

Opdrachtgever:

**Rijkswaterstaat**

## **Robuust ontwerpen voor de kust**

**Uitwerking robuustheidsbegrip  
ten behoeve van het ontwerp  
van waterkeringen aan de kust**

Eindversie ENW-Kust

A1936

Oktober 2008

Opdrachtgever **Rijkswaterstaat**  
**Dienst Weg- en Waterbouwkunde**

Titel **Robuust ontwerpen voor de kust**  
**Uitwerking robuustheidsbegrip ten behoeve van**  
**het ontwerpen van waterkeringen aan de kust**

Samenvatting Ten behoeve van de 'Leidraad Rivieren' is een notitie verschenen inzake het robuust ontwerpen voor rivierwaterkeringen. De tekst van deze notitie is verwerkt in deel 1 (hoofdstuk 5) en deel 3 van de 'Leidraad Rivieren'. Voor de waterkeringen langs de kust (duinen en dijken) is ook behoefte aan een dergelijke uitwerking. De voorliggende rapportage probeert hier een goede invulling aan te geven.

Referenties Offerte-aanvraag d.d. 11 mei 2007  
Alkyon-offerte met kenmerk A1936P1r1/A1936le01 d.d. 15 juni 2007  
Opdrachtverlening met bestelnummer 4500090086  
en positienummer 00010 d.d. 26 juni 2007  
Projectleider opdrachtgever/DWW ir. P. Janssen / ir. N. Murmohamed  
Projectleider opdrachtnemer/Alkyon dr. ir. H.J. Steetzel

Rev.	Auteur	Datum	Bijzonderheden	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
0	H.J. Steetzel	27 sept. '07	Voorlopige versie		
1	H.J. Steetzel	10 dec. '07	Eerste concept		
2	H.J. Steetzel	10 mrt '08	Interim versie		
3	H.J. Steetzel	12 juni '08	Conceptrapportage		
4	H.J. Steetzel	20 okt '08	Eindrapportage ENW-Kust		

Document specificaties	Inhoud	Status
Rapport nummer: A1936R1	tekst pagina's :35	<input type="checkbox"/> voorlopig
Sleutelwoorden: Ontwerp, duinen, dijken, robuustheid, veiligheid, toetsing, ontwerp	tabellen :24	<input type="checkbox"/> concept
Project nummer: A1936	figuren :1	<input checked="" type="checkbox"/> eindrapport
Bestand: A1936R1r4.doc	appendices :1	



## Samenvatting

Ten behoeve van de 'Leidraad Rivieren' is een notitie verschenen inzake het robuust ontwerpen voor rivierwaterkeringen. De tekst van deze notitie is verwerkt in deel 1 (hoofdstuk 5) en deel 3 van de 'Leidraad Rivieren'. Voor de waterkeringen langs de kust (duinen en dijken) is ook behoefte aan een dergelijke uitwerking en in de voorliggende rapportage is getracht hier een goede invulling aan te geven.

Het doel van de voorliggende notitie is dan ook het helder beschrijven van wat met robuustheid bij het ontwerpen van waterkeringen (aan de kust) wordt bedoeld en hoe deze robuustheid in voorkomende gevallen dient te worden gekwantificeerd.

Teneinde te komen tot een geschikte invulling van het begrip robuustheid is in eerste instantie aandacht gegeven aan de algemene definitie van het robuustheidsbegrip (hoofdstuk 2). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de verschillende componenten zoals directe robuustheid, uitbreidbaarheid en ruimtereserering. Aansluitend op deze meer algemene verhandelingen is vervolgens de inhoud van een aantal relevant geachte notities besproken (hoofdstuk 3) en is mede op basis van de evaluatie van deze documenten een voorstel voor een meer specifieke invulling aan het robuustheidsbegrip voor de kust gegeven (hoofdstuk 4).

Vervolgens zijn de relevant geachte onzekerheden uitgewerkt en gekwantificeerd (hoofdstuk 5) waarna deze worden gecombineerd tot de voor kustwaterkeringen te gebruiken uitgangspunten voor robuust ontwerpen (hoofdstuk 6).

Het laatstgenoemde hoofdstuk kan dan ook worden gezien als de daadwerkelijke invulling van het robuustheidsbegrip voor kustwaterkeringen.



# Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van bijlagen

1	Inleiding .....	1
1.1	Achtergrond en kader	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Opdracht en uitvoering	1
1.4	Plan van aanpak	2
1.5	Leeswijzer	3
2	Het begrip robuustheid.....	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Basisdefinitie 'robuustheid'	4
2.3	Mutatie in randvoorwaarden	5
2.4	Toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden	6
2.5	Uitbreidbaarheid t.b.v. toekomstige versterkingen	7
3	Relevante literatuur .....	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Leidraad Rivieren [MinVenW, 2007a]	9
3.3	Advies zee- en meerdijken [Van der Meer, 2007]	12
3.4	Derde Kustnota [MinVenW, 2000]	13
3.5	Gevoeligheidsonderzoek reservestrook [Alkyon, 2006]	14
4	Nadere uitwerking .....	16
4.1	Inleiding	16
4.2	Verschillende toekomstsituaties	16
4.3	Verschillende onzekerheden	16
4.4	Koppeling robuustheidsonderdelen en onzekerheden	17
4.5	Stand-van-zaken (rivieren en zee- en meerdijken)	18
5	Kwantificering relevante onzekerheden .....	20
5.1	Inleiding	20
5.2	Uitgangspunten voor uitwerking	20
5.3	Overzicht relevante onzekerheden	20
5.4	Onzekerheid klimaatontwikkeling	21
5.4.1	Inleiding	21
5.4.2	TAW-scenario's	21
5.4.3	Definitie onzekerheden	22
5.4.4	Overzicht onzekerheid maatgevende waterstanden	22
5.4.5	Overzicht onzekerheid golfaanval op diep water	22



## Samenvatting

Ten behoeve van de 'Leidraad Rivieren' is een notitie verschenen inzake het robuust ontwerpen voor rivierwaterkeringen. De tekst van deze notitie is verwerkt in deel 1 (hoofdstuk 5) en deel 3 van de 'Leidraad Rivieren'. Voor de waterkeringen langs de kust (duinen en dijken) is ook behoefte aan een dergelijke uitwerking en in de voorliggende rapportage is getracht hier een goede invulling aan te geven.

Het doel van de voorliggende notitie is dan ook het helder beschrijven van wat met robuustheid bij het ontwerpen van waterkeringen (aan de kust) wordt bedoeld en hoe deze robuustheid in voorkomende gevallen dient te worden gekwantificeerd.

Teneinde te komen tot een geschikte invulling van het begrip robuustheid is in eerste instantie aandacht gegeven aan de algemene definitie van het robuustheidsbegrip (hoofdstuk 2). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de verschillende componenten zoals directe robuustheid, uitbreidbaarheid en ruimtereserering. Aansluitend op deze meer algemene verhandelingen is vervolgens de inhoud van een aantal relevant geachte notities besproken (hoofdstuk 3) en is mede op basis van de evaluatie van deze documenten een voorstel voor een meer specifieke invulling aan het robuustheidsbegrip voor de kust gegeven (hoofdstuk 4).

Vervolgens zijn de relevant geachte onzekerheden uitgewerkt en gekwantificeerd (hoofdstuk 5) waarna deze worden gecombineerd tot de voor kustwaterkeringen te gebruiken uitgangspunten voor robuust ontwerpen (hoofdstuk 6).

Het laatstgenoemde hoofdstuk kan dan ook worden gezien als de daadwerkelijke invulling van het robuustheidsbegrip voor kustwaterkeringen.



# Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van bijlagen

1	Inleiding .....	1
1.1	Achtergrond en kader	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Opdracht en uitvoering	1
1.4	Plan van aanpak	2
1.5	Leeswijzer	3
2	Het begrip robuustheid.....	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Basisdefinitie 'robuustheid'	4
2.3	Mutatie in randvoorwaarden	5
2.4	Toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden	6
2.5	Uitbreidbaarheid t.b.v. toekomstige versterkingen	7
3	Relevante literatuur .....	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Leidraad Rivieren [MinVenW, 2007a]	9
3.3	Advies zee- en meerdijken [Van der Meer, 2007]	12
3.4	Derde Kustnota [MinVenW, 2000]	13
3.5	Gevoeligheidsonderzoek reservestrook [Alkyon, 2006]	14
4	Nadere uitwerking .....	16
4.1	Inleiding	16
4.2	Verschillende toekomstsituaties	16
4.3	Verschillende onzekerheden	16
4.4	Koppeling robuustheidsonderdelen en onzekerheden	17
4.5	Stand-van-zaken (rivieren en zee- en meerdijken)	18
5	Kwantificering relevante onzekerheden .....	20
5.1	Inleiding	20
5.2	Uitgangspunten voor uitwerking	20
5.3	Overzicht relevante onzekerheden	20
5.4	Onzekerheid klimaatontwikkeling	21
5.4.1	Inleiding	21
5.4.2	TAW-scenario's	21
5.4.3	Definitie onzekerheden	22
5.4.4	Overzicht onzekerheid maatgevende waterstanden	22
5.4.5	Overzicht onzekerheid golfaanval op diep water	22



5.5	Onzekerheid normstelling	23
5.5.1	Inleiding	23
5.5.2	Waterstandsmutatie	23
5.5.3	Golfhoogtemutatie	23
5.5.4	Golfperiodemutatie	24
5.5.5	Overzicht onzekerheden normstelling (diepwater condities)	24
5.6	Statistische onzekerheden (inzichten, data)	24
5.6.1	Inleiding	24
5.6.2	Relevante relaties	24
5.6.3	Overzicht statistische onzekerheden	24
5.7	Modelonzekerheden (kennis, processen)	25
5.7.1	Inleiding	25
5.7.2	Relevante modellen	25
5.7.3	Kwantificering modelonzekerheid	25
5.7.4	Overzicht modelonzekerheden	26
5.8	Morfologische onzekerheden	26
5.8.1	Inleiding	26
5.8.2	Reguliere ontwikkeling voor zandige keringen	26
5.8.3	Reguliere ontwikkeling voor harde waterkeringen	26
5.8.4	Locatiespecifieke ontwikkeling voor zandige keringen	26
5.8.5	Locatiespecifieke ontwikkeling voor harde keringen	26
5.8.6	Overzicht morfologische onzekerheden	27
6	Definitie robuust ontwerpen voor de kust .....	28
6.1	Algemene begripsdefinitie	28
6.2	Stapsgewijze invulling	28
6.3	Uitgangspunt: het referentieontwerp	28
6.4	Robuust ontwerp (robuustheidstoeslag)	29
6.4.1	Algemeen	29
6.4.2	Duinwaterkeringen (zachte waterkeringen)	29
6.4.3	Dijken (harde waterkeringen)	30
6.4.4	Overzicht robuustheidstoelagen	31
6.4.5	Overzicht randvoorwaarden robuust ontwerp	32
6.5	Uitbreidbaar ontwerp (korte termijn)	32
6.5.1	Algemeen	32
6.5.2	Duinwaterkeringen (zachte waterkeringen)	32
6.5.3	Dijken (harde waterkeringen)	33
6.5.4	Overzicht mutatie ten opzichte van referentie	33
6.5.5	Overzicht randvoorwaarden uitbreidbaar ontwerp	34
6.6	Ruimtereservering (lange termijn)	34
6.6.1	Algemeen	34
6.6.2	Overzicht randvoorwaarden ruimtereservering	34
6.7	Overzicht ontwerpvoorwaarden robuust ontwerpen	34
6.8	Financiële afwegingen	35

Referenties

Figuren



## Bijlagen





## Lijst van tabellen

- 4.1 Totaaloverzicht toekomstsituaties en bijbehorende robuustheidscomponenten
- 4.2 Samenhang effectcomponenten en onzekerheden
- 4.3 Koppeling robuustheidscomponenten en onzekerheden
- 4.4 Huidige invulling op basis van 'Leidraad Rivieren' (en 'Advies Zee- en Meerdijken')
  
- 5.1 Relevante combinaties van robuustheidscomponenten en onzekerheden
- 5.2 Overzicht toename maatgevende hoogwaterstand voor relevante TAW-scenario's [TAW, 2002]
- 5.3 Overzicht toename maatgevende golfaanval voor relevante TAW-scenario's [TAW, 2002]
- 5.4 Overzicht onzekerheid maatgevende hoogwaterstand (op basis van [TAW, 2002])
- 5.5 Overzicht onzekerheid golfaanval op diep water (op basis van [TAW, 2002])
- 5.6 Overzicht onzekerheid a.g.v. aanscherping normstelling
- 5.7 Overzicht statistische onzekerheid
  
- 6.1 Randvoorwaardenmutatie t.b.v. referentieontwerp voor duinwaterkeringen
- 6.2 Randvoorwaardenmutatie t.b.v. referentieontwerp voor harde waterkeringen
- 6.3 Samenstelling onzekerheden t.b.v. robuustheidstoeslag voor zachte waterkeringen / duinen
- 6.4 Samenstelling onzekerheden t.b.v. robuustheidstoeslag voor harde waterkeringen / dijken
- 6.5 Overzicht robuustheidstoeslagen voor zachte en harde waterkeringen
- 6.6 Overzicht randvoorwaarden robuust ontwerp voor zachte en harde waterkeringen
- 6.7 Samenstelling onzekerheden t.b.v. uitbreidbaarheid voor zachte waterkeringen / duinen
- 6.8 Samenstelling onzekerheden t.b.v. uitbreidbaarheid voor harde waterkeringen / dijken
- 6.9 Overzicht mutaties uitbreidbaar ontwerp voor zachte en harde waterkeringen
- 6.10 Overzicht randvoorwaarden uitbreidbaar ontwerp voor zachte en harde waterkeringen
- 6.11 Overzicht randvoorwaarden ruimtereservering voor zachte en harde waterkeringen
- 6.12 Overzicht mutaties hydraulische randvoorwaarden voor robuust totaalontwerp voor zachte waterkeringen / duinen
- 6.13 Overzicht mutaties hydraulische randvoorwaarden voor robuust totaalontwerp voor harde waterkeringen / dijken



## Lijst van figuren

- 2.1 Schematische weergave principe robuust ontwerpen; Definitie robuustheidstoetslag ten behoeve van opvang onzekerheden en uitbreidbaarheid

## Lijst van bijlagen

- A Robuust ontwerpen in de 'Leidraad Rivieren'



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en kader

Ten behoeve van de 'Leidraad Rivieren' is een notitie verschenen inzake het robuust ontwerpen voor rivierwaterkeringen. De tekst van deze notitie is verwerkt in deel 1 (hoofdstuk 5) en deel 3 van de 'Leidraad Rivieren' [MinVenW, 2007a].

Voor de waterkeringen langs de kust (duinen en dijken) is ook behoefte aan een dergelijke uitwerking waarbij, waar mogelijk, moet worden voortgebouwd op de inhoud van de 'riviernotitie'.

In de voorliggende rapportage is getracht hier een goede invulling aan te geven.

## 1.2 Doelstelling

Het doel van de in dit kader aangeboden werkzaamheden is feitelijk tweeledig:

- De opstellen van een notitie waarin helder is beschreven wat met robuustheid bij het ontwerpen van waterkeringen wordt bedoeld en hoe deze robuustheid in voorkomende gevallen dient te worden gekwantificeerd;
- Het voldoende breed gedragen krijgen van de inhoud van deze notitie bij de relevante partijen.

Het eerste (inhoudelijke) doel heeft de voorliggende notitie (en dan met name het deel vanaf hoofdstuk 2, inclusief de bijlage) als resultaat.

Het tweede (proces) doel wordt bereikt door het bespreken van (conceptversies van) deze notitie met betrokken partijen, waaronder ENW-kust en (in een later stadium) de werkgroepen ENW-Veiligheid en ENW-Techniek.

Tijdens de uitvoering van deze studie zijn de beide doelen iteratief uitgewerkt.

## 1.3 Opdracht en uitvoering

Onder verwijzing naar een offerteaanvraag van 11 mei 2007, is door Alkyon Hydraulic Consultancy & Research (Alkyon) een studievoorstel uitgewerkt, met kenmerk A1936P1r1 d.d. 15 juni 2007, voor uitvoeren van de gevraagde activiteiten. Door middel van brief met bestelnummer 4500090086 d.d. 26 juni 2007, werd vervolgens aan Alkyon opdracht verleend tot uitvoering van deze studie. De initieel aangeboden werkzaamheden zijn daarbij beperkt gebleven tot het bespreken en gedragen krijgen van de inhoud van deze notitie binnen ENW-kust. De vervolguitwerking gericht op het verbreden van de gewenste draagkracht valt buiten de bestaande opdracht.

De studie werd uitgevoerd door Henk Steetzel, met bijdragen van Matthijs Kok (HKV). Henk Steetzel was verantwoordelijk voor de gevraagde concretisering en de voorliggende rapportage. De kwaliteitscontrole werd, conform de ISO-9001-norm, uitgevoerd door Rob Steijn.

Tijdens de uitvoering van de werkzaamheden heeft meerdere malen overleg plaatsgevonden met een door ENW-Kust ingestelde begeleidingsgroep. Hierin hadden zitting



Jan van de Graaff (TUD), Gertjan Nederbragt (Provincie Noord-Holland) en (initieel ook) Adri Provoost (Waterschap Zeeuws-Vlaanderen).  
De door de genoemde mensen ingebrachte standpunten zijn zo goed mogelijk verwerkt in de voorliggende versie van de rapportage.

## 1.4 Plan van aanpak

Gelet op de twee verschillende doelstellingen is in het plan van aanpak expliciet onderscheid gemaakt tussen de inhoudelijke uitwerking (eerste doelstelling) en de procesgang (tweede doelstelling).

### **Inhoudelijke aanpak**

Teneinde te komen tot een geschikte invulling van het begrip robuustheid is in eerste instantie aandacht gegeven aan de algemene definitie van het robuustheidsbegrip. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de verschillende componenten.

Aansluitend op deze meer algemene verhandelingen is vervolgens de inhoud van een aantal relevant geachte notities besproken en is mede op basis van de evaluatie van deze documenten een voorstel voor een meer specifieke invulling aan het robuustheidsbegrip voor de kust gegeven.

### **Aanpak proces**

Tijdens de uitvoering van de studie is de (inhoudelijke) notitie in een steeds meer volledige vorm binnen de verschillende werkgroepen besproken. In de eerste fase van deze studie is de inhoud kortgesloten op de werkgroep Kust.

Aansluitend hierop is een meer definitieve concept versie omgezet naar een echt definitieve ENW-breed gedragen notitie. Deze laatste activiteit valt nog buiten de huidige opdracht.

### **Initiële activiteiten**

Begonnen is met een eerste presentatie op een ENW-kust-vergadering waarmee het probleem feitelijk is geagendeerd.  
Aansluitend hierop is vanuit ENW-kust een kleine afvaardiging (begeleidingsgroep) benoemd die in meer detail wordt betrokken bij de totstandkoming de notitie. Vervolgens zal de notitie worden opgewaarderd tot een meer volledig concept (revisie 1) dat opnieuw in ENW-Kust zal behandeld zal worden. (Deze tussenversie zal dus nog niet in de andere werkgroepen worden besproken.)

Mede op basis van de reacties zal het eerste concept vervolgens worden omgezet naar een meer definitief concept (revisie 2).

Dit tweede concept zal zowel (opnieuw) binnen werkgroep Kust als de werkgroepen Techniek en Veiligheid worden gepresenteerd en worden besproken.

De uitkomsten van deze presentatie-ronde kunnen vervolgens worden meegenomen in de vormgeving van de laatste fase van deze studie.

### **Afrondende activiteiten**

Als laatste stap zal de een definitieve versie worden opgeleverd waarin ook de laatste opmerkingen van ENW-kust en de begeleidingsgroep zijn verwerkt. Dit document kan daarbij dus worden beschouwd als de ENW-kust-eindversie (revisie 3).



Het omzetten van het laatste conceptversie in een echt definitieve ENW-breed gedragen versie valt vooralsnog buiten de huidige opdracht. Dit is gedaan omdat lastig is in te schatten in hoeverre het de opgeleverde ENW-Kust-definitief conceptnotitie voldoende breed gedragen zal worden.

## **1.5 Leeswijzer**

De feitelijke inhoudelijke uitwerking van het begrip robuust ontwerpen voor de kust is beschreven in de hoofdstukken 2 tot en met 6 van deze rapportage.

Hoofdstuk 2 gaat in op de algemene definitie van het begrip robuustheid en de hierbij van belang zijnde onderwerpen.

In hoofdstuk 3 wordt de relevante literatuur op een rij gezet om vervolgens in hoofdstuk 4 per situatie (zichtperiode) een overzicht te geven van de van belang zijnde onderwerpen.

In hoofdstuk 5 worden vervolgens de relevante onzekerheden uitgewerkt en gekwantificeerd waarna deze tenslotte in hoofdstuk 6 worden gecombineerd tot de voor kustwaterkeringen te gebruiken uitgangspunten voor robuust ontwerpen.



## 2 Het begrip robuustheid

### 2.1 Inleiding

In het geval dat een waterkering niet (meer) aan de hieraan gestelde eisen voldoet zal een nieuwe waterkering moeten worden ontworpen. Dit is bijvoorbeeld het geval indien de 5-jaarlijkse toets op 'veiligheid' laat zien dat de waterkering niet meer voldoet.

Een dergelijk nieuw ontwerp wordt in de regel (huidige ontwerppraktijk) zodanig vormgegeven dat deze gedurende de planperiode (meestal 50 jaar) aan de eisen zal voldoen.

Zoals in de inleiding aangegeven bestaat er behoefte aan het uniformeren van de uitgangspunten die bij een dergelijk ontwerp worden gehanteerd, waarbij het bovendien gewenst is dat er bij dat ontwerp met enkele specifieke aspecten rekening wordt gehouden.

Een dergelijk nagestreefd ontwerp wordt in als een 'robuust ontwerp' aangemerkt.

#### Gehanteerde ontwerpaanduidingen

In de voorliggende uitwerking worden in meer algemene zin gemakshalve drie verschillende ontwerpen onderscheiden, namelijk:

- Het volgens de (blijkbaar minder goed gedefinieerde) huidige ontwerppraktijk gedefinieerde *reguliere ontwerp*;
- Een soort van *referentieontwerp* dat in principe voldoet maar waarbij geen rekening is gehouden met onzekerheden in de toekomstige ontwikkelingen;
- Een *robuust ontwerp* waarbij in ieder geval rekening wordt gehouden met de effecten van onzekerheden in de toekomstige ontwikkelingen.

Helder is dat het robuuste ontwerp veelal zwaarder is dan het referentieontwerp; het robuuste ontwerp kenmerkt zich immers door iets extra's.

Dit laatste geldt ook voor het tot op heden toegepaste regulier ontwerp. Deze, in de huidige praktijk als 'goed ontwerp' aangeduide invulling, heeft ook iets extra's ten opzichte van het referentieontwerp.

De relatieve zwaarte van het robuuste ontwerp ten opzichte van het reguliere ontwerp is niet op voorhand duidelijk, maar is voor de uitwerking van het robuuste ontwerp ook niet nodig.

#### Aanvullende eisen t.a.v. ruimtelijke kwaliteit

Een geschikt ontwerp van een nieuwe waterkering kan natuurlijk ook elementen bevatten die niet strikt een waterkeringsdoel dienen. Duidelijk mag zijn dat er bij een robuust ontwerp (nog) meer mogelijkheden zijn voor het inpassen van ruimtelijke kwaliteit.

### 2.2 Basisdefinitie 'robuustheid'

De letterlijke definitie van robuustheid als verwoord in de 'Leidraad Rivieren' luidt (zie ook bijlage A waarin relevante delen uit deze leidraad zijn opgenomen):

"Goed (robuust) ontwerpen betekent: in het ontwerp rekening houden met *toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden*, zodat het uitgevoerde ontwerp tijdens de *planperiode* blijft *functioneren* zonder dat ingrijpende en kostbare

aanpassingen noodzakelijk zijn, en dat het ontwerp *uitbreidbaar* is indien dat economisch verantwoord is”.

De totstandkoming van deze definitie is onderdeel geweest van een zeer brede en lange discussie over dit onderwerp. Voorgesteld wordt derhalve om voor de invulling van het robuustheidsbegrip voor de kust dan ook aan te sluiten op de bovenstaande definitie. In feite betekent dit dat wordt voorgesteld om deze definitie ook van toepassing te laten zijn op andere watersystemen dan alleen de rivieren en dus slechts de praktische uitwerking van dit robuustheidsbegrip per watersysteem (maar ook per waterkerings-type) te laten verschillen.

### **Twee uitwerkingen: hard en zacht**

Bij beperking tot het watersysteem kust is, anders dan in de ‘Leidraad Rivieren’, sprake van twee typen waterkeringen, namelijk de dijken als harde kering en de duinen als een meer flexibele zachte kering. De onderhavige *uitwerking* van het begrip robuustheid voor de kust dient derhalve dus voor beide waterkeringstypen plaats te vinden.

### **Twee componenten**

Binnen de eerder gegeven definitie voor robuustheid spelen twee componenten een rol, te weten:

- Het rekening houden met toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden;
- Het uitbreidbaar zijn van het ontwerp.

In het eerste geval moet een tijdens de planperiode optredende, enigszins van het initieel verwachte patroon afwijkende, ontwikkeling zonder vergaande ingrepen in het oorspronkelijke ontwerp kunnen worden opgevangen.

In het tweede geval moet een volgend ontwerp ten behoeve van de periode na afloop van de eerste planperiode voortbouwend op het eerste ontwerp relatief eenvoudig te verwezenlijken zijn. Ten aanzien van deze uitbreidbaarheid wordt overigens een voorbehoud gemaakt door deze uitbreidbaarheid wel economisch verantwoord te laten zijn. De meerkosten voor het uitbreidbaar maken van een ontwerp moeten daarbij natuurlijk wel in verhouding staan tot de basiskosten van het ontwerp. In het verlengde van deze uitbreidbaarheid is voor het ontwerp van waterkeringen ook het begrip ruimte-reservering van belang. Hierbij wordt zelfs verder gekeken dan het eind van de volgende planperiode. De hiervoor te gebruiken randvoorwaarden zijn dan ook relatief zwaar (combinatie van lange zichtperiode en een ongunstig klimaatscenario). In aansluiting op de in de ‘Leidraad Rivieren’ gevolgde insteek wordt deze laatste ruimtereservering overigens gezien als een onderdeel van de uitbreidbaarheid.

## **2.3 Mutatie in randvoorwaarden**

Uitgangspunt voor het definiëren van ontwerprandvoorwaarden zijn steeds de vigerende (toetsings-)randvoorwaarden: feitelijk de waarden zoals opgenomen in de HR2006.

De referentiewaarde van de hydraulische randvoorwaarden aan het eind van de planperiode kan worden bepaald door de verwachte mutatie in met name de maatgevende waterstand in rekening te brengen. Omdat het gaat om een verwachte ontwikkeling is er bij toepassing van een dergelijk uitgangspunt voor het ontwerp natuurlijk ook een kans dat de daadwerkelijke condities uiteindelijk zwaarder zullen zijn en dus de oplossing een kortere levensduur heeft.

In dit geval zal er op een eerder moment moeten worden overgegaan tot een verdere versterking van de waterkering. Dit laatste is natuurlijk technisch mogelijk edoch vanuit beheerstechnisch oogpunt soms minder gewenst.

#### **Extra mutaties ten opzichte van verwachte randvoorwaarden**

Teneinde de kans op een ontwerp dat aan het eind van de planperiode niet voldoet te verkleinen zouden ook iets zwaardere hydraulische condities kunnen worden gebruikt. Een dergelijke extra mutatie in de verwachte randvoorwaarden kan worden gezien als een invulling van de eerste component van robuustheid.

Ook voor de tweede component (uitbreidbaarheid) zou een dergelijke invulling kunnen worden gegeven.

Uiteindelijk zou dit moeten leiden tot het specificeren van adequate ontwerpcondities voor elk van de twee componenten. Beide ontwerpconditiessets wijken dus af van de aan het eind van de planperiode regulier voorziene toetscondities.

In de volgende twee paragrafen zijn onderdelen enigszins verder uitgediept.

## **2.4 Toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden**

De voor het ontwerp voor een versterking van de waterkering benodigde randvoorwaarden worden in principe bepaald door de combinatie van een planperiode en (klimaat)scenario.

De planperiode zegt hierbij iets over de tijdsduur waarvoor het ontwerp tenminste moet voldoen. Het (klimaat)scenario zegt iets over de wijze waarop de huidige hydraulische randvoorwaarden in de tijd wijzigen.

Combinatie van beiden (planperiode en klimaatscenario) geeft dus de gedurende de planperiode aanwezige mutatie ten opzichte van de huidige randvoorwaarden.

Ten aanzien van de kwantificering van deze mutatie kunnen er feitelijk twee mogelijkheden worden onderscheiden, namelijk:

- Een situatie waarbij de mutatie wordt bepaald door uit te gaan van de verwachte ontwikkeling in de randvoorwaarden;
- Een situatie waarbij ook rekening wordt gehouden met de (ongunstig uitvallende) onzekerheden in deze ontwikkeling.

In het eerste geval leidt dit tot een referentieontwerp van de versterkte waterkering. Het rekening houden met (ongunstig uitvallende) onzekerheden leidt tot een relatief zwaarder ontwerp: het robuuste ontwerp.

Een en ander is schematisch weergegeven in de bovenste afbeelding van figuur 2.1 waarin de mutatie in de randvoorwaarden als functie van de tijd is weergegeven. Bij het volgen van de verwachte ontwikkeling worden aan het eind van de planperiode de randvoorwaarden behorende bij het referentieontwerp gevonden (blauwe cirkel). Het gebruik van een ongunstiger ontwikkeling leidt tot een robuuster ontwerp (rode vierkant). Het verschil tussen beide ontwerpen kan in feite worden beschouwd als het onzekerheidsdeel van de robuustheidstoelag.

#### **Rekening houden met (alle) onzekerheden**

Centraal staat daarbij de dus kwantificering van deze robuustheid ofwel de robuustheidstoelag op de randvoorwaarden voor het referentieontwerp.



Hierbij spelen meerdere onzekerheden een rol, bijvoorbeeld:

- Een meer extreme ontwikkeling van de zeespiegelstijging dan thans als verwacht scenario is ingeschat;
- Een op basis van (thans nog onvoorziene) nieuwe inzichten bijgestelde statistische beschrijving van de extremen van waterstanden, golfhoogten en golfperioden;
- Op basis van (thans nog onvoorziene) nieuwe inzichten aangepaste rekenmodellen;
- Alsmede de consequenties van het aanpassen van de maatgevende normen.

Ten behoeve van een voldoende robuust ontwerp is het natuurlijk niet nodig om met het gelijktijdig optreden van al deze onzekerheden rekening te houden. De robuustheidstoeslag dient echter wel voldoende groot te zijn om 'enige tegenslag' te kunnen opvangen.

De vraag doet zich overigens voor of een mogelijk toekomstige normverandering op dezelfde wijze moet worden behandeld als de eerste drie meer natuur-gedreven onzekerheden. In principe wordt immers over de aanpassing van de norm een weloverwogen besluit genomen en zouden de consequenties op dat moment worden verwerkt. In de voorliggende uitwerking wordt, in lijn met de in het kader van de 'Leidraad Rivieren' gevoerde discussies, de normaanpassing dus buiten de eerste component van de robuustheid gehouden.

#### **Een robuust ontwerp ...**

In de praktijk betekent dit dat het ontwerp daadwerkelijk veelal 'wat zwaarder' dan standaard zal worden uitgevoerd.

Overigens moet worden opgemerkt dat de robuustheidstoeslag alleen mag worden toegepast bij het ontwerpen van waterkeringen en dus niet bij de toetsing van waterkeringen. Met een dergelijke toeslag worden waterkeringen dus wel zwaarder ontworpen maar worden er niet meer waterkeringen afgekeurd.

## **2.5 Uitbreidbaarheid t.b.v. toekomstige versterkingen**

Uitgaande van de veronderstelling dat de ontworpen en gerealiseerde versterking van de waterkering aan het eind van de planperiode nog net voldoet (dat wil zeggen een toetsing aan de hand van de dan van toepassing zijnde versie van het VTV met een goed gevolg afsluit), zal een nieuwe (tweede) versterking voor de hierop volgende planperiode moeten worden ontworpen.

Indien de eerste versterking daadwerkelijk robuust is ontworpen, betekent dit feitelijk twee dingen, namelijk:

- De waterkering voldoet nog steeds en er is dus voldoende rekening gehouden met gedurende de eerste planperiode opgetreden afwijkende ontwikkelingen en onzekerheden;
- De ten behoeve van de tweede planperiode (in een later stadium) alsnog benodigde versterking van de waterkering is relatief eenvoudig te realiseren omdat hier in de eerste versterkingsronde al op werd geanticipeerd.

Een en ander betekent dus feitelijk dat het eerste ontwerp ook geschikt moet zijn als basis voor het tweede ontwerp. Dit laatste ontwerp dient te worden gebaseerd op de ingeschatte randvoorwaarden zoals deze gelden aan het eind van de volgende planperiode.



Een en ander is schematisch weergegeven in de onderste afbeelding van figuur 2.1 waarin in dit geval de verwachte ontwikkeling voor een dubbele planperiode is doorgezet. De hierbij aan te houden condities zijn aangegeven met de grijze driehoek.

Dit 'reeds voldoende anticiperen op' kan worden vormgegeven door bijvoorbeeld het nu tenminste reeds reserveren van voldoende fysieke ruimte. Door het reserveren van voldoende ruimte kan een tweede en volgende versterking meer eenvoudig mogelijk worden gemaakt. In dit kader speelt het begrip reservestrook een rol.

#### **Een uitbreidbaar ontwerp ...**

In de praktijk betekent dit dat het eerder gedefinieerde (robuuste) ontwerp zal moet worden getoetst op de verdere uitbreidbaarheid.

## 3 Relevante literatuur

### 3.1 Inleiding

Gegeven de in het vorige hoofdstuk beschreven algemene definitie en de hieromtrent gehouden bespiegelingen kunnen er een aantal verschillende onderwerpen worden benoemd die om een verdere uitwerking vragen.

Daartoe is in eerste instantie een korte inventarisatie gemaakt van enkele relevante notities waaronder natuurlijk de 'Leidraad Rivieren' en zijn de voornaamste bevindingen hieruit benoemd.

Vervolgens is al deze informatie bijeengebracht en zijn de uitgangspunten voor de nadere definitie van het robuustheidsbegrip voor de kust vastgesteld.

Mede op basis hiervan is in het laatste hoofdstuk een voorstel geformuleerd voor de voor de kust te gebruiken definities.

### 3.2 Leidraad Rivieren [MinVenW, 2007a]

De voor robuustheid relevante delen van de 'Leidraad Rivieren' zijn in bijlage A van deze rapportage opgenomen. Aan de invulling van het begrip robuustheid is veel discussie voorafgegaan en zijn ook meerdere notities verschenen waaronder een vrij brede notitie van E. van Hijum en een meer beknopte notitie van M. Kok [INFRAM, 2007; Kok, M. en P. Janssen, 2007]. Deze laatste notitie vormde de basis voor de uiteindelijke leidraadteksten.

In bijlage A zijn een zestal relevante tekstdelen uit de uiteindelijke leidraad weergegeven welke in het volgende van enig aanvullend commentaar zijn voorzien.

#### 1 - Definitie

De definitie, waarin robuustheid onlosmakelijk is verbonden aan de twee componenten onzekerheden en uitbreidbaarheid, is reeds aan de orde geweest in het vorige hoofdstuk.

Ook van belang is echter de veiligheidsnorm welke in de hierbij opgenomen figuur (zie figuur 5-1 uit de bijlage) direct naast de onzekerheden en de uitbreidbaarheid wordt geplaatst. Mede gelet op de huidige discussies over deze normering is het allerminst zeker dat er gedurende de planperiode geen wijziging van de normering zal worden doorgevoerd. De veiligheidsnorm zou wat dat betreft dus ook niet als een vast gegeven mogen worden beschouwd en zou daarmee ook onder het kopje 'onzekerheden' vallen. In principe wordt er over de aanpassing van de norm een weloverwogen besluit genomen en zouden de consequenties op dat moment alsnog kunnen worden verwerkt. In de voorliggende uitwerking wordt de normaanpassing dus buiten de eerste component van de robuustheid gehouden edoch wel meegenomen in de uitbreidbaarheidsbeoordeling.

Verder speelt ook ruimtelijke kwaliteit nog een rol. Daar deze zeer afhankelijk is van de lokale omstandigheden is het uitermate lastig, zo niet onmogelijk, om hier voor algemeen toepasbare richtlijnen te geven.



## 2 - Ontwerpbelastingen

In deze sectie wordt ingegaan op de ontkoppeling tussen de toetsbelasting aan het eind van de planperiode en de ontwerpbelasting. In de eerder beschreven bovenste afbeelding van figuur 2.1 zijn deze beide aangeduid als de randvoorwaarden ten behoeve van respectievelijk het referentieontwerp en het robuuste ontwerp.

## 3 - Onzekerheden (t.b.v. robuustheid)

Er moet *voldoende* rekening worden gehouden met onzekerheden in de toekomstige ontwikkelingen. Het is nadrukkelijk niet de bedoeling om alles op te kunnen vangen en dus ook niet om 'veiligheid op veiligheid' te stapelen.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen onzekerheden in de belasting en de sterkte waarbij de aandacht zich vooral richt op de onzekerheid aan de belastingkant.

Aan deze belastingkant wordt onderscheid gemaakt tussen:

- Kennisonzekerheden (inclusief erosiegedrag);
- Modelonzekerheden;
- Klimaatonzekerheden.

De eerste twee onderwerpen vallen feitelijk onder het kopje 'nieuwe inzichten'.

Hierbij wordt nadrukkelijk dus geen melding gemaakt van onzekerheden met betrekking tot de norm, maar deze valt ook niet onder de 'natuur-krachten' en heeft in feite betrekking op een soort van contractafpraak tussen de ontwerpende ingenieur en de maatschappij.

Ook wordt de nadruk gelegd op de waterstandsonzekerheid ofschoon dit slechts een van de vele onzekerheden is. Voor de rivier is een dergelijke focus natuurlijk wel te motiveren (zie verderop), edoch zal er voor kust-gerelateerde uitwerkingen wat breder moeten worden gekeken.

## 4 - Uitbreidbaarheid

Bij de uitbreidbaarheid moet volgens de opsomming rekening worden gehouden met:

- Versnelde klimaatverandering;
- Scherpere normen;
- Nieuwe inzichten.

Hier wordt dus wel de onzekerheid van de norm genoemd.

Onder het kopje nieuwe inzichten vallen (waarschijnlijk) zowel de kennis- als de modelonzekerheden.

Verder wordt ook niet expliciet genoemd dat de uitbreidbaarheid getoetst moet worden voor een dubbele planperiode. Wel wordt gemeld dat voor de toekomstige uitbreiding dezelfde orde van grootte geldt als de eerste dijkversterking, maar dat lijkt een slechts beperkt bruikbare formulering.

## 5 - Ontwerpeisen

Bij de ontwerpeisen wordt onder het eerste kopje feitelijk invulling gegeven aan de randvoorwaarden voor het referentieontwerp (zie figuur 2.1). Hiertoe wordt ook het verwachte scenario voor klimaatverandering (het zogenaamde middenscenario) gehanteerd.

Het tweede kopje gaat in op de robuustheidstoeslag (zie bovenste afbeelding van figuur 2.1) welke in dit geval is uitgedrukt in een toeslag van 0,3 m op de maatgevende hoogwaterstand aan het eind van de planperiode.

## **6 – Verwerking onzekerheden en uitbreidbaarheid**

In deze, in deel 3 van de 'Leidraad Rivieren' opgenomen sectie worden de eerdere punten nog eens langsgelopen.

De onzekerheden worden hierbij consequent beperkt tot de belasting en de sterkte van de waterkering. Uiteindelijk wordt alleen de onzekerheid in de waterstand gebruikt. Dat betekent overigens niet dat bij de afleiding hiervan andere onzekerheden niet in beschouwing zijn genomen. Er is ook gekeken naar de onzekerheid in de morfologie en de afvoerverdeling rond de splitsingspunten.

Uiteindelijk is echter, mede om een ongewenste stapeling van onzekerheden te voorkomen gekozen om alleen de onzekerheid in de belangrijkste belastingvariabele in rekening te brengen. Met de gekozen toeslag van 0,3 m kunnen natuurlijk derhalve ook andere onzekerheden, waaronder in de golfoploop, worden opvangen.

Overigens mag, bij een zorgvuldige motivatie, van deze vaste toeslag van 0,3 m worden afgeweken.

Van belang is hierbij wel dat de robuustheid is vormgegeven door de standaarddeviatie (van de belangrijkste belastingparameter) op te tellen bij de verwachte effecten van de klimaatverandering. Deze insteek zal ook bij de invulling van het robuustheidsbegrip voor de kust kunnen worden gevolgd.

Voor de uitbreidbaarheid moeten zwaardere ontwerpeisen worden gebruikt welke het gevolg kunnen zijn van nieuwe veiligheidsnormen, nieuwe kennis of snellere klimaatverandering. Een kwantificering van deze zwaardere omstandigheden is echter niet gegeven omdat dit uitermate sterk afhangt van de lokale situatie (groene dijk, dijk in stad, type kunstwerk, kosten fundering, etc.). Bovendien geldt hierbij nog de clausele dat de aan het uitbreidbaar maken van het ontwerp verbonden kosten niet tot een exorbitant grote kostenstijging mag leiden. In een dergelijk geval mag de eis van de uitbreidbaarheid worden verlaten.

### **Conclusie**

De in de leidraad notitie gedefinieerde robuustheidstoeslag voor rivierdijken wordt vormgegeven door alleen de onzekerheid in de belangrijkste belastingparameter in rekening te brengen.

Voor de kust-uitwerkingen zal de invulling van de robuustheidstoeslag vanaf de basis moeten gebeuren waarbij wordt geanticipeerd op onzekerheden in alle relevante hydraulische parameters en andere tijdens de planperiode optredende ontwikkelingen en onzekerheden.

Het direct gebruik van de riviersie van de robuustheidstoeslag is dan ook niet aan de orde.

Verder kan nog worden opgemerkt dat er ten aanzien van de kwantificering van de uitbreidbaarheid geen kwantitatieve uitgangspunten zijn gegeven. Dit laatste zou voor het ontwerp van een waterkering natuurlijk wel handig zijn.

### 3.3 Advies zee- en meerdijken [Van der Meer, 2007]

Ten behoeve van de verbetering van de Waddenzeedijk van Ameland, die is opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma voor 2008, is in opdracht van het Wetterskip Fryslân een specifieke invulling van robuust ontwerpen gegeven. Deze notitie is overigens ook in ENW-kader besproken.

Startpunt hierbij vormde de 'Leidraad Rivieren' waarbij werd geconstateerd dat er bij de invulling van het begrip robuust ontwerpen ten behoeve van deze leidraad zeer veel discussie is geweest en het dus zeker niet zo is dat zowel het begrip als de invulling gemakkelijk vertaald kunnen worden naar zee- en meerdijken.

Als uitgangspunt bij dit advies is wel overgenomen dat er een zekere toeslag op hydraulische randvoorwaarden moest worden vastgesteld om onzekerheden in de planperiode te kunnen opvangen (dus een mutatie op de verwachte toetsrandvoorwaarden). Dit is in lijn met de ook in de voorliggende uitwerking voor de kust gevolgde strategie (zie ook figuur 2.1).

Voor het rivierengebied werd daarbij dus gekozen voor een toeslag op de maatgevende waterstand ter grootte van de standaardafwijking van voorspelling van deze hoogwaterstand, gegeven een bepaalde rivierafvoer. Uiteindelijk leidde dit tot een toeslag van 0,3 m.

Voor het bovenrivierengebied is het natuurlijk duidelijk dat de waterstand bepalend is en niet de wind (en golven) die mogelijk bij een hoogwatersituatie aanwezig kunnen zijn. In het benedenrivierengebied kan de maatgevende waterstand ook door een storm kan worden bepaald.

Bij zee- en meerdijken speelt natuurlijk de waterstand ook een grote rol, maar op een andere manier dan bij rivierdijken. In de meeste gevallen ontstaan, door dezelfde extreme windsnelheden, ook grote golven die de waterkering bereiken. Waterstand en wind zijn bovendien gecorreleerd, iets wat bij rivieren meestal niet zo is.

Geconcludeerd wordt derhalve dat bij invulling van het begrip robuust ontwerpen bij zee- en meerdijken niet alleen de waterstand een rol speelt, maar ook de golfcondities.

Als dan overeenkomstig strategie volgens de 'Leidraad Rivieren' een robuustheidstoeslag moet worden vastgesteld, dan zou deze toeslag op de waterstand gezet kunnen worden, of op de golfcondities, of mogelijk op beide.

Op basis van een aantal verkennende kruinhoogteberekeningen voor een situatie met een beperkte golfaanval en situatie met zwaardere golfaanval is in dit memo vervolgens invulling gegeven aan een nieuwe robuustheidstoeslag.

Uitgangspunt vormde daarbij een serie sommen met verschillende toeslagen van op zowel de golfhoogte als de golfperiode. Gegeven een ingeschatte betrouwbaarheid van golfhoogte en golfperiode is uiteindelijk gekozen voor een toeslag van 10 %.

Uiteindelijk leidde dit tot het voorstel om een toeslag van 10% op zowel de golfhoogte als de golfperiode toe te passen.

Globaal houdt dit in dat dijken ongeveer een halve tot een hele meter hoger zullen worden ontworpen dan voorheen, bij een zelfde toelaatbaar overslagdebiet. Deze toeslag is ook van toepassing bij het ontwerpen van bekledingen, die vaak ontwerpcondities bij lagere waterstanden hebben dan de ontwerpwaterstand. Op deze manier

kan het begrip robuust ontwerpen eenvoudig worden ingevuld voor zee- en meerdijken en op een zelfde manier voor kruinhoogtebepaling als ontwerp van bekledingen.

### **Conclusie**

De in deze notitie voorgestelde robuustheidstoeslag voor zee- en meerdijken houdt enkel en alleen rekening met de mogelijke onzekerheden in de hydraulische condities en meer specifiek met de thans reeds aanwezige onzekerheden in de golfhoogte en golfperiode. De onzekerheid in de waterstand wordt nu dus niet meer meegenomen. Er wordt ook niet herkenbaar geanticipeerd op andere tijdens de planperiode mogelijk optredende ontwikkelingen en onzekerheden.

Als uitgangspunt voor een vertaling naar een robuustheidsbegrip voor aan de open kust gelegen waterkeringen is een en ander niet geschikt.

Conform de in de oplegbrief gegeven advies dient bij elke afzonderlijke versterking het principe van robuust ontwerpen voor de specifieke locatie worden beschouwd en kan de voor Ameland voorgestelde methodiek niet zonder meer worden toegepast voor andere kustgedeelten [ENW, 2008].

## **3.4 Derde Kustnota [MinVenW, 2000]**

De Derde Kustnota richtte zich met name op de situatie langs de Nederlandse Noordzeekust en probeerde randvoorwaarden te scheppen voor een toekomstbestendige waterkering.

In dat kader wordt ook stilgestaan bij de effecten van klimaatverandering.

Deze en met name de daarmee samenhangende zeespiegelstijging leidt immers tot een grotere belasting van de waterkeringen.

Naast deze fysische belasting vanaf de zeezijde zijn er aan de landzijde economische ontwikkelingen die de waterkering vanaf deze zijde 'belasten'.

Teneinde de mogelijkheid tot een landwaartse verbreding van de waterkering in de toekomst mogelijk te houden is een zogenaamde reservestrook gedefinieerd; een zone landwaarts van de huidige kering die voor toekomstige versterkingen kan worden gebruikt en feitelijk raakt aan de eerder besproken uitbreidbaarheid van een waterkering.

Hierbij spelen in meer algemene zin een viertal aspecten een rol, te weten:

1. Klimaatverandering;
2. Mogelijke wijzigingen in de normstelling;
3. Nieuwe inzichten en voortschrijdende kennis;
4. Onzekerheden in onder andere het morfologisch kuststelsel.

Genoemde punten zijn rechtsreeks ontleend aan bijlage 2 van de 3<sup>e</sup> Kustnota [MinVenW, 2000].

In de huidige praktijk wordt bij het vaststellen van de breedte van de reservestrook alleen het als eerste genoemde effect, zijnde de bijdrage van de klimaatverandering, in beschouwing genomen. Hierbij wordt uitgegaan van de in de 'Leidraad Zandige Kust' beschreven methodiek [TAW, 2002]. Meer specifiek betreft dit de toepassing van het hierin beschreven maximumscenario voor een zichtperiode van 200 jaar. Het resultaat hiervan wordt overigens veelal beleidsmatig ingevuld, dit met aandacht voor een in bovenaanzicht acceptabele belijning van de achterzijde van de waterkering.

In een, op opdracht van RWS/RIKZ uitgevoerde studie, is de omvang van de reservestrook bepaald waarbij ook de andere drie aspecten werden meegenomen [Alkyon, 2006]. De voornaamste resultaten van deze studie zijn in de volgende paragraaf beschreven.

### **3.5 Gevoeligheidsonderzoek reservestrook [Alkyon, 2006]**

De huidige formulering voor de definitie van de reservestrook is slechts gebaseerd op de verwachte klimaatontwikkeling. Hierbij is dus nog geen rekening gehouden met de onzekerheden als gevolg van nieuwe inzichten/kennis en morfologische ontwikkelingen. Ook is er thans nog geen 'ruimte' voor een wijziging in de normstelling.

Bij de uitwerking is een specifiek onderscheid gemaakt tussen zachte waterkeringen en harde keringen. Niet alleen vanwege het karakter van de kering maar ook vanwege het feit dat een duinwaterkering effect ondervindt van kustlijn-onderhoud met een positief effect op de waterkering als gevolg. Bij een dijk is dit laatste niet het geval en is er alleen sprake van een aanleg.

#### **Zachte waterkeringen (duinen)**

In de uitgevoerde verkenningen zijn de verschillende bijdragen separaat en gecombineerd beschouwd. Uit de resultaten blijkt dat een normwijziging een zeer groot aandeel heeft in de reservebreedte. Het is zelfs zo dat deze reeds bij een factor 10 van dezelfde orde-van-grootte is als het reguliere effect van de klimaatwijziging. De effecten van de statistische onzekerheid zijn (mede door de onzekerheid in de waterstand) van vergelijkbare grootte.

De hiermee samenhangende mutaties dienen dan ook deel uit te maken van een formulering die iets zegt over een deel van de tweede component van robuust ontwerpen, namelijk de lange-termijn uitbreidbaarheid van een duinwaterkering. Deze zal op grond van deze uitwerkingen dus moeten bestaan uit een mutatie ten opzichte van de vigerende toetscondities van:

- Een absolute toename van de waterstand (als gevolg van zeespiegelstijging volgens een bepaald scenario plus het effect van een normaanpassing en onzekerheid in de waterstand);
- Een toename van de golfhoogte (als som van een percentage, een aan de normmutatie gekoppelde absolute toename en een absolute statistische onzekerheidstoeslag);
- Een toename van de golfperiode (als som van een percentage en een absolute onzekerheidstoeslag).

Aanvullend moet er nog rekening worden gehouden met enige extra afslag ter verrekening van onzekerheden in de modellering en een slechts gedeeltelijke ophoging van de vooroever.

Uit de uitgevoerde berekeningen komt verder wel naar voren dat een dergelijke uitwerking alleen mogelijk is bij een voldoende hoog gelegen duin/achterland. Voorgesteld wordt dan ook om hier een zekere minimale waarde voor aan te houden. Hiervoor zou de kruinhoogte van het bijbehorende grensprofiel kunnen worden gebruikt.

Overigens is het natuurlijk niet de bedoeling om alle hier genoemde onzekerheden te stapelen. Er zal dan ook een keuze moeten worden gemaakt ten aanzien van een rekenrecept dat qua resultaat ergens tussen het vigerende resultaat voor alleen



klimatewiziging en het gecombineerde resultaat (voor ongunstig samenvallen van alle onzekerheden) in ligt.

### **Harde waterkeringen (dijken)**

Voor de harde keringen kan de formulering voor de reservestrook in principe al veel eenvoudiger zijn daar nagenoeg alle categorieën onzekerheden kunnen worden omgezet naar een mutatie van de lokale hydraulische condities aan de teen van de dijk.

De bovengrens voor de uitwerking zal dus moeten bestaan uit een mutatie ten opzichte van de toetscondities van:

- Een absolute toename van de waterstand (als gevolg van zeespiegelstijging volgens een bepaald scenario plus het effect van een normaanpassing);
- Een absolute toename van de golfhoogte (deels direct gekoppeld via een factor 0,6 aan de waterstand);
- Een toename van de golfperiode (als som van een percentage en een absolute statistische onzekerheidstoetslag).

Aanvullend moet er nog rekening worden gehouden met een extra kruinhoogteverhoging ter verrekening van onzekerheden in de modellering.

Centraal hierbij staat overigens wel dat er voldoende inzicht zal moeten zijn in de te verwachten morfologische ontwikkeling van de vooroever.

De helling van het talud blijkt hierbij wel van belang te zijn voor de benodigde kruinhoogteverhoging maar minder voor het hiermee samenhangende breedtebeslag.

### **Aanbevelingen en conclusies**

In dit kader werd overigens ook aanbevolen om:

- Beter inzicht te krijgen in de statistische onzekerheden van de maatgevende hydraulische condities;
- Aandacht te geven aan de lange termijn ontwikkeling van de vooroever van dijken alsmede aan het meegroeien van de duinen
- Inzicht te krijgen in de wens om op termijn over te gaan tot een zwaardere norm.

Het effect van een normaanpassing op de breedte van de reservestrook is immers, zeker in het geval van een zandige waterkering, relatief groot.

In het geval van een zandige waterkering (duin) is het effect van de morfologische onzekerheid relatief beperkt. De bijdragen van de onzekerheden in klimaat, normaanpassing en statistiek zijn vergelijkbaar van grootte. Dit betekent ook dat het gezamenlijk in beschouwing nemen van alle onzekerheden ruwweg leidt tot een verdrievoudiging van de 'huidige' reservebreedte.

Bij een harde waterkering (dijk) levert de klimaatwijziging de grootste bijdrage aan de breedte van de reservestrook. De overige bijdragen leiden ruwweg tot een verdubbeling van de benodigde breedte. Het effect van de morfologische onzekerheid is relatief beperkt.

## 4 Nadere uitwerking

### 4.1 Inleiding

Mede op basis van de in de vorige hoofdstukken gegeven uitwerkingen is in het volgende getracht een samenhangende invulling voor het robuust ontwerpen voor de kust af te leiden.

Uitgangspunten vorm daarbij de verschillende toekomstsituaties, de individuele robuustheidscomponenten en de bronnen van onzekerheid. Ook is hierbij waar nodig een onderscheid gemaakt tussen de uitwerkingen voor harde en zachte waterkeringen.

### 4.2 Verschillende toekomstsituaties

Voor het ontwerp van een waterkering spelen verschillende toekomstsituaties met de bijbehorende randvoorwaarden een rol.

Deze zijn:

- De situatie aan het eind van de voor een versterking te beschouwen planperiode;
- De situatie aan het eind van de daaropvolgende planperiode;
- De situatie op nog langere termijn.

De eerder genoemde robuustheidscomponenten, te weten de daadwerkelijk in de versterking in te bouwen robuustheid en de verschillende vormen van uitbreidbaarheid, zijn aan deze toekomstsituaties te koppelen conform het in tabel 4.1 gegeven overzicht.

Situatie	Toetsing	Robuustheidscomponent		
		Robuustheid	Uitbreidbaarheid	
		Robuust ontwerp	Uitbreidbaar ontwerp	Ruimte-reservering
Nu	(conform VTV)			
Eind planperiode		X		
Eind volgende planperiode			X	
Lange(re) termijn				X

Tabel 4.1: Totaaloverzicht toekomstsituaties en bijbehorende robuustheidscomponenten.

Het robuust ontwerp heeft hierbij de betrekking op de situatie aan het eind van de planperiode. Voor de uitbreidbaarheidscomponenten is deze zichtperiode langer.

De hiermee verband houdende zichttermijnen hangen mede samen met de aard van de constructie en variëren van 50 jaar voor het ontwerp van een grondconstructie tot 200 jaar voor de ruimtereservering voor een duinwaterkering.

### 4.3 Verschillende onzekerheden

Voor een robuust totaal ontwerp spelen in principe een viertal categorieën van onzekerheden een rol. Deze zijn samengebracht in tabel 4.2 en sluiten aan bij de opsomming als gegeven in de Derde Kustnota en de 'reservestrook-uitwerking' [Alkyon, 2006].

Ook de in de vorige hoofdstukken genoemde onzekerheden vallen hier natuurlijk onder.

Bij het onderdeel inzichten/nieuwe kennis is nog onderscheid gemaakt tussen een verbeterd inzicht in de randvoorwaarden statistiek en een verbetering in de modellering (inbreng meer fysica in modellen).

In deze tabel is ook onderscheid gemaakt tussen de wijze waarop een bepaalde onzekerheid bij het maken van een ontwerpberekening moet worden verwerkt. In de meeste gevallen is dit via een aanpassing van de (hydraulische) randvoorwaarden. In een tweetal gevallen moet of het model of de sterkte-eigenschappen van de constructie worden aangepast.

	Relevante onzekerheden				
	Klimaat ontwikkeling	Zwaardere normering	Inzichten/Kennis		Morfologische onzekerheid
			Inzicht/data	Kennis/proces	
Sterkte			(X)		X
Belasting	X	X	X		(X)
Model				X	

Tabel 4.2: Samenhang effectcomponenten en onzekerheden [Alkyon, 2006].

De morfologische onzekerheid leidt tot een aanpassing van de sterkte. Als voorbeeld kan hierbij een lager liggende vooroever worden genoemd. Voor de harde kering kan dit effect vervolgens in rekening worden gebracht door een aangepaste lokale golfbelasting aan de teen van de dijk

#### 4.4 Koppeling robuustheidsonderdelen en onzekerheden

In tabel 4.3 is de koppeling gelegd tussen de verschillende robuustheidsonderdelen en de eerder genoemde onzekerheden en is per robuustheidscomponent aangegeven in hoeverre rekening moet worden gehouden met bepaalde onzekerheden.

Bij de robuustheidscomponenten is een onderscheid gemaakt tussen het robuuste ontwerp en de twee met de uitbreidbaarheid van de versterking samenhangende onderdelen.

	Relevante onzekerheden				
	Klimaat ontwikkeling	Zwaardere normering	Inzichten/Kennis		Morfologische onzekerheid
			Inzicht/data	Kennis/proces	
Referentieontwerp	X	nee	nee	nee	nee
Robuust ontwerp	XX	nee	X	X	X
Uitbreidbaarheid	XXX	X	XX	XX	XX
Ruimtereservering	XXXX	XX	XXX	XXX	XXX

Tabel 4.3: Koppeling robuustheidsonderdelen en onzekerheden.

Op de eerste regel is hierin het resultaat gegeven voor het zogenaamde referentieontwerp. Dit ontwerp is enkel en alleen gebaseerd op de thans verwachte klimaatontwikkeling (met name de zeespiegelstijging) en heeft nog geen additionele robuustheid in zich.

Het robuust ontwerp dient in principe rekening te houden met de alle relevante onzekerheden, dit (in aansluiting op de bij rivieren gevolgde insteek) met uitzondering van de effecten van een aangepaste normering.

De robuustheidsopslag volgt in deze uit het verschil tussen het robuuste ontwerp en het referentieontwerp (feitelijk het verschil tussen de tweede en de eerste regel van de tabel).

Voor de beide uitbreidbaarheidscomponenten (directe uitbreidbaarheid en ruimte-reservering) zijn alle onzekerheden van belang.

De mate waarin een onzekerheid van belang is, is in de tabel aangegeven met een toenemend aantal x-symbolen. Het achterliggende idee hierachter is dat naarmate de zichttermijn toeneemt (van robuust ontwerp naar uitbreidbaarheid en ruimte-reservering) zowel het aantal in beschouwing genomen onzekerheden als de omvang van deze onzekerheden toeneemt.

Dit laatste kan worden geïllustreerd aan de hand van de wijze waarop de klimaatontwikkeling in rekening kan worden gebracht. Voor het referentieontwerp (zonder robuustheid) wordt gewerkt met het middenscenario voor klimaatontwikkeling over een zichtperiode van 50 jaar terwijl voor de ruimte-reservering juist gebruik wordt gemaakt van het maximumscenario bij een zichtperiode van 200 jaar (dit laatste conform [TAW, 2002]).

Overigens moet wel worden opgemerkt dat het natuurlijk niet de bedoeling is om alle onzekerheden te stapelen. De totaal in rekening te brengen onzekerheid dient echter wel zodanig groot te zijn dat het gemiddeld verwachte gecombineerde effect kan worden opgevangen.

## 4.5 Stand-van-zaken (rivieren en zee- en meerdijken)

Tabel 4.3 kan ook worden gebruikt om de uitwerking zoals deze thans is uitgewerkt in de 'Leidraad Rivieren' en het 'Advies voor Zee- en Meerdijken' in te vullen.

Het resultaat hiervan is gegeven in tabel 4.4 waarbij het laatstgenoemde advies tussen haakjes is weergegeven.

	Relevante onzekerheden				
	Klimaat ontwikkeling	Zwaardere normering	Inzichten/Kennis		Morfologische onzekerheid
			Inzicht/data	Kennis/proces	
Referentieontwerp	X	nee	nee	nee	nee
Robuust ontwerp	X	nee	h+0,3 m (H en T +10%)		
Uitbreidbaarheid	Geen specificatie				
Ruimtereservering	Niet benoemd				

Tabel 4.4: Huidige invulling op basis van 'Leidraad Rivieren' (en 'Advies Zee- en Meerdijken').

In de 'Leidraad Rivieren' is de robuustheidstoetsing voor het referentieontwerp vormgegeven door de waterstand met 0,3 m te verhogen. Deze waarde is te beschouwen als het gecombineerde effect van inzichten/kennis en morfologische onzekerheid.

Ten aanzien van de klimaatontwikkeling is er dus geen sprake van een verschil tussen het referentieontwerp en het robuuste ontwerp. Ook voor het robuuste ontwerp wordt de gemiddelde klimaatontwikkeling (waterstandstijging) in rekening gebracht.

Voor de uitbreidbaarheid worden zowel een (ongunstiger) klimaatontwikkeling, een zwaardere normering als nieuwe inzichten en kennis genoemd. Er is echter bewust gekozen om hierin geen rekenregels te geven voor de uitbreidbaarheid vanwege het



zeer lokaal gebonden aspecten. Ten aanzien van de langere termijn ruimtereservering zijn geen nadere specificaties gegeven.

In het 'Advies Zee- en Meerdijken' is alleen invulling gegeven aan de robuustheids-toeslag in de vorm van een 10%'s toename van de golfhoogte (H) en de golfperiode (T). Een invulling voor uitbreidbaarheid of ruimtereservering is niet gegeven.

## 5 Kwantificering relevante onzekerheden

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is een kwantificering gegeven van de voor de invulling het robuustheidsbegrip voor de kust relevante onzekerheden.

Achtereenvolgens komen daarbij aan de orde de voor de verdere uitwerking gehanteerde uitgangspunten, een overzicht van de relevante onzekerheden en de daadwerkelijke kwantificering van deze onzekerheden

### 5.2 Uitgangspunten voor uitwerking

Mede op basis van de in de vorige hoofdstukken gegeven uitwerkingen kunnen hierbij een aantal meer algemene, achterliggende uitgangspunten van toepassing worden verklaard. Deze uitgangspunten zijn dus zoveel mogelijk in lijn met de eerdere uitwerkingen voor de 'rivier-robuustheid'.

In overzicht gaat het daarbij om de volgende punten:

- De voor de invulling van robuustheid(stoeslag) te hanteren stuurparameters hebben primair betrekking hebben op de belasting cq. de te gebruiken hydraulische condities;
- Het startpunt wordt gevormd door de thans vigerende maatgevende hydraulische condities en rekenmodellen zoals deze voor het toetsen van een waterkering moeten worden gebruikt;
- Uitgangspunt voor de ontwerprandvoorwaarden is het zogenaamde referentieontwerp voor de situatie met een gedurende de planperiode gemiddelde klimaatontwikkeling;
- Om te komen tot een robuust ontwerp moet een robuustheidstoeslag worden gedefinieerd;
- De grootte van deze robuustheidstoeslag hangt samen met de (per watersysteem en waterkeringstype) relevante onzekerheden;
- Deze onzekerheden mogen niet worden gestapeld (dus niet de som van alle relevante onzekerheden). De te hanteren grootte dient te worden gebaseerd op een samengestelde onzekerheid en is in principe in de orde grootte van de gecombineerde standaardafwijking;
- Het ontwerp wordt daarmee dus niet gedimensioneerd met een verwachtingswaarde als randvoorwaarde (referentieontwerp), maar met een toeslag voor de standaardafwijking (robuust ontwerp).  
Er wordt dus feitelijk gerekend met een 'ontwerpwaarde' of 'karakteristieke waarde' in plaats van met de verwachtingswaarde;
- In aanvulling hierop dient ook te worden nagegaan of het ontwerp voldoende uitbreidbaar is, ofschoon het geven van algemeen toepasbare uitwerkingen hiervoor lastig lijkt.

### 5.3 Overzicht relevante onzekerheden

In tabel 5.1 zijn de relevante combinaties van de robuustheidscomponenten en onzekerheden nog eens samengebracht.

Daarbij zijn de uitbreidbaarheidscomponenten (korte termijn uitbreidbaarheid en lange termijn ruimtereservering) apart benoemd.

	Relevante onzekerheden				
	Klimaat ontwikkeling	Zwaardere normering	Inzichten/Kennis		Morfologische onzekerheid
			Inzicht/data	Kennis/proces	
Referentieontwerp	X	nee	nee	nee	nee
Robuust ontwerp	XX	nee	X	X	X
Uitbreidbaarheid	XXX	X	XX	XX	XX
Ruimtereservering	XXXX	XX	XXX	XXX	XXX

Tabel 5.1: Relevante combinaties van robuustheidscomponenten en onzekerheden.

Voor een goede definitie van het begrip 'robuust totaalontwerp' is in deze tabel is per robuustheidscomponent aangegeven in hoeverre rekening moet worden gehouden met de verschillende onzekerheden. De wijze waarop zal nog moeten worden gespecificeerd. In het volgende zijn de onzekerheden 'kolomsgewijs' behandeld. In alle gevallen is gezocht naar een kwantificering van de standaardafwijking

## 5.4 Onzekerheid klimaatontwikkeling

### 5.4.1 Inleiding

Ten aanzien van de klimaatontwikkeling zijn in het kader van de 'Leidraad Zandige Kust' een aantal klimaatscenario's gedefinieerd [TAW, 2002]. Voor de voorliggende uitwerking zijn daarbij zowel het midden- en het maximumscenario van belang. Het verschil tussen beide wordt in deze beschouwd als een geschikte maat voor de onzekerheid (standaardafwijking) van de zeespiegelstijging.

### 5.4.2 TAW-scenario's

In tabel 5.2 zijn de relevante getalswaarden voor wat betreft de waterstandsmutatie samengebracht.

Zichtperiode	Middenscenario	Maximumscenario		
	zeespiegelstijging	zeespiegelstijging	extra stormopzet	toename MHW
50 jaar	+0,30 m	+0,45 m	+0,40 m	+0,85 m
100 jaar	+0,60 m	+0,85 m	+0,40 m	+1,25 m
200 jaar	+1,20 m	+1,70 m	+0,40 m	+2,10 m

Tabel 5.2: Overzicht toename maatgevende hoogwaterstand voor relevante TAW-scenario's [TAW, 2002].

Het middenscenario (met een zeespiegelstijging van 0,60 m/eeuw) kan worden gebruikt voor het referentieontwerp van een waterkering. Het zwaardere maximumscenario (met een gemiddelde zeespiegelstijging van 0,85 m/eeuw) kan worden gebruikt als indicatie voor de bovengrens van de te verwachten ontwikkelingen.<sup>\*)</sup>

In het maximumscenario wordt tevens rekening gehouden met het effect van een ongunstige mutatie in het windklimaat [TAW, 2002]. Dit heeft, naast een toename in de diepwatergolfhoogte, via een toename van de stormopzet ook een extra toename van de maatgevende hoogwaterstand van 0,40 m tot gevolg. Voor een zichtperiode van

<sup>\*)</sup> Inmiddels is ook het advies van de Deltacommissie beschikbaar waarin gebruik wordt gemaakt van een plausibele bovengrens ('high-end' scenario) van de zeespiegelstijging van 1,10 m per eeuw (exclusief bodemdaling). Ten opzichte van de verwachte stijging van 0,60 m per eeuw (middenscenario) is dit 0,50 m per eeuw extra. Omdat de commissie zich grofstoffelijk heeft gericht op de 95 %'s overschrijdings-waarde heeft deze 0,50 m dus betrekking op 1,65 maal de standaardafwijking. Langs deze weg leidt dit tot een standaardafwijking van circa 0,30 m een waarde die aansluit bij het verschil tussen het maximum en het midden scenario (0,25 m).

50 jaar leidt dit tot een toename in de maatgevende hoogwaterstand van 0,85 m ten opzichte van de huidige situatie.

Ofschoon er hierbij feitelijk geen uitspraak wordt gedaan over de golfperiode, is het alleszins reëel om hierbij ook een zekere toename van de golfperiode te veronderstellen. Indien daarbij wordt uitgegaan van een gelijkblijvende golfsteilheid leidt dit tot een toename van de golfperiode op dieper water met 2,5 %.

De mutaties in de golfaanval op dieper water zijn per scenario samengebracht in tabel 5.3.

Zichtperiode	Middenscenario		Maximumscenario	
	golfhoogte	golfperiode	golfhoogte	golfperiode
N.v.b.	ongewijzigd	ongewijzigd	+5 %	+2,5 %

Tabel 5.3: Overzicht toename maatgevende golfaanval op dieper water voor relevante TAW-scenario's [TAW, 2002].

Hierbij dient te worden benadrukt dat het hierbij specifiek gaat om de mutaties van de golfaanval op diep water (rond de NAP-20 m dieptelijn). Deze kunnen direct worden gebruikt voor de belasting van een zandige kering (duin), maar niet voor de belasting op een dijk omdat hier juist de condities aan de teen van de dijk maatgevend zijn.

#### 5.4.3 Definitie onzekerheden

Uitgaande van het middenscenario voor het referentieontwerp kan het verschil tussen het maximum- en middenscenario worden gebruikt als indicatie voor de onzekerheid in de klimaatontwikkeling. Deze komt dus tot uitdrukking in een iets grotere zeespiegelstijgingsnelheid (0,85 in plaats van 0,60 m/eeuw, ofwel 0,25 m voor een zichtperiode van 100 jaar) en een extra verhoging van de maatgevende waterstand.

#### 5.4.4 Overzicht onzekerheid maatgevende waterstanden

Uitgaande van deze insteek bedraagt de onzekerheid in de zeespiegelstijging nu dus 0,25 m/eeuw (afgerond 40 % van de verwachtingswaarde) en neemt deze dus in absolute zin in de tijd toe. De onzekerheid in de stormopzet bedraagt 0,40 m. De aldus gedefinieerde onzekerheden in de maatgevende waterstand zijn per zichtperiode samengebracht in tabel 5.4.

Zichtperiode	Onzekerheid maatgevende waterstand		
	bijdrage zeespiegelstijging	bijdrage extra stormopzet	totale toename MHW
50 jaar	0,15 m	0,40 m	0,55 m
100 jaar	0,25 m	0,40 m	0,65 m
200 jaar	0,50 m	0,40 m	0,90 m

Tabel 5.4: Overzicht onzekerheid maatgevende hoogwaterstand (op basis van [TAW, 2002]).

De totaal in rekening te brengen onzekerheid op de maatgevende hoogwaterstand is gegeven in de rechter kolom van deze tabel. Voor een zichtperiode van 50 jaar bedraagt deze dus 0,55 m.

#### 5.4.5 Overzicht onzekerheid golfaanval op diep water

Op soortgelijke wijze kan invulling worden gegeven aan de onzekerheid in de golfaanval op dieper water. Het resultaat hiervan is gegeven in tabel 5.5.



Zichtperiode	Onzekerheid golfaanval	
	golfhoogte	golfperiode
N.v.b.	+5 %	+2,5 %

Tabel 5.5: Overzicht onzekerheid golfaanval op diep water (op basis van [TAW, 2002]).

Voor een significante golfhoogte van 7 tot 12 m leidt dit tot een onzekerheid van afgerond 0,4 tot 0,6 m. Voor de golfperiode (indicatief bereik piekwaarde van 12 tot 16 s) levert dit een toename van 0,3 tot 0,4 s.

## 5.5 Onzekerheid normstelling

### 5.5.1 Inleiding

In de huidige benadering vormt het ontwerppeil behorende bij een overschrijdingsfrequentie van  $10^{-4}$  per jaar een belangrijk uitgangspunt.

Niet zeker is of deze 'norm' ook op langere termijn gehandhaafd zal blijven. Het is immers niet uitgesloten dat vanwege de toegenomen/toenemende economische waarde van het achterland de nog te accepteren faalkans van een waterkering naar beneden zal moeten worden bijgesteld. Feitelijk leidt dit tot een verhoging van de maatgevende waterstand en een verzwarend van de daarbij behorende condities.

In de voorliggende uitwerking is uitgegaan van een factor 10 zwaardere norm. De hiermee samenhangende mutaties van de maatgevende waterstand, de golfhoogte en de periode zijn vervolgens aangemerkt als een goede indicatie voor de in rekening te brengen 'normstellings-onzekerheid'.

### 5.5.2 Waterstandsmutatie

Voor het vertalen van een dergelijke normaanpassing in een aanpassing van de hydraulische condities is voor de waterstand de relatie tussen overschrijdingsfrequentie en stormvloedpeil van belang. Een factor 10 in de overschrijdingsfrequentie leidt tot een locatie-afhankelijke, toename van de waterstand. Deze zogenaamde decimeringshoogte bedraagt voor bijvoorbeeld Hoek van Holland circa 0,8 m en voor Den Helder circa 0,5 m. Voor deze uitwerking is gewerkt met een karakteristieke gemiddelde decimeringshoogte van 0,65 m. Een factor 10 kleinere overschrijdingskans resulteert dus in een 0,65 m hogere maatgevende waterstand.

### 5.5.3 Golfhoogtemutatie

Bij een hogere waterstand behoort ook een hogere golf. Voor het kwantificeren van dit effect is de relatie tussen waterstand en de gemiddelde golfhoogte van belang. Deze relatie is enigszins afhankelijk van de locatie langs de kust. Ofschoon voor een gegeven waterstand de golfhoogte per locatie hierbij behoorlijk kan verschillen, is de toename in de golfhoogte per meter waterstandverhoging nagenoeg onafhankelijk van de locatie. Voor het hogere waterstandsbereik is deze zelfs geheel onafhankelijk van de waterstand.

Hier leidt een meter waterstandsverhoging tot 0,60 m toename in de golfhoogte. Deze factor komt overigens overeen met de ook voor de lokale aanval bij harde constructie gehanteerde factor.

Een waterstandsstijging van 0,65 m (een factor 10) resulteert dus in een golfhoogte-toename van 0,60 maal 0,65 m is 0,40 m.

### 5.5.4 Golfperiodemutatie

Bij een hogere golf hoort ook een grotere golfperiode. Uit de relaties tussen golfhoogte en piekperiode volgt dat een meter toename in de golfhoogte leidt tot een toename in de piekperiode van 1,1 s.

Een toename van 0,40 m in de golfhoogte heeft dan ook een 0,40 m maal 1,1 s/m is (afgerond) 0,4 s toename in de golfperiode tot gevolg.

### 5.5.5 Overzicht onzekerheden normstelling (diepwater condities)

Tabel 5.6 geeft een overzicht van de aldus bepaalde 'normstellings-onzekerheid' waarbij met name de toegenomen maatgevende waterstand relatief gezien belangrijk is.

Zichtperiode	Onzekerheid normstelling		
	MHW	golfhoogte	golfperiode
> 50 jaar	0,65 m	0,40 m	0,4 s

Tabel 5.6: Overzicht onzekerheid a.g.v. aanscherping normstelling.

In deze tabel is voor de zichtperiode aangegeven dat deze betrekking heeft op minimaal 50 jaar, dit omdat de effecten van een aanscherping van de normstelling buiten de eerste component van de robuustheid worden gehouden. Het effect van een aangepaste normstelling zal wel worden meegenomen in de uitbreidbaarheidsbeoordeling.

Hierbij dient wederom te worden benadrukt dat het hierbij specifiek gaat om de mutaties van de golfaanval op diep water (rond de NAP-20 m dieptelijn). Deze kunnen wel worden gebruikt als maat voor de belasting van een zandige kering (duin) maar niet voor de belasting op een dijk.

## 5.6 Statistische onzekerheden (inzichten, data)

### 5.6.1 Inleiding

Voor het definiëren van klimaatstatistiek wordt gebruik gemaakt van relaties tussen de verwachtingswaarde van de waterstand als functie van de overschrijdingskans, de verwachtingswaarde van de golfhoogte als functie van waterstand en de verwachtingswaarde van de golfperiode als functie van de golfhoogte.

### 5.6.2 Relevante relaties

Aan deze beschrijvingen liggen statistische beschrijvingen ten grondslag. Het is natuurlijk niet uit te sluiten dat het op enige termijn beschikbaar komen van meer en/of andere meetgegevens tot een aanpassing van deze statistische relaties zal leiden.

Voor de statistische onzekerheid in de waterstand is een karakteristieke waarde van 0,50 m aangehouden. De in rekening te brengen standaardafwijkingen voor de golfaanval zijn respectievelijk 0,60 m voor de golfhoogte en 1,0 s voor de golfperiode, dit overeenkomstig de gangbare waarden.

### 5.6.3 Overzicht statistische onzekerheden

Tabel 5.7 geeft een overzicht van de aldus veronderstelde statistische onzekerheden.

Zichtperiode	Onzekerheid statistiek		
	MHW	golfhoogte	golfperiode
N.v.b.	0,50 m	0,60 m	1,0 s

Tabel 5.7: Overzicht statistische onzekerheid.

De zichtperiode is hier niet van belang.

## 5.7 Modelonzekerheden (kennis, processen)

### 5.7.1 Inleiding

Voor de kwantificering van het effect van de belasting op de waterkering moet gebruik worden gemaakt van de meest recente versie van de relevante rekenmodellen.

Een van de relevant geachte onzekerheden heeft betrekking op de mogelijk nieuwe inzichten in de modellering. De verdere uitwerking hangt daarbij dus sterk af van aard van het gebruikte rekenmodel en daarmee dus ook van het type waterkering.

### 5.7.2 Relevante modellen

Voor de dimensionering van duinwaterkeringen kan gebruik worden gemaakt van het VTV-2006 model. Dit recent opgeleverde rekenmodel is gebaseerd op het oorspronkelijke VTV2001-model. Met het model kan ook het effect van langere golfperiodes worden doorgerekend.

Voor de dijken kan gebruik worden gemaakt van de meest recente versie van het PC-OVERSLAG model. Met dit model is het onder andere mogelijk om, voor een gegeven geometrie en hydraulische belasting, de voor een bepaald kritiek overslagdebiet benodigde kruinhoogte uit te rekenen. Overigens wordt er voor de vertaling van de diepwatercondities naar de locatie bij de teen van de dijk ook gebruik gemaakt van een rekenmodel. Ook dit SWAN-model is natuurlijk onderhevig aan onzekerheden.

### 5.7.3 Kwantificering modelonzekerheid

In zowel het duinafslag- als het overslagmodel is sprake van een zekere standaardwaarde voor de modelonzekerheid. Als maat voor de onzekerheid zou kunnen worden uitgegaan van een bepaald percentage (bijvoorbeeld de helft) van de standaardonzekerheid.

Voor het duinafslagmodel betekent dit dan dat de reguliere modelonzekerheid, zijnde 15 % van de basisafslag met een factor 1,5 wordt vermenigvuldigd, resulterend in 22,5 % onzekerheid. Deze (extra) onzekerheid kan vervolgens verwerkt in de vorm van een (extra) toeslag op de basisafslag. Deze extra afslag leidt tot een extra landwaartse verschuiving van het afslagpunt.

Standaard wordt er bij een overslagberekening rekening gehouden met een zekere modelonzekerheid. Deze onzekerheid vraagt impliciet om een hogere kruin. Het verschil in de met en zonder onzekerheid berekende kruinhoogte is daarbij een maat voor de reguliere onzekerheid. Verkennende uitwerkingen geven aan dat dit leidt tot een verschil van 1 m in de benodigde kruinhoogte. Een dergelijke maat zou ook kunnen worden gebruikt om het effect van onzekerheden in de modellering in rekening te brengen.

### **5.7.4 Overzicht modelonzekerheden**

In verhouding tot de andere onzekerheden is het kwantificeren van modelonzekerheden lastig. Deze hangen immers direct af van het gebruikte model en soort waterkering en zijn bovendien niet gekoppeld aan de hydraulische condities zoals dat bij de andere onzekerheden veelal wel het geval is.

## **5.8 Morfologische onzekerheden**

### **5.8.1 Inleiding**

De morfologische onzekerheid heeft betrekking op de toekomstige ontwikkeling van de vooroever en komt tot uitdrukking in het op termijn verwachte niveau van het voorland. De uitwerking is sterk afhankelijk van zowel de aard van de constructie als de lokale omstandigheden.

In het volgende komen eerst de reguliere ontwikkelingen aan de orde.

### **5.8.2 Reguliere ontwikkeling voor zandige keringen**

Onder normale omstandigheden kan bij het dimensioneren van zachte waterkeringen worden uitgegaan van een met de gemiddelde zeespiegel meestijgende bodem. Dit als resultaat van een combinatie van het met de gemiddelde zeespiegel meestijgende evenwichtsprofiel en het in het kader van het BKL-beleid uitgevoerde kustonderhoud. In de standaard berekeningen dient dus ook te worden uitgegaan van het met de gemiddelde zeespiegel meestijgen van het beneden de duinvoet gelegen kustdeel. In de duinafslag-berekeningen heeft dit een direct effect op de sedimentbalans. Zonder deze ophoging zou het maatgevende afslagpunt verder landwaarts zijn gelegen. Het niet in beschouwing nemen van het meestijgen van de vooroever kan overigens worden gezien als een onrealistisch scenario, dus wat betreft dit aspect is er nauwelijks sprake van enige onzekerheid.

In het thans vigerende rekenmodel heeft de ligging van de diepere vooroever overigens geen enkel effect; ook niet op de belasting van de kering.

### **5.8.3 Reguliere ontwikkeling voor harde waterkeringen**

Voor een harde constructie geldt de eerder beschreven koppeling niet en mag dus niet worden gerekend met een meestijgende bodem. In de praktijk betekent dit dat de waterdiepte voor de dijk als gevolg van zeespiegelstijging toeneemt. Omdat de golfaanval op de teen in principe dieptebeperkt is, leidt deze relatieve verdieping vervolgens weer tot een toename van de golfaanval (golfhoogte) op de constructie.

### **5.8.4 Locatiespecifieke ontwikkeling voor zandige keringen**

Omdat de nabije vooroever in principe wordt gevoed door het reguliere kustonderhoud en de golfcondities niet worden beïnvloed door de morfologie van de diepere vooroever behoeft in principe geen rekening te worden gehouden met de effecten van onzekerheden in deze morfologische ontwikkelingen.

### **5.8.5 Locatiespecifieke ontwikkeling voor harde keringen**

De morfologie van de vooroever voor harde keringen heeft een direct effect op de golfbelasting van de kering. Een verlaging van de vooroever leidt daarmee onherroepelijk tot een vergroting van de maatgevende golfaanval. Anders dan bij zachte keringen is het dus zaak om in een bepaalde mate rekening te houden met een dergelijke omstandigheden.



Het mag duidelijk zijn dat een hiervoor benodigde uitwerking zeer afhankelijk is van de lokale situatie en met name afhangt van de vorm van de vooroever.

Enige verandering op een min of meer uniform hellende bodem heeft in deze slechts een beperkt effect. Indien er zich op de vooroever echter een bank bevindt die als gevolg van de hiermee samenhangende lokale ondiepte zorgt voor een grote bijdrage aan de reductie van de van diep water inkomende golf, wordt dit gegeven belangrijker. Een dergelijke situatie doet zich bijvoorbeeld voor bij de Hondsbossche en Pettemer Zeewering alwaar de hoogte van de zich op 300 m uit de dijk bevindende bank feitelijk bepalend is voor de golfaanval op de dijk.

### **5.8.6 Overzicht morfologische onzekerheden**

Ten aanzien van de morfologie dient afhankelijk van de aard van de kering uit te worden gegaan van een al dan niet met de gemiddelde zeespiegel (en dus niet de maatgevende waterstand) meestijgende vooroever. Voor een zandige kering is dit wel het geval, voor een harde kering niet.

Qua onzekerheid is de morfologie van de vooroever in het geval van een zandige kering minder relevant. Veel meer aandacht verdient de onzekerheid in de bodemligging voor een harde kering, zeker op het moment dat er hier sprake is van golfinvalbepalende bodemvormen.

## 6 Definitie robuust ontwerpen voor de kust

### 6.1 Algemene begripsdefinitie

Er kan wederom gebruik kan worden gemaakt van de (nu dus als breder toepasbaar verklaarde) algemene definitie van het robuustheidsbegrip.

Deze luidt:

“Goed (robuust) ontwerpen betekent: in het ontwerp rekening houden met *toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden*, zodat het uitgevoerde ontwerp tijdens de *planperiode* blijft *functioneren* zonder dat ingrijpende en kostbare aanpassingen noodzakelijk zijn, en dat het ontwerp *uitbreidbaar* is indien dat economisch verantwoord is”.

Deze definitie is hiermee dus ook van toepassing voor waterkeringen aan de kust, al zal de uitwerking op onderdelen natuurlijk specifiek gericht moeten zijn op het watersysteem kust en bovendien nog verschillen per waterkeringstype (duin of dijk).

### 6.2 Stapsgewijze invulling

Een ‘robuust totaalontwerp’ omvat (uitgaande van een referentieontwerp) drie verschillende onderdelen, te weten:

- Een robuust ontwerp waarbinnen onzekerheden binnen de planperiode voor het grootste deel kunnen worden opgevangen;
- Een uitbreidbaar ontwerp waarbij reeds geanticipeerd wordt op een volgende versterkingsronde;
- Voldoende ruimtereservering voor langere termijn versterkingen.

Het robuuste ontwerp kan als uitgangspunt worden gebruikt voor het daadwerkelijke ontwerp. De beide andere onderdelen kunnen worden gebruikt om de uitbreidbaarheid op zowel korte als langere termijn te toetsen.

### 6.3 Uitgangspunt: het referentieontwerp

Voor het referentieontwerp geldt dat gebruik moet worden gemaakt van het midden-scenario voor klimaatontwikkeling in combinatie met een zichtperiode van 50 jaar. Dit levert dus een ontwerp waarvoor de kans dat het ontwerp aan het eind van de planperiode alsnog niet zal blijken te voldoen feitelijk te groot is omdat onvoldoende rekening is gehouden met onzekerheden in de toekomstige ontwikkelingen.

Voor duinwaterkeringen leidt dit tot de in tabel 6.1 gegeven mutaties ten opzichte van thans vigerende hydraulische condities.

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Mutatie eind planperiode	+ 0,30 m	-	-

Tabel 6.1: Randvoorwaardenmutatie t.b.v. referentieontwerp voor duinwaterkeringen (50 jaar).

Een soortgelijk overzicht voor de harde constructies is gegeven in tabel 6.2.

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Mutatie eind planperiode	<b>+ 0,30 m</b>	<b>+ 0,20 m</b>	-

Tabel 6.2: Randvoorwaardenmutatie t.b.v. referentieontwerp voor harde waterkeringen (50 jaar).

Omdat de golfhoogte aan de teen van de constructie dieptebeperkt is en de bodem niet wordt verondersteld mee te stijgen met de gemiddelde zeespiegel, leidt deze waterstandsmutatie tot een vergroting van de maatgevende golfhoogte. Deze vergroting volgt uit het product van de brekingsindex (factor 0,6) en de waterstandsmutatie (0,30 m) en bedraagt afgerond 0,20 m.

## 6.4 Robuust ontwerp (robustheidstoeslag)

### 6.4.1 Algemeen

Een robuust ontwerp kan worden verkregen door ten opzichte van het referentieontwerp een extra verzwaring van de hydraulische condities in rekening te brengen. Deze robustheidstoeslag kan worden gebaseerd op eerder gekwantificeerde onzekerheden en heeft betrekking op een planperiode van 50 jaar. Hierbij is expliciet onderscheid gemaakt tussen de uitwerking voor de zachte waterkeringen (duinen) en de harde waterkeringen (dijken).

### 6.4.2 Duinwaterkeringen (zachte waterkeringen)

Hierbij kan gebruik worden gemaakt van het in tabel 6.3 gegeven overzicht. In dit geval zijn daarbij de randvoorwaarden op dieper water bepalend daar deze direct als invoer in het vigerende toetsingsmodel kunnen worden ingevoerd.

Onzekerheidsbijdrage	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Klimaat	+ 0,55 m	+ 5 % (= 0,4 à 0,6 m)	+ 2,5 % (0,3 à 0,4 s)
Normstelling	wordt in robustheidstoeslag niet meegenomen		
Inzicht/statistiek	+ 0,50 m	+ 0,6 m	+ 1,0 s
Kennis /processen	niet uit te drukken in mutaties van condities voor duinafslagmodel		
Morfologie	-	-	-
<i>Gesommeerd</i>	<i>+ 1,05 m</i>	<i>1,0 à 1,2 m (8 à 15 %)</i>	<i>1,3 à 1,4 s (8 à 12 %)</i>
Samengesteld	<b>+ 0,55 m</b>	<b>10 %</b>	<b>5 %</b>

 Tabel 6.3: Samenstelling onzekerheden t.b.v. robustheidstoeslag voor zachte waterkeringen / duinen (50 jaar).

In de eerste regels van deze tabel zijn de resultaten van de in hoofdstuk 5 uitwerkingen samengebracht.

De normstelling speelt voor het robuuste ontwerp nog geen rol.

Ten aanzien van de kennis en processen zijn de effecten niet direct uit te drukken in mutaties van de hydraulische condities hetgeen de samenstelling wat lastig maakt. De onzekerheid in de morfologie wordt hierin als niet relevant meegenomen. In alle gevallen moet overigens wel worden gerekend met een met de gemiddelde zeespiegelstijging meestijgende vooroever.

Voor de waterstand zou het gesommeerde effect leiden tot een waterstandsmutatie van ruim 1 m. Gegeven het feit dat de voornaamste bijdrage aan de waterstandstoename voor de klimaatonzekerheid (feitelijk 0,15 m plus 0,40 m; zie tabel 5.4) gekoppeld is aan de gewijzigde windstatistiek, is de 0,40 m extra stormopzet sterk gerelateerd aan de

0,50 m waterstandonzekerheid. Sommatie van deze deelbijdragen (0,40 m plus 0,50 m is 0,90 m) is daarom niet aan de orde.

Een meer reële samengestelde waarde zou derhalve zijn de som van de onzekerheid in de zeespiegelstijging van 0,15 m en een waterstandonzekerheid van 0,40 à 0,50 m, dus totaal iets in de orde van 0,55 à 0,65 m.

Gezien de slechts geringe afwijking van het door de TAW vastgestelde maximum scenario wordt voorgesteld om voor de gecombineerde waterstandonzekerheid aan te sluiten bij de oorspronkelijke waarde van 0,55 m. Deze waarde is dan ook opgenomen in de laatste rij van de tabel.

Rekening houdend met het hierin nog niet direct kunnen betrekken van de model-onzekerheden wordt voorgesteld om juist voor de golfhoogte en golfperiode gebruik te maken van een relatief ongunstige combinatie van de wel gekwantificeerde onzekerheidsbijdragen. Dit betreft immers het gecombineerde resultaat van het effect van een ongunstige windklimaatmutatie en de reguliere onzekerheid in de golfhoogtestatistiek. In het duinafslagmodel leidt een relatieve toename van zowel de golfhoogte als de golfperiode tot een toename van de hoeveelheid afslag. Het inbouwen van enige extra buffer lijkt bovendien verstandig met het oog op andere nog niet in rekening gebrachte effecten (bijvoorbeeld de stormduur).

Voor de golfhoogte leidt de sommatie van het effect van een ongunstige windklimaatmutatie en de reguliere onzekerheid in de golfhoogtestatistiek tot een toename van 8 tot 15 %. Voorgesteld wordt hierbij om uit te gaan van een (nog relatief voorzichtige) mutatie van 10 % en dus niet gelijk de bovengrens aan te houden. Deze waarde is dan ook opgenomen in de laatste rij van de tabel.

Voor de golfperiode zou eenzelfde uitwerking kunnen worden gevolgd. Dit zou eveneens leiden tot een periodetoeename van 10 %. Gezien de fysische relatie tussen golfhoogte en golfperiode wordt echter voorgesteld om uit te blijven gaan van een gelijkblijvende golfsteilheid en dus de in rekening te brengen golfperiode-toename te beperken tot 5 % (zie onderste rij van de tabel).

Samenvattend wordt aldus qua waterstand aangesloten op de TAW-invulling van het maximumscenario. Voor de golfaanval wordt een verdubbeling van de oorspronkelijke TAW-waarden voorgesteld (in plaats van 5 % nu dus 10 % zwaardere golven).

### **6.4.3 Dijken (harde waterkeringen)**

Voor dijken is de uitwerking in grote mate vergelijkbaar met die van de zachte keringen, dit met uitzondering van de kwantificering van de golfhoogte. Deze is gekoppeld aan de waterstandsmutatie en volgt uit het product met de brekingsindex.

Tabel 6.4 geeft hierbij het resultaat van de samenstelling van de robuustheidstoelag.



Onzekerheidsbijdrage	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Klimaat	+ 0,55 m	0,35 m	+ 2,5 % (0,3 à 0,4 s)
Normstelling	wordt in robuustheidstoeslag niet meegenomen		
Inzicht/statistiek	+ 0,50 m	0,30 m	+ 1,0 s
Kennis /processen	niet uit te drukken in mutaties van condities voor overslagmodel		
Morfologie	-	afh. van lokale situatie	-
<i>Gesommeerd</i>	+ 1,05 m	+ 0,65 m + lokaal effect	1,3 à 1,4 s (8 à 12 %)
Samengesteld	<b>+ 0,55 m</b>	<b>+ 0,35 m + lokaal effect</b>	<b>5 %</b>

Tabel 6.4: Samenstelling onzekerheden t.b.v. robuustheidstoeslag voor harde waterkeringen / dijken (50 jaar).

Een andere afwijking heeft betrekking op de onzekerheid in de lokale morfologie. De grootte van dit effect is afhankelijk van de lokale situatie en kan worden gekwantificeerd door de onzekerheid (spreiding) in de ligging van de vooroever te relateren aan de hieruit volgende spreiding in de golfhoogte bij de dijk.

Ten aanzien van de samengestelde waterstand geldt dus dezelfde argumentatie als gegeven voor de zachte keringen.

Voor de golfhoogte leidt dit afgezien van het lokale effect van de morfologie tot een samengestelde golfhoogtetoeename van 0,35 m.

Het extra in rekening te brengen effect van de onzekere morfologie hangt sterk af van de lokale situatie. In meer algemene zin zou de golfhoogtemutatie echter gelijk kunnen worden gesteld aan het product van de tijdsvariatie in de bodemligging en de eerder genoemde brekingsindex. Voor het specifieke geval met een voor de dijk aanwezige bank moet daarbij dus worden gekeken naar de spreiding van het maximale bankniveau in de tijd ten opzichte van de voor de afleiding van de huidige randvoorwaarden (HR2006) gehanteerde bodemligging. Indien de HR2006 waarden zijn bepaald met een zeer ongunstige, laaggelegen bodem hoeft de onzekerheid natuurlijk niet in rekening te worden gebracht. Is echter gebruik gemaakt van een gemiddelde of relatief gunstige, hooggelegen bodem, dan moet hiermee expliciet rekening worden gehouden.

Uitgaande van de veronderstelling dat een mutatie op dieper water onverkort doorwerkt op de golfperiode aan de teen van de dijk geldt voor de golfperiode ook de bij de zachte waterkeringen gegeven argumentatie.

Samenvattend wordt aldus qua waterstand wederom aangesloten op de TAW-invulling van het maximumscenario. Voor de golfhoogte wordt een absolute toename van *tenminste* 0,35 m voorgesteld. Afhankelijk van de grootte van de reguliere golfhoogte (zeg 3 tot 5 m) leidt dit tot een verhoging van *tenminste* 5 tot 10 %.

#### 6.4.4 Overzicht robuustheidstoelagen

Tabel 6.5 geeft een overzicht van de aldus vastgestelde robuustheidstoelagen voor zowel de zachte als de harde waterkeringen.

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Zacht / duinen	<b>+ 0,55 m</b>	<b>10 %</b>	<b>5 %</b>
Hard / dijken	<b>+ 0,55 m</b>	<b>+ 0,35 m + lokaal effect</b>	<b>5 %</b>

Tabel 6.5: Overzicht robuustheidstoelagen voor zachte en harde waterkeringen (50 jaar).

Het verschil is dus met name gelegen in de te gebruiken golfhoogte welke voor de harde keringen zowel absoluut en afhankelijk van de situatie lokaal bepaald is.

#### 6.4.5 Overzicht randvoorwaarden robuust ontwerp

Combinatie van de randvoorwaarden voor het referentieontwerp en de robuustheids-toeslag leidt het in tabel 6.6 gegeven overzicht van de voor een robuust ontwerp aan te houden hydraulische randvoorwaarden. Het betreft hier overigens de mutatie ten opzichte van de thans vigerende hydraulische randvoorwaarden (HR2006).

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Zacht / duinen	+ 0,85 m	10 %	5 %
Hard / dijken	+ 0,85 m	+ 0,50 m + lokaal effect	5 %

Tabel 6.6: Overzicht randvoorwaarden robuust ontwerp voor zachte en harde waterkeringen (50 jaar).

Ook hier is er slechts sprake van een verschil in de te gebruiken golfhoogten.

### 6.5 Uitbreidbaar ontwerp (korte termijn)

#### 6.5.1 Algemeen

Voor de definitie van de randvoorwaarden welke dienen te worden gebruikt voor de toetsing van het ontwerp op de (korte termijn) uitbreidbaarheid kan in feite dezelfde uitwerking worden gevolgd als voor het in de vorige paragraaf besproken robuuste ontwerp.

Hierbij is echter sprake van een tweetal verschillen, te weten de afwijkende planperiode en het feit dat nu ook rekening moet worden gehouden met een aanscherping van de veiligheidsnorm.

Voor de planperiode wordt nu uitgegaan van een dubbele lengte (dus 100 in plaats van 50 jaar) hetgeen voor het zeespiegelstijgingsdeel van de klimaatonzekerheid resulteert in een 0,10 m hogere waterstand (zie tabel 5.4).

Voor de met de normaanscherping samenhangende extra onzekerheden kan worden verwezen naar paragraaf 5.5 (tabel 5.6).

In het volgende zijn de resultaten voor respectievelijk de zandige en de harde kust uitgewerkt. Hierbij is in eerste instantie de toeslag ten opzichte van de referentiesituatie in beeld gebracht.

#### 6.5.2 Duinwaterkeringen (zachte waterkeringen)

De relevante getalswaarden zijn samengebracht in tabel 6.7 waarbij de wijzingen in de onzekerheidsbijdragen ten opzichte van tabel 6.3 rood zijn gemarkeerd.

Onzekerheidsbijdrage	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Klimaat (100 jaar)	+ 0,65 m	+ 5 % (= 0,4 à 0,6 m)	+ 2,5 % (0,3 à 0,4 s)
Normstelling	+ 0,65 m	+ 0,4 m	+ 0,4 s
Inzicht/statistiek	+ 0,50 m	+ 0,6 m	+ 1,0 s
Kennis /processen	niet uit te drukken in mutaties van condities voor duinafslagmodel		
Morfologie	-	-	-
<i>Gesommeerd</i>	+ 1,80 m	1,4 à 1,6 m (10 à 20 %)	1,7 à 1,8 s (10 à 15 %)
Samengesteld	+ 1,30 m	15 %	7,5 %

Tabel 6.7: Samenstelling onzekerheden t.b.v uitbreidbaarheid voor zachte waterkeringen / duinen (100 jaar).

Ten aanzien van de waterstand leidt de aanpassing van de tijdshorizon (+0,10 m) en het meenemen van de normstellingsonzekerheid (+0,65 m) tot 0,75 m hogere waterstanden. Ten opzichte van de referentiewaarde leidt dit tot een waterstandsmutatie van +1,30 m.

Voor de golfaanval leidt de toevoeging van de normstellingsonzekerheid tot een toename van zowel de golfhoogte als de golfperiode.

Gebruikmakend van een middenschatting van de golfhoogte (tussen de 10 en 20 %) en de aanname van gelijkblijvende golfsteilheid leidt dit tot de in de onderste rij van de tabel gegeven uitgangspunten.

### 6.5.3 Dijken (harde waterkeringen)

De voor de harde waterkeringen gevolgde uitwerking is gegeven in tabel 6.8.

Onzekerheidsbijdrage	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Klimaat	+ 0,65 m	+ 0,40 m	+ 2,5 % (0,3 à 0,4 s)
Normstelling	+ 0,65 m	+ 0,40 m	+ 0,4 s
Inzicht/statistiek	+ 0,50 m	+ 0,30 m	+ 1,0 s
Kennis /processen	niet uit te drukken in mutaties van condities voor overslagmodel		
Morfologie	-	afh. van lokale situatie	-
<i>Gesommeerd</i>	+ 1,80 m	+ 1,10 m + lokaal effect	1,7 à 1,8 s (10 à 15 %)
Samengesteld	+ 1,30 m	+ 0,80 m + lokaal effect	7,5 %

Tabel 6.8: Samenstelling onzekerheden t.b.v uitbreidbaarheid voor harde waterkeringen / dijken (100 jaar).

Het resultaat voor de waterstanden en de golfhoogten sluit aan bij de uitwerking voor de zandige waterkering.

Ten opzichte van de uitwerking voor de robuustheidstoeslag (zie tabel 6.4) is er sprake van een extra verhoging van de golfhoogte als gevolg van de toegenomen zeespiegelstand (+0,05 m) en een extra verhoging als gevolg van de normafhankelijke waterstand (+0,40 m), hetgeen totaal leidt tot een toename van +0,45 m.

### 6.5.4 Overzicht mutatie ten opzichte van referentie

Tabel 6.9 geeft een overzicht van de aldus vastgestelde robuustheidstoelagen voor zowel de zachte als de harde waterkeringen.



	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Zacht / duinen	+ 1,30 m	15 %	7,5 %
Hard / dijken	+ 1,30 m	+ 0,80 m + lokaal effect	7,5 %

Tabel 6.9: Overzicht mutaties uitbreidbaar ontwerp voor zachte en harde waterkeringen (100 jaar).

Het onderlinge verschil is ook hier gelegen in de te gebruiken golfhoogte welke voor de harde keringen zowel absoluut en lokaal bepaald is.

### 6.5.5 Overzicht randvoorwaarden uitbreidbaar ontwerp

Combinatie van de randvoorwaarden voor het referentieontwerp en de robuustheids-toeslag leidt het in tabel 6.10 gegeven overzicht van de voor een uitbreidbaar ontwerp aan te houden hydraulische randvoorwaarden (ten opzichte van de vigerende HR2006-waarden).

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Zacht / duinen	+ 1,60 m	15 %	7,5 %
Hard / dijken	+ 1,60 m	+ 1,00 m + lokaal effect	7,5 %

Tabel 6.10: Overzicht randvoorwaarden uitbreidbaar ontwerp voor zachte en harde waterkeringen (100 jaar).

Ook hier is er slechts sprake van een onderling verschil in de te gebruiken golfhoogten.

## 6.6 Ruimtereservering (lange termijn)

### 6.6.1 Algemeen

Voor de vaststelling van de randvoorwaarden voor de ruimtereservering kan in feite direct gebruik worden gemaakt van de voor de uitbreidbaarheid afgeleide randvoorwaarden. Het enige verschil heeft immers betrekking op het in beschouwing nemen van een langere zichtperiode.

### 6.6.2 Overzicht randvoorwaarden ruimtereservering

Door in plaats van 100 jaar nu de situatie over 200 jaar te gebruiken neemt de maatgevende waterstand met 0,85 m extra toe. Deze waterstandsmutatie leidt voor de harde constructies tot een 0,50 m (is 0,6 maal de waterstandsmutatie) hogere golf bij de constructie. Een en ander leidt tot de in tabel 6.11 samengebrachte hydraulische randvoorwaarden (ten opzichte van de vigerende HR2006-waarden).

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Zacht / duinen	+ 2,45 m	15 %	7,5 %
Hard / dijken	+ 2,45 m	+ 1,50 m + lokaal effect	7,5 %

Tabel 6.11: Overzicht randvoorwaarden ruimtereservering voor zachte en harde waterkeringen (200 jaar).

## 6.7 Overzicht ontwerp randvoorwaarden robuust ontwerpen

Als resultaat van de in het voorafgaande gepresenteerde uitwerkingen zijn in de volgende twee tabellen de voor het ontwerp van aan de kust gelegen waterkeringen te

hanteren hydraulische condities (relatief ten opzichte van de vigerende HR2006-waarden) samengebracht.

Tabel 6.12 geeft het resultaat voor duinwaterkeringen.

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Robuust ontwerp (50 jaar)	+ 0,85 m	10 %	5 %
Uitbreidbaarheid (100 jaar)	+ 1,60 m	15 %	7,5 %
Ruimtereservering (200 jaar)	+ 2,45 m	15 %	7,5 %

Tabel 6.12: Overzicht mutaties hydraulische randvoorwaarden voor robuust totaalontwerp voor zachte waterkeringen / duinen (200 jaar).

De resultaten voor dijken zijn samengebracht in tabel 6.13.

	Waterstand	Golfhoogte	Golfperiode
Robuust ontwerp (50 jaar)	+ 0,85 m	+ 0,50 m + lokaal effect	5 %
Uitbreidbaarheid (100 jaar)	+ 1,60 m	+ 1,00 m + lokaal effect	7,5 %
Ruimtereservering (200 jaar)	+ 2,45 m	+ 1,50 m + lokaal effect	7,5 %

Tabel 6.13: Overzicht mutaties hydraulische randvoorwaarden voor robuust totaalontwerp voor harde waterkeringen / dijken (200 jaar).

## 6.8 Financiële afwegingen

In de algemene definitie van robuust ontwerpen is reeds aangegeven dat tenminste ten aanzien van de uitbreidbaarheid geldt dat deze economisch verantwoord dient te zijn.

In meer algemene termen geldt dat laatste natuurlijk voor het gehele robuustheidsconcept. Er worden immers nu al kosten gemaakt voor het ten opzichte van een basisontwerp gewenste verzwaring van het ontwerp die anders pas op enige termijn zouden optreden. Puur financieel vraagt dit om een afweging tussen enerzijds nu extra investeren en anderzijds het op de bank zetten van de aan deze extra investering verbonden gelden om hiermee op termijn de extra versterking te kunnen financieren.

De hier mee samenhangende afweging is in principe echter onafhankelijk van het beschouwde watersysteem. In het kader van deze notitie is dan ook aan dit meer algemene aspect geen aandacht.

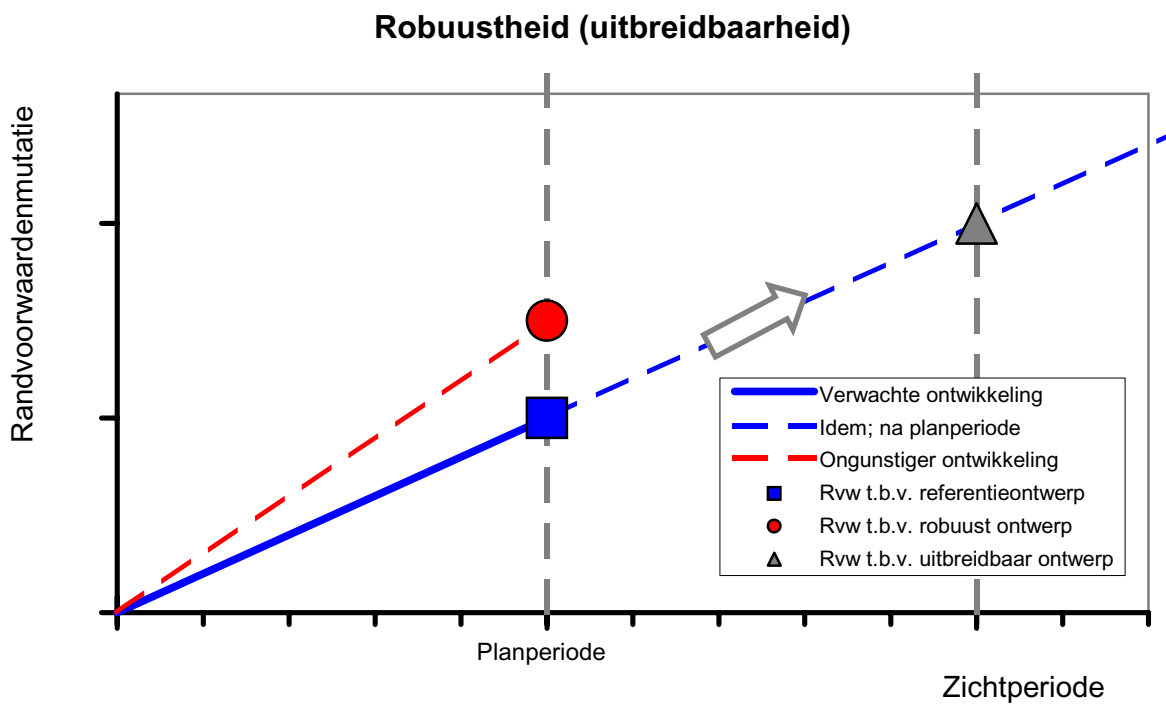
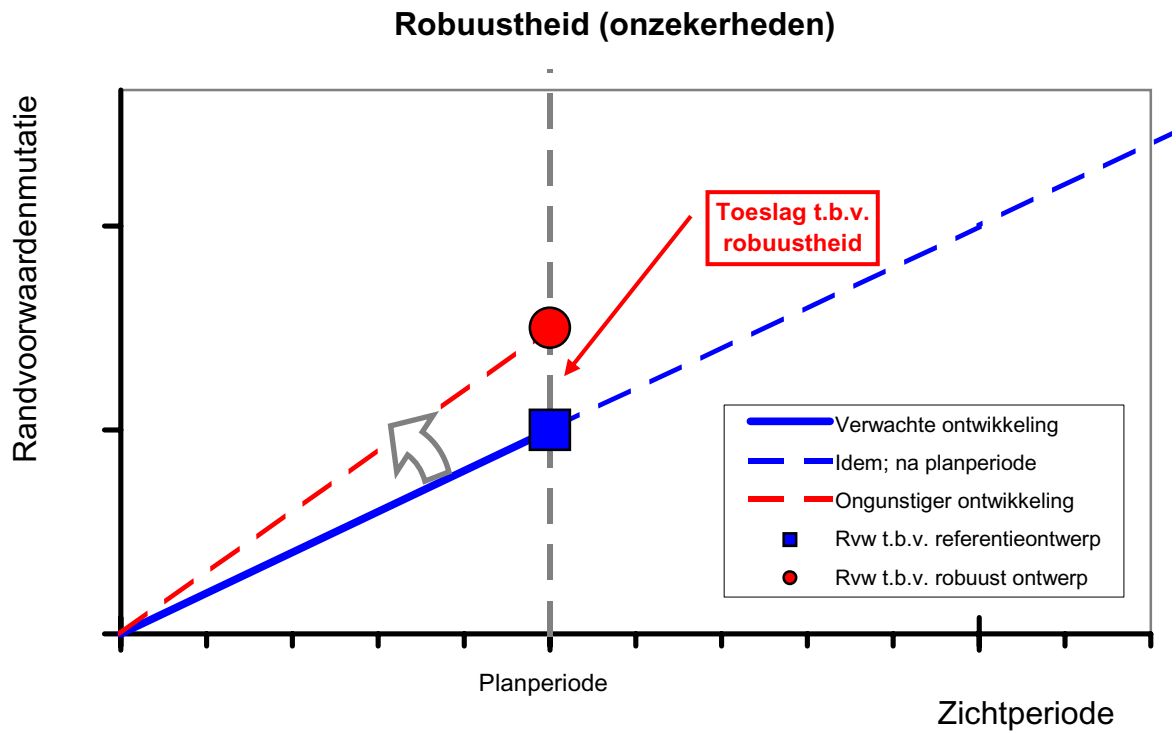
Overigens moet wel worden opgemerkt dat in een meer integrale afweging natuurlijk niet alleen naar de financiën moet worden gekeken, daar (afhankelijk van de lokale situatie) ook vele andere criteria van belang zijn.



## Referenties

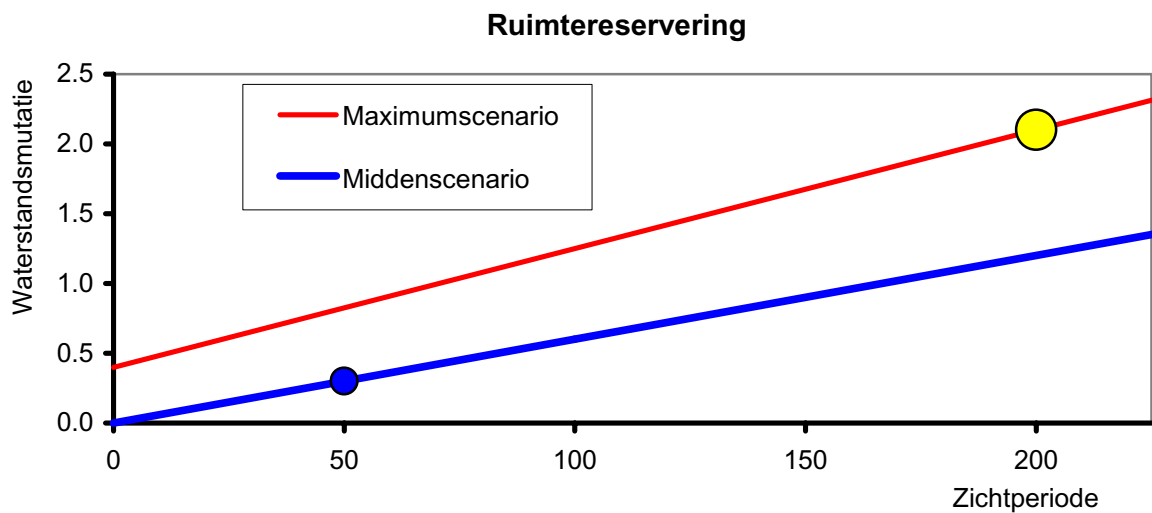
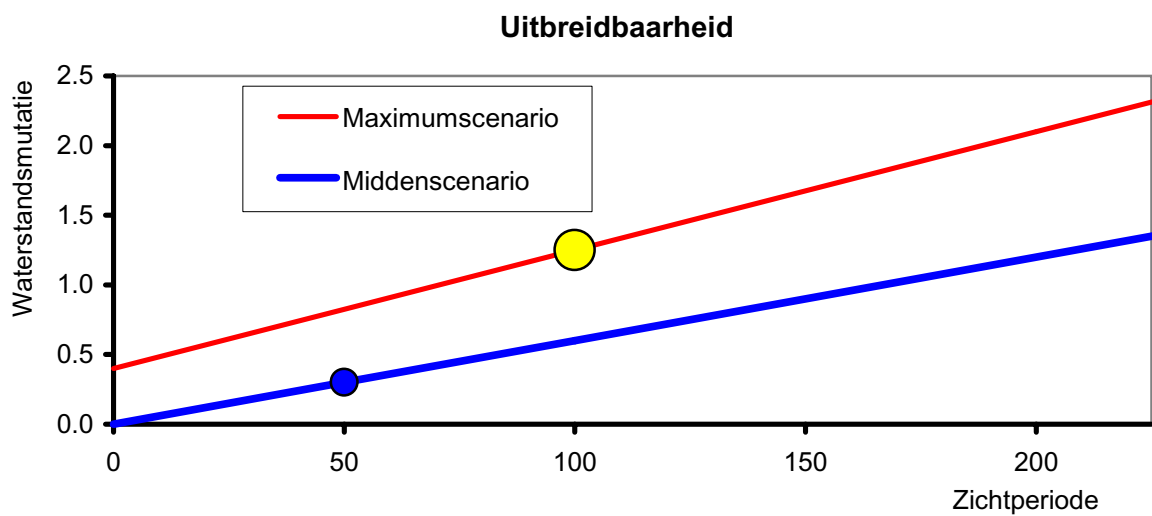
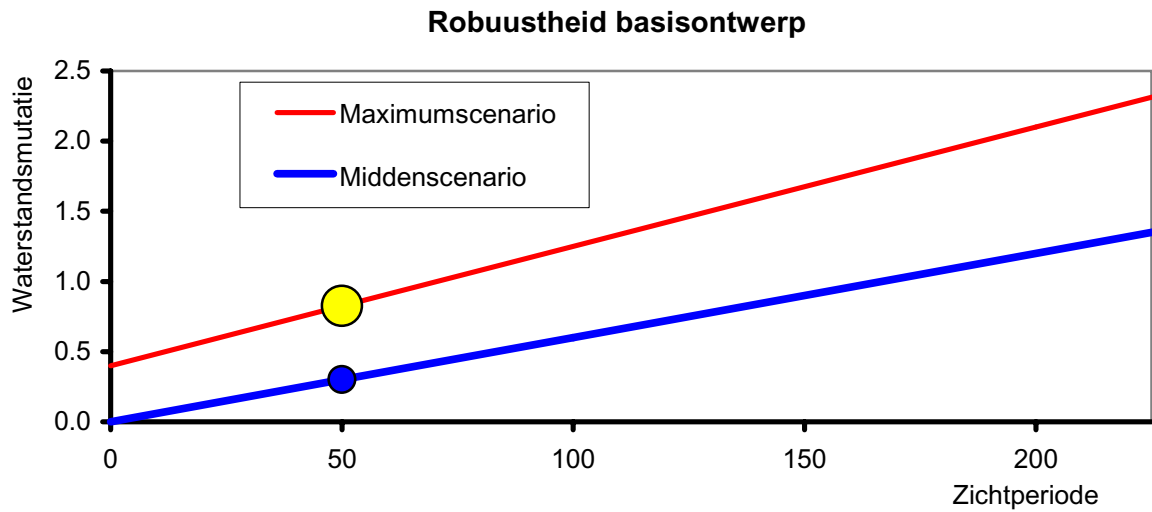
- Alkyon, 2006.** *Gevoeligheidsanalyse reservestrook*, Rapport A1832 H.J. Steetzel. December 2006.
- Alkyon, 2007a.** *Aanvullend versterkingsonderzoek Hondsbossche en Pettemer Zeewering*. Rapportage A1763 H.J. Steetzel. Januari 2007.
- Alkyon, 2007b.** *Kustversterkingsplan Waterdunen; ontwerp van een geoptimaliseerde variant*. Rapportage A2045 H.J. Steetzel. December 2007.
- Alkyon, 2008a.** *Hydraulische randvoorwaarden dijkversterkingen; Voorstel procedure vaststelling maatgevende belastingen voor ontwerp rivierdijkversterkingen*. Rapportage A1917 i.o.v. Waterschap Hollandse Delta, H.J. Steetzel. Februari 2008.
- ENW, 2007.** *Wensenbrief DGW 2007*, Kenmerk DGW/2007/206, februari 2007.
- ENW, 2008.** *ENW-advies ontwerp randvoorwaarden Ameland*, Kenmerk ENW/2007/34, 8 november 2008.
- Infram, 2007.** *ENW over robuust ontwerpen*, Rapportage 06i067 E. Van Hijum. Versie 19 februari 2007.
- Kok, M. en P. Janssen, 2007.** *Robuust ontwerpen in de leidraad rivieren*. Versie 2 april 2007.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000.** *Derde kustnota – Traditie, Trends en Toekomst*. December 2000.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat/ENW, 2007a.** *Leidraad rivieren*. Juli 2007.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat/ENW, 2007b.** *Technisch rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Juli 2007.
- Rijkswaterstaat, 2007.** *Beleidslijn kust, rapport DGW/WG 2007/1160*. September 2007.
- PCCC, 2006.** *De staat van het klimaat 2006; actueel onderzoek en beleid nader verklaard*. December 2007.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2002.** *Leidraad Zandige Kust*. December 2002.
- Van der Meer Consulting, 2007.** *Robuust ontwerpen van zee- en meerdijken*. Notitie t.b.v. ENW-kerngroep (versie 2), J.W. van der Meer. Augustus 2007.

**FIGUREN**



Schematische weergave principe robuust ontwerpen  
 Definitie robuustheidsopslag ten behoeve van opvang onzekerheden  
 en uitbreidbaarheid





Voorstel klimaatmutatie waterstand t.b.v. invulling robuustheid kust

## **BIJLAGE A**

### **Robuust ontwerpen in de 'Leidraad Rivieren'**

Overzicht meest relevante passages  
uit de 'Leidraad Rivieren' t.b.v. de invulling  
van het robuustheidsbegrip voor de kust

## Robuust ontwerpen in de 'Leidraad Rivieren'

---

In de 'Leidraad Rivieren' (zie [MinVenW, 2007a]) neemt het begrip 'robust ontwerpen' een belangrijke plaats in. Bij de totstandkoming van deze leidraad zijn veel mensen betrokken geweest en is de Leidraad diverse malen bij ENW aan de orde geweest. In deze leidraad wordt als uiteindelijke invulling van dit begrip een toeslag van 0,3 m toegepast op de waterstand.

### Relevante passages

In deze bijlage zijn een aantal voor robust ontwerpen relevante delen van deze leidraad weergegeven. Voor een volledige versie wordt verwezen naar de leidraad zelf.

In deel 1 (Algemeen), paragraaf 5, zijn enkele algemene aspecten van robust ontwerpen benoemd, waaronder:

- 1) de definitie (in paragraaf 5.1);
- 2) de ontwerpbelastingen (in paragraaf 5.2.3);
- 3) de onzekerheden (in paragraaf 5.3 en meer specifiek 5.3.3);
- 4) de uitbreidbaarheid (in paragraaf 5.4);
- 5) de aan een robust ontwerp te stellen eisen (paragraaf 5.5).

In deel 3 ('Rivierdijken van vormgeving naar beheer'), paragraaf 2 ('Ontwerp van de waterkering') wordt verder ingegaan op de wijze waarop robust ontwerpen wordt ingevuld, dit met aandacht voor:

- 6) een robust ontwerp rekening houden met onzekerheden en uitbreidbaarheid (in paragraaf 2.2.2)

In het volgende zijn de genoemde tekst delen, in een afwijkend lettertype, overgenomen uit de definitieve leidraad. Voor de 'kustrobustheid' relevante woorden of alinea's zijn hierbij bovendien **geel gemarkeerd**.

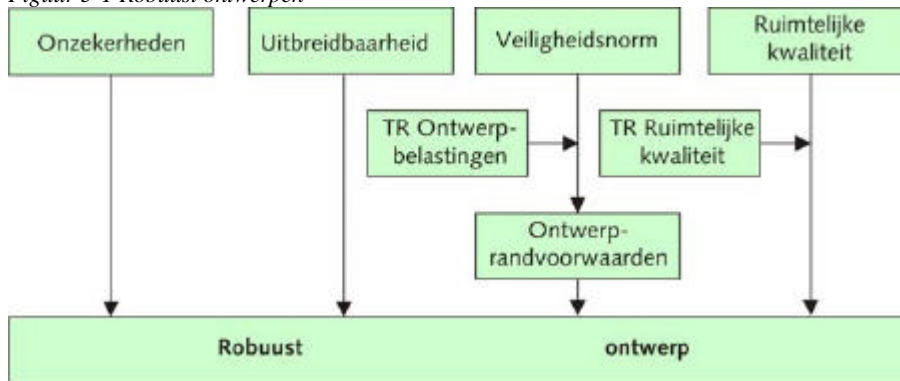
### 1 - Definitie (Deel 1; paragraaf 5.1)

In deze leidraad wordt de volgende definitie van goed (robust) ontwerpen gebruikt:

“Goed (robust) ontwerpen betekent: in het ontwerp rekening houden **met toekomstige ontwikkelingen en onzekerheden**, zodat het uitgevoerde ontwerp tijdens de **planperiode** blijft **functioneren** zonder dat ingrijpende en kostbare aanpassingen noodzakelijk zijn, en dat het ontwerp **uitbreidbaar** is indien dat economisch verantwoord is”.

Figuur 5-1 geeft aan met welke aspecten rekening moet worden gehouden om te komen tot een robust ontwerp. De term "robust" is vooral verbonden aan de aspecten **onzekerheden** en **uitbreidbaarheid**. De **veiligheidsnormen** zijn wettelijk bepaald en in het aspect **ruimtelijke kwaliteit** zijn vooral regionale en lokale omstandigheden bepalend.

Figuur 5-1 Robuust ontwerpen



## 2 - Ontwerpbelastingen (Deel 1; paragraaf 5.2.3)

Voor de primaire waterkeringen in Nederland worden elke vijf jaar de hydraulische randvoorwaarden vastgesteld voor de wettelijke vijfjaarlijkse toetsing van de waterkeringen. Deze randvoorwaarden worden per locatie vertaald in toetsbelastingen.

De toetsbelastingen kunnen iedere vijf jaar veranderen en zijn daarom niet geschikt voor het ontwerp van een maatregel. Het ontwerp moet tenslotte gedurende de gehele planperiode aan de norm blijven voldoen.

Om er zeker van te zijn dat het ontwerp aan het eind van de planperiode nog (net) aan de norm voldoet, wordt het ontwerp op de **ontwerpbelasting** gebaseerd.

De ontwerpbelasting is: de **verwachte toetsbelasting aan het eind van de planperiode plus een toeslag voor onzekerheden**.<sup>1)</sup> Deze toeslag kan tijdens de planperiode nodig zijn als onzekere ontwikkelingen nadeliger uitvallen dan verwacht.

In het Technisch Rapport Ontwerpbelastingen (TROB) voor het rivierengebied is gedetailleerd beschreven hoe de ontwerpbelastingen berekend moeten worden. Voor de toeslag wordt verwezen naar paragraaf 2.2.2 van Deel 3.

De toeslag is niet opgenomen in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid. Zo ontstaat een verschil tussen ontwerpeisen en toetseisen. Hiermee is te voorkomen dat een nieuw ontwerp al snel na realisatie wordt afgekeurd bij de toetsing omdat de belasting zich anders heeft ontwikkeld dan verwacht.

<sup>1)</sup> Dit betekent dat een ontwerp niet gedimensioneerd wordt met de verwachtingswaarde ( $\mu$ ) als randvoorwaarde, maar met de verwachtingswaarde plus een toeslag voor de standaard afwijking ( $\mu + x \cdot \sigma$ ). In andere woorden: rekenen met de 'ontwerpwaarde' of 'karakteristieke waarde' i.p.v. met de verwachtingswaarde.

## 3 - Onzekerheden (Deel 1; paragraaf 5.3 t/m 5.3.3)

Een robuust ontwerp moet in voldoende mate rekening houden met **onzekerheden in toekomstige ontwikkelingen**, zonder de onzekerheden op elkaar te stapelen en daarmee "veiligheid op veiligheid" te creëren.

In de huidige ontwerppraktijk (2007) worden onzekerheden vaak impliciet meegenomen door een extra marge te hanteren, via een veiligheidsfactor of een toeslag. Ook wordt vaak een probabilistische aanpak gevolgd, waarin de relevante onzekerheden via onzekerheidsverdelingen worden gekwantificeerd en met elkaar gecombineerd. Centraal idee achter beide benaderingen is dat het gerealiseerde ontwerp niet direct hoeft te worden afgekeurd als één van de onzekerheden 'werkelijkheid' wordt.

Twee categorieën van onzekerheden zijn van belang bij het ontwerp:

- onzekerheden in de **hydraulische belastingen** en
- onzekerheden in de **sterkte van waterkeringen**.

### 5.3.1 Onzekerheden in de hydraulische belastingen

Onzekerheden in de hydraulische belastingen zitten in de volgende parameters:

- rivierafvoer;
- zee- of meerwaterstand;
- wind (richting en snelheid);
- stormvloedkering.

In het TROB is de schematisatie van deze parameters opgenomen voor de deelgebieden bovenrivieren, benedenrivieren en IJssel- en Vechtdelta.

### 5.3.2 Onzekerheden in de sterkte van waterkeringen

Ook de geologische laagopbouw en de daarmee samenhangende geohydrologische en geotechnische eigenschappen (sterkte, stijfheid en erosiebestendigheid) zijn omgeven met onzekerheden. In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies en het Addendum daarbij (ENW, 2007-b) is beschreven hoe in het ontwerp moet worden omgegaan met onzekerheden in de sterkteparameters. Voor het mechanisme 'macro-instabiliteit buitentalud' representeren bijvoorbeeld de schematiseringfactoren, de modelfactoren en de materiaalfactoren samen de onzekerheden in de stabiliteit.

### 5.3.3 Nadere detaillering van onzekerheden

Een goed ontwerp is voldoende berekend op tegenvallers in de planperiode. Deze tegenvallers zijn vooraf niet bekend, maar vaak is het wel mogelijk de kans in te schatten dat ze optreden.

Tegenvallers kunnen optreden in:

1. Kennisonzekerheid in onder andere:
  - a. de afvoeren
  - b. lokale waterstanden, vanwege onzekerheid in
    - i. de ruwheid
    - ii. de geometrie van het verruimde bed
    - iii. de afvoerverdeling op de splitsingspunten
  - c. duur van extreme zeewaterstanden
  - d. (rest)sterkte, stijfheids- en erosiegedrag
  - e. laagopbouw, geo-hydrologische en geo-technische eigenschappen
2. Modelonzekerheid in onder andere:
  - a. extreme waarden kansverdelingen voor afvoeren en windsnelheden
  - b. bepaling van waterstanden (gegeven de rivierafvoer)
  - c. bepaling van golfhoogten
  - d. bepaling van statistische grondeigenschappen
3. Onzekerheid in de effecten van klimaatverandering.

Deze onzekerheden moeten worden meegenomen bij het bepalen van de faalkans van de kering. Onzekerheden die betrekking hebben op de waterstand worden omgerekend naar waterstandonzekerheden. De afzonderlijke waterstandonzekerheden worden gesommeerd volgens de foutenvoortplantingswet. De totale onzekerheid in de waterstand die daaruit volgt, moet voor een deel aan de standzekerheid (hoogte, sterkte, stijfheid) van de kering worden toegevoegd.

## 4 - Uitbreidbaarheid (Deel 1; paragraaf 5.4).

Er moet altijd rekening mee worden gehouden dat in de toekomst een "zwaarder" ontwerp voor de waterkering nodig is. Redenen voor een zwaarder ontwerp kunnen bijvoorbeeld versnelde klimaatsverandering, scherpere normen of nieuwe inzichten zijn. Het is maatschappelijk ongewenst dat het oorspronkelijke ontwerp deze verzwaaring onmogelijk of onevenredig duur maakt. Voor een goed (robuust) ontwerp is het nodig te onderzoeken of het economisch en maatschappelijk aantrekkelijk is

het ontwerp zo uit te voeren dat het in de toekomst **gemakkelijk uit te breiden** is om aan de zwaardere eisen te voldoen.

De ontwerper mag alleen afwijken van een uitbreidbaar ontwerp als daar zwaarwegende argumenten voor zijn, bijvoorbeeld als de kosten van een uitbreidbaar ontwerp onevenredig hoog zijn in vergelijking met een niet uitbreidbaar ontwerp. Het doel van een uitbreidbaar ontwerp is immers om met een relatief geringe investering een **grote maatschappelijke besparing in de toekomst** te bereiken.

Een redelijke maat voor de uitbreidbaarheid is, dat de toekomstige uitbreiding **dezelfde orde van grootte** heeft als de huidige dijkversterking. Uiteraard moet deze maat per project goed worden onderbouwd ten behoeve van de motivatie van het uitbreidbare ontwerp. Daarbij moeten kosten en maatschappelijke aspecten (zoals belangen van derden) aan de orde komen.

Rekening houden met uitbreidbaarheid heeft gevolgen voor het dijkversterkingsproces:

- Naast het dijkversterkingsplan moet ook het mogelijke toekomstige dijkversterkingsproject tijdens de inspraak over het dijkversterkingsproject aan de orde komen. De omvang van de mogelijke toekomstige dijkversterking hangt af van de grootte van de onzekerheden, waarbij ook rekening wordt gehouden met een **aanscherping van de veiligheidsnorm**;
- Aan het eind van de inspraak moet een besluit worden genomen over de realisatie van de dijkversterking én over doorwerking van de mogelijk toekomstige dijkversterking in het vergunningenbeleid van de beheerder (keur) en de gemeente (bestemmingsplan);
- Als de mogelijk toekomstige dijkversterking niet uitvoerbaar of aanvaardbaar is, dan is het voorgestelde ontwerp niet voldoende robuust. In dat geval is aanpassing van het ontwerp nodig, tenzij dat op economische gronden onverantwoord is.

## 5 - Ontwerp eisen (Deel 1; paragraaf 5.5).

Voor dijkversterkingen in het rivierengebied gelden samenvattend de volgende eisen aan een robuust ontwerp:

- 1) Bij het berekenen van de maatgevende hoogwaterstand en de duur ervan wordt rekening gehouden met de **verwachte toename** van de rivierafvoer en de verwachte toename van de zeewaterstanden als gevolg van klimaatverandering gedurende de planperiode. Standaard wordt hiervoor het **middenscenario** gehanteerd. Is het ontwerp niet uitbreidbaar, dan wordt het extreme scenario gehanteerd. Zie voor de invulling hiervan het Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied.
- 2) De dijk wordt ontworpen op de **ontwerpwaterstand** (zie ook Deel 3): de maatgevende hoogwaterstand aan het einde van de planperiode plus een toeslag van 0,3 m. Als maat voor de toeslag is de spreiding rond de ontwerpwaterstand genomen (orde van grootte 0,3 m). Deze toeslag is mede bedoeld om onzekerheden in de waterstanden op te vangen. De kering moet bij alle faalmechanismen berekend zijn op de maatgevende hoogwaterstand plus de toeslag van 0,3 m.
- 3) Een ontwerp moet **in principe uitbreidbaar** zijn. De ontwerper mag alleen afwijken van een uitbreidbaar ontwerp als daar zwaarwegende argumenten voor zijn, bijvoorbeeld als de kosten van een uitbreidbaar ontwerp onevenredig hoog zijn in vergelijking met een niet uitbreidbaar ontwerp. Een redelijke maat voor de uitbreidbaarheid is dat de toekomstige uitbreiding dezelfde orde van grootte heeft als de huidige dijkversterking.

Deze eisen zijn in Deel 3 van deze leidraad verder uitgewerkt.

## 6 - Verwerking onzekerheden en uitbreidbaarheid (Deel 3; paragraaf 2.2.2)

In Deel 1 van deze Leidraad staat een beschrijving van het begrip robuust ontwerpen (hoofdstuk 5). Robuust ontwerpen betekent dat rekening wordt gehouden met:

- 1) onzekerheden
- 2) uitbreidbaarheid

### Rekening houden met **onzekerheid**

Een robuust ontwerp is een ontwerp waarin, voor alle faalmechanismen, rekening gehouden is met onzekerheid. Hierbij gaat het om onzekerheden met betrekking tot de **belasting** van de dijk en de **sterkte** van de dijk.

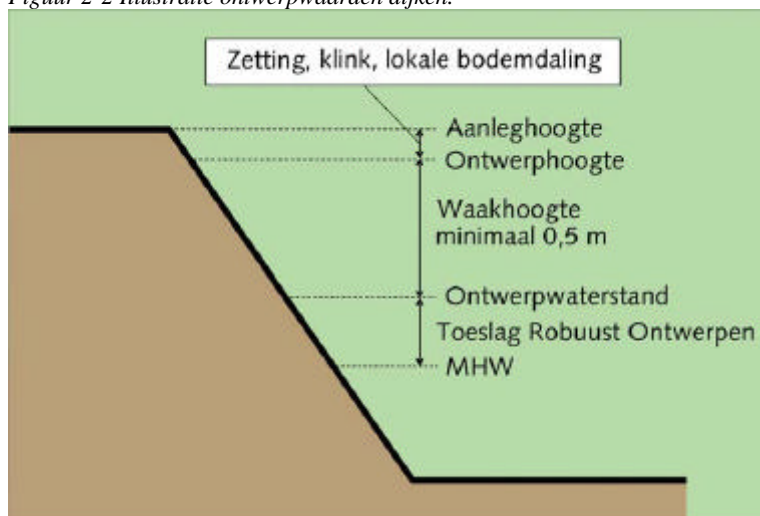
De waakhogte is bedoeld om onzekerheden in de hydraulische belastingen op te vangen, de bereikbaarheid van de dijk tijdens hoogwater te garanderen en de golfoverslag te beperken. De waakhogte is niet gedimensioneerd voor het keren van waterstanden.

Op die manier biedt de waakhogte geen oplossing voor onzekerheden in hoogwaterstanden, die wél gekeerd moeten worden. De onzekerheid in de hoogwaterstanden, ofwel de spreiding, is orde van grootte 0,2 à 0,3 m.

Robuust ontwerpen betekent dat de onzekerheid in de waterstand, in zowel het boven- als benedenrivierengebied, wordt opgenomen als een robuustheidstoeslag van 0,3 m. Deze toeslag kan natuurlijk ook andere onzekerheden opvangen, zoals **onzekerheden in de golfoploop**. De beheerder kan van deze toeslag afwijken als uit een probabilistische analyse, waarin alle relevante onzekerheden zijn meegenomen, blijkt dat de toeslag niet passend is.

De marge van 0,3 m die hierdoor ontstaat kan tegenvallers in de planperiode opvangen. Deze tegenvallers kunnen ook op de waterstand betrekking hebben. De waterkering moet daarom de maatgevende hoogwaterstand (MHW) plus de marge van 0,3 m kunnen keren, rekening houden met alle faalmechanismen. MHW wordt daarbij gedefinieerd als de berekende hoogste waterstand aan het einde van de planperiode met een gemiddelde overschrijdingskans per jaar waarop de waterkering moet zijn berekend. De waterstand MHW plus de toeslag van 0,3 m wordt de ontwerpwaterstand genoemd ofwel de stilwaterstand waarop de dijk wordt ontworpen. In Figuur 2-2 zijn MHW, ontwerpwaterstand en waakhogte nader toegelicht. De waakhogte is voor het rivierengebied minimaal 0,5 m, behalve voor de Limburgse Maas (zie ook paragraaf 2.2.3).

Figuur 2-2 Illustratie ontwerpwaarden dijken.



Effectief betekent het bovenstaande dat een **onzekerheidstoeslag aan de hoogte toegevoegd** wordt. Hiermee wordt bereikt dat niet meteen een nieuwe dijkversterking of een rivierverruimingsproject nodig is als de belastingen op de dijk veranderen. Voorwaarde is dat de dijk voldoende stabiel is om het hogere verval over de dijk op te vangen. Deze stabiliteit is zo nodig te vergroten met innovatieve technieken die geen extra ruimte vereisen, zoals “mixed-in-place” en “dijkvernageling” (zie ook bijlage 6).

Onzekerheden in de **sterkte van een dijk** werden al langer in het ontwerp verwerkt, via **veiligheidsfactoren of materiaalfactoren**. Samen met de robuuste belasting is het ontwerp daarmee voldoende berekend op onzekerheden in bijvoorbeeld piping en is een extra toeslag op bijvoorbeeld de breedte van de berm daarom niet nodig.

#### *Rekening houden met **uitbreidbaarheid***

In het algemeen is het wenselijk dat het ontwerp later uitbreidbaar is. Hiermee is te voorkomen dat een maatregel achteraf inefficiënt blijkt te zijn omdat zwaardere ontwerpeisen een geheel nieuwe ingreep vergen die de onderhavige ingreep overbodig maakt. Dat is maatschappelijk ongewenst.

Zwaardere ontwerpeisen kunnen bijvoorbeeld het gevolg zijn van **nieuwe veiligheidsnormen, nieuwe kennis** of **snellere klimaatverandering**.

De ontwerper mag alleen afzien van een uitbreidbaar ontwerp als daar zwaarwegende argumenten voor zijn, bijvoorbeeld als de kosten van een uitbreidbaar ontwerp disproportioneel hoger zijn dan van een niet-uitbreidbaar ontwerp. Het doel van een uitbreidbaar ontwerp is immers dat een relatief geringe extra investering een grote (maatschappelijke) besparing in de toekomst kan opleveren. Een redelijke maat voor de uitbreidbaarheid is dat de omvang van de toekomstige ingreep dezelfde orde van grootte heeft als het onderhavige ontwerp. Uiteraard moet deze maat per project goed worden onderbouwd ten behoeve van de motivatie van het uitbreidbare ontwerp. Daarbij moeten kosten en maatschappelijke aspecten (zoals het belang van derden) aan de orde komen.

Voorbeelden van een uitbreidbaar ontwerp zijn:

- Planologische reservering van extra ruimte (aan de binnen- of buitenkant). Deze ruimte kan nodig zijn bij zwaardere belastingen of zwaardere veiligheidsnormen. In deze gereserveerde ruimte mogen geen ontwikkelingen plaatsvinden die een toekomstige uitbreiding onmogelijk maken. De toekomstige uitbreiding kan zowel de vorm van rivierverruiming als van dijkversterking hebben. In de nota Ruimte is het instrument van de “vrijwaringszone” opgenomen. Dit is een strook langs de primaire waterkering waar geen nieuwe permanente bebouwing mag komen. Het doel van de vrijwaringszones is toekomstige versterkingen van de primaire waterkeringen mogelijk te maken.
- Voorzieningen die het mogelijk maken uitbreiding relatief goedkoop uit te voeren. Dit kan bijvoorbeeld een extra zware fundering zijn of voorzieningen waardoor de hoogte van een kering relatief gemakkelijk is aan te passen.

De eis aan uitbreidbaarheid betekent dat de ontwerper tijdens het ontwerpproces al rekening houdt met een volgende dijkversterking of rivierverruiming. Uitbreidbaarheid moet expliciet aan bod komen bij de besluitvorming over het ontwerp van de dijkversterking:

- Naast het dijkversterkingsplan moet ook het mogelijke toekomstige dijkversterkingsproject tijdens de inspraak op het dijkversterkingsproject aan de orde komen. De omvang van de mogelijke toekomstige dijkversterking hangt af van de grootte van de onzekerheden, waarbij ook rekening wordt gehouden met een **aanscherping van de veiligheidsnorm**.
- Aan het eind van de inspraak moet een besluit worden genomen over de realisatie van de dijkversterking én over de doorwerking van de mogelijk toekomstige dijkversterking in het vergunningenbeleid van de beheerder (keur) en de gemeente (bestemmingsplan).
- Als de mogelijk toekomstige dijkversterking niet uitvoerbaar of niet aanvaardbaar is, dan is het voorgestelde ontwerp niet robuust. In dat geval is aanpassing van het ontwerp nodig, tenzij dat op economische gronden onverantwoord is.