

**Plan voor geavanceerde
toetsing van Zwartemeerdijk**



Plan voor geavanceerde toetsing van Zwartemeerdijk

M. Klein Breteler

1206947-000

Titel

Plan voor geavanceerde toetsing van Zwartemeerdijk

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Waterschap Zuiderzeeland	1206947-000	1206947-000-HYE-0004	21

Trefwoorden

Verlengde derde toetsronde, reststerkte, erosie, faalkans

Samenvatting




De Zwartemeerdijk aan de zuidoostkant van de Noordoostpolder heeft volgens de derde toetsronde een te zwakke bekleding. Deze bekleding bestaat uit klinkers op klei/keileem, overgroeid met gras. Het onderhavige rapport is een plan om een geavanceerde toetsing uit te voeren waarin ook de reststerkte van de dijk wordt meegewogen. De reststerkte is de tijd tussen het ontstaan van schade aan de bekleding en het uiteindelijk doorbreken van de dijk. De geavanceerde toetsing kan uitgevoerd worden met een probabilistisch rekenmodel op basis van Deltagootproeven, dat ontwikkeld is in het kader van het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen, namelijk SBW-reststerkte. Dit maakt het mogelijk om de faalkans van de dijk te berekenen, rekening houdend met de steenzetting, klei/keileem-laag en de zandkern.

Het rapport geeft ook een overzicht van de benodigde eigenschappen van de dijk en de bekleding.

Op basis van de Leidraad Grondslagen voor Waterkeringen (TAW 1998) is een criterium afgeleid waar de berekende faalkans aan moet voldoen.

Referenties

Opdracht van 28 juni 2012 met kenmerk PWB/155681
 Werkplannummer 109.300 en een grootboeknummer 42700
 Contactpersoon waterschap: dhr. C.F. Kaihatu

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	sep. 2012	Mark Klein Breteler		Robert 't Hart		Marcel van Gent	
2	dec. 2012	Mark Klein Breteler		Robert 't Hart		Marcel van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Aanpak van de geavanceerde toetsing	3
2.1 Eigenschappen van de dijk	3
2.2 Hydraulische randvoorwaarden	5
2.3 Maatgevende doorsnede	6
2.4 Rekenmodel	7
2.4.1 Formules voor het berekenen van de stabiliteit van de steenzetting	7
2.4.2 Formules voor het berekenen van de erosie van de klei/keileem en de zandkern	7
2.5 Faalkans van de dijk	10
2.6 Toetsoordeel	11
3 Toelaatbare faalkans	13
4 Conclusie	15
5 Referenties	17
Bijlage(n)	
A Te meten eigenschappen van de dijk	A-1

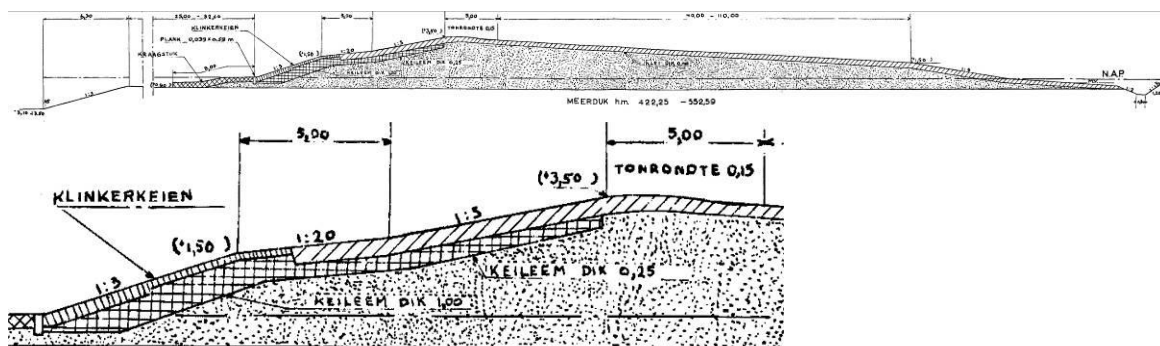
1 Inleiding

In het kader van de derde toetsronde is de dijkbekleding van de Zwartemeerdijk getoetst, maar kon helaas niet goedgekeurd worden. Het wettelijk toetsinstrumentarium geeft dan de gelegenheid om een geavanceerde toetsing uit te voeren als onderbouwing van het beheerdersoordeel, teneinde een definitief oordeel te bereiken.

Het Waterschap Zuiderzeeland heeft Deltares opdracht verstrekt om een plan uit te werken voor deze geavanceerde toetsing. Het betreft de dijk langs de zuidoostzijde van de Noordoostpolder, zie Figuur 1.1 (dp44,5 tot dp56,4: van Ramspol tot Kadoelersluis).



Figuur 1.1 Locatie van de Zwartemeerdijk langs de Noordoostpolder (Google Earth)



Figuur 1.2 Dwarsdoorsnede van de Zwartemeerdijk en detail van het buitentalud (Dienst Zuiderzeewerken, 1962)

Figuur 1.2 geeft een indruk van de dwarsdoorsnede van de dijk. In deze figuur valt op dat de dijk bijzonder breed is. Vanwege deze grote breedte, in combinatie met de relatief lage golfbelasting tijdens toetsomstandigheden, heeft het waterschap de indruk dat schade aan de dijkbekleding de waterkerende functie van de dijk niet in gevaar brengt. Daarom is aan

Deltares gevraagd een plan op te stellen voor een geavanceerde toetsing, waarin ook de reststerkte van de dijk wordt meegewogen. De reststerkte is de tijdsduur tussen het moment waarop schade aan de bekleding ontstaat tot het moment dat de dijk doorbreekt. Naarmate deze tijdsduur groter is dan de belastingduur tijdens de storm, zal de kans op een dijkdoorbraak kleiner zijn.

De haalbaarheid van het uitvoeren van deze geavanceerde toetsing met reststerkte kan worden beoordeeld aan de hand van de resultaten van de oriënterende bureaustudie van Arcadis (van Santen en Steetzel, 2012). Door de dijk te beschouwen als een duin en vervolgens de te verwachten duinafslag te berekenen, is aannemelijk gemaakt dat het volume van de dijk waarschijnlijk voldoende groot is om de belasting tijdens toetsomstandigheden te weerstaan. Gezien dit resultaat kan er geconcludeerd worden dat er een goede kans is dat een geavanceerde toetsing, waarin ook de reststerkte wordt meegewogen, zal leiden tot een goedkeuring van deze dijk.

Het onderhavige plan is bedoeld om de werkwijze en criteria voor deze geavanceerde toetsing af te spreken en daarvoor draagvlak te verkrijgen bij de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) en/of het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW). Dit is gewenst om straks de uitkomst van de geavanceerde toetsing geaccepteerd te krijgen.

Voorgesteld wordt om de conclusie van de geavanceerde toetsing te baseren op probabilistische berekeningen van de faalkans van de dijk. Teneinde goed aan te sluiten op de heersende toetspraktijk (VTV2006) wordt de overschrijdingskansbenadering toegepast voor een dijkvak. De te gebruiken rekenmethode is ontwikkeld in het kader van het onderzoek Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) dat thans wordt uitgevoerd door o.a. Deltares in samenwerking met de Waterdienst. De aanpak van de toetsmethode is beschreven in hoofdstuk 2, samen met de wijze waarop de meest kritische doorsnede van de dijk wordt gekozen en welke invoergegevens moeten worden bepaald. In hoofdstuk 3 is het criterium waar de faalkans aan moet voldoen afgeleid.

2 Aanpak van de geavanceerde toetsing

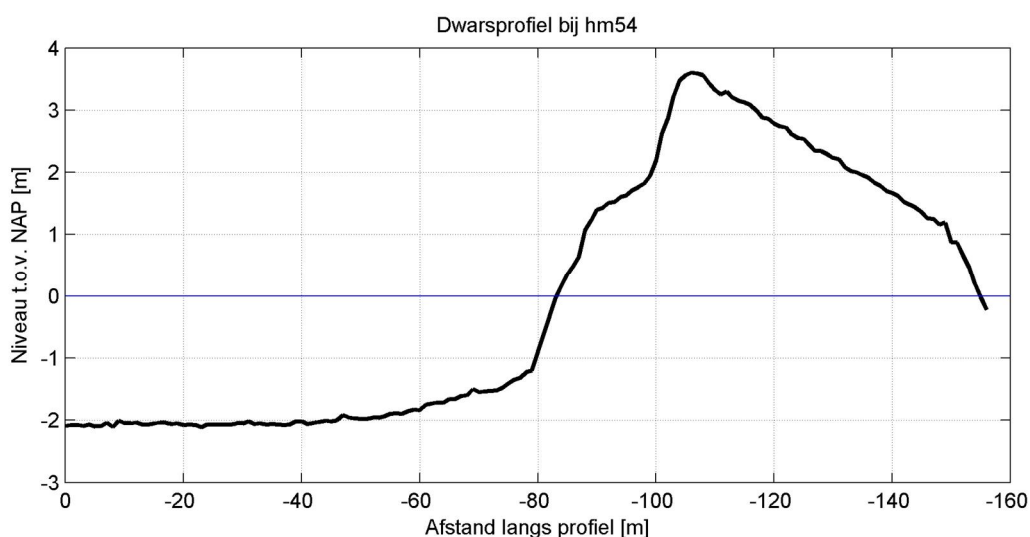
Voorgesteld wordt om de geavanceerde toetsing uit te voeren in een aantal stappen:

1. het verzamelen van de relevante eigenschappen van de dijk
2. het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden
3. het kiezen van de maatgevende doorsnede
4. het geschikt maken van het rekenmodel voor het berekenen van de faalkans
5. het berekenen van de faalkans van de dijk
6. het vergelijken van de resulterende faalkans met de toelaatbare faalkans en het daarop baseren van de conclusie ten aanzien van de geavanceerde toetsing

Dit is onderstaand nader toegelicht.

2.1 Eigenschappen van de dijk

De eerste stap van de geavanceerde toetsing is het verzamelen van de relevante eigenschappen van de dijk en de bekleding. Gezien het feit dat in de geavanceerde toetsing ook de erosiesnelheid van het dijklichaam van belang is, is het ook nodig informatie te hebben over de kern en klei/keileemlagen.



Figuur 2.1 Dijkprofiel ter plaatse van km54 (mogelijk zwakste doorsnede) (Van Santen e.a. 2012)

Zoals te zien is in Figuur 1.2 is de dijk opgebouwd uit zand, een kleilaag op de kruin en het binnentalud en keileem op het buitentalud. Verder is het buitentalud versterkt met een laag klinkerstenen, die volledig overgroeid zijn met gras (zie Figuur 2.2).

Volgens de beheerservaring van de dijkbeheerder en zoals vastgesteld tijdens het in het verleden uitgevoerde grondonderzoek (Pehlig 2002 en Arcadis 2009) is de opbouw van de dijk weinig verschillend in de verschillende dwarsprofiel van dit dijkvak. Er zit weinig variatie in de eigenschappen van de grond in de betreffende lagen.

Gezien deze opbouw van de dijk zijn de volgende gegevens nodig voor het berekenen van de faalkans:

- Het profiel van de dijk (zie als voorbeeld Figuur 2.1)

- De dikte van de keileemlaag.
- De dikte van de kleilaag.
- De dikte en soortelijke massa van de laag stenen op de klei/keileem, inclusief het niveau ten opzichte van NAP waar de betreffende toplaagdikte op de dijk aanwezig is.
- De korrelgrootte van het zand in de dijk.
- Eventuele inhomogeniteiten in de dijk,
- Hoogte en helling van het voorland voor de dijk (De invloed van deze parameters is betrekkelijk klein, waardoor een schatting voldoende is)

Deze gegevens moeten verzameld worden voor elke dwarsdoorsnede langs de 11,9 km lange dijk met een zodanig detail dat de zwakste doorsnede kan worden vastgesteld (doorsnede met de grootste faalkans).



Figuur 2.2 Buitentalud en bekleding van de Zwartemeerdijk (foto's van Arcadis)

Voor de probabilistische berekenen van de faalkans is het belangrijk dat niet alleen de verwachtingswaarde van bovenstaande gegevens beschikbaar is, maar ook de standaardafwijking. De standaardafwijking wordt bepaald door de volgende aspecten:

- Nauwkeurigheid van de gemeten parameter (bijvoorbeeld: de meetmethode om het dijkprofiel te meten heeft een beperkte nauwkeurigheid)
- Variatie van de parameter (bijvoorbeeld: de soortelijke massa van de stenen kent enige variatie, die bepaald kan worden door een aantal stenen te meten)

Mochten er ook secties van de dijk bekleed zijn met een steenzetting op een filter- of uitvullaag, dan moet hiervan de laagdikte en de korrelgrootte bepaald worden.

Hoewel sommige van deze parameters reeds in het veld bepaald zijn, zal er waarschijnlijk additioneel veld- laboratoriumwerk nodig zijn om alle gegevens te verzamelen. In appendix A is in meer detail de lijst van de benodigde metingen uitgewerkt en de locaties waar dat gemeten moet worden.

2.2 Hydraulische randvoorwaarden

In het kader van de gedetailleerde toetsing zijn de toetscondities (toetspeil, en golfhoogte en golfperiode bij toetspeil) bepaald. Voor km54 zijn de toetscondities bijvoorbeeld (Van Santen e.a. 2012) (zie ook figuur A.2 voor kilometrering):

- Significante golfhoogte: $H_s = 0,60$ m
- Golfperiode bij de piek van het spectrum: $T_p = 3,5$ s
- Waterstand met overschrijdingsfrequentie van 1/4000: NAP+1,74 m

Voor de probabilistische berekeningen van de faalkans van de dijk is het echter nodig de verdelingsfunctie van de waterstand en golfcondities te hebben. Voorgesteld wordt om dit te bepalen met Hydra-zoet (Duits en Kuijper 2012). Die software is hiervoor heel geschikt, omdat het voor verschillende overschrijdingsfrequenties de golfcondities als functie van de waterstand kan berekenen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de database die ontwikkeld is in het kader van WTI2011.

Gezien het feit dat deze database nog niet voor dit soort toepassingen is vrijgegeven door DG Ruimte&Water, zal daarvoor tijdig een verzoek moeten worden ingediend. Mocht dit niet gehonoreerd worden, dan kan ook gewerkt worden met de oude database van WTI2006.

Voor de duur van de storm wordt voorgesteld om te rekenen met een verwachtingswaarde van de 35 uur, zoals voorgeschreven in de HR2006, met een geschatte standaardafwijking van 5 uur.

De formules, die in het kader van het onderzoek van SBW-reststerkte zijn ontwikkeld, zijn slechts bedoeld voor dijken met loodrechte golfaanval. Wel zijn de negatieve effecten van scheve golfaanval meegenomen (het wegspoelen van de sedimentatie aan de teen van de dijk) maar de invloed van de positieve effecten (minder erosie doordat er minder golfenergie per meter dijk op de dijk aankomt) zitten niet in de formules.

Voorgesteld wordt om de toetsing in eerste instantie uit te voeren zonder rekening te houden met de hoek van inval van de golven. Door net te doen of alle golven loodrecht invallen, wordt een conservatief resultaat verkregen. Als dan blijkt dat het toetsresultaat niet 'goed' is, kan overwogen worden om het effect van de scheve golfaanval te kwantificeren en mee te nemen in de rekenresultaten. Het effect van de scheve golfaanval wordt in eerste instantie nog niet meegenomen, teneinde de rekeninspanning en de discussies over de uitgangspunten te beperken.

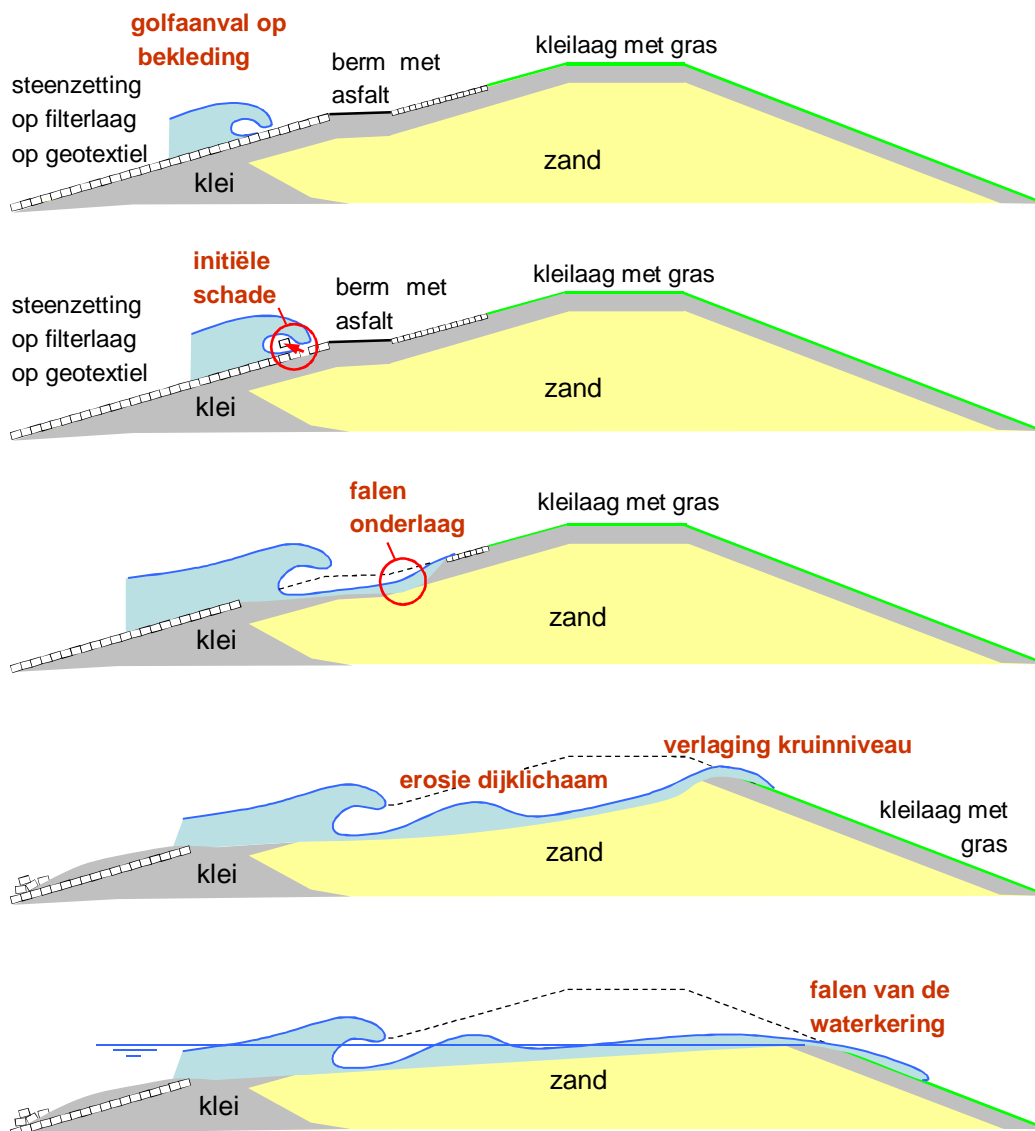
2.3 Maatgevende doorsnede

De toetsmethode volgens de VTV2006 gaat ervan uit dat de toetsing wordt uitgevoerd ter plaatse van de doorsnede met de laagste stabiliteit. De stabiliteit wordt enerzijds bepaald door de sterkte en anderzijds door de belasting.

De sterkte is afhankelijk van de dikte en kwaliteit van de steenzetting, de kleilaag en/of keileemlaag en het volume van de dijk. De belasting wordt mede bepaald door de strijklengte (grootte van het water voor de dijk).

Door Van Santen (2012) is km54 voorgesteld als maatgevende doorsnede (zie Figuur A.2). Daar zijn de golven relatief hoog en is de breedte van de dijk relatief klein.

In de geavanceerde toetsing zal dit opnieuw bezien worden. Als het op voorhand niet direct te zeggen is welke doorsnede maatgevend is, zullen van meerdere doorsneden de faalkans bepaald worden. De maatgevende doorsnede is degene met de grootste faalkans.



Figuur 2.3 Schematische weergave van het erosieproces (het dijkprofiel komt niet overeen met de Zwartemeerdijk)

2.4 Rekenmodel

De probabilistische berekeningen voor het bepalen van de faalkans van de dijk kunnen worden uitgevoerd met het rekenmodel dat is ontwikkeld in het kader van het meerjarig onderzoek Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW).

In het rekenmodel worden de volgende fysische processen berekend (zie Figuur 2.3):

- Het ontstaan van initiële schade aan de steenzetting en het vervolgens wegspoelen van de steenzetting over een groter oppervlak
- De erosie van de klei en/of keileem als gevolg van de aanhoudende golfbelasting
- De erosie van het zandlichaam onder de klei/keileem.

Deze fysische processen zijn in het rekenmodel beschreven met formules, waaromheen een probabilistische rekenschil is geplaatst. Dat maakt het mogelijk om de faalkans van de dijk te berekenen. Dit is onderstaande paragrafen in detail beschreven.

Naast bovenstaand omschreven faalmechanismen is er nog een ander mechanisme mogelijk. Als er eenmaal enige erosie van het dijklichaam is opgetreden, gaat er water infiltreren. Daardoor zal de freatische lijn in de dijk gaan stijgen. Omdat een hogere freatische lijn het gevaar voor macro-instabiliteit binnenwaarts verhoogd, moet het risico daarop gecontroleerd worden. Er zal met een deterministische berekening met conservatieve aannamen gecontroleerd worden of er gevaar is voor macro-instabiliteit binnenwaarts bij een verhoogde freatische lijn. Dit wordt niet opgenomen in de probabilistische berekeningen, omdat het flauwe binnentalud doet vermoeden dat dit mechanisme waarschijnlijk geen rol speelt.

2.4.1 Formules voor het berekenen van de stabiliteit van de steenzetting

De stabiliteit van steenzettingen wordt in Nederland doorgaans berekend met het rekenmodel Steentoets. Dit rekenmodel wordt ook voorgeschreven voor de gedetailleerde toetsing volgens de systematiek van de VTV2006.

In dit rekenmodel zijn ook formules opgenomen voor het berekenen van de stabiliteit van een steenzetting van klinkers op klei. Deze formules geven een ondergrens en een bovengrens voor de significante golfhoogte bij het bezwijken van de steenzetting.

Deze formules kunnen met een kleine aanpassing gebruikt worden voor de probabilistische berekeningen. Daartoe wordt een nieuwe formule opgesteld die resultaten geeft die precies tussen de ondergrens en bovengrens in ligt. Die formule geeft daarmee de verwachtingswaarde van de significante golfhoogte bij bezwijken. Vervolgens wordt aan die formule een modelfactor toegevoegd met verwachtingswaarde 1,0 en een bepaalde standaardafwijking. Deze standaardafwijking wordt zo gekozen dat de onder- en bovengrens van de stabiliteit volgens de formules uit Steentoets ongeveer overeenkomen met het 95% betrouwbaarheidsinterval.

2.4.2 Formules voor het berekenen van de erosie van de klei/keileem en de zandkern

In het kader van het SBW-onderzoek naar reststerkte zijn twee grootschalige modelonderzoeken in de Deltagoot uitgevoerd naar de erosie van een laag klei en keileem en

de erosie van de zandkern van een dijk tijdens de belasting door golven (Klein Breteler e.a. 2012). Bij de analyse van deze onderzoeken zijn ook numerieke berekeningen en de resultaten van grootschalig modelonderzoek uit het verleden betrokken.

In het onderzoek zijn vier verschillende typen klei/keileem betrokken. Daarbij is gebleken dat de erosiesnelheid van de klei/keileem nauwelijks afhankelijk is van de korrelverdeling en de Atterbergse grenzen, mits er sprake is van gestructureerde klei. Klei zal onder invloed van de klimatologische omstandigheden in Nederland boven hoogwater in de loop van de jaren gestructureerd worden. Dit betekent dat er vele scheuren door krimpen/uitzetten, variatie vochtgehalte et cetera ontstaan, waardoor de kleilaag gaat bestaan uit een conglomeraat van vele brokken en brokjes. Deze structuur is dominant voor de grootte van de erosiesnelheid bij golfaanval.

Uit het onderzoek is de volgende formule voortgekomen die gebruikt kan worden voor de probabilistische berekeningen:

$$V_e = 0,063 \cdot c_{m1} \frac{H_s^2 \tan \alpha}{s_{op}} t \quad (2.1)$$

mits $0,7 < H_s < 2$ m, $s_{op} > 0,02$, kleilaagdikte < 3 m en klei van Nederlandse dijken, boven gemiddeld hoogwater, met normale hoeveelheid zandlenzen

Met:

V_e = erosievolume per meter dijk (m^3/m)

H_s = significante golfhoogte aan de teen van de dijk (m)

s_{op} = $H_s / (1,56 T_p^2)$ = golfsteilheid gebaseerd op significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk en de equivalente diep water golflengte (-)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

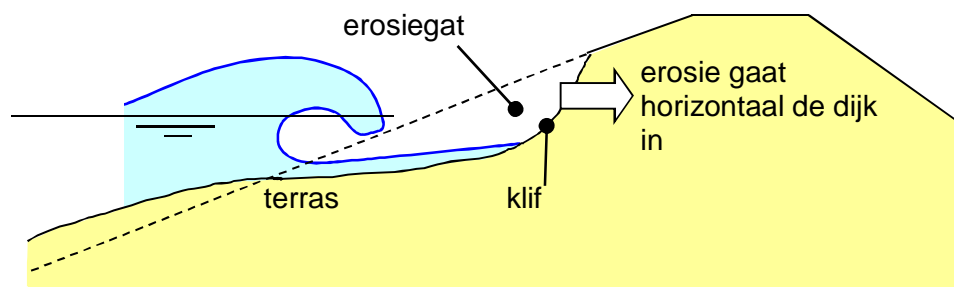
α = taludhelling, gemiddeld tussen H_s onder SWL en H_s boven SWL ($^\circ$)

t = belastingduur (uur)

c_{m1} = modelcoëfficiënt (-)

De modelcoëfficiënt is gelijk aan de verhouding tussen de werkelijk gemeten waarden en de waarden volgens bovenstaande formule. Het is gebleken dat de verwachtingswaarde van de modelcoëfficiënt $\mu(c_{m1}) = 1$ en de standaardafwijking $\sigma(c_{m1}) = 0,20$.

Deze formule geeft betrouwbare resultaten zolang de golfhoogte tenminste $H_s = 0,7$ m is. Langs de Zwartemeerdijk is de golfhoogte echter lager. Bij gebrek aan beter wordt deze formule toch gebruikt. Bij de interpretatie van de resultaten zal er echter rekening mee gehouden moeten worden dat de formule bij kleine golfhoogte waarschijnlijk een overschatting geeft van de erosie. Het resultaat zal derhalve conservatief zijn.



Figuur 2.4 Tijdens de erosie ontstaat er een ondiep terras en een steile klif, die in de loop van de tijd naar rechts verschuift als gevolg van de erosie door de golven

Zodra de erosie zo ver gevorderd is dat het erosieprofiel door de klei/keileem heen breekt, begint de erosie van de zandkern. Er ontstaat dan een proces van snelle erosie van het zand die een ondermijning geeft van de resterende klei/keileemlaag. Steeds als er weer wat klei/keileem ondermijnd is, breekt er wat klei/keileem af, zie Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Erosieproces in de Deltagoot (links breekt de golf boven het erosieterras (zie Figuur 2.4), en rechts breekt een stuk klei af)

In het onderzoek is met het numerieke model voor duinafslag Durosta een voorlopige relatie opgesteld tussen de geometrie en de golfcondities enerzijds en de erosiesnelheid anderzijds. Vervolgens is deze relatie geïjkt aan de hand van het resultaat van de Deltagootproeven met een normaal dijkprofiel (met een buitenberm) en een kleilaag van 80 cm. De resulterende formule is (Klein Breteler e.a. 2012):

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

Mits: $0,7 < H_s < 3,0$ m en $0,22 < \tan \alpha \leq 0,5$ en $0,015 < s_{op} < 0,06$ en $0,18 < D_{50} < 0,22$ mm.

Met:

B_t = terrasbreedte, waarbij het terras en de klif elk geschematiseerd zijn tot een rechte lijn (m)

Het cumulatieve erosievolume kan gevonden worden door stap voor stap het stormverloop door te rekenen, waarbij B_t in bovenstaande formule de breedte van het terras is aan het begin van de betreffende tijdstap. Aan de formule is volgens op de volgende wijze een modelcoëfficiënt toegevoegd:

$$V_e = c_{m2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial V_e}{\partial t} \cdot t_{stap} \quad (2.3)$$

Met:

V_e = erosievolume per meter dijk (m^3/m)

c_{m2} = modelcoëfficiënt (-)
 $\partial V_e / \partial t$ = erosiesnelheid berekend met formule (2.2) ($m^3/m/uur$)
 t_{stap} = duur van één tijdstap (uur)

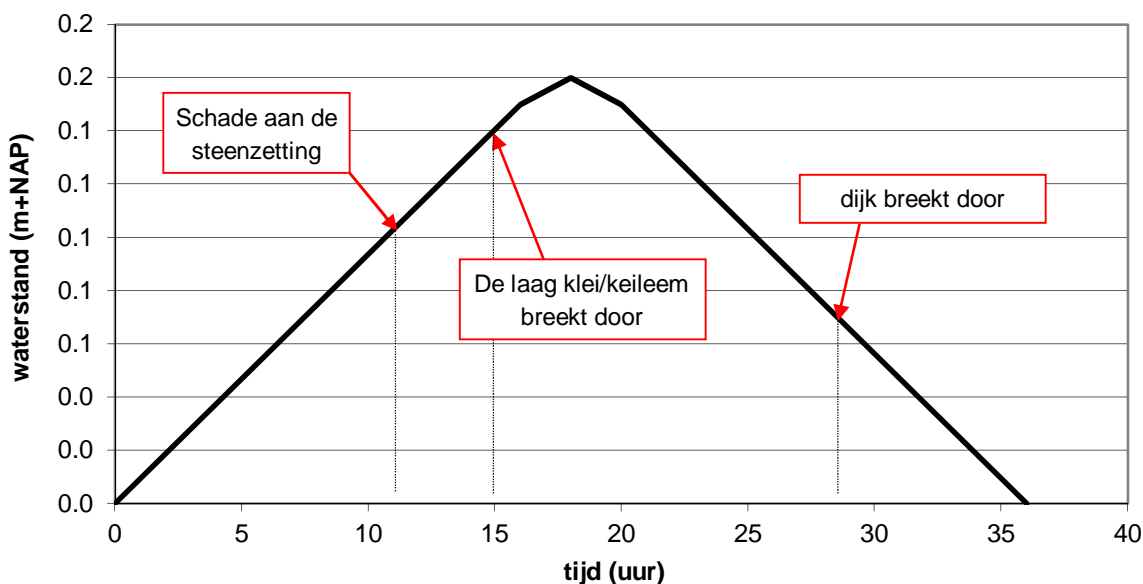
Het is gebleken dat de verwachtingswaarde van de modelcoëfficiënt $\mu(c_{m2}) = 1$ en de standaardafwijking $\sigma(c_{m2}) = 0,19$ (Klein Breteler e.a. 2012).

Bovenstaande formule is geschikt voor golfcondities met $H_s > 0,7$ m en zand in de kern van de dijk met korrelgrootte van $D_{50} \approx 0,2$ mm. Naar verwachting zijn de golfcondities bij de Zwartemeerdijk wat lager, en bovendien is het denkbaar dat de korrelgrootte van het zand in de kern van de dijk anders is dan 0,2 mm.

Voorgesteld wordt om op basis van berekeningen met het numerieke model Durosta de formule wat aan te passen zodat hij met name geschikt is voor kleinere golven en de korrelgrootte van het zand in de Zwartemeerdijk.

2.5 Faalkans van de dijk

Voor het berekenen van de faalkans van een dijk zijn diverse methoden beschikbaar. De meest gebruikelijke zijn Form (numerieke integratie op basis van een linearisatie in het ontwerppunt) en de Monte Carlo methode. Net als gebruikt is in het kader van het onderzoek SBW-reststerkte (Kaste e.a. 2012) wordt aanbevolen om de Monte Carlo methode te gebruiken. Deze methode is eenvoudig te hanteren en biedt veel inzicht in de details van het rekenproces. Deze methode werkt als volgt.



Figuur 2.6 Voorbeeld van waterstand verloop tijdens de storm en het resultaat van de berekeningen

In de Monte Carlo methode worden willekeurige combinaties van de belasting en de constructie gekozen, met eigenschappen die voldoen aan de ingevoerde verdelingsfuncties. Voor bijvoorbeeld de waterstand geeft die verdelingsfunctie de relatie tussen de overschrijdingsfrequentie en de waterstand. Voor de eigenschappen van de constructie, zoals kleilaagdikte, taludhelling en kruinhoogte van de dijk, wordt doorgaans een normale verdeling gehanteerd die gekarakteriseerd kan worden met een verwachtingswaarde en een standaardafwijking.

Voor elke gekozen combinatie van de belasting en de constructie wordt met de formules uitgerekend of de dijk zal falen of niet. Falen wordt in dit verband gedefinieerd als een zodanige erosie van het dijklichaam dat de kruin (het hoogste punt van het erosieprofiel) lager is geworden dan de op dat moment aanwezige waterstand (zie Figuur 2.3). Daartoe wordt de volledige storm in de tijd doorgerekend met het voorgeschreven waterstandverloop uit de HR2006.

Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 2.6. Dit kan gezien worden als het resultaat van één van de willekeurige trekkingen in het Monte Carlo proces. Er is een storm getrokken met een maximale waterstand van NAP+1,6 m en een duur van 36 uur. Daarnaast is ook een willekeurige trekking voor de eigenschappen van de dijk uitgevoerd. Met deze eigenschappen, golfcondities en de formules is in dit (fictieve) voorbeeld berekend dat de steenzettingen bezwijkt op $t = 11$ uur. Vanaf dat moment start de erosie van de klei/keileem en wordt er gerekend met formule (2.1). In dit voorbeeld is op $t = 15$ uur de laag klei/keileem doorgebroken en wordt overgestapt op formule (2.2) voor het berekenen van de erosie in de zandkern. Tenslotte breekt de dijk door op $t = 29$ uur.

In de Monte Carlo methode worden op deze wijze enkele miljoenen combinaties van belasting en constructie doorgerekend en wordt bijgehouden in hoeveel gevallen de dijk doorbreekt. De faalkans is vervolgens de verhouding tussen het aantal berekende dijkdoorbraken en het totaal aantal berekeningen.

Deze rekentechniek heeft als nadeel dat de berekeningen veel tijd kosten. In de literatuur zijn daarvoor diverse oplossingen bedacht, zoals 'direct sampling' en 'importance sampling'. Voorgesteld wordt om de techniek van 'importance sampling' toe te passen, die ook toegepast is in het SBW onderzoek (Kaste e.a. 2012). Dit bekort de totale rekentijd met minstens een factor 100.

Met deze methode is het ook vrij eenvoudig om de faalkans te berekenen voor als er twee stormen optreden in het winterseizoen voordat een aannemer in de gelegenheid is geweest om de opgetreden schade aan de dijk te herstellen. De eerste storm is in zo'n geval een zeldzame storm die schade geeft aan de steenzetting, terwijl de tweede storm minder sterk is en alleen de reeds ontstane erosie verder vergroot.

Voorgesteld wordt om het toetsresultaat te baseren op de faalkans met twee stormen.

2.6 Toetsoordeel

Het toetsoordeel is afhankelijk van de berekende faalkans met twee stormen en de toelaatbare faalkans. De toelaatbare faalkans is afgeleid in het volgende hoofdstuk.

Als de berekende faalkans met twee stormen kleiner is dan de toelaatbare faalkans, dan is het toetsoordeel 'goed'.

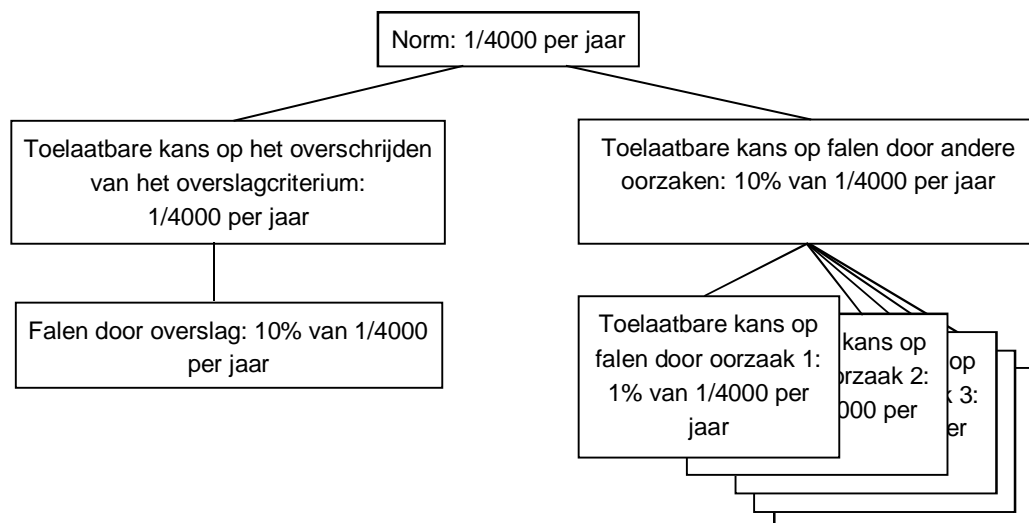
3 Toelaatbare faalkans

Voor het afleiden van de toelaatbare faalkans wordt voor deze geavanceerde toetsing aangesloten op de systematiek van de VTV2006, de uitgaat van de overschrijdingskansbenadering en een toetsing per dijkvak. De Leidraad Grondslagen voor Waterkeren (TAW 1998) geeft een bruikbare omschrijving op basis waarvan de toelaatbare faalkans kan worden bepaald:

Veiligheidseisen:

1. De kans op overschrijden van het debiet q_t mag voor elk dijkvak niet groter zijn dan de norm die in de Wet op de waterkering voor het betreffende dijkkringgebied is genoemd. Daarbij wordt meestal uitgegaan van een ontwerpwaterstand (MHW), waarbij een golf hoort, waaruit weer een golfloop c.q. golfoverslagdebiet volgt;
2. Bij waterstanden gelijk aan of lager dan MHW mag de kans op falen door andere oorzaken dan overloop/overslag, niet meer dan 10% van de bij punt 1 genoemde norm bedragen.

De voor de Zwartemeerdijk geldende norm is volgens de Waterwet 1/4000 per jaar. Voor deze dijk gaat het nu om één van de overige oorzaken dan overloop/overslag, dus punt 2. Hiermee wordt het falen van de dijk bedoeld als gevolg van bezwijkmechanismen zoals "erosie buitentalud" (schade aan de steenzetting), "piping", "macro-instabiliteit", etc.. 't Hart (2012) heeft op basis hiervan een toelaatbare faalkans voor een dijk afgeleid, gericht op het instabiel worden van de steenzetting en het meewegen van reststerkte. Hij stelt dat er orde 10 andere faalmechanismen zouden kunnen zijn, waardoor de kans op falen per afzonderlijk mechanisme 1/10 is van de genoemde "10% van de norm": dus 1% van de norm (zie ook Figuur 3.1). Daarbij is aangenomen dat alle andere mechanismen ook een reële kans van voorkomen hebben, er 10 van dat soort mechanisme zijn, en ze allemaal een gelijke bijdrage aan de totale faalkans toebedeeld krijgen. Deze aannames zijn conservatief, waardoor dit criterium vrij streng genoemd kan worden.



Figuur 3.1 Faalkansbegroting: verdeling van de faalkansbijdragen over de mechanismen:

Voor de Zwartemeerdijk betekent dit een toelaatbare faalkans van 1% van 1/4000, dus 1/400.000 per jaar voor waterstanden gelijk of lager dan MHW, gegeven het bezwijken als gevolg van het instabiel worden van de steenzetting. Met MHW wordt het toetspeil bedoeld.

Voorgesteld wordt om in eerste instantie de berekende faalkans volgens de methodiek van hoofdstuk 2 te vergelijken met deze toelaatbare faalkans. Als de berekende faalkans kleiner is dan 1/400.000 per jaar, dan wordt het toetsresultaat 'goed'. Daarbij wordt voorlopig gerekend met de aanname dat de golven loodrecht op de dijk invallen en er nog een tweede storm zal optreden voordat de eventuele schade aan de dijk kan worden hersteld.

Als de berekende faalkans echter groter is, kan het criterium heroverwogen worden. Als aangetoond kan worden dat de kans op het optreden van andere faalmechanismen verwaarloosbaar is, kan de toelaatbare faalkans verhoogd worden. Dit geldt ook voor een verwaarloosbare kans op het overschrijden van het kritieke overslagdebiet. Verder is het aannemelijk dat bij scheve golfaanval de erosie van het dijklichaam trager gaat dan bij loodrechte golfaanval.

Deze verfijningen worden in eerste instantie nog niet meegenomen, teneinde de rekeninspanning en de discussies over de uitgangspunten te beperken.

4 Conclusie

De Zwartemeerdijk aan de zuidoostkant van de Noordoostpolder heeft volgens de derde toetsronde een te zwakke bekleding. Deze bekleding bestaat uit klinkers op klei/keileem, overgroeid met gras.

Voorgesteld wordt een geavanceerde toetsing uit te voeren waarin ook de reststerkte van de bekleding wordt meegewogen. De reststerkte is de tijd tussen het ontstaan van schade aan de bekleding en het uiteindelijk doorbreken van de dijk. Doordat de dijk relatief breed is, is er vrij veel reststerkte, en is de kans op een doorbraak bij schade aan de bekleding klein. Dat maakt de slaagkans van een dergelijke toetsing hoog.

De geavanceerde toetsing kan uitgevoerd worden met de rekentechnieken die ontwikkeld zijn in het kader van het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen, namelijk SBW-reststerkte. Dit maakt het mogelijk om probabilistische berekeningen te maken van de faalkans van de dijk, rekening houdend met de steenzetting, klei/keileemlaag en de zandkern.

Om dergelijke berekeningen mogelijk te maken is het nodig om de eigenschappen van de dijk en de bekleding in detail te meten. Het benodigde meetprogramma is weergegeven in appendix A.

Op basis van de Leidraad Grondslagen voor Waterkeringen (TAW 1998) is een criterium afgeleid waar de berekende faalkans aan moet voldoen. Als de berekende faalkans kleiner is dan 1/400.000 per jaar, dan kan de dijk het toetsresultaat 'goed' krijgen. Mocht de dijk hier niet aan voldoen, dan is het mogelijk een scherper criterium af te leiden en rekening te houden met de scheve golfaanval op de dijk. Deze verfijningen worden in eerste instantie nog niet meegenomen, teneinde de rekeninspanning en de discussies over de uitgangspunten te beperken.

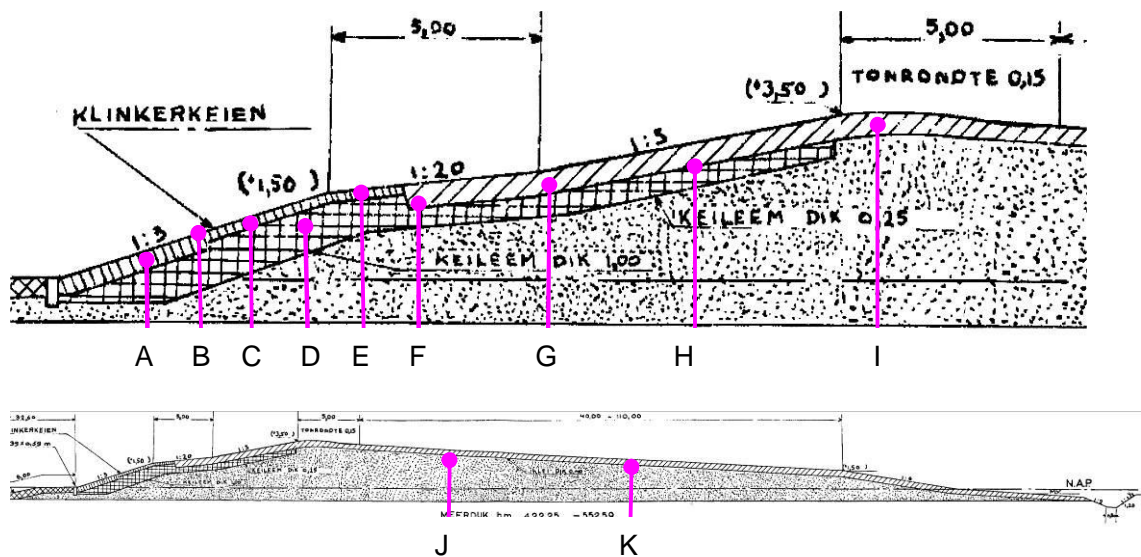
5 Referenties

- Arcadis (2009)
Toets Zwartemeerdijk;
Rapportage 074442450:0.3; C03011.200041/SD; 11 december 2009
- Duits, M.T. en B. Kuijper (2012)
Hydra-Zoet; Gebruikershandleiding; Versie 1.6
HKV rapport PR1564, juli 2012
- Pehlig, M. (2002)
Toetsing IJsselmeerdijken, dijkvak Zwartemeerdijk
Fugro, rapport R4070/008, 11 juni 2002
- Hart, R. 't (2012)
Verkenning beoordeling veiligheid van dijken tot falen, toegespitst op falen door erosieprocessen
Deltares, rapport 1204200.009, juni 2012
- HR2006
Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor toetsen van primaire waterkeringen
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007
- Kase, D and M. Klein Breteler (2012)
Safety margin for block revetments taking residual strength into account; SBW – residual strength
Deltares, rapport 1206012.015, september 2012
- Klein Breteler, M., A. Capel, G. Kruse en G. Mourik (2012)
Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven
SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven
Deltares, rapport 1204200.008, mei 2012
- Niemeijer, H. (2012)
Taludbekleding Zwartemeerdijk,
Arcadis, memo C03011.000179 van april 2012
- Santen, R.B. van, en H.J. Steetzel (2012)
Duinafslagbenadering Zwartemeerdijk
Arcadis, memo C03011.000179.0100.0100 van 21 febr. 2012
- TAW (1998): Grondslagen voor Waterkeren, TAW Leidraad, ISBN 9036937353, januari 1998.
- VTV2006
Voorschrift Toetsen op Veiligheid, primaire waterkeringen
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007

A Te meten eigenschappen van de dijk

Voor het uitvoeren van de geavanceerde toetsing is vrij veel informatie nodig over de constructie. Ter plaatse van de maatgevende doorsnede is de meeste informatie nodig, maar omdat op voorhand nog niet direct te zeggen is welke doorsnede maatgevend is, zal ook in andere doorsneden metingen verricht moeten worden.

In Figuur A.1 is globaal aangegeven op welke locaties er gemeten moet worden.



Figuur A.1 Dwarsdoorsnede van de Zwartemeerdijk en detail van het buitentalud (Dienst Zuiderzeewerken, 1962)

Op deze locaties moet het volgende gemeten worden ter plaatse van de maatgevende doorsnede:

- A. Dikte van de laag klinkerkeien en soortelijke massa van de klinkerkeien
- B. Niveau ten opzichte van NAP waar de dikte van de laag klinkerkeien veranderd
- C. Dikte van de laag klinkerkeien en soortelijke massa van de klinkerkeien (deze meting mag ook worden uitgevoerd op de locatie D)
- D. Op ongeveer 1 m onder de rand van de berm (langs het talud gemeten) moet het volgende gemeten worden:
 - a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van de klei/keileem
 - d. de Atterbergse de grenzen van de klei/keileem
 - e. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem
- E. Dikte van de laag klinkerkeien en soortelijke massa van de klinkerkeien. Indien het dezelfde klinkerkeien zijn als bij locatie C, dan is het meten van de soortelijke massa niet nodig.
- F. Langs de bovenrand van de klinkerkeien op de berm moet het volgende gemeten worden:
 - a. de afstand tot de buitenrand van de berm
 - b. de dikte van de kleilaag
 - c. een indicatie van grootte een frequentie van het voorkomen van zand-insluitingen

- d. de korrelgrootte verdeling van de klei
 - e. de Atterbergse de grenzen van de klei
 - f. de dikte van de keileemlaag
 - g. de korrelgrootte verdeling van de keileem
 - h. de Atterbergse de grenzen van de keileem
 - i. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de keileem
- G. Op ongeveer 1/3 van de buitenrand van de berm tot de buitenkruinlijn moet het volgende gemeten worden:
- a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van de klei/keileem
 - d. de Atterbergse de grenzen van de klei/keileem
 - e. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem
- H. Op ongeveer 2/3 van de buitenrand van de berm tot de buitenkruinlijn moet het volgende gemeten worden:
- a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem
- I. Ter plaatse van de kruin moet het volgende gemeten worden:
- a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem
- J. Op ongeveer een kwart van de buitenkruinlijn tot de binnenteen moet het volgende gemeten worden:
- a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem
- K. Op ongeveer halverwege de buitenkruinlijn tot de binnenteen moet het volgende gemeten worden:
- a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem

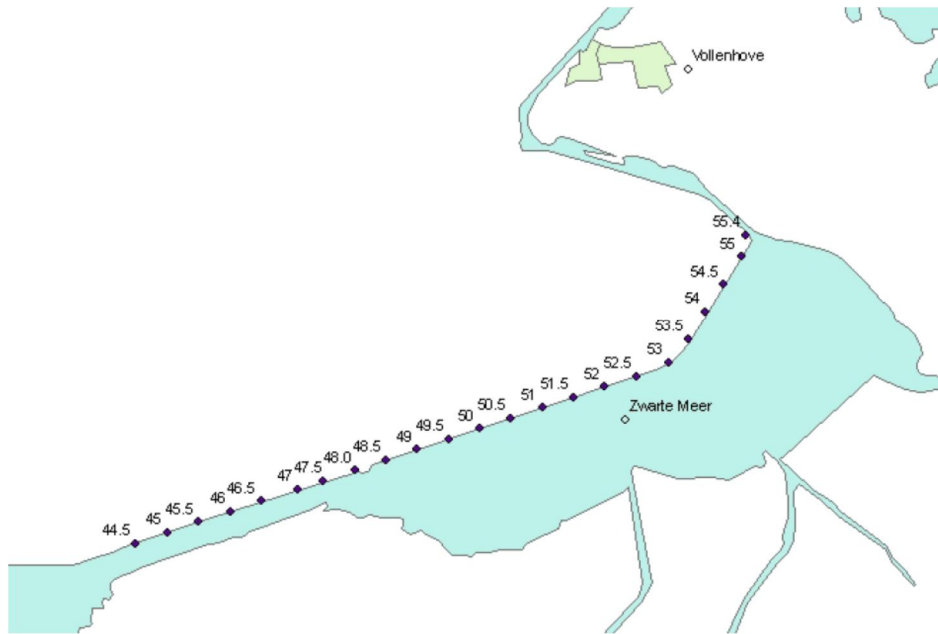
En tevens moet het profiel van de dijk en een indicatie van de hoogte van het voorland gemeten worden.

Op basis van de dwarsprofielen en de golfcondities is de maatgevende doorsnede vastgesteld, namelijk bij km54 (zie figuur A.2). Teneinde een indicatie te hebben van de variatie langs de dijk moeten ook op km53,2, km53,6, km53,8 en km54,2 deze metingen verricht worden.

Daarnaast moet de gehele dijk globaal bemeten worden om een goed beeld van de variatie te hebben:

- A. Dikte van de laag klinkerkeien en soortelijke massa van de klinkerkeien
- B. Niveau ten opzichte van NAP waar de dikte van de laag klinkerkeien veranderd
- C. Dikte van de laag klinkerkeien en soortelijke massa van de klinkerkeien (deze meting mag ook worden uitgevoerd op de locatie D)
- E. Langs de bovenrand van de klinkerkeien op de berm moet het volgende gemeten worden:
 - a. de dikte van de laag klei/keileem
 - b. of er sprake is van klei of keileem
 - c. de korrelgrootteverdeling van het zand onder de klei/keileem

Deze metingen moeten langs de gehele dijk om de 500 m uitgevoerd worden.



Figuur A.2 Kilometrering van de Zwartemeerdijk (Niemeijer 2012)