



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

DE TERUGTREKKING VAN DE NEDERLANDSE KUSTLIJN

BSc-eindopdracht Civiele Techniek, Universiteit Twente

Auteur: Dhr. A.J. Dekker
S-nummer: s1332899

Intern begeleider: Mevr. Prof. dr. S.J.M.H. Hulscher
Bedrijfsbegeleider: Mevr. E. van Eijsbergen, MSc

Stageperiode: 20 april-3 juli 2015
Datum: 29 juni 2015
Status: Definitief

Colofon

Uitgegeven door: Rijkswater Water, Verkeer en Leefomgeving
afdeling Hoogwaterveiligheid
Onderwijsinstelling: Universiteit Twente
Auteur: dhr. A.J. Dekker, s1332899
Opmaak: dhr. A.J. Dekker, s1332899
Datum: 29 juni 2015
Status: Definitief

Inhoud

Voorwoord—	4
Samenvatting—	5

1	Inleiding—6
1.1	Projectkader—6
1.1.1	Onderzoeksgebied—6
1.1.2	Kustbeleid—7
1.1.3	Begrippen en uitgangspunten—7
1.2	Onderzoeksvragen—9
1.2.1	Hoofdvraag—9
1.2.2	Deelvragen—9
1.3	Methodiek—9
1.3.1	Wat zijn de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn?—9
1.3.2	Wat is de natuurlijke variatie van de kustlijn?—9
1.3.3	Hoe kan de teruggang van de Nederlandse kustlijn gekwantificeerd worden?—9
1.3.3.1.	Het Bruun Model—10
1.3.3.2.	Data-analyse—11
1.3.4	Wat is het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn?—12
2	Resultaten—13
2.1	Wat zijn de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn?—13
2.1.1	Natuurlijke factoren—13
2.1.1.1.	Geologische vorming van Nederland—13
2.1.1.2.	Hydrodynamische en eolische processen—14
2.1.1.3.	Zeespiegelstijging—15
2.1.2	Menselijk ingrijpen—15
2.2	Wat is de natuurlijke variatie van de Nederlandse kustlijn?—16
2.3	Hoe kan de teruggang van de Nederlandse kustlijn gekwantificeerd worden?—18
2.3.1	De Delta—18
2.3.2	De Hollandse kust—19
2.3.3	De Wadden—20
2.3.4	De gehele Nederlandse kust—21
2.4	Wat is het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn?—22
3	Discussie—23
4	Conclusie en Aanbevelingen—24
4.1	Conclusie—24
4.2	Aanbevelingen—25
	Bibliografie—26
	Bijlagen—28
Bijlage A	Effect menselijke ingrepen—29
Bijlage B	Referentieprofiel Hollandse kust—32
Bijlage C	Trendanalyse verplaatsingen MKL—33
Bijlage D	Berekeningen effect suppleties—34

Voorwoord

Voor de afronding van de bachelorstudie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente dient er een individueel onderzoek te worden uitgevoerd. Dit moet worden gedaan bij een externe organisatie in binnen- of buitenland. Ik heb besloten om in het mooie Nederland te blijven. Tijdens het vierde kwartiel van het collegejaar 2014-2015 heb ik mijn opdracht uitgevoerd bij de afdeling Hoogwaterveiligheid van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. De stageperiode heb ik als zeer waardevol en leuk ervaren.

Veel dank gaat uit naar mijn begeleiders. Suzanne Hulscher van de UT was mijn intern begeleider. Zij heeft veel nuttige feedback gegeven op mijn voor- en conceptverslag. Evelien van Eijsbergen was mijn begeleider binnen Rijkswaterstaat. Ik wil haar hierbij hartelijk bedanken voor alle praktische dingen die zij voor mij heeft geregeld. Mijn afdelingschef, Koen van der Werff, is hierbij ook van grote waarde geweest. Bureaucratie leek af en toe tegen te werken, maar uiteindelijk kwam het allemaal wel goed. Evelien heeft ook goede feedback gegeven op de verschillende concepten die ik tijdens de stageperiode aanleverde. Op het gebied van de analyses kreeg ik goede feedback van Quirijn Lodder.

Mijn dank gaat ook uit naar alle andere medewerkers van de afdeling Hoogwaterveiligheid. Zij hebben mij erg geholpen met informatie en data. Ook heb ik via hun een mooi inkijkje gekregen bij het kust- en rivierbeheer in Nederland.

Met vriendelijke groet,
Bert Dekker

Samenvatting

Naar aanleiding van een persvraag is in 2011 bepaald wat de teruggang van de Nederlandse kust is als er geen suppleties worden uitgevoerd. Uit enkele snelle analyses kwam een waarde van 1 meter gemiddelde kustachteruitgang per jaar. Dit is een gemiddelde voor de gehele Nederlandse kust. Dit rapport beschrijft een structureel onderzoek naar een waarde voor de terugtrekking van de kust.

Aan de Nederlandse kust zien we over het algemeen een terugtrekkende kustlijn. Een verplaatsing van de kustlijn hangt sterk samen met de hoeveelheid sediment in het kuststelsel en de verdeling van dat sediment. De mate van erosie kan per locatie verschillen. Er zijn ook locaties waar aangroei van de kust plaatsvindt. Het ingrijpen van de mens heeft ook veel invloed gehad op het transport van sediment en dus ook op de verplaatsing van de kust.

Bij sedimenttransport kan er een onderscheid worden gemaakt tussen kustlangse en kustdwarse transporten. Kustlangse transporten ontstaan als gevolg van getijstroom en schuin invallende golven. Kustdwarse transporten zijn het gevolg van golven in combinatie met muistroom. Op het droge gedeelte van de kust zorgt de wind voor herverdeling van het zand.

Zeespiegelstijging zorgt ervoor dat golven hoger het strand op kunnen komen. Dit leidt tot erosie van het strand en aangroei van de vooroever. Het effect van zeespiegelstijging vindt plaats op lange termijn, terwijl golven en wind zorgen voor een snelle herverdeling van sediment. Er is tegenwoordig een situatie waarin de vraag naar sediment groter is dan het aanbod. Vooral de Westerschelde en de Waddenzee hebben een tekort aan sediment. Sediment uit andere delen van het kuststelsel wordt getransporteerd richting die gebieden. In grote delen van het kuststelsel vindt structurele erosie plaats. Het effect van deze erosie wordt zoveel mogelijk gecompenseerd door suppleties.

Tijdens dit onderzoek is met behulp van meerdere methodes gepoogd om een waarde te vinden voor de gemiddelde teruggang van de Nederlandse kustlijn als er geen suppleties plaatsvinden. Er is gebruik gemaakt van literatuuranalyse, het Bruun Model en analyse van twee soorten trends. In Tabel 1 staat een samenvatting van de uitkomsten van de verschillende analyses. Ter volledigheid is de waarde uit de beleidsdocumenten ook ingevoegd. Het gemiddelde van de uitkomsten van de verschillende analyse leidt tot een terugtrekking van de Nederlandse kust met 0,8 meter per jaar.

Tabel 1: verplaatsing van de Nederlandse kust

Verplaatsing kustlijn (m/jaar)	Wadden	Hollandse kust		Delta	Nederland
		Den Helder- IJmuiden	IJmuiden-Hoek van Holland		
(Beleid)					(-1)
Bruun Model	-0,9		-1,1	-1,3	-1,1
Trends MKL	-1,6	+0,2	+0,7	-1,0	-0,7
Trends Volume	-0,3	-0,7	+1,3	-0,6	-0,2
Effect suppleties					-1,0
Gemiddelde	-0,9	-0,5	0,3	-1,0	-0,8

De waarde zoals die in deze studie is bepaald, wordt vooral gebruikt in de communicatie richting bestuurders. In het taalgebruik is het raadzaam om de waarde als volgt te communiceren: "Als er geen suppleties plaats vinden zal de Nederlandse kustlijn zich met gemiddeld 1 meter per jaar terugtrekken." Gezien de onzekerheden in de verschillende methodes en de mate van afronding is het niet raadzaam om de waarde van 0,8 meter per jaar te gebruiken in berekeningen. Berekeningen aan de verandering van de kustlijn dienen te worden gedaan aan de hand van de meest recente JARKUS-data.

1 Inleiding

In 2011 is door een journalist van Metro de volgende vraag gesteld: "Met welke snelheid gaat de kustlijn achteruit als er geen suppleties worden uitgevoerd?" Voor de beantwoording van deze vraag is door Rijkswaterstaat een snelle vingeroefening gedaan, waar grofweg 1 meter kustachteruitgang per jaar uit kwam (van Eijsbergen, 2015 (1)). Deze waarde is een gemiddelde waarde voor de gehele kustlijn waar een Basiskustlijn (BKL) is gedefinieerd. Op sommige locaties is de erosie groter, terwijl er op andere locatie aangroei plaatsvindt. De "1 meter per jaar" is vervolgens in meerdere (beleids)documenten opnieuw gebruikt, zoals het Ontwerp Nationaal Waterplan 2016-2021. Door Rijkswaterstaat is gesteld dat deze waarde van 1 meter per jaar onvoldoende onderbouwd en gedocumenteerd is (van Eijsbergen, 2015 (2)).

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om te bepalen wat de gemiddelde waarde voor de teruggang van de Nederlandse kustlijn is en hoe deze op beleidsniveau gecommuniceerd kan worden. Hierbij wordt er ook gekeken of de "1 meter per jaar" juist is.

1.1 Projectkader

Deze paragraaf geeft een beschrijving van de context van dit onderzoek. Ook worden de belangrijkste begrippen uitgelegd.

1.1.1 Onderzoeksgebied

Voor het voorliggende onderzoek wordt de Nederlandse kust in drie gedeeltes verdeeld: de Wadden, de Hollandse Kust en de Delta. Deze verdeling van de Nederlandse kust is ook gebruikt door Stronkhorst en Van Buren (2012). Er is gekozen voor deze onderverdeling omdat de kustgedeeltes verschillende eigenschappen hebben.



Figuur 1: verdeling Nederlandse kust

De Waddenkust wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van de barrière-eilanden (Waddeneilanden) en zeegaten. De begrenzing wordt gevormd door de Duitse grens en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZW). Deze begrenzing is gekozen omdat ten noorden van de HPZW het effect van het Zeegat van Texel merkbaar is (Elias & Bruens, 2013). De Waddeneilanden zijn van west naar oost respectievelijk Texel, Vlieland, Terschelling, Ameland en Schiermonnikoog. De Waddenkust heeft een lengte van 143 km (Stronkhorst & van Buren, 2012).

De Hollandse Kust is een vrijwel gesloten kust die zich uitstrekt van de Maasvlakte in het zuiden tot de HPZW in het noorden. De Rotterdamse haven is hier als grens gekozen, omdat de Maasvlaktes en de Eurogeul op de tijdsschaal van decennia een barrière vormen voor het langstransport van sediment. In bijlage Bijlage A wordt er verder ingegaan op het effect van de Maasvlakte. De Hollandse kust heeft een lengte van 97 km (Stronkhorst & van Buren, 2012). Het grootste deel van de kust wordt beschermd door stranden en duinen. Bij enkele badplaatsen, zoals Scheveningen, wordt de kust beschermd door boulevards. De enige significante opening bevindt zich bij IJmuiden.

De Delta strekt zich uit van Het Zwin op de Belgische grens tot de Maasvlakte. De kust wordt gevormd door de koppen van de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden en de Deltawerken. In bijlage Bijlage A wordt er ingegaan op het effect van de Deltawerken. De Deltakust heeft een totale lengte van 126 kilometer (Stronkhorst & van Buren, 2012). In de Oosterschelde bevindt zich een afsluitbare stormvloedkering en de Westerschelde is nog volledig open. De overige zeegaten zijn afgedamd.

1.1.2

Kustbeleid

In 1990 heeft de Rijksoverheid besloten dat Nederland niet kleiner mag worden en dat de kustlijn van 1990 in stand moet worden gehouden. Dit wordt gedaan door het dynamisch handhaven van de kustlijn. Dit houdt in dat er suppleties worden toegepast om de kustlijn te handhaven. Alleen als het echt niet anders kan, worden er harde constructies aangelegd. Dit wordt samengevat in de uitspraak 'Zacht waar het kan, hard waar het moet'. Om te bepalen welke lijn er gehandhaafd moest worden is in 1990 de Basiskustlijn (BKL) vastgesteld. In 2012 is de BKL voor het laatst geactualiseerd.

Suppleties kunnen worden onderverdeeld in drie types: strand-, vooroever- en geulwandsuppleties. Strandsuppleties hebben direct effect op de kustlijn en de mate van veiligheid. Tijdens de aanleg ondervinden andere functies echter veel hinder van de suppletie, omdat het strand in kwestie gedeeltelijk wordt afgesloten. Vooroeversuppleties hebben dit probleem niet, maar hun effect is ook pas op termijn zichtbaar. Geulwandsuppleties worden toegepast op locaties waar een geul vlak voor het strand loopt. Door erosie van de geul kan het strand instabiel worden. Door een suppletie tegen de wand van de geul wordt de stabiliteit van het strand vergroot.

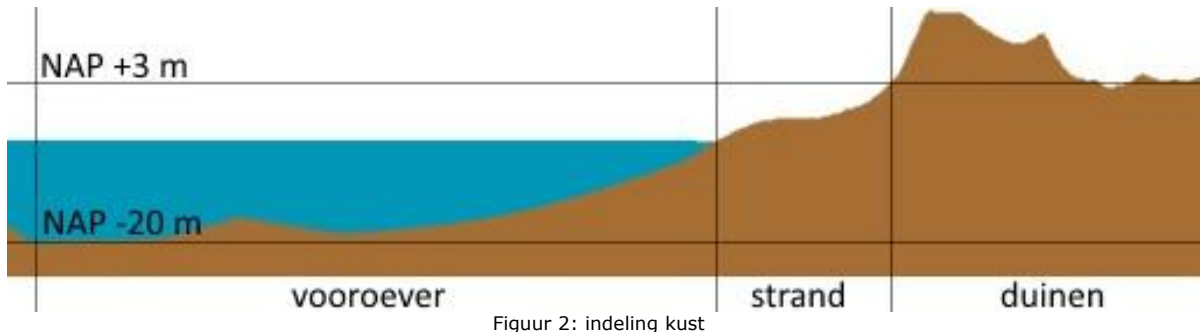
Tot 1993 werden er vooral strandsuppleties toegepast. Er werd op kleine schaal al wel geëxperimenteerd met vooroeversuppleties. Sinds 1993 wordt er getracht om in zoveel mogelijk gevallen onderwatersuppleties uit te voeren in plaats van strandsuppleties. Sinds 1997/98 wordt dit op reguliere basis gedaan. Geulwandsuppleties worden alleen toegepast in specifieke situaties. In 2011 is er voor het eerst een megasuppletie toegepast voor de Nederlandse kust, de zogenoemde "Zandmotor". Deze suppletie is uitgevoerd in het kustvak Delfland ter hoogte van Ter Heijde.

1.1.3

Begrippen en uitgangspunten

De Nederlandse kustlijn wordt in dit project gedefinieerd als de Momentane KustLijn (MKL) op locaties waar ook een BKL is gedefinieerd. In Figuur 3 is weergegeven op welke locaties de BKL is vastgesteld. Kustvakken 1 (Rottumeroog /-plaat), 10 (Slufter/Maasvlakte) en 14 (Oosterschelde/ Neeltje Jans) worden niet meegenomen in dit onderzoek. De MKL wordt bepaald door per raai de hoeveelheid zand tussen twee horizontale grenzen en een verticale grens te delen door de hoogte van het profiel. De MKL wordt jaarlijks bepaald aan de hand van de Jaarlijkse Kustmeting (JARKUS). De richtlijnen voor het uitvoeren van de JARKUS wordt beschreven in rapport RIKZ-95.022.

Belangrijke locaties binnen het kustprofiel zijn de buitengrens van de vooroever en de duinvoet (MDL). De buitengrens van de vooroever is vastgesteld op NAP -20 meter (TAW, 2002). Buiten deze grens hebben processen geen invloed op de kustlijn. De duinvoet wordt over het algemeen gedefinieerd als de locatie waar het zandige profiel overgaat van een flauwe (strand) naar een steile helling (duin). Dit punt is in Nederland vastgesteld op NAP +3 meter (Walstra, et al, 2006). In Figuur 2 staat de indeling van het kustsysteem weergegeven.



Figuur 2: indeling kust

Zeespiegelstijging is een belangrijk begrip als het gaat om kustbeheer. Er bestaan vele scenario's die elk een andere mate van zeespiegelstijging voorspellen. Bij dit onderzoek is er gebruik gemaakt van het scenario dat ook wordt gehanteerd binnen het Programma Kustlijnzorg. Dit scenario gaat uit van een zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw.



Figuur 3: BKL 2012 (Deltares, 2012)

1.2 Onderzoeksvragen

Om het onderzoek te structureren en richting te geven zijn onderstaande onderzoeksvragen opgesteld. In het volgende hoofdstuk wordt aangegeven hoe elke deelvraag wordt beantwoord.

1.2.1 Hoofdvraag

Wat is de gemiddelde waarde voor de teruggang van de Nederlandse kustlijn als er geen suppleties worden uitgevoerd?

1.2.2 Deelvragen

1. Wat zijn de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn?
2. Wat is de natuurlijke variatie van de Nederlandse kustlijn?
3. Hoe kan de teruggang van de kustlijn gekwantificeerd worden?
4. Wat is het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn?

1.3 Methodiek

Voor het bepalen van de gemiddelde teruggang van de Nederlandse kustlijn worden er verschillende invalshoeken en methodes gebruikt. Per deelvraag wordt er besproken welke methode wordt toegepast. In Tabel 2 staat er een samenvatting van de gebruikte onderzoeksmethodes.

Tabel 2: onderzoeksmethodes per deelvraag

	Literatuur	Data	Model
1. Wat zijn de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn?	x		
2. Wat is de natuurlijke variatie van de kustlijn?	x		
3. Wat is het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn?	x	x	
4. Hoe kan de teruggang van de Nederlandse kustlijn gekwantificeerd worden?	x	x	x

1.3.1 Wat zijn de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn?

Om te bepalen wat de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn zijn, is er gebruik gemaakt van literatuurstudie. Hierbij is gebruik gemaakt van zowel Nederlandse als buitenlandse studies. Er is gekeken naar factoren op verschillende tijdsschalen, van heel groot tot heel klein. De grootste tijd- en ruimteschaal is de ontwikkeling van Nederland over duizenden jaren. Voor het uiteindelijke advies wordt er gekeken naar een tijdsschaal van jaren tot decennia.

1.3.2 Wat is de natuurlijke variatie van de kustlijn?

Voor de beantwoording van de tweede deelvraag is er in de literatuur gezocht naar factoren die op verschillende tijdsniveaus zorgen voor een schommeling in de positie van de kustlijn. Ook hier is er gekeken naar een breed palet van tijd- en ruimteschalen. Met behulp van de literatuur is er ook aangegeven hoe groot deze variaties per jaar zijn. Voor het uiteindelijke antwoord op deze deelvraag is er gekeken naar variatie op een niveau van jaren tot decennia.

1.3.3 Hoe kan de teruggang van de Nederlandse kustlijn gekwantificeerd worden?

De teruggang van de Nederlandse kustlijn is gekwantificeerd met behulp van literatuur- en data-analyse en een modelberekening. Voor de data-analyse is gekeken naar de gegevens die volgen uit de toetsing van de kustlijn 2015. Voor de modelberekeningen is er gebruik gemaakt van het Bruun Model. Dit model wordt als eerste besproken, waarna er wordt ingegaan op de data-analyse.

1.3.3.1. Het Bruun Model

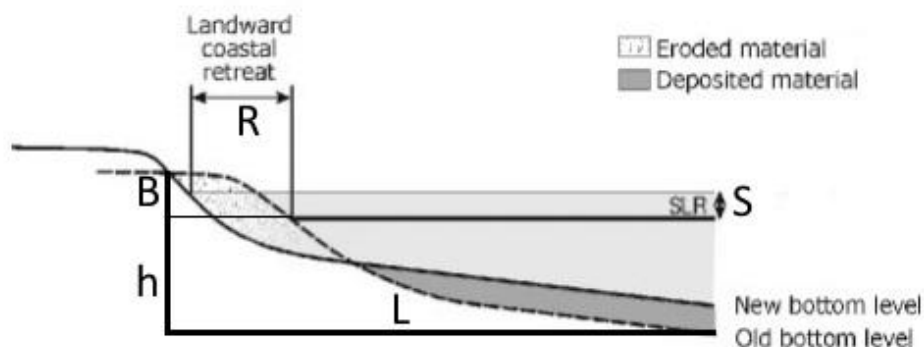
In 1962 heeft Per Bruun een conceptueel model voorgesteld dat de teruggang van een zandige kust als gevolg van zeespiegelstijging kon bepalen. Dit model is bedoeld voor tijdsschalen van tientallen tot honderden jaren. Bij het opstellen van dit model zijn er een aantal aannames gedaan:

- Het model heeft betrekking op een tweedimensionaal profiel loodrecht op de kustlijn.
- Het profiel is altijd in evenwicht.
- Het profiel is volledig van zand dat makkelijk kan eroderen.
- Op regelmatige basis zijn er golven die groot genoeg zijn om het zand te eroderen.

De eerste aanname heeft als gevolg dat kustlangs sedimenttransport wordt genegeerd. Het model gaat uit van een gesloten zandbalans met alleen kustdwars transporten. De laatste aanname is nodig, omdat het ontbreken van golven puur leidt tot inundatie van land als gevolg van de stijging van de waterspiegel. Eolische processen worden buiten beschouwing gelaten bij dit model. Dit heeft als direct gevolg dat de duinen niet meegenomen hoeven te worden in het profiel. Het profiel strekt zich tot uit van de duinvoet tot de buitenste grens van de vooroever.

Het Bruun Model is opgebouwd uit drie hypothesen (Davidson-Arnott, 2005):

- (1) Als gevolg van zeespiegelstijging wordt het strand geërodeerd door golven.
- (2) Het materiaal dat is geërodeerd op het strand wordt op de vooroever gedeponneerd. De hoeveelheid zand dat wordt gedeponneerd is gelijk aan de hoeveelheid zand dat wordt geërodeerd.
- (3) De dikte van de depositie van sediment op de vooroever is gelijk aan de zeespiegelstijging. De waterhoogte ter hoogte van de vooroever blijft dus gelijk.



Figuur 4: Schematisatie van het Bruun Model (Davidson-Arnott, 2005)

In formulevorm kan het Bruun Model als volgt worden weergegeven (Davidson-Arnott, 2005):

$$R = \frac{L_*}{B + h_*} S \quad (1)$$

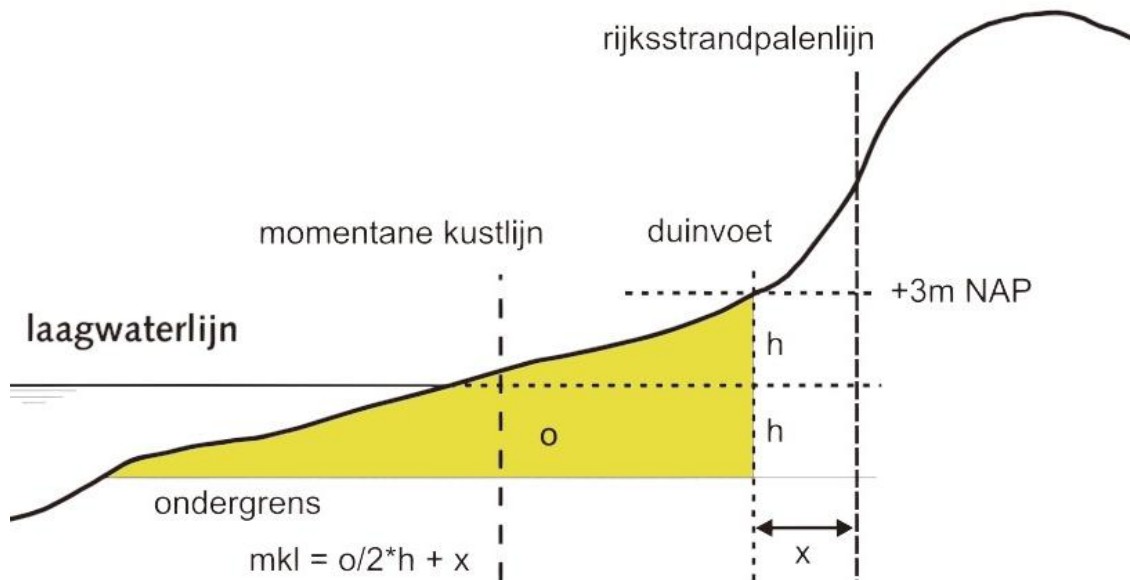
In deze formule is R de teruggang van de kustlijn als gevolg van zeespiegelstijging S . L_* is de lengte van het profiel dat wordt doorberekend. De diepte h_* is de diepte aan buitengrens van de vooroever. B is de hoogte van het zandige element dat wordt geërodeerd (Davidson-Arnott, 2005). In de berekeningen wordt aangenomen dat dit de hoogte van de duinvoet is. De duinen worden buiten beschouwing gelaten omdat hier onder gemiddelde omstandigheden geen erosie als gevolg van golfaanval plaats vindt.

De term $B + h_*$ is constant voor de gehele Nederlandse kust, namelijk 23 meter (zie paragraaf 1.1.3). Om L_* te bepalen is per kustgedeelte tussen de 5 en de 10 metingen gedaan van de afstand tussen de duinvoet en de NAP-20 meter lijn. Dit is gedaan met behulp van ArcGis. Uit deze metingen is een gemiddelde bepaald. Het Bruun Model is doorgerekend voor de Delta, de Hollandse kust en de Waddenkust. Van de drie uitkomsten is daarna een gewogen gemiddelde genomen op

basis van de lengte van de kustlijn van de drie deelsystemen, als gemiddelde voor de landelijke waarde.

1.3.3.2. Data-analyse

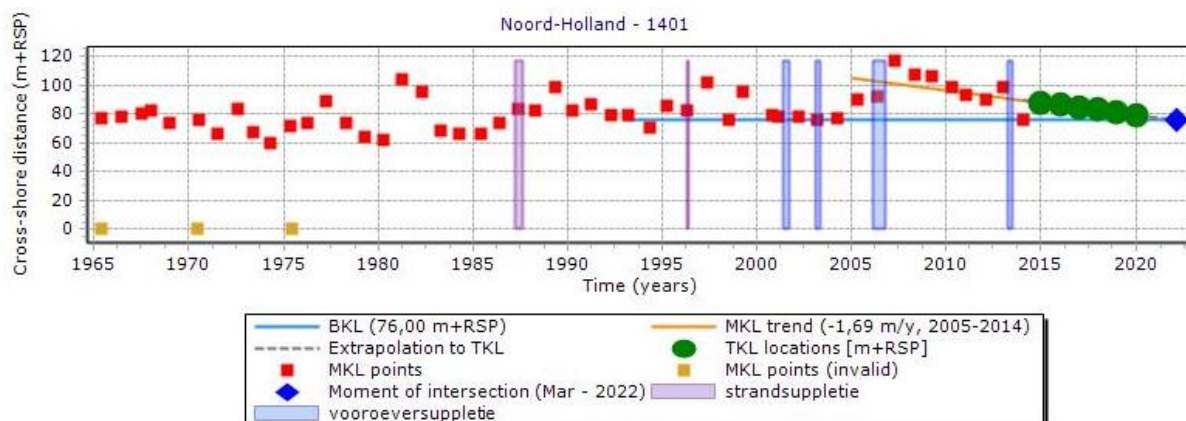
In het kader van het Programma Kustlijnzorg vindt er jaarlijks een toetsing plaats van de Momentane Kustlijn (MKL) ten opzichte van de BKL. In Figuur 5 staat de schematisatie van de rekenschijf van de MKL weergegeven. De MKL wordt elk jaar bepaald.



Figuur 5: rekenschijf MKL

Bij de toetsing hoort ook een trendanalyse en een verwachting voor de locatie van de MKL voor de komende jaren. Per raai wordt er aan de hand van de laatste 10 jaar vastgesteld wat de trend in de verplaatsing van de MKL is. Als er strandsuppleties zijn uitgevoerd bij de betreffende raaien, wordt er bepaald of er voldoende metingen beschikbaar zijn van na de suppletie.

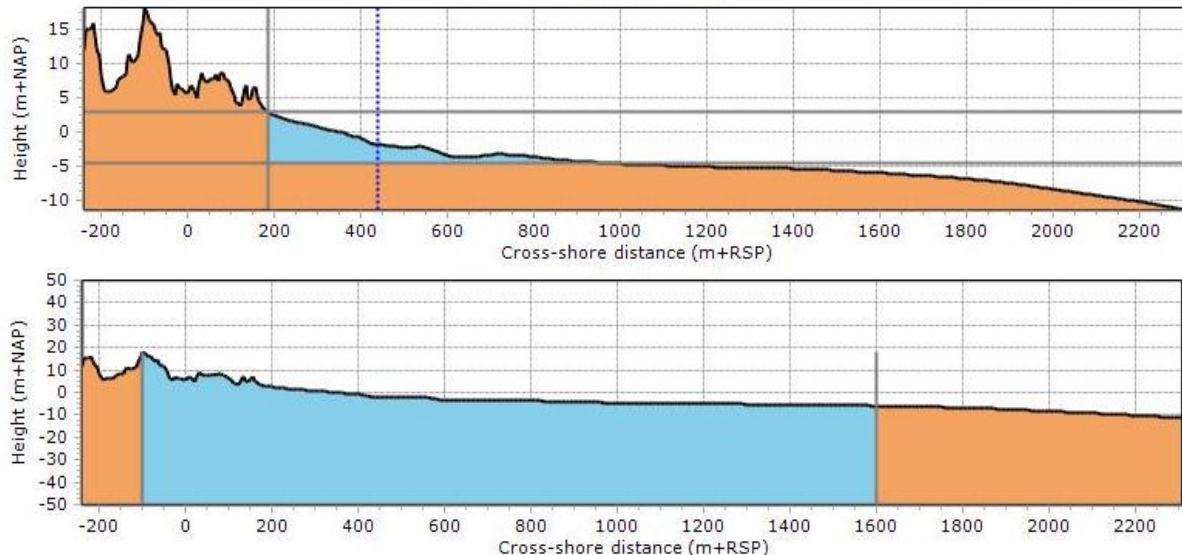
Vooroeversuppleties worden niet als een trendbreuk gezien, omdat zij geen direct effect hebben op de ligging van de MKL. De uitkomst van de trendanalyse geeft aan wat er naar verwachting met de MKL gebeurt als er geen suppleties plaatsvinden. De berekening is in 2015 uitgevoerd voor 1450 van de 1465 raaien. Voor 15 raaien was het niet mogelijk om de toetsing uit te voeren (Rijkswaterstaat, 2014). In Figuur 6 is als voorbeeld voor raai 1401 in het kustvak Noord-Holland de uitkomst van deze berekening weergegeven. Met behulp van Morphan is het mogelijk om alle trends per raai per kustvak te bepalen. Morphan is software dat wordt gebruikt voor de analyse van de kust. Het maakt ook de resultaten inzichtelijk. Van alle trends is het gemiddelde bepaald. Hierbij is gebruikt gemaakt van SPSS.



Figuur 6: trend in de positie van de MKL op raai 1401 in Noord-Holland (Rijkswaterstaat, 2014)

DE TERUGTREKKING VAN DE NEDERLANDSE KUSTLIJN

Tijdens de toetsing 2015 is ook bepaald hoeveel sediment in het kustsysteem aanwezig was tijdens de afgelopen jaren. Hierbij wordt er gekeken naar de hoeveelheid zand tussen de NAP+50 m en NAP-50 m. Uit de gegevens van de afgelopen 10 jaar is de trend in de volumeverandering bepaald. Van deze trends is voor de delen van de kust een gemiddelde bepaald. Daarna is er een gewogen gemiddelde bepaald voor de gehele Nederlandse kust. De lengte van de kustlijn is als weging gebruikt. In onderstaande afbeelding is het verschil tussen de MKL-rekenschijf en het profiel zoals gebruikt bij de volumeberekeningen te zien.



Figuur 7: rekenschijf en volumeprofiel raai 5475 in Noord-Holland (Rijkswaterstaat, 2014)

1.3.4

Wat is het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn?

Met behulp van literatuurstudie is bepaald wat het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn is. Tevens is er data verzameld over suppletievolumes en de verandering van de MKL. Met behulp van lineaire regressieanalyse is de data verwerkt. Hierbij is gebruik gemaakt van het statistiekprogramma SPSS. Aan de hand van het zandvolume dat nodig is om de BKL te handhaven is terug geredeneerd wat de gemiddelde teruggang van de Nederlandse kust is. Aan de hand van de suppletievolumes per strekkende meter kust is bepaald wat de teruggang van de kust is.

2 Resultaten

In paragraaf 1.2 zijn er een aantal onderzoeksvragen gepresenteerd. Deze vragen worden in dit hoofdstuk beantwoord. De methode die is gebruikt om tot deze antwoorden te komen is besproken in paragraaf 1.3.

2.1 Wat zijn de oorzaken van de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn?

Aan de Nederlandse kust zien we over het algemeen een terugtrekkende kustlijn. Deze erosie heeft verschillende oorzaken. Een verplaatsing van de kustlijn hangt sterk samen met de hoeveelheid sediment in de kust en de verdeling van dat sediment. De mate van erosie kan per locatie verschillen. Er zijn ook locaties waar aangroei van de kust plaatsvindt (Elias & Bruens, 2013). Het ingrijpen van de mens heeft ook veel invloed gehad op het transport van sediment en dus ook op de verplaatsing van de kust.

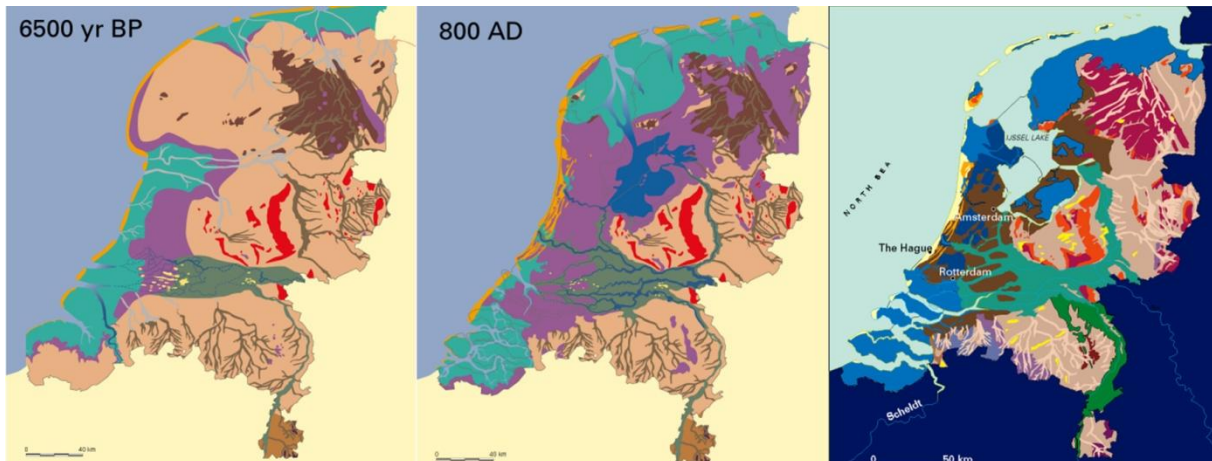
2.1.1 *Natuurlijke factoren*

Sediment wordt getransporteerd als gevolg van natuurlijke processen. De mens kan dit transport beïnvloeden. In deze paragraaf wordt dit menselijk ingrijpen buiten beschouwing gelaten. Ten eerste wordt er ingegaan op de geologische geschiedenis van Nederland en de vorming van de kustlijn. Ten tweede wordt er ingegaan op het natuurlijke sedimenttransport. Ten slotte wordt er expliciet ingegaan op het effect van zeespiegelstijging.

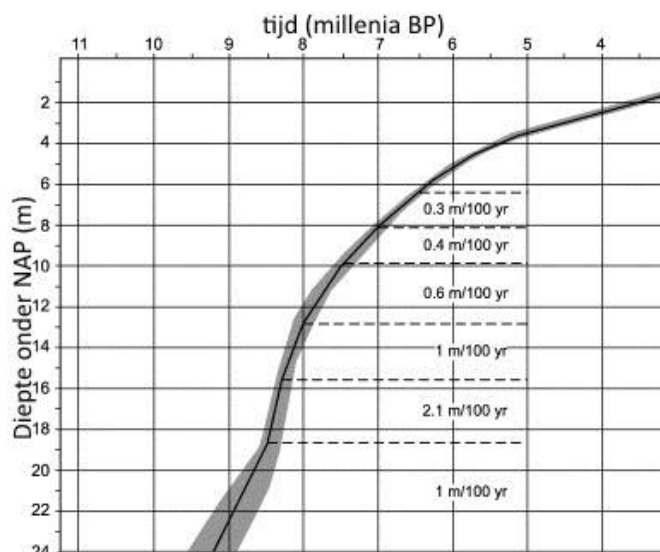
2.1.1.1. Geologische vorming van Nederland

Nederland had niet altijd de vorm die het nu heeft. Dit is goed te zien als de kaarten van Nederland van 6500 jaar en 1200 jaar geleden worden vergeleken met een kaart van de huidige situatie, zie Figuur 8. In Figuur 9 is ter illustratie ook de zeespiegelstijging voor de periode tussen 9000 BP en 3000 BP weergegeven. Vanaf circa 9000 jaar geleden bestond het huidige West-Nederland uit een groot inter-getijdengebied dat werd ingesloten door twee grote landhoofden. Het zuidelijke landhoofd werd gevormd door de afzettingen van de Maas en de Rijn. Het noordelijke landhoofd was de zogenoemde Texelse Hoogte. Het inter-getijdengebied was via talrijke openingen verbonden met de Noordzee. Tot circa 6000 jaar geleden steeg de zeespiegel zeer snel. Hierna vlakke de relatieve zeespiegelstijging af. De mate van sedimenttransport richting de kust bleef echter gelijk. De bekkens in het inter-getijdengebied werden langzaam opgevuld. Tijdens deze periode trad er ook een zeewaartse verplaatsing van de kustlijn op. De kust veranderde van een open kust gedomineerd door het getij naar een gesloten kust die wordt gedomineerd door golven. Er vond regressie van de kust plaats (Beets, et al, 1992). De veranderingen in de geologische omstandigheden zorgen voor zeer grote verschuivingen over een zeer lange termijn en op een grote ruimteschaal.

De regressie van de kust als gevolg van zeespiegelstijging vindt nog steeds plaats. Tegenwoordig wordt een stijging van 20 cm/eeuw gemeten. Een deel van deze zeespiegelstijging is het gevolg van het versterkte broeikaseffect (KNMI, 2013). De natuurlijke verandering van de zeespiegel heeft heel weinig effect op de kustlijn. De ligging van de kustlijn wordt veel sterker beïnvloedt door andere factoren (zie paragraaf 2.1.1.2).



Figuur 8: geologische verandering van Nederland. (Links/midden: Groenblauw is inter-getijdgebied, paars is veen) (Werkgroep voor Tertiaire en Kwartaire Geologie, 2011).



Figuur 9: zeespiegelstijging gedurende de afgelopen 9000 jaar (Hijma, van der Spek, & van Heteren, 2010)

2.1.1.2. Hydrodynamische en eolische processen

Als gevolg van hydrodynamische en eolische processen vindt er transport van sediment plaats. De hoeveelheid sediment die door het water wordt verplaatst hangt onder andere af van de golfhoogte, golfsnelheid, waterdiepte en de helling van het strand.

Kustlangse stromingen als gevolg van de wind en het getij zorgen voor een kustlangse verplaatsing van sediment. De sterkste kustlangse stromingen in Nederland zijn de getijstromen. Getijstromen zijn voornamelijk dominant in dieper water. De vloedstroom is sterker dan de ebstroom (Bearman & Brown, 1999). De vloedstroom stroomt voor de Nederlandse kust richting het noordnoordoosten. Netto wordt het sediment voor de Nederlandse kust dus richting het noordnoordoosten getransporteerd. Dit heeft vooral effect op een grote tijdschaal van decennia tot eeuwen. Golven zorgen voor beweging van het water. Beweging van water heeft weer als gevolg dat sediment wordt verplaatst. De hoeveelheid sediment die wordt verplaatst hangt af van de stroomsnelheden tijdens het passeren van de golf en de korreldiameter. Ook de steilheid van de golf heeft invloed op de verplaatsing van sediment. Hoe steiler de golf, hoe meer sediment zeewaarts wordt getransporteerd (Bearman & Brown, 1999).

Als golven onder een schuine hoek een kust benaderen ontstaan er kustlangse stromingen. De snelheid van deze stromingen is afhankelijk van de orbitale snelheid en de hoek tussen het golfvront en de kustlijn (Bearman & Brown, 1999). Kustlangse stromingen als gevolg van schuin invallende golven hebben in Nederland een veel groter effect dan getijstromen. Dit is het gevolg van de flauwe helling van de Nederlandse kust.

Naast water zorgt ook de wind voor een verplaatsing van sediment. Fijn zand kan vanaf het strand richting de duinen worden getransporteerd. De vorm en plaats van de duinen kunnen ook variëren als gevolg van de wind. Door beplanting, zoals helmgras, op een duin wordt het zand vastgehouden. Wind heeft een zeer lokaal effect. Dit effect is zichtbaar op het niveau van uren. Het is belangrijk om op te merken dat de verandering van een kustlijn niet afhangt van de absolute transporten. Het hangt af van de gradiënten in het transport. Een groter verschil in transport in en uit een gebied leidt tot een grotere verandering van de kustlijn.

2.1.1.3. Zeespiegelstijging

Al meerdere decennia is er bekend dat de stijging van de zeespiegel de oorzaak is van een groot gedeelte van de erosie van de kustlijn. Per Bruun heeft in 1962 al enkele formules opgesteld om terugtrekking van de kust te kunnen bepalen. Een deel van het strand zal geïnundeerd worden als gevolg van het stijgende waterpeil. Dit heeft een regressie van de kustlijn tot gevolg. Uit meerdere onderzoeken blijkt dat de werkelijke erosie vele malen groter is dan deze regressie (Leatherman, et al, 2000; Davidson-Arnott, 2005). Dit is het gevolg van het wegspoelen van sediment. Door de stijgende waterspiegel kunnen golven namelijk structureel verder het strand op komen. Dit leidt tot erosie van het zandlichaam. Als gevolg van hydrodynamische en eolische processen zal een herverdeling van het sediment plaatsvinden (van der Wal, 2004; TAW, 1995). De herverdeling van sediment vindt plaats op verschillende tijdsschalen. Extreme situaties, zoals stormen, zorgen voor een snelle herverdeling. Een stijgende zeespiegel zorgt echter voor een herverdeling op veel langere termijn (Bearman & Brown, 1999).

2.1.2 Menselijk ingrijpen

Naast zeespiegelstijging is menselijk ingrijpen ook van invloed op de beschikbaarheid en het transport van sediment. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat vooral harde constructies een effect hebben op de teruggang van de kustlijn. Het sedimenttransport bij de kust is namelijk een zeer dynamisch proces met een bepaald dynamisch evenwicht. Op het moment dat er starre elementen in dit systeem worden aangebracht, wordt dit evenwicht verstoord (van der Wal, 2004). Grote ingrepen in het Nederlandse kuststelsel zijn de Zuiderzeewerken, de Deltawerken, De haven van Rotterdam, de monding van het Noordzeekanaal en de Eierlandse dam (zie Figuur 10). Ook zijn er langs gedeeltes van de Nederlandse kust strekdammen aangelegd. De invloed van deze werken wordt in bijlage Bijlage A uitgebreider besproken.

Door de rivieren wordt er vrijwel geen sediment meer aangevoerd. Dit heeft te maken met de menselijke ingrepen in het rivierensysteem en aanpassingen in het landgebruik langs de rivier. De input van sediment is dus nihil. Daarentegen is de sedimentvraag in de Waddenzee en de Westerschelde juist toegenomen. Zand uit delen van het kuststelsel wordt getransporteerd richting deze gebieden. Hierdoor vindt er erosie plaats bij het Marsdiep en de kust van de Westerschelde. Zand dat getransporteerd wordt richting de Westerschelde of de Waddenzee komt zeer waarschijnlijk niet meer terug in het kustfundament.

De aanleg van de Deltawerken heeft er toe geleid dat er een nieuw dynamisch evenwicht moet worden gezocht in de Voordelta. De zandbanken en geulen in de Voordelta zijn daardoor continu in beweging. De Oosterschelde is nog steeds een getijdegebied, maar de ontgrondinsculen voor de kering hebben als gevolg dat sediment niet de kering passeert.

De Maasvlaktes vormen samen met de Eurogeul op een tijdschaal van jaren tot decennia een barrière voor sedimenttransport langs de kust. Hetzelfde is het geval bij de havenpiëren van IJmuiden en de IJgeul.



Figuur 10: locaties grote kunstwerken

De aanleg van de Eierlandse Dam bij de noordelijke Noordzeekust van Texel heeft ertoe geleid dat de kustlijn lokaal enkele honderden meters zeewaarts is verplaatst. Ten zuiden van de dam is de erosie echter van dezelfde orde van grootte als voor de aanleg van de dam (Elias & Bruens, 2012). Het effect van de dam is zeer lokaal. Dit is ook het geval bij de strekdammen die langs grote gedeeltes van de Nederlandse kust zijn aangelegd. Zij zijn aangelegd om de erosie van de kust tegen te gaan. Op de plekken waar de strekdammen de getijstroom uit de kust houden, zijn ze effectief. Op andere plekken is het vrijwel niet aantoonbaar dat ze effectief zijn (Elias & Bruens, 2013).

2.2

Wat is de natuurlijke variatie van de Nederlandse kustlijn?

Als gevolg van natuurlijke en menselijke processen varieert de ligging van de kustlijn. In deze paragraaf wordt de variatie bepaald onafhankelijk van menselijk ingrijpen. Variatie wordt gedefinieerd als een schommeling in de positie van de kustlijn. De natuurlijke variatie heeft verschillende oorzaken. Een samenvatting van deze oorzaken is gegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Oorzaken variatie kustlijn

Tijd- en ruimteschaal	Oorzaak
Heel groot (eeuwen-millenia/100+ km)	Veranderend klimaat
Groot (decennia-eeuwen/10-100 km)	Migratie zandgolven
Gemiddeld (jaren-decennia/1-5 km)	Veranderde golfomstandigheden Migratie zandbanken
Klein (uren-jaren/10 m-1 km)	Seizoensinvloeden

Veranderingen in het klimaat kunnen een variatie in de ligging van de kustlijn veroorzaken. Deze variatie is dan het gevolg van veranderingen in de zeespiegel. De zeespiegel verandert als gevolg van temperatuurveranderingen. Deze temperatuurveranderingen worden beschreven met zogenoemde klimaatcycli. Deze klimaatcycli hebben effect op een tijdschaal van millennia. De effecten zijn globaal merkbaar. Op een tijdschaal van decennia is het effect van de klimaatcycli echter verwaarloosbaar klein.

Als gevolg van stromingen ontstaan er zandvormen op de zeebodem, zoals zandgolven en brekerbanken. Zandgolven zijn aanwezig op de bodem van de gehele Noordzee. Zij bewegen zich met een maximale snelheid van circa 10 meter per jaar. De aanwezigheid van zandgolven dichtbij de kust heeft invloed op het golfklimaat bij de kust. Omdat zandgolven op regelmatige afstand van elkaar voorkomen, ontstaat er een quasiritmisch veranderend patroon van golfomstandigheden (Guillén, Stive, & Capobianco, 1998). Verschillen in golfomstandigheden leiden tot verschillen in sedimenttransport. Dit heeft weer invloed op de ligging van de kustlijn. Omdat de zandgolven zich verplaatsen langs de kust, zal de mate van erosie langs de Hollandse kust lokaal variëren met een periode van 10-15 jaar. Langs de kust van de Delta is deze periode vele malen groter, volgens Maranus en Verhagen (1987) namelijk circa 130 jaar. Tijdens deze periode kan de locatie van de kust wel met enkele honderden meters variëren. Het is op dit moment onduidelijk waar het verschil in periode door wordt veroorzaakt.

Uit onderzoek van Wijnberg (1995) dat wordt gebruikt als onderbouwing door Guillén et al (1998) blijkt dat brekerbanken migreren van ondiep naar diep. Een brekerbank wordt dicht bij het strand gevormd en zal groeien en naar dieper water verplaatsen. In het diepere water zal de bank weer eroderen en verdwijnen. Op dit moment wordt er dicht bij het strand weer een nieuwe bank gevormd. Dit cyclische proces heeft bij de Hollandse kust een periode van ongeveer 15 jaar (Guillén, et al, 1998). De positie van de banken heeft direct invloed op het golfklimaat bij de kust. Een veranderend golfklimaat leidt tot een verschuiving van de kustlijn. Deze verschuiving heeft een cyclisch karakter. De periode van dit proces is gelijk aan de periode van de verplaatsing van de banken, circa 15 jaar.

DE TERUGTREKKING VAN DE NEDERLANDSE KUSTLIJN

Tijdens de verschillende seizoenen overheersen er verschillende weersomstandigheden. Tijdens de winter vinden er over het algemeen meer stormen plaats, terwijl tijdens de zomer de rustige condities overheersen. Dit heeft als gevolg dat tijdens de winter er veel erosie van het strand en de duinen plaatsvindt, terwijl tijdens de zomer het strand en duinen weer aangroeien (Bearman & Brown, 1999). Dit proces is weergegeven in Figuur 11. Gedurende een jaar zal de positie van de kustlijn als gevolg van seizoensinvloeden een cyclisch verloop hebben. Tijdens het analyseren van data is het dus van belang dat er rekening wordt gehouden met de periode waarbinnen de metingen zijn uitgevoerd.



Figuur 11: invloed van de seizoenen op een strand. (a) Een zandig strand tijdens de herfst wordt (b) geërodeerd door winterse stormen, zodat (c) onderliggende keien bloot komen te liggen. (d) in de zomer komt er weer zand op het strand (Bearman & Brown, 1999).

De veranderingen van de kustlijn die zijn besproken in de voorgaande paragrafen blijken een cyclische variatie in de kustlijn te weeg te brengen met een amplitude van ongeveer 10 meter (Guillén et al, 1998). Verschuivingen van de kustlijn aan de Hollandse kust van maximaal circa 10 meter tijdens periodes van minimaal 15 jaar kunnen dus worden toegeschreven aan de natuurlijke variatie van de kust als gevolg van de migratie van zandgolven en -banken. Op de Waddeneilanden fluctueert de kustlijn in de orde van 10-40 m/jaar (Alkyon, 2005). Hier is de natuurlijke variatie dus nog groter.

2.3 Hoe kan de teruggang van de Nederlandse kustlijn gekwantificeerd worden?

Het bepalen van de gemiddelde teruggang van de Nederlandse kustlijn kan vanuit verschillende standpunten worden gedaan. Bij dit onderzoek is er gebruik gemaakt van literatuuronderzoek, het Bruun Model (zie paragraaf 1.3.3.1) en trendanalyses. Voor de uitvoering van de analyses is de Nederlandse kust onderverdeeld in drie gebieden: de Delta, De Hollandse Kust en de Waddenkust.

2.3.1

De Delta

Stronkhorst en van Buren (2012) stellen dat er aan de Deltakust erosie optreedt over 64 kilometer. Dit bedraagt 51% van de totale kustlengte in de Delta. De erosie treedt voornamelijk op aan de koppen van de eilanden. In de monding van de Westerschelde treedt ook structurele erosie op (zie Figuur 12). Van der Laan (1990) heeft data verzameld over de verplaatsing van de kustlijn sinds 1600. Deze zijn weergegeven in Tabel 4. Verder stelt Van der Laan (1990) dat Zeeuws-Vlaanderen over de laatste 100 jaar een erosie van circa een 0,5 m/jaar kent. Walcheren kent een ook erosie met een maximum van 1,0 m/jaar aan de noordwestzijde.

Tabel 4: verplaatsing Delta volgens Van der Laan (1990)

Locatie	Verplaatsing kust sinds 1600 (m)	kustlengte (km)	Verplaatsing kustlijn (m/jaar)
Goeree	-4000	16	-10,0
Voorne	-500	10	-1,3
Zeeuws Vlaanderen	-400	14	-1,0
Walcheren/Schouwen	-1000	45	-2,5
Gemiddelde			-3,5

De afstand L_* bedraagt 15 kilometer (Ruiter, 2015). De methode staat beschreven in paragraaf 1.1.3. Als dit wordt verwerkt in het Bruun Model leidt dit tot de volgende uitkomst:

$$R_{Delta} = \frac{L_*}{B + h_*} S = \frac{1,5 * 10^4}{3 + 20} * 0,20 = 130 \text{ m/eeuw} = 1,3 \text{ m/jaar}$$

$$\text{Verplaatsing Delta} = -1,3 \text{ m/jaar}$$

Met behulp van de trends van de verplaatsing van de MKL is ook bepaald wat de gemiddelde verplaatsing van de kust in de Delta is. Uit deze exercitie komt de volgende uitkomst:

$$\text{Verplaatsing Delta} = -1,0 \text{ m/jaar}$$

Aan de hand van de trends in de verandering van het volume in de profiel is evenzo bepaald wat de gemiddelde verplaatsing van de kustlijn is. Dit leidde voor de Delta voor onderstaande uitkomst.

$$\text{Verplaatsing Delta} = -0,6 \text{ m/jaar}$$

2.3.2

De Hollandse kust

Het blijkt dat er op grote schaal suppleties nodig zijn om de Basiskustlijn te handhaven. Er wordt gesteld door Elias en Bruens (2013) dat er over de gehele Noord-Hollandse kust erosie plaatsvindt. Dit komt overeen met het onderzoek van Stronkhorst en van Buren (2012). Aan de Zuid-Hollandse kust treedt de erosie voornamelijk op tussen Hoek van Holland en Scheveningen. Tussen Scheveningen en IJmuiden is er vrijwel geen sprake van structurele erosie (zie Figuur 12). Stronkhorst en van Buren (2012) stellen dat er over 32 km van de Hollandse kust erosie plaatsvindt. Er treedt dus erosie op over 33% van de totale kustlengte van Holland. Moens (1987) heeft bepaald hoeveel sediment er betrokken is bij de verplaatsing van de kustlijn langs de Hollandse kust. Uit zijn studie komen de volgende resultaten zoals weergegeven in de tweede kolom van Tabel 5. Het gemiddelde in de onderste rij is een gewogen gemiddelde van de veranderingen van de kustlijn. De lengte van de kustlijn is als weging gebruikt.

Tabel 5: verandering van de Hollandse kust volgens Moens (1987)

Afstand tot Den Helder (km)	Erosie/Aanzanding (m³/jaar) (Moens, 1987)	Hoogte actief kustprofiel (m) (Moens, 1987)	Verplaatsing kustlijn (m/jaar)
0-40	-1.000.000	25	-1,0
40-100	+604.000	25	+0,4
100-120	-133.000	25	-0,3
Gemiddelde			-0,2

Ook in onderzoek van Van der Laan (1990) worden er uitspraken gedaan over de teruggang van de Hollandse kust. In Tabel 6 is de verplaatsing van de kustlijn op verschillende locaties langs de Hollandse kust weergegeven. Van der Laan (1990) gaf de verandering vanaf 1750. Deze zijn in de laatste kolom vertaald naar een verplaatsing in meters per jaar.

Tabel 6: achteruitgang van de kust volgens Van der Laan (1990)

Locatie	Verandering kustlijn sinds 1750 (m)	Verplaatsing kustlijn (m/jaar)
's Gravenzande	-300	-1,2
Scheveningen	-50	-0,2
Katwijk	100	0,4
Egmond aan Zee	-130	-0,5
Hondsbosche Zeewering	-375	-1,5
Gemiddelde		-0,6

L_* bedraagt aan de Hollandse kust circa 13 km (Ruiter, 2015). De methode waarmee deze waarde is bepaald staat in paragraaf 1.1.3. De waarde leidt tot de volgende uitkomst van het Bruun Model:

$$R_{\text{Holland}} = \frac{L_*}{B + h_*} S = \frac{1,3 \cdot 10^4}{3 + 20} \cdot 0,20 = 113 \text{ m/eeuw} = 1,1 \text{ m/jaar}$$

$$\text{Verplaatsing Holland} = -1,3 \text{ m/jaar}$$

In het kader van Kustgenese 2 wordt er kritisch gekeken naar de grens van de vooroever. Momenteel wordt er aangenomen dat het actieve kustprofiel zich uitstrekt tot NAP -20 meter. Er zijn echter vermoedens dat het actieve kustprofiel zich minder ver uitstrekt. Om deze discussie van input te voorzien, wordt het Bruun Model voor de Hollandse kust ook doorgerekend met een h_* van NAP -15 meter en NAP -10 meter. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het referentieprofiel zoals gegeven in bijlage Bijlage A. Bij een h_* van NAP -15 meter hoort een L_* van $2,5 \times 10^3$ meter. Bij een h_* van NAP -10 meter hoort een L_* van $1,8 \times 10^3$ meter. Deze waardes leidden tot onderstaande uitkomsten voor het Bruun Model.

$$R_{Holland,15} = \frac{L_*}{B + h_*} S = \frac{2,5 * 10^3}{3 + 15} * 0,20 = 27,7 \text{ m/eeuw} = 0,3 \text{ m/jaar}$$

$$R_{Holland,10} = \frac{L_*}{B + h_*} S = \frac{1,8 * 10^3}{3 + 10} * 0,20 = 27,8 \text{ m/eeuw} = 0,3 \text{ m/jaar}$$

Uit Figuur 12 blijkt dat de mate van erosie sterk verschilt tussen het traject Den Helder-IJmuiden en IJmuiden-Hoek van Holland. De analyse van de trends in deze trajecten leidt tot de onderstaande uitkomsten.

$$\text{Verplaatsing Den Helder – IJmuiden} = +0,2 \text{ m/jaar}$$

$$\text{Verplaatsing IJmuiden – Hoek van Holland} = +0,7 \text{ m/jaar}$$

Aan de hand van de trends in de verandering van het volume in het profiel is ook bepaald wat de terugtrekking van de kustlijn is aan de Hollandse. Uit deze exercitie volgde de onderstaande uitkomsten. Het verschil tussen de uitkomsten is niet verrassend, want in Figuur 12 is goed te zien dat er grootschalige erosie plaatsvindt ten noorden van IJmuiden, terwijl dit veel minder is in Zuid-Holland.

$$\text{Verplaatsing Den Helder – IJmuiden} = -0,7 \text{ m/jaar}$$

$$\text{Verplaatsing IJmuiden – Hoek van Holland} = +1,3 \text{ m/jaar}$$

2.3.3

De Wadden

Stronkhorst en van Buren (2012) stellen dat er aan de Waddenkust erosie plaatsvindt over een totale lengte van 83 km. Dit is 58% van de totale lengte van de Waddenkust. Deze erosie vindt voornamelijk plaats op Texel en Ameland. De overige eilanden kennen echter ook erosieve gedeeltes (zie Figuur 12). Sinds 1600 vindt er erosie plaats van de Noordzeekust van alle eilanden. De mate van achteruitgang verschilt per eiland. In Tabel 7 staat aangegeven wat de achteruitgang is sinds 1600 (van der Laan, 1990). Deze is ook vertaald naar een teruggang in meters per jaar.

Tabel 7: achteruitgang Waddenkust volgens Van der Laan (1990)

Locatie	Achteruitgang sinds 1600 (m)	Achteruitgang (m/jaar)
Texel	400	1,0
Vlieland	600-1900	1,5-4,8
Terschelling	300	0,8
Ameland	1200	3,0
Gemiddelde		2,0

De afstand L_* bedraagt circa 10 km (Ruiter, 2015). De methode staat beschreven in paragraaf 1.1.3. Dit leidt tot de volgende uitkomst van het Bruun Model:

$$R_{Wadden} = \frac{L_*}{B + h_*} S = \frac{1,0 * 10^4}{3 + 20} * 0,20 = 87 \text{ m/eeuw} = 0,9 \text{ m/jaar}$$

$$\text{Verplaatsing Wadden} = -0,9 \text{ m/jaar}$$

Met behulp van de trends in de verplaatsing van de MKL is ook de verplaatsing van de Wadden bepaald. Dit leidde tot onderstaande uitkomst.

$$\text{Verplaatsing Wadden} = -1,6 \text{ m/jaar}$$

Met behulp van de trends in de volumeverandering in het profiel is ook bepaald wat de gemiddelde verandering in de verplaatsing van de kustlijn. Dit leidde tot de onderstaande uitkomst.

$$\text{Verplaatsing Wadden} = -0,3 \text{ m/jaar}$$

2.3.4

De gehele Nederlandse kust

Aan de hand van de analyse waarvan de resultaten zijn weergegeven in de vorige drie paragrafen kan er een voorlopige conclusie worden getrokken voor de Nederlandse kust.

De Nederlandse kust wordt aan de zuidzijde begrensd door het Zwin op de Belgisch-Nederlandse grens. Aan de noordzijde wordt de grens gevormd door het zeegat tussen Schiermonnikoog en Borkum. De totale lengte van de kustlijn bedraagt in totaal 366 kilometer. Er treedt structurele erosie op over in totaal 179 kilometer (Stronkhorst & van Buren, 2012). Structurele erosie treedt dus op bij ongeveer de helft van de Nederlandse kust.

In de vorige drie paragrafen is met behulp van het Bruun Model een waarde bepaald voor de terugtrekking van de kust als gevolg van zeespiegelstijging. Gebruik makende van de lengte van de kustlijn in de verschillende gebieden kan er een gewogen gemiddelde worden bepaald:

$$R_{NL} = \frac{R_{Delta} * L_{Delta} + R_{Holland} * L_{Holland} + R_{Wadden} * L_{Wadden}}{L_{NL}} \quad (2)$$

$$R_{NL} = \frac{1,3 * 126 + 0,9 * 97 + 1,1 * 143}{366} = 1,1 \text{ m/jaar}$$

$$\text{Verplaatsing Nederland} = -1,1 \text{ m/jaar}$$

Met behulp van de trends in de verplaatsing van de MKL is bepaald wat de gemiddelde trend voor de gehele Nederlandse kust is. Voor de gebruikte methode, zie paragraaf 1.3.3.2. De trend is als volgt:

$$\text{Verplaatsing Nederland} = -0,7 \text{ m/jaar}$$

Voor de drie kustgedeeltes is bepaald wat de gemiddelde verplaatsing van de MKL is, als er wordt gerekend vanuit de trends in de volumeverandering in het kustprofiel. Voor de gebruikte methode, zie paragraaf 1.3.3.2. Voor de gehele Nederlandse kust leidt dit tot de onderstaande waarde.

$$\text{Verplaatsing Nederland} = -0,2 \text{ m/jaar}$$



Figuur 12: locaties met structurele erosie (rood) langs de gehele Nederlandse kust (Stronkhorst & van Buren, 2012).

2.4 Wat is het effect van suppleties op de Nederlandse kustlijn?

In 1990 heeft de Rijksoverheid gekozen voor het dynamisch handhaven van de kustlijn. Dit houdt in de praktijk in dat de BKL wordt gehandhaafd met behulp van suppleties (VWS, 1990). Alleen als het echt niet anders kan, worden er harde constructies aangelegd: 'Zacht als het kan, hard als het moet'. Sinds 1990 is er op grote schaal gesuppleerd. Het suppleren heeft effect gehad op de ligging van de kustlijn. Als dit effect kwantitatief is vastgesteld, kan worden bepaald wat de ligging van de kustlijn is zonder de suppleties.

Het blijkt dat er circa 8 miljoen m³ per jaar gesuppleerd moet worden om de BKL te handhaven (van Eijsbergen, 2015 (1)). De kust heeft in totaal een lengte van 366 kilometer (Stronkhorst & van Buren, 2012). Per strekkende meter kust gaat dus per jaar 22 m³ verloren. Het actieve kustprofiel op een tijdsschaal van decennia strekt zich uit van de buitengrens van de vooroever tot de duinvoet en heeft een hoogte van 23 meter (zie paragraaf 1.1). De achteruitgang van de kustlijn wordt bepaald door het volumeverlies te delen door de actieve hoogte. Dit leidt tot een achteruitgang van 1,0 meter per jaar. De berekeningen die horen bij voorgaande resultaten staan in bijlage Bijlage D.

- In Alkyon (2005) worden gegevens genoemd over het suppletievolume en de verandering van de MKL. Het is echter niet duidelijk of er een volledig causaal verband bestaat tussen deze twee grootheden. Het is aangetoond dat suppleties een positief effect hebben op de MKL, maar het is niet duidelijk of de gegeven verplaatsingen volledig worden veroorzaakt door de suppleties. De MKL kan namelijk ook verplaatsen als gevolg van de migratie van zandbanken of andere processen.
- Voor de bepaling van de verplaatsing van de kustlijn als gevolg van zeespiegelstijging is het Bruun Model gebruikt. Dit is echter nog onvoldoende gevalideerd. Davidson-Arnott (2005) stelt dat eerdere onderzoeken zoals die van Schwartz en Dubois naar de juistheid van het Bruun Model onvoldoende waren. Het vergelijken van waargenomen achteruitgang met waargenomen zeespiegelstijging vormt namelijk geen validatie voor het Bruun Model. Uit deze metingen blijkt wel dat het Bruun Model als grove vuistregel gehanteerd kan worden. Voor een goede validatie van het model moet er worden gewerkt met sedimentbudgetten. De vraag is in hoeverre de onderliggende hypothesen kloppen. Dit lijkt niet heel aannemelijk gezien onze kennis over de interactie tussen de verschillende kustzones. Ook wordt er bij het Bruun Model aangenomen dat het profiel in evenwicht is. Bij de Nederlandse kust is dit niet het geval.
- Bij doorrekenen van het Bruun Model voor verschillende ondergrenzen van het actieve kustprofiel is er gebruik gemaakt van een referentieprofiel. Dit profiel stamt uit de jaren '80 van de vorige eeuw en is dus gedateerd. Het gebruik van dit profiel leidt ook tot uitkomsten van het model die een factor 3-4 lager zijn dan de berekening die is uitgevoerd met gegevens uit ArcGis. In ArcGis zijn de meest recente kaarten beschikbaar. Deze zijn betrouwbaarder dan het referentieprofiel.
- Voor de kwantificering van de teruggang van de Nederlandse kustlijn is er gekeken naar literatuur van Van der Laan (1990). Hierin worden waardes genoemd met betrekking tot de verplaatsing van verschillende gedeeltes van de Nederlandse kust. Hierbij is echter geen bronvermelding gegeven. Ook betreft het gegevens over de verplaatsing over een tijdspanne van circa 400 jaar. Het Bruun Model en de analyse van de trends hebben betrekking op een veel kortere tijdspanne. Om deze reden is ervoor gekozen om de waardes uit de literatuur niet mee te nemen in het advies.
- Bij de analyse van de trends in de verandering van het volume in de profielen is er niet per raai een aparte boven- en ondergrens vastgesteld. Er is één boven- en één ondergrens per kustvak vastgesteld. Dit zorgt voor een onbekende onbetrouwbaarheid in de analyse. Om deze fout in een vervolganalyse niet te herhalen is het noodzakelijk om per raai de raaispecifieke boven- en ondergrens mee te nemen in de berekeningen.
- Bij de resultaten uit de verschillende analyses dient opgemerkt te worden dat niet alle resultaten een gelijk aantal significante getallen hebben. Dit is gedaan om alle uitkomsten op een nauwkeurigheid van decimeters weer te geven. Op dit niveau van nauwkeurigheid is enige spreiding in de uitkomsten zichtbaar. Deze spreiding verdwijnt echter als we alle uitkomsten afronden naar het niveau van hele meters. Dit leidt namelijk bij alle methodes tot een terugtrekking van de kust met 1 meter per jaar.

4 Conclusie en Aanbevelingen

4.1 Conclusie

Stromingen van wind en water zorgen voor een verplaatsing van het sediment in het kuststelsel. Er kan een onderscheid worden gemaakt tussen kustlangse en kustdwarse transporten. Kustlangse transporten ontstaan als gevolg van getijstroom en schuin invallende golven. Kustdwarse transporten zijn het gevolg van golven in combinatie met muistroom. Op het droge gedeelte van de kust zorgt de wind voor herverdeling van het zand.

Zeespiegelstijging zorgt ervoor dat golven hoger het strand op kunnen komen. Dit leidt tot erosie van het strand en aangroei van de vooroever. De regressie van de kustlijn is daardoor vele malen groter dan de verwachte regressie als gevolg van inundatie dat weer het gevolg is van het verhoogde waterpeil. Het effect van zeespiegelstijging vindt plaats op langere termijn, terwijl stormen zorgen voor een snelle herverdeling van sediment.

Als gevolg van menselijk ingrijpen in het kuststelsel is het dynamisch evenwicht verstoord. Er is tegenwoordig een situatie waarin de vraag naar sediment groter is dan het aanbod. Vooral de Westerschelde en de Waddenzee hebben zandhonger. Sediment uit andere delen van het kuststelsel wordt verplaatst richting die gebieden. In grote delen van het kuststelsel vindt dus erosie plaats. In Tabel 8 staat weergegeven hoe groot de kustlengte is waar erosie plaatsvindt in relatie tot de totale kustlengte. Door het toepassen van zandsuppleties blijkt het zeer goed mogelijk te voorkomen dat grote delen van de kust verloren gaan.

Tabel 8: structurele erosie langs de Nederlandse kust (bewerking van: Stronkhorst en Van Buren, 2012)

Kustgedeelte	Lengte kustlijn (km)	Lengte erosie (km)	erosie (%)
Wadden	143	83	58
Hollandse kust	97	32	33
Delta	126	64	51
Nederland	366	179	49

Tijdens dit onderzoek zijn meerdere methodes toegepast om een waarde te vinden voor de gemiddelde teruggang van de Nederlandse kustlijn als er geen suppleties worden uitgevoerd. In Tabel 9 staat een samenvatting van de uitkomsten. Ter volledigheid is de waarde uit de beleidsdocumenten ook ingevoegd. Het gemiddelde van de uitkomsten van de verschillende analyse leidt tot een terugtrekking van de Nederlandse kust met 0,8 meter per jaar.

Tabel 9: verplaatsing kustlijn

Verplaatsing kustlijn (m/jaar)	Wadden	Hollandse kust		Delta	Nederlandse kustlijn
		Den Helder-IJmuiden	IJmuiden-Hoek van Holland		
(Beleid)					(-1)
Bruun Model	-0,9		-1,1	-1,3	-1,1
Trends MKL	-1,6	+0,2	+0,7	-1,0	-0,7
Trends Volume	-0,3	-0,7	+1,3	-0,6	-0,2
Effect suppleties					-1,0
Gemiddelde	-0,9	-0,5	0,3	-1,0	-0,8

De waarde zoals die is bepaald in deze studie wordt voornamelijk gebruikt in communicatie richting bestuurders. In deze communicatie is het raadzaam om de "1 meter per jaar" te handhaven, omdat dit makkelijker overkomt dan de "0,8 meter". Gezien de onzekerheden in de verschillende methodes en de mate van afronding is het niet raadzaam om de waarde van 1 meter per jaar te gebruiken in berekeningen. Berekeningen aan de verandering van de kustlijn dienen te worden gedaan aan de hand van de meest recente JARKUS-data.

4.2

Aanbevelingen

Het wordt aanbevolen om met behulp van JARKUS-data nieuwe referentieprofielen op te stellen voor de Hollandse kust. Gezien de verschillende karakteristieken langs de kust wordt aanbevolen om meerdere profielen te bepalen. Met behulp van deze profielen kan het Bruun Model beter worden bepaald voor de verschillende delen van de Nederlandse kust. Aan de hand hiervan kan de verplaatsing van de Nederlandse kustlijn worden bepaald voor verschillende scenario's met betrekking tot zeespiegelstijging of actieve hoogtes van het kustprofiel.

Bibliografie

- Alkyon. (2005). *Effectiviteit van vooroeversuppleties langs de Waddenkust*. Emmeloord: Alkyon.
- Bearman, G., & Brown, J. (1999). *Waves, Tides and Shallow Water Processes*. Oxford: The Open University.
- Beets, D., van der Valk, L., & Stive, M. (1992). *Holocene evolution of the coast of Holland*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- Davidson-Arnott, R. (2005). Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research*, pp. 1166-1172.
- Deltares. (2012). *Basiskustlijn 2012*. Opgehaald van Kustviewer: <http://kustviewer.lizard.net/kml/>
- Elias, E., & Bruens, A. (2013). *Beheerbibliotheek Noord-Holland*. Delft: Deltares.
- Elias, E., & Bruens, A. (2012). *Een Quickscan van de morfologische ontwikkelingen van het Eierlandse Gat*. Delft: Deltares.
- Guillén, J., Stive, M., & Capobianco, M. (1998). *Shoreline Evolution of the Holland Coast on a decadal scale*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Hijma, M., van der Spek, A., & van Heteren, S. (2010, juni 15). Development of a mid-Holocene estuarine basin, Rhine–Meuse mouth area, offshore The Netherlands. *Elsevier: Marine Geology*, pp. 198-211.
- KNMI. (2013, september 27). *Zeespiegelveranderingen gemeten*. Opgehaald van knmi.nl: www.knmi.nl/cms/content/73921/zeespiegelveranderingen_gemeten
- Leatherman, S. P., Zhang, K., & Douglas, B. C. (2000). *Sea Level Rise Shown to Drive Coastal Erosion*. American Geophysical Union.
- Lodder, Q. (2015, april 20). Verdiepingsbijeenkomst Noordzee. Den Haag, Noord Holland, Nederland: RWS WVL.
- Maranus, J., & Verhagen, H. (1987). *Zandgolven en kustverdediging in Zeeland*. Middelburg: Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren.
- Moens, M. (1987). *Zandtransport onder invloed van het getij*. Delft: Technische Hogeschool Delft, Afdeling der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, Sectie Kustwaterbouw.
- Mulder, J. (2000). *Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel*. Den Haag: RIKZ.
- Pethick, J. (2001). Coastal Management and Sea Level Rise. *Catena*, 42, pp. 307-322.
- Port of Rotterdam. (z.j.). *Over de haven*. Opgehaald van portofrotterdam.nl: www.portofrotterdam.com/nl/Over-de-haven/Pages/default.aspx
- Rijkswaterstaat. (2014). *Kustlijnkaarten 2015*. Lelystad: Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2014). Morphan, toetsresultaten tbv Kustlijnkaartenboek 2015. *Data toetsing 2015*.
- Ruiter, T. d. (2015, april 29). Persoonlijke communicatie. Lelystad, Flevoland, Nederland.
- Stichting Deltawerken Online. (2004). *Deltawerken*. Opgehaald van Deltawerken Online: www.deltawerken.com
- Stronkhorst, J., & van Buren, R. (2012). *Ruimtelijke verdeling van functies langs de Nederlandse kust in relatie tot het dynamisch handhaven van de kustlijn*. Delft: Deltares.
- TAW. (1995). *Basisrapport Zandige Kust*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- TAW. (2002). *Leidraad Zandige Kust*. Lelystad: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- van der Laan, A. (1990). *Zeewaartse kustverdediging Texel*. Den Haag/Delft: Rijkswaterstaat/TU Delft.
- van der Wal, D. (2004). *Beach-Dune interactions in Nourishment Areas along the Dutch Coast*. Universiteit van Amsterdam. *Journal of Coastal Research*.
- van Eijsbergen, E. (2015 (1)). *Achteruitgang kust zonder suppleties*. Lelystad: Rijkswaterstaat WVL.
- van Eijsbergen, E. (2015 (2), maart 4). Persoonlijke communicatie.
- van Kessel, G. A. (2004). *Verlopend Getij. Oosterschelde, een veranderend natuurmonument*. Middelburg: Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- VWS. (1990). *Kustverdediging na 1990*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Walstra, D. J., Cohen, A., Aarninkhof, S., & van Koningsveld, M. (2006). *Onderwatersuppleties Ontwerprichtlijnen*. Delft: WL|Delft Hydraulics.

Werkgroep voor Tertiaire en Kwartaire Geologie. (2011, augustus 26). *Paleografische kaarten*.
Opgehaald van WTKG.nl: http://www.wtkg.org/geo_paleomap.html
Wikipedia. (2014, juni 23). *Eurogeul*. Opgehaald van Wikipedia.nl: nl.wikipedia.org/wiki/Eurogeul
Wikipedia. (2014, december 9). *Maasvlakte*. Opgehaald van Wikipedia.nl:
nl.wikipedia.org/wiki/Maasvlakte
Wikipedia. (2015, januari 27). *Noordzeekanaal*. Opgehaald van Wikipedia.nl:
nl.wikipedia.org/wiki/Noordzeekanaal

Bijlagen

- A. Effect menselijke ingrepen
- B. Referentieprofiel Hollandse kust
- C. Trendanalyse verplaatsingen MKL
- D. Berekeningen effect suppleties

Bijlage A Effect menselijke ingrepen

Deze bijlage beschrijft in meer detail de effecten van verschillende harde ingrepen in het Nederlandse kuststelsel.

A.1 Zuiderzeewerken

De afsluiting van de Zuiderzee in 1932 had en heeft grote invloed op het stromingenpatroon en het sedimenttransport van en naar de westelijke Waddenzee. Als gevolg van het veranderen van de getijkromme is het kombergend vermogen lokaal toegenomen (Elias & Bruens, 2013; Lodder, 2015). Dit heeft als gevolg dat er in de westelijke Waddenzee een tekort aan sediment is. Sediment dat vanaf de Noordzee via een van de zeegaten in de Waddenzee stroomt, komt niet meer terug richting de Noordzee. Deze put zorgt dus voor een afname van het sedimentbudget aan de Nederlandse kust. Het is nu al meer dan 80 jaar na de voltooiing van de Afsluitdijk, maar er is nog steeds geen evenwicht bereikt in de Westelijke Waddenzee.

A.2 Deltawerken

Naar aanleiding van de Watersnoodramp van 1953 zijn er in Zuidwestelijke Delta meerdere dammen en stormvloedkeringen gerealiseerd. Deze projecten zijn weergegeven in Figuur 13. De bouwwerken hebben een effect gehad op het getij in de omgeving. De Haringvlietdam en de Brouwersdam zorgen er ook voor dat sediment niet meer vanuit de rivieren en de zeearmen richting zee kan stromen. Dit heeft een negatief effect op het sedimentbudget bij de Nederlandse kust. De sedimentverdeling rond de dammen wordt wel steeds meer een dynamisch evenwicht. Verschuivingen die in gang werden gezet door de realisatie van de dammen, zijn nu aan het afvlakken.

Ook in de Oosterschelde is het sedimenttransport veranderd. Het getijverschil is afgenomen van 3,70 meter naar 3,25 meter. Als gevolg hiervan is de maximale stroomsnelheid afgenomen van 1,5 m/s naar 1,0 m/s, een afname van 33%. Als gevolg van deze verlaagde stroomsnelheden overheersen de erosieve processen als gevolg van windgolven de opbouwende krachten van het getij. Doordat het getijvolume is verminderd, zoekt het systeem naar een nieuw evenwicht tussen het formaat van de geulen en het getijvolume. De geulen willen zich opvullen. Dit wordt 'zandhonger' genoemd. De aanleg van de Oosterscheldekering heeft als gevolg dat er geen sediment meer kan worden aangevoerd vanuit de Voordelta. Het sediment dat met de vloedstroom wordt aangevoerd vanuit de Voordelta bezinkt in de ontgrondingskuilen bij de kering. Het sediment wordt met de ebstroom weer richting Voordelta getransporteerd. De aanvoer van zoetwater en sediment vanuit de rivieren is met een factor 5-10 afgenomen (van Kessel, 2004). De barrièrewerking van de keringen voor sedimenttransport heeft als gevolg dat er vrijwel geen sediment meer wordt getransporteerd tussen de Voordelta en de Oosterschelde.



Figuur 13: Deltawerken (Stichting Deltawerken Online, 2004)

A.3

Eerste en Tweede Maasvlakte

De zuidwestelijke Delta wordt aan de noordzijde begrenst door de haven van Rotterdam. Deze haven is de grootste van Europa en een van de grootste in de wereld (Port of Rotterdam, z.j.). Om uitbreiding van de haven te faciliteren is er in de jaren '60 van de vorige eeuw een uitbreiding bewerkstelligt in de Noordzee, de Maasvlakte. Deze uitbreiding bevindt zich aan de zuidzijde van de monding van de Nieuwe Waterweg. Tussen 2008 en 2013 is er een tweede grote uitbreiding gerealiseerd. Deze uitbreiding kreeg de naam Tweede Maasvlakte (Wikipedia, 2014). Om de haven bereikbaar te houden is er een geul in de Noordzee gebaggerd, de Eurogeul. Deze geul is 57 kilometer lang en heeft een diepte van 23 meter (Wikipedia, 2014). Deze uitbreidingen hebben een grote impact gehad op het transport van sediment tussen de Voordelta en de Hollandse Kust. Door Mulder (2000) wordt zelfs gesteld dat op een tijdschaal van decennia de Maasvlakte en de Eurogeul een barrière vormen voor kustlangs sedimenttransport. Sediment kan dus niet meer vanaf de Voordelta richting de Hollandse kust worden getransporteerd. Het lange termijn effect van de Tweede Maasvlakte moet nog duidelijk worden, want deze is relatief kort geleden gerealiseerd.

A.4

De monding van het Noordzeekanaal

Het Noordzeekanaal vormt de directe verbinding tussen Amsterdam en de Noordzee. De monding bevindt zich ter hoogte van IJmuiden. Om de monding te beschermen en schepen een ongehinderde doorgang te geven, zijn er twee pieren aangelegd. Het zuidelijke havenhoofd reikt 2800 meter zeewaarts. Het noordelijke havenhoofd is 1850 meter lang (Elias & Bruens, 2013). Tevens is er in de Noordzee een 43 kilometer lange geul gebaggerd met een diepte van bijna 20 meter en een breedte variërend tussen de 450 en 600 meter, de IJgeul (Wikipedia, 2015). De IJgeul en de pieren vormen volgens Mulder (2000) een barrière voor het langtransport van sediment op de tijdschaal van decennia. Aan zowel de zuid- als noordzijde van de havenhoofden vindt aanzanding en erosie plaats. Direct naast de havenhoofden vindt aanzanding plaats, maar op

enkele kilometers van de havenhoofden overheerst erosie. Opvallend is verder dat er ook aanzanding optreedt bij de kop van de noordelijke pier (Elias & Bruens, 2013). De morfologische situatie lijkt lokaal wel in dynamisch evenwicht te zijn.

A.5

De Eierlandse Dam

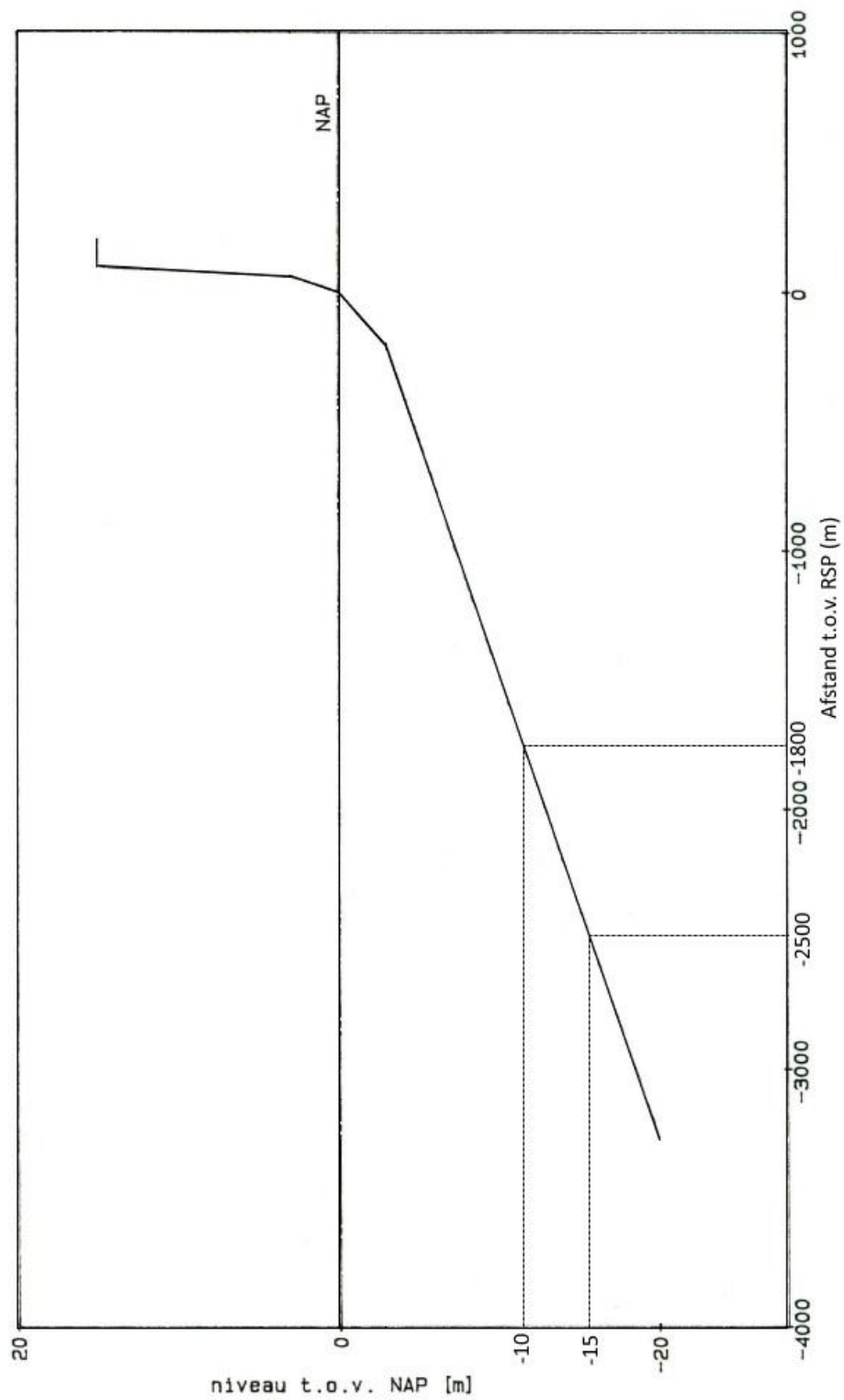
De Eierlandse Dam is een strekdam met een lengte van 800 meter die zich op de noordelijke punt van Texel bevindt. Hij is in 1995 aangelegd om de grootschalige erosie van de kust van Eierland tegen te gaan. De aanleg was noodzakelijk, omdat de erosie niet met suppleties tegengegaan kon worden. Sinds de aanleg van de dam is de kust in de direct omgeving van de dam sterk verbreed. Ter hoogte van de vuurtoren is de kustlijn met 400 meter opgeschoven in zeewaartse richting. Ten zuiden van deze de uitbouw gaat de erosie echter door met dezelfde orde van grootte als voor 1995. In de ruimere omgeving van de dam is er geen aanwijsbaar effect (Elias & Bruens, 2012).

A.6

Strekdammen

Langs grote delen van de kust zijn strekdammen aangelegd om de verdeling van het sediment te sturen. Het eigenlijke probleem van het zandtekort in het kuststelsel wordt hierdoor niet opgelost. De effectiviteit van de strekdammen is zeer verschillend per locatie. Op locaties waar de strekdammen de getijstrooming uit de kust houden, blijken ze zeer effectief te zijn. Op plaatsen waar de strekdammen alleen maar de golfgedreven strooming beïnvloeden, is het effect minder goed aan te tonen. Aan de lijzijde van de strekdammen vindt dan meestal nog steeds erosie plaats. Dit werd in het verleden opgelost door nog meer strekdammen aan te leggen (Elias & Bruens, 2013). Dit heeft als gevolg dat er langs grote gedeeltes van de Nederlandse kust strekdammen zijn te vinden.

Bijlage B Referentieprofiel Hollandse kust



Figuur 14: referentieprofiel Hollandse kust

Bijlage C Trendanalyse verplaatsingen MKL

De trends die zijn geanalyseerd zijn verkregen met behulp van Morphan. Het betreffen trends die zijn bepaald tijdens de toetsronde aan het eind van 2014. Onderstaande afbeelding geeft weer hoe deze trends in Morphan worden gepresenteerd.

Transect location [-]	Δ	BKL [m+RSP]	Trend [m/y]	R2 [-]	BKL intersection [date]	TKL 2015 (01-Jan) [m+RSP]	TKL 2016 (01-Jan) [m+RSP]
Texel - 900		243,00	-21,10	0,9902	Heden	239,03	217,93
Texel - 915		236,00	-15,94	0,9889	Heden	224,57	208,63
Texel - 930		232,00	-15,51	0,8581	Feb-2015	234,25	218,74
Texel - 945		226,00	-16,44	0,9621	Feb-2015	227,42	210,98
Texel - 960		209,00	-9,52	0,7692	Heden	198,01	188,49
Texel - 976		197,00	-15,47	0,6674	Heden	167,53	152,07
Texel - 1000		179,00	-8,48	0,9988	Heden	159,38	150,90
Texel - 1001		175,00	-5,54	0,9437	Heden	150,09	144,55
Texel - 1013		170,00	-7,77	0,5381	Heden	156,39	148,62
Texel - 1033		195,00	-7,62	0,9115	Heden	175,79	168,16
Texel - 1053		208,00	-11,95	0,9838	Heden	178,18	166,23
Texel - 1073		196,00	-6,78	0,8188	Heden	178,38	171,60
Texel - 1093		180,00	-2,91	0,5276	Heden	160,62	157,70
Texel - 1108		165,00	-9,20	0,5359	Oct-2017	190,73	181,52
Texel - 1128		146,00	-9,64	0,9070	Nov-2016	164,39	154,75

Figuur 15: Voorbeeld presentatie trends in Morphan

De trends zijn allemaal gekopieerd in een datasheet in SPSS en Excel. Met Excel zijn controleberekeningen gedaan. In SPSS is gebruikt gemaakt van Analyze → Compare Means → Means. In onderstaande tabel staat de output van SPSS.

Tabel 10: Output SPSS analyse trends in de verplaatsingen MKL

	Mean	N	Std. Deviation
Nederland	-,7324	1504	9,07930
Wadden	-1,6021	540	11,68630
Noord_Holland	,2072	257	4,76945
Zuid_Holland	,7263	237	9,49482
Delta	-,9824	470	6,85186

Bijlage D Berekeningen effect suppleties

$$\text{benodigd volume voor handhaving BKL} = V_{BKL} = 8 * 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$$

$$\text{Lengte kustlijn} = L_k = 366 \text{ km} = 366 * 10^3 \text{ m}$$

$$\text{bovengrens actief kustprofiel} = \text{duinvoet} = \text{NAP} + 3 \text{ m}$$

$$\text{ondergrens actief kustprofiel} = \text{buitengrens vooroever} = \text{NAP} - 20 \text{ m}$$

$$\text{Hoogte actief kustprofiel} = h_a = 23 \text{ m}$$

$$\text{Verlies per strekkende meter kust} = V_m = \frac{V_{BKL}}{L_k} = \frac{8 * 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}}{366 * 10^3 \text{ m}} = 22 \text{ m}^3/\text{m/jaar}$$

$$\text{Achteruitgang kustlijn} = \frac{V_m}{h_a} = \frac{22 \text{ m}^2/\text{jaar}}{23 \text{ m}} = 1,0 \text{ m/jaar}$$