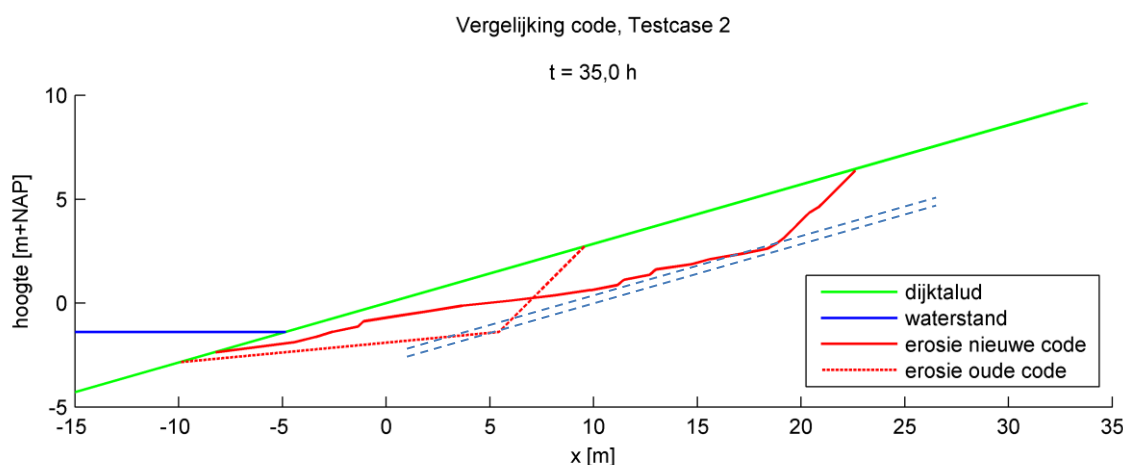
	Nieuwe code	Oude code
Erosiediepte $E_p$ [m]	2,82	2,83
Erosievolume $V_e$ [m <sup>3</sup> /m]	28,72	28,63

## 4.2 Testcase 2: variërende waterstand en constante golfeigenschappen

In Testcase 2 is een variërende waterstand aangehouden, maar met constante golfeigenschappen. Voor de variërende waterstand is een stormverloop gebruikt, zoals in de Westerschelde kan voorkomen met een stormopzet en een getij (zie Figuur A.2). De maximale waterstand is  $h_{max} = 5,2$  m+NAP, de getijrange is  $h_{getij} = 3,75$  m en de stormduur is  $t_{storm} = 35$  uur. De golfeigenschappen zijn dezelfde als bij Testcase 1.

In Figuur 4.2 is de erosie aan het eind van de storm gegeven, berekend met de nieuwe en met de oude code. Het valt op dat de erosie, berekend met de nieuwe methode, is uitgesmeerd over het hele talud omdat er erosie optrad bij alle waterstanden van -1,38 m+NAP tot 5,2 m+NAP. Aan de hand van de twee gestippelde lijnen kan worden gezien dat de erosiediepte volgens de nieuwe methode wat kleiner is dan de erosiediepte volgens de oude methode.

In Bijlage A.2.2 zijn erosieprofielen te zien van elke 5 uur tijdens de storm.



Figuur 4.2 Vergelijking van de bepaalde erosieprofielen met de nieuwe code en de oude code voor Testcase 2 met een variërende waterstand en constante golfeigenschappen na 35 uur

In Tabel 4.3 is de maximale erosiediepte haaks op het dijktaalud en het totale erosievolume gegeven. Het valt op dat de resultaten voor de oude code hetzelfde zijn als bij Testcase 1. Dit komt omdat de golfeigenschappen hetzelfde zijn en de erosie volgens de oude methode alleen afhankelijk is van de golfeigenschappen. Het sleept het hele erosievolume mee met de veranderende waterstand. Bij de nieuwe methode wordt de erosie echter over het hele talud verdeeld, juist daar, waar de erosie ook optreedt. Verder blijkt het totale erosievolume volgens de nieuwe methode veel groter te zijn dan bij de oude methode. Het erosievolume is bij de oude methode kleiner omdat de bijkomende erosie kleiner wordt, hoe groter het al aanwezige erosievolume is. Bij de oude methode wordt altijd het totale erosievolume meegesleept naar de nieuwe waterstand, waardoor de bijkomende erosie steeds kleiner wordt. Bij de nieuwe methode wordt alleen het reeds aanwezige erosievolume van de belaste zone van de tijdstap beschouwd in de berekening van de bijkomende erosie. Daardoor is het al aanwezige erosievolume steeds wat kleiner dan volgens de oude methode en is dus de bijkomende erosie groter.

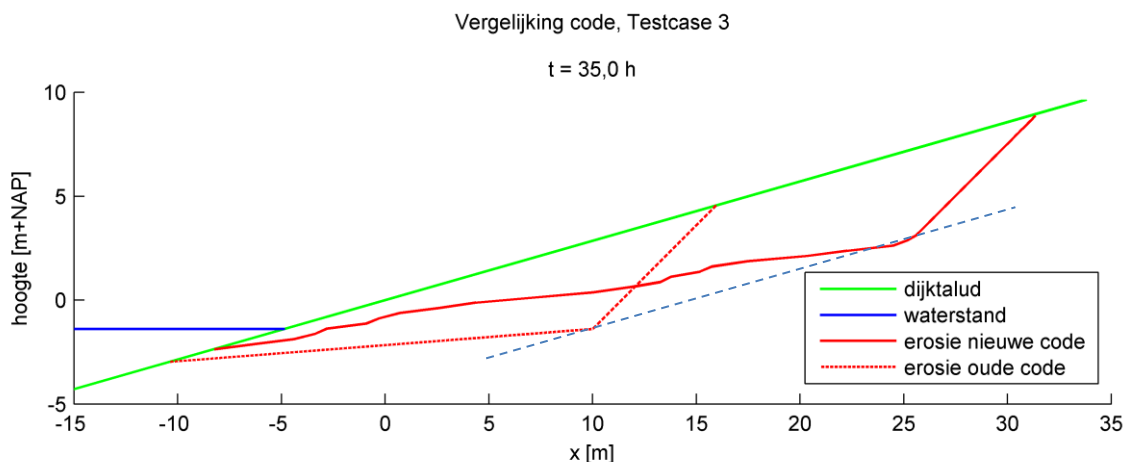
Het uiteindelijke erosieprofiel dat berekend is met de nieuwe rekenmethode ziet er veel realistischer uit dan het profiel volgens de oude methode.

Tabel 4.3 Resultaten voor de erosiediepte haaks op het dijktaalud en het erosievolume voor Testcase 2 berekend met de oude en de nieuwe code

	Nieuwe code	Oude code
Erosiediepte $E_p$ [m]	2,53	2,83
Erosievolume $V_e$ [m <sup>3</sup> /m]	44,12	28,63

#### 4.3 Testcase 3: variërende waterstand en variërende golfeigenschappen

In Testcase 3 zijn zowel de waterstand als de golfeigenschappen gevarieerd. Voor het waterstandsverloop is hetzelfde aangehouden als in Testcase 2. De golfhoogte heeft een maximale waarden van  $H_{s,max} = 2,5$  m en is gerelateerd aan de waterstand: bij lagere waterstanden is de golfhoogte kleiner. Voor de golfsteilheid is een constante waarde van  $s_{op} = 4\%$  aangehouden zodat de golfperiode een maximum heeft van  $T_{p,max} = 6,3$  s. Het verloop van de waterstand, de golfhoogte en de golfperiode is in Figuur A.3 te zien.



Figuur 4.3 Vergelijking van de bepaalde erosieprofielen met de nieuwe code en de oude code voor Testcase 3 met een variërende waterstand en variërende golfeigenschappen na 35 uur

In Figuur 4.3 zijn de erosieprofielen volgens de nieuwe en de oude code afgebeeld na 35 uur. Het valt weer op dat de erosie volgens de nieuwe code over het hele talud is verdeeld. Het verschil tussen de erosiediepte volgens de nieuwe en volgens de oude code is in dit geval bijna niet te zien (zie de gestippelde lijn). De numerieke resultaten van de erosiediepte, haaks op het talud, laten zien dat de erosie volgens de nieuwe code echter iets groter is dan volgens de oude code (zie Tabel 4.4). Ook voor deze testcase zijn er afbeeldingen van elke 5 uur tijdens de storm te zien in Bijlage A.2.3.

Het uiteindelijke erosieprofiel dat berekend is met de nieuwe rekenmethode ziet er veel realistischer uit dan het profiel volgens de oude methode. Dit geldt ook voor de erosie op de tussenliggende tijdstippen.

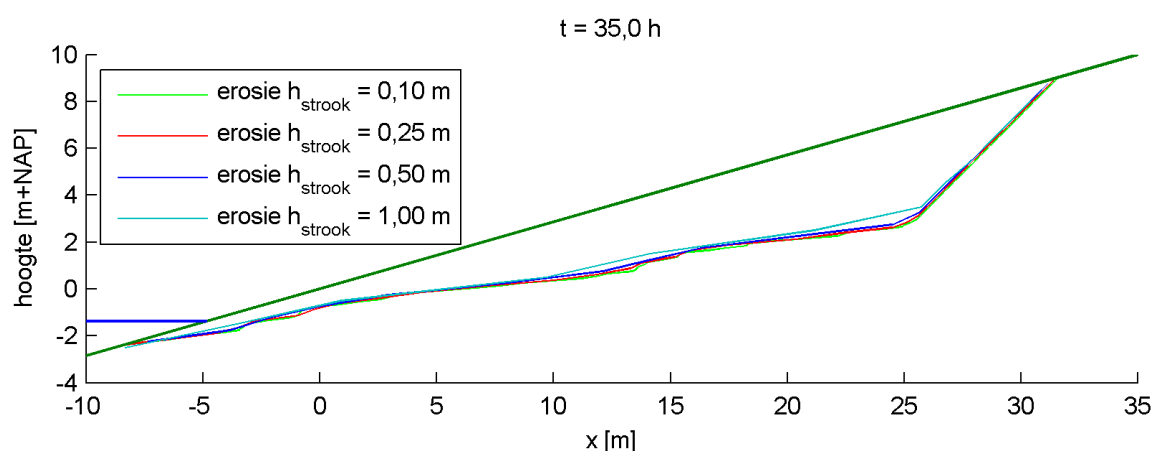
Tabel 4.4 Resultaten voor de erosiediepte haaks op het dijktaalud en het erosievolume voor Testcase 3 berekend met de oude en de nieuwe code

	Nieuwe code	Oude code
Erosiediepte $E_p$ [m]	4,20	4,15
Erosievolume $V_e$ [m <sup>3</sup> /m]	84,57	55,94

## 4.4 Invloed van de strookhoogte

De hoogte van de horizontale stroken kan vrij worden gekozen in het rekenmodel. Daarom is hier de invloed van de strookhoogte onderzocht. Testcase 3 is herhaald met de strookhoogte van 0,1 m, 0,5 m en 1,0 m. In Figuur 4.4 is te zien dat het verschil tussen de erosie van strookhoogte van 0,1 m, 0,25 m en 0,5 m klein is. De resultaten van de erosiediepte haaks op het talud (Tabel 4.5) wijken voor deze twee cases slechts ca. 3% van elkaar af. De erosiediepte met een strookhoogte van 1,0 m wijkt echter duidelijk meer af, namelijk 12%.





Figuur 4.4 Vergelijking van het berekende erosieprofiel met verschillende strookhoogten  $h_{\text{strook}}$

Met deze vergelijking kan worden geconcludeerd dat een strookhoogte van 0,1 m, 0,25 m of 0,5 m een nauwkeurig resultaat geven. Een strookhoogte van 1,0 m is echter te groot, want dit geeft een minder nauwkeurig resultaat. De strookhoogte van 1,0 m wordt daarom niet aangeraden.

Het wordt ook niet aangeraden om een strookhoogte van 0,1 m te kiezen, omdat dan het aantal stroken te groot is en daardoor de rekentijd van het rekenmodel duidelijk toeneemt (zie Tabel 4.5). Dit is vooral belangrijk voor probabilistische berekeningen, als met bv. een miljoen samples wordt gerekend. Het is verder ook afhankelijk van de dijkhogte en de golfcondities, maar het is aangenomen dat een strookhoogte van 0,25 m een redelijk keuze is voor de meeste gevallen. Bij deterministische berekeningen zou ook met een kleinere strookhoogte kunnen worden gerekend.

Tabel 4.5 De erosiediepte haaks op het dijktalud  $E_p$  berekend met verschillende strookhoogten  $h_{\text{strook}}$

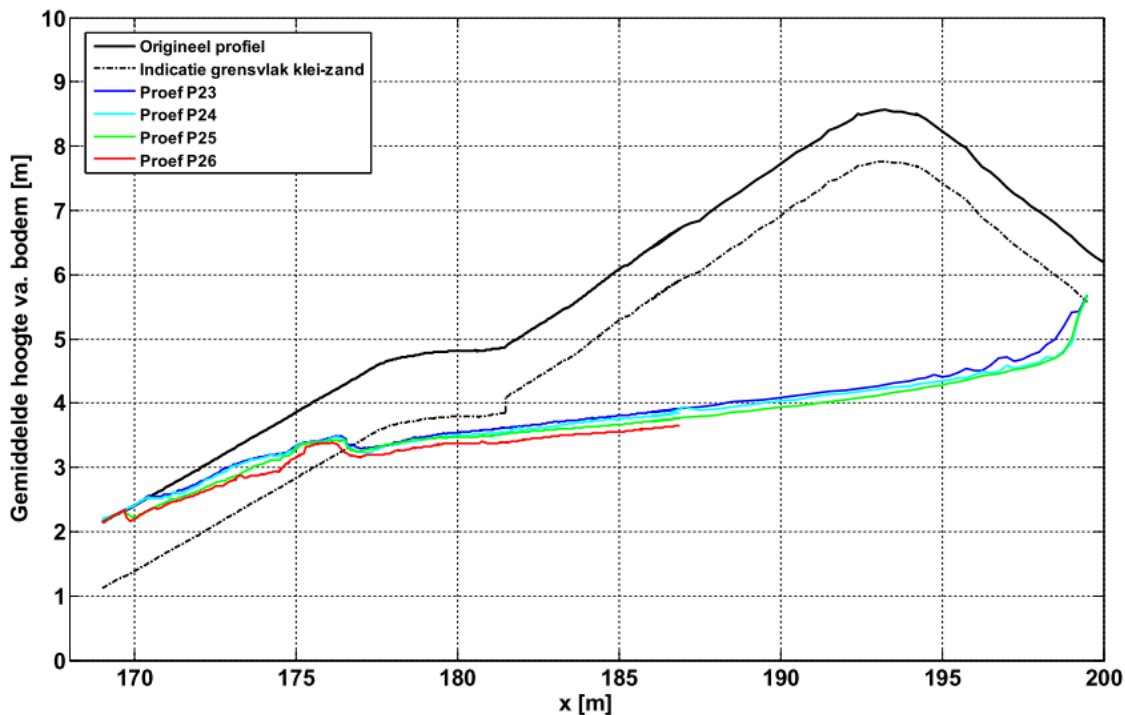
	$h_{\text{strook}} = 0,10$ m	$h_{\text{strook}} = 0,25$ m	$h_{\text{strook}} = 0,5$ m	$h_{\text{strook}} = 1,0$ m
Erosiediepte $E_p$ [m]	4,30	4,20	4,08	3,70
Rekentijd (voor 1000 samples) [s]	23,8	6,5	4,2	3,2

#### 4.5 Narekenen van een grootschalige modelproef in de Deltagoot

Om de nauwkeurigheid van het rekenmodel in te kunnen schatten, is een grootschalige modelproef nagerekend. Het is helaas het enige grootschalige modelonderzoek, waar de waterstand veranderd is, dat ons bekend is. De modelproef is uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares en gedocumenteerd in Wolters en Klein Breteler (2011). Bij het grootste deel van deze proeven is dezelfde waterstand aangehouden, maar afsluitend zijn proeven met twee lagere waterstanden uitgevoerd. In Figuur 4.5 zijn de gemeten erosieprofielen van de proeven 23 t/m 26 met een lagere waterstand te zien.

Het erosieprofiel loopt zowel door klei als door zand. Gezien het doel van het huidige rapport, namelijk een rekenmodel voor klei-erosie, was een proef met alleen klei relevanter. Helaas is die niet beschikbaar.

Tijdens het eerste deel van de proeven (t/m proef 22) is een waterstand van 4,70 m aangehouden, dezelfde hoogte als de berm. In proef 23 en proef 24 was een waterstand van 4,20 m gebruikt over een proefduur van 0,5 uur. Proef 25 en 26 hadden een waterstand van 3,90 m met een duur van 1 uur in proef 25 en 2 uur in proef 26. De aangehouden waarden van de golfcondities zijn gegeven in Tabel 4.6.



Figuur 4.5 Resultaten van erosiemetingen van een grootschalige modelproef (bron: Wolters en Klein Breteler (2011), proeven 23 t/m 26)

De proeven zijn nagerekend met het rekenmodel door te starten vanaf het oorspronkelijke dijkprofiel. Eerst is er gedurende enkele uren gerekend met een vaste waterstand en golfcondities totdat een erosieprofiel was verkregen dat lijkt op het gemeten profiel aan het eind van proef 22. Daarna zijn de proeven 23 t/m 26 nagerekend met de iets lagere waterstand.

Tabel 4.6 Overzicht van de aangehouden waarden voor het narekenen van de modelproeven met het rekenmodel

Proef	Waterstand h [m tov gootbodern]	Significante golfhoogte H <sub>s</sub> [m]	Piekperiode T <sub>p</sub> [s]	Duur [h]
proeven 1 t/m 22	4,70	1,60	5,58	5,5
proef 23	4,20	1,46	5,29	0,5
proef 24	4,20	1,46	5,29	0,5
proef 25	3,90	1,40	5,24	1,0
proef 26	3,90	1,45	5,19	2,0

Al vrij snel kwam de erosie in het zand en moest noodgedwongen met het rekenmodel de zanderosie doorgerekend worden. Het rekenmodel kan hier nog niet goed mee overweg, omdat hiervoor ook de terrasbreedte B<sub>t</sub> nodig is. Dit is momenteel nog niet in het rekenmodel

opgenomen. Er is voorlopig met een work-around gewerkt: het rekenmodel rekent nu voorlopig met de terrasbreedte van het erosieprofiel van de vorige tijdstep.

Uit te rekenresultaten blijkt dat de berekende erosie duidelijk groter is dan de gemeten erosie. Het erosieterras daalt volgens het rekenmodel met een snelheid van 0,9 m in 4 uur, dus ca. 0,23 m/uur. Volgens de modelproeven daalt het erosieterras 0,6 m in 4 uur, dus ca. 0,15 m/uur.

Hoewel er een duidelijk verschil is tussen de rekenresultaten en metingen, wordt dit niet gezien als een extreem groot verschil. Zo'n verschil is normaal bij dergelijke complexe erosieprocessen, zoals aan de hand van de spreiding van de erosiecoëfficiënt kan worden gezien. Omdat hierbij een deterministische berekening is uitgevoerd, is met de gemiddelde waarde voor de erosiecoëfficiënt gerekend. Het komt waarschijnlijk mede omdat het rekenmodel met de erosieformule voor zand rekent, zodra de kleilaag is doorbroken. Aan de hand van Figuur 4.5 kan worden gezien dat dit niet helemaal realistisch is. Daar is te zien dat tijdens de proeven met verlaagde waterstand de golfbelasting voor een belangrijk deel op de kleilaag aangrijpt. De erosie van het terras verloopt daardoor in realiteit wat langzamer.

In het rekenmodel wordt de erosie met de formule van de zandkern berekend, zodra de kleilaag is doorbroken. Er wordt dan aangenomen dat het erosieproces gedomineerd wordt door de erosie van het zand. Bij stijgende waterstand is dit waarschijnlijk juist, maar bij een dalende waterstand hoeft dit niet het geval te zijn. Tijdens de modelproeven met de verlaagde waterstand werd de erosie kennelijk gedomineerd door de kleilaag. Als de waterstand verhoogd zou zijn geweest, was de erosie wel gedomineerd door de erosie in het zand, omdat de belasting dan rechtstreeks op de zandkern kan inwerken. Het wordt aanbevolen om dit aspect in het rekenmodel op te nemen.

De conclusie van dit voorbeeld is dat het rekenmodel de erosie van de dijk iets overschat, vergeleken met het grootschalige modelonderzoek, omdat er gerekend wordt met formules voor zand. Daarnaast geldt dat de coëfficiënten in de erosieformules ook een spreiding hebben, terwijl hier gerekend is met de gemiddelde waarde van de coëfficiënten. Omdat dit een veilig resultaat is, wordt dit voorlopig geaccepteerd.

#### 4.6 Beperkingen van het nieuwe rekenmodel

Het aangepaste rekenmodel voor de erosie van een dijk is nu beter geschikt voor een variërende waterstand. Er zijn echter nog enkele punten die verbeterd kunnen worden, namelijk:

- Het rekenmodel is nu geschikt voor een dijktaalud met een berm. Als het erosieprofiel door de kruin en het binnentalud gaat, is het nu nog niet mogelijk dit met de code te berekenen. Het principe kan worden overgenomen voor een dijkgeometrie met kruin en binnentalud. De code moet nog worden aangepast voor een berekening met een gehele dijkgeometrie.
- Het rekenmodel is tot nu alleen aangepast voor de erosie van klei. De omgang met zand bij een variërende waterstand wordt nu nog niet goed gedaan. De erosieformule voor zand bevat de terrasbreedte  $B_t$  om de invloed van de al aanwezige erosie mee te nemen. Het rekenmodel rekent nu voorlopig met de terrasbreedte van het erosieprofiel van de vorige tijdstep. Aanbevolen wordt het rekenmodel zo aan te passen dat het ook correct kan rekenen met een combinatie van klei en zand.



## 5 Samenvatting en conclusies

Het is opgevallen dat het bestaande rekenmodel voor dijkerosie, dat ontwikkeld is in het kader van het onderzoek van WTI-2017 (zie Kaste en Klein Breteler, 2014), niet goed omgaat met een variërende waterstand. Daarom is een nieuwe aanpak bedacht die geïmplementeerd is in het bestaande rekenmodel.

Om met een variërende waterstand goed om te gaan, wordt in de nieuwe aanpak in navolging van de aanpak van PBZ (2013) het dijprofiel in horizontale stroken opgedeeld. De berekening van de erosie gebeurt in tijdstappen. In elke tijdstap wordt afhankelijk van de waterstand de belaste zone bepaald. Vervolgens wordt gekeken hoe groot het al aanwezige erosievolume in de belaste zone is. Dit is nodig, om de bijkomende erosie te berekenen met de nieuwe formule van Mourik (2015). Door ook de gemiddelde erosiediepte per strook te berekenen, kan eenvoudig gecontroleerd worden of de kleilaag al is doorbroken.

Er zijn enkele testcases met de nieuwe aanpak doorgerekend. Het aangepaste rekenmodel lijkt nu de erosie veel beter te berekenen voor een variërende waterstand. Voor een constante waterstand geeft het nieuwe model dezelfde resultaten als het oude. Helaas zijn er onvoldoende proefresultaten uit grootschalig modelonderzoek die geschikt zijn om het rekenmodel te controleren. De conclusie over de kwaliteit van het nieuwe rekenmodel is daarom getrokken op basis van engineering judgement aan de hand van de doorgerekende testcases.

Er is slechts één onderzoek gevonden, waarbij de erosie van een talud van klei en zand is gemeten tijdens een dalende waterstand. Het betreft een grootschalige modelproef van Wolters en Klein Breteler (2011). Bij deze proeven is de waterstand eerst gedurende vele proeven constant, maar is daarna verlaagd voor de laatste 4 proeven. Vergeleken met de modelproeven wordt met het nieuwe rekenmodel de erosie overschat. Het is echter moeilijk om de uitkomsten te vergelijken, omdat tijdens het modelonderzoek al vrij snel de kleilaag was doorgebroken en de erosie gedomineerd werd door de erosie van het zand. Het rekenmodel rekt nog niet goed voor zo'n situatie. Daarnaast geldt dat de coëfficiënten in de erosieformules ook een spreiding hebben, terwijl hier gerekend is met de gemiddelde waarde van de coëfficiënten.

Omdat dit een veilig resultaat is, wordt dit voorlopig geaccepteerd.

Het nieuwe rekenmodel is tot nu toe alleen geschikt voor de erosie in een dijktalud met of zonder berm. Het model moet nog worden aangepast om de erosie in de kruin en het binnentalud ook goed te berekenen. Ook werkt de methode nog niet helemaal goed voor de erosie in zand, omdat de erosieformule voor zand anders is opgebouwd dan diegene voor klei. Aanbevolen wordt om deze tekortkomingen in de code op te lossen en de code aan te passen.

Samenvattend kan worden gezegd dat de nieuwe aanpak van het rekenmodel duidelijk beter omgaat met een variërende waterstand. Tijdens de doorgerekende cases bleek de erosiediepte  $E_p$  volgens het nieuwe rekenmodel niet zoveel te verschillen met die van het oude rekenmodel. Desondanks wordt aanbevolen om in de toekomst met het nieuwe model te rekenen voor de erosie van een dijk met een variërende waterstand, omdat het erosieprofiel een stuk realistischer is en er daardoor meer vertrouwen is dat het rekenmodel het ook goed doet in andere cases.

Helaas kon het rekenmodel niet aan de hand van experimenteel onderzoek volledig worden geverifieerd. Daarom wordt aanbevolen verder te zoeken naar geschikte resultaten van grootschalig modelonderzoek voor de erosie van een dijk met een variërende waterstand of zulk onderzoek uit te voeren.

## 6 Referenties

- Kaste, D.L. en Klein Breteler, M. (2014):  
Sensitivity study into residual strength of dikes after block revetment failure, given as preliminary safety factor – WTI-2017.  
Deltares, rapport 1207811-010, august 2014.
- Klein Breteler, M., A. Capel, G. Kruse, G.C. Mourik en D.L. Kaste (2012):  
Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven - SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven.  
Deltares, rapport 1204200-008, mei 2012.
- Mourik, G.C. (2015):  
Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack – WTI2017.  
Deltares, rapport 1209437-017, januari 2015.
- PBZ (2013):  
Methode voor het berekenen van de erosie bij variërende waterstand, uitgewerkt in de vorm van een Excel spreadsheet “Klei2013 v01.xls”, opgesteld door R. Bosters.  
PBZ, 2013.
- Wolters, G. en Klein Breteler, M. (2011):  
Reststerkte van een dijk met steenzetting op een kleilaag; Meetverslag Deltagootproeven SBW-Reststerkte.  
Deltares, rapport 1202122-002, november 2011.



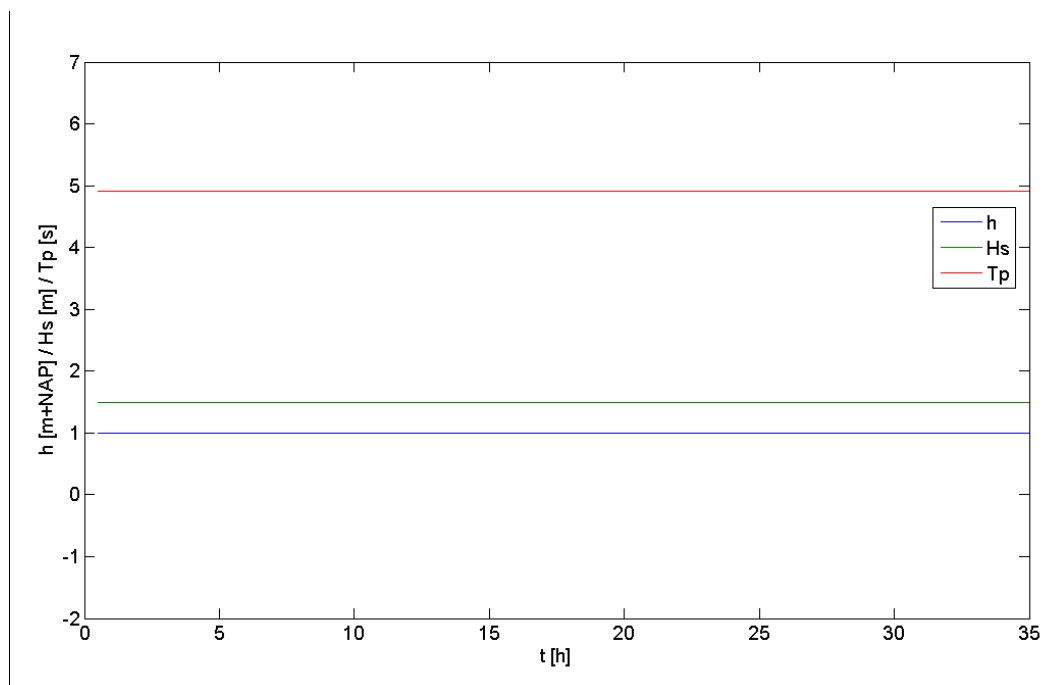


## A Testcases 1 t/m 3 in detail

In deze bijlage worden nog meer afbeeldingen getoond voor de drie voorgestelde testcases.

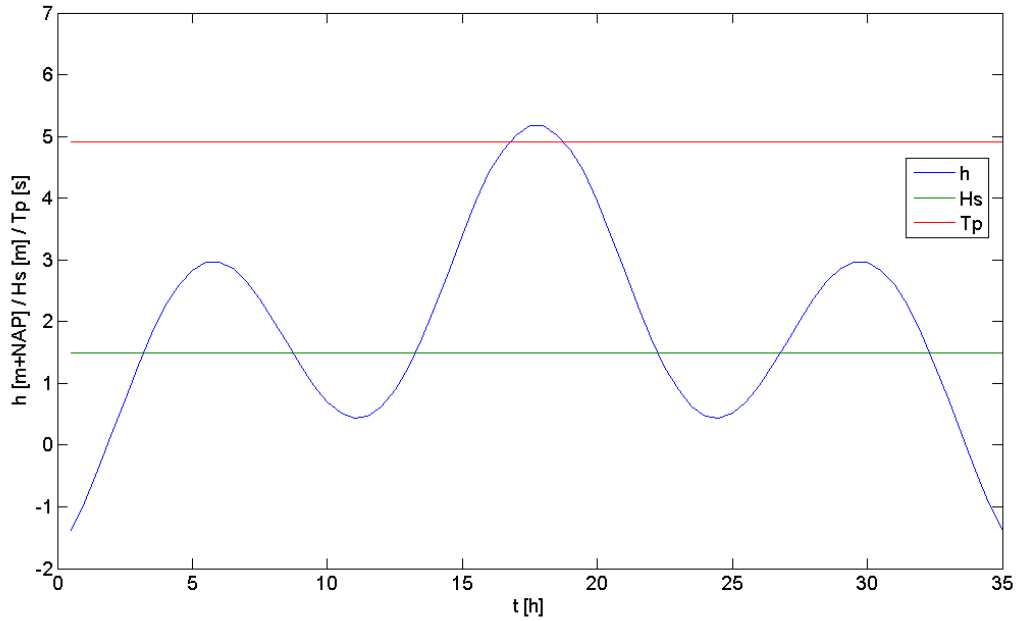
### A.1 Hydraulische gegevens

#### A.1.1 Hydraulische gegevens voor Testcase 1



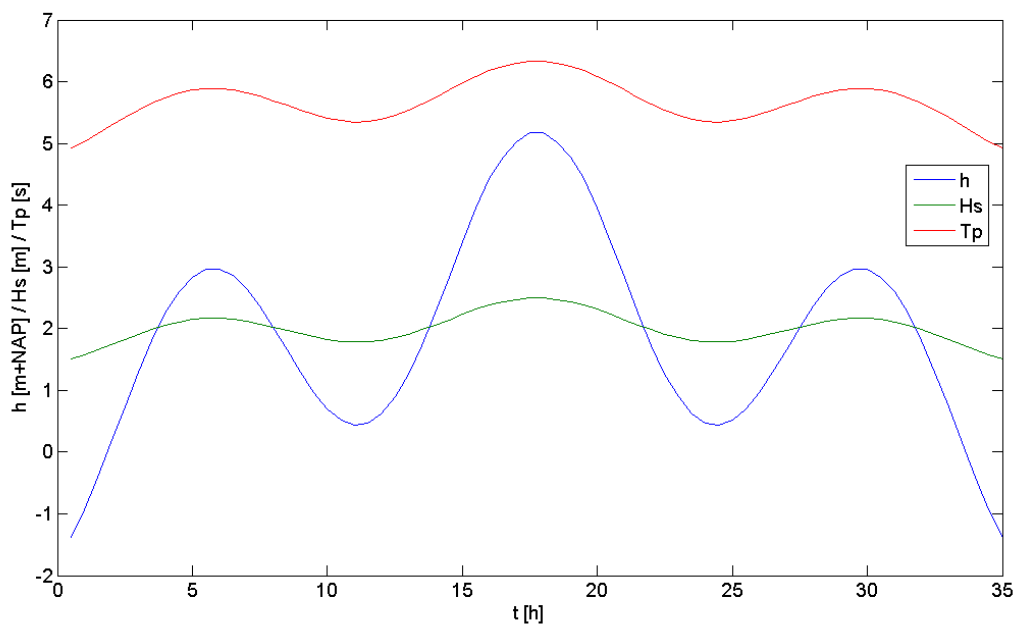
Figuur A.1 De hydraulische invoer voor de eerste testcase met een constante waterstand ( $h$ ) en constante golfhoogte ( $H_s$ ) en golfperiode ( $T_p$ )

## A.1.2 Hydraulische gegevens voor Testcase 2



Figuur A.2 De hydraulische invoer voor de tweede testcase met een variërende waterstand ( $h$ ) en constante golfhoogte ( $H_s$ ) en golfperiode ( $T_p$ )

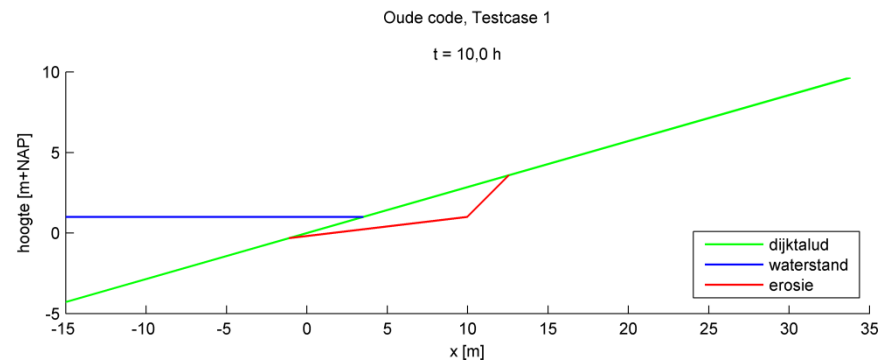
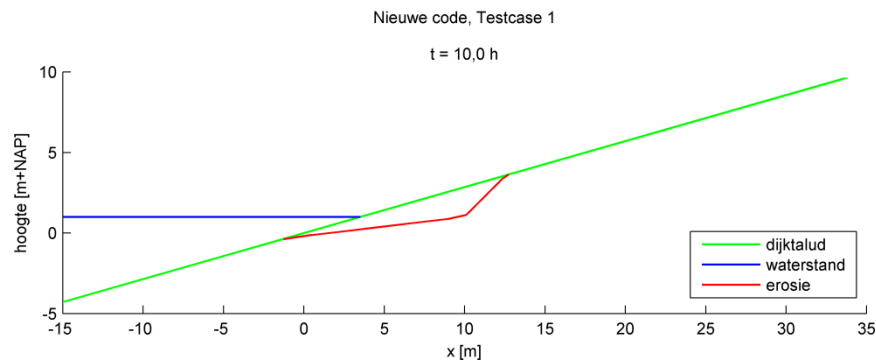
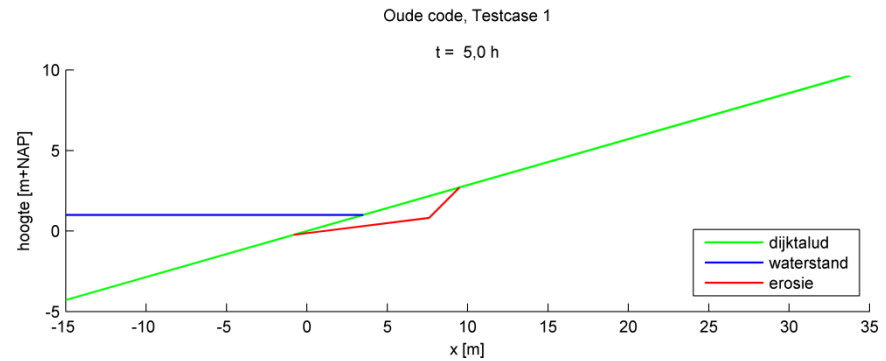
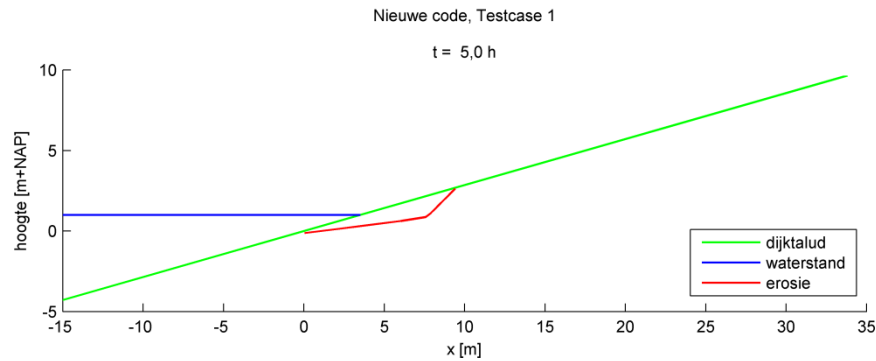
## A.1.3 Hydraulische gegevens voor Testcase 3

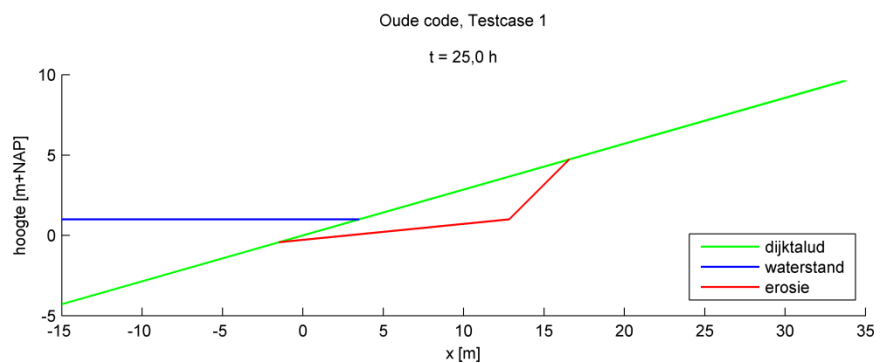
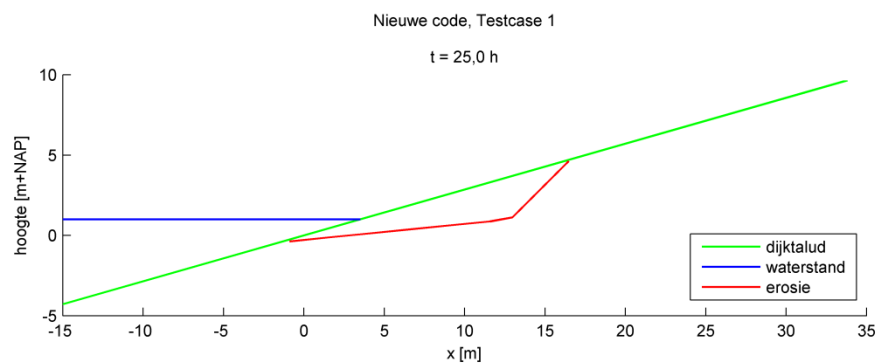
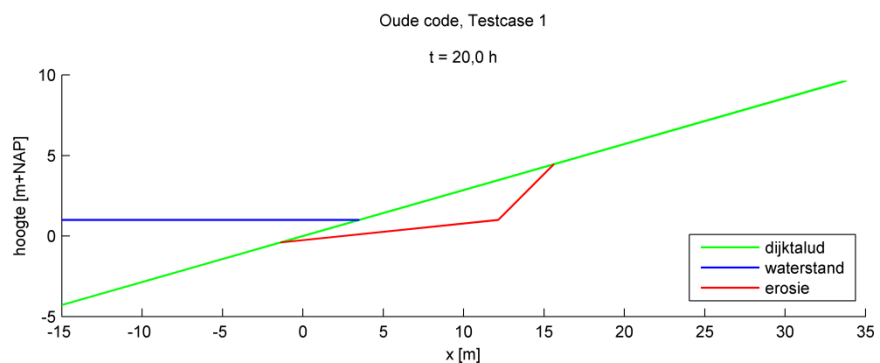
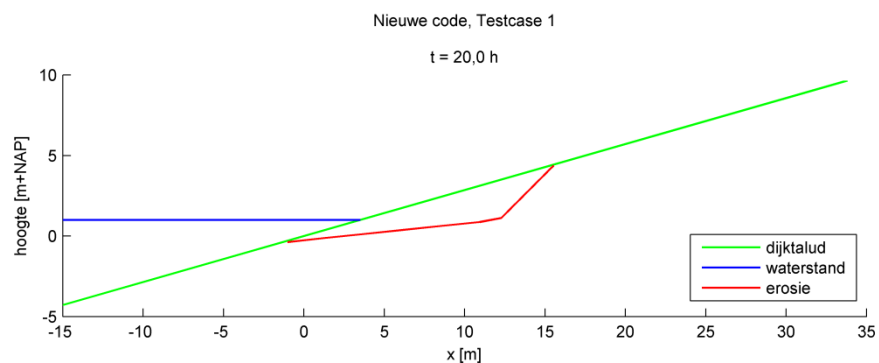
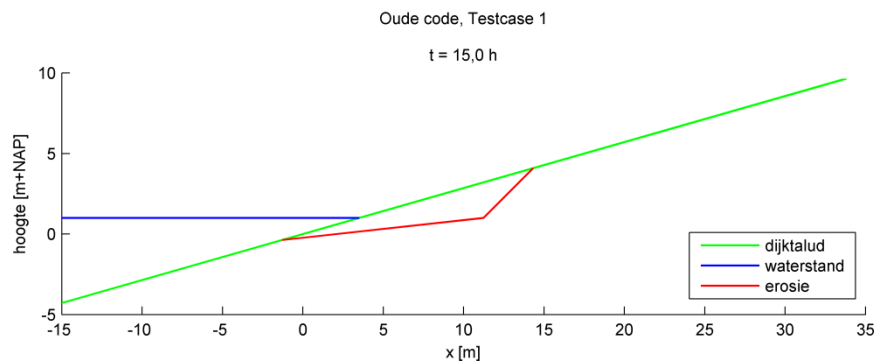
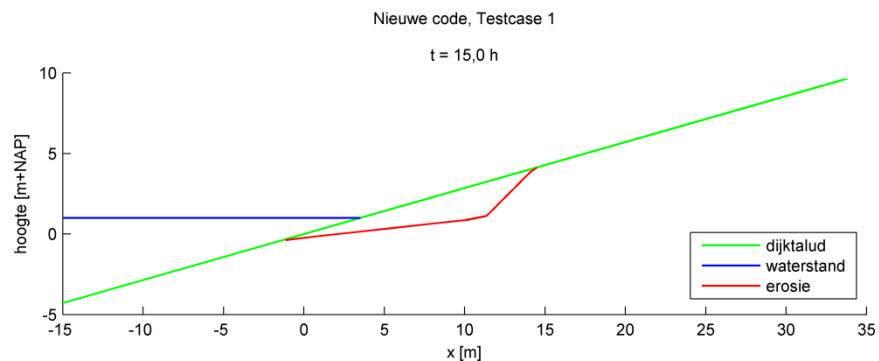


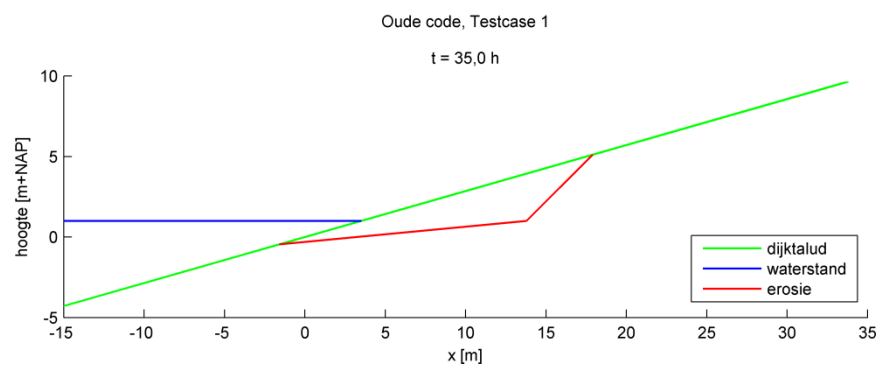
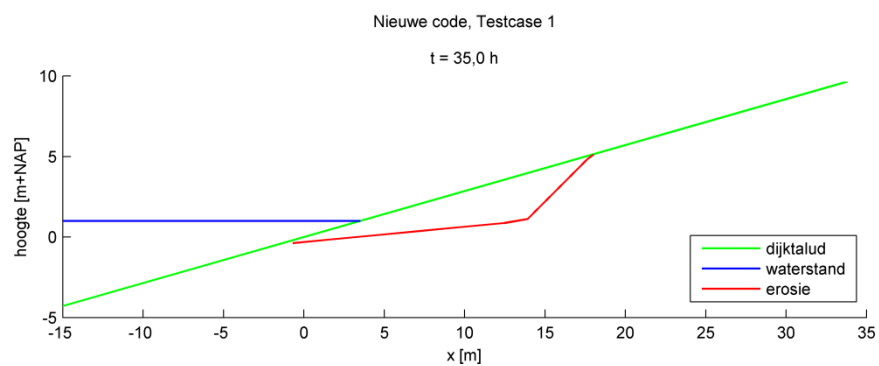
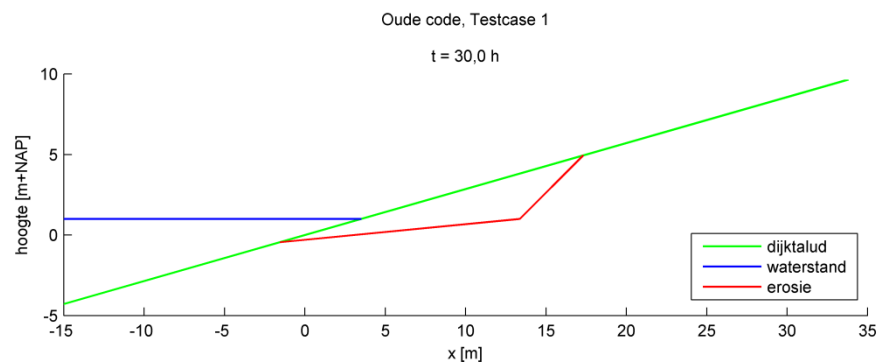
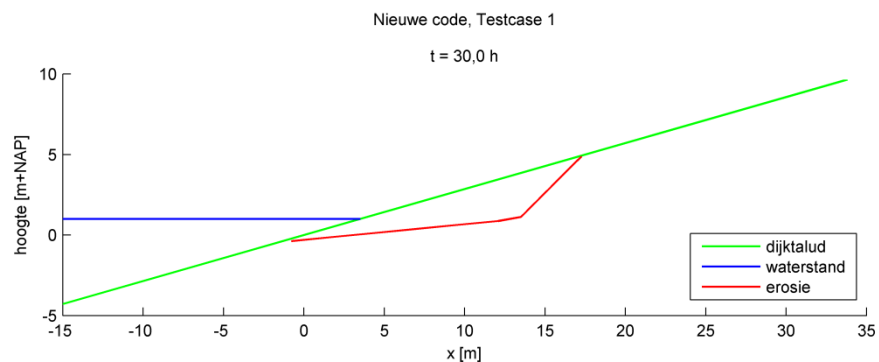
Figuur A.3 De hydraulische invoer voor de derde testcase met een variërende waterstand ( $h$ ) en variërende golfhoogte ( $H_s$ ) en golfperiode ( $T_p$ )

## A.2 Erosieprofielen in tijdreeksen

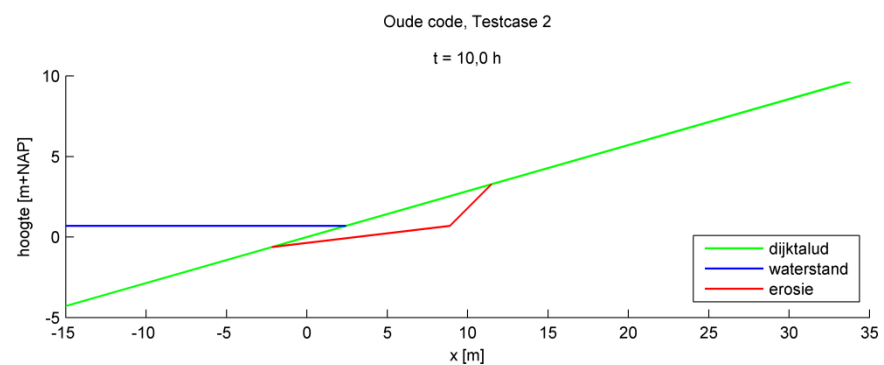
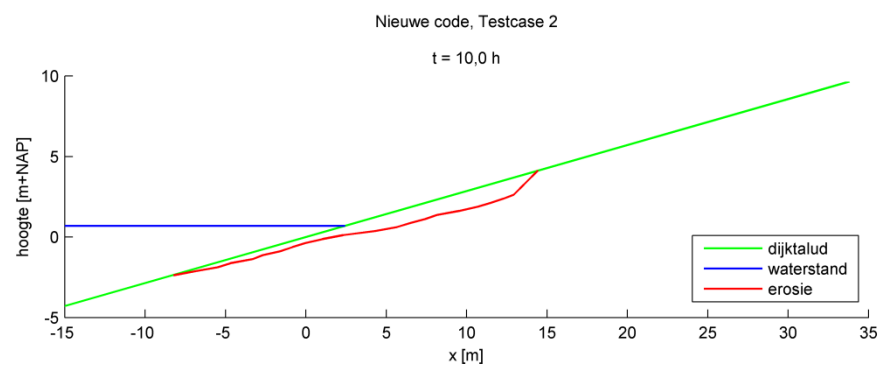
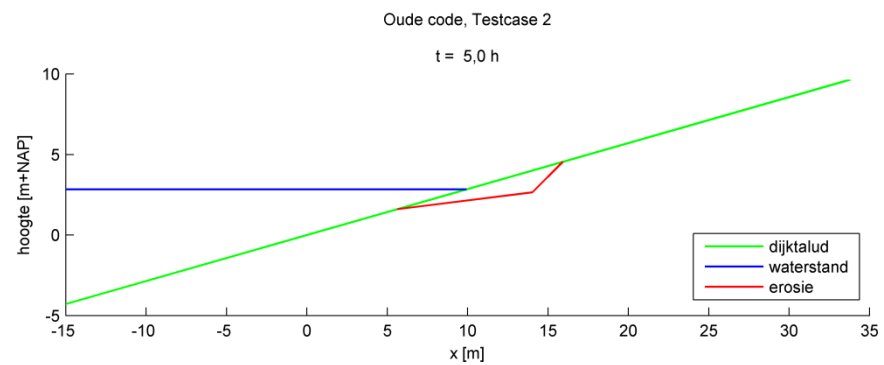
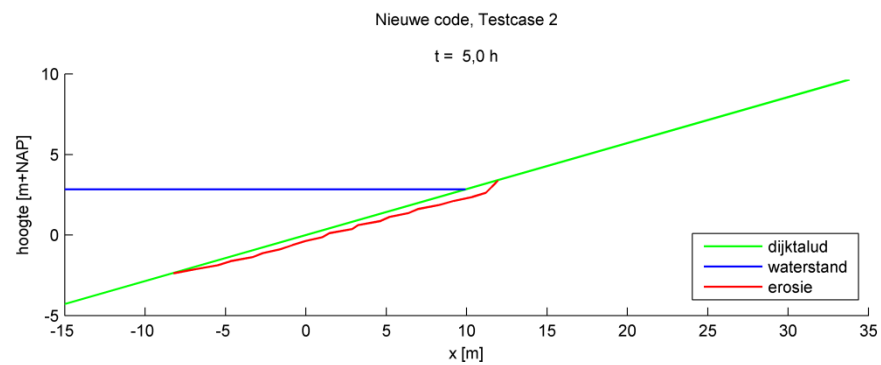
### A.2.1 Erosieprofielen van Testcase 1 elke 5 uur

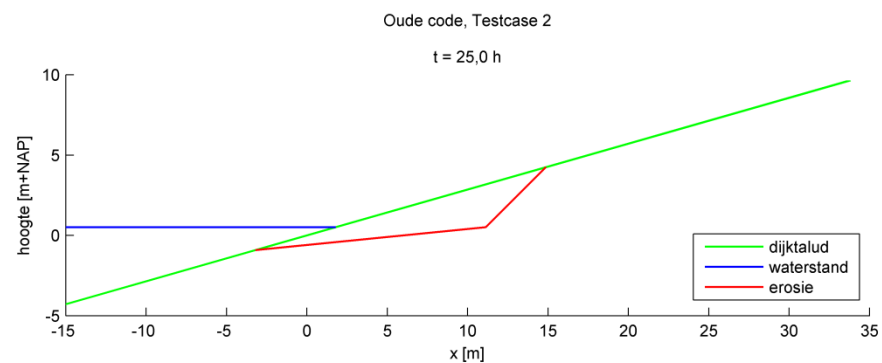
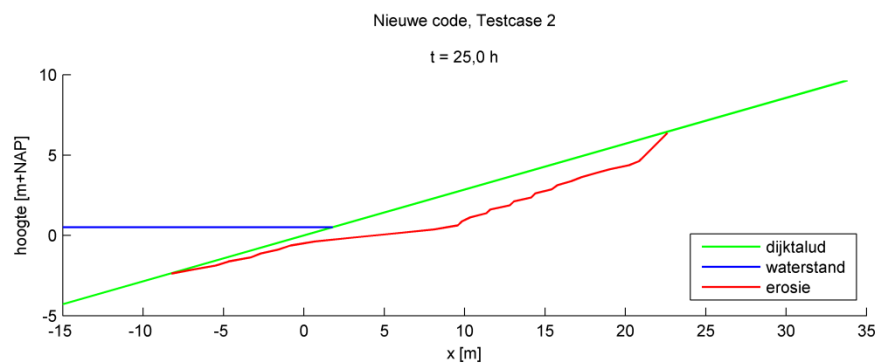
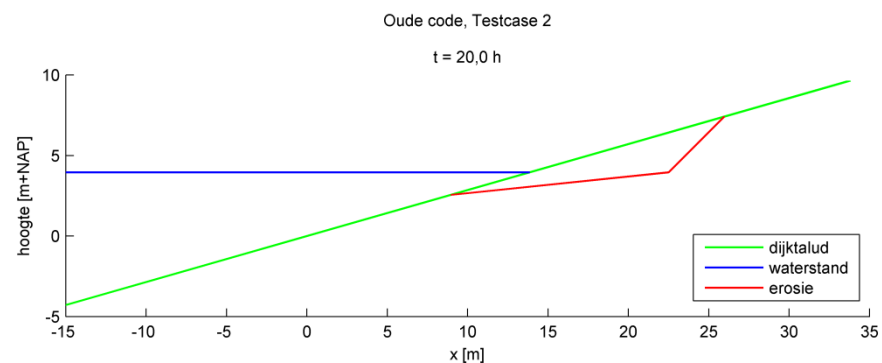
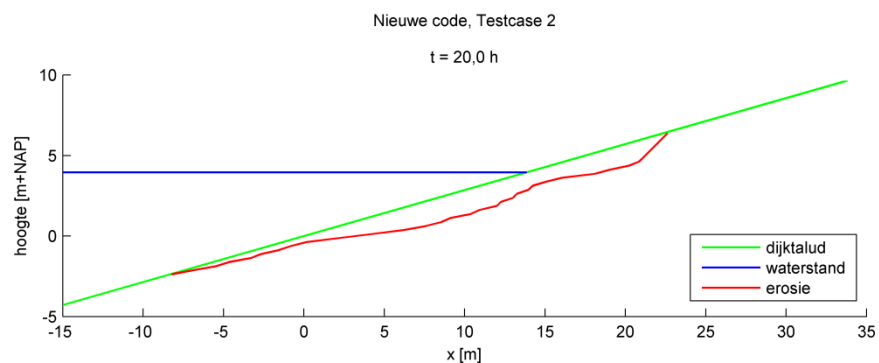
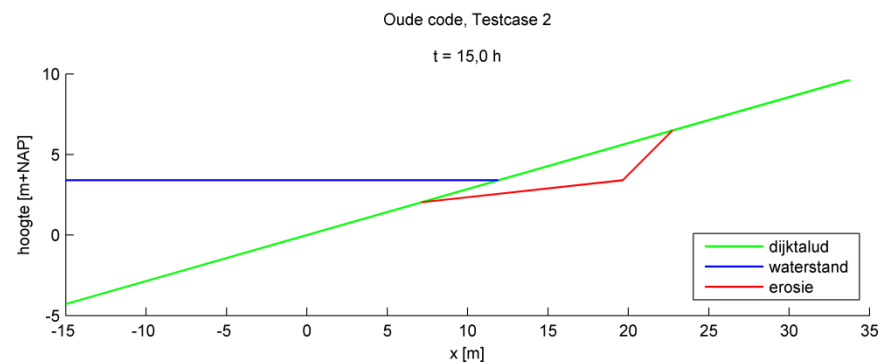
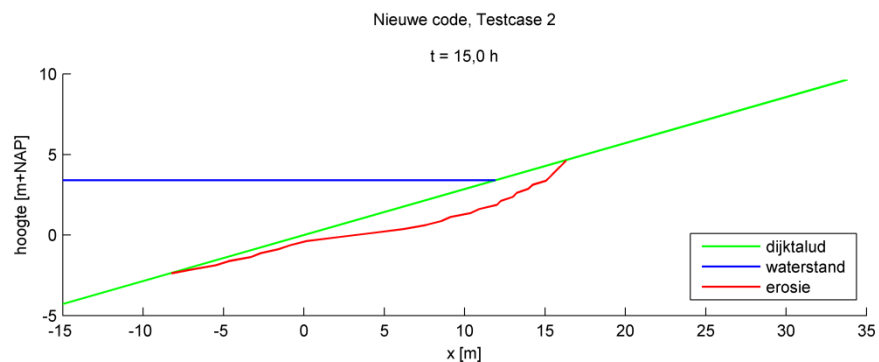


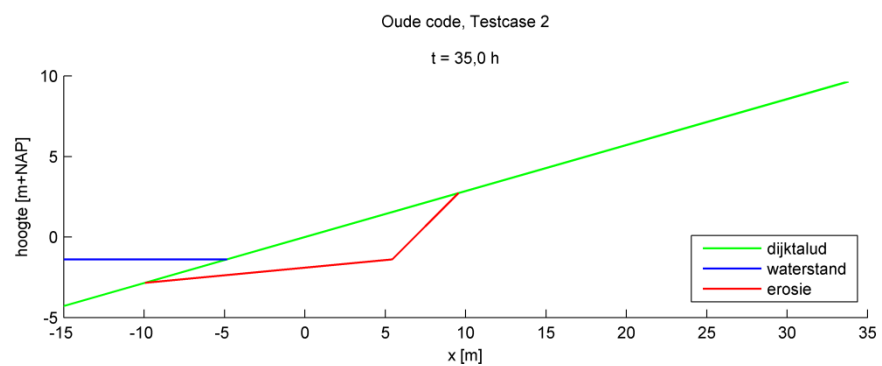
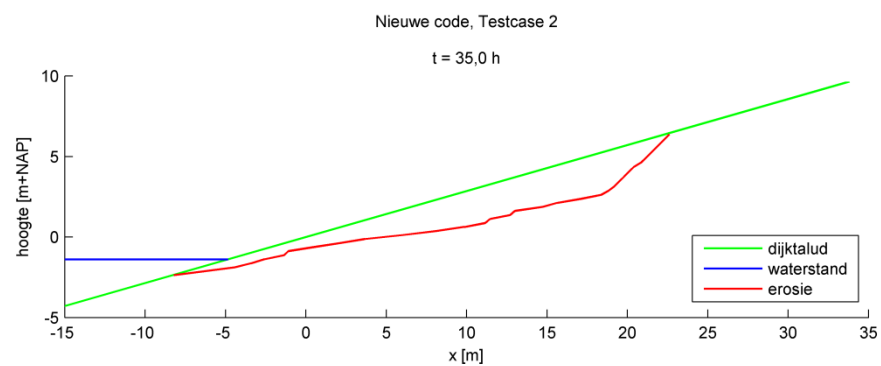
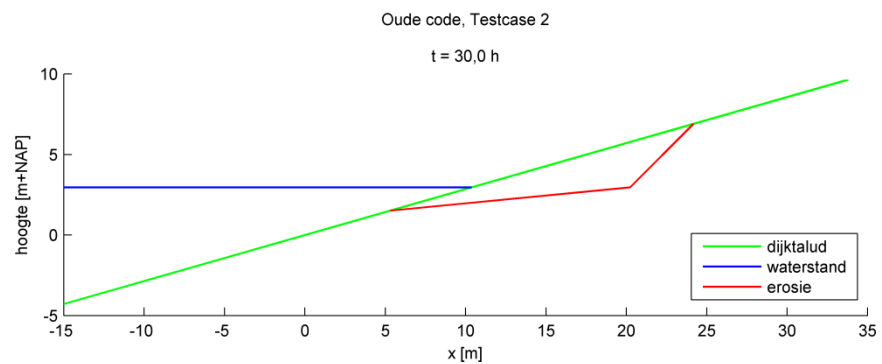
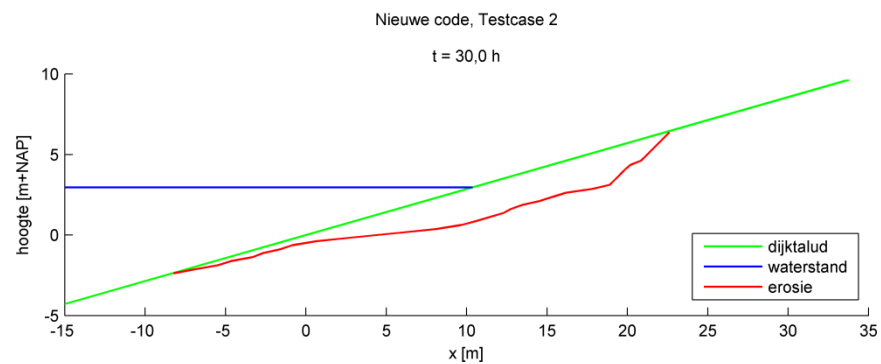




## A.2.2 Erosieprofielen van Testcase 2 elke 5 uur









A.2.3 Erosieprofielen van Testcase 3 elke 5 uur

