

Kustlijnen voor Dijkringen

**Over de relatie tussen kustlijnzorg en de sterkte van
Nederlandse duinwaterkeringen**



Kustlijnen voor Dijkringen

**Over de relatie tussen kustlijnzorg en de sterkte van Nederlandse
duinwaterkeringen**

Joost Stronkhorst en Ankie Bruens

m.m.v. Alessio Giardino, Giorgio Santinelli, Rolf van Buren

1204594-000



Titel
Kustlijnen voor Dijkkringen

Project
1204594-000

Kenmerk
1204594-000-VEB-0011

Pagina's
53

Trefwoorden
Kustveiligheid, zandsuppleties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	apr. 2012	J. Stronkhorst		A. de Leeuw		H. Vissers	

Status
definitief

handy baay

Inhoud

Samenvatting

1 Inleiding	1
1.1 Dit rapport	1
1.2 Context	1
1.2.1 Zeeweringen en natuurkrachten	1
1.2.2 Maatregelen om de veiligheid te waarborgen	2
1.3 Afbakening	4
1.4 Vraagstelling	5
1.5 Aanpak	6
1.6 Leeswijzer	7
2 Methoden	9
2.1 Indicatoren en rekenmethoden	9
2.1.1 Algemeen	9
2.1.2 Indicatoren voor zandvolume	9
2.1.3 Indicatoren voor veiligheid (sterkte duinwaterkering)	10
2.1.4 Zandsuppleties	11
2.2 Uitgevoerde Analyses	12
2.2.1 Identificatie kwetsbare kustdelen	12
2.2.2 Ontwikkeling indicatoren	12
2.2.3 Relatie tussen indicatoren	13
2.2.4 Relatie tussen zandsuppleties en indicatoren	13
3 Resultaten	15
3.1 Kwetsbare delen langs de kust	15
3.1.1 Ligging	15
3.1.2 Rangschikking	16
3.2 Ontwikkeling van indicatoren	21
3.2.1 Hollandse kust tussen Hoek van Holland en Den Helder	21
3.2.2 Zeeuws-Vlaamse kust	22
3.2.3 Delflandse kust	23
3.3 Relaties tussen indicatoren voor zandvolume en veiligheid	24
3.3.1 MKL en MDL versus ligging maatgevend afslagpunt	24
3.3.2 MKL en MDL versus overschrijdingskansen afslagpunt 1990	26
3.3.3 MKL versus afslagpunten	27
3.4 Relatie tussen zandsuppleties en indicatoren	27
3.4.1 Momentaan effect	27
3.4.2 Lange termijn effect: case Noord Hollandse duinenkust	28
4 Discussie	37
4.1 Kwetsbare zeeweringen	37
4.2 Relatie tussen zandvolume en kustveiligheid	37
4.3 Effect van zandsuppleties	38
4.3.1 Toename van het zandvolume en kustveiligheid	38
4.3.2 Verschillende tijdschalen en typen suppleties	38
4.3.3 Voorkomen van versterkingen	40

4.3.4	Prioritering van reguliere suppleties	41
4.3.5	Verminderen van het overstromingsrisico	41
4.4	Normering	43
5	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	45
6	Literatuur	47

Samenvatting

Kader

De veiligheid van de zeeweringen langs onze kust vormt een voortdurend punt van aandacht. Er worden twee typen maatregelen genomen die er in combinatie voor moeten zorgen dat het veiligheidsniveau in het achterland voldoende is gewaarborgd. Enerzijds worden er reguliere zandsuppleties uitgevoerd om de kustlijn te handhaven en het zandtekort in het kustfundament (ontstaan door erosie en zeespiegelstijging) aan te vullen. Dit gebeurt in het kader van het beheer&onderhoudsprogramma Kustlijnzorg. Anderzijds worden de waterkeringen elke zes jaar getoetst aan de wettelijke veiligheidsnormen. Indien nodig worden er kustversterkingen aangelegd, in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Vanuit dit kader worden ook de Zwakke Schakel projecten gerealiseerd (2009-2015). Hoewel het suppleren van zand en het toetsen/versterken van duinwaterkeringen twee verschillende sporen zijn, zijn ze wel gerelateerd. Voorliggend rapport doet verslag van een studie die Deltares, op verzoek van het Ministerie I&M en het Deltaprogramma Kust, heeft uitgevoerd naar de bijdrage van het programma Kustlijnzorg aan het duurzaam handhaven (of vergroten) van de sterkte van duinwaterkeringen op de middellange en lange termijn¹. Hiertoe wordt een antwoord gezocht op de volgende deelvragen:

- 1 Waar bevinden zich de relatief kwetsbare delen van de Nederlandse zeeweringen die gebaat zijn bij reguliere zandsuppleties?
- 2 Wat is de relatie tussen het aanwezige zandvolume en de sterkte van de duinwaterkering?
- 3 Wat is de bijdrage van zandsuppleties aan het zandvolume in de kustzone en de sterkte van de duinwaterkering? Wat is daarbij de invloed van de gekozen uitvoeringswijze van suppleren (duin-, strand-, vooroever- of geulwandsuppleties)?
- 4 Hoe kunnen de bevindingen worden doorvertaald naar de uitvoering, beleidsvoorbereiding en aanbevelingen voor nader onderzoek?

De bovengenoemde vragen worden in de volgende paragrafen behandeld.

Om deze vragen te beantwoorden zijn indicatoren benoemd (zie hoofdstuk 2), waarmee de relatie tussen zandsuppleties en de sterkte van duinwaterkeringen in beeld zijn gebracht. Hiertoe zijn berekeningen en analyses uitgevoerd met JARKUS metingen: metingen van kustprofielen van de Nederlandse kust die sinds 1965 op systematische wijze plaats vinden. Tijdens de studie is gebruik gemaakt van de specialistische kennis van Deltares, Arcadis, HKV en Rijkswaterstaat Waterdienst.

1. Kwetsbare delen van de kust

De zeeweringen langs onze kust behoren tot de veiligste ter wereld. De overstromingskans van de duinen en zeedijken is klein en voldoet aan de wettelijke normen (kans van 1/2000 tot 1/10.000 per jaar), mede door aanleg van versterkingen en intensief beheer en onderhoud. Delen van de duinenkust hebben zelfs een verwaarloosbare kleine kans op overstroming. In relatief opzicht zijn er echter wel kwetsbare delen.

Langs de hele Nederlandse kust zijn 22 locaties in kaart gebracht waar structurele kusterosie optreedt en waar een relatief smalle, lage zeewering achterliggende polders beschermen. Uit

1. Een aantal samenhangende onderwerpen is buiten beschouwingen, waaronder de bijdrage van Kustlijnzorg aan de buitendijkse veiligheid en de afname in de golfbelasting (zie par. 1.3)

analyse blijkt dat circa 64 kilometer van de 360 kilometer lange Nederlandse kust kwetsbaar is en uit veiligheidsoogpunt direct gebaat is bij zandsuppleties. Deze locaties zijn te beschouwen als toekomstige zwakke schakels wanneer er geen beheer en onderhoud zou plaats vinden. Meer dan de helft van de kwetsbare kustdelen ligt langs de Deltakust, gevolgd door de Hollandse kust en Waddenkust. Eventuele bresvorming en falen van de zeewering bij Katwijk, Scheveningen en Ter Heijde heeft relatief de grootste gevolgen voor het achterland, gevolgd door de Kop van Voorne en Zuidwest Walcheren. De verwachting is dat zandsuppleties hier dan ook het meeste effect hebben op risicoreductie, gegeven een bepaalde sterkte van de zeewering. De minste risicoreductie is te verwachten voor de Waddeneilanden, omdat daar de gevolgen van een eventuele overstroming het kleinst zijn.

2. Relatie tussen zandvolume en kustveiligheid

Er zijn statistische relaties bepaald tussen de indicatoren voor zandvolume (momentane kustlijn, duinvoetpositie, momentane duinlijn) en de veiligheidsindicatoren van de duinwaterkering (verschuiving maatgevend afslaglijn, overschrijdingskans maatgevend afslagpunt, faalkans eerste duinenrij). Tussen beide type indicatoren zijn correlaties gevonden, zoals: i) een zeewaartse verschuiving van de afslaglijn langs de Hollandse kust met bijvoorbeeld 10 meter gaat samen met een zeewaartse verplaatsing van de MKL van gemiddeld 10 tot 30 meter; ii) een verandering van overschrijdingskans van een maatgevend afslagpunt met een factor 10 gaat samen met een verplaatsing van de MKL van gemiddeld 20 tot 80 meter en iii) een afname met een factor 10 van de faalkans van de eerste duinenrij langs de kust van de kop van Noord-Holland gaat samen met een zeewaartse verplaatsing van de MKL of duinvoet van circa 30 meter.

3. Bijdrage van zandsuppletie aan kustveiligheid

In de afgelopen decennia is de inspanning in zandsuppleties langs de Nederlandse kust geleidelijk aan toegenomen, vooral langs de Hollandse kust en de Deltakust. Uit de indicatoren voor zandvolume (momentane kustlijn, duinvoetpositie, momentane duinlijn) blijkt dat de veerkracht van de kust hierdoor groter is geworden: de kuststrook is op veel plekken zeewaarts verbreed. Het afgelopen decennium is de overschrijdingskans van het afslagpunt en de faalkans van de eerste duinenrij langs de Hollandse kust sterk afgenomen. Ook in de erosieve kustvakken Zeeuws-Vlaanderen en Delfland hebben zandsuppleties geresulteerd in een stabilisatie van de faalkans.

Zandsuppleties verkleinen de *kans* op overstroming (veiligheidslaag 1-preventie). In potentie kan het beheer- en onderhoudsprogramma Kustlijnzorg de aanleg van duin- en dijkversterkingen voorkomen, mits de juiste zandverdeling in tijd en ruimte wordt toegepast. De tijdschaal en daarmee ook de ruimteschaal waarop suppleties doorwerken in de sterkte van de duinen, hangt af van de suppletievorm. Duinsuppleties zorgen voor een directe toename in de sterkte van de duinwaterkering. Zo heeft de aanleg van extra duinen langs de kust van Delfland en Zeeuws-Vlaanderen, in het kader van de Zwakke Schakelprojecten, lokaal tot een momentane en sterke toename van de kustveiligheid geleid. Zoals verwacht hebben strandsuppleties een minder direct effect; de wind moet het zand transporteren, om het zandvolume in de duinen te vergroten. De bijdrage van vooroeversuppleties aan de sterkte van duinen is waar te nemen met veldmetingen. Het is de verwachting dat vooroeversuppleties vooral een rol spelen in het dempen van de (golf-)belasting van de zeewering; dit aspect is in deze studie niet expliciet in beschouwing genomen.

Uit nadere analyse van de gegevens van de Noord-Hollandse duinenkust blijkt dat de faalkans door het uitvoeren van zandsuppleties significant afneemt. Dankzij strand- vooroever- en geulwandsuppleties tussen 1990 en 2010 langs deze erosieve kust is de kustveiligheid daar

toegenomen. Uit de gegevens is af te leiden dat de faalkans met een factor 10 is afgenomen, bij een hoeveelheid zandsuppleties van circa 900-1000 m³ per strekkende meter kust per decennium.

Het werken met grotere systeemsuppleties staat nog in de kinderschoenen. Voorbeelden zijn de zandmotor bij Delfland en de geulwandsuppleties langs de kust van Zuidwest Walcheren en de Kop van Noord-Holland die bedoeld zijn om de stabiliteit van stranden en duinen op langere termijn te waarborgen. Het is nog te vroeg om de werking van systeemsuppleties te kunnen evalueren. Buitendelta-suppleties tenslotte zijn een mogelijke nieuwe vorm van suppleren, waar nog geen ervaring mee opgebouwd is.

4. Aanbevelingen voor nader onderzoek

Voorliggende studie zet de eerste stappen in het verbinden van kustmorfologie met overstromingsrisico, dat wil zeggen, in het verbinden van zandsuppleties aan de sterkte van de duinwaterkeringen. Om de 22 kwetsbare locaties op een systematische wijze nader in beeld brengen wordt aanbevolen om:

- 1 te controleren of de ligging van de basiskustlijn in alle situaties ook voorziet in de handhaving van de afslaglijn of de gewenste ligging van de afslaglijn. De werkwijze daarvoor is uiteengezet in figuur 3.11,
- 2 aan te geven hoe het zandvolume in het kustprofiel, inclusief de diepere delen, bijdraagt aan de sterkte van de zeewering en het reduceren van de (golf-)belasting op de zeewering,
- 3 de verschillen tussen strandsuppleties en vooroeversuppleties in beeld te brengen in termen van kosteneffectiviteit en daarbij de verschillen in de kustoriëntatie en hellingshoek van de vooroever in beschouwing te nemen en
- 4 bij het vervolgonderzoek gebruik te maken van:
 - de nieuw ontwikkelde database (zie ook Giardino et al, 2011),
 - de nieuwe software Morphan voor het toetsen van de duinwaterkering en kustlijn (Deltares, 2011) en
 - de nieuwe methodiek voor kustkaarten (Boers, 2011).

1 Inleiding

1.1 Dit rapport

Dit rapport doet verslag van een studie die Deltares heeft uitgevoerd naar de bijdrage die het handhaven van de kustlijn met zandsuppleties levert aan het veiligheidsniveau van de dijkeringen langs de Nederlandse kust. Deze studie is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie I&M en het Deltaprogramma Kust.

In dit eerste hoofdstuk wordt de context van het project besproken en wordt de algemene vraagstelling verder uitgewerkt.

1.2 Context

1.2.1 Zeeweringen en natuurkrachten

De zeeweringen langs onze kust behoren tot de veiligste ter wereld. Tachtig procent wordt gevormd door duinen en twintig procent door verharde zeeweringen, zoals zeedijken, boulevards, hybride keringen en dammen. De zeeweringen beschermen het achterland tegen de krachten van de natuur. Enerzijds gaat het daarbij om extreme natuurkrachten, zoals incidentele en onverwachte stormen. Daarbij ontstaan stormvloed op zee, die bressen² kunnen slaan in de zeewering. Als dat gebeurt, kan het achterland in korte tijd overstromen, waarbij in het getroffen gebied slachtoffers kunnen vallen en schade kan ontstaan. Hoe groot de gevolgen zijn, hangt sterk af van de waterdiepte die ontstaat en van de snelheid waarmee het water binnenstroomt. Zware tot zeer zware stormen, met windkracht 10 en 11, komen maar af en toe voor. De atmosfeer kan zodanig zijn dat stormen elkaar met korte tussenpozen opvolgen. Zo werd de laatste zware storm, op 25 januari 1990, de volgende dag opgevolgd door een vrijwel even zware storm. In 1928 volgden er drie in één week (bron KNMI).

Anderzijds staan de zeeweringen bloot aan geleidelijke processen: voortdurende kusterosie en stijgende waterstanden door zeespiegelstijging. Momenteel bedraagt de zeespiegelstijging op de Noordzee circa 2 mm per jaar. Volgens de scenario's van het KNMI en Deltaprogramma kan dit aan het eind van de 21^e eeuw toenemen tot 3.5 à 8.5 mm per jaar.



Duinafslag ten noorden van de Pettemerzeewering na een storm in december 2011 (Foto gemaakt door Carola van Gelder-Maas)

2. Een doorgaand gat in de waterkering dat is ontstaan door overbelasting

1.2.2 Maatregelen om de veiligheid te waarborgen

Algemeen

De veiligheid van de zeekeringen vormt een voortdurend punt van aandacht en er worden verschillende maatregelen genomen die, in combinatie, ervoor moeten zorgen dat het veiligheidsniveau in het achterland voldoende is gewaarborgd:

- Allereerst is er het wettelijke kader van toetsing van waterkeringen en aanleg van kustversterkingen, in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Vanuit dit kader worden ook de Zwakke Schakel projecten gerealiseerd (2009-2015).
- Daarnaast worden jaarlijkse zandsuppleties uitgevoerd om de basiskustlijn (sinds 1990) en een deel van het kustfundament (sinds 2001) te handhaven, in het kader van het programma Kustlijnzorg (KLZ). Het zandvolume van de Hollandse kust is daardoor toegenomen (van Rijn, 2010).

Naast deze uitvoeringsprogramma's, is in 2011 de zandmotor Delfland aangelegd, mede om ervaring op te doen met innovatieve megazandsuppleties.

Verder spelen er gelijktijdig met deze fysieke maatregelen vele beleidsontwikkelingen rond waterveiligheid (Ministerie Infrastructuur & Milieu, 2011a). Belangrijke beleidsvragen zijn ondermeer: de nieuwe opgaven voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma (zie ook NLingenieurs & Deltares, 2011); de deltabeslissingen over wettelijke beschermingsniveaus voor dijkeringen (zie ook Kind, 2011); het sturen op overstromingsrisico (zie ook VNK2); de meerlaagse veiligheidsbenadering (zie ook Oranjewoud & HKV, 2011) en de financiering van de toename in zandsuppletievolumes voor de kust.

Wettelijke toetsing op veiligheid

Waterkeringbeheerders zorgen voor het onderhouden van dijken en duinen en waar nodig voor het versterken. Rijkswaterstaat zorgt voor het vasthouden van de kustlijn. Dit zijn taken die in de Waterwet zijn vastgelegd. In het hoofdstuk 'doelstellingen en normen' van de Waterwet wordt het onderwerp kustveiligheid in twee artikelen benoemd, namelijk over het handhaven van veiligheidsnormen en over het handhaven van de kustlijn:

- artikel 2.2, lid 1: "In de bij deze wet behorende bijlage II is voor elke dijkkring de veiligheidsnorm aangegeven als gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op de overige het waterkerend vermogen bepalende factoren";
- artikel 2.7: "Landwaartse verplaatsing van de kustlijn wordt van rijkswege voorkomen of tegengegaan, voor zover dat naar het oordeel van Onze Minister noodzakelijk is vanwege de ingevolge deze wet te handhaven veiligheidsnorm (lid 1). De in het eerste lid bedoelde kustlijn wordt aangegeven op een door Onze Minister kosteloos verkrijgbaar gestelde kaart die telkens na zes jaren wordt herzien. De verkrijgbaarstelling wordt bekend gemaakt in de Staatscourant" (lid 2).

In overeenstemming met de Waterwet en de Voorschriften voor het Toetsen van Veiligheid (VTV) worden de primaire waterkeringen van Nederland elke zes jaar beoordeeld op de veiligheid, waarbij dient te worden aangetoond dat de waterkeringen aan de wettelijke veiligheidsnorm³ voldoen. Het resultaat is een oordeel: 'voldoet' of 'voldoet niet' (of 'nader

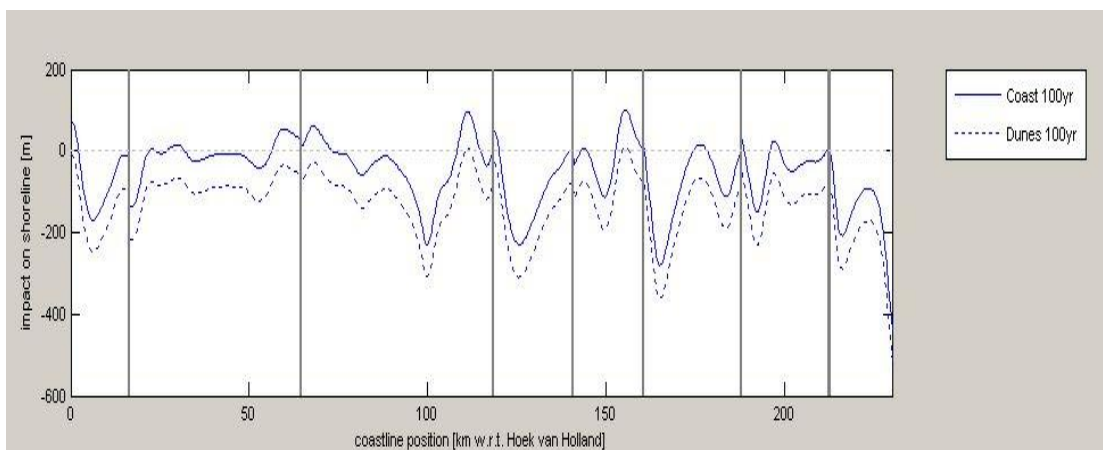
3. *Veiligheidsnorm: Eis waaraan een primaire waterkering moet voldoen. Het is de situatie die de waterkering nog niet moet kunnen keren. Dit wordt uitgedrukt als de gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de maatgevende set van hoogwaterstanden en golven waarop de primaire waterkering moet zijn berekend.*

onderzoek'). Ook de zeeweringen die deel uitmaken van de dijkringen op de Waddeneilanden en langs de Hollandse en Zeeuwse kust moeten voldoen aan de wettelijke normen. De veiligheidsnormen zijn uitgedrukt in overschrijdingskansen per jaar. Indien uit de toetsresultaten blijkt dat een waterkering niet aan de norm voldoet wordt een besluit genomen over een dijk- of duinversterking. De hoogste bescherming heeft de Hollandse kust (1/10.000 per jaar), gevolgd door Texel en de Zuid-Hollandse eilanden en Zeeland (1/4000 per jaar) en de Waddeneilanden (1/2000 per jaar).

Handhaven van de kustlijn

Naast de wettelijke toetsing op veiligheid en de versterkingen van de zeeweringen, wordt de kustlijn sinds 1990 gehandhaafd met zandsuppleties. Dat moet voldoende zekerheid bieden tegen de optredende zeespiegelstijging en kusterosie door opeenvolgende stormen, om functies in de kustzone (inclusief veiligheid) te beschermen.

Als er geen zand zou worden gesuppleerd, wordt geschat dat ongeveer de helft van de Nederlandse kust aan het eind van deze eeuw circa 100-400 meter landwaarts is opgeschoven (zie figuur 1.1). De kustlijn langs het overige deel is ook dynamisch maar verschuift minder.



Figuur 1.1. Geschatte achteruitgang van de kustlijn tussen Hoek van Holland (links) en Schiermonnikoog (rechts) in 100 jaar bij het achterwege laten van zandsuppleties en een zeespiegelstijging van 35-85 cm per eeuw, op basis van de ontwikkelde ALS suppletie tool (Huisman, 2011; Stronkhorst et al, 2011).

De uitvoering van reguliere zandsuppleties wordt geregeld via het beheer- en onderhoudsprogramma Kustlijnzorg van Rijkswaterstaat (Ministerie Infrastructuur & Milieu, 2011a). Het daadwerkelijke suppleren van zand gebeurt doorgaans door baggerbedrijven, met sleepopperzuigers. Zo wordt het zandtekort in het kuststelsel gecompenseerd. Het zand zorgt niet alleen voor de fysieke randvoorwaarden voor kustveiligheid, maar is ook randvoorwaarde voor het in stand houden van de bestaande functies waaronder recreatie, natuur en drinkwaterwinning. Kustlijnzorg kan dus gezien worden als uitvoering van *integraal kustbeleid* op rijksniveau dat gericht is op het behoud van de intrinsieke waarde van de kust.

De reguliere zandsuppleties onderhouden de zandvoorraad in verschillende zones:

- De BKL-zone (de zone tussen duinvoet tot enkele meters beneden NAP). Het zand is bedoeld voor een morfologische tijdschaal van circa 10 tot 25 jaar (Mulder, 2011). Het aanvullen van de zandvoorraad gebeurt door strand- en vooroeversuppleties;

- Het kustfundament (de zone tussen de -20 m NAP lijn en de binnenduinrand). Het zand in deze zone is bedoeld voor de lange termijn veiligheid, met een morfologische tijdschaal van circa 50 tot 200 jaar (Mulder, 2011) en vormt een invulling van 'duurzaamheid'. De suppleties omvatten, naast strand- en vooroeversuppleties in de BKL-zone, ook suppleties op de diepere vooroever, in getijdengeulen en in de toekomst mogelijk ook op buitendelta's;
- De duinen. Het zand komt hier indirect terecht: de wind transporteert het vanuit de vooroever en vanaf het strand. Dynamisch kustbeheer (Löffler et al., 2011) is mede gericht op het stimuleren van het zandtransport verder de duinen in.

Volgens een kantteken kosten-batenanalyse (RebelGroup en Witteveen+Bos, 2007) is het onderhouden van de BKL-zone een economisch verantwoorde werkwijze voor het behouden van het kustareaal en die bespaart op de voorheen hogere uitgaven aan aanleg en beheer van de waterkering door waterschappen. Er ligt echter geen economische rationale achter het onderhouden van het kustfundament. Dit is logisch, gezien de lange tijdschaal van dit concept. De lange termijn bijdrage aan 'duurzame veiligheid' strookt niet met de relatief korte zichtperiode die wordt gebruikt voor economische beschouwing (doorgaans <25 jaar).

Reguliere zandsuppleties wordt vooralsnog niet uitgevoerd voor zeedijken, aangezien de ligging van getijdengeulen voor zeedijken het onderhouden van een basiskustlijn zouden kunnen bemoeilijken. In principe bestaat er echter wel de mogelijkheid om voor harde zeeeringen, net als bij duinwaterkeringen, een basiskustlijn vast te stellen en te handhaven. Dit is momenteel in onderzoek bij Deltares (in opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst en Deltaprogramma Kust).

Zandsuppleties worden veelvuldig toegepast bij de aanleg van dijk- en duinversterkingen, zoals bij de Zwakke Schakel projecten. Ze maken een substantieel deel uit van de uitgaven voor kustversterkingen, zoals bij de Zwakke Schakel Noordwijk, waar zandsuppleties 46% uitmaakten van de totale aanlegkosten (Algemene Rekenkamer, 2009).

Relatie Kustlijnzorg en veiligheidsbeoordeling

Vanaf 2006 heeft Kustlijnzorg een plaats in de veiligheidsbeoordeling (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007, Expertise Netwerk Waterkeringen, 2007). Vanaf dat moment kan de waterkeringbeheerder, bij de toetsing van de waterkering, ervan uitgaan dat structurele erosie in de zone tussen duinvoet tot enkele meters beneden NAP (de BKL zone) volledig wordt gecompenseerd door Kustlijnzorg. Er dient nog wel rekening te worden gehouden met structurele achteruitgang van het afslagpunt door morfologische ontwikkelingen buiten de BKL zone.

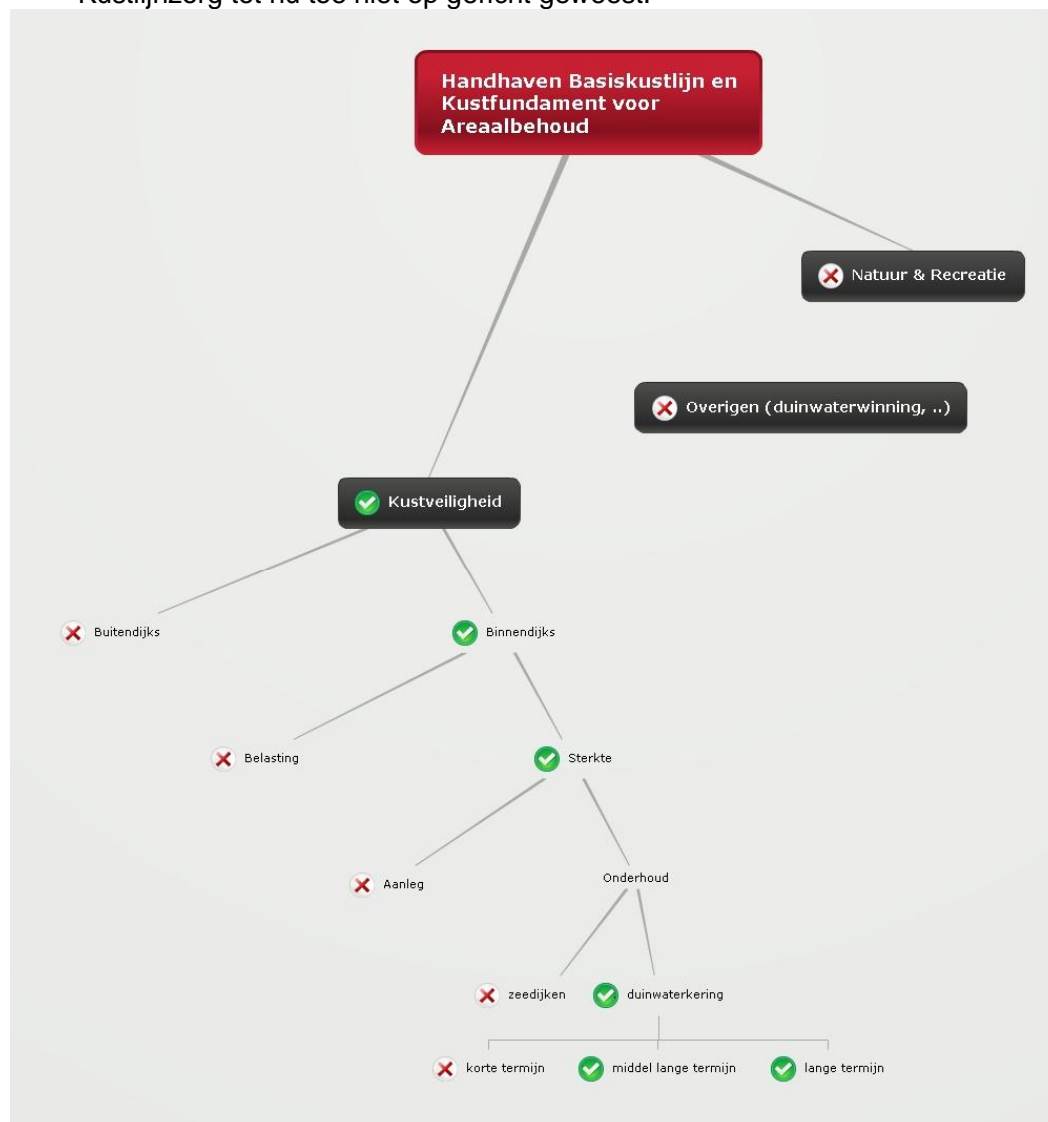
Onderwerp voor nadere studie is de vraag in hoeverre zandsuppleties de golfbelasting op de waterkering tijdens storm verminderen.

1.3 Afbakening

Om te voorkomen dat de studie naar de relatie tussen het handhaven van de kustlijn met zandsuppleties en kustveiligheid te omvangrijk zou worden, is het onderwerp afgebakend (zie figuur 1.2). De focus van de studie ligt op de waterveiligheid van de dijkringen langs de kust (kustveiligheid). Dat betekent dat de volgende onderwerpen buiten beschouwing zijn gelaten:

- De bijdrage van zandsuppleties aan natuur, recreatie of overige functies;
- De bijdrage van Kustlijnzorg aan buitendijkse veiligheid (Boers, 2009);
- De positieve invloed van suppleties op de belasting van de waterkering; dit is een onderwerp voor nadere analyse;
- Zandsuppleties die ingezet worden bij aanleg van dijk- of duinversterking om op korte termijn (< 1 jaar) een verbetering in kustveiligheid te realiseren;

- De bijdrage van zandsuppleties aan de sterkte van zeedijken; hier is de uitvoering van Kustlijninzorg tot nu toe niet op gericht geweest.



Figuur 1.2. Dit rapport richt zich op de bijdrage van Kustlijninzorg aan het onderhoud van kwetsbare duinwaterkeringen op de middellange en lange termijn. De rode kruisjes zijn onderwerpen die buiten beschouwing zijn gelaten, te weten: de bijdrage aan buitendijkse veiligheid, de mogelijke reductie in de belasting van de waterkering, het gebruik van zandsuppleties bij de aanleg van versterkingen en de bijdrage van reguliere zandsuppleties (beheer&onderhoud) van de sterkte van verharde zeedijken.

1.4 Vraagstelling

De centrale vraag in dit rapport luidt: wat is de bijdrage van het beheer- en onderhoudsprogramma Kustlijninzorg aan het duurzaam handhaven (of vergroten) van de sterkte van duinwaterkeringen op de middellange en lange termijn? Deze vraag is onderverdeeld in de volgende deelvragen:

- 1 Waar bevinden zich de relatief kwetsbare delen van de Nederlandse zeedijken die gebaat zijn bij reguliere zandsuppleties? En hoe verhouden die kwetsbare delen zich tot elkaar in termen van de gevolgen voor het achterland van een duin- of dijkdoorbraak?

- 2 Wat is de relatie tussen het aanwezige zandvolume en de sterkte van de duinwaterkering?
- 3 Wat is de bijdrage van zandsuppleties aan het zandvolume in de kustzone en de sterkte van de duinwaterkering? Wat is daarbij de invloed van de gekozen uitvoeringswijze van suppleren (duin-, strand-, vooroever- of geulwandsuppleties)?
- 4 Hoe kunnen de bevindingen worden doorvertaald naar de uitvoering, beleidsvoorbereiding en aanbevelingen voor nader onderzoek?

1.5 Aanpak

Allereerst is een inventarisatie gemaakt van kwetsbare locaties langs de kust. Vervolgens zijn indicatoren benoemd, waarmee de relatie tussen zandsuppleties en de sterkte van duinwaterkeringen in beeld kunnen worden gebracht. Deze indicatoren zijn berekend uit de JARKUS metingen: dit zijn metingen van kustprofielen van de Nederlandse kust die sinds 1965 op systematische wijze plaats vinden. Tijdens de studie is gebruik gemaakt van de specialistische kennis van Deltares, Arcadis, HKV en Rijkswaterstaat Waterdienst. Als laatste stap is een start gemaakt met het in beeld brengen van de relaties tussen de indicatoren en zandsuppleties.

De studie heeft geresulteerd in een grote database met indicatoren en in de volgende rapporten:

- Steetzel, HJ, Van Santen RB, 2010. Relatie Kustlijnzorg – Kustveiligheid, resultaten uit het verleden. Arcadis, rapport A2681. Een eerste analyse van voor de Hollandse Kust.
- Van Santen RB, Steetzel HJ, 2011. Relatie Kustlijnzorg – Kustveiligheid, nadere uitwerkingen. Arcadis, rapport A2738. Dit rapport geeft een uitgebreide data-analyse naar de relatie tussen zandvolume indicatoren en veiligheidsindicatoren voor de gehele Nederlandse kust over de periode 1990-2010.
- Van Vuren S, Havinga F, Stijnen J, 2010. Verbinden van toetsingssystematiek van kustlijnzorg en wettelijke veiligheidstoetsronde. HKV, rapport PR2063.10.
- Van Geer P, 2011. Kustkaarten met behulp van Morphan (Deltares, open source software). De mogelijkheden in het toekomstige toetsprogramma Morphan zijn uitgebreid om kustprofielen te analyses en kaarten samen te stellen.
- Boers, M. 2011. Kustkaarten voor kustbeleid. Deltares, rapport 1204594. Dit rapport presenteert een procedure voor het vervaardigen van kustkaarten ten behoeve van toekomstige beleidsvragen rond kustveiligheid.

De analyses zijn uitgevoerd in samenwerking met het Deltares project KPP Beheer & Onderhoud Kust, zoals beschreven in de volgende rapportages:

- Giardino A, Santinelli G, Bruens A, (2011). Toestand van de Kust; case study Noord Hollandse kust. Deltares, rapport. Het rapport beschrijft de uitgevoerde trendanalyse en uitkomsten voor het kustvak Noord Holland;
- Van Balen W., Vuik V, Van Vuren S, 2011. Indicatoren voor kustlijnzorg. HKV, rapport PR2063.10. Dit rapport gaat in op ondermeer de faalkansen van de duinenrij en de relatie met zandsuppleties.

Het voorliggende rapport bouwt voort op bovengenoemde rapportages en presenteert aanvullende berekeningen van de effecten van het beheer- en onderhoudsprogramma Kustlijnzorg op de sterkte van duinwaterkeringen op een grotere tijd- en ruimteschaal.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 omschrijft de gevolgde methoden bij 1) de indicatoren voor zandvolume en voor de sterkte van de duinwaterkering, 2) het bepalen van de kwetsbare plekken langs de kust en 3) de relaties tussen de indicatoren.

Hoofdstuk 3 bevat de resultaten. Eerst worden de kwetsbare delen langs de kust getoond, daarna de uitkomsten van de berekende indicatoren (en relaties ertussen) voor een geselecteerd aantal kustvakken langs de Nederlandse kust.

Hoofdstuk 4 bespreekt de bevindingen over de bijdrage van zandsuppleties aan de sterkte van de duinwaterkeringen.

Hoofdstuk 5 benoemt onderwerpen die relevant zijn voor de uitvoering van het kustbeheer, de beleidsvoorbereiding rond waterveiligheid en het deltaprogramma kust. Ook worden aanbevelingen voor nader onderzoek gedaan.

2 Methoden

2.1 Indicatoren en rekenmethoden

2.1.1 Algemeen

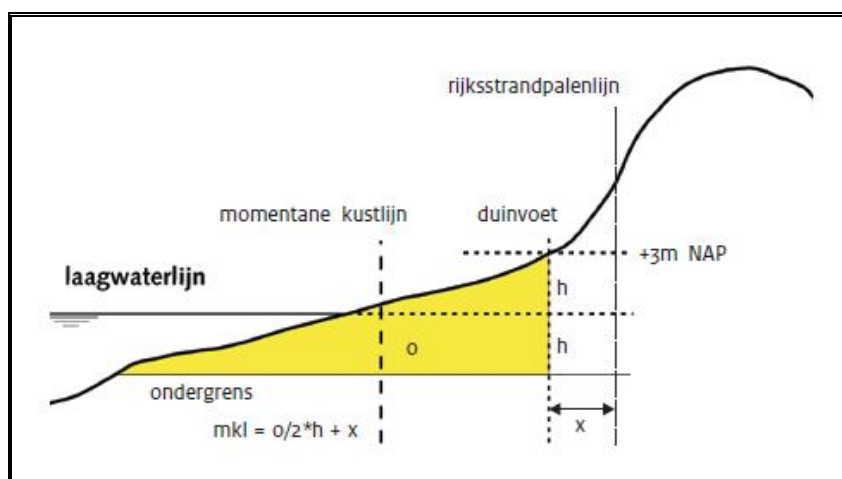
Om de morfologische ontwikkelingen van de kustlijn en de sterkte van de waterkering weer te geven zijn in totaal zes numerieke indicatoren gebruikt. De basis voor het berekenen van de indicatoren zijn de 'Jarkus metingen'. Dit zijn jaarlijkse metingen van kustprofielen die sinds 1965 op systematische wijze plaats vinden. Het gaat om ongeveer 1400 raaien dwars op de Nederlandse kust, van circa 200 meter landwaarts van de eerste duinenrij tot circa 800 meter zeewaarts van de Rijksstrandpalen. Voor meer details wordt verwezen naar Steetzel & van Santen, 2010, Giardino et al., 2011, van Balen et al, 2011 en van Santen & Steetzel, 2011.

2.1.2 Indicatoren voor zandvolume

De volgende drie indicatoren worden voor de zandvolumes in de BKL-zone en in de duinen gebruikt:

1. Momentane kustlijnligging (MKL): de MKL is een standaard indicator en representeert het zandvolume in de vooroever en op het strand, tussen de duinvoet (+3m NAP) en een vastgesteld niveau om en nabij de laagwaterlijn (zie Figuur 2.1). Dit zandvolume wordt beïnvloed door natuurlijke morfologische dynamiek en door zandsuppleties. De MKL wordt jaarlijks vastgesteld aan de hand van Jarkus metingen en uitgedrukt als afstand ten opzichte van de Rijksstrandpalen (RSP).

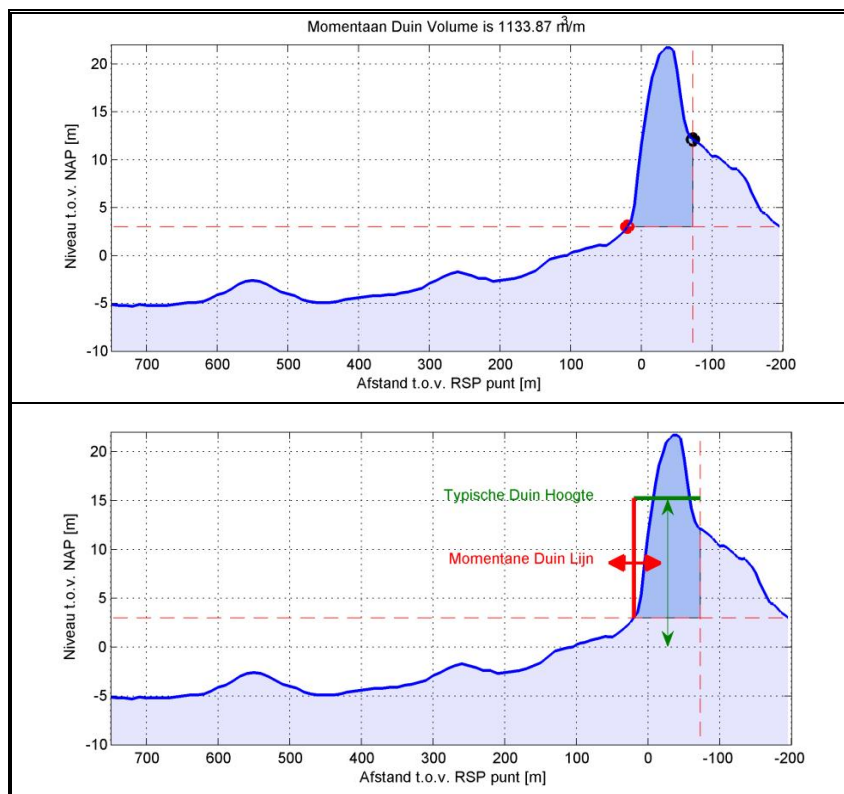
2. Duinvoet positie (DV): DV is de afstand van de duinvoet op +3 meter NAP ten opzichte van de Rijksstrandpalen (RSP). De DV wordt jaarlijks vastgesteld met de Jarkus metingen. Het is een eenvoudige maat die aangeeft of er sprake is van aangroei of afslag van de duinen.



Figuur 2.1 Definitie van de indicatoren momentane kustlijn en duinvoet (Kustlijnkaartenboek 2012, Rijkswaterstaat).

3. Momentane Duinlijn (MDL): de MDL is een nieuw ontwikkelde maat voor het zandvolume boven de duinvoet die een rol speelt bij duinafslag tijdens stormcondities (Steetzel & van Santen (2010), zie Figuur 2.2). Allereerst wordt het Momentane Duinvolume (MDV) berekend uit de Jarkus metingen. Dit is het zandvolume tussen +3 meter NAP en het maatgevend duinafslagpunt in het referentiejaar 1990 met de bijbehorende overschrijdingskans conform de

veiligheidsnorm (Xaf,1990). De MDL wordt vervolgens bepaald door MDV te delen door een typische Duin Hoogte van het referentiejaar 1990.



Figuur 2.2 Definitie van de indicatoren Momentaan Duin Volume en Momentane Duin Lijn, voorbeeld voor raai 8006800 (van Santen en Steetzel, 2011).

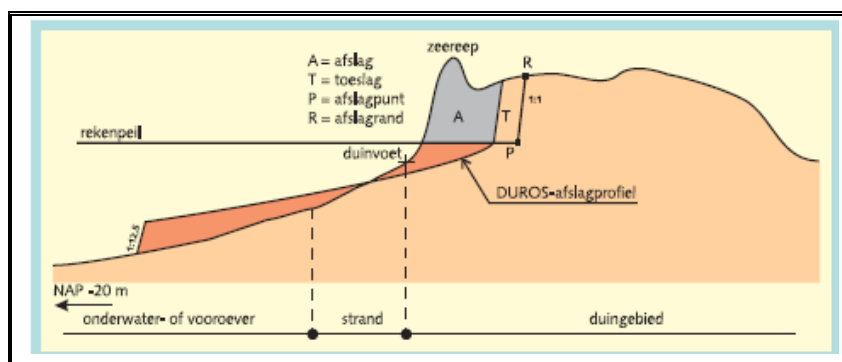
Voor de langetermijn ontwikkelingen in het kustfundament bestaat helaas geen eenduidige maat. Ook zijn lange termijn ontwikkelingen moeilijk vast te stellen (de Ronde, 2011).

2.1.3 Indicatoren voor veiligheid (sterkte duinwaterkering)

Er zijn drie indicatoren voor de sterkte van de eerste, zeewaarts gelegen duinenrij⁴ bepaald:

1. Maatgevende afslagpunt (MAL): het MAL is het afslagpunt in een duin tijdens maatgevende stormomstandigheden (zie Figuur 2.3). Het is uitgerekend met het reguliere toetsmodel (VTV2006) in combinatie met de hydraulische randvoorwaarden (HR2006). De resultaten zijn uitgedrukt als verschil in afstand (m) ten opzichte van de ligging van het duinafslagpunt in 1990 bij een vaste overschrijdingskans van 10^{-5} .

4. De rekenmethoden zijn niet geschikt om meerdere parallelle duinenrijen door te rekenen



Figuur 2.3 Definitie van het afslagpunt (Leidraad Zandige Kust, TAW 2002)

2. Overschrijdingskans MAL 1990: dit is de kans dat het maatgevend afslagpunt 1990 wordt overschreden. De overschrijdingskansen zijn hier berekend voor alle Jarkus raaien, met behulp van de probabilistische Monte-Carlo schil rondom het DUROS+ model. De aanpak komt overeen met Den Heijer et al (2011). De resultaten zijn uitgedrukt als variërende overschrijdingskansen ten opzichte het duinafslagpunt in 1990 met een overschrijdingskans van 10^{-5} (Steetzel & van Santen, 2010).

3. Faalkans eerste duinenrij: dit is de kans dat het afslagpunt van de eerste duinenrij het uiterste toelaatbare afslagpunt overschrijdt (de grens tot waar de duinen zouden mogen afslaan zodat er nog juist een restprofiel in de eerste duinenrij aanwezig blijft). Voor duinen geldt volgens de formele toetsing dat er bij duinafslag geen reststerkte meer over is bij het bereiken van het restprofiel. Voor duinen wordt feitelijk dus getoetst op faalkans, in plaats van op overschrijdingskans. Voor het berekenen van de faalkans van de eerste duinenrij is gebruik gemaakt van het model DUROS+ binnen PC-Ring (Van Balen et al, 2011), conform de aanpak binnen het onderzoekstraject Veiligheid Nederland in Kaart (VНК). De berekeningen zijn uitgevoerd per Jarkus raai voor de periode 1965 tot 2010, waarbij is uitgegaan van de hydraulische randvoorwaarden uit 2006 (HR2006). Het model DUROS+ is niet geschikt voor het berekenen van de faalkans van meerdere duinenrijen.

NB: Het afleiden van veiligheidsindicatoren voor de Hollandse Kust is eenvoudiger (nauwkeuriger) dan voor de Delta en Wadden (eilandkoppen, geulen, buitendelta's zorgen voor complexere morfologie). Vandaar dat in deze studie in eerste instantie de indicatoren voor de Hollandse kust in meer detail zijn geanalyseerd.

2.1.4 Zandsuppleties

Rijkswaterstaat beschikt over een suppletiedatabase die in deze studie gebruikt is. Waar relevant is de wijze waarop suppleties zijn aangebracht vermeld: duinsuppletie, strandsuppletie, vooroeversuppletie of geulwandsuppletie. Zandsuppleties hebben een positieve invloed op de ontwikkeling van de indicatoren. De mate en tijdschaal van beïnvloeding hangt af van het type suppletie, de omvang van de suppletie en de frequentie van suppleren:

- Duinsuppleties zorgen voor een directe toename van het zandvolume in het duin en de BKL-zone en een directe toename van de sterkte van de duinwaterkering. In de loop der tijd neemt het zandvolume en de sterkte van de duinwaterkering weer af.
- Strandsuppleties zorgen voor een directe toename van het zandvolume in de BKL-zone en een beperkte toename van de sterkte van de duinwaterkering. Water en wind verplaatsen het aangebrachte zand in de loop van de tijd langs de kust en dwars op de kust. Hierdoor neemt op termijn het zandvolume in het duin en daarmee sterkte

van de waterkering naar verwachting verder toe. Op de langere termijn, nadat de suppletie is 'uitgewerkt', nemen de zandvolumina en de sterkte weer af.

- Vooroever suppleties hebben geen of een beperkte directe invloed op het zandvolume in de BKL-zone en geen directe invloed op het zandvolume in het duin. De suppletie heeft op termijn wel invloed op de ontwikkeling van het zandvolume in BKL-zone en het duin en de sterkte van de waterkering.

Het suppletievolumen dat is neergelegd, is uitgedrukt in absolute en relatieve hoeveelheden zand:

- Totale suppletievolumen: m³ per suppletie of m³ per 10 jaar per kustsectie;
- Suppletievolumen per strekkende meter: m³ per suppletie per strekkende meter kustlengte waarlangs de suppletie heeft plaatsgevonden of per tijdstap van 10 jaar (m³/m'/10 jaar).

2.2 Uitgevoerde Analyses

Om de vier deelvragen uit paragraaf 1.4 te beantwoorden zijn de volgende analyses uitgevoerd.

2.2.1 Identificatie kwetsbare kustdelen

Langs de hele Nederlandse kust (circa 360 kilometer) zijn locaties geïdentificeerd waar structurele kusterosie optreedt en waar de zeewering relatief smal en laag is. Tijdens een werksessie op 14 september 2011 (met Q. Lodder, Rijkswaterstaat Waterdienst) zijn deze kwetsbare kustdelen op basis van veldkennis en ervaring bij het programmeren van Kustlijninzorg in kaart gebracht en vastgelegd in GIS.

Eventuele bresvorming van de zeewering en overstroming van het achterland hebben uiteraard grote gevolgen. Hoe groot het gevolg is, hangt af van de fysieke kenmerken van een overstroming (zoals het oppervlak, de waterdiepte en stroomsnelheid van het ondergelopen gebied, aangeduid als blootstelling), het aantal mensen in het getroffen gebied en de economische waarde. De gevolgen worden uitgedrukt in schade en slachtoffers. Het risico wordt uitgedrukt in schade per jaar of slachtoffers per jaar. Gegevens van overstromingsberekeningen⁵, schade en slachtoffers zijn verzameld uit het LIZARD systeem, zoals die zijn bepaald voor eerdere studies (risicokaarten en VNK2). Voor de kwetsbare kustdelen zijn locaties geselecteerd waar mogelijk bresvorming zou kunnen optreden. Voor deze locaties zijn de gevolgen van een eventuele overstroming van het achterliggende (polder-)gebied in beeld gebracht, in termen van economische schade en aantal slachtoffers. Deze resultaten geven antwoord op de 1^e onderzoeksvraag uit paragraaf 1.4. Voor meer details wordt verwezen naar <http://flooding.lizardssystem.nl/flooding> (Nelen en Schuurmans).

2.2.2 Ontwikkeling indicatoren

Per indicator is de ontwikkeling in de tijd en per jarkusraai bepaald en in een database opgeslagen. Uit de volume-indicatoren kan afgeleid worden welke delen van de kust erosief zijn, uit de veiligheidsindicatoren kan afgeleid worden welke delen (relatief) een grote kans hebben bresvorming en overstromingen. In paragraaf 3.2 worden een aantal resultaten gepresenteerd, die een andere onderbouwing geven van de 1^e onderzoeksvraag uit paragraaf 1.4.

5. Een berekening van het overstromingspatroon voor één of meerdere doorbraken in een dijkkring.

2.2.3 Relatie tussen indicatoren

Uit de database kunnen op vrij eenvoudige wijze relaties tussen de verschillende volume- en veiligheidsindicatoren afgeleid worden (per jarkusraai). Zo kan antwoord gegeven worden op de 2^{de} vraag: Wat is de relatie tussen het aanwezige zandvolume en de sterkte van de waterkering. In paragraaf 3.3 worden een aantal resultaten van afgeleide relaties tussen indicatoren gepresenteerd. Dit geeft antwoord op de 2^e onderzoeksvraag uit paragraaf 1.4. .

2.2.4 Relatie tussen zandsuppleties en indicatoren

Voor een aantal gebieden in Noord-Holland is een analyse uitgevoerd. Allereerst is naar het momentane effect gekeken van een suppletie in jaar j-1 op de faalkans in het daarop volgende jaar j.

Om de relatie tussen zandsuppleties en indicatoren beter in beeld te brengen moet naar de ontwikkeling van de indicatoren op grotere tijd- en ruimteschaal worden gekeken. Hiervoor zijn vakken bepaald met een uniforme morfologisch gedrag op een schaal van enkele kilometers:

- Kustdeel tussen Den Helder en Julianadorp (afstand van 6 km), oorsprong eroderend, vanaf 1990 zijn er regelmatig strandsuppleties en onderwatersuppleties uitgevoerd;
- Kustdeel rondom Callantsoog (afstand van 12 km), oorsprong eveneens eroderend, vanaf 1990 zijn er regelmatig strandsuppleties en onderwatersuppleties uitgevoerd;
- Kustdeel tussen Bergen – Egmond (afstand van 7 km), oorsprong ook eroderend, ondertussen is er veel gesuppleerd (strandsuppleties en onderwatersuppleties);
- Kustdeel rondom Castricum (afstand van 10 km), niet eroderend en geen (of weinig) suppleties.

Voor het bepalen van de relatie tussen de uitgevoerde zandsuppleties langs de Kop van Noord Holland en de indicatoren voor zandvolume en waterveiligheid zijn drie verschillende perioden aangehouden, te weten:

- Van 1965 tot 1990, waarin geen structureel suppletiebeleid bestond;
- Van 1991 tot 2000 met een beleid van handhaving Basiskustlijn;
- Van 2001 tot 2010 met een beleid van handhaving Basiskustlijn en (gedeeltelijk) meegroeien van het kustfundament met de zeespiegelstijging.

De indicatoren voor de periode 1965-1990 zijn teruggerekend naar 10 jaar gemiddelden.

In paragraaf 3.4 worden de resultaten van afgeleide relaties tussen zandsuppleties en indicatoren gepresenteerd. Hiermee wordt een antwoord gegeven op de 3^{de} vraag: Wat is de bijdrage van zandsuppleties aan het zandvolume in de kustzone en de sterkte van de duinwaterkering?

3 Resultaten

3.1 Kwetsbare delen langs de kust

3.1.1 Ligging

Er zijn 22 locaties langs de Nederlandse kust geïdentificeerd, waar zandsuppleties structurele kusterosie tegengaan (figuur 3.1). Het programma Kustlijnzorg levert hier een bijdrage aan het onderhoud van relatief kwetsbare zeeweringen.

De kustlengte per locatie varieert van 1 tot 15 kilometer. In totaal is de binnendijkse veiligheid langs circa 64 kilometer kust direct gebaat bij zandsuppleties (tabel 3.1). De Deltakust heeft het grootste aandeel daarin (57%), de Waddeneilanden het kleinste aandeel (8%).

Tabel 3.1 Indicatie van kwetsbare locaties langs de Nederlandse kust waar gesuppleerd wordt voor kustveiligheid op middellange termijn, van noord naar zuid. Zie Figuur 3.1 voor de ligging van de locaties.

Nr	Locatie	lengte kust (m)
1	Ameland	1035
2	Ameland	934
3	Vlieland	2089
4	Kop Texel	1163
5	Den Helder	3195
6	Callantsoog	3471
7	Hondsbossche/Pettermer zeewering	5419
8	Velsen	1422
9	Noordwijk	2407
10	Katwijk	1395
11	Scheveningen	2622
12	Ter Heijde	2774
13	Kop Voorne	2315
14	Flaauwe Werk	2110
15	Noorderstrand	1074
16	Renesse	1760
17	Westenschouwen	785
18	Banjaard	1005
19	Domburg-Westkappele	834
20	Westkappelse zeedijk	7801
21	ZW Walcheren	3862
22	Zeeuws Vlaanderen	14916
	Totaal	64388

3.1.2 Rangschikking

Van deze 22 kwetsbare locaties, waar mogelijk bresvorming zou kunnen optreden, zijn gegevens verzameld over economische schade en het aantal slachtoffers na een overstroming. De beschikbare gegevens zijn weergegeven in tabel 3.2⁶.

Het ruimtelijk patroon van de inundatie is geïllustreerd in figuur 3.2 t/m 3.4 (voor de locaties 4, 5, 7, 10, 11, 12, 21 en 22).

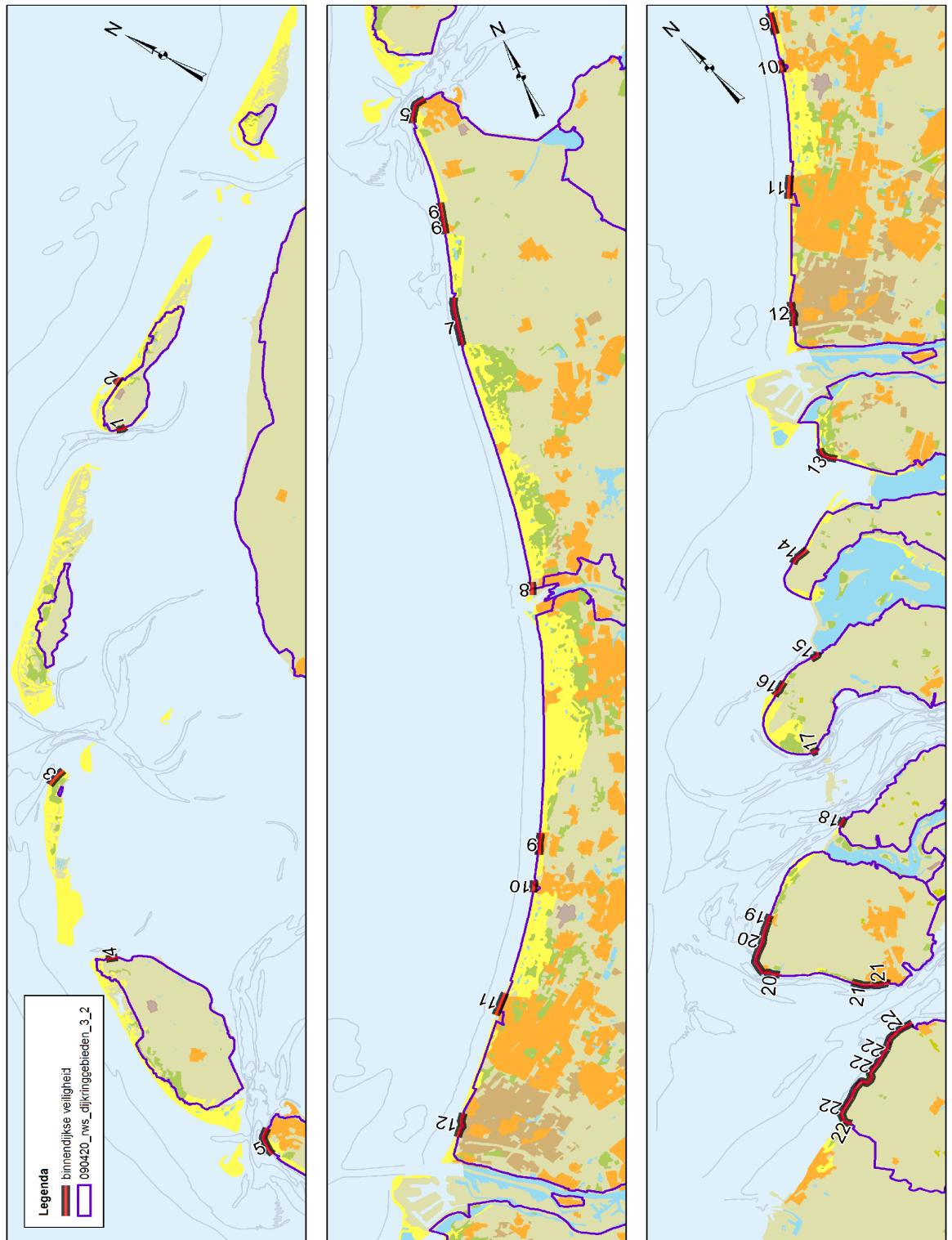
Tabel 3.2 Rangschikking van kwetsbare locaties langs de Nederlandse kust naar het geschatte aantal slachtoffers en de schade door inundatie bij doorbraak van de zeewering ter plaatse. Bij het geschatte aantal slachtoffers is geen rekening gehouden met evacuatie. Bron: Lizard. (- = gegevens ontbreken).

nr	Locatie	type zeewering	Slachtoffers (n)	Schade (M€)
10	Katwijk	Verharde zeewering ^{a)}	449	5.325
12	Ter Heijde	Duinwaterkering	427	5.287
11	Scheveningen	Verharde zeewering	198	4.565
21	ZW Walcheren	Duinwaterkering	161-212	1.457-1.708
13	Kop Voorne	Duinwaterkering	128	1.421
5	Den Helder ^{b)}	Zeedijk	60-73	632-682
6	Callantsoog	Duinwaterkering	9-10	103-112
14	Flauwe Werk	Verharde zeewering	9-14	156-219
4	Kop Texel ^{b)}	Verharde zeewering	5	192
20	Westkappelse zeedijk ^{b)}	Zeedijk	0-7	22-137
1	Ameland	Verharde zeewering	4-5	34-85
17	Westenschouwen	Verharde zeewering	3	67
19	Domburg-Westkappele	Duinwaterkering	2	51
7	Hondsbossche/Pettermer zeewering ^{b)}	Zeedijk	1	20-41
22	Zeeuws Vlaanderen	Hybride keringen	0-1	3-57
18	Banjaard	Verharde zeewering	0	19
2	Ameland	Duinwaterkering	-	-
3	Vlieland	Duinwaterkering	-	-
8	Velsen	Duinwaterkering	-	-
9	Noordwijk	Verharde zeewering	-	-
15	Noorderstrand	Duinwaterkering	-	-
16	Renesse	Duinwaterkering	-	-

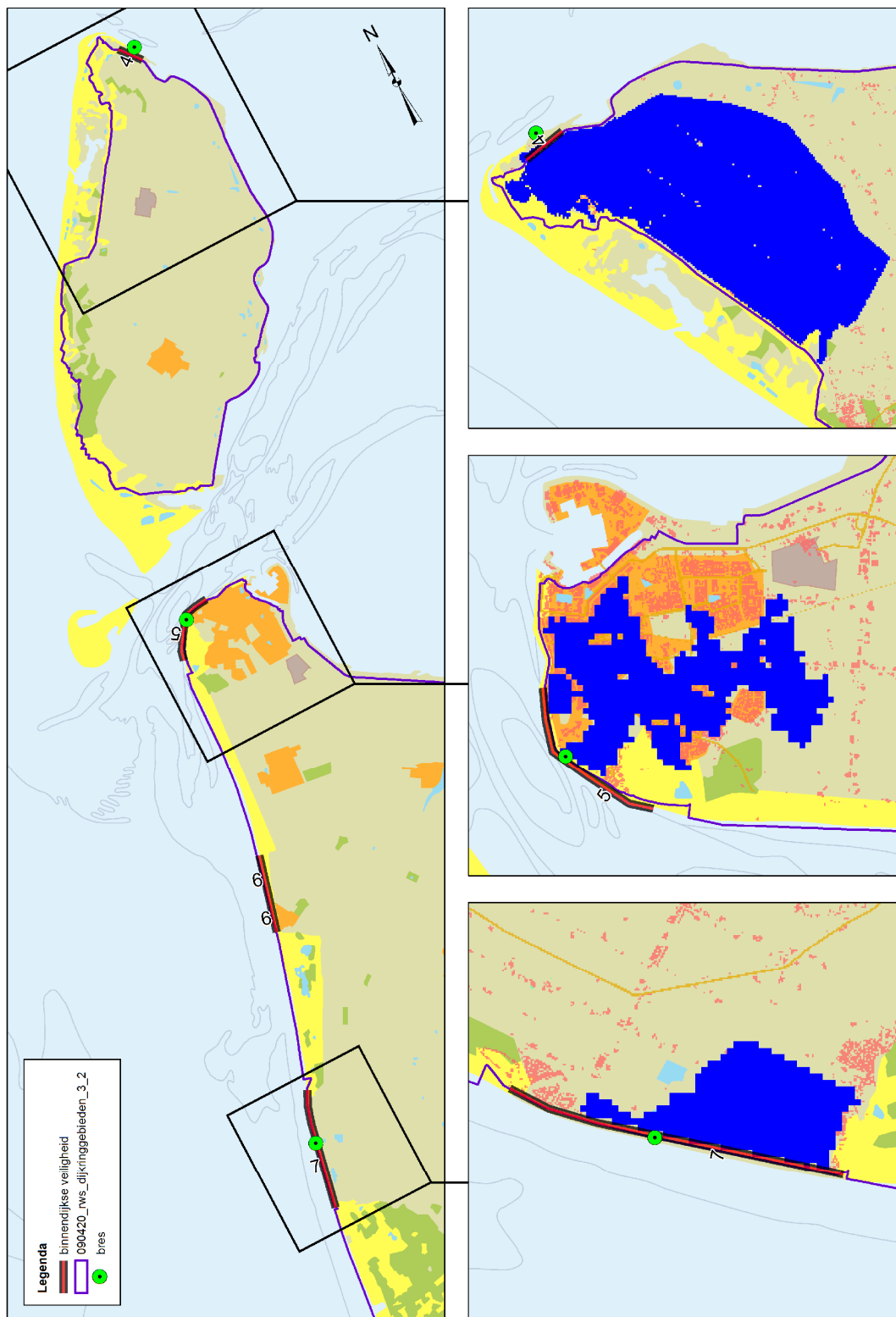
^{a)} duinwaterkering met harde, niet waterkerende objecten

^{b)} geen BKL gedefinieerd

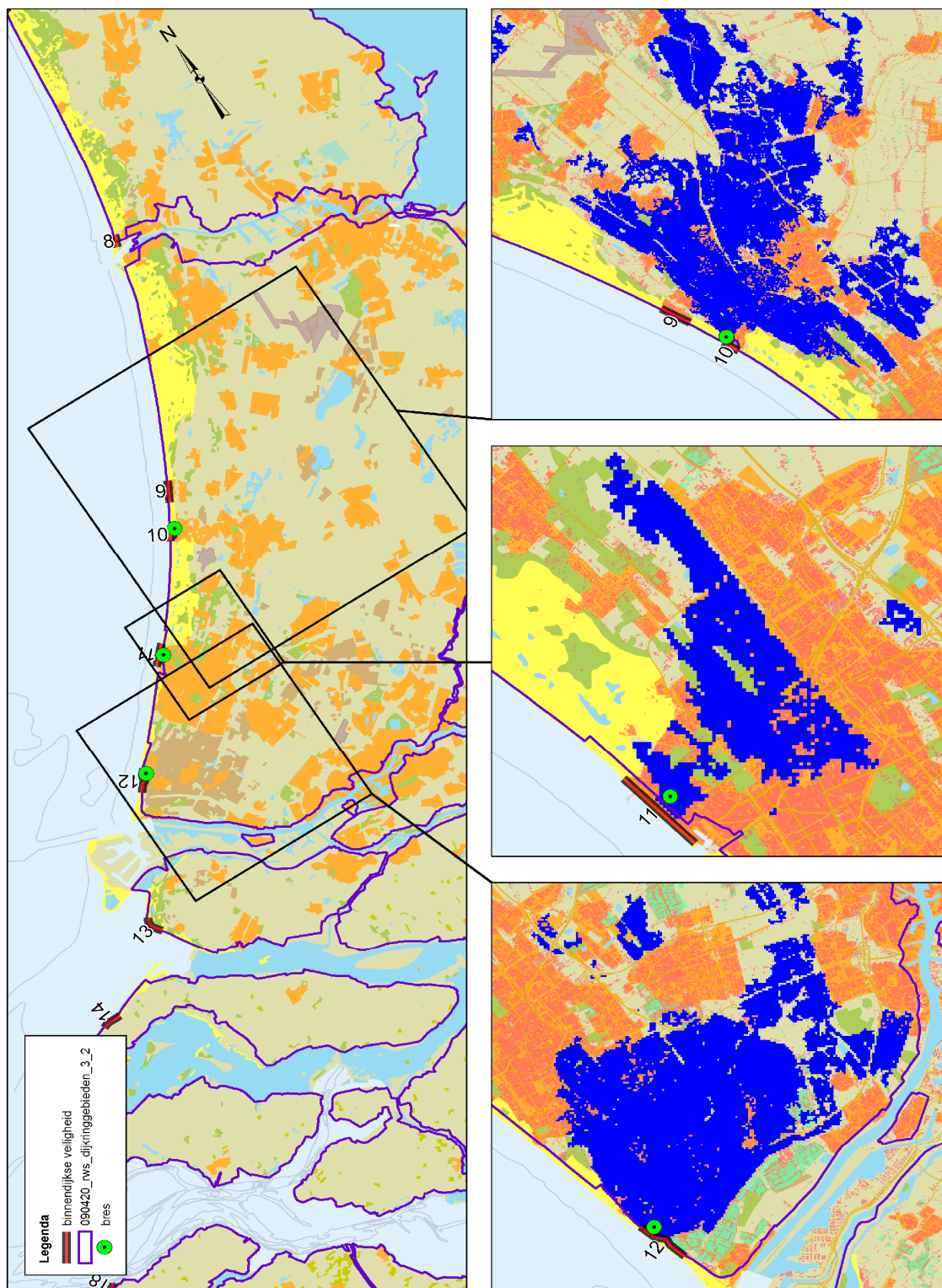
6. Deze gegevens wijken af van de studie WV21 waar met scenario's, andere uitgangspunten en gewogen gemiddelde verwachtingswaarden is gewerkt



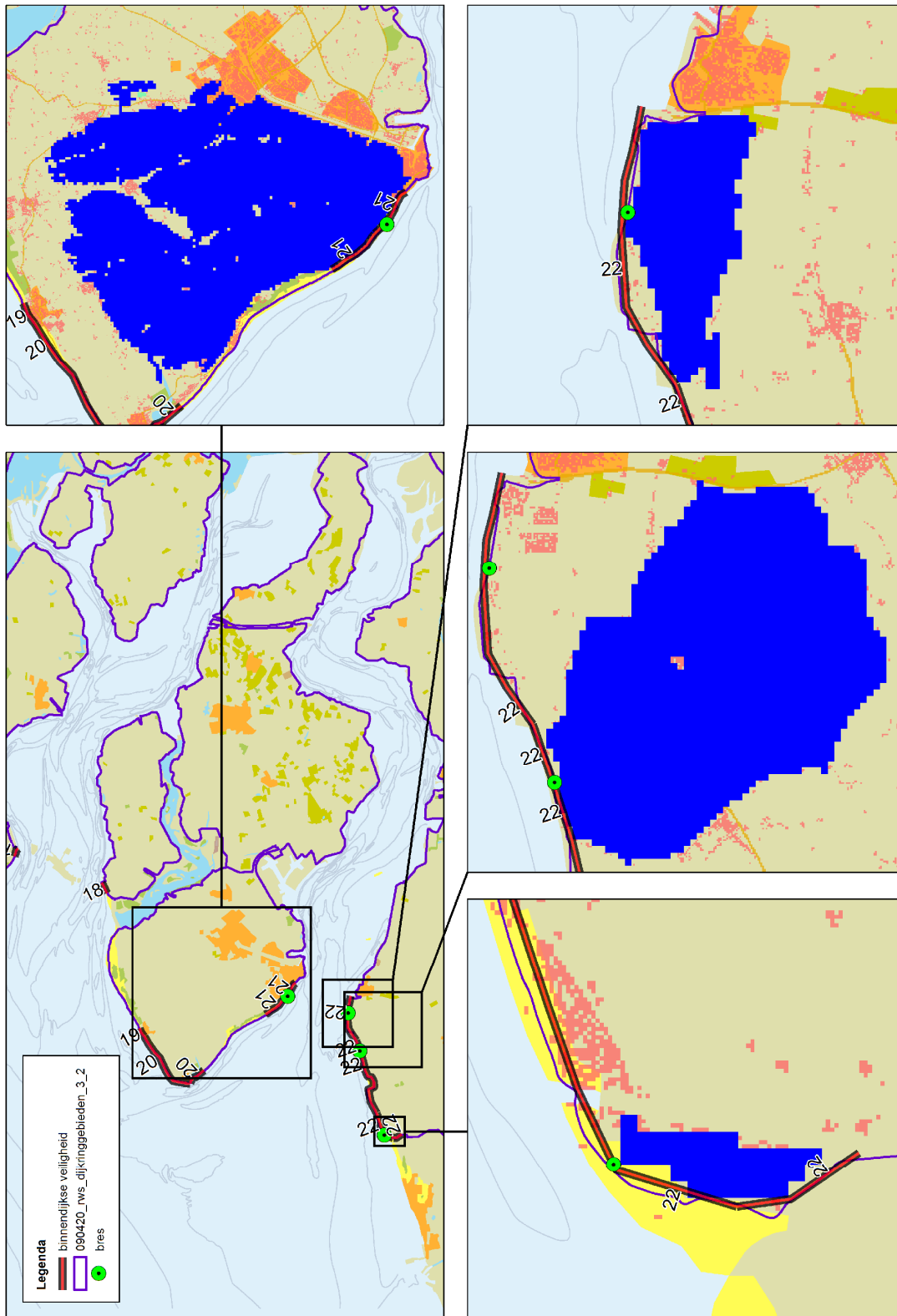
Figuur 3.1. Locaties langs de Nederlandse kust waar reguliere zandsuppleties een bijdrage leveren aan het onderhoud van relatief kwetsbare zeekeringen Zie tabel 3.1. voor naamgeving van de locaties.



Figuur 3.2. Overstromingspatronen bij een aantal mogelijke breslocaties in de zeekering van Noord-Holland. (Bron:Lizard)



Figuur 3.3. Overstromingspatronen bij een aantal mogelijke breslocaties in de zeewering van Zuid-Holland. (Bron:Lizard)



Figuur 3.4. Overstromingspatronen bij een aantal mogelijke breslocaties in de zeewering van Walcheren en West Zeeuws-Vlaanderen. (Bron: Lizard)

3.2 Ontwikkeling van indicatoren

3.2.1 Hollandse kust tussen Hoek van Holland en Den Helder

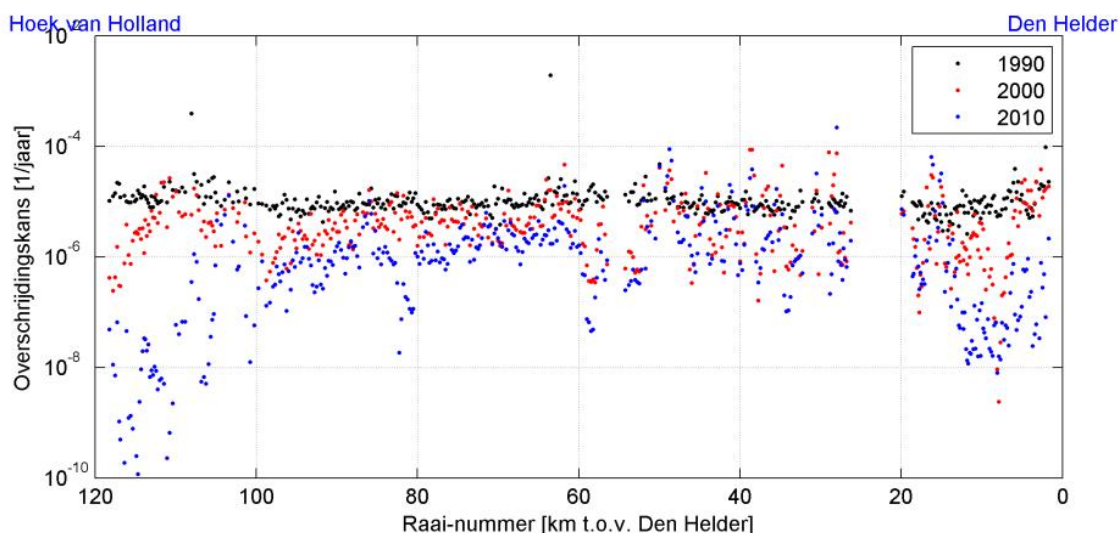
Overschrijdingskansen (1990-2010)

Er zijn overschrijdingskansen bepaald voor de maatgevende afslagpunten van de Jarkus raaien langs de Hollandse kust volgens de VTV methode (figuur 3.5).

De overschrijdingskans in 1990 (zwarte stippen), het moment waarop werd begonnen met het handhaven van de kustlijn, ligt rond een kans van 10^{-5} per jaar. In de voorafgaande jaren werd weinig tot niet gesuppleerd.

Na 10 jaar is de overschrijdingskans (rode stippen) langs de Hollandse kust voor veel raaien met een factor 10 afgenomen. Dit was de periode waarin gemiddeld langs de Hollandse kust $\sim 50 \text{ m}^3$ zand/m'/jaar is gesuppleerd.

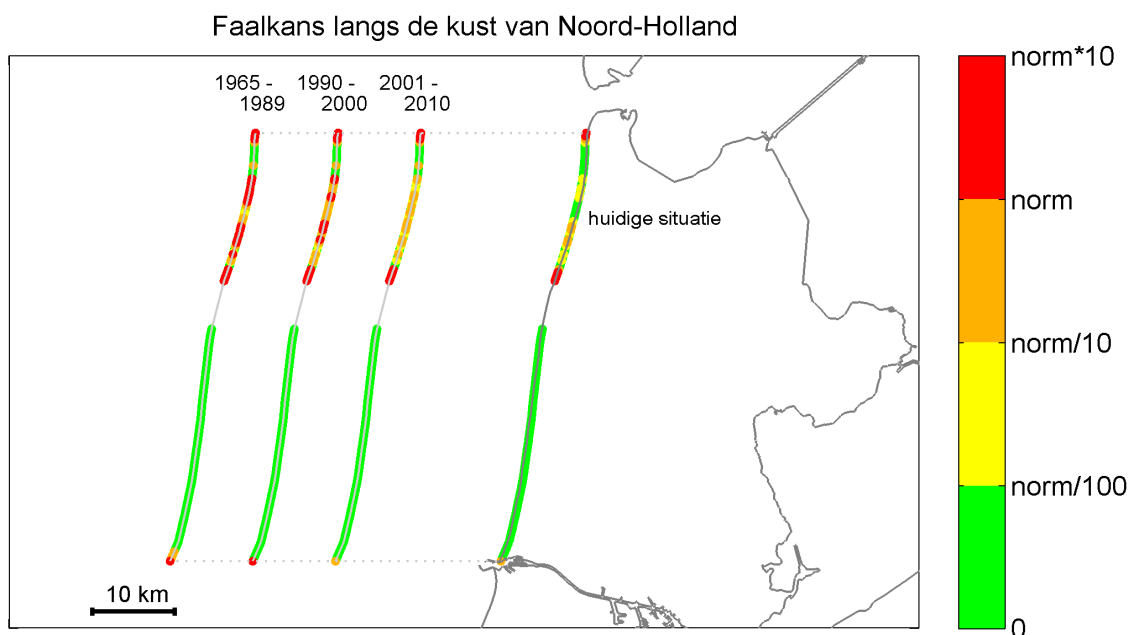
In 2010 liggen de overschrijdingskansen (blauwe stippen) voor bijna alle raaien een factor 10 tot 1000 lager dan in 1990. Dit was de periode waarin gemiddeld langs de Hollandse kust circa 90 m^3 zand/m'/jaar werd gesuppleerd.



Figuur 3.5. Trend in overschrijdingskansen van het afslagpunt op de Jarkus-raaien langs de Hollandse kust tussen 1990, 2000 en 2010. Data ontbreken voor delen van de kust met zeedijken zoals de Hondsbossche en Pettemer zeedijk (tussen 20 en 25 km vanaf Den Helder (Bron: van Santen en Steetzel, 2011)).

Faalkans (1965-2010)

In figuur 3.6 is weergegeven hoe de faalkans van de duinen langs de kust van Noord-Holland zich tussen 1965 en 2010 ontwikkelde. Het is duidelijk te zien dat de zwakste duinenrijen vlak ten noorden van de Hondsbossche Zeewering liggen: de duinen zijn daar relatief smal ($< 100 \text{ m}$) en kunnen over het algemeen worden beschouwd als één enkele duinenrij. Bovendien zijn de duinen met een hoogte van ongeveer 13 meter + NAP niet bijzonder hoog. In de zuidelijke helft zijn de duinen relatief breed. De eerste duinenrij is grotendeels zeer breed. Aangenomen wordt dat de faalkans van deze duinenrij van de orde 10^{-8} per jaar of lager is.

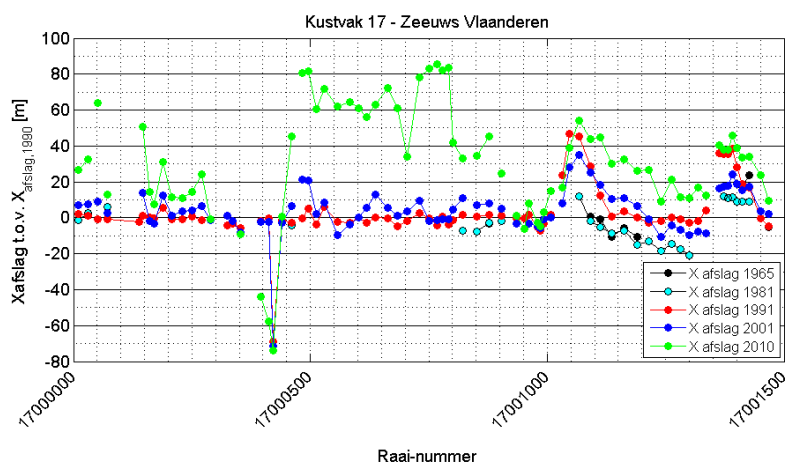


Figuur 3.6. De berekende maximale faalkans van de duinen (op jaarbasis) voor Noord-Holland gedurende de periode 1965-1981, 1990-2000 en 2001-2010, gerelateerd aan een overschrijdingscriterium ('norm') voor de hydraulische belasting van 10^4 . (Van Balen et al, 2011).

3.2.2 Zeeuws-Vlaamse kust

Verschuiving afslagpunt (1965-2010)

De ontwikkelingen in de kustveiligheid van de kust van Zeeuws-Vlaanderen wordt hier geïllustreerd aan de hand van de verschuiving van het *maatgevend afslagpunt* ten opzichte van de situatie in 1990. Figuur 3.7 toont de verschuivingen in de afslaglijn van Zeeuws-Vlaanderen gedurende de afgelopen 40 jaar. Na 1990 is deze kust regelmatig gesuppleerd.



Figuur 3.7. De zeewaartse verschuiving (positief) en landwaartse verschuiving (negatief) van het maatgevend afslagpunt tussen Breskens (link) en het Zwin (rechts) in de jaren 1965, 1981, 1991, 2001 en 2010 ten opzichte van het referentiejaar 1990.

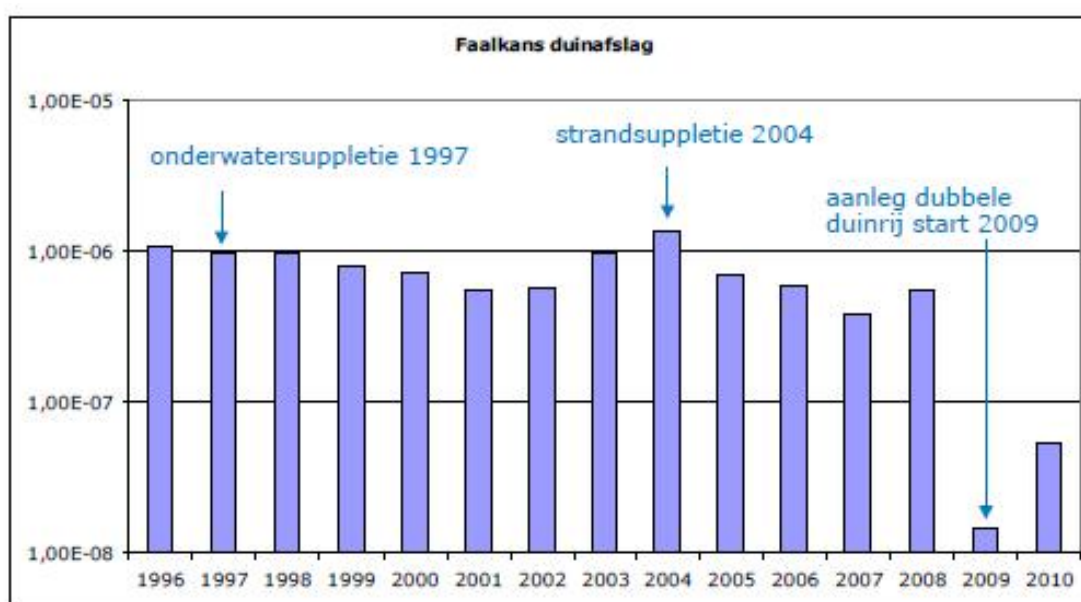
Invloed zandsuppleties

In figuur 3.7 is het effect te zien van zandsuppleties op de ligging van de maatgevende afslaglijn. Het afslagpunt blijft ongeveer op dezelfde hoogte liggen of verplaatst zich enigszins zeewaarts (zie donker blauwe punten in figuur 3.7). Opmerkelijk is de substantiële zeewaartse verschuiving van het afslagpunt met 40 tot 80 meter in 2010. Dit is te danken aan de zandsuppleties in voorgaande jaren en vooral aan de realisatie van het project Zwakke Schakels. Bij Nieuwvliet-Groede (raai 17000500-17000800) is in 2009-2010 een nieuw duin aangelegd met circa 3 miljoen kubieke meter zand. Andere delen van de kust zijn inmiddels versterkt of worden de komende jaren aangepakt (gereed 2015).

3.2.3 Delflandse kust

Faalkansen

Figuur 3.8 toont het verloop van de faalkans van de kust bij Ter Heijde in de periode 1996 tot 2010 voor een representatieve raai. In het begin van deze periode is de faalkans 10^{-6} . In 2009 en 2010 is de faalkans met ruim een factor 10 verkleind. Naast autonome morfologische processen speelt hier de invloed van uitgevoerde suppleties een belangrijke rol; dit wordt in paragraaf 3.5.2. besproken.



Figuur 3.8 De positieve invloed op de faalkans van een drietal zandige maatregelen bij Ter Heijde (Delflandse kust) tussen 1997 en 2009. (Van Vuren et al., 2010).

Invloed zandsuppleties

De serie van zandsuppleties aan de Delflandse kust bij Ter Heijde tussen 1996 en 2010 had verschillende effecten op de faalkans (figuur 3.8). Na een onderwatersuppletie van 1 miljoen kubieke meter zand in de vooroever van de Delflandse kust in 1997 nam de faalkans van de zeewering na ongeveer 2 jaar iets af. Door herverdeling van het zand of autonome morfologische processen steeg de faalkans na ongeveer 6 jaar weer tot het oude niveau. In 2004 vond een strandsuppletie plaats over een lengte van 5270 meter. Mogelijk was dit de reden voor de daling van de faalkans in de daaropvolgende jaren.

In 2009 nam de faalkans fors af; het is evident dat dit direct samenhangt met de aanleg van een dubbele duinenrij als onderdeel van de Zwakke Schakel Kijkduin (Van Vuren et al., 2010).

3.3 Relaties tussen indicatoren voor zandvolume en veiligheid

3.3.1 MKL en MDL versus ligging maatgevend afslagpunt

Relaties

Om een eerste inzicht te krijgen hoe afhankelijkheid het maatgevende afslagpunt is van de ligging van de momentane kustlijn (MKL) en momentane duinlijn (MDL) zijn voor alle Jarkus raaien van de Hollandse kustlijnen afgeleid. De regressievergelijkingen zijn weergegeven in tabel 3.4. Hieruit blijkt dat:

- Een verschuiving van de afslaglijn met bijvoorbeeld 10 meter samengaat met een zeewaartse verplaatsing van de MKL van gemiddeld 18 meter (10/0.57) en variërend tussen 10 meter (10/0.9) bij Hoek van Holland tot 30 meter (10/0.3) bij Den Helder;
- Een verschuiving van de afslaglijn met bijvoorbeeld 10 meter samengaat met een zeewaartse verplaatsing van de MDL van circa 10 meter (10/0.99) met een spreiding van 5 meter (10/2.0) bij Hoek van Holland tot 14 meter (10/0.7) bij Den Helder.

Spreiding

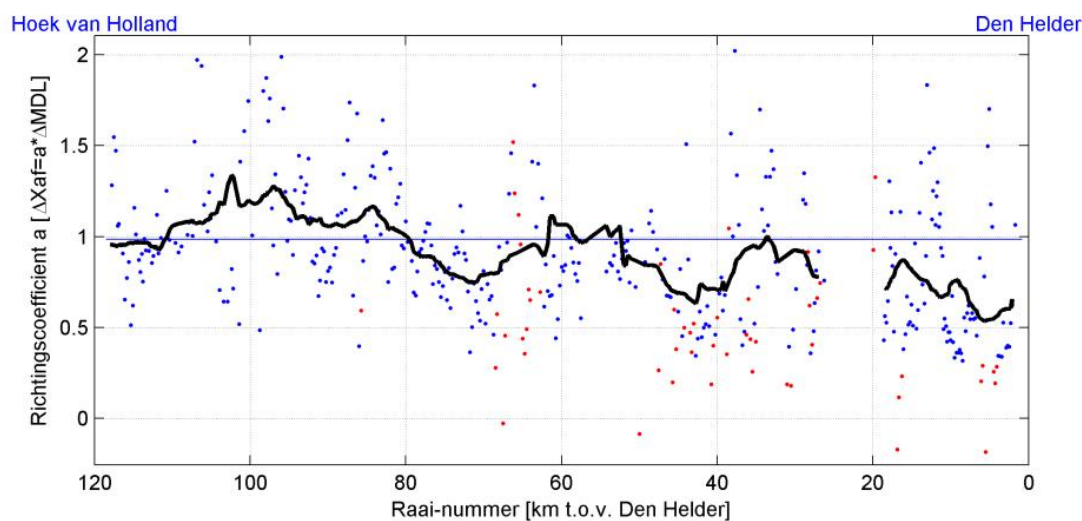
Uit de twee regressievergelijkingen blijkt dat zowel de MKL als de MDL een verband heeft met de ligging in het afslagpunt. De gepresenteerde regressievergelijkingen zijn echter een sterke versimpeling van de werkelijkheid. De ligging van het afslagpunt is ook namelijk ook afhankelijk van andere factoren. Bovendien toont de richtingscoëfficiënt in de regressievergelijkingen een grote spreiding (tabel 3.4).

De ruimtelijke variatie in de richtingscoëfficiënt voor de relatie tussen afslaglijn in duinen X_{afslag} en de duinlijn ligging MDL is weergegeven in figuur 3.9. Hieruit blijkt dat het verband tussen de momentane afslaglijn X_{afslag} en de MDL sterk afhankelijk is van de locatie langs de kust, waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door de helling van de kust.

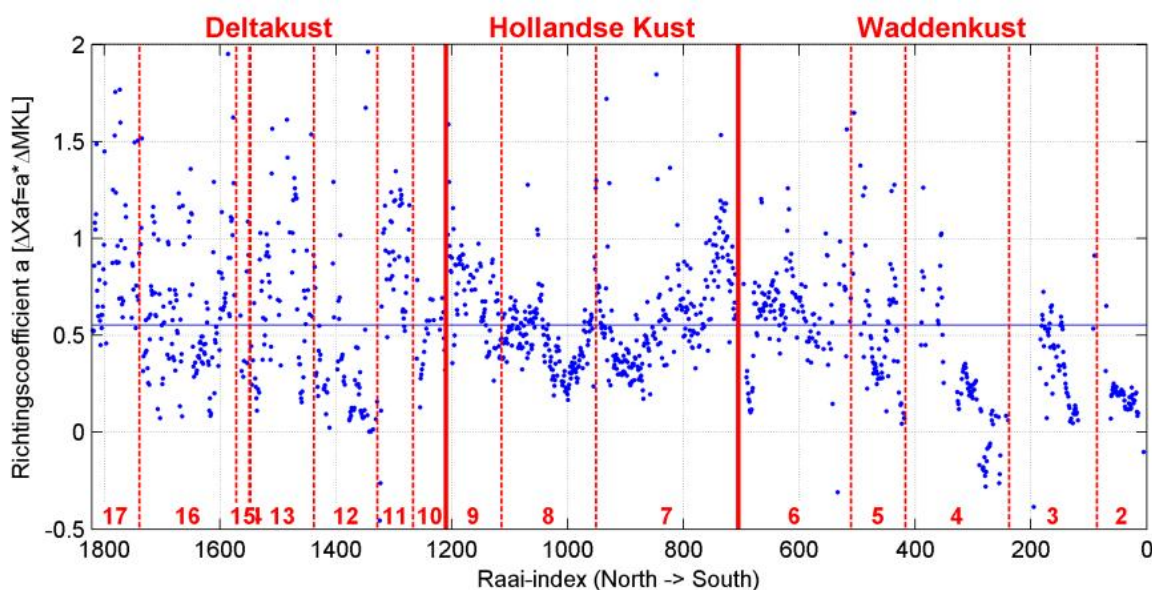
Een vergelijkbare figuur (figuur 3.10) toont de ruimtelijke variatie in de richtingscoëfficiënt voor de relatie tussen de afslaglijn X_{afslag} en MKL. In deze figuur is de variatie in de richtingscoëfficiënt weergegeven voor de Deltakust, Hollandse kust en Waddenkust. De spreiding langs de Deltakust en Waddenkust is zeer groot. Voor de Hollandse kust varieert de richtingscoëfficiënt, uitschieters daar gelaten, ongeveer tussen 0.3 en 0.9 (conform tabel 3.3). De hoge richtingscoëfficiënten komen voor bij ondermeer Hoek van Holland en Den Helder, de lage waarde bij ondermeer Zandvoort en Egmond.

Tabel 3.3. Veranderingen in afslaglijnen X_{afslag} versus veranderingen in de momentane duinlijn MDL en momentane kustlijn MKL voor de Hollandse kust. (Bron: Santen en Steetzel, 2011). Richtingscoëfficiënten zijn gegeven als gemiddelde waarde voor de gehele Hollandse kust en als gemiddelde rondom Hoek van Holland en gemiddelde rondom Den Helder).

Relatie	Regressie	Richtingscoëfficiënt Gemiddelde HK (HvH – DH)
1. Verschuiving van het afslagpunt in duinen (ΔX_{afslag} , meter) als functie van verplaatsing van de momentane kustlijn (ΔMKL , meter)	$\Delta X_{\text{afslag}} = a * \Delta \text{MKL}$	0.57 (0.3 - 0.9)
2. Verschuiving van het afslagpunt in de duinen (ΔX_{afslag} , meter) als functie van verplaatsing van de momentane duinlijn (ΔMDL , meter)	$\Delta X_{\text{afslag}} = a * \Delta \text{MDL}$	0.99 (0.7 - 2.0)



Figuur 3.9 De richtingscoëfficiënt in de regressievergelijking tussen de momentane afslaglijn en de momentane duinlijn (zie vergelijking 1 in tabel 3.3) voor alle onderzochte raaien langs de Hollandse kustlijn. De doorgetrokken lijn is het voortschrijdende gemiddelde. Rode punten zijn niet significant. De kustvak nummering volgens Kustlijn zorg zijn in rode cijfers aangegeven. (bron: van Santen en Steetzel, 2011).



Figuur 3.10 De richtingscoëfficiënt in de regressievergelijking tussen de momentane afslaglijn en de momentane kustlijn (zie vergelijking 2 in tabel 3.3) voor alle onderzochte raaien langs de Nederlandse kustlijn. De rode punten zijn niet significant. De kustvak nummering volgens Kustlijninzorg zijn in rode cijfers aangegeven (bron: van Santen en Steetzel, 2011).

3.3.2 MKL en MDL versus overschrijdingskansen afslagpunt 1990

Relaties

Voor alle Jarkus raaien van de Hollandse kust zijn Relaties afgeleid tussen de overschrijdingskansen van de afslagpunten en de momentane kustlijn (MKL) respectievelijk duinlijn (MDL). De regressievergelijkingen zijn weergegeven in tabel 3.4. Hieruit blijkt dat:

- Een verandering van de overschrijdingskans met bijvoorbeeld een factor 10 samengaat met een verplaatsing van de MKL van gemiddeld 42 meter ($1/0.0237$) en variërend tussen 20 meter en 80 meter;
- Een verandering van de overschrijdingskans met bijvoorbeeld een factor 10 samengaat met een verplaatsing van de MDL van gemiddeld 25 meter ($1/0.0394$) en variërend tussen 20 meter en 40 meter.

Tabel 3.4. Veranderingen in overschrijdingskans P versus veranderingen in de momentane duinlijn MDL en momentane kustlijn MKL voor de Hollandse kust (Bron: Santen en Steetzel, 2011). Richtingscoëfficiënten zijn gegeven als gemiddelde waarde voor de gehele Hollandse kust en als gemiddelde rondom Hoek van Holland en gemiddelde rondom Den Helder).

Relatie	Regressie	Richtingscoëfficiënt Gemiddelde (HvH – DH)
1. Overschrijdingskans P' van afslagpunt 1990 als functie van Kustlijn ligging MKL	$\Delta \log P' = a * \Delta MKL$	-0.0237 (-0.012 tot -0.045)
2. Overschrijdingskans P' van afslagpunt 1990 als functie van Duinlijn ligging MDL	$\Delta \log P' = a * \Delta MDL$	-0.0394 (-0.025 tot -0.052)

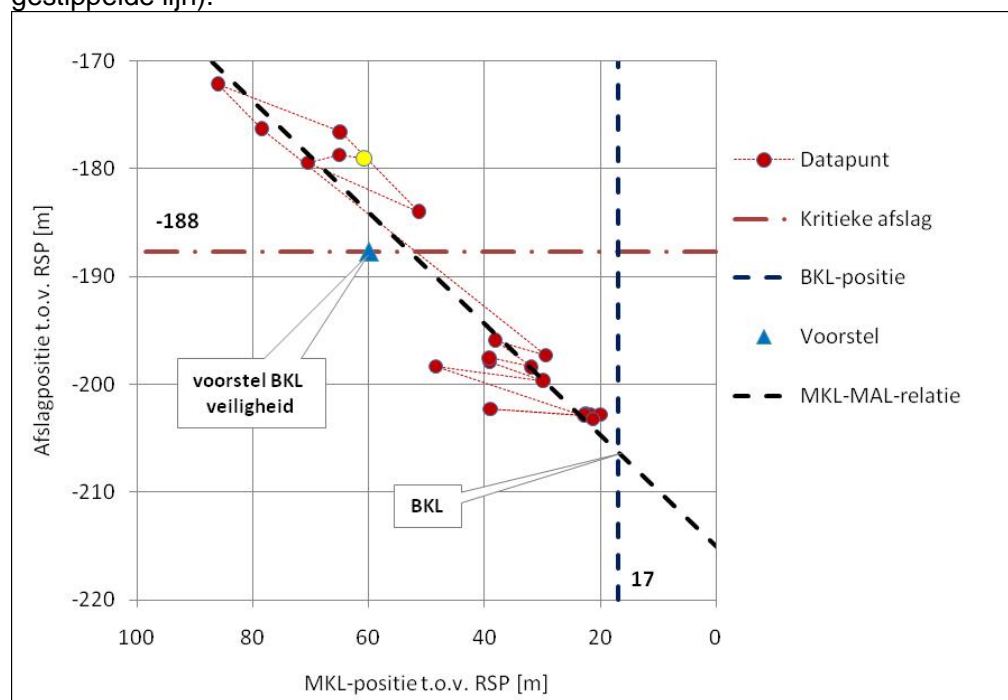
Spreiding

Ook hier geldt dat de gepresenteerde regressievergelijkingen een versimpeling van de werkelijkheid zijn. De richtingscoëfficiënten in de regressievergelijkingen variëren met een factor 3 langs de Hollandse kust (van Santen & Steetzel, 2011).

3.3.3 MKL versus afslagpunten

Figuur 3.11 geeft een voorbeeld van een situatie langs de Noord-Hollandse kust waarin een zeewaartse verschuiving van de kustlijn, mede als gevolg van zandsuppleties in de periode tussen 1996 en 2010, heeft geleid tot een zeewaartse verplaatsing van het afslagpunt. Daardoor is de kustveiligheid toegenomen.

Om te voldoen aan de norm ligt het kritieke afslagpunt op deze voorbeeldlocatie op 188 meter landwaarts van de Rijksstrandpalen. Dit is weergegeven met de horizontale roodgestippelde lijn. Dit afslagpunt zal daar ongeveer blijven liggen wanneer de momentane kustlijn (MKL) op circa 60 meter zeewaarts van de Rijksstrandpalen ligt. De formele basiskustlijn (BKL) ligt momenteel meer landwaarts, op 17 meter zeewaarts van de Rijksstrandpalen (verticaal gestippelde lijn).

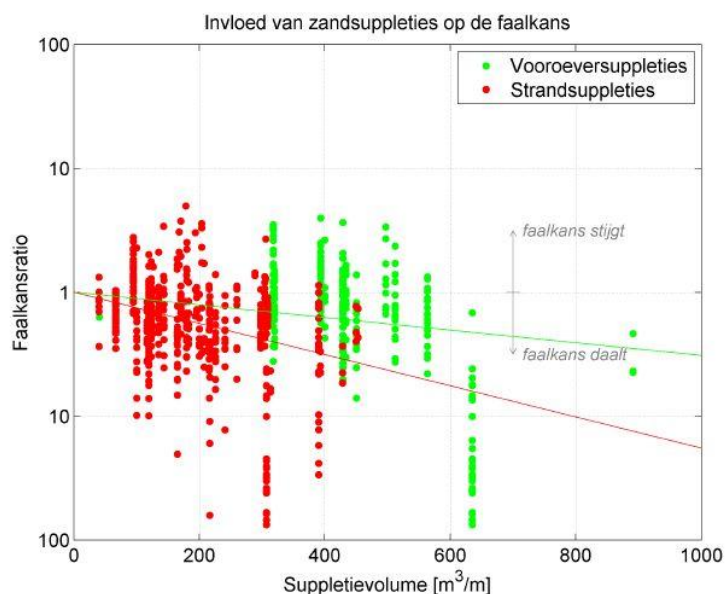


Figuur 3.11. De momentane kustlijn (MKL) versus de positie van het maatgevende afslagpunt op een voorbeeldlocatie aan de Noord-Hollandse kust. De MKL positie is in de loop der jaren in zeewaartse richting verschoven, mede door zandsuppleties ter plaatse. De X-as loopt van land (rechts) naar zee (links), de Y-as loopt van land (onder) naar zee (boven). Gele punt: laatste meetpunt 2010. Blauwe driehoek: gewenste BKL ligging voor handhaven van het kritieke afslagpunt. Bron: H. Steetzel (Arcadis). (Data 1990 tot 2010, weergegeven ten opzichte van een Rijksstrandpaal / RSP).

3.4 Relatie tussen zandsuppleties en indicatoren

3.4.1 Momenteel effect

Onderstaande plot (figuur 3.12) toont de relatie tussen de suppletievolumes langs de Kop van Noord Holland in jaar $j-1$ versus de relatieve, momentane verandering in de faalkans in jaar j voor de periode 1965-2010. Er is een onderscheid gemaakt tussen strand- en vooroeversuppleties. De data vertonen, zoals verwacht, een grote spreiding. Hieruit kan geen significante relatie afgeleid worden.



Figuur 3.12 Relatie tussen de momentane verandering in faalkans (uitgedrukt als ratio tussen de faalkans in jaar j en jaar $j-1$) en het suppletievolumen (data Noord-Holland 1990-2010) waarin een zandsuppletie daadwerkelijk is uitgevoerd (Van Balen et al, 2001).

3.4.2 Lange termijn effect: case Noord Hollandse duinenkust

Trend in MKL, duinvoet, faalkans en suppletievolumen

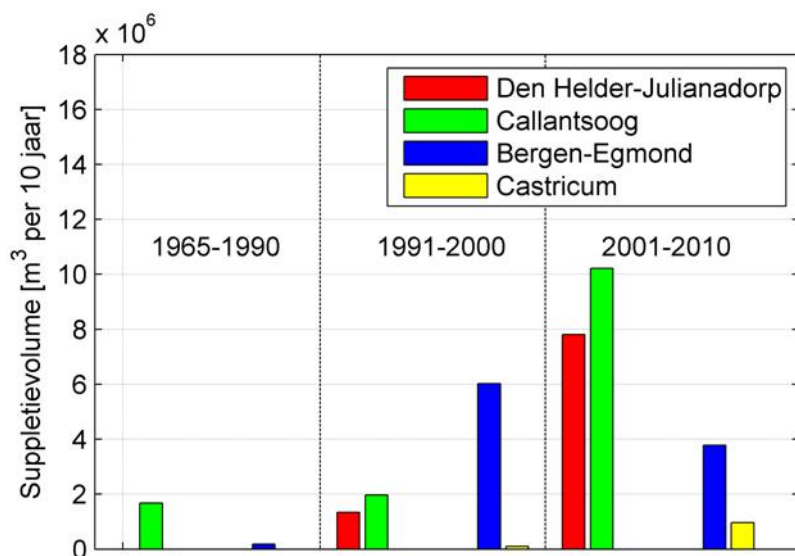
In deze paragraaf worden de data gepresenteerd van de indicatoren MKL, duinvoet en faalkans en van het suppletievolumen dat is aangebracht langs de Kop Noord Holland in de periode 1965-1990.

Het kustdeel rondom Den Helder-Julianadorp, Callantsoog en Bergen-Egmond is van oorsprong erosief van karakter. Figuur 3.13 geeft het totale suppletievolumen weer, ongeacht het type suppletie. Tussen 1990 en 2000 is er veel zand gesuppleerd bij Bergen en Egmond. Tussen 2001 en 2010 vonden er vooral suppleties plaats rondom Callantsoog en bij Den Helder-Julianadorp, in het laatste geval deels grote geulwandsuppleties. Het kustdeel rondom Castricum vertoont van oorsprong een afwisseling tussen geringe kusterosie en geringe kustuitbouw. In dit gebied is daarom weinig gesuppleerd.

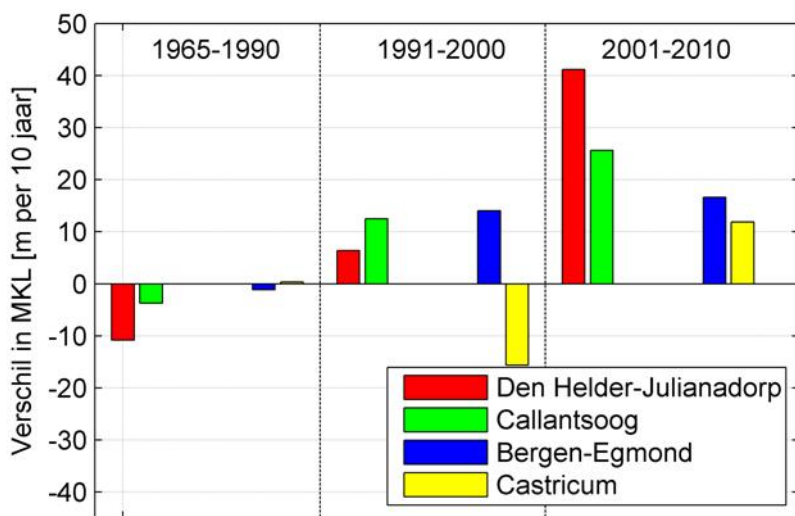
Voor 1990 vertoonde de MKL bij Den Helder-Julianadorp en Callantsoog een landwaartse verplaatsing van 4 tot 10 meter per 10 jaar (Figuur 3.14). In de daarop volgende twee decennia is in de gebieden waar intensief gesuppleerd is een omslag te zien naar een zeewaartse verplaatsing van 5 tot 10 meter in de periode 1991-2000⁷ en van 25 tot 40 meter in de periode 2001-2010.

Voor 1990 erodeerde de duinvoet bij Den Helder-Julianadorp, Callantsoog en Bergen-Egmond elke tien jaar 5 tot 10 meter (Figuur 3.15). In gebieden waar daarna intensief werd gesuppleerd sloeg de landwaartse verplaatsing om naar een zeewaartse verplaatsing van 5 tot 25 meter per 10 jaar.

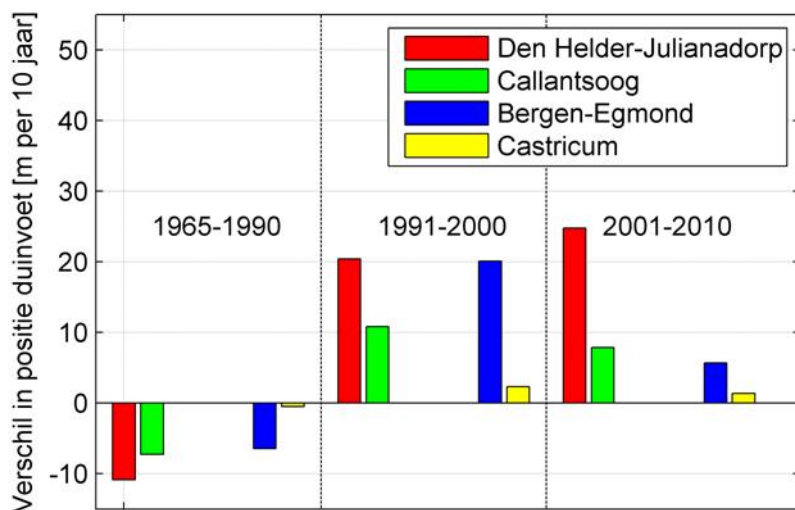
7. Behalve bij Castricum tussen 1991-2000 toen daar nog niet werd gesuppleerd



Figuur 3.13 Totale suppletievolumes voor vier kustdelen in Noord-Holland voor de drie tijdperioden.

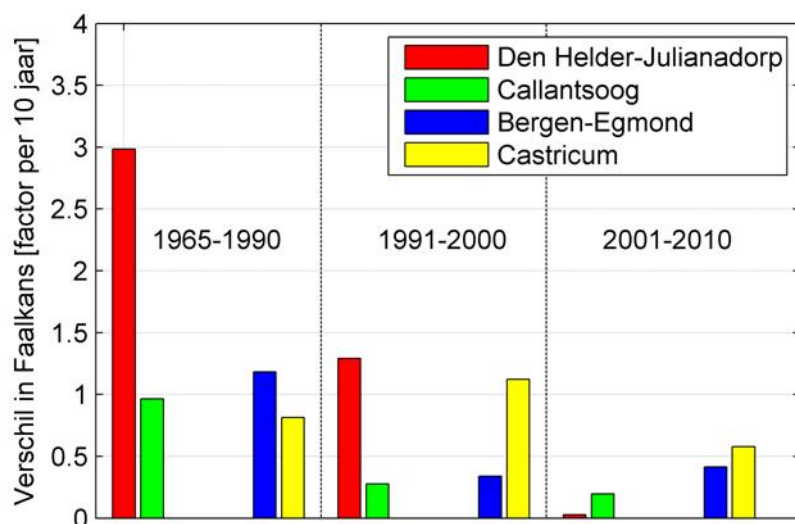


Figuur 3.14. Verplaatsing van de MKL (meters per 10 jaar) voor vier kustdelen in Noord-Holland voor de drie tijdperioden.



Figuur 3.15 Verplaatsing van de duinvoet (meters per 10 jaar) voor de vier kustdelen in drie perioden.

Figuur 3.16 presenteert de ontwikkeling in de faalkans van de duinen langs de kust van Noord-Holland tussen 1965 en 2010⁸ zoals die berekend is met PC-Ring. In het kustdeel Den Helder-Julianadorp nam de faalkans voor 1990 met een factor 3 per 10 jaar toe. In de jaren negentig van de vorige eeuw stabiliseerde de faalkans, om in het decennium daarna met een factor 50 tot 100 af te nemen. Bij Callantsoog en Bergen-Egmond was de faalkans voor 1990 min of meer stabiel; in de jaren daarna nam ook hier de faalkans sterk af.



Figuur 3.16 De factor waarmee de faalkans is toegenomen (>1) dan wel is afgenomen (<1, dat wil zeggen een verbetering) voor de vier kustdelen voor de drie tijdsperioden.

8. De zeedijk bij Den Helder en de Hondsbossche- en Pettemerzeewering zijn buiten beschouwing gelaten

Relaties tussen zandvolume en veiligheid

MKL versus faalkans

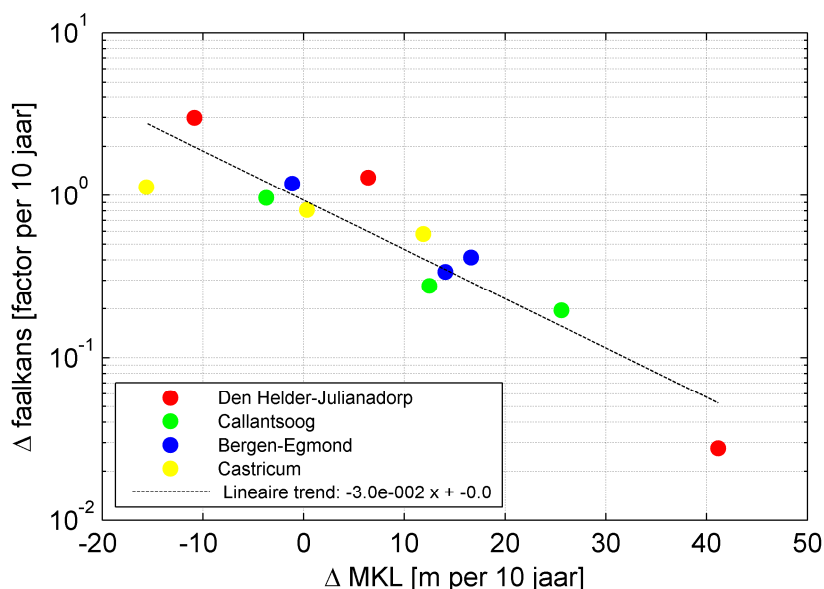
In figuur 3.17 is de verandering van de faalkans, uitgedrukt als factor tussen de faalkans aan het begin en eind van een decennium, uitgezet tegen de verplaatsing van de Momentane Kustlijn (MKL). Daarbij zijn de faalkansberekeningen uitgevoerd voor het mechanisme duinafslag voor de eerste duinenrij met behulp van PC-Ring (van Balen et al, 2011). De correlatie tussen de verandering in de logaritme van de faalkans en verplaatsing van de MKL is significant ($R^2=0.84$); zie tabel 3.5.

De richtingscoëfficiënt uit de regressievergelijking geeft aan dat een afname in de faalkans met een factor 10 samengaat met een zeewaartse verplaatsing van de Momentane Kustlijn van circa 30 meter ($(\log 10)/0.03$).

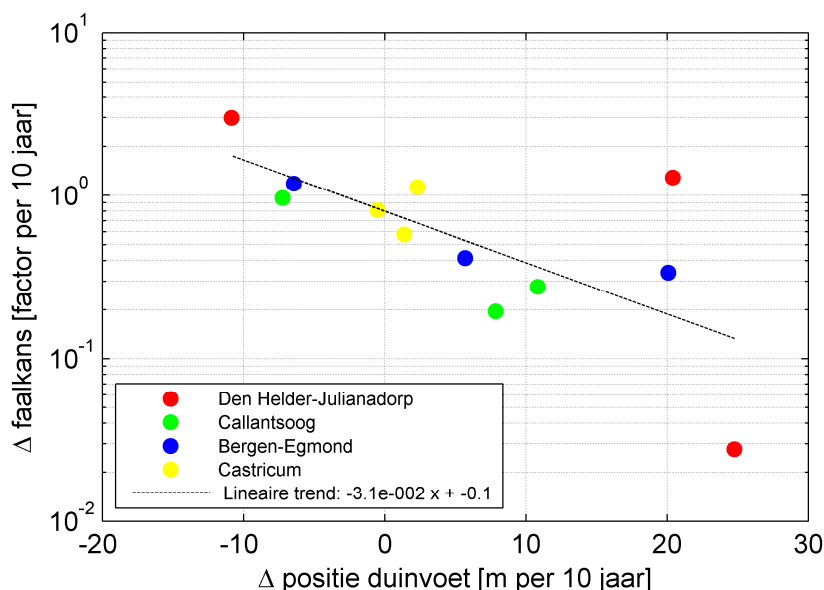
Duinvoetpositie versus faalkans

In figuur 3.18 is de verandering van de faalkans, uitgedrukt als factor tussen de faalkans aan het begin en eind van een periode van 10 jaar, uitgezet tegen de verplaatsing van de duinvoet per 10 jaar. De correlatie ($R^2=0.49$) lijkt minder significant dan tussen MKL en faalkans, dit kan veroorzaakt worden door de aanwezigheid van twee uitschieters op een beperkt aantal punten.

De richtingscoëfficiënt uit de regressievergelijking (tabel 3.3) geeft aan dat een afname in de faalkans met een factor 10 samengaat met een zeewaartse verplaatsing van de duinvoet van eveneens circa 30 meter ($(\log 10)/0.031$).



Figuur 3.17 Verschil in faalkans (factor per 10 jaar) versus het verschil in MKL (meters per 10 jaar).



Figuur 3.18 Verskil in faalkans (factor per 10 jaar) versus verplaatsing van de duinvoet (meters per 10 jaar).

Tabel 3.5 Veranderingen in de faalkans als functie van verschuivingen in de MKL en duinvoetpositie

Relatie	Regressie	R ²
1. Verandering in faalkans ($\Delta \log P$, 1/10 jaar) als functie van verschuiving in de momentane kustlijn (ΔMKL , meter/10 jaar)	$\Delta \log P = -0.030 * \Delta \text{MKL}$	0.84
2. Verandering in faalkans ($\Delta \log P$, 1/10 jaar) als functie van verschuiving in duinvoet (ΔDV , meter/10 jaar)	$\Delta \log P = -0.031 * \Delta \text{DV}$	0.49

Relaties tussen zandsuppletie en zandvolume

MKL versus suppletievolumen

In figuur 3.19 is de verplaatsing van de momentane kustlijn van de Noord-Hollandse duinenkust per 10 jaar uitgezet tegen het suppletievolumen per 10 jaar. Er is een goede correlatie ($R^2=0.78$); zie tabel 3.6. Volgens de regressievergelijking geldt dat:

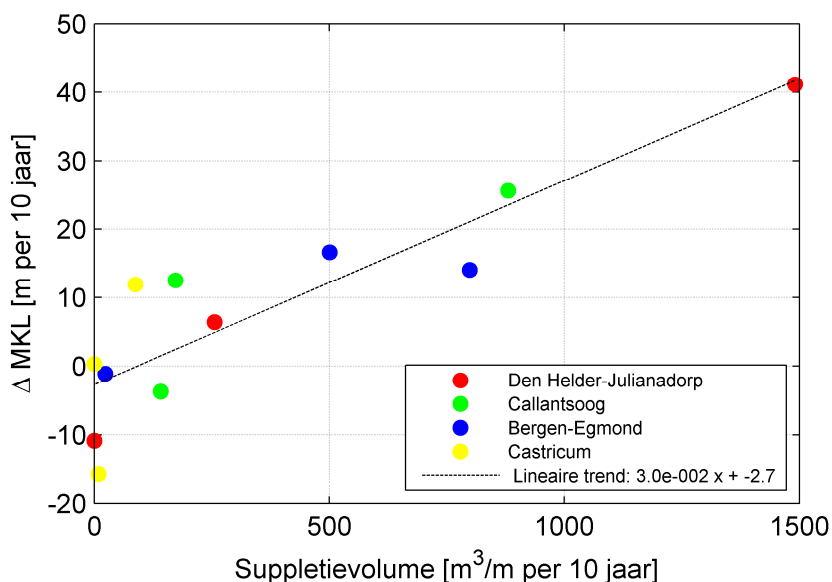
- Een zeewaartse verplaatsing van de MKL van bijvoorbeeld 1 meter langs deze erosieve kust een suppletievolumen van $30 \text{ m}^3/\text{m}$ vergt.

Duinvoetpositie versus suppletievolumen

In figuur 3.20 is de verplaatsing van de duinvoet per 10 jaar uitgezet tegen het suppletievolumen per 10 jaar. De correlatie ($R^2=0.54$) is minder sterk als tussen MKL en suppletievolumen.

Spreiding

De afwijking van de waarnemingen ten opzichte van de regressielijn zijn waarschijnlijk het gevolg van het feit dat er geen onderscheid gemaakt is in het type suppletie (strand, vooroever, duin) en er soms sprake is van onevenredige middeling per decennia⁹.

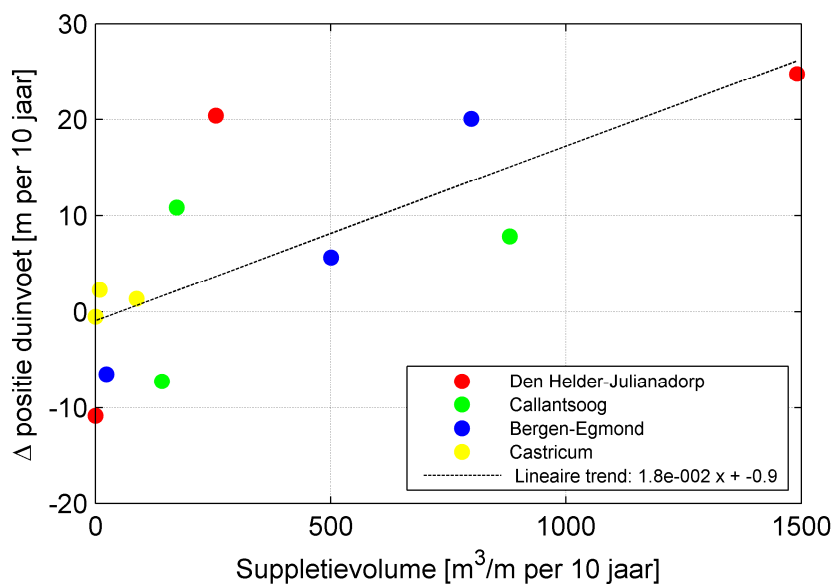


Figuur 3.19 Verplaatsing van de MKL (m) als functie van het suppletievolume (m³ per strekkende meter kustlijn, uitgedrukt als decenniumgemiddelden in de periode 1965-2010 langs de Noord Hollandse kust.

Tabel 3.6. Veranderingen in de MKL, duinvoetpositie en faalkans als functie van het suppletievolume.

Relatie	Regressie	R ²
1. Verandering in MKL (m) als functie van het suppletievolume S (Mm ³ /m'/10 jaar)	$\Delta \text{MKL} = 0.030 * S$	0.78
2. Verandering in de duinvoetpositie DV (m) als functie van het suppletievolume S (Mm ³ /m'/10 jaar)	$\Delta \text{DV} = 0.018 * S$	0.54
3. Verandering in de faalkans $\Delta \log P$ (1/10 jaar) als functie van het suppletievolume S (Mm ³ /m'/10 jaar)	$\Delta \log P = -0.001 * S$	0.79

9. een uitschieter in de data is bijvoorbeeld de grote zandsuppletie van ca. 10 miljoen kubieke meter zand bij Callantsoog die tot een beperkte daling in faalkans heeft geleid. Dit komt omdat de suppletie is uitgevoerd aan het eind van het decennium

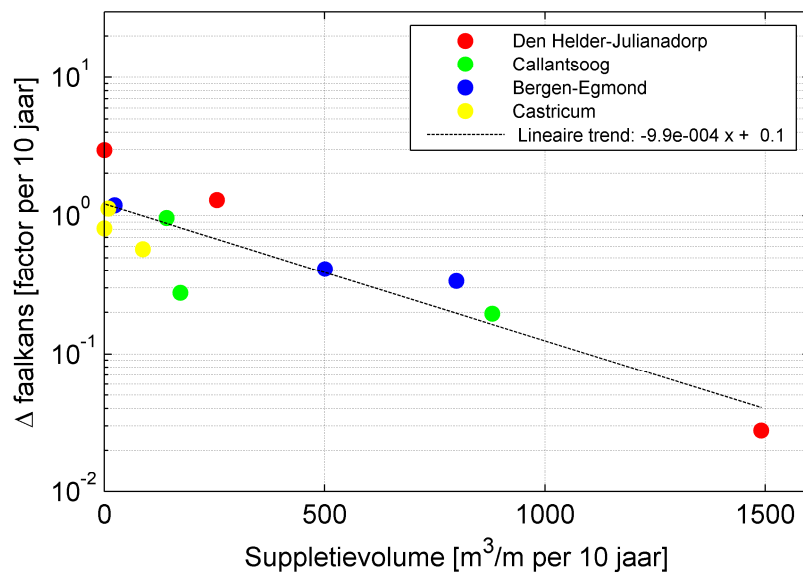


Figuur 3.20 Verplaatsing van de duinvoet (m) als functie van het suppletievolume (m^3 per strekkende meter kustlijn, uitgedrukt als decenniumgemiddelden in de periode 1965-2010 langs de Noord Hollandse kust.

Relaties tussen zandsuppleties en veiligheid

In figuur 3.21 is het verschil in faalkans voor de Noord-Hollandse duinenkust uitgezet tegen het suppletievolume die daar is aangebracht (gemiddeld per 10 jaar). De lineaire regressie (tabel 3.6) toont een significant negatief verband ($R^2=0.79$): door het uitvoeren van suppleties neemt de faalkans af.

Deze resultaten geven een indicatie van de bijdrage van reguliere zandsuppleties aan de sterkte van een erosieve duinwaterkering en de inspanning die nodig is om een erosieve trend om te buigen in een toename in kustveiligheid. Door strand- en vooroeversuppleties langs deze kust van circa 1000 m^3 per strekkende meter kustlijn kan in de loop van een decennium een afname in de faalkans bereikt worden van orde grootte factor 10.



Figuur 3.21 Het verschil in faalkans (factor) als functie van het suppletievolume (m³ per strekkende meter kustlijn, uitgedrukt als decenniumgemiddelden in de periode 1965-2010 langs de Noord Hollandse kust. Een factor > 1 betekent een toename in faalkans (=afname veiligheid), een factor < 1 betekent een afname in faalkans (=toename veiligheid).

4 Discussie

4.1 Kwetsbare zeeweringen

De overstromingskans van de duinen en zeedijken is klein en voldoen aan de wettelijke normen (overschrijdingskans van 1/2000 tot 1/10.000 per jaar), mede door aanleg van versterkingen en intensief beheer en onderhoud. Delen van de duinenkust hebben zelfs een verwaarloosbare kleine kans op overstroming. (Kind, 2010; Jongejan et al., 2011). De zeeweringen langs onze kust behoren dan ook tot de veiligste ter wereld. In relatief opzicht zijn er echter wel kwetsbare delen.

Uit analyse blijkt dat circa 64 kilometer van de Nederlandse kust kwetsbaar¹⁰ is en direct gebaat is bij zandsuppleties (tabel 3.1, figuur 3.1). Deze locaties zijn te beschouwen als toekomstige zwakke schakels wanneer er geen beheer en onderhoud zou plaats vinden. Meer dan de helft van de kwetsbare kustdelen ligt langs de Deltakust, gevolgd door de Hollandse kust en Waddenkust.

De hoeveelheid suppletiezand die nodig is om de sterkte van de waterkering te handhaven verschilt per locatie. Voor de hele kust wordt de hoeveelheid geschat op 4 miljoen kubieke meter zand per jaar, uitgaande van de huidige zeespiegelstijging van 2 mm per jaar en een gemiddeld onderhoud van 300 m³/m om de 5 jaar. Dit valt binnen de hoeveelheid van 8 miljoen kubieke meter zand die momenteel jaarlijks gesuppleerd wordt om de basiskustlijn te handhaven¹¹. Deze suppleties vinden ondermeer plaats voor de meeste kwetsbare locaties, maar tot op heden niet voor de harde zeeweringen.

Samenvattend blijkt dat eventuele bresvorming en falen van de zeewering bij Katwijk, Scheveningen en Ter Heijde de grootste gevolgen voor het achterland heeft, gevolgd door de Kop van Voorne en Zuidwest Walcheren (tabel 3.2). Als zandsuppleties bijdragen aan het verkleinen van de kans op overstromingen, dan is hier het meeste effect op risicoreductie te verwachten. De minste risicoreductie is te verwachten voor de Waddeneilanden, omdat daar de gevolgen van een eventuele overstroming het kleinst zijn.

De analyse van de kwetsbare delen van de kust kan verdiept worden met de ontwikkelde database met indicatoren. Uit de volume-indicatoren kan afgeleid worden welke delen van de kust erosief zijn, terwijl de veiligheidsindicatoren een nadere onderbouwing kunnen geven van kans op bresvorming en overstromingen.

4.2 Relatie tussen zandvolume en kustveiligheid

Er zijn correlaties vastgesteld tussen de indicatoren voor zandvolume (momentane duinlijn, momentane kustlijn, duinvoetpositie) en de indicatoren voor veiligheid (ligging afslaglijn, overschrijdingskans afslagpunt₁₉₉₀ en faalkans eerste duinenrij).

Een verschuiving van de afslaglijn langs de Hollandse kust met bijvoorbeeld 10 meter gaat samen met een zeewaartse verplaatsing van de MKL van gemiddeld 10 tot 30 meter en van de MDL van 5 tot 14 meter (par. 3.3.3).

10. Kwetsbaar in de zin dat het gaat om erosiegevoelige locaties met relatief smalle, lage zeeweringen die achterliggende polders beschermen. Dit is dus een andere betekenis dan kwetsbaarheid voor overstroming van binnendijks gebied zoals gehanteerd wordt in ondermeer het onderzoeksproject Floodsite (www.Floodsite.org) of door van der Pas et al, 2011

11. Dit staat los van de suppleties op de diepere delen van het kustfundament, die nodig zijn voor stabiliteit van de BKL-zone op langere termijn.

Een verandering van overschrijdingskans van een maatgevend afslagpunt met een factor 10 gaat samen met een verplaatsing van de MKL van gemiddeld 20 tot 80 meter en een verplaatsing van de MDL van 20 tot 40 meter.

Een afname met een factor 10 van de faalkans van de eerste duinenrij langs de kust van de kop van Noord-Holland gaat samen met een zeewaartse verplaatsing van de MKL of duinvoet van circa 30 meter (par. 3.3.2). Deze bevindingen zijn in lijn met die van Van Dongeren (2008).

De relaties variëren sterk en vertonen bepaalde patronen langs de kust. Om bijvoorbeeld een zekere zeewaartse verschuiving van de afslaglijn te realiseren zal de MKL over een grotere afstand verschoven moeten worden in het geval van een vlakke vooroever ten opzichte van een steile vooroever. Doorvertaling naar het benodigde (onderhouds-) suppletievolumes vergt nadere studie.

4.3 Effect van zandsuppleties

4.3.1 Toename van het zandvolume en kustveiligheid

In de afgelopen decennia is de inspanning in zandsuppleties langs de Nederlandse kust geleidelijk aan toegenomen, met name langs de Hollandse- en Deltakust. Voor 1990 werd slechts incidenteel gesuppleerd. Tussen 1990 en 2000 brachten sleepopperzuigers jaarlijks 6 miljoen kubieke meter naar de kust. Deze hoeveelheid nam tussen 2000 en 2010 toe tot 12 miljoen kubieke meter zand per jaar. Hierdoor is de buffercapaciteit van de kust, zoals uitgedrukt in de indicatoren voor zandvolume (momentane duinlijn, momentane kustlijn, duinvoetpositie) vergroot: de kuststrook is op veel plekken zeewaarts verbreed. Uit berekeningen van de indicatoren voor veiligheid blijkt dat de kustveiligheid langs de erosieve kust daardoor gehandhaafd dan wel toegenomen is:

- Over de gehele linie genomen is de overschrijdingskans van de maatgevende afslagpunten langs de Hollandse kust sterk afgenomen (figuur 3.5).
- Uit de meetreeks voor de Noord-Hollandse duinenkust blijkt dat er een statistische relatie is tussen de gemiddelde omvang van de zandsuppleties en de veranderingen in de faalkans (figuur 3.21). Om de faalkans hier met een factor 10 te verlagen is gemiddeld genomen circa 1000 m³ zand per strekkende meter kust nodig.
- In het erosieve kustvak Zeeuws-Vlaanderen hebben zandsuppleties geresulteerd in een stabilisatie van de afslaglijn. De aanleg van extra duin in 2010 in het kader van het Zwakke Schakel project heeft voor een momentane en sterke toename in kustveiligheid gezorgd (figuur 3.7).
- Langs de erosieve kust van Delfland (figuur 3.8) hebben reguliere zandsuppleties de faalkans eveneens gestabiliseerd. De aanleg van extra duin in 2009 leverde ook hier een momentane en sterke toename in kustveiligheid.

Zandsuppleties vergroten dus de sterkte van de duinwaterkering en verkleinen zodoende de kans op overstroming. Uit de meetreeksen blijkt dus dat er significante statistische relaties zijn tussen de omvang van zandsuppleties en de indicatoren voor veranderingen in zandvolume en veiligheid.

4.3.2 Verschillende tijdschalen en typen suppleties

Tijdschalen

Het effect van zandsuppleties op kustveiligheid is hier onderzocht op de middellange (1 tot 5 jaar) en lange (5 tot 25 jaar) termijn. De gehanteerde afbakening in tijd is arbitrair. Bij het onderzoek naar de bijdrage van zandsuppleties op de kustveiligheid spelen feitelijk verschillende tijdschalen door elkaar heen:

- Bij de planning van Kustlijn zorg wordt uitgegaan van een levensduur van een zandsuppletie van ca. 5 jaar. Ook bij economische beschouwingen wordt doorgaans uitgegaan van een middellange termijnen (1 tot 5 jaar dan wel 5 tot 10 jaar);
- De morfologische tijdschaal is langer, van decennia voor de BKL-zone tot eeuwen voor het kustfundament. In het kustbeleid staat het kustfundament centraal en daarbij geldt een tijdschaal van 50 tot 200 jaar. Dit sluit aan bij het Deltaprogramma, waar het gaat om strategieontwikkeling voor de Nederlandse delta, wordt onder lange termijn een periode verstaan van 100 tot 200 jaar.

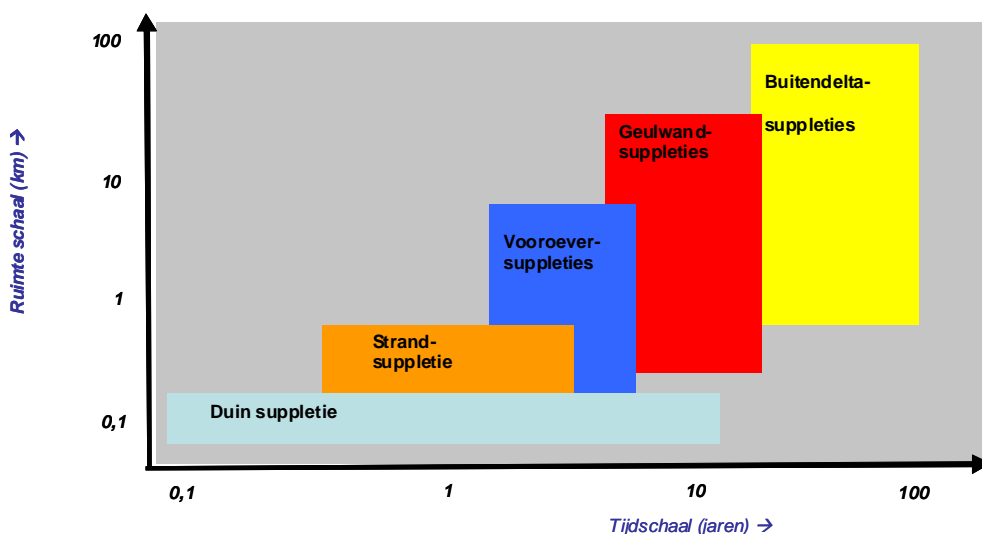
Veranderingen van het kustfundament op een tijdschaal van ongeveer 50 tot 200 jaar zijn vooralsnog niet te kwantificeren met veldmetingen.

Effecten van typen suppleties

Dankzij de Jarkus metingen van kustprofielen beschikken we over een lange reeks van veldwaarnemingen. Ook zijn de effecten van duin- en strandsuppleties goed bekend, na 20 jaar praktijkervaring (Roelse, 2003). Vooroever suppleties kunnen goed worden geëvalueerd met de ervaringen uit de afgelopen 10 jaar. Hieruit volgen de volgende bevindingen:

- Duinsuppleties zorgen voor een directe toename in de sterkte van de duinwaterkering. Dit blijkt ondermeer uit de voorbeelden in Zeeuws-Vlaanderen en Delfland.
- Zoals verwacht hebben strandsuppleties een minder direct effect op de sterkte van de duinwaterkering. Bovendien is het effect na suppletie minder lang merkbaar.
- De bijdrage van vooroever suppleties is nog niet expliciet gemaakt. Bij de regressieanalyse van de data van Noord-Holland is namelijk geen onderscheid gemaakt in suppletietypen. Het momentane effect op de faalkans is, zoals verwacht, beperkt (Figuur 3.8). Dat wordt bevestigd door een modelmatige vergelijking door Giardino (2010) tussen strandsuppleties en vooroever suppleties; duinerosie nam minder sterker af na vooroever suppletie (2-5%) dan bij strandsuppletie (35-47%). Het is de verwachting dat vooroever suppleties vooral indirect een rol spelen bij de sterkte van de waterkering, namelijk via het dempen van de (golf-)belasting van de zeewering; dit aspect is in deze studie niet in beschouwing genomen.
- Het werken met grotere systeem suppleties staat nog in de kinderschoenen. Voorbeelden zijn de geulwandsuppleties langs de kust van Zuidwest Walcheren en de Kop van Noord-Holland die bedoeld zijn om de stabiliteit van stranden en duinen op langere termijn te waarborgen.
- Buitendelta-suppleties zijn een mogelijke nieuwe vorm, waar nog geen ervaring mee opgebouwd is. Buitendelta's spelen een belangrijke rol in de afscherming van de kust tegen golven en in de sedimentuitwisseling met de Waddenzee. De laatste 80 jaar verdwijnt hier jaarlijks circa 7 miljoen kubieke meter zand richting de Waddenzee (Mulder, 2011). De buitenranden van alle buitendelta's schuiven landwaarts. De Marsdiep buitendelta zou binnen 75 tot 150 jaar kunnen verdwijnen bij voortzetting van de huidige erosiesnelheid van 3 tot 6 miljoen kubieke meter zand per jaar. Als gevolg daarvan zullen de golfwerking en kusterosie langs de aanliggende kusten toenemen.

De tijdschaal en daarmee ook de ruimteschaal waarop suppleties doorwerken op de veiligheid, hangt dus af van de suppletievorm. Dit is samengevat in figuur 4.1. De tijd- en ruimteschaal van de verschillende suppletievormen is van belang om te bepalen hoe lang zandsuppleties een bijdrage aan kustveiligheid kunnen leveren.



Figuur 4.1. Tijd- en ruimteschaal waarop verschillende type zandsuppleties bijdragen aan de sterkte van de duinwaterkering. Buitendelta-suppleties zijn tot op heden nog niet toegepast.

4.3.3 Voorkomen van versterkingen

Dat zandsuppleties bijdragen aan de veiligheid, blijkt onder meer uit de duinenrij bij Callantssoog, onderdeel van de Zwakke Schakel van de Kop van Noord Holland. Door de uitvoering van het programma Kustlijnzorg in de afgelopen jaren is deze zwakke schakel nu voldoende sterk en is daarom niet meer afgekeurd in de derde toetsronde (Inspectie Verkeer en Waterstaat, 2011).

Ook de andere aanlegprojecten van de Zwakke Schakels maken maximaal gebruik van zandige oplossingen, waaronder de Hondsbossche Zeewering, Zeeuws-Vlaanderen, Noordwijk, Scheveningen, Kijkduin, Westkapelle en Flauwe werk. Het gaat hierbij grotendeels om verharde zeeweringen. Het is daarom zeker opportuun om ook voor verharde zeeweringen een toetscriterium zoals de basiskustlijn te ontwikkelen.

Voor de toekomst wordt verwacht dat de trend, waarin wordt gekozen voor zandige oplossingen, zich voortzet. De studie 'Toekomstbestendige Verharde Zeeweringen (Deltares, 2001, Arcadis, 2011) laat zien dat 16 van de 42 verharde zeeweringen langs de Nederlandse kust een veiligheidsopgave hebben rond het midden van de 21^e eeuw; de andere locaties hebben een langer veiligheidshorizon. In sommige gevallen zijn constructieve maatregelen nodig, maar in 20 gevallen bieden zandsuppleties geheel of gedeeltelijk de oplossing.

Het is de vraag of reguliere zandsuppleties een economisch gunstiger aanpak is boven de aanleg van kustversterkingen. Deze vraag speelt vanaf de start van Kustlijnzorg in 1990. In de Eerste Kustnota (Ministerie voor Verkeer en Waterstaat, 1990) zijn vier alternatieven vergeleken: 'Terugtrekken van de kustlijn (geen kustlijnzorg, alleen aanleg kustversterking)', 'Handhaven Kustlijn', 'Selectief handhaven kustlijn' of 'Zeewaarts'. Gekozen werd voor 'Handhaven Kustlijn'.

In een *ex post* economische analyse in 2007 van het kustbeleid zijn de beleidsalternatieven uit de Eerste Kustnota opnieuw geanalyseerd met gegevens over de periode 1990-2007 (Rebelgroep & Wittenveen+Bos, 2007). Voor het behouden van het kustareaal is het alternatief 'Handhaven Kustlijn' het meest kosteneffectief van alle beleidsalternatieven. De uitgaven aan zandsuppleties in het alternatief 'Handhaven Kustlijn' worden deels, maar niet geheel, gecompenseerd door een besparing op het beheer en onderhoud van de waterkering bij het alternatief 'Terugtrekken kustlijn'.

De analyse houdt vooralsnog geen rekening met de manier waarop alternatieven omgaan met onzekerheden, zoals bijvoorbeeld de onzekerheid in zeespiegelstijging.

Morselt en Gersonius (2010) hebben de zogenaamde optiewaardemethode gebruikt om onzekerheden in zeespiegelstijging te verdisconteren in economische afwegingen bij het versterken van een zeedijk. De optiewaardemethode biedt de mogelijkheid om te investeren in kustverdediging maar niet de verplichting daartoe, bijvoorbeeld als de zeespiegelstijging minder snel gaat dan verwacht. Er is een vergelijking gemaakt tussen een dijkversterking waarbij nu al een keuze in zeespiegelstijging voor over 50 jaar wordt gemaakt versus een stapsgewijze aanpak met zandsuppleties die in de loop der tijd inspelen op zeespiegelstijging binnen een bepaalde range aan mogelijke scenario's. Het blijkt dat investeringsbesluiten voor kustveiligheid afhangen van de manier waarop met onzekerheid wordt omgegaan. De netto contante waarde van een versterking van de zeedijk kan hoger maar ook lager zijn dan de netto contante waarde van zandsuppleties, afhankelijk van ondermeer de gekozen discontovoet (Morselt en Gersonius, 2010).

4.3.4 Prioritering van reguliere suppleties

De database met indicatoren voor zandvolume en waterveiligheid vormt een belangrijke basis voor het produceren van kustkaarten zoals toegelicht door Broers (2011). Dergelijke kustkaarten kunnen de planning en prioritering van reguliere suppleties binnen het programma Kustlijnzorg ondersteunen en handvaten bieden om Kustlijnzorg en handhaving van de waterkering verder te integreren.

4.3.5 Verminderen van het overstromingsrisico

Deze studie zet de eerste stappen in het verbinden van kustmorfologie met overstromingsrisico. Binnen de wereld van waterveiligheid is overstromingsrisico een actueel thema, zowel bij onderzoek (VNK2, WV21) als bij beleidsontwikkeling (Ministerie Infrastructuur & Milieu, 2011a). Overstromingsrisico is gedefinieerd als het product van de kans dat een waterkering bezwijkt en de gevolgen van de overstroming voor het achterliggende gebied. Het risico wordt uitgedrukt in schade per jaar of slachtoffers per jaar.

Bezwijkkans

Zandsuppleties verkleinen de kans op overstroming (veiligheidslaag 1-preventie). De hier gepresenteerde overschrijdingskansen en faalkansen van duinwaterkeringen zijn berekend met de formele methoden voor het faalmechanisme duinafslag. Aan de hand van verschillende voorbeelden is aangetoond dat twee decennia Kustlijnzorg de kans op overstromingen bij de kwetsbare plekken aan de kust heeft verkleind.

Daarbij speelt wel de vraag of de overschrijdingskans voor de duinenkust de juiste indicator is. Een bres in de eerste duinenrij hoeft immers niet direct een overstroming van de achterliggende dijkkring te betekenen. Zeker in brede duinen kan daardoor het overstromingsrisico worden overschat. Een alternatieve indicator die van toepassing lijkt is de bezwikkans¹². Dat is de kans dat een (onbeheersbare) bres ontstaat in de waterkering waardoor water in het gebied stroomt. In een vervolgstudie kan dit verder worden uitgewerkt.

Gevolgen van eventuele overstroming

In voorliggend rapport zijn de gevolgen niet gekwantificeerd, maar in een aantal andere studies wel. Hier volgt een kort overzicht.

De omvang van gevolgen blijkt onder andere uit de kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21e eeuw (Kind, 2011). Hiervoor zijn computersimulaties uitgevoerd van doorbraken bij de harde zeekeringen

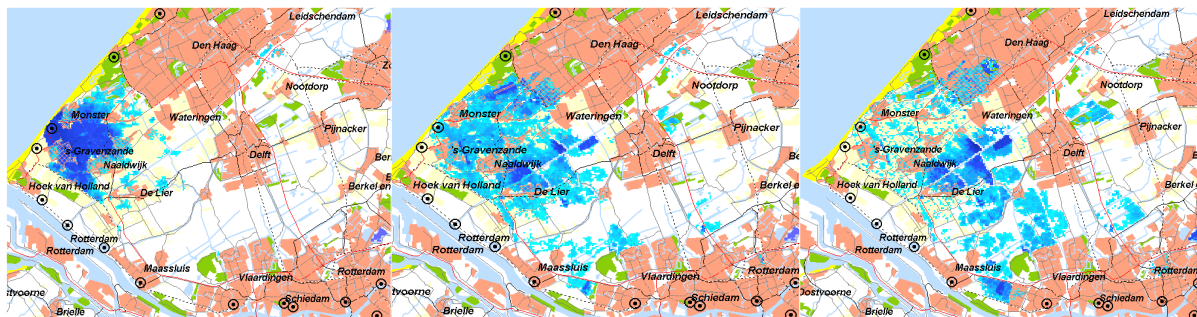
12. Pers.med. dr Frans Klijn, Deltares

langs dijkkringdeel 13-1 in Noord-Holland (Balgzanddijk, Helderse zeewering, Hondsbossche -en Pettemer zeewering) en dijkkringdeel 14-1 in Zuid-Holland (Katwijk, Noordwijk, Scheveningen (boulevard, uitwateringssluis). Om in te schatten hoe groot de bijdrage van duindoorbraken hierbij is, zijn simulaties uitgevoerd met bressen bij de voorgenoemde harde zeeweringen én de smalle duinen bij Callantsoog in dijkkringdeel 13-1 en bij Kijkduin, Ter Heijde en 's-Gravenzande in dijkkringdeel 14-1 (Stronkhorst et al., 2010). Hieruit blijkt dat voor dijkkringdeel 13-1 het berekende aantal slachtoffers en de schade nauwelijks toenemen bij een bres bij Callantsoog. Voor dijkkringdeel 14-1 leidt een bres in de smalle duinen bij Kijkduin, Ter Heijde of 's Gravenzande wel tot hogere schattingen van het aantal slachtoffers en de schade: de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers neemt met 10% toe (van 820 naar 900) en de verwachtingswaarde van de schade neemt met 20% toe (van M€9800 naar M€11900).

De conclusie is dat de duindoorbraken t.o.v. dijkdoorbraken niet veel bijdragen aan de verwachtingswaarden voor schade en slachtoffers in dijkkringdeel 13-1 en 14-1.

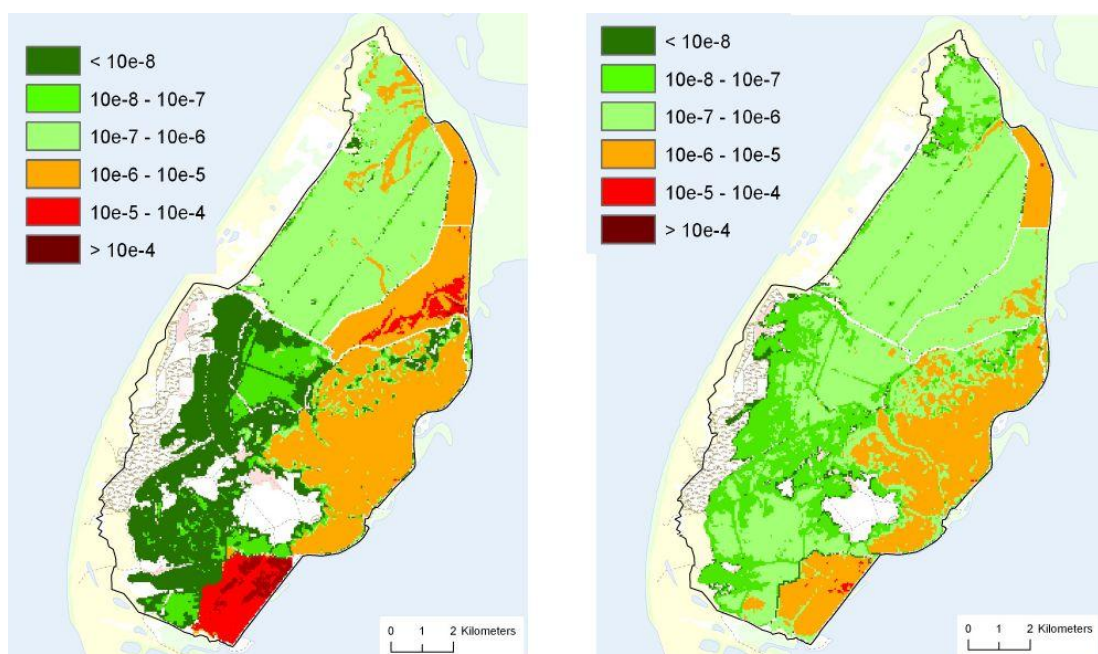
In het onderzoek VNK2 zijn de overstromingsrisico's bepaald voor onder andere twee dijkringen aan de kust: Zuid-Holland en Texel (Jongejan et al., 2011). Een illustratie van blootstelling is gegeven in figuur 4.2. Voor de gehele duinenkust langs de provincie Zuid-Holland (dijkkringdeel 14-1) blijkt de faalkans door duinafslag kleiner te zijn dan 10^{-6} per jaar (project VNK-2)¹³.

Voor Texel heeft Maaskant (2010) de effectiviteit van dijkversterkingen in beeld gebracht. Hierbij zijn de opbrengsten van een tiental dijkversterkingen op het eiland (dijkkring 5) berekend, waarbij ook andere indicatoren zijn gebruikt, zoals het individuele risico (figuur 4.3).



Figuur 4.2 Duindoorbraak bij Ter Heijde bij toetspeil, na 12 uur, 48 uur en eindsituatie. Bron: VNK2

13. Bij Katwijk werd wel een hogere faalkans berekend, maar dat hing samen met het feit dat de versterking van de primaire kering nog niet was meegenomen.



Figuur 4.3 Het individuele risico (per jaar) van overstromingen op Texel: voor (links) en na een tiental dijkversterkingen (rechts). Bron: Maaskant (2010)

4.4 Normering

Dit rapport zet de eerste stappen in het verbinden van kustmorfologie met overstromingsrisico. De inzichten in de rol van kustmorfologie zullen zeker nog evolueren (zie ook de aanbevelingen voor nader onderzoek in hoofdstuk 5), maar ook het denken over overstromingsrisico's is in ontwikkeling. Ter afsluiting van deze rapportage wordt daarom kort stil gestaan bij de beleidsontwikkeling rond de wettelijke beschermingsniveaus voor dijkringen en het sturen op overstromingsrisico (Beleidsbrief Ministerie Infrastructuur & Milieu, 2011a).

In de Maatschappelijke Kosten Baten Analyse Waterveiligheid 21^e eeuw die met de beleidsbrief verscheen, zijn economisch optimale niveaus voor norm-overschrijdingskansen bepaald (Kind, 2011). Voor nagenoeg alle dijkringen langs de kust zijn de economisch optimale normwaarden lager dan de huidige normen (zie ter illustratie tabel 4.1). Analyses van slachtofferrisico's laten een vergelijkbaar beeld zien. Verondersteld mag worden dat voor de dijkringdelen langs de Nederlandse kust er dus geen aanleiding is om de bestaande veiligheidsnormen aan te scherpen.

Om de overstromingskansen per raai, zoals ook in dit rapport gepresenteerd, te kunnen vergelijken met de normen voor overstromingskansen per dijkringdeel heeft ENW (2011) omrekenfactoren voorgesteld. Voor harde keringen langs de kust bedraagt de omrekenfactor zes¹⁴. Voor duinen is omrekening echter niet mogelijk, omdat er nog geen omrekenfactor beschikbaar is.

14. Met andere woorden: als de gewenste faalkans of overstromingskans per dijkringdeel 1/10.000 per jaar bedraagt dan is de overeenkomstige overschrijdingskans op vakniveau 1/60.000 per jaar

Tabel 4.1 Huidige normen en economisch optimale normen voor de dijkringen met een duinwaterkering, uitgedrukt als overstromingskansen, zoals bepaald in de Maatschappelijke Kosten Baten Analyse Waterveiligheid 21^e eeuw..

Dijkringdeel	Huidige niveau veiligheidsnorm^a [per jaar]	Economisch optimaal niveau^b [per jaar]
1-1. Schiermonnikoog	1/2.000	1/300
2-1. Ameland	1/2.000	1/300
3-1. Terschelling	1/2.000	1/300
4-1. Vlieland	1/2.000	1/300
5-1. Texel	1/4.000	1/300
13-1. Noord – Holland	1/10.000	1/1.200
14-1. Zuid – Holland	1/10.000	1/9.300
20-1. Voorne – Putten	1/4.000	1/3.500
25-1. Goeree – Overflakkee	1/4.000	1/1.500
26-1. Schouwen – Duiveland	1/4.000	1/2.400
28-1. Noord – Beveland	1/4.000	1/800
29-1. Walcheren	1/4.000	1/700
32-1. Zeeuws – Vlaanderen	1/4.000	1/200

^{a)} WV21 2^e referentiesituatie; aangenomen is dat een normwaarde voor overstromingskansen gelijk is aan die van de wettelijke normen voor de overschrijdingskans. ^{b)} Bron: MKBA (Kind, 2011).

5 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Voor het nationale kustbeleid is het relevant om inzicht te hebben in de lange termijn ontwikkeling in bescherming van laag Nederland tegen overstromingen vanuit zee. Het beleid beoogt op een sobere, doelmatige en robuuste wijze invulling te geven aan duurzame kustveiligheid voor middellange en lange termijn van kwetsbare locaties¹⁵.

De kust is zeer dynamisch, zodoende is het niet eenvoudig om goede voorspellingen te doen over kustontwikkelingen bij verschillende scenario's qua zeespiegelstijging, golfklimaat en omvang van het kustonderhoud met zandsuppleties. Binnen verschillende onderzoeksprogramma's wordt gewerkt aan geavanceerde rekenmethoden voor het bepalen van lange termijn veranderingen in het kustprofiel. Om op korte termijn een beeld te schetsen van de lange termijn kustveiligheid zal vooralsnog gebruik worden gemaakt met bestaande toets- en analysesmodellen en extrapolaties van praktijkervaringen.

Om de kwetsbare locaties langs de Nederlandse kust op een systematische wijze nader in beeld brengen wordt aanbevolen om:

1. te controleren of de ligging van de basiskustlijn in alle situaties ook voorziet in de handhaving van de afslaglijn of de gewenste ligging van de afslaglijn. De werkwijze daarvoor is uiteengezet in figuur 3.11,
2. aan te geven hoe het zandvolume in het kustprofiel, inclusief de diepere delen, bijdraagt aan de sterkte van de zeewering en het reduceren van de (golf-)belasting op de zeewering,
3. de verschillen tussen strandsuppleties en vooroeversuppleties in beeld te brengen in termen van kosteneffectiviteit en daarbij de verschillen in de kustoriëntatie en hellingshoek van de vooroever in beschouwing te nemen en
4. bij het vervolgonderzoek gebruik te maken van:
 - a. de nieuw ontwikkelde database (zie ook Giardino et al, 2011),
 - b. de nieuwe software Morphan voor het toetsen van de duinwaterkering en kustlijn (Deltares, 2011) en
 - c. de nieuwe methodiek voor kustkaarten (Boers, 2011).

15. In deze rapportage zijn 22 kwetsbare kustdelen benoemd waar structurele kusterosie optreedt en waar een relatief smalle, lage zeewering achterliggende polders beschermen.

6 Literatuur

- Algemene Rekenkamer, 2009. Kosten van het programma Zwakke Schakel Kust.
- Alkyon. 2008. Upgrade duinmodule Onderbouwing, validatie en binnen PC-RING; gebruiksrichtlijnen van een nieuwe duinafslagmodule. A1919.
- Boers, M 2009. Atlas 13 Kustplaatsen. Deltares, rapport 1200121.
- Broers, M 2012. Kustkaarten voor kustbeleid. Deltares rapport 1204594.
- Deltares, 2011. Morphan gebruikershandleiding. Draft report 19692. Deltares, Delft.
- Den Heijer, C and Baart, F and van Koningsveld, M, 2011. Assessment of dune failure along the Dutch coast using a fully probabilistic approach. Geomorphology.
- Expertise Netwerk Waterkeringen (ENW), 2011. De beschermingsnorm in waterveiligheid: relatie tussen en normoverschrijdingskans.
- Expertise Netwerk Waterkeringen (ENW). 2007. Technisch Rapport Duinafslag 2006; Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006. (TRDA2006).
- Giardino, A., 2010. The impact of sand nourishment design on dune erosion storm conditions BwN HK3.1c. Design aspects pilot Sand Engine Delfland. Deltares memo 1201770-000-ZKS-0010, Delft, The Netherlands.
- Giardino A, Santinelli G, Bruens A, (2011). Toestand van de Kust; case study Noord Hollandse kust. Deltares, project KPP B&O Kust, rapport.
- Inspectie Verkeer en Waterstaat. 2011. Derde toets primaire waterkeringen. Landelijke toets 2006-2011.
- Jongejan RB, Stefess H, Roode N, ter Horst W, Maaskant B, 2011. The VNK2 project; a detailed large-scale quantitative flood risk analysis for the Netherlands. 5th International Conference on Flood Management (ICFM5), 27-29 September 2011, Tokyo-Japan
- Kind, 2011. Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21^e eeuw. Deltares, Delft. Rapport 1204144-006.
- Loffler M, A van der Spek & Maa-van Gelder C 2011. Dynamisch kustbeheer. Rapport Deltares 1204594, Delft
- Maaskant, B., 2010, Veiligheid Nederland in Kaart 2 - Overstromingsrisico dijkkring 5 Texel VNK2.
- Ministerie voor Verkeer en Waterstaat, 1990. Eerste Kustnota.

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 2007A. Voorschriften Toetsen op Veiligheid Primaire waterkeringen. (VTV2007).
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 2007B. Hydraulische Randvoorwaarden 2006. (HR2006).
- Ministerie Infrastructuur & Milieu, 2011a. Stand van zaken waterveiligheidsbeleid. Brief aan de Tweede Kamer IENM/BSK-2011/160710.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2011b). Kustlijnkaarten 2012.
- Morselt T, Gersonius B, 2010. Flexibele maatregelen in het waterbeheer zijn economisch aantrekkelijker. Essay Blue economy. <http://www.blueeconomy.nl/wp-content/uploads/2011/06/Essay-Flexibele-maatregelen-zijn-economisch-aantrekkelijker.pdf>
- NLingenieurs & Deltares, 2011. Hoogwaterbeschermingsprogramma beproefd betaalbaar, voorstellen voor besparingen op de kosten van het HWBP.
- Oranjewoud & HKV, 2011. Syntheserapport Gebiedspilots meerlaagsveiligheid.
- Projectbureau VNK2. 2009. Van ruwe data tot overstromingsrisico; Handleiding ter bepaling van het overstromingsrisico van dijkringen binnen het project VNK2. Versie ten behoeve van uitvraag productiefase 1a (Handleiding VNK2).
- Projectbureau VNK2. 2010A. Overstromingsrisico Dijkkring 5 Texel. HB 1199415.
- Projectbureau VNK2. 2010B. Overstromingsrisico Dijkkring 14 Zuid - Holland. HB 1199420.
- RebelGroup en Witteveen+Bos, 2007. Economische analyse kustlijnbeleid. Rapport fase 1 analyse ex post .en fase 2 ex ante. Studie in opdracht van Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag.
- Ronde, de J 2011. Monitoring van de ontwikkeling van het kustfundament. Memo 1204595, Deltares, Delft.
- Steetzel, H, R van Santen, 2010. Relatie Kustlijnzorg – Kustveiligheid, resultaten uit het verleden. Alkyon rapport A2681.
- Stronkhorst et al, 2010. Belang van duinscenario's in de MKBA voor waterveiligheid 21ste eeuw (WV21). Deltares rapport 1202129-013-ZWS-0002. Oktober 2010.
- Stronkhorst J, van der Doef M, van Dongeren A, den Heijer K, den Heijer F, Beckers J, Mulder, J, Boers M, Kind J, 2010. Belang duinscenario's in de MKBA voor waterveiligheid 21^{ste} eeuw. Werkdocument Deltares 1202129.013.
- Van Balen W., Vuik V, Van Vuren S, 2011. Indicatoren voor kustlijnzorg. HKV, rapport PR2063.10.
- Van Dongeren, et al, 2008. Bepaling beschermingscontouren kustplaatsen. Rapport Deltares, TU Delft & Alkyon.

Van Vuren et al, 2010. Verbinden van toetsingssystematiek van kustlijn­zorg en wettelijke toetsronde. Rapport HKV. December 2010.

Van de Pas B, Slager T, de Bruin K, Klijn F, 2011. Overstromingsrisicozonering. Fase 1: methode voor het identificeren van overstromingsgevaarzones. Deltares, Delft. Rapport 1204144-019.

Van Rijn, 2010. Coastal erosion control based on the concept of sediment cells. Report of the EU project CONSCIENCE.

Van Santen RB, Steetzel HJ, 2011. Relatie Kustlijn­zorg – Kustveiligheid, nadere uitwerkingen. Arcadis, rapport A2738.

WL|Delft Hydraulics. 2007. Dune Erosion, Product 3: Probabilistic Dune Erosion Prediction Method. H4357.