Deltares

Enabling Delta Life

Overstromingskansen - Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw



Deltares

Overstromingskansen - Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw

1204144-002

© Deltares, 2011

Deltares

Titel
Overstromingskansen – Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw

Opdrachtgever	Project	Kenmerk
Rijkswaterstaat Waterdienst	1204144-002	1204144-002-ZWS-0002

Trefwoorden
Overstromingskansen, Waterveiligheid, kosten-batananalyse

Samenvatting

Het voorliggende rapport geeft een overzicht van de informatie die is toegeleverd aan de kosten-batenanalyse met betrekking tot de *overstromingskansen*. Bij de berekening van de benodigde invoer voor de kosten-batenanalyse vanuit dit "kansenspoor" is gebruik gemaakt van het Hydra-instrumentarium. In het bijzonder zijn decimeringhoogten van waterstanden en kruinhoogten voor een groot aantal locaties (elke 100-500 m) in heel Nederland bepaald. Daarnaast is de invloed van klimaatverandering in beeld gebracht bij verschillende klimaatscenario's. Naast informatie voor de kosten-batenanalyse, geeft het rapport ook een overzicht van de gehanteerde modellen, methoden en uitgangspunten die zijn gebruikt bij het afleiden van deze gegevens.

Bij het bepalen van de invoer voor de kosten-batenanalyse is uitgegaan van de resultaten uit de zogenaamde basisvariant (referentiesituatie na uitvoering van de PKB Ruimte voor de Rivier), met hieraan gekoppeld een aantal aannames en uitgangspunten. Deze zijn omgeven met onzekerheid en de resultaten kunnen ook in meer of mindere mate gevoelig zijn voor de keuzes die zijn gemaakt in de basisvariant. Daarom is tevens een uitgebreide gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, met als doel het inzichtelijk maken van de consequenties van bepaalde aannames en (model)keuzen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Mrt.2011	Emiel van Velzen		Herman van der Most		Toon Segeren	

Inhoud

1 Begin hier **1**

1 Begin hier

Deltares

Overstromingskansen
Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw

Bastiaan Kuijper (HKV)
Jan Stijnen (HKV)
Emiel van Velzen (Deltares

1204144-002

© Deltares, 2010

Deltares

Titel

Overstromingskansen – Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw

Opdrachtgever	Project	Kenmerk
Rijkswaterstaat Waterdienst	1204144-002	1204144-002-ZWS-0002

Trefwoorden

Overstromingskansen, Waterveiligheid, kosten-batananalyse

Samenvatting

Het voorliggende rapport geeft een overzicht van de informatie die is toegeleverd aan de kosten-batenanalyse met betrekking tot de *overstromingskansen*. Bij de berekening van de benodigde invoer voor de kosten-batenanalyse vanuit dit "kansenspoor" is gebruik gemaakt van het Hydra-instrumentarium. In het bijzonder zijn decimeringhoogten van waterstanden en kruinhoogten voor een groot aantal locaties (elke 100-500 m) in heel Nederland bepaald. Daarnaast is de invloed van klimaatverandering in beeld gebracht bij verschillende klimaatscenario's. Naast informatie voor de kosten-batenanalyse, geeft het rapport ook een overzicht van de gehanteerde modellen, methoden en uitgangspunten die zijn gebruikt bij het afleiden van deze gegevens.

Bij het bepalen van de invoer voor de kosten-batenanalyse is uitgegaan van de resultaten uit de zogenaamde basisvariant (referentiesituatie na uitvoering van de PKB Ruimte voor de Rivier), met hieraan gekoppeld een aantal aannames en uitgangspunten. Deze zijn omgeven met onzekerheid en de resultaten kunnen ook in meer of mindere mate gevoelig zijn voor de keuzes die zijn gemaakt in de basisvariant. Daarom is tevens een uitgebreide gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, met als doel het inzichtelijk maken van de consequenties van bepaalde aannames en (model)keuzen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Mrt.2011	Emiel van Velzen		Herman van der Most		Toon Segeren	

Inhoud

Lijst van Tabellen **iii**

Lijst van Figuren **v**

1 Inleiding **1**
1.1 Doelstelling en reikwijdte 2
1.2 Uitvoering van het onderzoek 3
1.3 Opbouw van het rapport 3

2 Uitgangspunten voor de basisinformatie overstromingskansen **5**
2.1 Achtergrond besliskundig model 5
2.2 Benodigde informatie 6
2.3 Opzet en uitgangspunten van referentiesituaties 7
2.3.1 Dijkringdelen als ruimtelijke eenheden 7
2.3.2 Twee referentiesituaties binnen het onderzoek 8
2.3.3 Nadere invulling van beide referentiesituaties 10
2.3.4 Rol van beide referentiesituaties in het onderzoek 12
2.3.5 Keuze faalmechanismen 13
2.3.6 Klimaatverandering 15
2.4 Ruimtelijke schematisatie 15
2.5 Dijkringdeelfactor 16
2.6 Basisvariant en gevoeligheidsonderzoek 16

3 Modellen en uitgangspunten **19**
3.1 Statistiek en randvoorwaarden per deelgebied 20
3.1.1 Kustgebied en Waddenzee 22
3.1.2 IJsselmeer en Markermeer 23
3.1.3 Bovenrivieren (Rijntakken) 25
3.1.4 Bovenrivieren (Maas) 28
3.1.5 IJssel- en Vechtdelta 29
3.1.6 Benedenrivieren 31

4 Berekening en resultaten basisvariant **33**
4.1 Inleiding 33
4.2 Berekening decimeringshoogtes 33
4.3 Berekening kruinhoogte in de referentiesituatie 35
4.4 Berekening waterstandstijging 36
4.5 Resultaten decimeringhoogtes 38
4.6 Resultaten waterstandstijging 42

5 Gevoeligheidsanalyse **45**
5.1 Inleiding 45
5.2 Kritiek golfoverslagdebiet 45
5.3 Meerpeilstijging 45
5.4 Raaklijnbepaling 46
5.5 Aftoppen 47
5.6 Overhoogte 51

5.7 Profielschematisatie 54

6 Referenties 55

Bijlage(n)

A Begrippenlijst A-1

B Dijkringtrajecten B-1

C Afvoerstatistiek C-1
C.1 Werklijnen Rijn bij Lobith C-1
C.2 Werklijnen Maas bij Borgharen C-4
C.3 Werklijnen IJssel bij Olst C-5
C.4 Werklijnen Vecht bij Dalfsen C-7

D Ontzien van de Nederrijn/Lek D-1
D.1 Inleiding D-1
D.2 Verdeling van de rivierafvoer in 2015 D-1
D.3 Aanpassing van de Qh-relaties D-4

E Modelschematisaties E-1
E.1 Benedenrivieren E-1
E.2 Bovenrivieren E-1
E.3 Maas E-4

F Decimeringshoogtes F-1

G Toelichting decimeringshoogtes G-1

H Waterstandstijging en bodemdaling H-3

I Dijkringdeelfactoren I-1

J Tabellen met en zonder aftoppen J-1

K Figuren gevoeligheidsanalyse K-1
K.1 Kritiek golfoverslagdebiet K-1
K.2 Methode raaklijnbepaling K-5

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1 Uitgangspunten basisvariant en gevoeligheidsanalyse. 17

Tabel 3.1 Overzicht gebruikte Hydra-modellen, profielen, statistiek en randvoorwaarden per gebied. 21

Tabel 3.2 Zeespiegelstijging tot 2050 per klimaatscenario. 22

Tabel 3.3 Zeespiegelstijging en meerpeilstijging (IJsselmeer) tot 2100 per klimaatscenario. 24

Tabel 3.4 Binnen WV21 gehanteerde fysische maxima Rijnafvoer bij Lobith. 27

Tabel 3.5 : Binnen WV21 gehanteerde fysische maxima IJsselafvoer bij Olst. 31

Tabel 4.1 Herhalingstijden op basis waarvan de decimeringshoogtes zijn bepaald. 33

Tabel 5.1 Resultaten gevoeligheidsanalyse overhoogte voor dijkringen 26,36 en 44. 53

Tabel 5.2 Overzicht gevarieerde parameters. 54

Tabel C.1 Parameters werklijn Lobith 2015 (TMR2006). C-1

Tabel C.2 Parameters werklijn Lobith 2050 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+). C-2

Tabel C.3 Parameters werklijn Borgharen 2015, 2050 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+). C-4

Tabel C.4 Rivierafvoeren op de IJssel bij Olst bij de met WAQUA doorgerekende hoogwatergolven. C-6

Tabel C.5 IJsselafvoer (Olst) bij verschillende herhalingstijden, met ontzien van de Nederrijn/Lek. C-6

Tabel C.6 Procentuele verhoging maatgevende afvoer bij Lobith t.o.v. de referentiesituatie. C-7

Tabel D.1 Rivierafvoeren bij de hoogwatergolven met een piekafvoer groter of gelijk aan 16.000 m^3/s. D-2

Tabel D.2 Rivierafvoeren bij het ontzien van de Nederrijn/Lek bij Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s. D-3

Tabel D.3 Aanpassing afvoeren boven 16.000 m^3/s in berekende Qh-relaties uit WAQUA-sommen. D-5

Tabel E.1 PKB-maatregelen WAQUA-schematisatie BOR – deel I (R=rechterzijde en L=linkerzijde). E-2

Tabel E.2 PKB-maatregelen WAQUA-schematisatie BOR – deel II (R=rechterzijde en L=linkerzijde). E-3

Tabel F.1 Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel I (geel = schatting). F-1

Tabel F.2 Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel II (geel = schatting). F-3

Tabel F.3 Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel III (geel = schatting). F-5

Tabel F.4 Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel IV (geel = schatting). F-7

Tabel F.5 Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel V (geel = schatting). F-9

Tabel H.1 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel I (geel = schatting). H-4

Tabel H.2 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel II (geel = schatting). H-6

Tabel H.3 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel III (geel = schatting). H-8

Tabel H.4 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel IV (geel = schatting). H-10

Tabel H.5 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel V (geel = schatting). H-12

Tabel I.1 Overzicht van de dijkring- en dijkringdeelfactoren – deel I. I-1

Tabel I.2 Overzicht van de dijkring- en dijkringdeelfactoren – deel II. I-3

Tabel J.1 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, VIJ-delta. J-1

Tabel J.2 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, BER (deel I). J-1

Tabel J.3 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, BER (deel II). J-2

Tabel J.4 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, BOR. J-4

Lijst van Figuren

Figuur 2.1 Het idee achter een kosten-batenanalyse: het optimale beschermingsniveau bevindt zich in het minimum van de totale kosten (de som van de investeringen en de verwachte schade). 5

Figuur 2.2 Schematische weergave verwerking van faalmechanismen in de kosten van dijkverhoging. 14

Figuur 3.1 Schema berekening invoerparameters OptimaliseRing binnen het kansenspoor. 19

Figuur 3.2 Dijkringen langs het kustgebied en de Waddenzee. 22

Figuur 3.3 Dijkringen langs het IJsselmeer en het Markermeer. 24

Figuur 3.4 Dijkringen in het bovenrivierengebied, met uitzondering van de (Limburgse) Maas. 26

Figuur 3.5 Dijkringen van het bovenrivierengebied langs de Maas. 28

Figuur 3.6 Dijkringen langs de IJssel- en Vechtdelta. 29

Figuur 3.7 Dijkringen in het benedenrivierengebied. 31

Figuur 4.1 Voorbeeld berekening decimeringhoogtes voor een locatie langs het IJsselmeer. 34

Figuur 4.2 Voorbeeld berekening decimeringhoogtes voor een locatie langs de Bovenrijn. 34

Figuur 4.3 Voorbeeld berekening kruinhoogte referentiesituatie voor een locatie langs het IJsselmeer. 36

Figuur 4.4 Voorbeeld berekening waterstandstijging voor een locatie langs de Rijn (zonder aftoppen). 37

Figuur 4.5 Voorbeeld berekening waterstandstijging voor een locatie langs de Rijn (met aftoppen). 38

Figuur 4.6 Decimeringhoogtes waterstand basisvariant. 39

Figuur 4.7 Decimeringhoogtes kruinhoogte basisvariant. 40

Figuur 4.8 Relatieve waterstandstijging (inclusief bodemdaling) basisvariant. 43

Figuur 5.1 Gevoeligheidsanalyse relatieve waterstandstijging (incl. bodemdaling) IJssel- en Vechtdelta. 46

Figuur 5.2 Decimeringhoogtes waterstand gevoeligheidsanalyse zonder aftoppen. 49

Figuur 5.3 Decimeringhoogtes kruinhoogte gevoeligheidsanalyse zonder aftoppen. 50

Figuur 5.4 Relatieve waterstandstijging (inclusief bodemdaling) gevoeligheidsanalyse zonder aftoppen. 51

Figuur B.1 Dijkringtrajecten WV21 (Noord-Nederland). B-1

Figuur B.2 Dijkringtrajecten WV21 (Zuid-Nederland). B-2

Figuur C.1 Werklijn Lobith 2050 bij klimaatscenario G+. C-2

Figuur C.2 Werklijn Lobith 2100 bij klimaatscenario G+. C-3

Figuur C.3 Werklijn Lobith 2050 bij klimaatscenario W+. C-3

Figuur C.4 Werklijn Lobith 2100 bij klimaatscenario W+. C-4

Figuur C.5 Werklijnen Borgharen 2015, 2050 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+). C-5

Figuur C.6 Werklijnen Olst 2015 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+). C-7

Figuur D.1 Afvoerverdeling in de referentiesituatie (2015) bij de maatgevende afvoer (WAQUA). D-2

Figuur D.2 Afvoerverdeling in 2015 bij een Rijnafvoer van 18.000 m^3/s, zonder ontzien Nederrijn/Lek. D-3

Figuur D.3 Afvoerverdeling in 2015 bij een Rijnafvoer van 18.000 m^3/s, met ontzien Nederrijn/Lek. D-4

Figuur D.4 Voorbeeld aanpassing Qh-relatie voor een locatie langs de IJssel (dijkring 53). D-6

Figuur G.1 Frequentielijnen waterstand en golfoverslag voor een locatie langs traject 7-1-3. G-1

Figuur G.2 Frequentielijnen waterstand en golfoverslag voor een locatie langs traject 41-2-1. G-2

Figuur H.1 : Verwachte bodemdaling in Nederland tot het jaar 2050 (bron: Haasnoot et al., 1999). H-3

Figuur K.1 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Benedenrivierengebied (deel I). K-1

Figuur K.2 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Benedenrivierengebied (deel II). K-1

Figuur K.3 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Bovenrivierengebied (deel I). K-2

Figuur K.4 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Bovenrivierengebied (deel II). K-2

Figuur K.5 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, (Limburgse) Maas. K-3

Figuur K.6 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, IJssel- en Vechtdelta. K-3

Figuur K.7 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Meren. K-4

Figuur K.8 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Kust (deel I). K-4

Figuur K.9 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Kust (deel II). K-5

Figuur K.10 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Benedenrivierengebied (deel I). K-5

Figuur K.11 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Benedenrivierengebied (deel II). K-6

Figuur K.12 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Bovenrivierengebied (deel I). K-6

Figuur K.13 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Bovenrivierengebied (deel II). K-7

Figuur K.14 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling (Limburgse) Maas. K-7

Figuur K.15 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling IJssel- en Vechtdelta. K-8

Figuur K.16 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Meren. K-8

Figuur K.17 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Kust (deel I). K-9

Figuur K.18 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Kust (deel II). K-9

1 Inleiding

1.1 Kader en aanleiding

Deltaprogramma en Nationaal Waterplan
De huidige wettelijke normen voor bescherming tegen (grootschalige) overstromingen vanuit zee, rivieren en meren vinden hun basis grotendeels in de jaren zestig van de vorige eeuw. Sinds die tijd is zowel het aantal mensen, als de economische waarde in de overstroombare gebieden sterk toegenomen. De potentiële gevolgen van een overstroming zijn daardoor ook toegenomen. Voorts is de kennis om overstromingsrisico's (kansen en gevolgen) te berekenen, toegenomen en zijn (economische) methoden voor het onderbouwen van het beschermingsniveau verbeterd.

Voor de actualisering van de waterveiligheidsnormen is een aantal jaren terug het beleidstraject 'Waterveiligheid 21e Eeuw' (WV21) in gang gezet. Inmiddels maakt de actualisering deel uit van het generieke deelprogramma 'Veiligheid' van het Deltaprogramma. Binnen het deelprogramma Veiligheid staat de vraag centraal hoe we Nederland in de toekomst kunnen beschermen tegen overstromingen op een maatschappelijk aanvaardbaar risiconiveau.

Het deelprogramma Veiligheid onderzoekt in hoeverre het huidige beschermingsniveau tegen overstromingen nog voldoende aansluit bij de economische waarden en mogelijke slachtoffers achter de waterkeringen. Het deelprogramma bekijkt verder deltadijken, beleid voor buitendijks gebied en – met behulp van regionale gebiedspilots – het concept van de zogenaamde meerlaagsveiligheid (preventie, duurzame ruimtelijke inrichting en rampenbeheersing).

Het Nationaal Water Plan (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009) schetst het kader voor de beleidsontwikkeling rond waterveiligheid. In de nota is aangegeven dat een maatschappelijke kosten-batenanalyse en analyses van slachtofferrisico worden uitgevoerd ten behoeve van de onderbouwing van waterveiligheidsnormen.

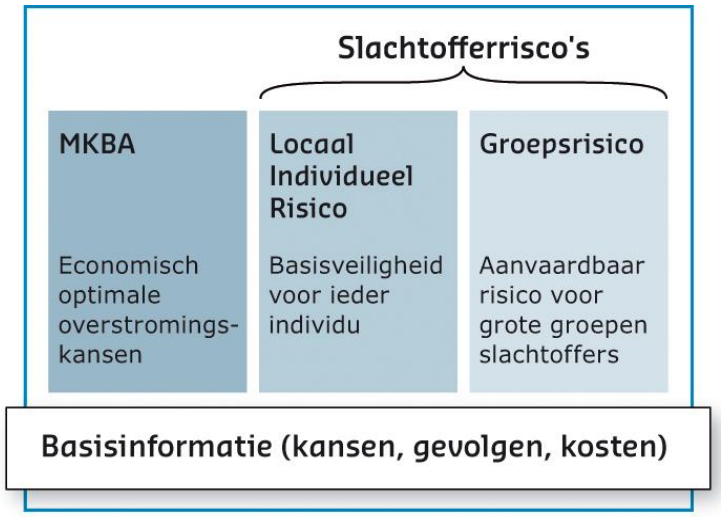
1.2 Opzet van het WV21-onderzoek

De maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) en de analyse van slachtofferrisico's zijn uitgevoerd door Deltares in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. De MKBA richt zich op de kosten en baten van bescherming tegen overstroming. Voor de harde primaire keringen van de categorie a uit de Waterwet worden economisch optimale beschermingsniveaus berekend. De economische doelmatigheid van investeringen in waterkeringen staat daarbij centraal. In de MKBA worden de investeringen (kosten) ter versterking van de waterkeringen afgezet tegen de baten (voorkomen van schade als gevolg van overstromingen). De analyse van slachtofferrisico's geeft inzicht in de overlijdenskansen voor individuen en groepen als gevolg van overstromingen.
De MKBA en slachtofferanalyses leveren informatie en inzichten op, die ondersteunend zijn bij de maatschappelijke afwegingen over actualisering van de waterveiligheidsnormen.

Aan de basis van beide analyses staan studies naar de kansen op en gevolgen van overstromingen en naar de kosten van waterkeringen (de zogenaamde basisinformatie):

- In het '*Kansenspoor*' zijn de overstromingskansen van de dijkringdelen bepaald alsook een aantal hydraulische kenmerken zoals de decimeringhoogten van waterstanden en kruinhoogten.
- In het '*Gevolgenspoor*' zijn de gevolgen van overstromingen bepaald. Het gaat om slachtoffers en schade als functie van de omvang van overstromingen.
- Het '*Kostenspoor*' was gericht op het vaststellen van de kosten die zijn gemoeid met het aanpassen (versterken) van waterkeringen. Deze kosten zijn in de vorm van kostenfuncties voor dijkringtrajecten benut in de MKBA.

De verschillende onderdelen van het onderzoek zijn getoond in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Overzicht van onderdelen van het WV21-onderzoek

1.1 Doelstelling en reikwijdte

Het kansenspoor levert primair informatie aan die nodig is in de Maatschappelijke kosten-batenanalyse. Voor de kosten-batenanalyse levert het kansenspoor drie parameters aan die per dijkringtraject kunnen variëren:

- de overstromingskans in de referentiesituatie;
- de decimeringhoogte van de kruinhoogte (HBN);
- de relatieve waterstandstijging als gevolg van klimaatverandering en bodemdaling.

Om de informatie af te leiden die het kostenspoor aanlevert aan de MKBA is ook kansinformatie nodig. Aan het kostenspoor wordt de volgende informatie geleverd:

- MHW: maatgevende hoogwaterstand in m + NAP in de referentiesituatie.
- HBN: hydraulisch belastingniveau in m + NAP in de referentiesituatie.
- decimeringhoogte van de MHW in m.
- decimeringhoogte van de kruinhoogte (HBN) in m.

De doelstelling van het kansenspoor om bovengenoemde informatie goed onderbouwd te leveren.

1.2 Uitvoering van het onderzoek

De kosten-batenanalyse komt in feite in twee fasen tot stand. De eerste fase bestond uit een globale, kengetallen kosten-batenanalyse (KKBA), bedoeld om een globale indicatie van optimale beschermingsniveaus en kosten op te leveren. De basis voor deze KKBA is feitelijk gelegd in het voortraject van de KBA voor het programma Ruimte voor de Rivier. Hierbij zijn ook de kosten en baten van de verschillende strategieën in beeld gebracht. In navolging van dit onderzoek is in de latere KKBA onderzocht welke parameters met name bepalend zijn voor de optimale beschermingsniveaus en welke informatie ontbreekt voor een volwaardige kosten-batenanalyse. De resultaten van de studie zijn beschreven in het rapport Waterveiligheid 21^{e} eeuw; Kengetallen Kosten-batenanalyse (Kind, 2008).
Voor de KKBA WV21 is in 2008 met een relatief eenvoudige methode de benodigde kansinformatie berekend voor het merendeel van de Nederlandse dijkringen. De eenvoudige methode om deze kansen te berekenen paste bij het indicatieve karakter van de studie. De tweede fase van de kosten-batenanalyse bestaat uit een volwaardige kosten-batenanalyse.
De kansinformatie die gebruikt worden voor de volwaardige KBA moet gedegen onderbouwd zijn. De gebruikte methode moet op een breed draagvlak kunnen rekenen.
Het bureau HKV heeft in het verleden veel ervaring opgedaan in soortgelijke analyses (o.a. Rampenbeheersingsstrategie, KKBA) en heeft aan de basis gestaan van het, in dit kader, toegepaste modelinstrumentarium Hydra. Daarom zijn de producten voor het kansspoor, in een samenwerkingsverband van Deltares en HKV tot stand gekomen.
Het kansenspoor is getrokken door de afdeling Klimaatadaptatie en risico's binnen de unit Verkenningen en Beleidsanalyse van Deltares, projectleider ir. E.H. van Velzen. Er is intensief samengewerkt met de afdeling Veiligheid van de unit Zoet Watersystemen, om tot goede afstemming te komen met het kostenspoor en het gevolgenspoor, maar ook voor advies van deskundigen en kwaliteitsborging. Voor HKV was Bastiaan Kuiper projectleider met ondersteuning van andere deskundigen binnen HKV.

1.3 Opbouw van het rapport

De opbouw van dit rapport is als volgt. Hoofdstuk 2 geeft een beknopte beschrijving van de achtergronden van de kosten-batenanalyse. Daarbij zijn tevens de belangrijkste definities en uitgangspunten beschreven voor het berekenen van de kansen. Deze kansen vormen de invoer voor het besliskundig model dat ten grondslag ligt aan de maatschappelijke kosten-batenanalyse (verwerkt in het programma OptimaliseRing).
Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de gebruikte modellen en de gehanteerde uitgangspunten voor het bepalen van de benodigde kansen, welke de invoer leveren voor OptimaliseRing.

Waar hoofdstuk 3 laat zien hoe de kansberekeningen zijn uitgevoerd, laat hoofdstuk 4 zien hoe, op basis van deze resultaten, de invoerparameters voor het programma OptimaliseRing tot stand komen. In dit hoofdstuk worden tevens resultaten gepresenteerd van deze parameters.

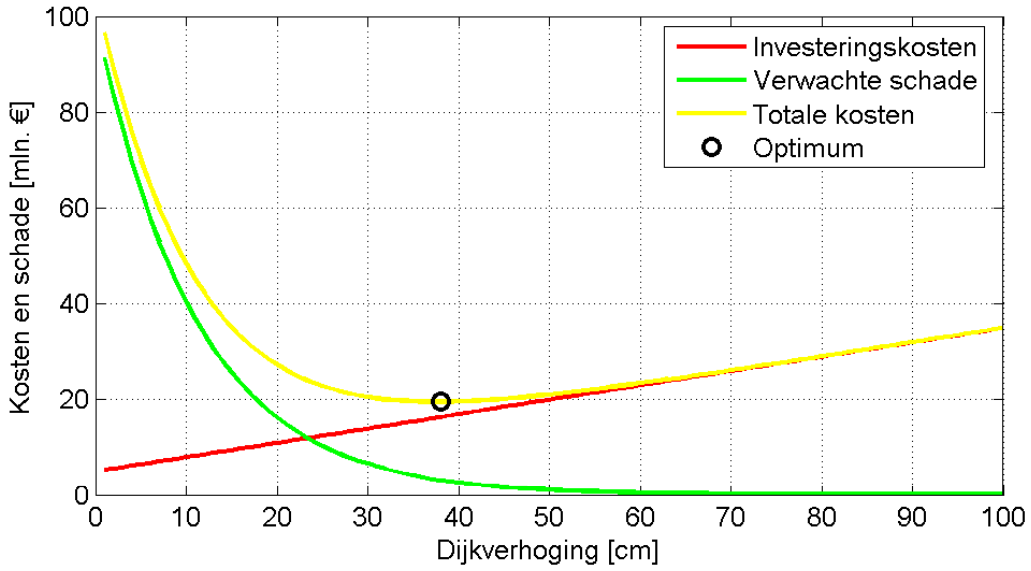
Bij het bepalen van de invoer voor OptimaliseRing is uitgegaan van de resultaten uit de zogenaamde basisvariant, met hieraan gekoppeld een aantal aannames en uitgangspunten. Deze zijn omgeven met onzekerheid en de resultaten kunnen ook in meer of mindere mate gevoelig zijn voor de keuzes die zijn gemaakt in de basisvariant. Daarom is in hoofdstuk 5 een uitgebreide gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, met als doel het inzichtelijk maken van de consequenties van bepaalde aannames en (model)keuzen.

Gepoogd is om de hoofdtekst beknopt te houden. Veel achtergrondinformatie is gegeven in de bijlagen A t/m K. Hier wordt telkens naar verwezen bij de betreffende onderdelen in het rapport.

2 Uitgangspunten voor de basisinformatie overstromingskansen

2.1 Achtergrond besliskundig model

Het afleiden van economisch optimale overstromingskansen op basis van een efficiënte langetermijnstrategie sluit aan bij eerdere KBA's voor de bescherming tegen overstromen (zie o.a. Van Dantzig, 1960 en Eijgenraam, 2005). Deze KBA's zijn gebaseerd op het minimaliseren van de totale kosten van enerzijds het investeren in (preventieve) veiligheidsmaatregelen en anderzijds verwachte overstromingsschade. Door te investeren in maatregelen als dijkversterking, wordt de overstromingskans van een bepaald gebied verkleind, en daarmee ook het overstromingsrisico. Aan de andere kant kosten deze investeringen geld. In een KBA wordt op zoek gegaan naar de balans tussen de vermindering van het overstromingsrisico (baten) en de kosten van de investeringen. In het punt waar de totale kosten (som van investering en verwachte schade) minimaal zijn, wegen extra investeringen in preventieve maatregelen niet meer op tegen de daarmee bereikte verdere reductie van de verwachte overstromingsschade (Figuur 2.1.). Op dat moment zijn de dimensies van de betreffende waterkering (bijvoorbeeld de dijkhoogte) en het daarbij horende beschermingsniveau optimaal.



Figuur 2.1 Het idee achter een kosten-batenanalyse: het optimale beschermingsniveau bevindt zich in het minimum van de totale kosten (de som van de investeringen en de verwachte schade).

Ten behoeve van het project Planologische Kernbeslissing (PKB) Ruimte voor de Rivier is door het Centraal Planbureau (CPB) een besliskundig model ontwikkeld voor het bepalen van economisch efficiënte beschermingsniveaus (Eijgenraam, 2005). Het door het CPB ontwikkelde model vormt op zichzelf weer een uitbreiding van het oorspronkelijke model dat Van Dantzig heeft ontwikkeld (in opdracht van de Deltacommissie) na de watersnoodramp in 1953. In het kader van het project Waterveiligheid 21^{e} eeuw (WV21) is het besliskundige model verder ontwikkeld. Het doorontwikkelde model is geïmplementeerd in het programma OptimaliseRing (Duits, 2009). De volwaardige kosten-batenanalyse voor WV21 is uitgevoerd met behulp van dit programma.

2.2 Benodigde informatie

Het uitvoeren van de kosten-batenanalyse analyse komt in het kort hierop neer, dat antwoord gegeven moet worden op de volgende twee vragen: Hoeveel kosten dijkversterkingen, en wat leveren deze op? Deze vragen vormen de hoofdvraag voor respectievelijk het kostenspoor en het kansenspoor binnen WV21.
De baten van dijkversterking bestaan uit de vermindering in verwachte overstromingsschade. Belangrijk is daarom het effect van dijkversterkingen op de overstromingskans. Centraal staat de formule voor de overstromingskans in het model dat ten grondslag ligt aan OptimaliseRing:

$$P(t) = P(0) \cdot \exp\left\{-\alpha\left(H(t) - H(0) - \eta t\right)\right\} \qquad (0.1)$$

waarin:

$P(t)$	overstromingskans als functie van de tijd	[1/jaar]
$P(0)$	overstromingskans in de referentiesituatie	[1/jaar]
$H(t)$	dijkhoogte als functie van de tijd	[m+NAP]
$H(0)$	dijkhoogte in de referentiesituatie	[m+NAP]
α	schaalparameter (exponentiële verdeling)	[1/m]
η	waterstandstijging, gecorrigeerd voor bodemdaling	[m/jaar]

Het kansenspoor heeft als doel om bovengenoemde parameters (die nodig zijn als invoer voor de kosten-batenanalyse) te bepalen. De belangrijkste parameters zijn α en η die hieronder in meer detail worden toegelicht.

Bepaling α (m.b.v. decimeringhoogte)

Vergelijking (0.1) laat zien dat de overstromingskans in het model afneemt bij toename van de dijkhoogte (en daarmee ook de verwachte overstromingsschade, vergelijk Figuur 2.1). Hoeveel de kans afneemt hangt af van de parameter α. Deze parameter bepaalt daarmee de effectiviteit van de dijkverhoging en is van groot belang voor de uitkomst van de kosten-batenanalyse.

Het is mogelijk om de parameter α uit te drukken in de decimeringhoogte van de kruinhoogte, gedefinieerd als díe dijkverhoging die resulteert in een 10 maal lagere overstromingskans:

$$\alpha = \frac{\ln(10)}{\Delta H_{10}} \approx \frac{2.3}{\Delta H_{10}} \qquad (0.2)$$

waarin ΔH_{10} de decimeringhoogte van de kruinhoogte is. De decimeringhoogte is omgekeerd evenredig met de schaalparameter α. De effectiviteit van dijkverhoging is dus groter naarmate de decimeringhoogte kleiner is.

Waterstandstijging (η)
Het verloop van de overstromingskans over de tijd wordt bepaald door de dijkhoogte als functie van de tijd en de structurele waterstandstijging (parameter η). Hiermee wordt het effect van klimaatverandering geschematiseerd. Wanneer de dijkhoogte niet wordt aangepast, neemt de overstromingskans als gevolg hiervan geleidelijk toe.
Zoals te zien in vergelijking (0.1) hangt de snelheid waarmee de overstromingskans toeneemt niet alleen af van de klimaatverandering zelf, maar ook van de parameter α, die het effect van de waterstandstijging op de kans bepaalt.

De waterstandstijging als gevolg van klimaatverandering wordt overigens nog gecorrigeerd voor bodemdaling. De parameter η betreft dus een relatieve waterstandstijging.

Opmerking

Wat wellicht is opgevallen, is dat voor de bepaling van de parameter α gebruik wordt gemaakt van de decimeringhoogte van de *kruinhoogte*, terwijl het bij de parameter η om een *waterstand*stijging gaat.

Beiden worden gebruikt in dezelfde formule (0.1), wat lijkt te duiden op een inconsistentie. De reden waarom voor deze benadering is gekozen, en waarom dus is gekozen om de α te baseren op de decimeringhoogte van de kruinhoogte, is als volgt.

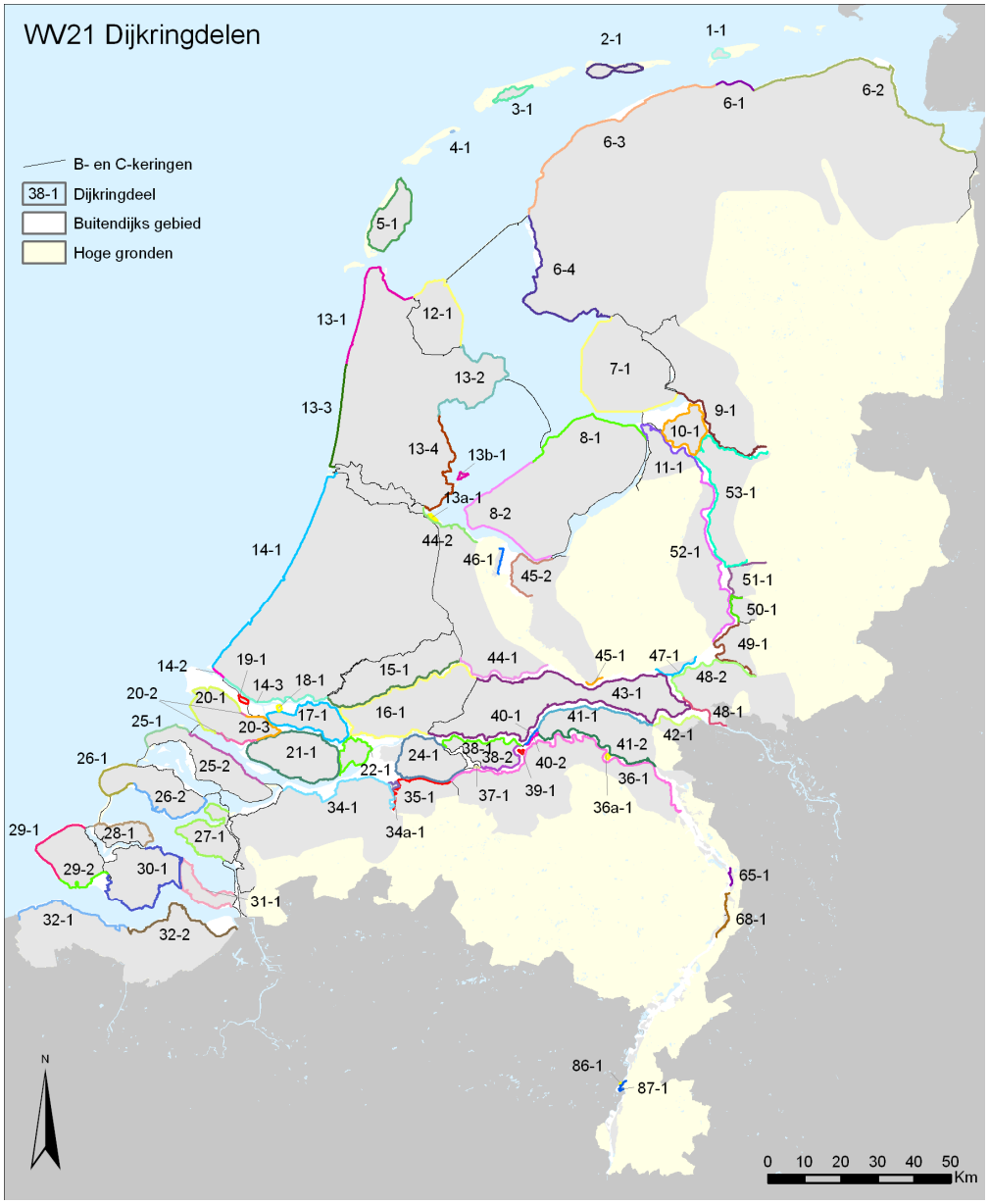
Langs de meren en de kust (en in mindere maten in de IJssel-Vechtdelta en de benedenrivieren) zijn waterstanden en golven met elkaar gecorreleerd, beiden worden immers beïnvloed door de wind. Hardere wind levert meer windopzet en hogere golven. In het geval van zeespiegelstijging neemt alleen de waterstand toe. De wind verandert niet. Als we het effect van een grotere waterdiepte op de golven verwaarlozen, veranderen ook de golven niet. Een *stijging* van de zeespiegel is vergelijkbaar met een *daling* van de kruin van dezelfde grootte. Daarom is het beter om de H(0), H(t) en de α uit te drukken in termen van kruinhoogte om het effect van zee- en meerpeilstijging in rekening te brengen.

In het bovenrivierengebied zijn de waterstanden en de golven niet gecorreleerd: de decimeringhoogten voor de waterstand en de kruinhoogten zijn nagenoeg gelijk. Althans, zolang het effect van het aftoppen van de afvoergolven beperkt is. In dat geval speelt dezelfde problematiek als langs de meren en de kust.

2.3 Opzet en uitgangspunten van referentiesituaties

2.3.1 Dijkringdelen als ruimtelijke eenheden

Dijkringdelen vormen de ruimtelijke eenheden waarvoor de maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) en de analyse van slachtofferrisico's zijn uitgevoerd. De dijkringen uit de Waterwet vormen hiervoor de basis. Voor een aantal dijkringen zijn met het oog op *verschillen in de gevolgen* van een dijkdoorbraak *of verschillende onafhankelijke bedreigingen* meerdere dijkringdelen onderscheiden (zie Van der Doef en de Bruijn, 2011). In totaal gaat het om 15 dijkringen, waarbij onderverdeling in dijkringdelen aan de orde is. Voor 11 dijkringen is een onderverdeling in twee dijkringdelen gehanteerd; voor vier dijkringen gaat het om een onderverdeling in 3 of 4 dijkringdelen. Voor de overige dijkringen geldt dat ze uit één dijkringdeel bestaan. De dijkringdelen zijn op kaart getoond in Figuur 2.1



Figuur 2.1 Overzicht van onderscheiden dijkringdelen

In de rapportage is de onderverdeling in dijkringdelen herkenbaar gemaakt door aan het nummer van de dijkring, na een horizontaal streepje, een tweede nummer (1 t/m 4, voor 1 t/m 4 dijkringdelen) toe te voegen. Ook is aan de naam van de dijkring de naam toegevoegd van het watersysteem van waaruit de overheersende dreiging voor het dijkringdeel komt, of een aanduiding van de geografische ligging.

2.3.2 *Twee referentiesituaties binnen het onderzoek*

Voor het uitvoeren van de MKBA en Slachtofferanalyses is een referentiesituatie nodig. Deze vervult in de analyse twee verschillende functies: (1) als startpunt voor de berekeningen en (2) als situatie om de uitkomsten mee te kunnen vergelijken. Een referentiesituatie beschrijft in beginsel de verwachte situatie bij voortzetting van het huidige beleid; dus een ongewijzigd beleid. In de context van het onderzoek naar actualisering van de normen voor

waterveiligheid is ervoor gekozen op twee verschillende manieren invulling te geven aan 'voortzetting van het huidige beleid'. Daarom zijn in het onderzoek twee referentiesituaties onderscheiden. Het onderscheid tussen beide heeft met name betrekking op de wijze waarop wordt omgegaan met nieuwe inzichten (bijv. het belang van piping, de invloed van lengte-effecten).

Voortzetting van het huidige beleid kan zo worden uitgelegd dat de waterkeringen voldoen aan de huidige normen, getoetst volgens de huidige normeringsystematiek. De huidige normeringsystematiek kan daarbij worden opgevat als een dynamisch systeem. Door nieuwe inzichten kunnen hydraulische randvoorwaarden wijzigen en kunnen toetsvoorschriften worden aangepast. Zo kunnen inzichten vanuit VNK ten aanzien van het belang van piping in het rivierengebied hun weg vinden in aangescherpte toetsregels voor piping.
Binnen deze benadering blijft worden toegewerkt naar de beschermingsniveaus zoals die in de huidige normen zijn vastgelegd. Daarbij worden die normen, hoewel betrekking hebbend op de overschrijdingskans van extreme hoogwaterstanden, getalmatig gelijk gesteld aan overstromingskansen. De Commissies Becht (1977), Boertien (1992) en meer recent de Commissie Veerman (2008) hebben hetzelfde uitgangspunt gehanteerd net als het CPB in de KBA Ruimte voor de Rivier (Eijgenraam 2005). Dit uitgangspunt sluit aan bij de (in de maatschappij) veronderstelde/gepercipieerde beschermingsniveaus.

Onderzoek in het kader van het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK) maakt duidelijk dat er geen één op één verband bestaat tussen overschrijdingskansen en overstromingskansen. Althans niet binnen de huidige normeringsystematiek, waarin het faalmechanisme overloop/overslag centraal staat. Nieuwe inzichten in lengte-effecten, de grotere bijdrage van piping aan de overstromingskans, e.d. laten zien dat de overstromingskans veelal een factor groter is dan de overschrijdingskans. Deze inzichten zijn door een groep experts eind 2009 betrokken bij de opstelling van een zogeheten 'omrekentabel'. Deze 'omrekentabel' (zie Tabel 2.1) laat zien dat de factor tussen overschrijdingskans en overstromingskans een functie is van het type watersysteem en de grootte van de dijkring. Deze nieuwe inzichten impliceren dat de overstromingskansen – ook na uitvoering van de lopende verbeterprojecten en –programma's - groter zullen zijn dan de overschrijdingskansen van de waterstanden.

Tabel 2.1 Omrekentabel' met verhouding overstromingskans –overschrijdingskans voor verschillende typen dijkringen na uitvoering van de lopende verbetermaatregelen

Type watersysteem	*grote dijkring*		*kleine dijkring*	
	gemiddelde	bandbreedte	gemiddelde	bandbreedte
Zee	2	0,6 – 5	1	0,3 – 2,2
Benedenrivieren	4	1 – 9,1	2	1 – 5,2
Meren	3	0,6 – 9,5	2	0,5 – 5,7
Bovenrivieren	5	1,2 – 9,7	3	1,1 – 5,4

Bron: Kok en Vrouwenvelder (21 december 2009); Eerste vertaalslag van huidig beschermingsniveau naar overstromingskans

Voor het onderzoek worden dus twee referentiesituaties onderscheiden:

- De **eerste referentiesituatie** sluit aan bij het uitgangspunt van de Commissies Becht (1977), Boertien (1992) en Veerman (2008). In deze referentiesituatie zijn de overstromingskansen van de onderscheiden dijkringdelen getalsmatig gelijk gesteld aan de huidige wettelijke normfrequenties in termen van overschrijdingskansen. De referentiesituatie weerspiegelt de *(in de maatschappij) veronderstelde/gepercipieerde* beschermingsniveaus.
- De **tweede referentiesituatie** – rekeninghoudend met nieuwe inzichten – vormt een *inschatting van de verwachte* overstromingskansen na uitvoering van de lopende verbeterprojecten en –programma's (in 2015/2020). Deze inschatting is gebaseerd op de inzichten uit de omrekentabel van experts.

In de maatschappelijke kosten-batenanalyse en de analyse van slachtofferrisico's wordt rekening gehouden met verwachte ontwikkelingen in economie en demografie. Als referentiejaar voor deze ontwikkelingen geldt in de analyses het jaar 2015. Voor de bepaling van toekomstige investeringen (kostenbepaling) wordt verondersteld dat de referentiesituatie in 2015 is bereikt.

De schatting van de kosten van maatregelen (dijkverhoging en dijkversterking) voor het verkleinen van de overstromingskans is voor de eerste referentiesituatie volledig gebaseerd op de huidige Voorschriften Toetsen op Veiligheid (VTV). Bij de tweede referentiesituatie wordt rekening gehouden met het grotere belang van piping. Hiervoor is gewerkt met de nieuwe piping-regel zoals die in het kader van WTI is ontwikkeld. In vergelijking tot de eerste referentiesituatie, waarbij de piping-regel uit het VTV is gebruikt, leidt toepassing van deze nieuwe piping-regel tot hogere kosten in piping-gevoelig gebieden.

2.3.3 Nadere invulling van beide referentiesituaties

De *eerste referentiesituatie* is *gedefinieerd* als de situatie waarbij de overstromingskans per onderscheiden dijkringdeel getalsmatig gelijk is aan de huidige wettelijke normen in termen van overschrijdingskansen. Net als bij de huidige toetsvoorschriften wordt er in de referentiesituatie vanuit gegaan dat overloop/overslag het dominante faalmechanisme is. Er wordt vanuit gegaan dat er geen zwakke plekken zijn en elke kilometer dijk een gelijke kans op doorbreken heeft . Regionale keringen, B- en C-keringen worden geacht 'op orde' te zijn.

De *tweede referentiesituatie* betreft een *ordegrootte inschatting*, waarbij rekening is gehouden met nieuwe inzichten ten aanzien van piping resp. lengte-effecten. De factoren zoals opgenomen in tabel 1 zijn benut om de verwachte overstromingskans per dijkringdeel na uitvoering van de lopende verbeterprojecten en –programma's te schatten.
De factoren van de omrekentabel gelden per dijkring. Wanneer een dijkring in het onderzoek is opgedeeld in bijvoorbeeld twee dijkringdelen dan zijn de overstromingskansen van de dijkring*delen* een factor twee kleiner. Het zijn met name de *grote* dijkringen langs de kust die in het onderzoek zijn opgedeeld in twee of meer dijkringen. De 'lengtefactor' van 2 voor grote dijkringen van het type watersysteem 'Zee' (zie Tabel 2.1) wordt daarmee gecompenseerd door de opsplitsing in twee of meer dijkringdelen.
Voor het onderzoek is ervoor gekozen de tweede referentie te benaderen als een minder rooskleurige inschatting van de veiligheidssituatie dan de eerste referentiesituatie. Daarom is het uitgangspunt gehanteerd dat de geschatte overstromingskans van de tweede referentiesituatie groter, dan wel gelijk is aan die van de eerste referentiesituatie.
Met deze principes is voor alle dijkringdelen een ordegrootte inschatting gedaan voor de overstromingskansen van de tweede referentiesituatie.

Een overzicht van de overstromingskansen van beide referentiesituaties per type watersysteem is opgenomen in Tabel 2.2. De grootste verschillen worden gevonden bij de *grote* dijkringen in het rivierengebied; daar bedraagt het verschil een factor 5. In dit type dijkring hebben nieuwe inzichten in het belang van piping en lengte-effecten het meeste effect op de overstromingskans van de dijkring (de factor uit de 'omrekentabel' is daar het grootst).
Voor de kleinere dijkringen in het bovenrivierengebied is het verschil geringer: ongeveer en factor 3. Voor de dijkringen langs de kust ontlopen de overstromingskansen van beide referentiesituaties elkaar slechts weinig: ze zijn gelijk, of de overstromingskans van de tweede referentiesituatie is ruwweg een factor 2 groter dan bij de eerste referentiesituatie.

Tabel 2.2 Overstromingskansen per jaar per dijkringdeel voor de eerste en tweede referentiesituatie

Nr	Naam	Eerste ref.	Tweede ref.	Nr	Naam	Eerste ref.	Tweede ref.
1-1	Schiermonnikoog	1/2000	1/2000	28-1	Noord-Beveland	1/4000	1/4000
2-1	Ameland	1/2000	1/2000	29-1	Walcheren-West	1/4000	1/4000
3-1	Terschelling	1/2000	1/2000	29-2	Walcheren-Oost	1/4000	1/4000
4-1	Vlieland	1/2000	1/2000	30-1	Zuid-Beveland-West	1/4000	1/4000
5-1	Texel	1/4000	1/4000	31-1	Zuid-Beveland-Oost	1/4000	1/4000
6-1	Friesland-Groningen-Lauwersmeer	1/4000	1/4000	32-1	Zeeuwsch Vlaanderen-West	1/4000	1/4000
6-2	Friesland-Groningen-Groningen	1/4000	1/4000	32-2	Zeeuwsch Vlaanderen-Oost	1/4000	1/4000
6-3	Friesland-Groningen-NoordFriesland	1/4000	1/4000	34-1	West-Brabant	1/2000	1/500
6-4	Friesland-Groningen-IJsselmeer	1/4000	1/4000	34a-1	Geertruidenberg	1/2000	1/500
7-1	Noordoostpolder	1/4000	1/2000	35-1	Donge	1/2000	1/1000
8-1	Flevoland-Noordoost	1/4000	1/4000	36-1	Land v Heusden/de Maaskant	1/1250	1/250
8-2	Flevoland-ZuidWest	1/4000	1/2000	36a-1	Keent	1/1250	1/500
9-1	Vollenhove	1/1250	1/250	37-1	Nederhemert	1/1250	1/500
10-1	Mastenbroek	1/2000	1/1000	38-1	Bommelerwaard-Waal	1/1250	1/1250
11-1	IJsseldelta	1/2000	1/1000	38-2	Bommelerwaard-Maas	1/1250	1/500
12-1	Wieringen	1/4000	1/2000	39-1	Alem	1/1250	1/500
13-1	Noord-Holland-Noord	1/10000	1/10000	40-1	Heerenwaarden-Waal	1/2000	1/250
13-2	Noord-Holland-Westfriesland	1/10000	1/10000	40-2	Heerenwaarden-Maas	1/500	1/250
13-4	Noord-Holland-Waterland	1/10000	1/10000	41-1	Land van Maas en Waal-Waal	1/1250	1/500
13b-1	Marken	1/1250	1/500	41-2	Land van Maas en Waal-Maas	1/1250	1/500
14-1	Zuid-Holland-Kust	1/10000	1/10000	42-1	Ooij en Millingen	1/1250	1/500
14-2	Zuid-Holland-NweWaterweg-West	1/10000	1/10000	43-1	Betuwe, Tieler- en C'waarden	1/1250	1/250
14-3	Zuid-Holland-NweWaterweg-Oost	1/10000	1/10000	44-1	Kromme Rijn-Rijn	1/1250	1/500
15-1	Lopiker- en Krimpenerwaard	1/2000	1/1000	44-2	Kromme Rijn-Meren	1/1250	1/500
16-1	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden	1/2000	1/1000	45-1	Gelderse Vallei-Rijn	1/1250	1/1250
17-1	IJsselmonde	1/4000	1/2000	45-2	Gelderse Vallei-Meren	1/1250	1/500
18-1	Pernis	1/10000	1/5000	46-1	Eempolder	1/1250	1/500
19-1	Rozenburg	1/10000	1/5000	47-1	Arnhemse- en Velpsebroek	1/1250	1/500
20-1	Voorne-Putten-West	1/4000	1/4000	48-1	Rijn en IJssel-Boven	1/1250	1/500
20-2	Voorne-Putten-Midden	1/4000	1/4000	48-2	Rijn en IJssel-Beneden	1/1250	1/500
20-3	Voorne-Putten-Oost	1/4000	1/4000	49-1	IJsselland	1/1250	1/500
21-1	Hoekse Waard	1/2000	1/1000	50-1	Zutphen	1/1250	1/500
22-1	Eiland van Dordrecht	1/2000	1/1000	51-1	Gorssel	1/1250	1/500
24-1	Land van Altena	1/2000	1/1000	52-1	Oost Veluwe	1/1250	1/250
25-1	Goeree-Overflakkee-Noordzee	1/4000	1/4000	53-1	Salland	1/1250	1/500
25-2	Goeree-Overflakkee-Haringvliet	1/4000	1/2000	65-1	Arcen	1/250	1/125
26-1	Schouwen Duiveland-West	1/4000	1/4000	68-1	Venlo-Velden Noord	1/250	1/125
26-2	Schouwen Duiveland-Oost	1/4000	1/2000	86-1	Maasband	1/250	1/125
27-1	Tholen en St. Philipsland	1/4000	1/4000	87-1	Meers	1/250	1/125

2.3.4 *Rol van beide referentiesituaties in het onderzoek*

De referentiesituaties vormen het vertrekpunt voor de MKBA. De MKBA heeft daarbij twee doelen: (i) het bepalen van economisch optimale beschermingsniveaus per dijkringdeel en (ii) het in beeld brengen van de benodigde investeringen om deze beschermingsniveaus te

realiseren. Voor de economisch optimale beschermingsniveaus geldt dat deze weinig tot niet afhankelijk zijn van de overstromingskans in de referentiesituatie (zie Box 3.1). De benodigde investeringen zullen bij de tweede referentiesituatie (beduidend) hoger uitvallen; een logisch uitvloeisel van de (veelal) grotere overstromingskansen dan bij de eerste referentiesituatie. De afstand tussen de referentiekansen en de berekende economisch optimale kansen zal bij de tweede referentie immers veelal groter zijn.
Bij de tweede referentiesituatie wordt rekening gehouden met nieuwe inzichten in ondermeer de bijdrage van piping aan de overstromingskans. Die nieuwe inzichten komen niet alleen tot uitdrukking in een grotere overstromingskans, maar – in vergelijking tot de eerste referentiesituatie - ook in hogere kosten om extra bescherming te realiseren. Deze relatief hogere kosten zullen leiden tot iets minder scherpe economisch optimale beschermingsniveaus dan bij de eerste referentiesituatie.

Voor de analyse van slachtofferrisico's geeft de tweede referentiesituatie een andere set overstromingskansen. Het lokaal individueel risico zal door de grotere overstromingskansen in een deel van de dijkringen toenemen, vooral in het rivierengebied. Ook het landelijk groepsrisico zal bij de tweede referentiesituatie groter zijn dan het risico bij de eerste referentiesituatie. De bijdrage van het rivierengebied aan het slachtofferrisico wordt ten opzichte van de eerste referentiesituatie vergroot.

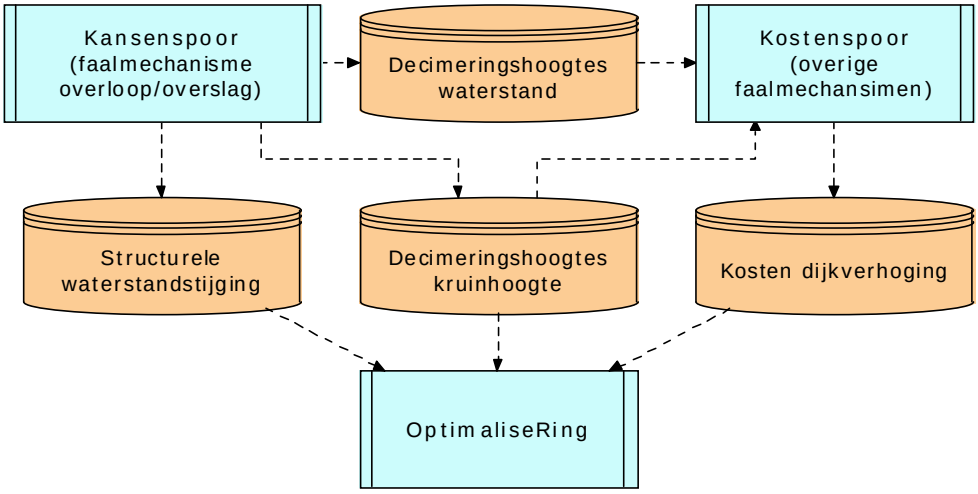
Bij zowel de kosten-batenanalyse als de analyse van slachtofferrisico's is een reeks gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd in de context van de eerste referentiesituatie.

2.3.5 Keuze faalmechanismen

Het berekenen van een overstromingskans van een dijkring is complex. De hydraulische belasting op de waterkering varieert in de tijd, de sterkte van de waterkering is vaak onzeker, en bovendien kan de waterkering op verschillende manieren falen. Op dit moment wordt het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK) uitgevoerd, waarin overstromingskansen van dijkvakken en dijkringen worden berekend, rekening houdend met de belangrijkste faalmechanismen en de onzekerheden in kennis en basisgegevens.

De informatie en inzichten die met VNK worden opgedaan konden (rekening houdend met het tijdpad van WV21 en VNK) slechts beperkt toegepast worden binnen WV21. In principe moet de overstromingskans worden berekend op basis van alle faalmechanismen. Binnen WV21 is echter alleen gerekend voor het faalmechanisme overloop/golfoverslag.
Zowel de overstromingskans als de investeringskosten worden uitgedrukt in de dijkhoogte. Uitgangspunt hierbij is dat bij dijkverhoging de waterkering zodanig wordt aangepast dat de faalkans voor de overige faalmechanismen in gelijke mate afneemt.
Bij het bepalen van de investeringskosten voor dijkversterking wordt op deze manier rekening gehouden met alle faalmechanismen.

In het kostenspoor zijn de kostencurves afgeleid als functie van de dijkhoogte. Voor de meeste faalmechanismen zijn maatregelen en bijbehorende kosten echter niet gekoppeld aan een dijkhoogte maar aan een waterstand. Om de kostencurve voor dijkverhoging af te leiden is het nodig de dijkverhoging te kunnen relateren aan een waterstandverhoging. Daarom zijn binnen het kansenspoor niet alleen de decimeringhoogtes voor de kruinhoogte, maar ook die voor de waterstand berekent (Figuur 2.3). Voor de kosten-batenanalyse met OptimaliseRing is alleen de decimeringhoogte voor de kruinhoogte van belang (paragraaf 2.2.1), maar bij het bepalen van de kosten van dijkverhoging is ook de decimeringhoogte van de waterstand gebruikt.



Figuur 2.2 Schematische weergave verwerking van faalmechanismen in de kosten van dijkverhoging.

Voor dijkbekleding is een zelfde soort uitgangspunt gekozen als bij kunstwerken, waardoor bij een zekere mate van waterstandstijging en kruinverhoging op een vak in theorie ook direct alle buitenbekleding versterkt dient te worden. Bij bekleding wordt er in de kostenmodules echter rekening mee gehouden dat een dergelijke ingreep niet noodzakelijkerwijs meteen voor de gehele lengte van het beschouwde dijkvak nodig hoeft te zijn. Door het hanteren van deze systeemaannamen wordt het zeer 'abrupt' ontstaan van zeer hoge kosten van maatregelen bij een minimale verhogingsstap enigszins voorkomen. In de aannames die hierbij zijn gehanteerd worden de ontwerphorizon en de beoogde levensduur van de nu reeds aanwezige bekleding meegenomen.

Met het Hydra instrumentarium wordt binnen het kansenspoor de noodzakelijke kruinverhoging van een kering berekend bij een stijgende waterstand. Om er voor te zorgen dat de kering bij deze waterstand ook daadwerkelijk blijft voldoen aan de gestelde ontwerpeisen dienen ook maatregelen getroffen te worden ten aanzien van opbarsten/piping en macrostabiliteit. Deze faalmechanismen worden expliciet meegenomen in de kostenbepaling van de versterkingsmaatregel (De Grave, 2010).
De dimensies van de benodigde versterkingsmaatregelen zijn per dijkvak bepaald met behulp van de zogenaamde Dijk Analyse Module (DAM), gebruik makend van de Rationele Risicobenadering Dijken (RRD) systematiek, ontwikkelt binnen de unit Geo Engineering bij Deltares. Per dijkvak is op basis van de gegevens aangeleverd (en gevalideerd) door de beheerders een representatief dijkprofiel vastgesteld, welke als input dient voor de RRD analyse. Gegeven de onzekerheden en variabiliteit van de gegevens over de bodem- en grondeigenschappen vindt binnen de dijkvakken een nadere schematisering plaats van de ondergrond waarbij een beperkt aantal bodemopbouwen wordt onderscheiden zowel voor piping als voor macrostabiliteit, met een bijbehorende kans van voorkomen. Per dijkvak is in de analyse een 10-tal hydraulische belastingsituaties doorgerekend om op ieder dijkvak bij een (gemiddelde) trend te kunnen vaststellen in de toename van de dijkbasis ten behoeve van de mechanismen opbarsten/piping en stabiliteit in geval van een stijgende waterstand.

Kritiek golfoverslagdebiet

De kruinhoogte van de referentiesituatie en in mindere mate de decimeringhoogte is afhankelijk van de keuze van het kritieke golfoverslagdebiet. Voor de basisvariant in WV 21 is gekozen voor een kritiek overslagdebiet van 1l/s/m. In de huidige ontwerppraktijk is 1 l/s/m'

het toelaatbare overslagdebiet en niet het kritiek golfoverslagdebiet. Het kritiek overslagdebiet is het debiet waar daadwerkelijk falen zal optreden. Het is een parameter die van plaats tot plaats zal verschillen afhankelijk van de bekleding, onderlaag etc. Daarnaast spelen zaken als overgangen (bijvoorbeeld talud-weg) en elementen in het talud (afrasteringen) een rol. In principe wordt het kritiek overslagdebiet weergegeven door een kansverdeling met een verwachtingswaarde en spreiding daarom heen. De verwachtingswaarde kan in de orde van 50 l/s/m' liggen met een grote spreiding er omheen. Een waterkering zal niet falen bij een verwachtingswaarde van het kritiek overslagdebiet maar bij een lager golfoverslagdebiet, op een plaats waar toevallig een groot aantal ongunstige factoren samenkomen. Welk overslagdebiet daarbij hoort is onbekend. Daarom is in WV21 verondersteld dat het kritiek overslagdebiet precies gelijk is aan het toelaatbaar overslagdebiet, en is in een gevoeligheidsanalyse geanalyseerd wat het effect zou zijn als het overslagdebiet 5 l/s/m' resp. 10 l/s/m' zou zijn.

2.3.6 Klimaatverandering

In de kosten-batenanalyse wordt rekening gehouden met een geleidelijke toename van de overstromingskans als gevolg van klimaatverandering, indien niet wordt ingegrepen door middel van dijkverhogingen. De effecten van klimaatverandering worden tot uitdrukking gebracht in een structurele (lokale) waterstandstijging.
De invloed van klimaatverandering is bepaald voor twee klimaatscenario's van het KNMI: het G+ en het W+ scenario. Hierin is rekening gehouden met zeespiegelstijging en toename van de rivierafvoeren. Er is geen rekening gehouden met toename in windeffecten, morfologische effecten of andere klimaateffecten die de waterstand mogelijk zouden kunnen beïnvloeden. Wel is in de structurele waterstandstijging een bijdrage opgenomen voor bodemdaling. In (Haasnoot et al., 1999) is de bodemdaling in beeld gebracht voor de periode 1995-2050. Deze kaart is voor de verkenning van de kosteneffectiviteit van grootschalige maatregelen voor droogteschade (Van Beek et al., 2008) aangepast voor de periode 2000-2050.
In bijlage H is zowel deze kaart als de daarop gebaseerde inschatting van de bodemdaling per dijkringtraject weergegeven.

2.4 Ruimtelijke schematisatie

Zoals al in 2.3.1 is beschreven vormen dijkringdelen de ruimtelijke eenheid waarvoor de maatschappelijke kosten-batenanalyse en de analyse van slachtofferrisico's zijn uitgevoerd. Daarnaast worden in het kansenspoor (en kostenspoor) ook nog dijkringtrajecten onderscheiden.

dijkringtrajecten,
Voor de analyse van de optimale overstromingskansen wordt per dijkringdeel een onderverdeling gemaakt in verschillende dijkringtrajecten. De dijkringtrajecten zijn de ruimtelijke basiseenheden voor de analyses met het model OptimaliseRing die ten grondslag liggen aan de uitvoering van de MKBA. De dijkringtrajecten vormen daarmee ook het ruimtelijk aggregatieniveau waarvoor de informatie over kansen en kosten in resp. het kansen- en kostenspoor moet worden vastgesteld.
De dijkringtrajecten worden in eerste instantie bepaald door verschillen in de kenmerken en omvang van de hydraulische belasting. Daartoe wordt onderscheid gemaakt naar hydraulische regimes op grond van verschillende watersysteemtypen (binnen de hoofdsystemen kust, estuaria, meren en rivieren). Verdere verschillen in de hydraulische belasting worden o.a. veroorzaakt door verschillen in locatiespecifieke maatgevende waterstanden en de invloed van wind en golven in relatie met de geografische oriëntatie. Dit heeft geleid tot een nadere indeling van dijkringdelen in gemiddeld 4 à 5 dijkringtrajecten. Een praktische beperking daarbij is dat in het model OptimaliseRing op dit moment niet meer dan

10 dijkringtrajecten per dijkringdeel kunnen worden beschouwd. Op grond van het bovenstaande geldt dat de indeling in dijkringtrajecten berust op een generieke indeling die voor alle sporen in de MKBA op uniforme wijze wordt gehanteerd. In totaal zijn binnen de 79 in de MKBA beschouwde dijkringdelen 203 afzonderlijke dijkringtrajecten onderscheiden. Kaarten met de ligging van de trajecten zijn weergegeven in bijlage 6B.

2.5 Dijkringdeelfactor

Een van de uitgangspunten binnen WV21 is dat een dijkringdeel in de referentiesituatie een overstromingskans heeft gelijk aan de wettelijke normfrequentie van het betreffende dijkringdeel. Om deze overstromingskans in de referentiesituatie te vertalen naar de kans voor een dijk*vak*, wordt gebruik gemaakt van de dijkringdeelfactor.

De overstromingskans van een dijkvak is niet hetzelfde als de overstromingskans van een dijkring(deel). De overstromingskans van de dijkring als geheel is groter dan die van één enkel dijkvak. Binnen de Hydra-modellen is dit vooral een gevolg van de variabiliteit in de oriëntatie van de dijkvakken. Een dijkvak dat op het westen is georiënteerd zal niet onder dezelfde omstandigheden falen door golfoverslag als een dijkvak dat op het oosten is georiënteerd. Komen ze beide voor in één dijkring, dan moeten de overstromingskansen van beide dijkvakken nagenoeg opgeteld worden: ze gedragen zich vrijwel onafhankelijk van elkaar wat golfaanval betreft. De dijkringdeelfactor wordt in dit onderzoek gedefinieerd als:

$$\text{dijkringdeelfactor} = \frac{\text{overstromingskans dijkringdeel}}{\text{overstromingskans dijkvak}}$$

In principe wordt deze factor met het Hydra-instrumentarium berekend. Daar waar dit niet mogelijk is (bijvoorbeeld bij gebruik van Hydra-K) is op basis van expert-opinion een inschatting gemaakt. De dijkringdeelfactor is niet nauwkeurig te bepalen. Dat komt deels door numerieke invloeden, en deels omdat de dijkringdeelfactor afhankelijk is van een groot aantal aannamen (de grootte van het kritieke overslagdebiet bijvoorbeeld). Om die reden is binnen het onderzoek gewerkt met een indeling in vier klassen: dijkringdeelfactoren van 2, 5, 10 en 15. Ieder dijkringdeel is gekoppeld aan één van deze vier klassen, deels door deze te berekenen met het betreffende Hydra-model en deels op basis van expert opinion. In bijlage I is een overzicht gegeven van de dijkringdeelfactoren.

De dijkringdeelfactor is van belang voor de bepaling van de kruinhoogte van een dijkvak in de referentiesituatie. Deze informatie wordt gebruikt bij de bepaling van de kostencurve: een dijkverhoging van een hogere dijk is duurder dan van een lagere dijk. Verschillen in de kostencurve door een verkeerde inschatting van de dijkringfactor spelen overigens maar een kleine rol, daarom is de relatief grove indeling in klassen aanvaardbaar.

In het binnen VNK gebruikte instrumentarium (PC-ring) worden naast bovengenoemde variabiliteit bij de belastingen ook onzekerheden meegenomen in sterkte-eigenschappen, inhomogeniteit van de ondergrond, etc. De dijkringfactor van PC-Ring zal daarom anders zijn dan de dijkringfactor die met het Hydra-instrumentarium wordt berekend.

2.6 Basisvariant en gevoeligheidsonderzoek

De informatie voor de overstromingskansen is vergaard voor een basisvariant en voor een aantal alternatieve varianten in een gevoeligheidsanalyse.

In de basisvariant wordt zoveel mogelijk uitgegaan van bestaand beleid, bestaande inzichten en ontwerpregels en geplande maatregelen die zijn vastgelegd. Bij de gevoeligheidsanalyses gaat het er om te onderzoeken hoe gevoelig de uitkomsten van de basisvariant zijn voor de belangrijkste en onzekere variabelen.
De gevoeligheidsanalyses worden gebruikt om een bandbreedte rondom de uitkomsten van de basisvariant te presenteren. In onderstaande tabel zijn de voor het kansenspoor relevante onderdelen van de basisvariant weergegeven.

Tabel 2.3 Uitgangspunten basisvariant.

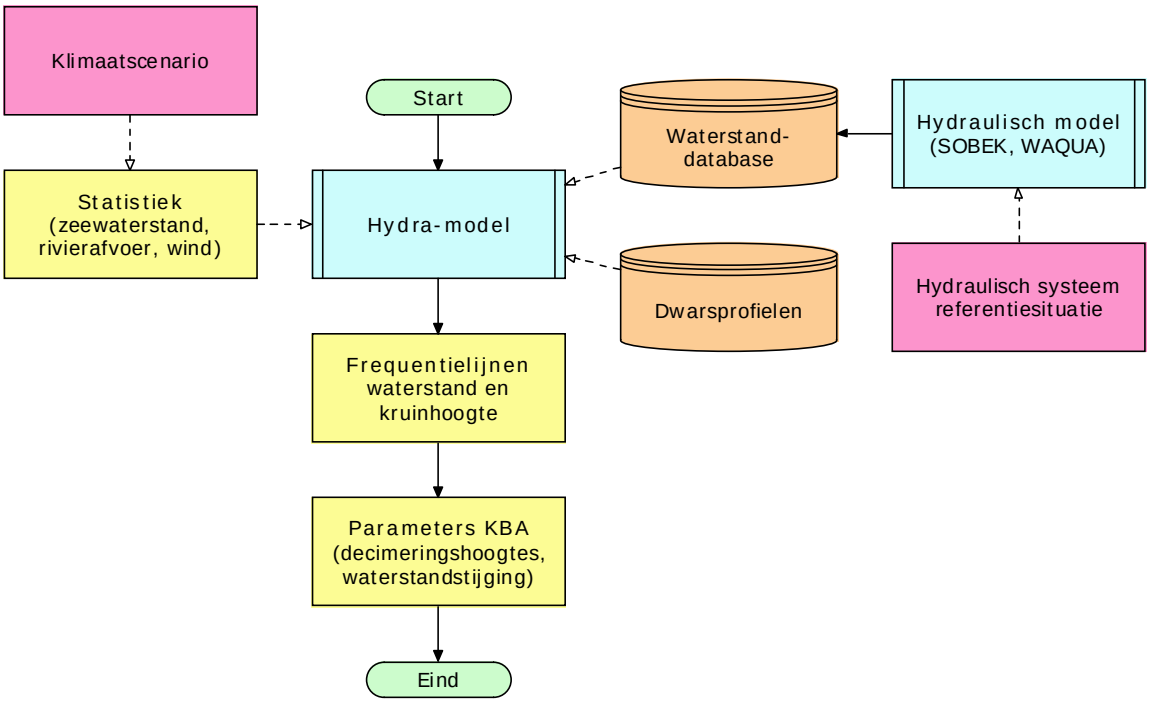
Onderdeel	Basisvariant
Ruimte voor de Rivier maatregelen	Voor de berekeningen is uitgegaan van het pakket maatregen voor de PKB Ruimte voor de Rivier zoals eind 2006 is vastgesteld.
Ontzien Nederrijn / Lek	Er is rekening gehouden met het ontzien van de Nederrijn/Lek bij Rijnafvoeren (bij Lobith) boven de 16.000 m^3/s
Afsluitdijk	Norm van 1/10000 waardoor de faalkans van de B -kering geen invloed heeft op de economisch optimale norm van de achterliggende A -keringen.
Overhoogte	Geen overhoogte
Faalkans-boekhouding algemeen	Conform huidige leidraden
Kritiek overslagdebiet	1 l/s/m
Piping	Huidige rekenregels
Klimaat-/ en aftopscenario	W+ scenario Rivierafvoeren Rijn en IJssel afgetopt
IJsselmeer	Tot 2035 peil handhaven, daarna peilverhoging

3 Modellen en uitgangspunten

Belangrijk voor het kansenspoor is de formule voor de overstromingskans van een dijkringtraject als functie van de dijkhoogte en de tijd. Het kansenspoor heeft immers als doel om de benodigde invoergegevens voor deze vergelijking te bepalen.

Bij de berekening van de invoerparameters voor OptimaliseRing is gebruik gemaakt van het Hydra-instrumentarium (zie Figuur 3.1). Hiermee zijn voor locaties langs alle dijkringtrajecten overschrijdingsfrequentielijnen berekend voor de waterstand en de kruinhoogte. De helling van de frequentielijn is bepalend voor de decimeringhoogte, de verandering van de frequentielijn bij verschillende klimaatscenario's geeft de invloed weer van klimaatverandering. Hoofdstuk 4 geeft een gedetailleerde beschrijving van de manier waarop deze parameters zijn afgeleid.

Dit hoofdstuk concentreert zich op de berekeningen met de Hydra-modellen zelf, en de daarvoor benodigde invoergegevens.



Figuur 3.1 Schema berekening invoerparameters OptimaliseRing binnen het kansenspoor.

De invoergegevens voor de Hydra-modellen bestaan uit:

- *Statistische gegevens*
  Afhankelijk van het gebied betreft het hier statistiek van zeewaterstanden, meerpeilen, rivierafvoeren en wind (of combinaties daarvan). Deze gegevens zijn afhankelijk van het gekozen klimaatscenario. Voor de referentiesituatie is voor alle gebieden zoveel mogelijk aangesloten bij de statistiek die is afgeleid voor het bepalen van de geldende Hydraulische Randvoorwaarden (HR2006). In de klimaatscenario's G+ en W+ wordt

rekening gehouden met verhoogde rivierafvoeren en een stijging van de gemiddelde zeewaterstand of het gemiddelde meerpeil. De windstatistiek is overigens niet aangepast in deze klimaatscenario's.

Om rekening te houden met het effect van overstromingen bovenstrooms van Lobith, zijn de afvoeren van de IJssel en de Rijn afgetopt op een verondersteld fysisch maximum. Bij de Maas en de Vecht is geen rekening gehouden met een fysisch maximum van de afvoer.

- *Waterstand- en golfgegevens*
  De waterstanddatabase (of randvoorwaardendatabase) geeft de relatie tussen de basisvariabelen (zeewaterstand, rivierafvoer, etc.) en de lokale waterstand. Deze gegevens worden berekend met een hydraulisch model (zoals SOBEK of WAQUA), en worden in dit hoofdstuk aangeduid met de term randvoorwaarden. De randvoorwaardendatabase bevat ook de lokale golfparameters (berekend met WAQUA of SWAN) of gegevens om deze te berekenen met de golfgroeiformule van Bretschneider (TAW, 1985), namelijk: karakteristieke bodemhoogtes en effectieve strijklengtes per windrichting.

Voor het rivierengebied zijn de waterstanddatabases binnen WV21 opnieuw afgeleid om zo goed mogelijk aan te sluiten bij het hydraulisch systeem in de referentiesituatie. Voor de overige gebieden geldt dat de het verschil tussen de huidige situatie en de referentiesituatie dermate klein is dat kan worden volstaan met de waterstanddatabases die zijn gebruikt voor de HR2006 (of de TMR2006).

- *Profielgegevens*
  De vorm en oriëntatie van het dwarsprofiel zijn van belang voor de golfoploop. Daarnaast is ook het kritieke golfoverslagdebiet bepalend voor de frequentielijn van de kruinhoogte. Voor het rivierengebied en de IJssel- en Vechtdelta is gebruik gemaakt van door de waterkeringbeheerders aangeleverde actuele dijkinformatie, zoals vastgelegd in de WV21 profielendatabase. Voor de kust zijn (Hydra-K) standaardprofielen gebruikt en voor het IJsselmeer en het Markermeer is een door Alkyon samengestelde profielendatabase gebruikt; deze is door de betrokken Waterschappen geverifieerd.

3.1 Statistiek en randvoorwaarden per deelgebied

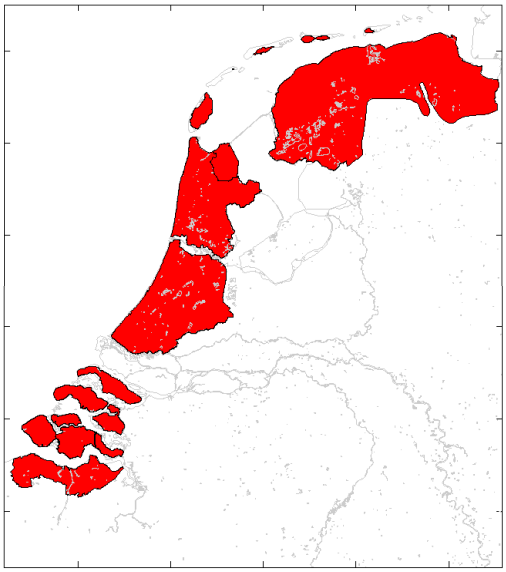
De volgende sub-paragrafen geven een precieze beschrijving van de gebruikte modellen en invoergegevens. Per deelgebied is aangegeven welk Hydra-model is gebruikt, welke waterstand- en golfdatabases (randvoorwaarden) zijn gehanteerd, welke statistiek is gebruikt in de verschillende klimaatscenario's en welke keuzes gemaakt zijn met betrekking tot het aftoppen van de rivierafvoeren en het ontzien van de Nederrijn/Lek. Een overzicht van al deze gegevens per deelgebied is gegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overzicht gebruikte Hydra-modellen, profielen, statistiek en randvoorwaarden per gebied.

Deelgebied	Dijkringen	Model	Randvoorwaarden	Statistiek	Profielen
Hollandse Kust Westerschelde Oosterschelde	13,14 25 t/m 32	Hydra-K versie 3.5.4	HR2006	HR2006 η o.b.v. data zeespiegelstijging 2050	standaard profielen HR2006
Waddenzee	1 t/m 6 12,13	Hydra-K versie 3.5.4	"Referentieversie HR Waddenzee"	"Referentieversie HR Waddenzee" η o.b.v. data zeespiegelstijging 2050	standaard profielen "Referentie versie HR Waddenzee"
IJsselmeer (incl. Ketelmeer en Vossemeer)	6 t/m 8 11 t/m 13	Hydra-VIJ versie 3.1.1	HR2006 (Hydra-M database omgezet naar Hydra-VIJ)	HR2006 η o.b.v. data meerpeilstijging 2100 (vanaf 2035)	profielen-database Alkyon
Markermeer (incl. IJmeer, Gooimeer, etc.)	8,13, 13a,13b 44 t/m 46	Hydra-VIJ versie 3.1.1	HR2006 (Hydra-M database omgezet naar Hydra-VIJ)	HR2006 geen meerpeilstijging	profielen-database Alkyon
Bovenrivieren (Rijntakken)	38 40 t/m 45 47 t/m 53	Hydra-B versie TMR2006	WV21 database o.b.v. WAQUA (aangepast i.v.m. ontzien van de Nederrijn/Lek) golfvormen uit TMR2006	WV21 afvoerstatistiek Lobith (basis: TMR2006 G+ en W+ scen.: o.b.v. GRADE) met aftoppen	profielen database WV21
Bovenrivieren (Maas)	36,36a 37 t/m 41 65,68 86,87	Hydra-B versie TMR2006	WV21 database o.b.v. WAQUA golfvormen uit HR2006	WV21 afvoerstatistiek Borgharen (basis: TMR2006 G+ en W+ scen.: o.b.v. Meuseflow) zonder aftoppen	profielen database WV21
IJsseldelta	10,11	Hydra-VIJ versie 3.1.1	TMR2006	WV21 afvoerstatistiek Lobith, omgezet naar Olst (o.b.v. WAQUA), rekening houdend met ontzien van de Nederrijn/Lek met aftoppen meerpeilstijging 2100 in G+ en W+	profielen database WV21
Vechtdelta	7,9,10,11 53	Hydra-VIJ versie 3.1.1	TMR2006	WV21 afvoerstatistiek Dalfsen (basis: TMR2006 G+ en W+ scen.: procent. verhoging) zonder aftoppen meerpeilstijging 2100 in G+ en W+	profielen database WV21
Benedenrivieren	14 t/m 22 24,25 34,34a,35	Hydra-B versie TMR2006	WV21 database o.b.v. SOBEK golfvormen uit TMR2006	WV21 afvoerstatistiek Lobith met aftoppen zeespiegelstijging 2050 in G+ en W+	profielen database WV21

3.1.1 Kustgebied en Waddenzee

Voor dijkringen langs de Hollandse kust, de Westerschelde, de Oosterschelde en de Waddenzee (Figuur 3.2) zijn berekeningen gemaakt met Hydra-K. Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van versie 3.5.4 van Hydra-K. Deze versie wijkt wat betreft de rekenmethode inhoudelijk niet af van versie 3.5.1, zoals gebruikt voor de HR2006, maar heeft slechts een aantal cosmetische wijzigingen ondergaan. Het belang van het gebruik van versie 3.5.4 is, dat in deze versie (in tegenstelling tot versie 3.5.1) ook voor de Waddenzee berekeningen gemaakt kunnen worden.



Figuur 3.2 Dijkringen langs het kustgebied en de Waddenzee.

Zeespiegelstijging

Voor het kustgebied en de Waddenzee zijn alleen berekeningen gemaakt voor de referentie-situatie. De structurele waterstandstijging is overal langs de kust gelijk verondersteld, en voor zowel het G+ als het W+ klimaatscenario gebaseerd op de zeespiegelstijging tussen 2015 en 2050 (Tabel 3.2). Hierbij is verondersteld dat de zeespiegel in de periode van 1990 tot 2015 gemiddeld met 5 cm is gestegen.

Tabel 3.2 Zeespiegelstijging tot 2050 per klimaatscenario.

Klimaat-scenario	Zeespiegelstijging 1990-2050 (cm)	Jaarlijkse zeespiegel-stijging 2015-2050 (cm/jaar)
G+	25	0,57
W+	35	0,86

Voor de berekening van de frequentielijn voor de waterstand en kruinhoogte vraagt Hydra-K de volgende invoergegevens:

- Wind- en zeewaterstandstatistiek (‘offshore’)
- SWAN-databases (voor de vertaling naar ‘nearshore’ waterstanden en golven)
- Gegevens over het dijkprofiel

Statistiek en randvoorwaarden

De gebruikte wind-waterstandstatistiek en SWAN databases komen overeen met de HR2006, met uitzondering van de Waddenzee, waar de statistiek en SWAN-databases uit het project “Referentieversie Hydraulische Randvoorwaarden in de Waddenzee” (Nicolai en Duits, 2010) gebruikt zijn.

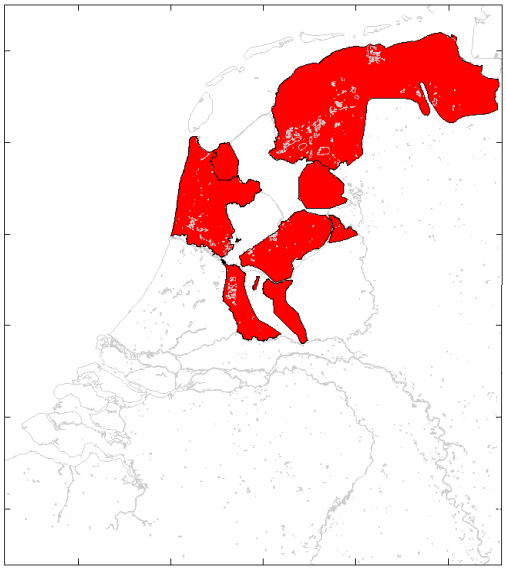
Gegevens dijkprofiel

Op het moment van rekenen was voor de watersystemen langs de Hollandse kust en de Waddenzee nog geen geverifieerde informatie beschikbaar van actuele profielgegevens. Er is daarom gerekend met standaard dijkprofielen uit Hydra-K. Deze profielen komen overeen met de profielen zoals gebruikt in de HR2006 en in de “Referentieversie Hydraulische Randvoorwaarden in de Waddenzee”. In een gevoeligheidsonderzoek (zie paragraaf 5.7) is het gebruik van de standaardprofielen op de decimeringhoogtes voor de kruinhoogte onderzocht.

Bij de kustwaterkeringen Noordwijk en Katwijk is verondersteld dat de waterkering direct langs de kust is aangebracht. Met name bij Katwijk doorkruist de huidige waterkering de stad. Bij het ontwerpen van de kostencurve is ingeschat dat versterking van die kering niet het goedkoopste alternatief zal zijn en daarom is gekozen voor een waterkering direct langs de kust. Voor de KBA geldt het uitgangspunt dat gewerkt wordt met de goedkoopste versterking.

3.1.2 IJsselmeer en Markermeer

Voor dijkringen langs het IJsselmeer (incl. het Ketelmeer en het Vossemeer) en het Markermeer (incl. het IJmeer, het Gooimeer, het Eemmeer, de Eem en het Nijkerkernauw) zijn berekeningen gemaakt met Hydra-VIJ (Figuur 3.3). Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van versie 3.1.1 van Hydra-VIJ. Naast recentere meerpeilstatistiek is hierin een aantal rekenopties toegevoegd ten opzichte van de versie zoals gebruikt voor de TMR2006, namelijk: de omkeervariant (berekening van het kritiek overslagdebiet), de dijkringvariant, de optie om bekledingen door te rekenen, klimaatscenario’s, de mogelijkheid om te rekenen met onzekerheid in de waterstand en de optie om te rekenen voor het merengebied (naast de IJssel- en Vechtdelta). Met name de laatste toevoeging is in dit geval van belang. De keuze om ook voor het merengebied te rekenen met Hydra-VIJ in plaats van Hydra-M is vooral gebaseerd op de mogelijkheid om binnen Hydra-VIJ dijkringberekeningen te maken, nodig om een inschatting te maken van de dijkringdeelfactoren.



Figuur 3.3 Dijkringen langs het IJsselmeer en het Markermeer.

Meerpeilstijging

Voor het merengebied zijn alleen berekeningen gemaakt voor de referentiesituatie. De structurele waterstandstijging is overal langs het IJsselmeer gelijk verondersteld, en voor zowel het G+ als het W+ klimaatscenario gebaseerd op de aanname dat het meerpeil tot 2035 gehandhaafd kan worden (door het vergroten van de spuicapaciteit in de Afsluitdijk) en daarna meestijgt met de zeespiegelstijging. Hierdoor is de gemiddelde meerpeilstijging per jaar tot 2050 nog zeer gering. De structurele waterstandstijging is daarom gebaseerd op de verwachte zeespiegelstijging tussen 2015 en 2100 (Tabel 3.3).

Als voorbeeld presenteren we de gemiddelde meerpeilstijging per jaar voor het G+ scenario. Uit de verwachte zeespiegelstijging voor het jaar 2100 wordt de jaarlijkse zeespiegelstijging in de periode 2015-2100 berekend. Hierbij is (net als voor de kustgebieden) verondersteld dat de zeespiegel in de periode van 1990 tot 2015 gemiddeld met 5 cm is gestegen. Voor het scenario G+ leidt dit tot een jaarlijkse zeespiegelstijging van 0,65 cm/jaar. Het IJsselmeerpeil wordt verondersteld vanaf 2035 mee te stijgen met de zeespiegel, en stijgt tot 2100 dus met 42 cm. De gemiddelde jaarlijkse meerpeilstijging over de periode van 2015 tot 2100 bedraagt in dat geval 0,49 cm/jaar (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Zeespiegelstijging en meerpeilstijging (IJsselmeer) tot 2100 per klimaatscenario.

Klimaat-scenario	Zeespiegelstijging 1990-2100 (cm)	Jaarlijkse zeespiegel-stijging 2015-2100 (cm/jaar)	Meerpeilstijging 2035-2100 (cm)	Jaarlijkse meerpeil-stijging 2015-2100 (cm/jaar)
G+	60	0,65	42	0,49
W+	85	0,94	61	0,72

Opmerking: in de leidraad rivieren worden voor het G+ en W+ scenario meerpeilstijgingen gegeven van respectievelijk 23cm en 48cm . Die meerpeilstijgingen zijn gebaseerd op resultaten van de WINN studie. De hier gehanteerde meerpeilstijgingen zijn hoger. Een quickscan over de benodigde pompcapaciteit IJsselmeer bij de verschillende klimaatscenario's (Verhoeven, 2009) levert een wat ongustiger beeld voor de meerpeilstijgingen dan de WINN studie. In overleg met de Waterdienst is besloten de in de tabel gehanteerde waardes te gebruiken, ze kunnen gezien worden als een bovengrens bij de gehanteerde scenario's.

Er is geen rekening gehouden met een meerpeilstijging in het Markermeer.
Voor de berekening van de frequentielijn voor de waterstand en kruinhoogte vraagt Hydra-VIJ de volgende invoergegevens:

- Windstatistiek, meerpeilstatistiek en afvoerstatistiek (IJssel en Vecht)
- Randvoorwaardendatabases (voor de vertaling van een meerpeil-, afvoer- en windsituatie naar lokale waterstanden en golven[1])
- Gegevens over het dijkprofiel

Statistiek en randvoorwaarden

De gebruikte statistiek komt overeen met de HR2006. De randvoorwaardendatabases zijn gebaseerd op Hydra-M databases, die zijn gebruikt voor de HR2006. Deze zijn door Alkyon omgezet naar voor Hydra-VIJ geschikte databases, binnen het project "Aanpassen Hydra Tools Vuldatabase" (Santbergen, 2005).

Gegevens dijkprofiel

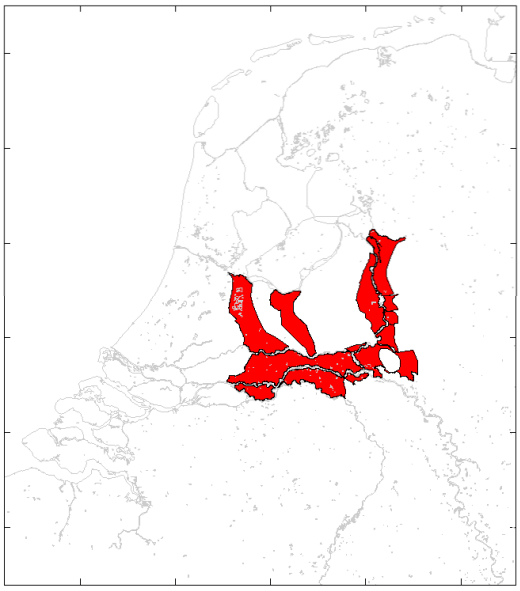
Voor het IJsselmeer en het Markermeer is een door Alkyon samengestelde profielendatabase gebruikt. Dit betreft een, door de betrokken Waterschappen, geverifieerde database.

3.1.3 Bovenrivieren (Rijntakken)

Voor dijkringen in het bovenrivierengebied zijn berekeningen gemaakt met Hydra-B. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de dijkringen langs de (Limburgse) Maas en het overige deel van het bovenrivierengebied (bestaande uit de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal, de Waal, de Nederrijn/Lek en de IJssel (Figuur 3.4).

De statistiek en randvoorwaarden die zijn gebruikt voor het deel langs de Maas worden beschreven in paragraaf 3.1.4. Deze paragraaf beschrijft de berekeningen voor het Rijntakken deel. Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van versie 3.5.10 van Hydra-B, die ook gebruikt is bij het afleiden van de TMR2006.

[1] *Hiervoor bestaan binnen Hydra-VIJ twee mogelijkheden, namelijk om te rekenen met een database die golfparameters bevat, of met een database die effectieve strijklengtes en bodemhoogtes bevat, op basis waarvan de golfparameters kunnen worden berekend (met behulp van Bretschneider). De hier beschreven randvoorwaardendatabases bevatten reeds golfparameters, voor de meren is dus de eerste optie gebruikt.*



Figuur 3.4 Dijkringen in het bovenrivierengebied, met uitzondering van de (Limburgse) Maas.

Voor het bovenrivierengebied zijn berekeningen gemaakt voor de referentiesituatie (2015) en de klimaatscenario's G+ en W+ in het jaar 2050. De structurele waterstandstijging per jaar is per locatie (en per scenario) bepaald op basis van het verschil in waterstand in 2015 en 2050. De decimeringhoogtes voor de waterstand en de kruinhoogte zijn (in de basisvariant) afgeleid uit de frequentielijn voor de referentiesituatie. Voor de berekening van deze frequentielijnen vraagt Hydra-B de volgende invoergegevens:

- Windstatistiek, zeewaterstandstatistiek en afvoerstatistiek (Rijn of Maas).
- Database met afvoergolfvormen.
- Waterstanddatabases (voor de vertaling van een Europoortkering-, zeewaterstand-, afvoer- en windsituatie naar lokale waterstanden).
- Faalkans Europoortkering (per sluitvraag).
- Effectieve bodemhoogtes en strijklengtes (voor de berekening van de golfparameters).
- Gegevens over het dijkprofiel.

Randvoorwaarden

De waterstanddatabases voor het bovenrivierengebied zijn binnen WV21 opnieuw afgeleid voor de referentiesituatie. Hiertoe zijn Qh-relaties bepaald met WAQUA, die het verband geven tussen de piekafvoer van de Rijn bij Lobith en de lokale waterstand. Het daarvoor gebruikte WAQUA-model is opgesteld binnen het project Ruimtelijke Opgaven Lange Termijn Rivieren (ROLT. Vertrekpunt is de situatie rond 2015 wanneer de PKB maatregelen voor Ruimte voor de Rivier, de Maaswerken en Hoogwaterbeschermingsprogramma's zijn gerealiseerd.

In lijn met de lange termijnvisie van de PKB Ruimte voor de Rivier wordt in WV21 de Nederrijn/Lek ontzien bij afvoeren bij Lobith groter dan 16.000 m^3/s. Hiertoe zijn de Qh-relaties (zoals berekend met WAQUA) aangepast, waarbij het water dat niet via de Nederrijn/Lek wordt afgevoerd naar rato is verdeeld over de IJssel en de Waal. Details over het gebruikte WAQUA-model en de berekening van de Qh-relaties met ontzien van de Nederrijn/Lek zijn opgenomen in bijlage 6D.

Voor het bovenrivierengebied is gerekend voor locaties om de circa 500 meter. De effectieve bodemhoogtes en strijklengtes voor deze locaties zijn overgenomen uit de TMR2006-databases. De in de Hydra-B berekeningen gebruikte golfvormen komen overeen met de golfvormen zoals gebruikt voor het afleiden van de TMR2006.

Afvoerstatistiek

Voor de Rijntakken in het bovenrivierengebied zijn alleen de afvoerstatistiek bij Lobith en de windstatistiek van belang. De gebruikte windstatistiek komt overeen met de TMR2006. Ook de werklijn bij Lobith voor de referentiesituatie (deze geeft het verband tussen de piekafvoer en de overschrijdingsfrequentie) is identiek verondersteld aan de werklijn die is afgeleid voor de TMR2006. De maatgevende afvoer (bij een frequentie van eens in de 1250 jaar) is daarin gelijk aan 16.000 m^3/s. Deze werklijn is gebaseerd op statistische extrapolatie van 100 jaar afvoerwaarnemingen. In die periode zijn geen grootschalige overstromingen in Duitsland opgetreden. Het effect van die overstromingen is dan ook niet in de werklijn opgenomen.

Voor klimaatscenario's kan de werklijn niet gebaseerd worden op extrapolatie van de afvoer-waarnemingen. De werklijn is voor de verschillende klimaatscenario's bepaald met behulp van het Generator Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) instrumentarium (De Wit en Buishand, 2007). Hierbij zijn met behulp van de neerslaggenerator en een neerslag-afvoermodel synthetische afvoerreeksen gegenereerd voor de referentiesituatie en de situatie in het jaar 2050 en 2100 voor de G+ en W+ scenario's (Kramer, 2008). De in Hydra-B gebruikte werklijnen voor het G+ en W+ scenario zijn afgeleid door een fit op de resultaten beneden het fysisch maximum voor de afvoer (het aftopniveau). Details over de GRADE-resultaten en de gefitte werklijnen zijn opgenomen in bijlage.C.2.

In een grensoverschrijdende studie (Lammersen, 2004) is onderzocht wat de maximale afvoer is gegeven overstromingen in de bovenstrooms gelegen landen. Vastgesteld is dat op dit moment maximaal een afvoer van 15.500 m^3/s Nederland kan bereiken. Echter, omdat de gebruikte modellen en modelschematisaties nog veel onzekerheid in zich dragen en er geen rekening is gehouden met eventueel te treffen noodmaatregelen in de betreffende landen wordt rekening gehouden met een maximale Rijnafvoer bij Lobith van 16.500 m^3/s. De volgende fysische maxima zijn gehanteerd voor de afvoer bij Lobith:

Tabel 3.4 Binnen WV21 gehanteerde fysische maxima Rijnafvoer bij Lobith.

Jaartal	Aftopniveau (m^3/s)
2015	16.500
2050	17.000
2100	18.000

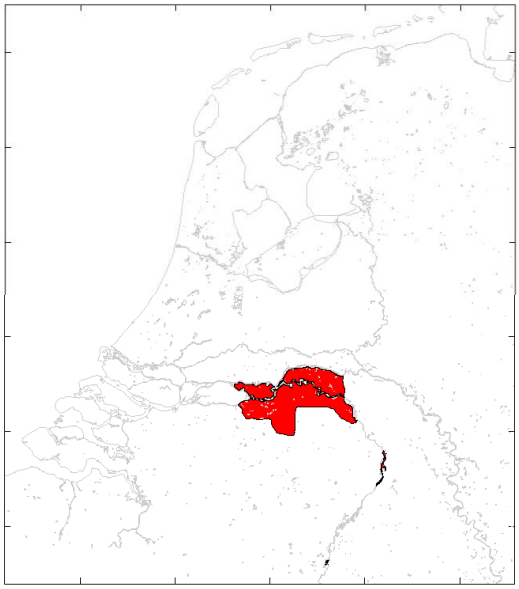
Voor 2100 is de 18000 m^3/s , in lijn met de bevindingen van de Deltacommissie. Op basis van modeluitkomsten en overleg met betrokkenen in Duitsland heeft de Deltacommissie geconcludeerd dat het zeer onwaarschijnlijk is dat op middellange termijn afvoeren groter dan 18000 m^3/s Nederland zullen bereiken. (Deltacommissie, 2008) . Voor 2050 is keuze van 17000 m^3/s vooral een pragmatische tussen de huidige de afvoer en de afvoer in 2100.

Gegevens dijkprofiel

De gebruikte profielgegevens zijn gebaseerd op door de waterkeringbeheerders aangeleverde actuele dijkinformatie, vastgelegd in de WV21 profielendatabase.

3.1.4 Bovenrivieren (Maas)

Voor dijkringen langs de Maas (Figuur 3.5) zijn berekeningen gemaakt met Hydra-B. Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van versie 3.5.10 van Hydra-B, die ook gebruikt is bij het afleiden van de TMR2006.



Figuur 3.5 Dijkringen van het bovenrivierengebied langs de Maas.

Voor dijkringen langs de Maas zijn berekeningen gemaakt voor de referentiesituatie en de klimaatscenario's G+ en W+ in het jaar 2050. De structurele waterstandstijging per jaar is per locatie (en per scenario) bepaald op basis van het verschil in waterstand in 2015 en 2050. De decimeringhoogtes voor de waterstand en de kruinhoogte zijn (in de basisvariant) afgeleid uit de frequentielijn voor de referentiesituatie. De benodigde invoergegevens voor Hydra-B zijn reeds genoemd in de beschrijving van de berekeningen voor de Rijntakken (paragraaf 3.1.3).

Randvoorwaarden

De waterstanddatabases voor de (Limburgse) Maas zijn binnen WV21 opnieuw afgeleid voor de referentiesituatie. Hiertoe zijn Qh-relaties bepaald met WAQUA, die het verband geven tussen de piekafvoer van de Maas bij Borgharen en de lokale waterstand. Het daarvoor gebruikte WAQUA-model is opgesteld binnen het project Ruimtelijke Opgaven Lange Termijn Rivieren (ROLT). Vertrekpunt is de situatie rond 2015 wanneer de PKB maatregelen voor Ruimte voor de Rivier, de Maaswerken en Hoogwaterbeschermingsprogramma's zijn gerealiseerd. Details over het gebruikte WAQUA-model zijn opgenomen in bijlage 6E. Voor de Maas is gerekend voor locaties om de circa 500 meter. De effectieve bodemhoogtes en strijklengtes voor deze locaties zijn overgenomen uit de TMR2006-databases. Ook de in de Hydra-B berekeningen gebruikte golfvormen komen overeen met de golfvormen zoals gebruikt voor het afleiden van de TMR2006.

Afvoerstatistiek

De werklijn voor de Maas bij Borgharen (die het verband geeft tussen de piekafvoer en de overschrijdingsfrequentie) in de referentiesituatie is gebaseerd op de werklijn uit de HR2006 (Bijlage 6C). De maatgevende afvoer (bij een frequentie van eens in de 1250 jaar) is daarin gelijk aan 3.800 m^3/s.

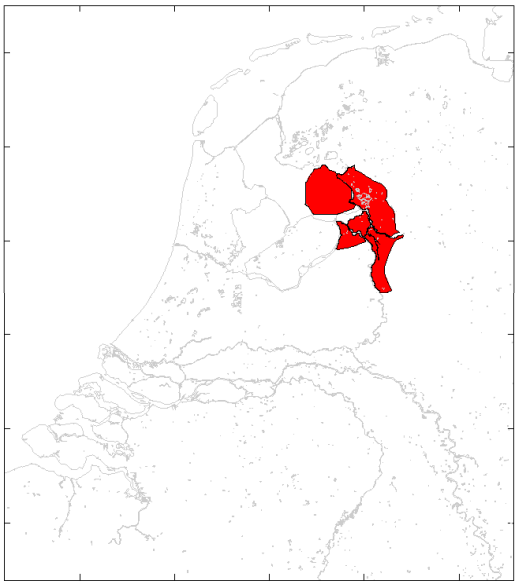
De werklijnen voor 2100 voor het G+ en W+ scenario zijn gefit op data uit een database die Kwadijk heeft afgeleid met behulp van het model Meuseflow voor het jaar 2100 (Kwadijk,2008). De helft van de toename tussen de huidige werklijnen en die voor 2100 is als schatting genomen voor de werklijnen voor 2050 voor het G+ en W+ scenario. Verdere details van deze werklijnen zijn opgenomen in bijlage 6C.
In de Hydra-B berekening is geen fysisch maximum gehanteerd voor de afvoer bij Borgharen. Er zijn geen grensoverschrijdende studies beschikbaar die wijzen op een reducerend effect van overstromingen langs de Maas in de bovenstroomsgelegen landen.

Gegevens dijkprofiel

De gebruikte profielgegevens zijn gebaseerd op door de waterkeringbeheerders aangeleverde actuele dijkinformatie, vastgelegd in de WV21 profielendatabase.

3.1.5 IJssel- en Vechtdelta

Voor dijkringen langs de IJssel- en Vechtdelta zijn berekeningen gemaakt met Hydra-VIJ (Figuur 3.6). Voor deze berekeningen is (evenals in de berekeningen voor het merengebied) gebruik gemaakt van versie 3.1.1 van Hydra-VIJ.



Figuur 3.6 Dijkringen langs de IJssel- en Vechtdelta.

Voor de IJssel- en Vechtdelta zijn berekeningen gemaakt voor de referentiesituatie (2015) en de klimaatscenario's G+ en W+ in het jaar 2100. De structurele waterstandstijging per jaar is per locatie (en per scenario) bepaald op basis van het verschil in waterstand in 2015 en 2100. De decimeringhoogtes voor de waterstand en de kruinhoogte zijn (in de basisvariant) afgeleid uit de frequentielijn voor de referentiesituatie.

Voor de berekening van deze frequentielijnen vraagt Hydra-VIJ de volgende invoergegevens:

- Windstatistiek, meerpeilstatistiek en afvoerstatistiek (IJssel en Vecht)
- Randvoorwaardendatabases (voor de vertaling van een meerpeil-, afvoer- en windsituatie naar lokale waterstanden en golven[2])
- Gegevens over het dijkprofiel

Randvoorwaarden

De gebruikte waterstand- en golvendatabases komen overeen met de TMR2006. Voor de IJssel- en Vechtdelta zou het wenselijk zijn om (net als voor het rivierengebied) de databases aan te passen aan de veranderende omstandigheden na het uitvoeren van de PKB maatregelen voor Ruimte voor de Rivier en de Hoogwaterbeschermingsprogramma's. Aangezien voor dit gebied nog geen WAQUA-model beschikbaar was voor deze referentiesituatie, vormde het aanpassen van de databases een te grote inspanning, niet passend binnen het tijdschema van WV21.

Voor de Vecht zijn de TMR2006 databases overigens gelijk aan die voor de HR2006, voor de IJssel daarentegen zijn de HR2006 afgeleid met Hydra-R. De TMR2006 voor de IJssel zijn echter wel gebaseerd op dezelfde WAQUA-berekeningen als die ten grondslag liggen aan de HR2006.

Meerpeilstatistiek

De gebruikte meerpeilstatistiek komt overeen met de HR2006. Voor de klimaatscenario's G+ en W+ is uitgegaan van een gemiddelde stijging van het IJsselmeerpeil met respectievelijk 42 en 61 cm in de periode 2015-2100 (zie Tabel 3.3). Deze getallen zijn gebaseerd op de aanname dat het meerpeil tot 2035 gehandhaafd kan worden (door het vergroten van de spuicapaciteit in de Afsluitdijk) en daarna meestijgt met de zeespiegelstijging.

Afvoerstatistiek

De werklijnen voor de IJssel bij Olst (die het verband geven tussen de piekafvoer en de overschrijdingsfrequentie) zijn gebaseerd op de werklijnen zoals gebruikt voor de Rijn bij Lobith, zoals beschreven in paragraaf 3.1.3. Voor de referentiesituatie is de werklijn bij Lobith verondersteld identiek te zijn aan de werklijn voor de TMR2006. Voor de klimaatscenario's zijn de werklijnen bij Lobith gebaseerd op berekeningen met behulp van het Generator Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) instrumentarium (De Wit en Buishand, 2007).

Voor de vertaling van de werklijn voor de Rijn naar de werklijn voor de IJssel is gelet op het verband tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer bij Olst. Deze relatie is afgeleid uit de WAQUA-berekeningen die binnen WV21 gemaakt zijn voor het opstellen van de waterstanddatabases voor het bovenrivierengebied voor de referentiesituatie. Op de gevonden relatie tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer bij Olst is nog een correctie toegepast om rekening te houden met het ontzien van de Nederrijn/Lek bij afvoeren bij Lobith groter dan 16.000 m^3/s.

[2] *Hiervoor bestaan binnen Hydra-VIJ twee mogelijkheden, namelijk om te rekenen met een database die golfparameters bevat, of met een database die effectieve strijklengtes en bodemhoogtes bevat, op basis waarvan de golfparameters kunnen worden berekend (met behulp van Bretschneider). De voor de IJssel- en Vechtdelta gebruikte databases bevatten geen golfparameters, maar bodemhoogtes en strijklengtes.*

Daarbij is het water dat niet via de Nederrijn/Lek wordt afgevoerd naar rato verdeeld over de IJssel en de Waal. Details over deze werkwijze zijn opgenomen in bijlage 6D
Met behulp van het gevonden verband tussen de Rijn- en de IJsselafvoer zijn ook de fysische maxima voor de afvoer bij Lobith vertaald naar fysische maxima voor de afvoer bij Olst. Deze aftopniveau's zijn weergegeven in Tabel 3.5.

Tabel 3.5: Binnen WV21 gehanteerde fysische maxima IJsselafvoer bij Olst.

Jaartal	Aftopniveau (m^3/s)
2015	3009
2050	3171
2100	3492

De werklijn voor de Vecht bij Dalfsen voor de referentiesituatie is identiek verondersteld aan de werklijn die is afgeleid voor de HR2006. Voor de afvoer van de Vecht bij Dalfsen zijn geen G+ en W+ scenario's beschikbaar. Daarom is gekozen om de afvoer van de werklijn procentueel te verhogen. Hiervoor zijn de percentages gebruikt die gelden voor de Rijn bij Lobith bij de maatgevende afvoer (met een overschrijdingsfrequentie van eens per 1250 jaar). Verdere details van deze werklijnen zijn opgenomen in bijlage 6C.

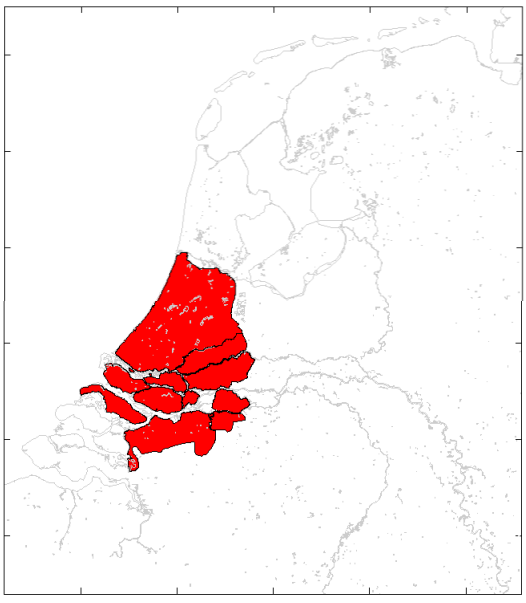
In de Hydra-B berekening is geen fysisch maximum gehanteerd voor de afvoer bij Dalfsen.

Gegevens dijkprofiel

De gebruikte profielgegevens zijn gebaseerd op door de waterkeringbeheerders aangeleverde actuele dijkinformatie, vastgelegd in de WV21 profielendatabase.

3.1.6 Benedenrivieren

Voor dijkringen in het benedenrivierengebied (Figuur 3.7) zijn berekeningen gemaakt met Hydra-B. Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van versie 3.5.10 van Hydra-B, die ook gebruikt is bij het afleiden van de TMR2006.



Figuur 3.7 Dijkringen in het benedenrivierengebied.

Voor het benedenrivierengebied zijn berekeningen gemaakt voor de referentiesituatie (2015) en de klimaatscenario's G+ en W+ in het jaar 2050. De structurele waterstandstijging per jaar is per locatie (en per scenario) bepaald op basis van het verschil in waterstand in 2015 en 2050. De decimeringhoogtes voor de waterstand en de kruinhoogte zijn (in de basisvariant) afgeleid uit de frequentielijn voor de referentiesituatie. Voor de berekening van deze frequentielijnen vraagt Hydra-B de volgende invoergegevens:

- Windstatistiek, zeewaterstandstatistiek en afvoerstatistiek (Rijn of Maas).
- Database met afvoergolfvormen.
- Waterstanddatabases (voor de vertaling van een Europoortkering-, zeewaterstand-, afvoer- en windsituatie naar lokale waterstanden).
- Faalkans Europoortkering (per sluitvraag).
- Effectieve bodemhoogtes en strijklengtes (voor de berekening van de golfparameters).
- Gegevens over het dijkprofiel.

Randvoorwaarden

De waterstanddatabases voor het benedenrivierengebied zijn binnen WV21 opnieuw afgeleid voor de referentiesituatie, met behulp van de MHW-processor (Klis en Markus, 2007) Het daarvoor gebruikte SOBEK-model is opgesteld binnen het project Ruimtelijke Opgaven Lange Termijn Rivieren (ROLT). Vertrekpunt is de situatie rond 2015 wanneer de PKB maatregelen voor Ruimte voor de Rivier, de Maaswerken en Hoogwaterbeschermingsprogramma's zijn gerealiseerd. Details over het gebruikte SOBEK-model en de instellingen van de MHW-processor zijn opgenomen in bijlage 6E.
Voor het benedenrivierengebied is gerekend voor locaties om de circa 500 meter. De effectieve bodemhoogtes en strijklengtes voor deze locaties zijn overgenomen uit de TMR2006-databases. Ook de in de Hydra-B berekeningen gebruikte golfvormen komen overeen met de golfvormen zoals gebruikt voor het afleiden van de TMR2006.

Afvoerstatistiek

De berekeningen met de MHW-processor zijn voor alle locaties in het benedenrivierengebied gebaseerd op de Rijnafvoer bij Lobith. De bijbehorende Maasafvoer (bij Lith) is afgeleid uit de 50%-lijn. Dat wil zeggen dat bij de beschouwde Rijnafvoer de mediane Maasafvoer is gehanteerd (Geerse, 2003 hoofdstuk 4.2). In de Hydra-B berekeningen kan derhalve worden volstaan met de afvoerstatistiek van de Rijn. De gebruikte werklijnen in de referentiesituatie en de klimaatscenario's G+ en W+ zijn beschreven in paragraaf 3.1.3. Voor de berekeningen in het benedenrivierengebied zijn dezelfde fysische maxima gehanteerd voor de afvoer bij Lobith als in het bovenrivierengebied (Tabel 3.4), hoewel de invloed van aftoppen in dit deel van het rivierengebied beperkt is.

Zeewaterstandstatistiek

De gebruikte zeewaterstandstatistiek komt overeen met de HR2006. Voor de klimaatscenario's G+ en W+ is uitgegaan van een gemiddelde stijging van de zeewaterstand met respectievelijk 25 en 35 cm in de periode 2015-2050 (zie Tabel 3.2).

Gegevens dijkprofiel

De gebruikte profielgegevens zijn gebaseerd op door de waterkeringbeheerders aangeleverde actuele dijkinformatie, vastgelegd in de WV21 profielendatabase.

4 Berekening en resultaten basisvariant

4.1 Inleiding

Bij de berekening van de invoerparameters voor OptimaliseRing is gebruik gemaakt van het Hydra-instrumentarium. Hiermee zijn voor locaties langs alle dijkringtrajecten overschrijding-frequentielijnen berekend voor de waterstand en de kruinhoogte. De helling van de berekende frequentielijn is bepalend voor de decimeringhoogte, en de verandering van de frequentielijn bij verschillende klimaatscenario's geeft de invloed weer van klimaatverandering. Dit hoofdstuk geeft een gedetailleerde beschrijving van de manier waarop deze parameters zijn afgeleid, en een overzicht van de resultaten (decimeringhoogte en structurele waterstandstijging) voor de basisvariant.

4.2 Berekening decimeringshoogtes

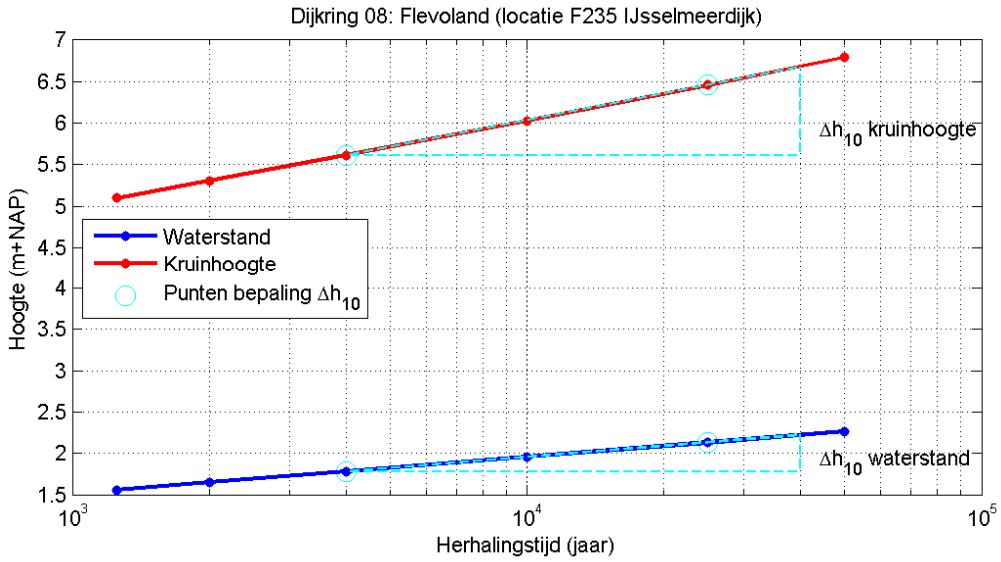
De overschrijdingsfrequentielijnen zoals berekend met het Hydra-instrumentarium bestaan uit een aantal combinaties van een herhalingstijd en een bijbehorende waterstand of kruinhoogte. In principe zijn voor alle locaties de volgende terugkeertijden doorgerekend: 1250, 2000, 4000, 10.000, 25.000 en 50.000 jaar. Het betreft hier de vier meest voorkomende normfrequenties, aangevuld met twee hogere herhalingstijden. Aangezien de dijkringen langs de Limburgse Maas een lagere normfrequentie hebben, zijn voor locaties langs Maas ook berekeningen gemaakt bij een herhalingstijd van 100 en 250 jaar.

De decimeringhoogte voor een Hydra-locatie is bepaald op basis van het verschil tussen de waarden bij de norm herhalingstijd van de betreffende dijkring en een herhalingstijd die twee stappen hoger is gekozen (van de beschikbare herhalingstijden). Tabel 4.1 geeft aan welke herhalingstijden op deze manier zijn gebruikt bij de berekening van de decimeringhoogtes.

Tabel 4.1 Herhalingstijden op basis waarvan de decimeringhoogtes zijn bepaald.

Norm (jaar)	Herhalingstijden berekening decimeringhoogte (jaar)	
250	250	2000
500	250	2000
1250	1250	4000
2000	2000	10.000
4000	4000	25.000
10.000	10.000	50.000

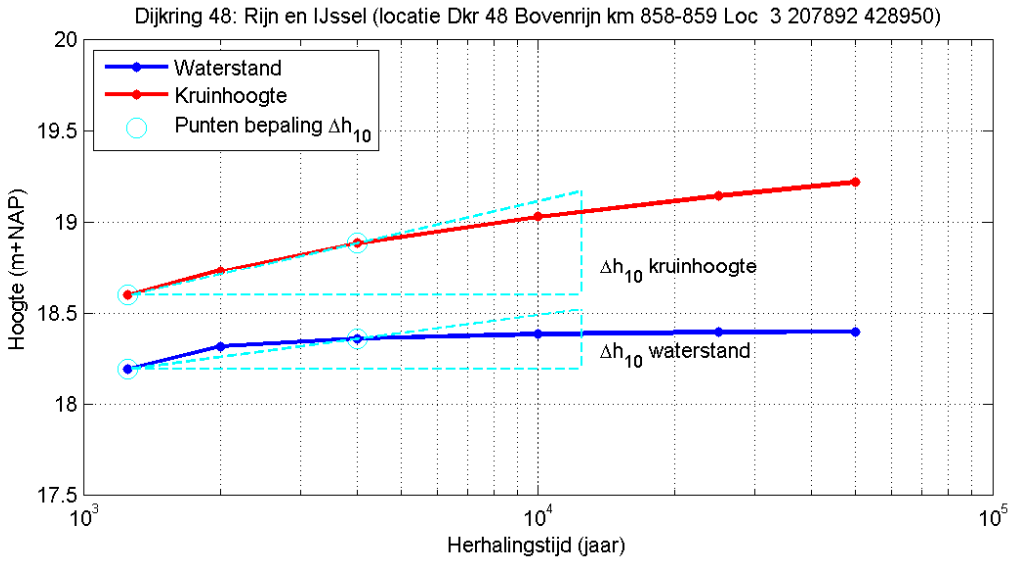
Figuur 4.1 geeft een voorbeeld van de berekening van de decimeringhoogtes voor een locatie langs het IJsselmeer. Deze locatie ligt langs dijkring 8: Flevoland, met een norm herhalingstijd van 4000 jaar. De decimeringhoogtes voor deze locatie zijn bepaald op basis van het verschil tussen de waarden bij een herhalingstijd van 4000 jaar en een herhalingstijd van 25.000 jaar, zoals aangegeven in de figuur.



Figuur 4.1 *Voorbeeld berekening decimeringhoogtes voor een locatie langs het IJsselmeer.*

In sommige gevallen zullen de frequentielijnen voor de waterstand en de kruinhoogte niet zo recht lopen (op logaritmische schaal) als in het voorbeeld van Figuur 4.1 Voor de Rijntakken en de IJssel geldt dit als gevolg van het meenemen van een fysisch maximum voor de rivierafvoer. Figuur 4.2 geeft hiervan een voorbeeld. Door het aftoppen van de afvoer bij 16.500 m^3/s gaat de waterstandsfrequentielijn vanaf een bepaalde herhalingstijd vrijwel vlak lopen. Dit effect is ook terug te zien in de frequentielijn voor de kruinhoogte, zij het in mindere mate.

Voor sommige watersystemen zal de decimeringhoogte daarom sterk afhankelijk zijn van de herhalingstijden die zijn gekozen voor de berekening ervan. Dit geldt niet alleen voor de Rijntakken en de IJssel door het aftoppen van de afvoer, maar ook voor het benedenrivierengebied, waar de frequentielijnen niet recht lopen als gevolg van de faalkans van de Maeslantkering.



Figuur 4.2 *Voorbeeld berekening decimeringhoogtes voor een locatie langs de Bovenrijn.*

Er zijn ook situaties waarin de berekende decimeringhoogte voor de kruinhoogte lager is dan die voor de waterstand. Voor de berekening van de parameter α is in dergelijke gevallen een correctie uitgevoerd, waarbij de decimeringhoogtes gelijk verondersteld zijn (zie bijlage G).

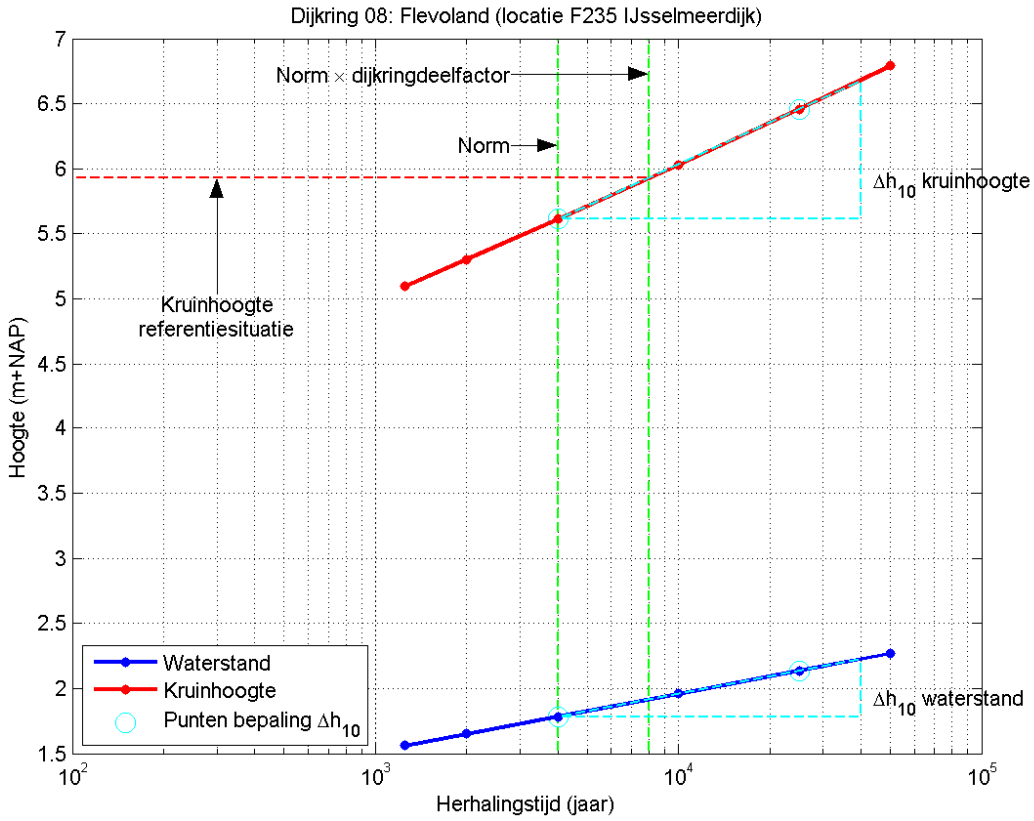
4.3 Berekening kruinhoogte in de referentiesituatie

De kruinhoogte van een dijkvak in de referentiesituatie wordt gebruikt bij de bepaling van de kostencurve (paragraaf 2.1). Deze kruinhoogte is gelijk aan de hoogte die overeenkomt met de overstromingskans in de referentiesituatie. Voor een dijkringdeel is deze overstromingskans verondersteld gelijk te zijn aan de normfrequentie. Om deze overstromingskans in de referentiesituatie te vertalen naar de kans voor een dijk*vak*, wordt gebruik gemaakt van de dijkringdeelfactor. Deze factor wordt in dit onderzoek gedefinieerd als:

$$\text{dijkringdeelfactor} = \frac{\text{overstromingskans dijkringdeel}}{\text{overstromingskans dijkvak}}$$

In principe is deze factor met het Hydra-instrumentarium berekend. Daar waar dit niet mogelijk is (bijvoorbeeld bij gebruik van Hydra-K) is op basis van expert-opinion een inschatting gemaakt. De dijkringdeelfactor is niet nauwkeurig te bepalen. Dat komt deels door numerieke invloeden, en deels omdat de dijkringdeelfactor afhankelijk is van een groot aantal aannamen (de grootte van het kritieke overslagdebiet bijvoorbeeld). Om die reden is binnen het onderzoek gewerkt met een indeling in vier klassen: dijkringdeelfactoren van 2, 5, 10 en 15 (zie bijlage I).

Voor het bepalen van de kruinhoogte in de referentiesituatie wordt gebruik gemaakt van de berekende frequentielijn. Door middel van interpolatie wordt de kruinhoogte berekend bij de overstromingskans voor het dijkvak in de referentiesituatie, namelijk de norm, als herhalingstijd, vermenigvuldigt met de dijkringdeelfactor. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Voorbeeld berekening kruinhoogte referentiesituatie voor een locatie langs het IJsselmeer.

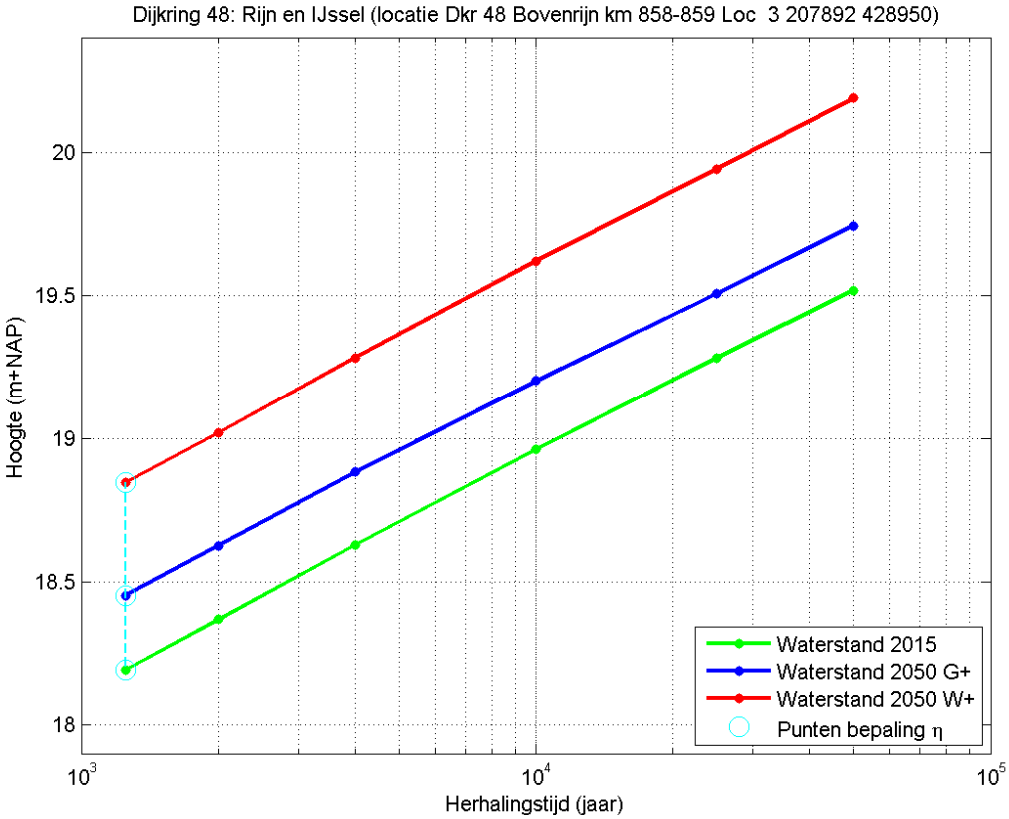
4.4 Berekening waterstandstijging

De parameter η in de vergelijking voor de overstromingskans als functie van de dijkhoogte en de tijd betreft de structurele waterstandstijging[3]. Hiermee wordt het effect van klimaatverandering geschematiseerd. Om de waterstandstijging te bepalen, is de frequentielijn voor de waterstand ook berekend voor de klimaatscenario's G+ en W+. Dit is overigens niet voor alle locaties gedaan, voor het kust- en merengebied is aangenomen dat de lokale waterstandstijging rechtstreeks volgt uit de gemiddelde zeespiegelstijging of meerpeilstijging (zie hoofdstuk 3).

Figuur 4.4 geeft een voorbeeld van de berekening van de structurele waterstandstijging voor een locatie in de Bovenrijn. Naast de waterstandsfrequentielijn voor de referentiesituatie (2015) zijn ook de waterstandsfrequentielijnen voor het G+ en W+ scenario in 2050 weergegeven. De toename in de waterstanden is een gevolg van de verhoogde rivierafvoeren in deze scenario's.

Het verschil in waterstand wordt berekend bij de norm van het betreffende dijkringdeel. In het voorbeeld is het verschil tussen de waterstand in 2050 in het G+ scenario en de waterstand in de referentiesituatie 2015 gelijk aan circa 26 cm (bij de norm herhalingstijd van 1250 jaar). Aangezien deze toename van de waterstand heeft plaatsgevonden over een periode van 35 jaar, is de structurele waterstandstijging per jaar gelijk aan circa 0,74 cm/jaar.

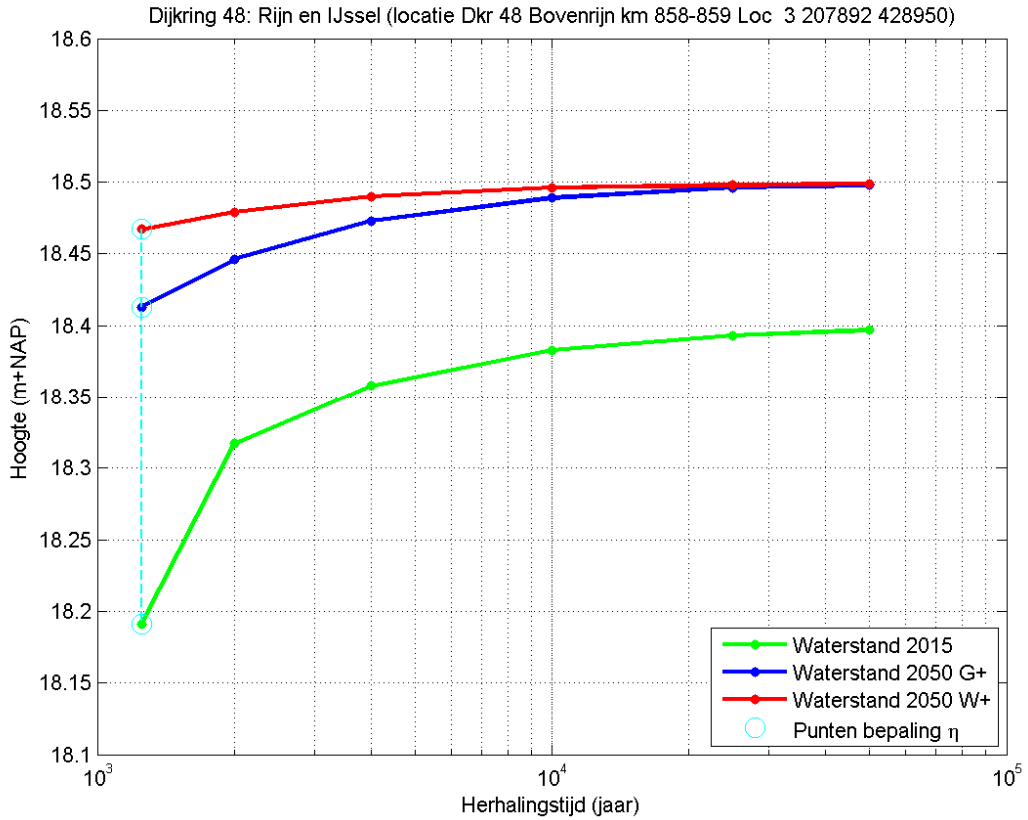
[3] *De waterstandstijging als gevolg van klimaatverandering wordt nog gecorrigeerd voor bodemdaling. De parameter η betreft dus een relatieve waterstandstijging.*



Figuur 4.4 Voorbeeld berekening waterstandstijging voor een locatie langs de Rijn (zonder aftoppen).

In het voorbeeld van Figuur 4.4 maakt het voor de bijdrage aan de parameter η erg weinig uit bij welke herhalingstijd de toename in de waterstand wordt bepaald. De frequentielijnen in de referentiesituatie en de klimaatscenario's lopen immers vrijwel parallel. Is dit niet het geval, dan maakt de keuze voor de herhalingstijd wel degelijk uit, zoals te zien in het volgende voorbeeld (Figuur 4.5). Het gaat hier om dezelfde locatie als in de vorige figuur, maar ditmaal betreft het de waterstandsfrequentielijnen uit de berekening met aftoppen.

Door het aftoppen van de afvoer gaat de frequentielijn vanaf een bepaalde herhalingstijd vrijwel vlak lopen. Er is nog wel verschil tussen de frequentielijnen in de referentiesituatie (2015) en de klimaatscenario's, aangezien voor 2050 met een ander aftopniveau (17.000 m^3/s) gerekend is dan in de referentiesituatie (16.500 m^3/s). In Figuur 4.5 is goed te zien dat de frequentielijnen nu niet meer parallel lopen. De berekende waterstandstijging wordt sterk bepaald door de keuze om de toename in waterstand te bepalen bij de normfrequentie.



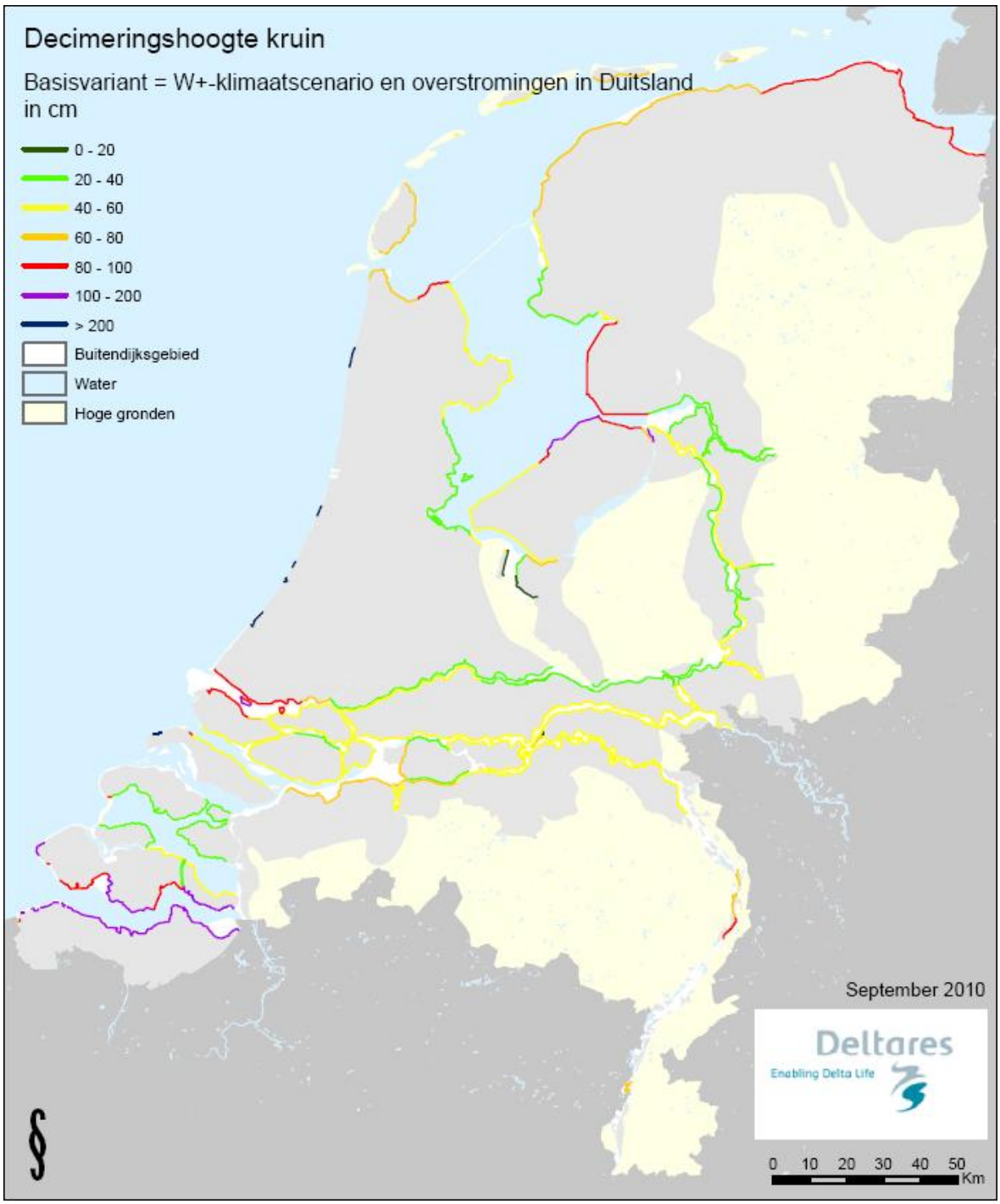
Figuur 4.5 Voorbeeld berekening waterstandstijging voor een locatie langs de Rijn (met aftoppen).

4.5 Resultaten decimeringhoogtes

In paragraaf 4.2 is uitgelegd hoe de decimeringhoogtes zijn bepaald op basis van de berekende frequentielijnen voor de waterstand en de kruinhoogte. Omdat de invoer voor OptimaliseRing bestaat uit parameters per dijkringtraject, is voor elk dijktraject de gemiddelde waarde van de decimeringhoogtes bepaald. De resultaten zijn weergegeven in bijlage F en in Figuur 4.6. In het vervolg van deze paragraaf is per watersysteem een toelichting gegeven op de resultaten.



Figuur 4.6 Decimeringhoogtes waterstand basisvariant.



Figuur 4.7 Decimeringhoogtes kruinhoogte basisvariant.

Kustgebied

In het kustgebied worden (conform verwachting) de grootste decimeringhoogtes berekend. Voor de waterstand variëren deze grofweg tussen 0,5 en 1,0 meter (in de Waddenzee soms iets lager). Voor de kruinhoogte lopen deze waarden op tot boven de 2 meter. Bij westelijke windrichtingen is hier sprake van sterk verhoogde waterstanden in combinatie met enorme golven.

De Oosterschelde vormt een duidelijke uitzondering op deze resultaten. Zowel de decimeringhoogtes voor de waterstand als die voor de kruinhoogte zijn beperkt tot enkele decimeters. Als gevolg van de Oosterscheldekering lopen de waterstanden nauwelijks op bij extremere stormen.

Merengebied
In het merengebied is de invloed van de afsluitdijk duidelijk zichtbaar. De decimeringhoogtes voor de waterstand zijn hierdoor voor het overgrote deel beperkt tot circa 0,4 meter. Langs de dijkringen in het zuid-westen (Flevoland en de Noordoostpolder) loopt de decimeringhoogte voor de waterstand op tot circa 0,6 meter, als gevolg van opwaaiing. Bij noord-westelijke windrichtingen is de kans op extreme windsnelheden immers groter. Langs het onderste deel van Flevoland is dit effect minder sterk, als gevolg van de Houtribdijk tussen het IJsselmeer en het Markermeer.
De decimeringhoogtes voor de kruinhoogte geven een soortgelijk beeld. Ook hier worden de grootste waarden berekend langs Flevoland en de Noordoostpolder, omdat de windrichtingen die zorgen voor verhoogde waterstanden (door opwaaiing) samenvallen met de meest belastende windrichtingen wat betreft golfoploop. De decimeringhoogtes lopen daardoor op tot (iets meer dan) 1 meter.

Bovenrivieren (Rijntakken)
Langs de Rijntakken in het bovenrivierengebied worden de laagste decimeringhoogtes berekend. Ook dit is conform verwachting, aangezien gerekend is met een afgetopte Rijnafvoer bij Lobith (16.500 m^3/s). Omdat de decimeringhoogte in de meeste gevallen is bepaald op basis van een herhalingstijd *onder* en een herhalingstijd *boven* het aftopniveau, is de decimeringhoogte van de waterstand niet helemaal gelijk aan nul, maar wordt een waarde berekend van slechts enkele decimeters.
De decimeringhoogtes voor de waterstand zijn langs de Nederrijn/Lek duidelijk het laagst. Hier speelt niet zozeer het aftoppen van de Rijnafvoer een rol, maar vooral het ontzien van deze riviertak bij Rijnafvoeren (bij Lobith) boven de 16.000 m^3/s.
De decimeringhoogtes voor de kruinhoogte zijn over het algemeen wel wat hoger. Deze lopen op tot circa 0,6 meter. Het effect van het aftoppen werkt bij de overslagberekeningen minder sterk door, aangezien de windsnelheid, in tegenstelling tot de waterstand, nog wel toeneemt bij extremere omstandigheden. Er is dus bij grotere herhalingstijden wel sprake van meer golven. De oorzaak van lokale verschillen kan liggen aan factoren als oriëntatie van het dijkvak (meer of minder golfbelasting), de vorm van het dwarsprofiel (taludhelling) en de normfrequentie van de betreffende dijkring (waardoor de decimeringhoogte op basis van andere herhalingstijden wordt bepaald, zie paragraaf 4.2).

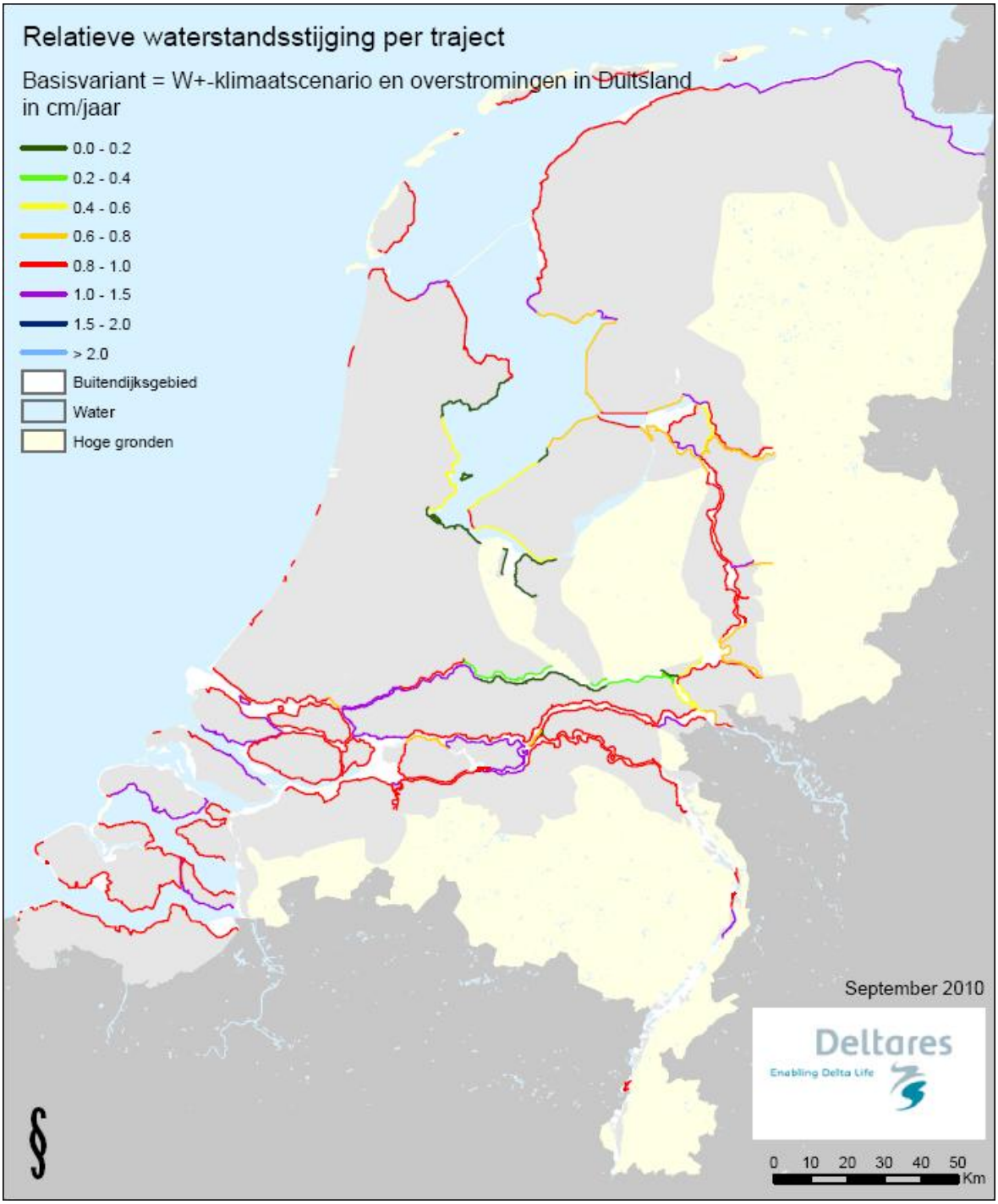
Bovenrivieren (Maas)
De decimeringhoogtes langs de Maas zijn gemiddeld hoger dan in het overige deel van het bovenrivierengebied (de Rijntakken), met name langs de Limburgse Maas. Daar lopen de waarden voor de waterstand op tot circa 0,8 meter. De oorzaak van dit verschil is dat voor de Maas geen rekening is gehouden met een fysisch maximum op de rivierafvoer, in tegenstelling tot de Rijn, waar wel gerekend is met aftoppen.

IJssel- en Vechtdelta
De resultaten voor de IJssel- en Vechtdelta komen redelijk goed overeen met de resultaten op het deel van de IJssel dat in het bovenrivierengebied ligt. Ook hier zijn de decimeringhoogtes beperkt als doordat met een fysisch maximum op de rivierafvoer is gerekend. De invloed van het IJsselmeer is beperkt als gevolg van de Ramspolkering.

Benedenrivieren
De decimeringhoogtes in het benedenrivierengebied liggen gemiddeld hoger dan die in het bovenrivierengebied. De invloed van het aftoppen is hier heel erg klein. Opvallend zijn de grote decimeringhoogtes die berekend worden in de Maasmonding. De bijdrage van de open kering situatie is groot, waardoor er weinig verschil is tussen de decimeringhoogte vlak buiten en net achter de Europoortkering.

4.6 Resultaten waterstandstijging

In paragraaf 4.4 is uitgelegd hoe de structurele waterstandstijging is bepaald op basis van de berekende frequentielijnen voor de waterstand in de verschillende klimaatscenario's. Omdat de invoer voor OptimaliseRing bestaat uit parameters per dijkringtraject, is voor elk dijktraject de gemiddelde waarde van de waterstandstijging bepaald. De resultaten zijn weergegeven in bijlage H en in Figuur 4.8 In deze tabellen is ook de parameter η weergegeven die dient als invoer voor het OptimaliseRing. Deze parameter betreft de relatieve waterstandstijging, dat wil zeggen: de waterstandstijging vermeerderd met de bodemdaling.



Figuur 4.8 Relatieve waterstandstijging (inclusief bodemdaling) basisvariant.

5 Gevoeligheidsanalyse

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 zijn de resultaten gepresenteerd voor de basisvariant. Deze resultaten zijn gekoppeld aan bepaalde aannames en uitgangspunten, die op hun beurt weer zijn omgeven met onzekerheden. De resultaten zijn in meer of mindere mate gevoelig voor de keuzes die zijn gemaakt in de basisvariant. In dit hoofdstuk is daarom een uitgebreide gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, met als doel het inzichtelijk maken van de consequenties van bepaalde aannames en (model)keuzen. Er is onder andere gekeken naar de effecten van andere keuzes voor de meerpeilstijging, het kritieke golfoverslagdebiet en het wel of niet aftoppen.

In dit hoofdstuk wordt volstaan met het presenteren van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse (decimeringhoogtes en waterstandstijging). Het bepalen van het effect van de uitkomsten op de kosten-batenanalyse vormt geen onderdeel van dit rapport. De resultaten van deze analyse zijn gebruikt om boven- en ondergrenzen van de invoerparameters voor OptimaliseRing te bepalen. Met behulp van deze waarden is vervolgens in de MKBA een Monte Carlo analyse uitgevoerd om de onzekerheid in de optimale kansen te berekenen.

5.2 Kritiek golfoverslagdebiet

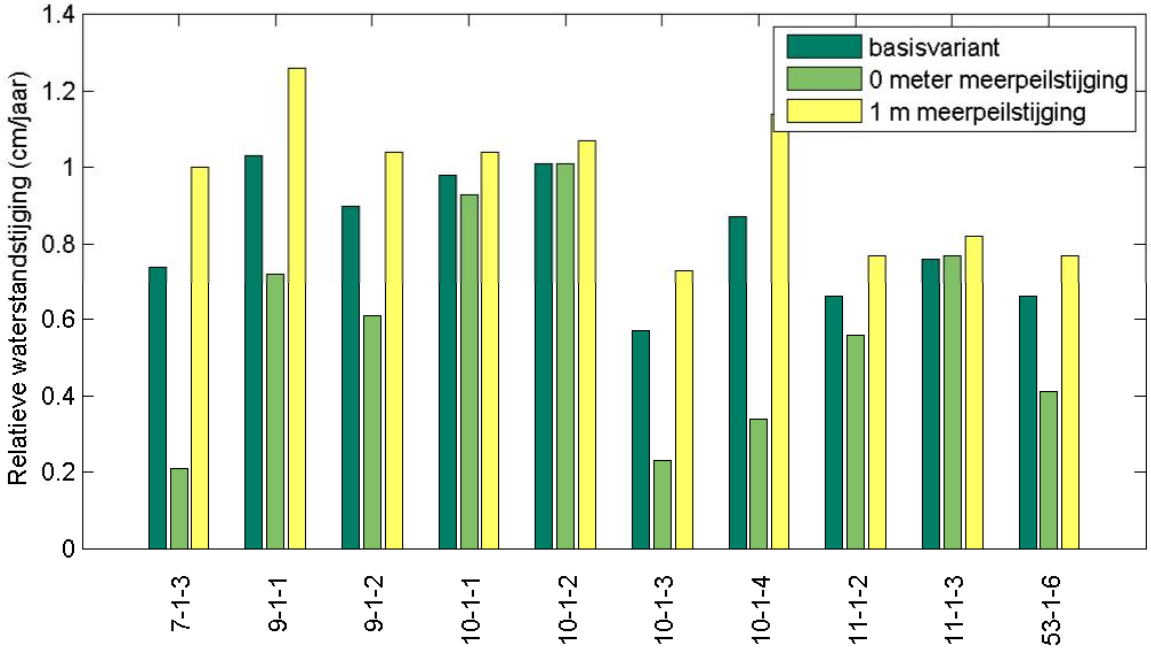
In de basisvariant is de decimeringhoogte voor de kruinhoogte berekend bij een kritiek golfoverslagdebiet van 1 l/s/m. Met behulp van de Hydra-modellen zijn ook berekeningen gemaakt voor een kritiek golfoverslagdebiet van 10 l/s/m. In de figuren in bijlage 6K1 worden de berekende decimeringhoogtes voor de kruinhoogte bij de verschillende waarden van het kritiek overslagdebiet vergeleken per deelgebied.

De invloed van het kritiek overslagdebiet is beperkt. Zoals te zien in de figuren in de bijlage, is het verschil overal in het rivierengebied beperkt tot circa 10 cm in decimeringhoogte. Langs de meren en met name de kust zijn de verschillen groter, oplopend tot ruim 0,5 meter. Daar zijn de decimeringhoogtes in absolute zin echter ook een stuk groter, waardoor de procentuele verschillen over het geheel beperkt blijven.
In sommige gevallen zijn de resultaten in de figuren gelijk bij 1 en 10 l/s/m. Vaak is dit het gevolg van een correctie en is de decimeringhoogte bij 10 l/s/m eigenlijk groter. Dat komt doordat de decimeringhoogte voor de waterstand bij die trajecten groter is dan die van de kruinhoogte (zie bijlage G). Het resultaat van de overslagberekening bij toenemend kritiek overslagdebiet benadert het resultaat van de waterstandberekening.

5.3 Meerpeilstijging

In de basisvariant (klimaatscenario W+) is rekening gehouden met 0,61 meter stijging van het IJsselmeerpeil in de periode 2015 tot 2100 (zie paragraaf 3.2.2.). In de gevoeligheidsanalyse is ook gekeken naar de varianten 0 en 1 meter meerpeilstijging. Voor het IJsselmeergebied zelf geldt dat deze meerpeilstijging zich direct vertaalt in de lokale waterstandstijging (per jaar). Voor de IJssel- en Vechtdelta is dat niet zo, aangezien ook rekening moet worden gehouden met verhoogde rivierafvoeren. Daarom zijn met Hydra-VIJ ook de (maatgevende) waterstanden berekend in het jaar 2100, uitgaande van 0 meter meerpeilstijging. De

waterstandstijging bij 1 meter meerpeilstijging is vervolgens bepaald (door middel van extrapolatie) op basis van de resultaten van de basisvariant en de variant met 0 meter meerpeilstijging.



Figuur 5.1 Gevoeligheidsanalyse relatieve waterstandstijging (incl. bodemdaling) IJssel- en Vechtdelta.

In de figuur is te zien, dat het verschil in de lokale (relatieve) waterstandstijging per jaar bij een meerpeilstijging van 0 meter of 1 meter erg groot is (zoals te verwachten). In het Zwarte Meer en langs de Vechtdelta zijn de verschillen groter dan langs de IJsseldelta, die duidelijk minder wordt beïnvloedt door het IJsselmeerpeil.

5.4 Raaklijnbepaling

In paragraaf 4.2 is uitgelegd hoe de decimeringhoogtes zijn bepaald op basis van de berekende frequentielijnen voor de waterstand en de kruinhoogte. Feitelijk komt dit neer op het bepalen van de richting van de frequentielijn. Als de frequentielijn niet zo recht loopt (op logaritmische schaal) hangt de uitkomst af van de steunpunten die gebruikt worden voor de raaklijnbepaling. In de basisvariant is dat de norm herhalingstijd van de betreffende dijkring en een herhalingstijd die twee stappen hoger is gekozen (van de beschikbare herhalingstijden).

Om de gevoeligheid van de decimeringhoogtes voor de methode van de raaklijnbepaling te onderzoeken, zijn de decimeringhoogtes ook een keer berekend bij een andere keuze voor de steunpunten. Waar in de basisvariant wordt uitgegaan van de norm van de dijkring, is in de gevoeligheidsanalyse uitgegaan van de optimale kans, zoals berekent met OptimaliseRing. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in de figuren in bijlage 6K2.
Het effect van het berekenen van de decimeringhoogte bij de optimale kans kan zowel positief als negatief zijn. Dat wil zeggen: de decimeringhoogte kan zowel omhoog als omlaag gaan ten opzichte van de eerdere berekende waarde. Over het algemeen is het verschil beperkt, maar er zijn enkele uitzonderingen waarbij het verschil groot is.

5.5 Aftoppen

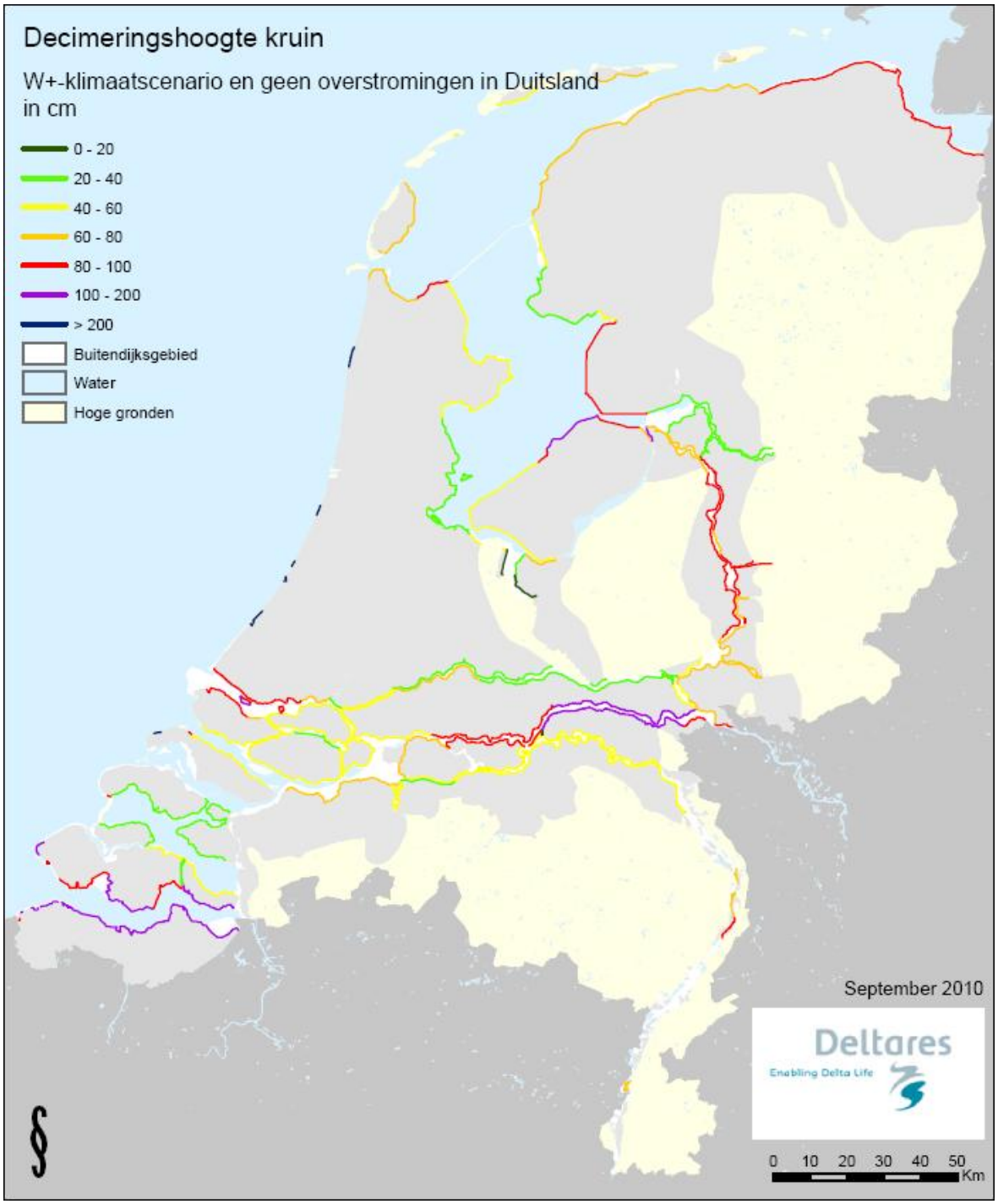
Om rekening te houden met het effect van overstromingen bovenstrooms van Lobith, zijn de afvoeren van de IJssel en de Rijn in de basisvariant afgetopt op een verondersteld fysisch maximum. Met behulp van de Hydra-modellen zijn ook berekeningen gemaakt zonder het aftoppen van de rivierafvoeren. De resultaten hiervan zijn weergegeven in bijlage J en in Figuur 5.2 t/m Figuur 5.4..

In het Benedenrivierengebied en de IJssel- en Vechtdelta is het verschil tussen de berekening met en zonder aftoppen erg klein, met uitzondering van een enkel dijkringtraject. In het bovenrivierengebied (de Rijntakken) is het verschil groot, met uitzondering van de Nederrijn/Lek, waar de invloed van wel of niet aftoppen nauwelijks merkbaar is, aangezien in beide gevallen rekening is gehouden met ontzien van de Nederrijn/Lek bij Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s.

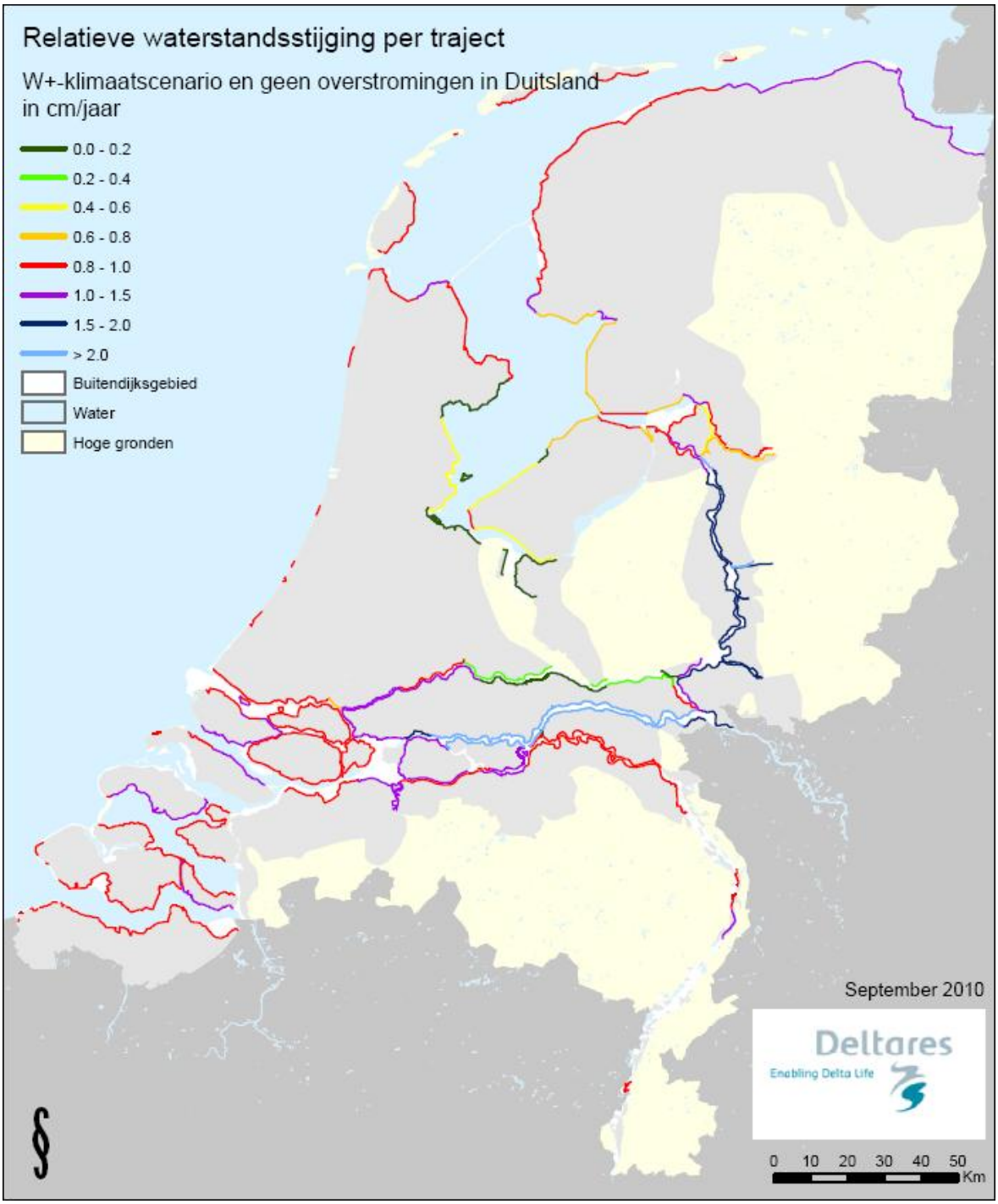

Decimeringshoogte waterstand
W+-klimaatscenario en geen overstromingen in Duitsland
in cm
0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100
100 - 200
> 200
Buitendijksgebied
Water
Hoge gronden
September 2010
Deltares
Enabling Delta Life
0 10 20 30 40 50
Km



Figuur 5.2 *Decimeringhoogtes waterstand gevoeligheidsanalyse zonder aftoppen.*



Figuur 5.3 *Decimeringhoogtes kruinhoogte gevoeligheidsanalyse zonder aftoppen.*



Figuur 5.4 Relatieve waterstandstijging (inclusief bodemdaling) gevoeligheidsanalyse zonder aftoppen.

5.6 Overhoogte

In de basisvariant is geen rekening gehouden met eventueel aanwezige overhoogte en oversterkte op een dijkringtraject. In een gevoeligheidsanalyse wordt binnen de MKBA nagegaan wat het mogelijke effect is op de economisch optimale overstromingskansen en op de verwachtte investeringsbedragen wanneer hier wel rekening mee gehouden zou worden.

In dit geval is de overhoogte gedefinieerd als het verschil tussen de door de beheerder aangeleverde hoogte van de waterkering en de benodigde hoogte in de referentiesituatie (zie paragraaf 4.3.). In de analyse is ervan uitgegaan dat de door de beheerder opgegeven hoogte ook daadwerkelijk kerend is, met andere woorden ook voldoet voor piping en stabiliteit. Tevens is ervan uitgegaan dat de eventueel aanwezige bekleding en kustwerken eveneens voldoen tot deze hoogte. Deze gevoeligheidsanalyse moet daarom gezien worden als een bovengrensbenadering en moet vooral indicatief worden opgevat.

Deze gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor drie dijkringen, te weten dijkring 26 (Schouwen Duivenland), 36 (Land van Heusden/De Maaskant) en 44 (Kromme Rijn).

Wanneer op een bepaalde plek overhoogte aanwezig is, en er in de uitgangssituatie dus een dijkprofiel ligt dat hoger is dan de referentiesituatie betekend dit feitelijk dat de overstromingskans in de uitgangssituatie, de zogenaamde P(0), lager is dan in de referentiesituatie. De P(0) wordt vanuit het kansenspoor aangeleverd, en wordt eveneens gebruikt in het model OptimaliseRing. Voor de basisvariant is de P(0) altijd vastgesteld op de normfrequentie gedeeld door de dijkringfactor (zie paragraaf 2.4.). In het kader van de analyse met overhoogte wordt deze P(0) verlaagd, zodat deze aansluit bij het hier beschouwde profiel met overhoogte. De aanwezige overhoogte wordt dus voornamelijk in rekening gebracht binnen het kansenspoor. Binnen het kostenspoor kunnen nu de kostencurves op de reguliere wijze bepaald worden, met het zwaardere profiel met overhoogte als uitgangssituatie.

In voorgaande beschouwing is uitgegaan van één vaste mate van overhoogte op een geheel dijkringtraject (het niveau waarop de gegevens vanuit het kansen- en kostenspoor worden aangeleverd aan OptimaliseRing). In praktijk zijn echter door de beheerders profielgegevens op dijkvak niveau aangeleverd, waardoor de mate van overhoogte binnen een traject kan variëren (per dijkvak). Wanneer op het traject met één enkele P(0) gerekend zou worden, zouden alsnog kostencurves ontstaan met sprongen daarin, omdat het ene vak op een traject bij een kleinere verhoging van het HBN versterkt zou moeten worden dan een ander vak. Om eerder genoemde redenen is dit een onwenselijke situatie. Om deze reden is besloten de trajecten waar dit aan de orde is op te splitsen in meerdere subtrajecten, waaraan verschillende waarden van P(0) worden meegegeven vanuit het kansenspoor. Dijkvakken met eenzelfde mate van overhoogte binnen een traject kunnen daarbij geclusterd worden binnen één subtraject.

In principe is per dijkvak een representatief profiel aangeleverd door de beheerders. Op de door de beheerder aangeleverde kruinhoogte is een kleine correctie gedaan voor mogelijk in de toekomst nog optredende zetting en klink van de dijk. Dit is in feite extra hoogte die na verloop van tijd vanzelf weer verdwijnt. Deze correctie is voor het gehele land uniform aangenomen op 20 cm. Waar de aldus berekende dijkhoogte niet voldoet aan de eisen die gesteld zijn voor de referentiesituatie wordt de overhoogte op 0 gesteld.

In Tabel 5.1 zijn de berekeningsresultaten gepresenteerd die zijn gebruikt om in OptimaliseRing de optimale kansen van de drie dijkringen met overhoogte te berekenen. Hierbij valt op dat er soms met grote overhoogtes rekening wordt gehouden.

Er zijn daarvoor een aantal verklaringen:

- Bij de kust is gerekend met een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m', de huidige ontwerppraktijk bij de kust is dat er nog vaak met 0,1 ls/m' wordt gerekend. Met name bij zware golfaanval kan dit een groot effect hebben
- Dijkring 26 bestaat grotendeels uit oude zeekeringen. Na aanleg van de Oosterschelde kan dat lokaal grote overhoogte tot gevold hebben.
- Van dijkring 44, Kromme Rijn is bekend dat er overhoogte aanwezig is. In het verleden is de waterkering, ontworpen op een afvoer van rond de 18000 m^3/. (Silva, e.a. ,2000)

Tabel 5.1Resultaten gevoeligheidsanalyse overhoogte voor dijkringen 26,36 en 44.

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	Factor dijkring-deel	P(0) traject	dh_{10} kruinhoogte (cm)	overhoogte (cm)	P(0) traject met overhoogte
26	26-1-1a	1/4000	2	1/8000	37	32	$1{,}28 \cdot 10^{-05}$
26	26-1-1b	1/4000	2	1/8000	35	56	$9{,}74 \cdot 10^{-07}$
26	26-1-1c	1/4000	2	1/8000	33	185	$1{,}78 \cdot 10^{-10}$
26	26-1-2*	1/4000	2	1/8000	-	0	-
26	26-2-1a	1/4000	2	1/8000	33	0	$2{,}47 \cdot 10^{-09}$
26	26-2-1b	1/4000	2	1/8000	36	49	$4{,}75 \cdot 10^{-06}$
26	26-2-1c	1/4000	2	1/8000	38	70	$1{,}07 \cdot 10^{-06}$
26	26-2-1d	1/4000	2	1/8000	38	90	$2{,}54 \cdot 10^{-07}$
26	26-2-1e	1/4000	2	1/8000	24	122	$2{,}11 \cdot 10^{-10}$
26	26-2-1f	1/4000	2	1/8000	35	143	$7{,}79 \cdot 10^{-09}$
26	26-2-1g	1/4000	2	1/8000	36	172	$8{,}62 \cdot 10^{-09}$
26	26-2-1h	1/4000	2	1/8000	38	266	$8{,}23 \cdot 10^{-11}$
36	36-1-1a	1/1250	5	1/6250	53	0	$1{,}60 \cdot 10^{-04}$
36	36-1-1b	1/1250	5	1/6250	50	32	$4{,}75 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-2a	1/1250	5	1/6250	58	0	$1{,}60 \cdot 10^{-04}$
36	36-1-2b	1/1250	5	1/6250	53	49	$2{,}98 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-3	1/1250	5	1/6250	56	46	$3{,}51 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-4	1/1250	5	1/6250	50	22	$4{,}41 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-5	1/1250	5	1/6250	51	58	$2{,}50 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-6a	1/1250	5	1/6250	31	18	$4{,}67 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-6b	1/1250	5	1/6250	58	52	$2{,}97 \cdot 10^{-05}$
36	36-1-7	1/1250	5	1/6250	51	106	$5{,}44 \cdot 10^{-06}$
44	44-1-1	1/1250	5	1/6250	36	229	$3{,}38 \cdot 10^{-14}$
44	44-2-1	1/1250	2	1/2500	34	126	$2{,}88 \cdot 10^{-08}$
44	44-2-2	1/1250	2	1/2500	22	218	$5{,}64 \cdot 10^{-14}$
44	44-2-3	1/1250	2	1/2500	55	164	$6{,}10 \cdot 10^{-07}$

*geen Hydra-locaties aanwezig op dit dijkringtraject

5.7 Profielschematisatie

Er is onderzocht wat de gevoeligheid van de decimeringhoogte van de kruinhoogte is voor de profielschematisatie. In de analyse is voor 4 watersystemen (bovenrivierengebied, benedenrivierengebied, merengebied en de kust) telkens één representatieve locatie geselecteerd. Bij elke locatie is een aantal fictieve dwarsprofielen voor de kering gedefinieerd. Op basis van deze profielen zijn bij gegeven waarden van het kritieke golfoverslagdebiet de overschrijdingsfrequentielijnen berekend met behulp van het bij het watersysteem behorende Hydra-model. Daaruit zijn vervolgens de gezochte decimeringhoogten bepaald. De decimeringhoogte is telkens berekend als het verschil tussen het hydraulische belastingniveau (HBN) bij een terugkeertijd van 10x de norm en het HBN bij de norm zelf.

De verschillende profielschematisaties en waarden voor het kritieke overslagdebiet die gebruikt zijn in de analyse, staan in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Overzicht gevarieerde parameters.

Te variëren parameter	Waarden
Profieltype	1 zonder en 1 met berm (op MHW-hoogte)
Kritiek golfoverslagdebiet	1, 10, 30 l/s/m
Helling (boven)talud	1:2, 1:3, 1:4
Bermbreedte	smal en breed

De resultaten kunnen als volgt worden samengevat (voor de details wordt verwezen naar (Kuijper, 2009). Voor het boven- en benedenrivierengebied geldt dat de gevoeligheid van de decimeringhoogte voor de gekozen profielschematisatie relatief klein is. Voor de kust en het merengebied geldt dat de gevoeligheid van de decimeringhoogte voor de gekozen profielschematisatie groter is.

6 Referenties

Agtersloot, 2009

Beschrijving invoer en resultaten 9 situaties. R. Agtersloot, AHA rapport P0041.6, WAQUA-simulaties Maas t.b.v. Hydra-B. In opdracht van Deltares, 15 december 2009.

Van Beek, E., M. Haasnoot, K.M. Meijer, J.R.Delsman, J.J.J.C. Snepvangers, G. Baarse, R. van Ek, G.F. Prinsen, J.C.J. Kwadijk & J.W. van Zetten, 2008. *Verkenning kosteneffectiviteit van grootschalige maatregelen tegen droogteschade als gevolg van G+ en W+ klimaatscenario's. Deltaresrapport T2498, Delft*

Van Dantzig, 1960

Economic Decision Problems for Flood Prevention. D. van Dantzig, Econometrica, Volume 24, Issue 3, July 1956 (pp. 276-287), 1956.

Deltacommissie, 2008

Samen werken met water; Bevindingen van de Deltacommissie

Duits, 2009

OptimaliseRing; Technische documentatie van een numeriek rekenmodel voor de economische optimalisatie van beschermingsniveaus van dijkringen – Versie 2.0, HKV LIJN IN WATER rapport PR1377, Lelystad, december 2009.

Eijgenraam, 2005

Veiligheid tegen overstromen; Kosten-batenanalyse voor Ruimte voor de Rivier, *deel 1,* C.J.J. Eijgenraam, CPB-document 82, Centraal Plan Bureau, Den Haag, april 2005.

Geerse, 2003

Probabilistisch model Hydraulische Randvoorwaarden Benedenrivierengebied. C.P.M. Geerse, RIZA werkdocument 2003.128X. Lelystad, 2003.

Jonkman, 2009

Mogelijk effect van piping op uitkomsten van de kosten-batenanalyse. Notitie van 28 augustus,2009.

Haasnoot et al., 1999

Impact of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands: terrestrial areas. M. Haasnoot, J.A.P.H. Vermulst en H. Middelkoop. RIZA rapport 99.049, Lelystad, 1999.

Geerse, 2010

Omgaan met b-keringen in WV21. HKV-nota PR1803.10, september 2010.

Kind, 2008

Waterveiligheid 21e eeuw; Kengetallen Kosten-batenanalyse, J. Kind, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, directoraat - Generaal Water, rapport WD 2008.044, september 2008.

Kind, 2011

Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21e eeuw ..

Projectnummer 1204144
J. Kind, Deltares, maart 2011.

Klis en Markus, 2007

MHW-processor versie 3.1. Gebruikershandleiding, WL | Delft Hydraulics, H. van der Klis en A. Markus, Rapport Q4209.20, Delft, maart 2007.

Kramer, 2008

Effecten klimaatverandering en systeemwerking op het benedenrivierengebied. Notitie van 18 december, 2008.

Kuijper, 2009

Gevoeligheidsanalyse decimeringshoogte golfoverslag voor profielschematisatie. B. Kuijper. Opdrachtgever Deltares, HKV LIJN IN WATER memorandum PR1741.10, Lelystad, juli 2009.

Kwadijk, J., Jeuken, A. & Van Waveren, H. E. (2008)

De klimaatbestendigheid van Nederland Waterland. Verkenning van knikpunten in beheer en beleid voor het hoofdwatersysteem. Delft, Deltares.

Lammersen, 2004

Grensoverschrijdende effecten van extreme hoogwater op de Niederrhein, R. Lammersen in opdracht van de Duits-Nederlandse werkgroep hoogwater, 2004.

Nicolai en Duits, 2010

Referentieversie Hydraulische Randvoorwaarden in de Waddenzee. R. Nicolai en M.T. Duits. HKV LIJN IN WATER rapport PR1719.10, Lelystad, juli 2009.

Santbergen,P., 2005

Hydra Toos. Gebruikershandleiding HydraTool's versie 1.2.0., Alkyonrapport A1460

Silva et al., 2005

Rampenbeheersingsstrategie Overstromingen Rijn en Maas; Achtergrondrapportage Veiligheid en Rivierkunde. W. Silva (RIZA), R.M. Slomp

(RIZA), J.W. Stijnen (HKV LIJN IN WATER) en E. v. Velzen (RIZA). Rijkswaterstaat RIZA-rapport 2005.024, ISBN-nummer 90-3695-697-8, december 2005.

Silva et al., 2000

Ruimte voor Rijntakken; Wat het onderzoek ons heeft geleerd . RIZA-nota 2000.026, ISBN-nummer 9036953235 .

Stronkhorst et al, 2010

Belang van duinscenario's in de MKBA voor Waterveiligheid 21e eeuw (WV21); Deltares memo, kenmerk 1202129-013-ZWS-0001

TAW, 1985

Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 1 – Bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Staatsuitgeverij 's Gravenhage, september 1985.

Verhoeven, G.F., 2009

Quickscan benodigde pompcapaciteit IJsselmeer bij klimaatscenario's. Deltares memo.

Volleberg, 2009

Overzichtsrapportage Baseline en WAQUA Rijn Op Lange Termijn en IJssel Lange Termijn. CSO Adviesbureau, rapportnummer 09K075/001. 16 december 2009.

Waal, 2007

Achtergrondrapport HR 2006 voor de Benedenrivieren. *Thermometerrandvoorwaarden 2006*. J.P. de Waal. Rijkswaterstaat RIZA Rapport 2007.023. ISBN 978-90-369-1402-4.

De Wit en Buishand, 2007

Generator of Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. M. de Wit en A. Buishand, Rijkswaterstaat RIZA/KNMI, RWS RIZA-rapport 2007.027, KNMI-publicatie 218, ISBN 9789036914062, Lelystad, juli 2007.

A Begrippenlijst

Belasting
: Op een constructie (een waterkering) uitgeoefende in- en uitwendige krachten, ofwel de mate waarin een constructie door in- en uitwendige krachten wordt aangesproken, uitgedrukt in een fysische grootheid.

Benedenrivierengebied
: Door Rijn en Maas gevoede rivierengebied, waarbij tijdens grote afvoergolven de waterstanden een significante invloed ondervinden van de waterstand op de Noordzee als gevolg van een zware storm. De getijhoogwaterstijging is hier van belang.

Beschermingsnorm
: De eis waaraan een primaire waterkering moet voldoen, aangegeven als de gemiddelde overschrijdingskans (per jaar) van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren.

Bovenrivierengebied
: Door Rijn en Maas gevoede rivierengebied (inclusief de IJssel), waarbij de waterstanden geen significante invloed ondervinden van de waterstand op de Noordzee en het IJsselmeer als gevolg van een zware storm. De getijhoogwaterstijging speelt hier geen rol.

Dijkring
: Het stelsel van waterkeringen, of hoge gronden, dat een dijkringgebied omsluit en beveiligt tegen overstromingen.

Dijkringdeel
: Deel van een dijkring dat is onderscheiden voor de berekening van economisch optimale overstromingskansen met het oog op het feit dat de gevolgen van een overstroming afhangen van waar de waterkering doorbreekt.

Dijkringgebied
: Een gebied dat door een stelsel van waterkeringen, of hoge gronden beveiligd moet zijn tegen overstroming, in het bijzonder bij hoge stormvloed, bij hoog opperwater van een van de grote rivieren, bij hoog water van het IJsselmeer of Markermeer of bij een combinatie daarvan.

Dijkringtraject
: Traject binnen de dijkring (of het dijkringdeel) waarbinnen het hydraulische regime min of meer constant verondersteld kan worden

Dijkvak
: Deel van een dijkringtraject met min of meer hetzelfde maatgevende dijkprofiel en uniform veronderstelde bodemeigenschappen.

Faalmechanisme
: Wijze waarop een waterkering wordt aangetast zodat dit leidt tot falen van de waterkerende functie.

Falen
: Het niet meer vervullen van de primaire functie (water keren) en/of het niet meer voldoen aan de vastgestelde criteria.

Golfhoogte
: De verticale afstand tussen dal en top van een golf.

Golfoverslag
: De hoeveelheid water die door golven per strekkende meter gemiddeld per tijdseenheid over de waterkering slaat. De golfoverslag wordt meestal gegeven als een gemiddeld

debiet per strekkende meter breedte, bijvoorbeeld in m^3/s per m of in l/s per m. De golfoverslag wordt berekend ten opzichte van de hoogte van de buitenkruinlijn en er wordt van uitgegaan dat deze overslag ook de achterkant van de kruin en het binnentalud bereikt.

Faalmechanisme golfoverslag

Voor het faalmechanisme golfoverslag is het hydraulisch belastingniveau, beschouwd bij een opgegeven overslagdebiet en bij gegeven deterministische omstandigheden (zoals rivierafvoer, zeewaterstand, windsnelheid etc.) het niveau op de dijk, in meters+NAP, waarvoor het gegeven debiet optreedt. Anders gezegd: het hydraulisch belastingniveau is hier het niveau op de dijk dat bij de gegeven omstandigheden gelijk is aan de som van de lokale waterstand en de golfoverslaghoogte.

HR2006

Hydraulische Randvoorwaarden 2006. De HR2006 zijn opgesteld in opdracht van de Staatssecretaris van Verkeer en Waterstaat, onder verantwoordelijkheid van het Directoraat Generaal Water, door de verschillende specialistische diensten van Rijkswaterstaat. Op basis van deze Hydraulische Randvoorwaarden wordt met het Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006 een beoordeling op veiligheid van de primaire waterkeringen uitgevoerd voor de periode van 2006 tot 2011.

Hydraulisch Belasting Niveau (HBN)

Niveau van de belasting tegen de waterkering als gevolg van de lokale waterstand en bijbehorende golven.

.Kruin(hoogte)

Het hoogste punt van het dijklichaam.

NAP

Het Normaal Amsterdams Peil.

Opbarsten

Het bezwijken van de grond, door het ontbreken van verticaal evenwicht in de grond, onder invloed van wateroverdrukken.

Overhoogte / oversterkte

Extra hoogte en sterkte ten opzichte van de hoogte en sterkte die waterkeringen moeten hebben om aan de wettelijke beschermingsnorm te voldoen

Overschrijdingsfrequentie

Het gemiddeld aantal keren dat in een bepaalde tijd een verschijnsel een zekere waarde bereikt of overschrijdt.

Overstromingskans

De kans dat een gebied overstroomt doordat de waterkering rondom dat gebied (de dijkring) op één of meer plaatsen faalt.

Overstromingsrisico

Overstromingskans $\times$ gevolg.

Piping

Het verschijnsel waarbij onder een waterkering een holle pijpvormige ruimte ontstaat doordat het erosieproces van een zandmeevoerende wel niet stopt.

Strijklengte

De lengte van het voor de waterkering gelegen wateroppervlak waarover de wind waait.

Talud

De schuinte van het zijvlak van aardwerken, dijken, spoorbanen, vestingwerken.

Taludbekleding

De afdekking van de kern van een dijk ter bescherming tegen golfaanvallen en langsstromend water. De taludbekleding bestaat uit een erosiebestendige toplaag, inclusief de onderliggende vlijlaag, filterlaag, kleilaag en/of geotextiel.

TMR2006

Thermometer Randvoorwaarden 2006. In algemene zin hebben de TMR2006 betrekking op hetzelfde type informatie als de HR2006. De getalswaarden, en vooral de status van de informatie zijn echter verschillend: in de TMR2006 zijn de nieuwste informatie en inzichten verwerkt, ze zijn dus up-to-date, maar de TMR2006 hebben géén wettelijke status. De TMR2006 gelden in het beleidsmatige besluitvormingsproces rond de vaststelling van de formele hydraulische randvoorwaarden als advieswaarden vanuit technisch-inhoudelijke invalshoek. De HR2006 zijn het eindresultaat van de beleidsmatige besluitvorming en de HR2006 hebben een wettelijke status.

Toetspeil yyyy

De waterstand met een overschrijdingsfrequentie conform bijlage II bij de Wet op de waterkering die gebruikt wordt voor het beoordelen van de toestand van de waterkeringen, waarover in het jaar yyyy aan de minister van Verkeer en Waterstaat wordt gerapporteerd. In het Toetspeil is de verwachte hoogwaterstijging (inclusief NAP-daling) tot en met het jaar yyyy verwerkt.

De Toetspeilen voor rivieren zijn gegeven op de as van de rivier; voor meren op enige afstand uit de teen van de waterkering (meestal 200m), voor duinen op de NAP –20m dieptelijn en voor de overige waterkeringen langs de kust en estuaria meestal nabij de teen van de waterkering.

Waakhoogte

De waakhoogte op enige moment is het verschil tussen de gemeten of verwachte kruinhoogte op dat moment en een stilwaterstand op dat zelfde moment.

Waterkering

Kunstmatige hoogten en die (gedeelten van) natuurlijke hoogten of hooggelegen gronden, met inbegrip van daarin of daaraan aangebrachte werken, die een waterkerende of mede een waterkerende functie hebben, en die als zodanig in de legger zijn aangegeven.

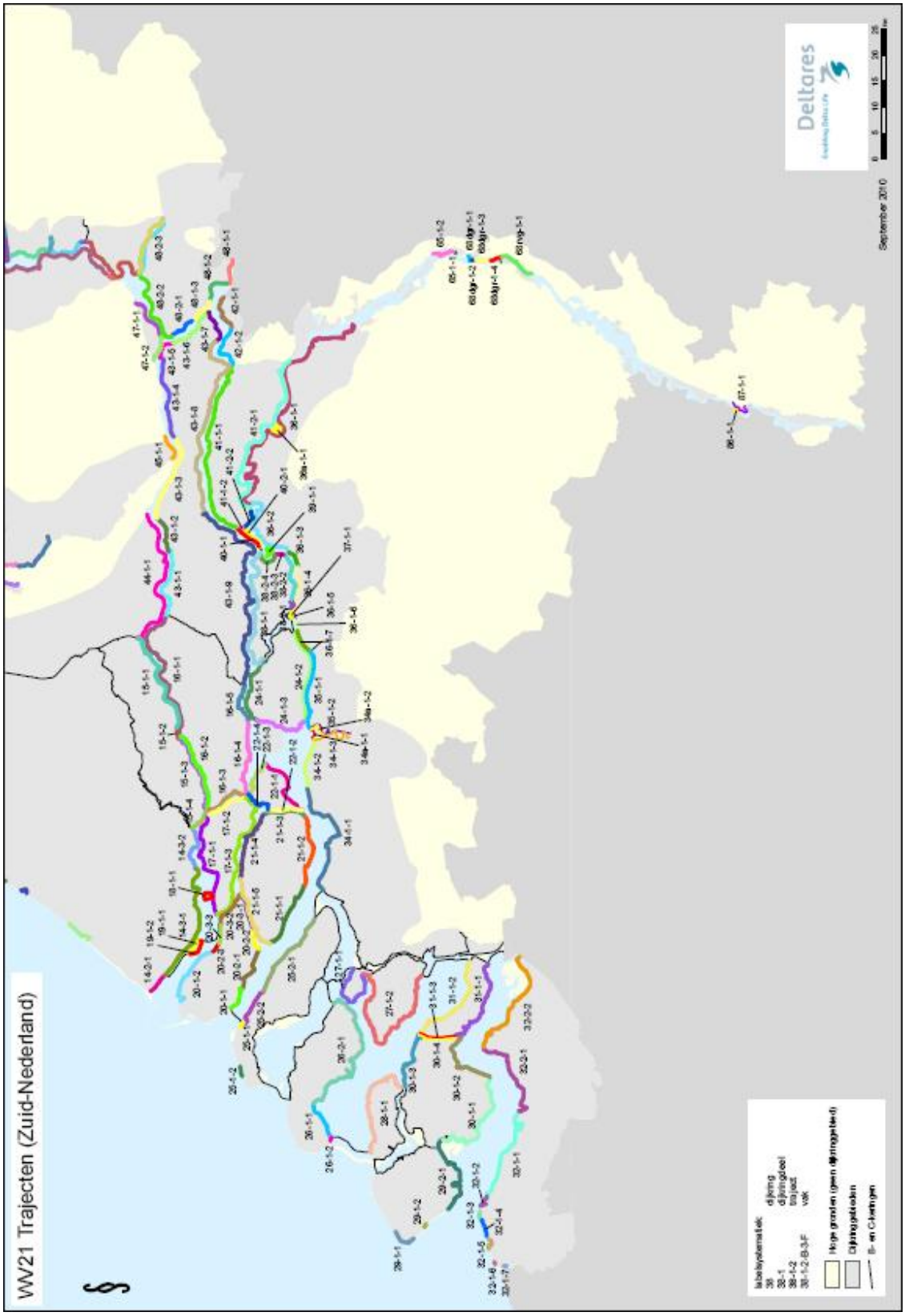
Werklijn

De relatie tussen de rvierafvoer en de statistisch bepaalde overschrijdingsfrequentie van de rivierafvoer, zoals deze door de Minister van Verkeer en Waterstaat wordt gehanteerd voor het bepalen van de ontwerpafvoer voor de versterking van dijken.

B Dijkringtrajecten



Figuur B.1 Dijkringtrajecten WV21 (Noord-Nederland).



Figuur B.2 Dijkringtrajecten WV21 (Zuid-Nederland).

C Afvoerstatistiek

C.1 Werklijnen Rijn bij Lobith

De werklijn bij Lobith voor de referentiesituatie is identiek verondersteld aan de werklijn die is afgeleid voor de TMR2006. De maatgevende afvoer (bij een frequentie van eens in de 1250 jaar) is daarin gelijk aan 16.000 m^3/s. Deze werklijn kan worden weergegeven met de volgende functie[4]:

$$\begin{aligned} Q &= a_1 \ln T + b_1 \quad T \le 25 \\ Q &= a_2 \ln T + b_2 \quad T > 25 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Voor de TMR2006 zijn de volgende getallen afgeleid:

Tabel C.1 Parameters werklijn Lobith 2015 (TMR2006).

a_1	1518
b_1	5965
a_2	1316
b_2	6613

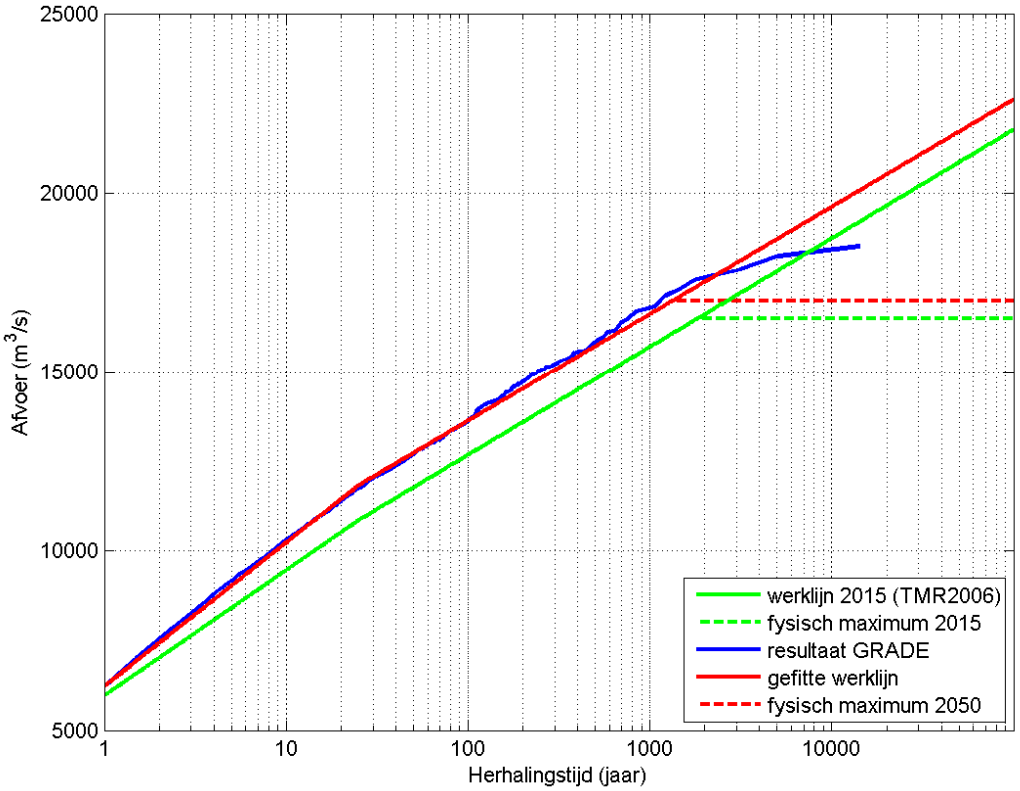
Voor klimaatscenario's kan de werklijn niet gebaseerd worden op extrapolatie van de afvoerwaarnemingen. De werklijn is voor de verschillende klimaatscenario's bepaald met behulp van het Generator Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) instrumentarium (De Wit en Buishand, 2007). Hierbij zijn met behulp van de neerslaggenerator en een neerslag-afvoermodel synthetische afvoerreeksen gegenereerd voor de referentiesituatie (2015) en de situatie in het jaar 2050 en 2100 voor de G+ en W+ scenario's.

De in Hydra-B gebruikte werklijnen voor het G+ en W+ scenario zijn afgeleid door een fit op de resultaten. Deze werkwijze kan worden toegelicht aan de hand van Figuur C.1: de blauwe lijn geeft de resultaten weer van de GRADE analyse voor het G+ scenario in 2050. Hierin is nog geen rekening gehouden met overstromingen bovenstrooms. Om dit effect wel mee te nemen, wordt gerekend met een fysisch maximum op de afvoer bij Lobith. Voor 2050 geldt een aftopniveau van 17.000 m^3/s. De resultaten beneden dit fysisch maximum zijn gefit met een werklijn van de formule B1. Ter vergelijking zijn ook de werklijn en het aftopniveau voor de referentiesituatie (2015) weergegeven.
Tabel C.2 geeft de parameters van alle gefitte werklijnen.

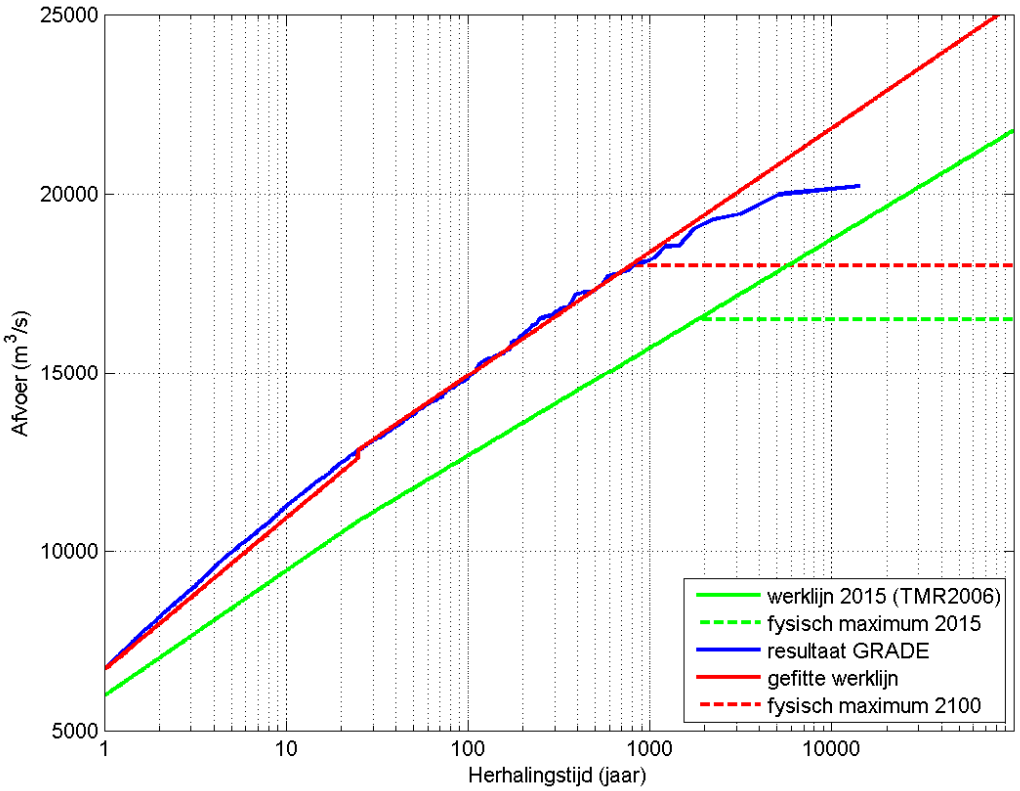
[4] *Gemakshalve is hier volstaan met de beschrijving van de werklijn middels twee takken, hoewel doorgaans sprake is van een extra tak voor herhalingstijden kleiner of gelijk aan een jaar. Deze vereenvoudiging heeft geen effect op de resultaten, aangezien binnen WV21 voor veel hogere herhalingstijden is gerekend.*

Tabel C.2 Parameters werklijn Lobith 2050 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+).

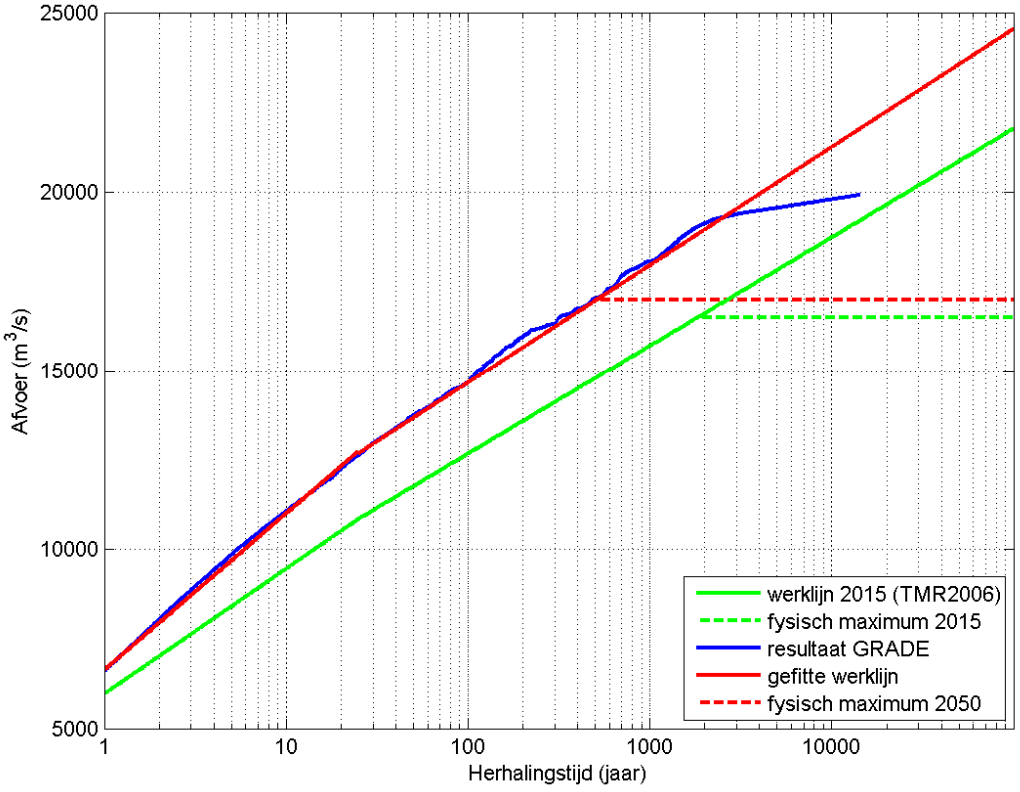
	2050 G+	2100 G+	2050 W+	2100 W+
a_1	1740	1840	1900	2200
b_1	6224	6693	6630	7516
a_2	1300	1500	1430	1700
b_2	7640	8013	8080	9150



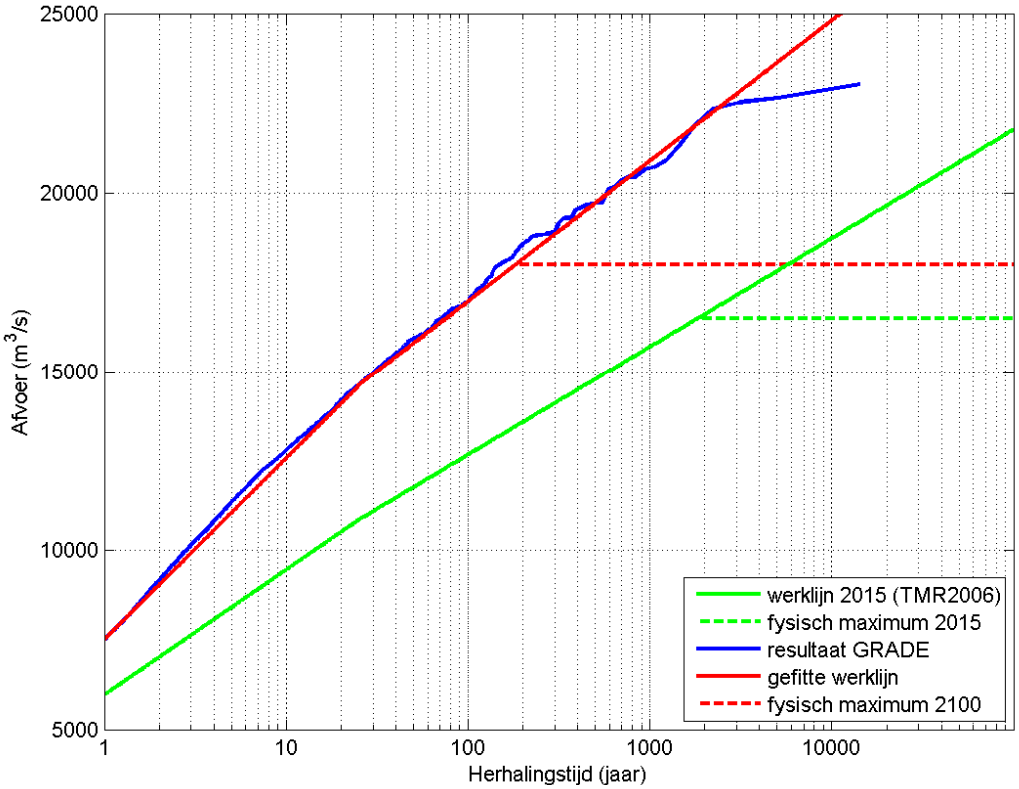
Figuur C.1 Werklijn Lobith 2050 bij klimaatscenario G+.



Figuur C.2 *Werklijn Lobith 2100 bij klimaatscenario G+.*



Figuur C.3 *Werklijn Lobith 2050 bij klimaatscenario W+.*



Figuur C.4 Werklijn Lobith 2100 bij klimaatscenario W+.

C.2 Werklijnen Maas bij Borgharen

De werklijn bij Borgharen in de referentiesituatie (2015) is gebaseerd op de werklijn uit de HR2006. De maatgevende afvoer (bij een frequentie van eens in de 1250 jaar) is daarin gelijk aan 3.800 m^3/s. Deze werklijn kan worden weergegeven met de volgende functie:

$$Q = a \ln T + b \qquad \text{(B.2)}$$

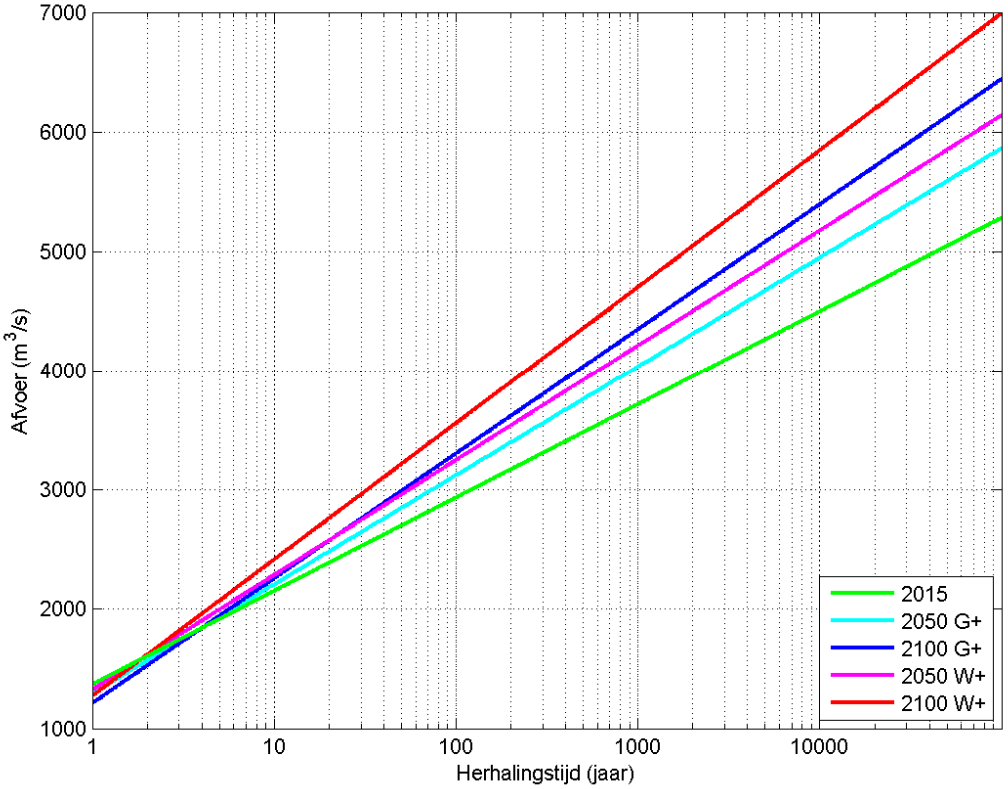
De werklijnen voor 2100 voor het G+ en W+ scenario zijn gefit op data uit een database die Kwadijk heeft afgeleid met behulp van het model Meuseflow voor het jaar 2100 (ref.). De helft van de toename tussen de huidige werklijnen en die voor 2100 is als schatting genomen voor de werklijnen voor 2050 voor het G+ en W+ scenario.

Tabel C.3 geeft de parameters van alle (gefitte) werklijnen.

Tabel C.3 Parameters werklijn Borgharen 2015, 2050 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+).

	2015	2050 G+	2100 G+	2050 W+	2100 W+
a	339,94	397,14	454,33	418,38	496,82
b	1371	1292	1212	1322	1272

De (gefitte) werklijnen zijn ook weergegeven in Figuur C.5.



Figuur C.5 Werklijnen Borgharen 2015, 2050 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+).

C.3 Werklijnen IJssel bij Olst

De werklijnen bij Olst zijn gebaseerd op de werklijnen zoals gebruikt bij Lobith (paragraaf C.1). Daarvoor is gebruik gemaakt van de met WAQUA bepaalde afvoerverdeling, waarbij rekening is gehouden met het ontzien van de Nederrijn/Lek bij Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s. Voor meer informatie over het bepalen van deze afvoerverdeling wordt verwezen naar bijlage D.

Tabel C.4 geeft het verband tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer bij Olst, voor zowel de situatie zonder ontzien als de situatie met ontzien. Merk op dat het effect van het ontzien van de Nederrijn/Lek pas optreedt bij Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s. De IJsselafvoeren in Tabel C.4 wijken af van de waarden in bijlage D, omdat het daar om de afvoer bovenstrooms op de IJssel gaat, terwijl hier gelet wordt op de afvoer bij Olst. Het verschil in afvoer tussen de situatie met en zonder ontzien is wel in beide gevallen hetzelfde, aangezien er evenveel extra water over de IJssel wordt afgevoerd door het ontzien van de Nederrijn/Lek.

Tabel C.4 Rivierafvoeren op de IJssel bij Olst bij de met WAQUA doorgerekende hoogwatergolven.

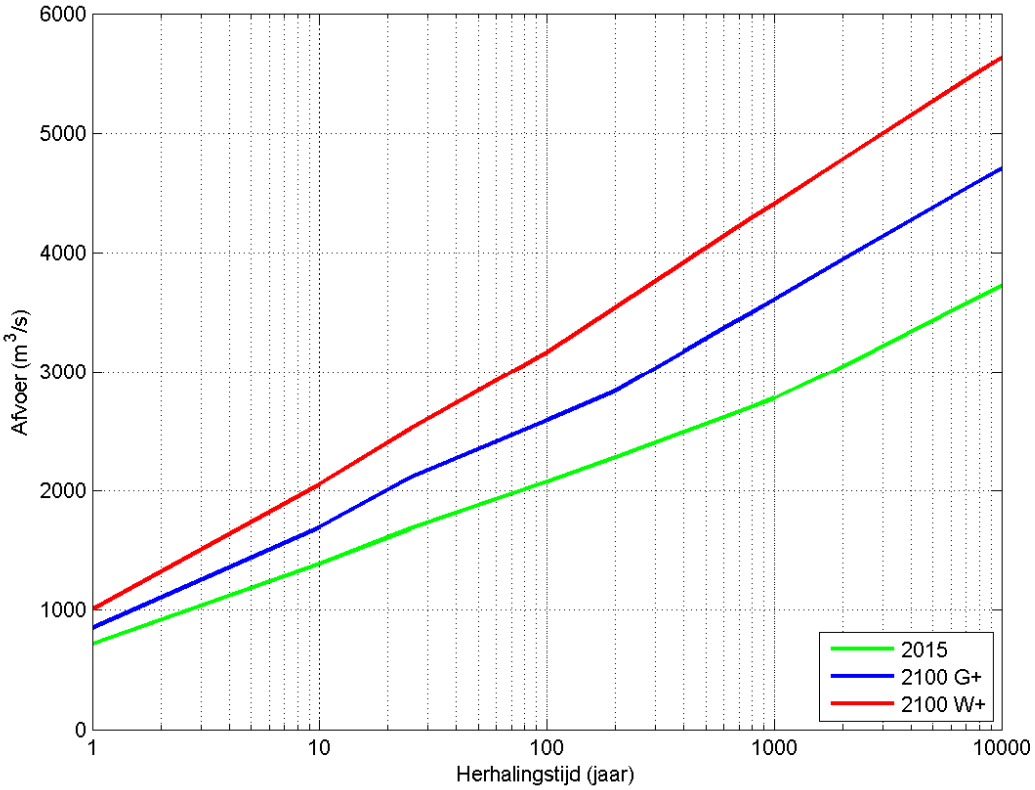
Lobith (m^3/s)	Afvoer Olst (m^3/s) zonder ontzien	Afvoer Olst (m^3/s) met ontzien
7864	1065	1065
9458	1403	1403
11766	1902	1902
12678	2039	2039
13880	2348	2348
16000	2853	2853
18000	3397	3500
20000	3917	4140

Op basis van de bovenstaande tabel is een kwadratische fit afgeleid voor de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer bij Olst (waarbij onderscheid is gemaakt tussen Rijnafvoeren boven en beneden de 16.000 m^3/s). Aan de hand van deze relatie en de werklijnen bij Lobith is de volgende tabel met herhalingstijden en bijbehorende afvoeren opgesteld.

Tabel C.5 IJsselafvoer (Olst) bij verschillende herhalingstijden, met ontzien van de Nederrijn/Lek.

Herhalingstijd (jaar)	Afvoer Lobith (m^3/s)			Afvoer Olst (m^3/s)		
	2015	2100 G+	2100 W+	2015	2100 G+	2100 W+
1	5965	6693	7516	718	852	1008
10	9460	10930	12582	1392	1697	2055
25	10851	12616	14598	1680	2113	2521
100	12673	14921	16979	2076	2591	3164
200	13586	15960	18157	2281	2840	3543
400	14498	17000	19335	2492	3171	3919
600	15031	17608	20025	2617	3367	4138
800	15410	18040	20514	2707	3505	4293
1000	15704	18375	20893	2778	3612	4412
2000	16616	19414	22072	3046	3944	4782
7500	18355	21397	24319	3606	4571	5479
10000	18734	21829	24808	3727	4706	5630

De werklijnen voor Olst, zoals gepresenteerd in Tabel C.4 zijn ook weergegeven in Figuur C.6.



Figuur C.6 Werklijnen Olst 2015 en 2100 (klimaatscenario's G+ en W+).

Met behulp van het gevonden verband tussen de Rijn- en de IJsselafvoer zijn ook de fysische maxima voor de afvoer bij Lobith vertaald naar fysische maxima voor de afvoer bij Olst.

C.4 Werklijnen Vecht bij Dalfsen

De werklijn voor de Vecht bij Dalfsen voor de referentiesituatie is identiek verondersteld aan de werklijn die is afgeleid voor de HR2006. Voor de afvoer van de Vecht bij Dalfsen zijn geen G+ en W+ scenario's beschikbaar. Daarom is gekozen om de afvoer van de werklijn procentueel te verhogen. Hiervoor zijn de percentages gebruikt die gelden voor de Rijn bij Lobith bij de maatgevende afvoer (met een overschrijdingsfrequentie van eens per 1250 jaar), zoals aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel C.6 Procentuele verhoging maatgevende afvoer bij Lobith t.o.v. de referentiesituatie.

2050 G+	6%
2050 W+	15%
2100 G+	17%
2100 W+	33%

D Ontzien van de Nederrijn/Lek

D.1 Inleiding

In lijn met de lange termijnvisie van de PKB Ruimte voor de Rivier wordt in WV21 de Nederrijn/Lek ontzien bij afvoeren bij Lobith groter dan 16.000 m^3/s. Dit uitgangspunt heeft invloed op de berekeningen voor de bovenrivieren (Rijntakken) en de IJssel- en Vechtdelta:

- Voor de Rijntakken in het bovenrivierengebied wordt gebruik gemaakt van de statistiek van de Rijnafvoer bij Lobith. Het ontzien van de Nederrijn/Lek heeft geen effect op de werklijn, maar wel op de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de lokale waterstand (de Qh-relatie). Het ontzien van de Nederrijn/Lek is dan ook meegenomen door middel van een aanpassing op de waterstanddatabase, zoals gebruikt in de berekeningen met Hydra-B.
- Voor de IJssel- en Vechtdelta wordt gebruik gemaakt van de statistiek van de IJsselafvoer bij Olst. In dit geval heeft het ontzien van de Nederrijn/Lek geen effect op de relatie tussen de afvoer bij Olst en de lokale waterstand (de Qh-relatie), maar juist wel op de statistiek van de IJsselafvoer (bij de hogere herhalingstijden gaat er immers meer water over de IJssel). Het ontzien van de Nederrijn/Lek is dan ook meegenomen door middel van een aanpassing op de werklijn bij Olst, zoals gebruikt in de berekeningen met Hydra-VIJ.

Deze bijlage beschrijft het effect van het ontzien van de Nederrijn/Lek op de verdeling van de afvoer over de verschillende Rijntakken. Met de nieuwe afvoerverdeling zijn de werklijnen bij Olst bepaald (zie bijlage bijlage B) en zijn de Qh-relaties voor de Rijntakken aangepast (paragraaf D.3).

D.2 Verdeling van de rivierafvoer in 2015

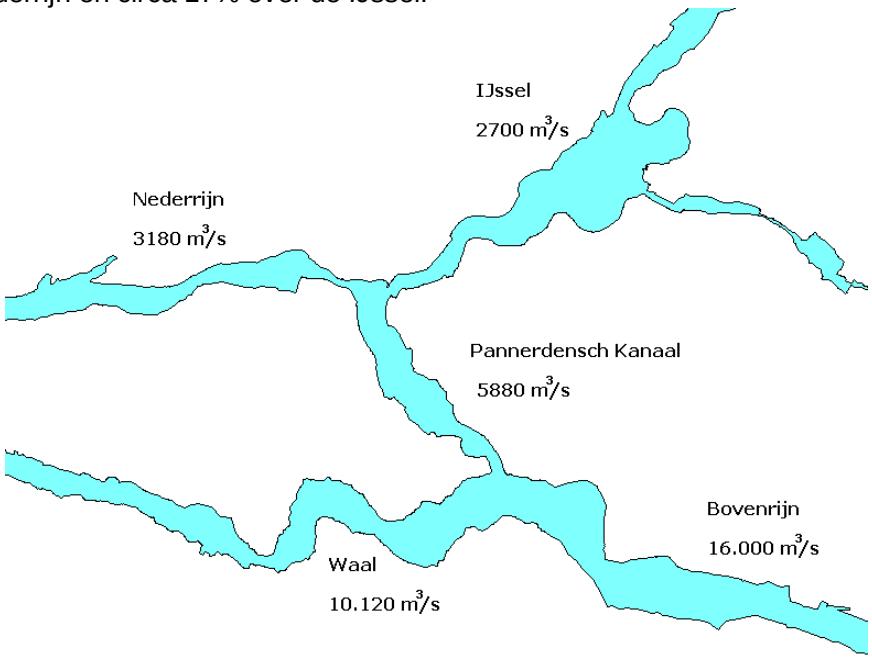
De waterstanddatabases voor het bovenrivierengebied zijn binnen WV21 opnieuw afgeleid voor de referentiesituatie. Hiertoe zijn Qh-relaties bepaald met WAQUA, die het verband geven tussen de piekafvoer van de Rijn bij Lobith en de lokale waterstand. Het daarvoor gebruikte WAQUA-model is opgesteld binnen het project Ruimtelijke Opgaven Lange Termijn Rivieren (ROLT. Vertrekpunt is de situatie rond 2015 wanneer de PKB maatregelen voor Ruimte voor de Rivier, de Maaswerken en Hoogwaterbeschermingsprogramma's zijn gerealiseerd (zie paragraaf 2.2.2.).

Voor de Rijntakken zijn met dit WAQUA-model 9 hoogwatergolven doorgerekend. Drie daarvan gaan uit van een piekafvoer bij Lobith gelijk aan 16.000 m^3/s of hoger. Met behulp van WAQUA zijn voor deze afvoeren (naast lokale waterstanden) ook de daarmee corresponderende afvoeren (bovenstrooms) op de afzonderlijke Rijntakken berekend. De resultaten daarvan zijn weergegeven in Tabel D.1, waarbij de afvoer op het Pannerdensch Kanaal apart is bepaald door het verschil te nemen tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer over de Waal.

Tabel D.1 Rivierafvoeren bij de hoogwatergolven met een piekafvoer groter of gelijk aan 16.000 m^3/s.

Lobith (m^3/s)	Waal (m^3/s)	Pannerdensch Kanaal (m^3/s)	Nederrijn (m^3/s)	IJssel (m^3/s)
16000	10117	5883	3176	2699
18000	11138	6862	3636	3221
20000	12109	7891	4113	3772

Ter illustratie van de berekende afvoerverdeling, zijn de (afgeronde) rivierafvoeren uit Tabel D.1 bij een maatgevende afvoer van 16.000 m^3/s weergegeven in Figuur D.1.Circa 63% van de afvoer op de Bovenrijn bij Lobith gaat naar de Waal. Van de overige 37% gaat circa 20% over de Nederrijn en circa 17% over de IJssel.



Figuur D.1 Afvoerverdeling in de referentiesituatie (2015) bij de maatgevende afvoer (WAQUA).

Op de berekende afvoerverdeling zoals weergegeven in Tabel D.1 is een lineaire fit toegepast. Dit geeft de volgende relaties tussen de afvoer bij Lobith en de afvoer over de Rijntakken:

$$\begin{aligned} Q_{Waal} &= 0,4980 \cdot Q_{Lobith} + 2157,3 \\ Q_{PanKan} &= 0,5020 \cdot Q_{Lobith} - 2157,3 \\ Q_{NedLek} &= 0,2343 \cdot Q_{Lobith} - 574,8 \\ Q_{IJssel} &= 0,2683 \cdot Q_{Lobith} - 1597,8 \end{aligned} \qquad \text{(C.1)}$$

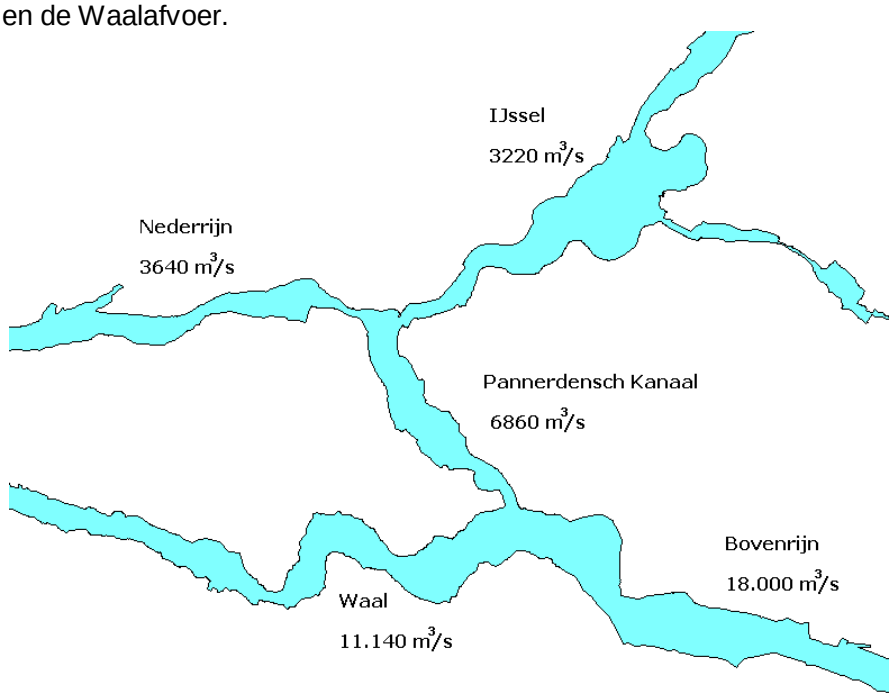
De berekende rivierafvoeren zoals weergegeven in Tael D.1 zijn aangepast om rekening te houden met het ontzien van de Nederrijn/Lek. Daarbij is het water dat niet via de Nederrijn/Lek wordt afgevoerd naar rato verdeeld over de IJssel en de Waal. Het resultaat van de aanpassing is weergegeven in Tabel D.2.

.

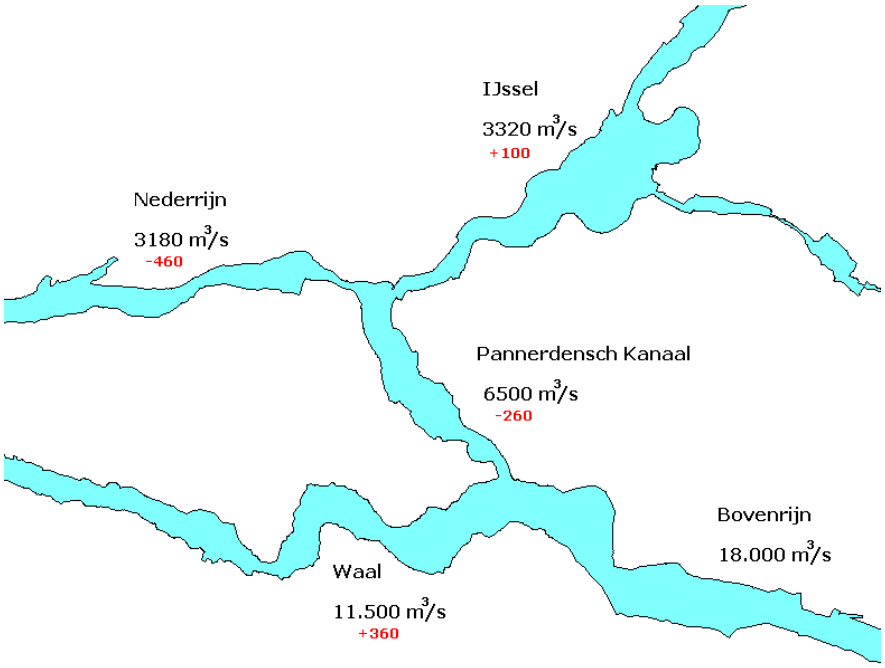
Tabel D.2 Rivierafvoeren bij het ontzien van de Nederrijn/Lek bij Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s.

Lobith (m^3/s)	Waal (m^3/s)	Pannerdensch Kanaal (m^3/s)	Nederrijn (m^3/s)	IJssel (m^3/s)
16000	10117	5883	3176	2699
18000	11495	6505	3176	3324
20000	12823	7177	3176	3995

Als voorbeeld kan de verdeling worden genomen bij een piekafvoer bij Lobith van 18.000 m^3/s (zie ook Figuur D.2 en Figuur D.3). De afvoer over de Nederrijn is dan in de oorspronkelijke situatie gelijk aan 3636 m^3/s. In de situatie met ontzien van de Nederrijn komt de afvoer over deze tak niet boven de 3176 m^3/s. Er gaat als gevolg hiervan dus 460 m^3/s minder over de Nederrijn. Deze hoeveelheid water wordt over de Waal en de IJssel verdeeld volgens de verhouding 11138 m^3/s : 3221 m^3/s, oftewel 357 m^3/s extra over de Waal (afgerond 360 m^3/s) en 103 m^3/s extra over de IJssel (afgerond 100 m^3/s). De afvoer op het Pannerdensch Kanaal is opnieuw apart bepaald door het verschil te nemen tussen de Rijnafvoer en de Waalafvoer.



Figuur D.2 Afvoerverdeling in 2015 bij een Rijnafvoer van 18.000 m^3/s, zonder ontzien Nederrijn/Lek.



Figuur D.3 Afvoerverdeling in 2015 bij een Rijnafvoer van 18.000 m^3/s, met ontzien Nederrijn/Lek.

Op de berekende afvoerverdeling zoals weergegeven in Tabel D.2 is opnieuw een lineaire fit toegepast. Dit geeft de volgende relaties tussen de afvoeren bij ontzien van de Nederrijn/Lek:

$$\begin{aligned} Q_{Waal} &= 0,6766 \cdot Q_{Lobith} - 700,6 \\ Q_{PanKan} &= 0,3234 \cdot Q_{Lobith} + 700,6 \\ Q_{IJssel} &= 0,3239 \cdot Q_{Lobith} - 2490,7 \end{aligned} \qquad \text{(C.2)}$$

D.3 Aanpassing van de Qh-relaties

Voor de Rijntakken in het bovenrivierengebied is het ontzien van de Nederrijn/Lek meegenomen door middel van een aanpassing op de met WAQUA berekende Qh-relaties. Door het ontzien van de Nederrijn/Lek bij Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s, gelden bij dezelfde rivierafvoer andere lokale waterstanden dan in de oorspronkelijke situatie.

Uit de WAQUA-resultaten zijn relaties afgeleid die het verband geven tussen de piekafvoer bij Lobith en de piekafvoer over een bepaalde Rijntak, voor zowel de situatie met ontzien van de Nederrijn/Lek (C.1) als de situatie zonder ontzien (C.2.). Deze relaties gelden bij Rijnafvoeren groter of gelijk aan 16.000 m^3/s. In de situatie met ontzien van de Nederrijn/Lek is het water dat niet via de Nederrijn/Lek wordt afgevoerd naar rato verdeeld over de IJssel en de Waal.

Uit de genoemde relaties is af te leiden welke Rijnafvoer in de situatie *met* ontzien dezelfde afvoer over een bepaalde riviertak geeft als in de situatie *zonder* ontzien. Deze werkwijze wordt toegelicht in onderstaand tekstblok.

Voorbeeld: IJsselafvoer met en zonder ontzien van de Nederrijn/Lek

Voor de IJssel gelden de volgende relaties (voor Q_{Lobith}>16.000 m^3/s):

zonder ontzien: $Q_{IJssel} = 0,2683\ Q_{Lobith} - 1597,8$
met ontzien : $Q_{IJssel} = 0,3239\ Q_{Lobith} - 2490,7$

Een Rijnafvoer bij Lobith van 18.000 m^3/s resulteert dus in de volgende IJsselafvoeren:

zonder ontzien: 3232 m^3/s
met ontzien : 3340 m^3/s

Door het ontzien van de Nederrijn/Lek wordt bij dezelfde Rijnafvoer meer water over de IJssel geleid, waardoor de bijbehorende IJsselafvoer groter is dan in de situatie zonder ontzien.

Welke Rijnafvoer levert nu met ontzien dezelfde IJsselafvoer op als in de situatie zonder ontzien?

Deze vraag kan worden beantwoord door gelijkstellen van de IJsselafvoeren in de relaties voor beide situaties (met en zonder ontzien van de Nederrijn/Lek):

$0,2683\ Q_{Lobith\ zonder\ ontzien} - 1597,8 = 0,3239\ Q_{Lobith\ met\ ontzien} - 2490,7$

Hieruit volgt:

$Q_{Lobith\ met\ ontzien} = 0,8283\ Q_{Lobith\ zonder\ ontzien} + 2756,7$

Een Rijnafvoer bij Lobith van 18.000 m^3/s in de situatie *zonder* ontzien levert blijkbaar eenzelfde afvoer op de IJssel op als een Rijnafvoer van 17.666 m^3/s in de situatie *met* ontzien van de Nederrijn/Lek.

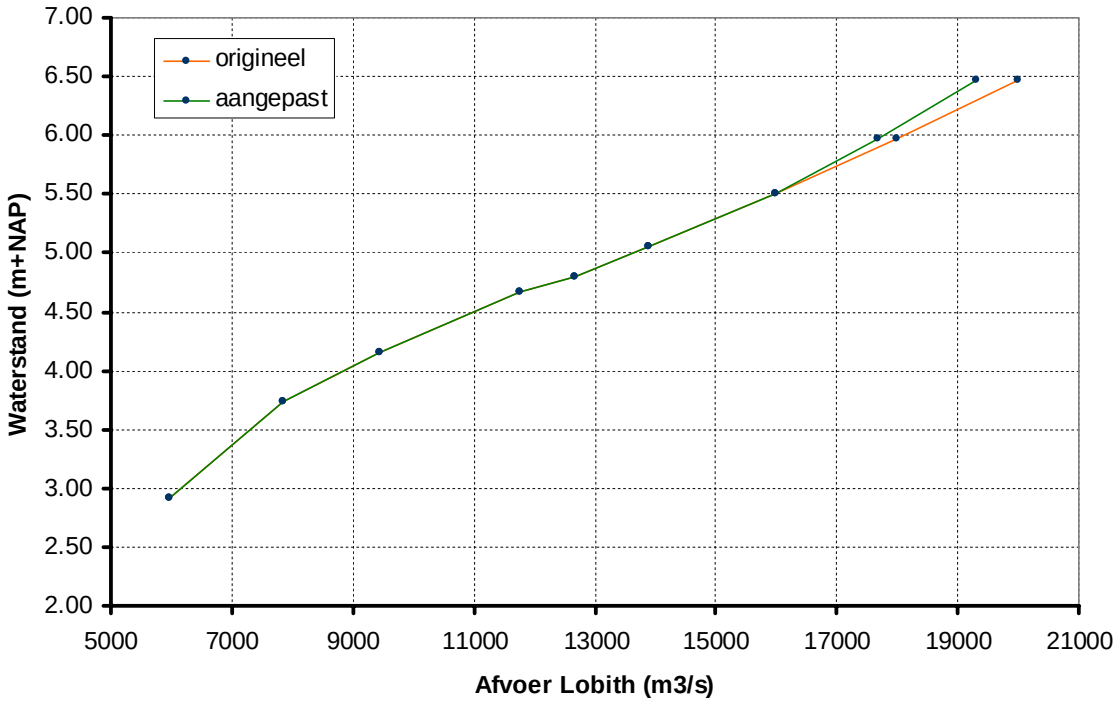
In de WAQUA-sommen zijn twee Rijnafvoeren boven de 16.000 m^3/s doorgerekend, namelijk 18.000 m^3/s en 20.000 m^3/s. Met behulp van de relaties tussen de rivierafvoeren kunnen deze afvoerwaarden worden aangepast om rekening te houden met het ontzien van de Nederrijn/Lek (Tabel D.3). De waterstanden in de berekende Qh-relaties worden daarbij gelijk gehouden.

Tabel D.3 Aanpassing afvoeren boven 16.000 m^3/s in berekende Qh-relaties uit WAQUA-sommen.

Q Lobith zonder ontzien (m^3/s)	Q Lobith met ontzien Nederrijn/Lek (m^3/s)			
	Qh-relatie Waal	Qh-relatie Pannerdensch Kanaal	Qh-relatie IJssel	Qh-relatie Nederrijn/Lek
18.000	17.472	19.104	17.666	16.000
20.000	18.944	22.209	19.323	16.000

Tenslotte volgt nog een voorbeeld van het resultaat van deze aanpassing van de Qh-relatie. In Figuur D.4 is de Qh-relatie gegeven voor een locatie langs de IJssel (dijkring 53). De oranje lijn geeft de originele Qh-relatie, zoals berekend met WAQUA (zonder rekening te houden met het ontzien van de Nederrijn). De groene lijn geeft de aangepaste Qh-relatie. De afvoeren 18.000 en 20.000 m^3/s bij Lobith, die horen bij de twee hoogst berekende waterstanden zijn daarbij verlaagd volgens Tabel D.3.

Zoals te zien in de figuur, is het gevolg van de aanpassing van de Qh-relatie dat de op de IJssel de waterstanden bij gelijke afvoer omhoog gaan, hetgeen volgens verwachting is.



Figuur D.4 *Voorbeeld aanpassing Qh-relatie voor een locatie langs de IJssel (dijkring 53).*

E Modelschematisaties

E.1 Benedenrivieren

Om tot waterstanddatabases voor Hydra-B te komen, zijn met behulp van de MHW-processor (Klis en Markus, 2007) de volgende stappen doorlopen:

1. Sobek-berekeningen;
2. Vertaling Sobek-resultaten naar de oeverlocaties;
3. Genereren Hydra-B databases.

De Sobek-schematisatie die ten grondslag ligt aan de berekeningen is het TMR2006-model uitgebreid met de Ruimte voor de Rivier maatregelen zoals voorzien voor 2015. Deze schematisatie is gebaseerd op de TMR2006 referentieschematisatie van de Benedenrivieren, met daarin opgenomen het volgende:

- Alle BER autonome ontwikkelingen (originele varianten conform eerdere pakkettoetsen 2004 & 2008, voor Zuiderklip, NOP Noordwaard, Sliedrechtse Biesbosch).
- Alle BER PKB maatregelen (Avelingen, Noordwaard, Overdiep, Kadeverlaging Biesbosch en Berging Volkerak Zoommeer). In alle gevallen originele PKB varianten.

Met de MHW-processor v3.2.1 zijn berekenen gemaakt met de randvoorwaardencombinaties van rivierafvoer, zeewaterstand, keringsituatie en wind volgens de Hydraulische Randvoorwaarden. In totaal zijn 3384 berekeningen gemaakt. Voor meer informatie over de MHW-processor zij verwezen naar (Klis en Markus, 2007).
De uitgangspunten en randvoorwaarden zijn gelijk aan de TMR2006 (Waal, 2007) op twee na:

- In de berekeningen is uitgegaan van waterberging in het Volkerak-Zoommeer. Uitgangspunt hierbij is dat waterberging plaatsvindt als de Europoortkering is gesloten en 2,60 m+NAP ter hoogte van de Volkeraksluizen is voorspeld. Voor de HR2006 is nog niet uitgegaan van waterberging.
- Voor de stormopzetduur is 46 uur aangenomen in plaats van de vigerende 29 uur. De MHW-processor is zodanig geprogrammeerd dat als de stormopzetduur voor de waterstand wordt verlengd, ook de stormduur voor de wind wordt verlengd.

Sobek genereert waterstanden op de as van de rivier. In de MHW-processor is een module opgenomen om de waterstanden van de as te vertalen naar de oever. Voor een toelichting op deze module wordt verwezen naar (Klis en Markus, 2007). In deze studie is bij de vertaling van de as naar de oever geen rekening gehouden met dwarsopwaaiing en bochtwerking.
Met behulp van de MHW-processor zijn de verkregen oeverlocaties vertaald naar een Hydra-B database per dijkring in het Benedenrivierengebied. Voor de berekeningen met Hydra-B zijn de databases per dijkring samengevoegd tot één database, waarbij een selectie is gemaakt van oeverlocaties (locaties om de 500 meter).

E.2 Bovenrivieren

De WAQUA-schematisatie die ten grondslag ligt aan de berekeningen is het model PKB2015_4 (Volleberg, 2009), waarin maatregelen zijn verwerkt zoals genoemd in Tabel E.1 en Tabel E.2. Gerekend is met een vrije afvoerverdeling.

Verondersteld wordt, dat door de PKB-maatregelen die zijn verwerkt in het WAQUA-model de beleidsmatige afvoerverdeling wordt benaderd. Voor de randvoorwaarden is gebruik gemaakt van de TMR2006. Het betreft:

- Afvoer bij Emmerich.
- QH-relatie van Werkendam.
- QH-relatie van Krimpen a/d Lek.
- QH-relatie van de Ketelmeer/Ketelbrug.
- Laterale instroming.

De modelrand van het pkb2015-model ligt aan zijde van het IJsselmeer bij de Ketelbrug. Om consistent te zijn in randvoorwaarden is de QH-relatie van de Ketelbrug uit de TMR2006 gebruikt. Er zijn kleine verschillen met randvoorwaarden als gedefinieerd in de pkb2015, maar dat is voor het resultaat niet van belang, aangezien deze verschillen alleen doorwerken in het benedenstroomse deel, waar binnen het kansenspoor voor WV21 gebruik gemaakt wordt van andere databases (namelijk voor de IJssel-/Vechtdelta). Bij Veessen-Wapenveld zit de oude PKB maatregel, er zijn geen barriers ingebracht bij de in en uitlaat. Vanaf de hoogwatergolf bij een herhalingstijd van 1250 jaar stroomt water in de geul.

Tabel E.1 PKB-maatregelen WAQUA-schematisatie BOR – deel I (R=rechterzijde en L=linkerzijde).

Beginkm	Eindkm	Positie	Korte omschrijving
Bovenrijn			
857,3	861,3	R	Uitwijkhaven Lobith
864,5	872,3	R	Uiterwaardvergraving Rijnwaardense Uiterwaarden natuur
Waal			
871,3	873,2	R	Obstakelverwijdering Suikerdam en Polderkade naar de Zandberg
882,0	886,0	R	Dijkteruglegging Lent Brokx klein
882,0	886,0	R	Dijkteruglegging Lent Brokx klein (met verbeterde ruwcodes)
867,3	886,8	R+L	Kribverlaging Waalbochten
886,8	914,8	R+L	Kribverlaging Midden-Waal
914,8	934,2	R+L	Kribverlaging Waal-Fort Sint Andries
934,2	953,0	R+L	Kribverlaging Beneden-Waal
954,8	957,7	R	Uiterwaardvergraving bedrijventerrein Avelingen
			Uiterwaardvergraving Millingerwaard natuur
878,4	880,8	R	Uiterwaardvergraving Bemmelse Waarden natuur
886,8	887,2	L	Uitwijkhaven Weurt
898,3	903,2	L	Uiterwaardvergraving Afferdensche- en Deestsche Waarden natuur
901,4	906,1	R	Uiterwaardvergraving Gouverneursche polder en Dijkverlegging Eldik
913,5	915,1	R	Uiterwaardvergraving Kleine Willemspolder natuur
917,5	918,5	L	Dreumelsche waarden
946,0	952,5	L	Uiterwaardvergraving Brakelse Benedenwaarden en Dijkverlegging Buitenpolder Het Munnikenland natuur
951,0	952,0	L	Uiterwaardvergraving Loevestein natuur

Tabel E.2 PKB-maatregelen WAQUA-schematisatie BOR – deel II (R=rechterzijde en L=linkerzijde).

Beginkm	Eindkm	Positie	Korte omschrijving
Pannerdensch Kanaal			
872,4	878,8	L	Uiterwaardvergraving Huissensche Waarden landbouw
Nederrijn			
899,0	901,8	L	Obstakelverwijdering veerstoep Lexkesveer
916,7	917,0	R	Obstakelverwijdering Steenfabriek Elst
880,6	887,6	L	Uiterwaardvergraving Meinerswijk natuur
886,1	890,3	R	Uiterwaardvergraving Rosandepolder natuur
891,0	896,0	R	Uiterwaardvergraving Doorwerthsche Waarden landbouw
898,2	903,2	R	Uiterwaardvergraving Renkumse Benedenwaard en Wageninger benedenwaard natuur (lexkesveer)
905,5	906,7	L	Uiterwaardvergraving Manuswaard-De Spees natuur
907,0	910,2	L	Uiterwaardvergraving Middelwaard
910,2	914,1	L	Uiterwaardvergraving De Tollewaard
916,4	920,7	R	Uiterwaardvergraving Amerongense Bovenpolder natuur
921,3	923,7	R	Vispassage Amerongen
Lek			
931,2	936,1	L	Uiterwaardvergraving Beusichemse waard natuur
942,5	944,8	L	Uiterwaardvergraving Polder de Goilbedinger en Everdinger Waarden natuur (Zuidelijke Lekuiterwaarden)
944,5	951,3	L	Uiterwaardvergraving Honswijkerwaarden, stuweiland Hagestein, Hagesteinse Uiterwaard en Heerenwaard
956,5	957,6	L	Dijkversterking Lek/Lexmond-west (Zuidelijke Lekuiterwaarden)
IJssel			
978,8	979,0	R+L	Obstakelverwijdering landhoofd Spoorbrug Zwolle
877,3	880,3	R	Dijkverlegging Hondsbroekse Pleij natuur
929,6	934,5	L	Dijkverlegging De Voorster Klei natuur
981,0	984,0	R	Dijkverlegging Westenholte natuur
960,5	972,1	L	Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld
918,3	925,0	L	Dijkverlegging Cortenoever natuur
			Uiterwaardvergraving Fortmonderwaarden en Welsumerwaarden natuur
943,1	946,9	L	Uiterwaardvergraving Bolwerksplas, Worp en Ossenwaard landbouw en natuur
			Uiterwaardvergraving Keizers- en Stobbenwaarden en Olsterwaarden natuur
976,7	979,8	R	Uiterwaardvergraving Scheller en Oldeneler Buitenwaarden natuur
1000,5	1001,8	L	Uiterwaardvergraving De Greente natuur
1002,0	1003,4	L	Uiterwaardvergraving Ketelpolder natuur
979,8	1001,8	R+L	Zomerbedverlaging Beneden-IJssel

E.3 Maas

De nieuw toegepaste informatie is voornamelijk het verschil tussen de toegepaste informatie in de HR2001 (Hydraulische Randvoorwaarden) en TMR2006 (Thermometer Randvoorwaarden). De TMR2006 geeft de actuele toestand van het gebied op een bepaald moment weer, zonder dat er rekening is gehouden met een gewenste situatie of een vergunde situatie. Voor TMR2006 Maas is een uitzondering gemaakt op de Maaswerken ingreep LateraalKanaal West (LKW) en de kaden bij Roermond, Venlo, Gennep en Mook-Middelaar, waar voor deze gebieden een ontwerpsituatie in het model is opgenomen. In HR2001 is, voor zover beschikbaar, wel rekening gehouden met een vergunde situatie. De belangrijkste nieuwe inzichten van de TMR2006 ten opzichte van de HR2001 zijn:

- Nieuwe kennis over de ruwheid van vegetatie.
- Nieuwe kennis en informatie over de toestroming van zijrivieren, beken en gemalen.
- Nieuwe kennis over de topafvoer van de Maas.
- Nieuwe kennis over vorm van de afvoergolf.
- Oplossen / herstellen van fouten.
- Actualiseren van de gebiedsinformatie (o.a. zomerbedbodem).
- Wijziging van model parameters.
- Toepassen van een fijnmaziger rekenrooster, van ongeveer 70 meter naar ongeveer 40 meter.
- Het toepassen van een ander uitgangspunt voor de benedenstroomse randvoorwaarden. Bij de HR2001 is uitgegaan van een benedenrand gebaseerd op een gemiddelde waterstand tijdens het getij en bij TMR2006 is uitgegaan van de maximale waterstand tijdens het getij.

Als basis voor het inzichtelijk maken van het effect van de nieuwe kennis wordt het model voor TMR2006 gebruikt. De Maaswerken is een aanlegproject. In ieder geval bij de start van een aanlegproject moet rekening worden gehouden met de gewenste en de vergunde situatie. De gewenste situatie is die situatie waarbij afspraken zijn gemaakt over de te onderhouden situatie van het gebied. Voor de Maas geldt dat het gebied wordt beheerd op de vegetatie situatie van 1996. Aan het model TMR2006 zijn vervolgens de Maaswerken maatregelen toegevoegd. In het kort ziet het model waar de effecten van nieuwe kennis voor de Maaswerken (MW) mee worden bepaald er als volgt uit:

TMR2006 + vegetatie 1996 + vergunningen + maatregelen MW = MW 2015

Het model beschrijft daarmee de situatie 2015 na de Maaswerken, gezien vanuit de nieuwe inzichten en met toepassing van de nieuwe informatie en rekening houdend met de gewenste situatie. Voor de Maas zijn er op dit moment geen vergunningen beschikbaar om in het nieuwe model op te nemen. De vergunde situatie wordt in deze fase van het project dus niet meegenomen (wel in het vervolg). De Maaswerken is gestart vóór de start van Ruimte voor de Rivier. De doelstelling van het project de Maaswerken staat los van Ruimte voor de Rivier. In de beoordeling van de effecten van de Maaswerken maatregelen wordt dan ook geen rekening gehouden met Ruimte voor de Rivier. Dit betekent dat voor de randvoorwaarden op de benedenstroomse rand bij Keijzersveer in het nieuwe model is uitgegaan van de randvoorwaarde zoals deze in TMR2006 is toegepast.

Verdere werkzaamheden om te komen tot het WAQUA-model MW2015_4 zijn beschreven in (Agtersloot, 2009).

F Decimeringshoogtes

Tabel F.1Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel I (geel = schatting).

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
01: Schiermonnikoog	1-1-1	1/2000	51	65
02: Ameland	2-1-1	1/2000	45	64
03: Terschelling	3-1-1	1/2000	39	54
04: Vlieland	4-1-1	1/2000	40	52
05: Texel	5-1-1	1/4000	46	65
05: Texel	5-1-2	1/4000	46	65
06: Friesland en Groningen	6-1-1	1/4000	48	78
06: Friesland en Groningen	6-1-2	1/4000	49	80
06: Friesland en Groningen	6-2-1	1/4000	56	88
06: Friesland en Groningen	6-2-2	1/4000	60	92
06: Friesland en Groningen	6-3-1	1/4000	44	74
06: Friesland en Groningen	6-4-1	1/4000	29	58
06: Friesland en Groningen	6-4-2	1/4000	22	30
06: Friesland en Groningen	6-4-3	1/4000	22	32
06: Friesland en Groningen	6-4-4	1/4000	27	40
06: Friesland en Groningen	6-4-5	1/4000	45	46
07: Noordoostpolder	7-1-1	1/4000	41	97
07: Noordoostpolder	7-1-2	1/4000	56	85
07: Noordoostpolder	7-1-3	1/4000	25	25
08: Flevoland	8-1-1	1/4000	64	72
08: Flevoland	8-1-2	1/4000	55	100
08: Flevoland	8-1-3	1/4000	44	108
08: Flevoland	8-1-4	1/4000	34	93
08: Flevoland	8-2-1	1/4000	23	57
08: Flevoland	8-2-2	1/4000	21	43
08: Flevoland	8-2-3	1/4000	39	45
09: Vollenhove	9-1-1	1/1250	26	38
09: Vollenhove	9-1-2	1/1250	30	40
10: Mastenbroek	10-1-1	1/2000	17	56
10: Mastenbroek	10-1-2	1/2000	13	43
10: Mastenbroek	10-1-3	1/2000	30	35

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
10: Mastenbroek	10-1-4	1/2000	26	39
11: IJsseldelta	11-1-1	1/2000	64	123
11: IJsseldelta	11-1-2	1/2000	24	42
11: IJsseldelta	11-1-3	1/2000	13	37
12: Wieringen	12-1-1	1/4000	50	84
12: Wieringen	12-1-2	1/4000	22	41
13: Noord Holland	13-1-1	1/10.000	50	72

Tabel F.2Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel II (geel = schatting).

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
13: Noord Holland	13-1-2	1/10.000	50	64
13: Noord Holland	13-1-3	1/10.000	49	67
13: Noord Holland	13-1-4	1/10.000	60	243
13: Noord Holland	13-2-1	1/10.000	22	41
13: Noord Holland	13-2-2	1/10.000	22	41
13: Noord Holland	13-4-1	1/10.000	22	35
13: Noord Holland	13-4-2	1/10.000	21	32
13a: IJburg	13a-1-1	1/4000	21	21
13a: IJburg	13a-1-2	1/4000	21	25
13a: IJburg	13a-1-3	1/4000	21	26
13a: IJburg	13a-1-4	1/4000	21	21
13b: Marken	13b-1-1	1/1250	22	29
14: Zuid-Holland	14-1-1	1/10.000	92	300
14: Zuid-Holland	14-1-2	1/10.000	92	300
14: Zuid-Holland	14-1-3	1/10.000	92	346
14: Zuid-Holland	14-1-4	1/10.000	83	289
14: Zuid-Holland	14-2-1	1/10.000	84	97
14: Zuid-Holland	14-3-1	1/10.000	84	84
14: Zuid-Holland	14-3-2	1/10.000	70	70
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-1	1/2000	14	35
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-2	1/2000	21	39
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-3	1/2000	29	32
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-4	1/2000	32	39
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-1	1/2000	15	43
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-2	1/2000	29	45
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-3	1/2000	35	45
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-4	1/2000	33	43
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-5	1/2000	16	42
17: IJsselmonde	17-1-1	1/4000	52	55
17: IJsselmonde	17-1-2	1/4000	43	43
17: IJsselmonde	17-1-3	1/4000	46	53
18: Pernis	18-1-1	1/10.000	75	85
19: Rozenburg	19-1-1	1/10.000	85	93

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
19: Rozenburg	19-1-2	1/10.000	105	117
20: Voorne-Putten	20-1-1	1/4000	44	44
20: Voorne-Putten	20-1-2	1/4000	76	82
20: Voorne-Putten	20-2-1	1/4000	43	45
20: Voorne-Putten	20-2-2	1/4000	44	44
20: Voorne-Putten	20-2-3	1/4000	70	82
20: Voorne-Putten	20-3-1	1/4000	44	44
20: Voorne-Putten	20-3-2	1/4000	50	60

Tabel F.3Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel III (geel = schatting).

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
20: Voorne-Putten	20-3-3	1/4000	62	80
21: Hoekse Waard	21-1-1	1/2000	42	49
21: Hoekse Waard	21-1-2	1/2000	43	43
21: Hoekse Waard	21-1-3	1/2000	42	42
21: Hoekse Waard	21-1-4	1/2000	38	38
21: Hoekse Waard	21-1-5	1/2000	40	51
22: Eiland van Dordrecht	22-1-1	1/2000	41	44
22: Eiland van Dordrecht	22-1-2	1/2000	42	49
22: Eiland van Dordrecht	22-1-3	1/2000	42	47
22: Eiland van Dordrecht	22-1-4	1/2000	40	56
24: Land van Althena	24-1-1	1/2000	14	35
24: Land van Althena	24-1-2	1/2000	26	35
24: Land van Althena	24-1-3	1/2000	42	61
25: Goeree-Overflakkee	25-1-1	1/4000	70	100
25: Goeree-Overflakkee	25-1-2	1/4000	69	219
25: Goeree-Overflakkee	25-2-1	1/4000	44	44
25: Goeree-Overflakkee	25-2-2	1/4000	44	49
26: Schouwen Duivenland	26-1-1	1/4000	14	35
26: Schouwen Duivenland	26-1-2	1/4000	60	90
26: Schouwen Duivenland	26-2-1	1/4000	16	35
27: Tholen en St. Philipsland	27-1-1	1/4000	16	34
27: Tholen en St. Philipsland	27-1-2	1/4000	18	38
28: Noord-Beveland	28-1-1	1/4000	19	36
29: Walcheren	29-1-1	1/4000	49	124
29: Walcheren	29-1-2	1/4000	49	86
29: Walcheren	29-2-1	1/4000	54	89
30: Zuid-Beveland	30-1-1	1/4000	60	106
30: Zuid-Beveland	30-1-2	1/4000	63	87
30: Zuid-Beveland	30-1-3	1/4000	22	44
30: Zuid-Beveland	30-1-4	1/4000	24	30
31: Zuid-Beveland	31-1-1	1/4000	69	128
31: Zuid-Beveland	31-1-2	1/4000	24	60
31: Zuid-Beveland	31-1-3	1/4000	24	30

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-1	1/4000	58	108
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-2	1/4000	53	114
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-3	1/4000	53	117
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-4	1/4000	52	119
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-5	1/4000	51	126
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-6	1/4000	50	122
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-7	1/4000	50	91
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-2-1	1/4000	64	128

Tabel F.4Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel IV (geel = schatting).

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-2-2	1/4000	70	128
34: West-Brabant	34-1-1	1/2000	43	61
34: West-Brabant	34-1-2	1/2000	43	63
34: West-Brabant	34-1-3	1/2000	42	42
34a: Geertruidenberg	34a-1-1	1/2000	42	73
34a: Geertruidenberg	34a-1-2	1/2000	42	42
35: Donge	35-1-1	1/2000	28	61
35: Donge	35-1-2	1/2000	42	42
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-1	1/1250	46	50
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-2	1/1250	46	53
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-3	1/1250	49	56
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-4	1/1250	47	50
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-5	1/1250	45	51
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-6	1/1250	46	46
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-7	1/1250	45	51
36a: Keent	36a-1-1	1/1250	46	50
37: Nederhemert	37-1-1	1/1250	45	54
38: Bommelerwaard	38-1-1	1/1250	32	56
38: Bommelerwaard	38-2-1	1/1250	45	54
38: Bommelerwaard	38-2-2	1/1250	48	57
38: Bommelerwaard	38-2-3	1/1250	49	58
38: Bommelerwaard	38-2-4	1/1250	49	55
39: Alem	39-1-1	1/1250	48	48
40: Heerewaarden	40-1-1	1/500	58	58
40: Heerewaarden	40-2-1	1/500	9	45
41: Land van Maas en Waal	41-1-1	1/1250	34	58
41: Land van Maas en Waal	41-2-1	1/1250	44	51
41: Land van Maas en Waal	41-2-2	1/1250	48	53
42: Ooij en Millingen	42-1-1	1/1250	32	59
42: Ooij en Millingen	42-1-2	1/1250	34	59
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-1	1/1250	11	39
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-2	1/1250	12	38
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-3	1/1250	11	35

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-4	1/1250	11	34
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-5	1/1250	12	30
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-6	1/1250	18	41
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-7	1/1250	35	55
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-8	1/1250	34	60
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-9	1/1250	34	58
44: Kromme Rijn	44-1-1	1/1250	12	36
44: Kromme Rijn	44-2-1	1/1250	21	35

Tabel F.5Resultaten decimeringshoogtes basisvariant – deel V (geel = schatting).

Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
44: Kromme Rijn	44-2-2	1/1250	20	23
44: Kromme Rijn	44-2-3	1/1250	28	55
45: Gelderse Vallei	45-1-1	1/1250	12	37
45: Gelderse Vallei	45-2-1	1/1250	48	79
45: Gelderse Vallei	45-2-2	1/1250	15	24
45: Gelderse Vallei	45-2-3	1/1250	14	18
46: Eempolder	46-1-1	1/1250	36	56
46: Eempolder	46-1-2	1/1250	14	17
47: Arnhemse- en Velpsebroek	47-1-1	1/1250	20	29
47: Arnhemse- en Velpsebroek	47-1-2	1/1250	11	37
48: Rijn en IJssel	48-1-1	1/1250	29	53
48: Rijn en IJssel	48-1-2	1/1250	25	59
48: Rijn en IJssel	48-1-3	1/1250	20	50
48: Rijn en IJssel	48-2-1	1/1250	18	44
48: Rijn en IJssel	48-2-2	1/1250	26	37
48: Rijn en IJssel	48-2-3	1/1250	25	42
49: IJsselland	49-1-1	1/1250	25	42
49: IJsselland	49-1-2	1/1250	25	42
50: Zutphen	50-1-1	1/1250	24	49
50: Zutphen	50-1-2	1/1250	25	40
50: Zutphen	50-1-3	1/1250	17	31
51: Gorssel	51-1-1	1/1250	17	29
51: Gorssel	51-1-2	1/1250	29	34
51: Gorssel	51-1-3	1/1250	29	34
52: Oost-Veluwe	52-1-1	1/1250	27	43
52: Oost-Veluwe	52-1-2	1/1250	27	40
53: Salland	53-1-1	1/1250	32	52
53: Salland	53-1-2	1/1250	28	47
53: Salland	53-1-3	1/1250	26	40
53: Salland	53-1-4	1/1250	29	48
53: Salland	53-1-5	1/1250	31	48
53: Salland	53-1-6	1/1250	31	34
65: Limburgse Maas	65-1-1	1/250	59	59

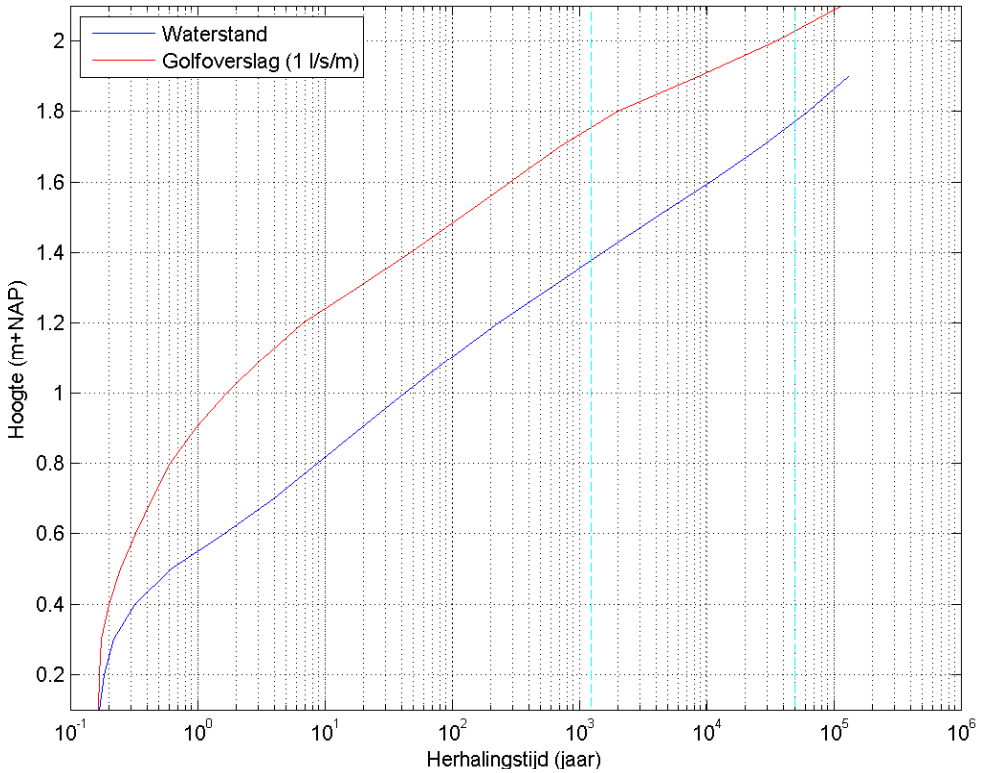
Dijkring	Traject	P(0) dijkring	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)
65: Limburgse Maas	65-1-2	1/250	58	61
68: Limburgse Maas	68dgr-1-1	1/250	63	71
68: Limburgse Maas	68dgr-1-2	1/250	64	72
68: Limburgse Maas	68dgr-1-3	1/250	65	65
68: Limburgse Maas	68dgr-1-4	1/250	68	69
68: Limburgse Maas	68rvg-1-1	1/250	80	81
86: Limburgse Maas	86-1-1	1/250	68	68
87: Limburgse Maas	87-1-1	1/250	64	64

G Toelichting decimeringshoogtes

Er zijn situaties waarin de berekende decimeringshoogte voor de kruinhoogte lager is dan die voor de waterstand. Voor de berekening van de parameter α is in dergelijke gevallen een correctie uitgevoerd, waarbij de decimeringshoogtes aan elkaar gelijk zijn verondersteld.
Uit een nadere analyse van de resultaten is gebleken dat er (minstens) twee oorzaken zijn waardoor dit fenomeen optreedt. Deze worden in deze bijlage besproken.

Oorzaak 1: profiel met (brede) berm

Een eerste oorzaak die is geconstateerd doet zich onder andere voor op traject 7-1-3 langs het Zwarte Meer. Deze locaties zijn voorzien van een dwarsprofiel met een 10 meter brede berm rond 1,80 m+NAP. Deze berm is zo breed, dat de golven vrijwel volledig worden uitgedempt. Hierdoor geldt dat voor een hydraulisch belastingniveau op of boven de berm de overschrijdingsfrequentie voor golfoverslag de overschrijdingsfrequentie van de waterstand benadert.
Het hierboven beschreven fenomeen is zichtbaar in Figuur G.1. Daarin zijn de volledige frequentielijnen weergegeven zoals berekend door Hydra-VIJ voor een locatie op traject 7-1-3. Zoals te zien in de figuur buigt de frequentielijn voor de kruinhoogte vanaf een zekere hoogte af richting de frequentielijn voor de waterstand. Dit gebeurt precies op het bereik van de gebruikte terugkeertijden binnen WV21 (aangegeven door verticale onderbroken lijnen).

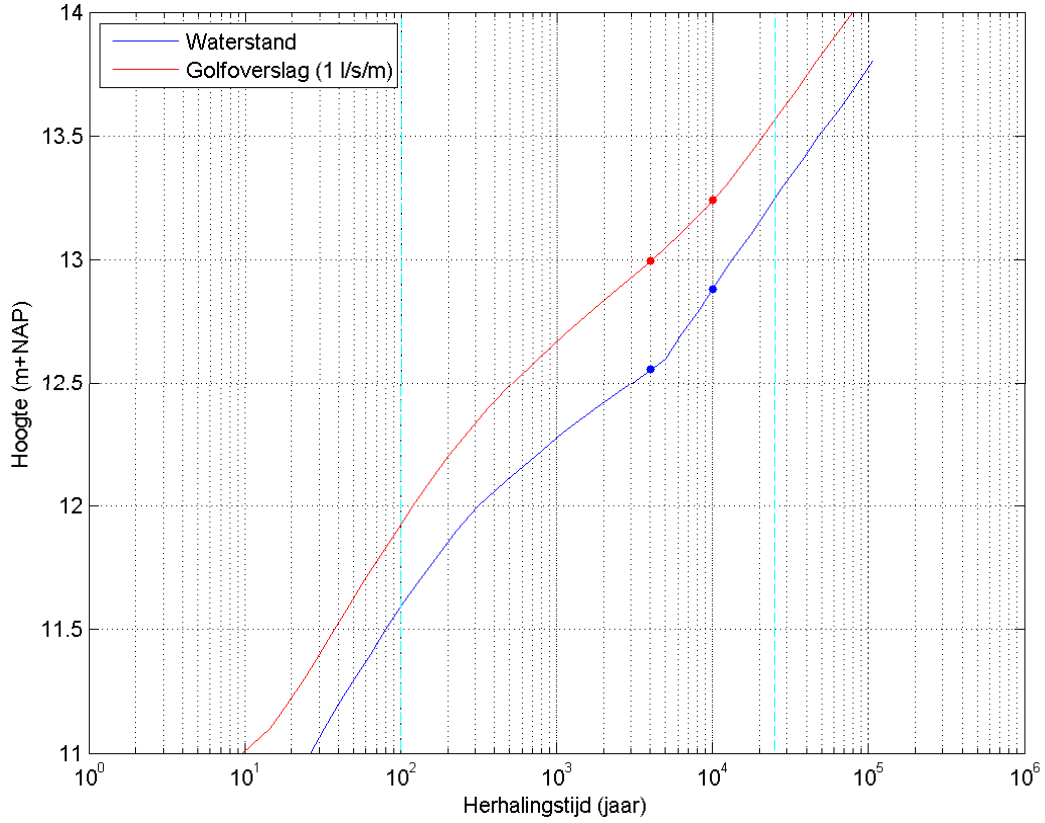


Figuur G.1 Frequentielijnen waterstand en golfoverslag voor een locatie langs traject 7-1-3.

Oorzaak 2: knik in QH-relatie

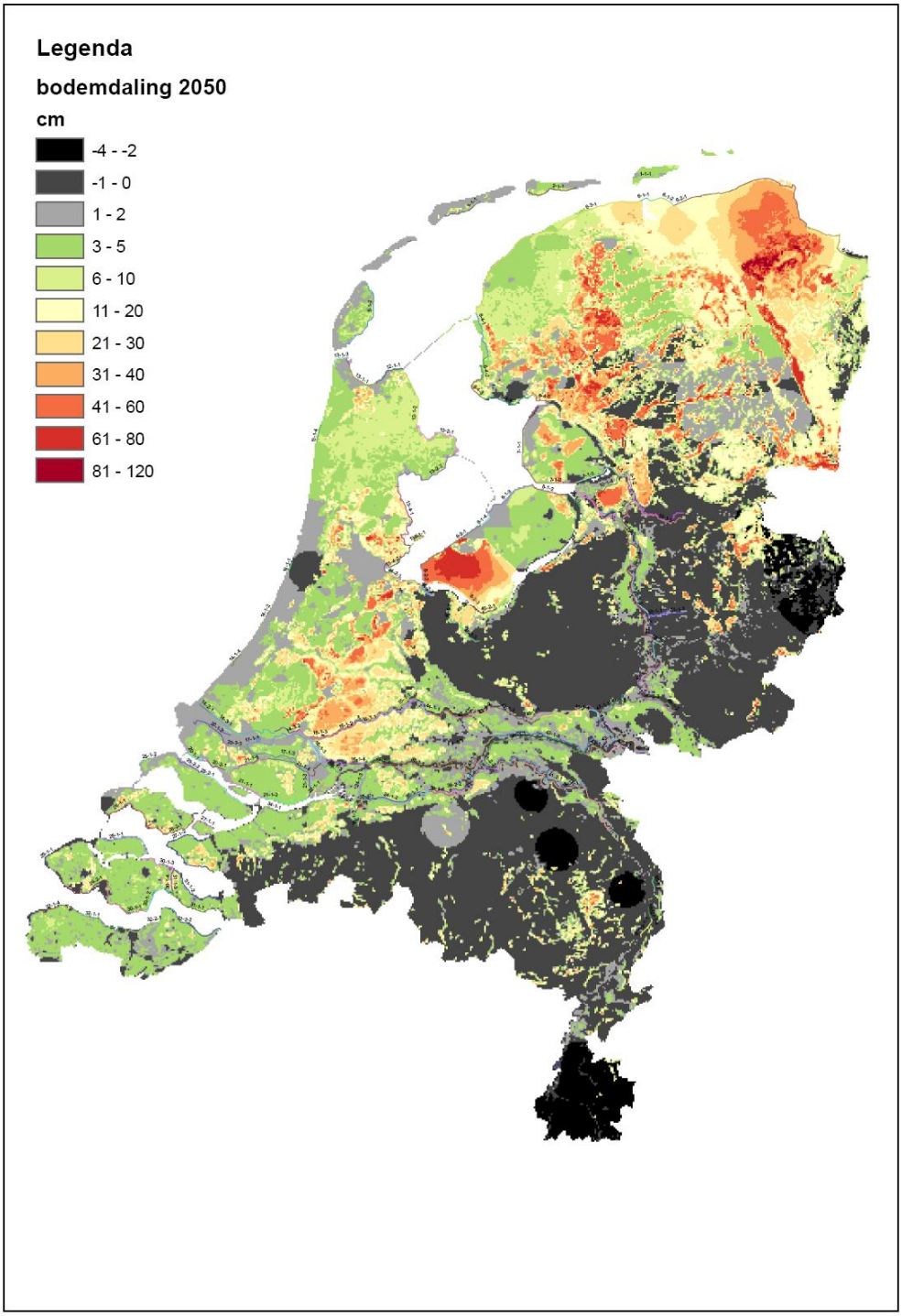
Een andere oorzaak doet zich onder andere voor op traject 41-2-1 langs de Maas. De waterstand is hier volledig afvoergedomineerd, dat wil zeggen: windrichting, windsnelheid en zeewaterstand hebben allemaal geen invloed op de lokale waterstand.

In de QH-relatie zit echter een knik, die goed terug te zien is in de waterstandsfrequentielijn (zie Figuur G.2). In de frequentielijn voor de kruinhoogte wordt deze knik enigszins glad getrokken, aangezien het faalmechanisme nu niet meer volledig afvoergedomineerd is.
In de figuur geven de punten op de frequentielijnen de waarden aan op basis waarvan de decimeringshoogtes zijn bepaald. Zoals te zien, is de scherpte van de knik hier bepalend voor de uiteindelijke decimeringshoogte.



Figuur G.2 Frequentielijnen waterstand en golfoverslag voor een locatie langs traject 41-2-1.

H Waterstandstijging en bodemdaling



Figuur H.1: Verwachte bodemdaling in Nederland tot het jaar 2050 (bron: Haasnoot et al., 1999).

Navolgende tabellen geven de resultaten voor de relatieve waterstandstijging per traject. Deze parameter η is de som van de waterstandstijging en de bodemdaling.

De definitieve waarden (voorlaatste kolom) wijken iets af van de waarden zoals gebruikt in de berekening met OptimaliseRing (laatste kolom). De reden hiervoor is een kleine aanpassing aan de waarden voor de zeespiegelstijging en de meerpeilstijging. De afwijkingen in η zijn dermate klein, dat besloten is geen nieuwe berekening te maken met OptimaliseRing.

Tabel H.1 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel I (geel = schatting).

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
01: Schiermonnikoog	1-1-1	0,86	0,07	0,93	0,95
02: Ameland	2-1-1	0,86	0,07	0,93	0,95
03: Terschelling	3-1-1	0,86	0,07	0,93	0,95
04: Vlieland	4-1-1	0,86	0,03	0,89	0,92
05: Texel	5-1-1	0,86	0,07	0,93	0,95
05: Texel	5-1-2	0,86	0,07	0,93	0,95
06: Friesland en Groningen	6-1-1	0,86	0,33	1,19	1,22
06: Friesland en Groningen	6-1-2	0,86	0,33	1,19	1,22
06: Friesland en Groningen	6-2-1	0,86	0,50	1,36	1,38
06: Friesland en Groningen	6-2-2	0,86	0,17	1,03	1,05
06: Friesland en Groningen	6-3-1	0,86	0,08	0,94	0,97
06: Friesland en Groningen	6-4-1	0,72	0,17	0,89	0,87
06: Friesland en Groningen	6-4-2	0,72	0,17	0,89	0,87
06: Friesland en Groningen	6-4-3	0,72	0,33	1,05	1,04
06: Friesland en Groningen	6-4-4	0,72	0,00	0,72	0,71
06: Friesland en Groningen	6-4-5	0,72	0,33	1,05	1,04
07: Noordoostpolder	7-1-1	0,72	0,03	0,75	0,74
07: Noordoostpolder	7-1-2	0,72	0,17	0,89	0,87
07: Noordoostpolder	7-1-3	0,57	0,17	0,74	0,74
08: Flevoland	8-1-1	0,72	0,00	0,72	0,71
08: Flevoland	8-1-2	0,72	0,17	0,89	0,87
08: Flevoland	8-1-3	0,72	0,03	0,75	0,74
08: Flevoland	8-1-4	0,00	0,17	0,17	0,17
08: Flevoland	8-2-1	0,00	0,50	0,50	0,50
08: Flevoland	8-2-2	0,00	0,83	0,83	0,83
08: Flevoland	8-2-3	0,00	0,50	0,50	0,50
09: Vollenhove	9-1-1	0,53	0,50	1,03	1,03
09: Vollenhove	9-1-2	0,57	0,33	0,90	0,90
10: Mastenbroek	10-1-1	0,65	0,33	0,98	0,98
10: Mastenbroek	10-1-2	0,68	0,33	1,01	1,01

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
10: Mastenbroek	10-1-3	0,57	0,00	0,57	0,57
10: Mastenbroek	10-1-4	0,54	0,33	0,87	0,87
11: IJsseldelta	11-1-1	0,72	0,08	0,80	0,79
11: IJsseldelta	11-1-2	0,58	0,08	0,66	0,66
11: IJsseldelta	11-1-3	0,68	0,08	0,76	0,76
12: Wieringen	12-1-1	0,86	0,17	1,03	1,05
12: Wieringen	12-1-2	0,72	0,17	0,89	0,87
13: Noord Holland	13-1-1	0,86	0,00	0,86	0,88

Tabel H.2 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel II (geel = schatting).

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
13: Noord Holland	13-1-2	0,86	0,00	0,86	0,88
13: Noord Holland	13-1-3	0,86	0,00	0,86	0,88
13: Noord Holland	13-1-4	0,86	0,08	0,94	0,97
13: Noord Holland	13-2-1	0,72	0,17	0,89	0,87
13: Noord Holland	13-2-2	0,00	0,17	0,17	0,17
13: Noord Holland	13-4-1	0,00	0,42	0,42	0,42
13: Noord Holland	13-4-2	0,00	0,42	0,42	0,42
13a: IJburg	13a-1-1	0,00	0,08	0,08	0,08
13a: IJburg	13a-1-2	0,00	0,08	0,08	0,08
13a: IJburg	13a-1-3	0,00	0,08	0,08	0,08
13a: IJburg	13a-1-4	0,00	0,08	0,08	0,08
13b: Marken	13b-1-1	0,00	0,08	0,08	0,08
14: Zuid-Holland	14-1-1	0,86	0,00	0,86	0,88
14: Zuid-Holland	14-1-2	0,86	0,00	0,86	0,88
14: Zuid-Holland	14-1-3	0,86	0,00	0,86	0,88
14: Zuid-Holland	14-1-4	0,86	0,00	0,86	0,88
14: Zuid-Holland	14-2-1	0,97	0,00	0,97	0,97
14: Zuid-Holland	14-3-1	1,00	0,00	1,00	1,00
14: Zuid-Holland	14-3-2	0,92	0,08	1,00	1,00
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-1	0,75	0,08	0,83	0,83
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-2	0,89	0,33	1,22	1,22
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-3	0,83	0,33	1,16	1,16
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1-4	0,58	0,17	0,75	0,75
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-1	0,76	0,33	1,09	1,09
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-2	0,83	0,33	1,16	1,16
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-3	0,73	0,33	1,06	1,06
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-4	0,82	0,25	1,07	1,07
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1-5	0,63	0,25	0,88	0,88
17: IJsselmonde	17-1-1	0,80	0,03	0,83	0,83
17: IJsselmonde	17-1-2	0,86	0,03	0,89	0,89
17: IJsselmonde	17-1-3	0,91	0,08	0,99	0,99
18: Pernis	18-1-1	0,99	0,00	0,99	0,99
19: Rozenburg	19-1-1	1,00	0,00	1,00	1,00

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
19: Rozenburg	19-1-2	1,01	0,00	1,01	1,01
20: Voorne-Putten	20-1-1	0,95	0,08	1,03	1,03
20: Voorne-Putten	20-1-2	0,96	0,00	0,96	0,96
20: Voorne-Putten	20-2-1	0,94	0,08	1,02	1,02
20: Voorne-Putten	20-2-2	0,97	0,17	1,14	1,14
20: Voorne-Putten	20-2-3	0,86	0,33	1,19	1,19
20: Voorne-Putten	20-3-1	0,96	0,17	1,13	1,13
20: Voorne-Putten	20-3-2	0,86	0,17	1,03	1,05

Tabel H.3 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel III (geel = schatting).

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
20: Voorne-Putten	20-3-3	0,84	0,08	0,92	0,92
21: Hoekse Waard	21-1-1	0,87	0,08	0,95	0,95
21: Hoekse Waard	21-1-2	0,88	0,08	0,96	0,96
21: Hoekse Waard	21-1-3	0,89	0,08	0,97	0,97
21: Hoekse Waard	21-1-4	0,76	0,08	0,84	0,84
21: Hoekse Waard	21-1-5	0,84	0,08	0,92	0,92
22: Eiland van Dordrecht	22-1-1	0,89	0,08	0,97	0,97
22: Eiland van Dordrecht	22-1-2	0,89	0,00	0,89	0,89
22: Eiland van Dordrecht	22-1-3	0,87	0,08	0,95	0,95
22: Eiland van Dordrecht	22-1-4	0,84	0,08	0,92	0,92
24: Land van Althena	24-1-1	0,60	0,08	0,68	0,68
24: Land van Althena	24-1-2	0,85	0,08	0,93	0,93
24: Land van Althena	24-1-3	0,92	0,08	1,00	1,00
25: Goeree-Overflakkee	25-1-1	0,86	0,00	0,86	0,88
25: Goeree-Overflakkee	25-1-2	0,86	0,00	0,86	0,88
25: Goeree-Overflakkee	25-2-1	0,94	0,08	1,02	1,02
25: Goeree-Overflakkee	25-2-2	0,94	0,00	0,94	0,94
26: Schouwen Duivenland	26-1-1	0,86	0,17	1,03	1,05
26: Schouwen Duivenland	26-1-2	0,86	0,08	0,94	0,97
26: Schouwen Duivenland	26-2-1	0,86	0,17	1,03	1,05
27: Tholen en St. Philipsland	27-1-1	0,86	0,08	0,94	0,97
27: Tholen en St. Philipsland	27-1-2	0,86	0,08	0,94	0,97
28: Noord-Beveland	28-1-1	0,86	0,08	0,94	0,97
29: Walcheren	29-1-1	0,86	0,00	0,86	0,88
29: Walcheren	29-1-2	0,86	0,08	0,94	0,97
29: Walcheren	29-2-1	0,86	0,08	0,94	0,97
30: Zuid-Beveland	30-1-1	0,86	0,08	0,94	0,97
30: Zuid-Beveland	30-1-2	0,86	0,08	0,94	0,97
30: Zuid-Beveland	30-1-3	0,86	0,08	0,94	0,97
30: Zuid-Beveland	30-1-4	0,86	0,17	1,03	1,05
31: Zuid-Beveland	31-1-1	0,86	0,17	1,03	1,05
31: Zuid-Beveland	31-1-2	0,86	0,08	0,94	0,97
31: Zuid-Beveland	31-1-3	0,86	0,08	0,94	0,97

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-1	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-2	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-3	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-4	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-5	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-6	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1-7	0,86	0,08	0,94	0,97
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-2-1	0,86	0,00	0,86	0,88

Tabel H.4 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel IV (geel = schatting).

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-2-2	0,86	0,08	0,94	0,97
34: West-Brabant	34-1-1	0,88	0,08	0,96	0,96
34: West-Brabant	34-1-2	0,92	0,08	1,00	1,00
34: West-Brabant	34-1-3	0,90	0,08	0,98	0,98
34a: Geertruidenberg	34a-1-1	0,96	0,08	1,04	1,04
34a: Geertruidenberg	34a-1-2	0,90	0,08	0,98	0,98
35: Donge	35-1-1	0,87	0,08	0,95	0,95
35: Donge	35-1-2	0,90	0,08	0,98	0,98
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-1	0,89	0,00	0,89	0,89
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-2	0,90	0,08	0,98	0,98
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-3	0,95	0,08	1,03	1,03
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-4	0,93	0,08	1,01	1,01
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-5	0,88	0,08	0,96	0,96
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-6	0,89	0,08	0,97	0,97
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1-7	0,88	0,08	0,96	0,96
36a: Keent	36a-1-1	0,90	0,08	0,98	0,98
37: Nederhemert	37-1-1	0,88	0,08	0,96	0,96
38: Bommelerwaard	38-1-1	0,96	0,08	1,04	1,04
38: Bommelerwaard	38-2-1	0,86	0,08	0,94	0,94
38: Bommelerwaard	38-2-2	0,93	0,08	1,01	1,01
38: Bommelerwaard	38-2-3	0,96	0,08	1,04	1,04
38: Bommelerwaard	38-2-4	0,94	0,08	1,02	1,02
39: Alem	39-1-1	0,93	0,08	1,01	1,01
40: Heerewaarden	40-1-1	0,85	0,00	0,85	0,85
40: Heerewaarden	40-2-1	0,73	0,00	0,73	0,73
41: Land van Maas en Waal	41-1-1	1,00	0,00	1,00	1,00
41: Land van Maas en Waal	41-2-1	0,87	0,00	0,87	0,87
41: Land van Maas en Waal	41-2-2	0,94	0,00	0,94	0,94
42: Ooij en Millingen	42-1-1	0,89	0,00	0,89	0,89
42: Ooij en Millingen	42-1-2	1,03	0,00	1,03	1,03
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-1	0,19	0,00	0,19	0,19
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-2	0,19	0,00	0,19	0,19
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-3	0,19	0,00	0,19	0,19

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-4	0,19	0,08	0,27	0,27
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-5	0,21	0,00	0,21	0,21
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-6	0,49	0,00	0,49	0,49
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-7	1,00	0,00	1,00	1,00
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-8	1,00	0,00	1,00	1,00
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1-9	0,98	0,00	0,98	0,98
44: Kromme Rijn	44-1-1	0,19	0,08	0,27	0,27
44: Kromme Rijn	44-2-1	0,00	0,08	0,08	0,08

Tabel H.5 Resultaten waterstandstijging en bodemdaling basisvariant – deel V (geel = schatting).

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
44: Kromme Rijn	44-2-2	0,00	0,08	0,08	0,08
44: Kromme Rijn	44-2-3	0,00	0,00	0,00	0,00
45: Gelderse Vallei	45-1-1	0,20	0,08	0,28	0,28
45: Gelderse Vallei	45-2-1	0,00	0,17	0,17	0,17
45: Gelderse Vallei	45-2-2	0,00	0,17	0,17	0,17
45: Gelderse Vallei	45-2-3	0,00	0,08	0,08	0,08
46: Eempolder	46-1-1	0,00	0,08	0,08	0,08
46: Eempolder	46-1-2	0,00	0,08	0,08	0,08
47: Arnhemse- en Velpsebroek	47-1-1	0,53	0,00	0,53	0,53
47: Arnhemse- en Velpsebroek	47-1-2	0,19	0,00	0,19	0,19
48: Rijn en IJssel	48-1-1	0,85	0,00	0,85	0,85
48: Rijn en IJssel	48-1-2	0,70	0,00	0,70	0,70
48: Rijn en IJssel	48-1-3	0,55	0,00	0,55	0,55
48: Rijn en IJssel	48-2-1	0,50	0,08	0,58	0,58
48: Rijn en IJssel	48-2-2	0,77	0,08	0,85	0,85
48: Rijn en IJssel	48-2-3	0,80	0,08	0,88	0,88
49: IJsselland	49-1-1	0,80	0,00	0,80	0,80
49: IJsselland	49-1-2	0,80	0,00	0,80	0,80
50: Zutphen	50-1-1	0,92	0,00	0,92	0,92
50: Zutphen	50-1-2	0,81	0,00	0,81	0,81
50: Zutphen	50-1-3	0,81	0,00	0,81	0,81
51: Gorssel	51-1-1	0,81	0,00	0,81	0,81
51: Gorssel	51-1-2	0,82	0,00	0,82	0,82
51: Gorssel	51-1-3	0,80	0,00	0,80	0,80
52: Oost-Veluwe	52-1-1	0,75	0,00	0,75	0,75
52: Oost-Veluwe	52-1-2	0,82	0,00	0,82	0,82
53: Salland	53-1-1	0,97	0,08	1,05	1,05
53: Salland	53-1-2	0,81	0,08	0,89	0,89
53: Salland	53-1-3	0,80	0,08	0,88	0,88
53: Salland	53-1-4	0,84	0,08	0,92	0,92
53: Salland	53-1-5	0,91	0,08	0,99	0,99
53: Salland	53-1-6	0,58	0,08	0,66	0,66
65: Limburgse Maas	65-1-1	0,91	0,00	0,91	0,91

Dijkring	Traject	waterstand stijging (cm/jr)	bodem-daling (cm/jr)	η (cm/jr)	η Opt. (cm/jr)
65: Limburgse Maas	65-1-2	0,89	0,00	0,89	0,89
68: Limburgse Maas	68dgr-1-1	0,97	0,00	0,97	0,97
68: Limburgse Maas	68dgr-1-2	0,97	0,00	0,97	0,97
68: Limburgse Maas	68dgr-1-3	1,00	0,00	1,00	1,00
68: Limburgse Maas	68dgr-1-4	1,05	0,00	1,05	1,05
68: Limburgse Maas	68rvg-1-1	1,20	0,00	1,20	1,20
86: Limburgse Maas	86-1-1	0,99	0,00	0,99	0,99
87: Limburgse Maas	87-1-1	0,94	0,00	0,94	0,94

I Dijkringdeelfactoren

Tabel I.1 Overzicht van de dijkring- en dijkringdeelfactoren – deel I.

Dijkring	Dijkringdeel	Factor dijkring	Factor dijkringdeel
01: Schiermonnikoog	1-1	2	2
02: Ameland	2-1	2	2
03: Terschelling	3-1	2	2
04: Vlieland	4-1	2	2
05: Texel	5-1	2	2
06: Friesland en Groningen	6-1	10	2
06: Friesland en Groningen	6-2	10	2
06: Friesland en Groningen	6-3	10	2
06: Friesland en Groningen	6-4	10	5
07: Noordoostpolder	7-1	5	5
08: Flevoland	8-1	5	2
08: Flevoland	8-2	5	2
09: Vollenhove	9-1	2	2
10: Mastenbroek	10-1	5	5
11: IJsseldelta	11-1	5	5
12: Wieringen	12-1	2	2
13: Noord Holland	13-1	10	2
13: Noord Holland	13-2	10	5
13: Noord Holland	13-4	10	5
13a: IJburg	13a-1	2	2
13b: Marken	13b-1	2	2
14: Zuid-Holland	14-1	10	2
14: Zuid-Holland	14-2	10	2
14: Zuid-Holland	14-3	10	5
15: Lopiker- en Krimpenerwaard	15-1	5	5
16: Alblasserwaard en Vijfherenlanden	16-1	10	10
17: IJsselmonde	17-1	5	5
18: Pernis	18-1	2	2
19: Rozenburg	19-1	2	2
20: Voorne-Putten	20-1	10	2

Dijkring	Dijkringdeel	Factor dijkring	Factor dijkringdeel
20: Voorne-Putten	20-2	10	5
20: Voorne-Putten	20-3	10	5
21: Hoekse Waard	21-1	5	5
22: Eiland van Dordrecht	22-1	5	5
24: Land van Althena	24-1	10	10
25: Goeree-Overflakkee	25-1	5	2
25: Goeree-Overflakkee	25-2	5	2
26: Schouwen Duivenland	26-1	2	2

Tabel I.2 Overzicht van de dijkring- en dijkringdeelfactoren – deel II.

Dijkring	Dijkringdeel	Factor dijkring	Factor dijkringdeel
26: Schouwen Duivenland	26-2	2	2
27: Tholen en St. Philipsland	27-1	2	2
28: Noord-Beveland	28-1	2	2
29: Walcheren	29-1	5	2
29: Walcheren	29-2	5	2
30: Zuid-Beveland	30-1	2	2
31: Zuid-Beveland	31-1	2	2
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-1	5	2
32: Zeeuwsch Vlaanderen	32-2	5	2
34: West-Brabant	34-1	5	5
34a: Geertruidenberg	34a-1	2	2
35: Donge	35-1	2	2
36: Land van Heusden/De Maaskant	36-1	5	5
36a: Keent	36a-1	2	2
37: Nederhemert	37-1	2	2
38: Bommelerwaard	38-1	5	2
38: Bommelerwaard	38-2	5	2
39: Alem	39-1	2	2
40: Heerewaarden	40-1	2	2
40: Heerewaarden	40-2	2	2
41: Land van Maas en Waal	41-1	5	5
41: Land van Maas en Waal	41-2	5	2
42: Ooij en Millingen	42-1	2	2
43: Betuwe/Tieler- en Culemborgerwaarden	43-1	5	5
44: Kromme Rijn	44-1	5	5
44: Kromme Rijn	44-2	5	2
45: Gelderse Vallei	45-1	5	2
45: Gelderse Vallei	45-2	5	2
46: Eempolder	46-1	2	2
47: Arnhemse- en Velpsebroek	47-1	2	2
48: Rijn en IJssel	48-1	5	2
48: Rijn en IJssel	48-2	5	5
49: IJsselland	49-1	2	2

Dijkring	Dijkringdeel	Factor dijkring	Factor dijkringdeel
50: Zutphen	50-1	2	2
51: Gorssel	51-1	2	2
52: Oost-Veluwe	52-1	2	2
53: Salland	53-1	5	5
65: Limburgse Maas	65-1	2	2
68: Limburgse Maas	68-1	2	2
86: Limburgse Maas	86-1	2	2
87: Limburgse Maas	87-1	2	2

J Tabellen met en zonder aftoppen

Opmerking: in de situatie zonder aftoppen geldt voor veel locaties dat de decimeringshoogte van de waterstand en de kruinhoogte vrijwel gelijk zijn. In de situatie met aftoppen is dat heel anders, aangezien het effect van aftoppen veel sterker doorwerkt in de waterstandsberekening dan in de kruinhoogteberekening (zie ook de opmerking in paragraaf 5.5).

Tabel J.1 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, VIJ-delta.

Traject	met aftoppen			zonder aftoppen		
	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)
7-1-3	25	25	0,74	25	25	0,74
9-1-1	26	38	1,03	26	38	1,03
9-1-2	30	40	0,90	30	40	0,90
10-1-1	17	56	0,98	70	70	1,28
10-1-2	13	43	1,01	79	79	1,38
10-1-3	30	35	0,57	30	35	0,57
10-1-4	26	39	0,87	26	39	0,87
11-1-2	24	42	0,66	65	68	0,90
11-1-3	13	37	0,76	79	79	1,14
53-1-6	31	34	0,66	31	34	0,66

Tabel J.2 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, BER (deel I).

Tabel J.3 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, BER (deel II)

.

Traject	met aftoppen			zonder aftoppen		
	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)
14-2-1	84	97	0,97	84	97	0,98
14-3-1	84	84	1,00	84	84	1,00
14-3-2	70	70	1,00	70	70	1,00
15-1-1	14	35	0,83	80	80	0,83
15-1-2	21	39	1,22	65	68	1,22
15-1-3	29	32	1,16	43	45	1,42
15-1-4	32	39	0,75	32	39	0,75
16-1-1	15	43	1,09	78	78	1,09
16-1-2	29	45	1,16	43	48	1,16
16-1-3	35	45	1,06	35	45	1,07
16-1-4	33	43	1,07	37	44	1,17
16-1-5	16	42	0,88	55	59	1,53
17-1-1	52	55	0,83	52	55	0,83
17-1-2	43	43	0,89	43	43	0,90
17-1-3	46	53	0,99	46	53	0,99
18-1-1	75	85	0,99	75	85	0,99
19-1-1	85	93	1,00	85	93	1,00
19-1-2	105	117	1,01	105	117	1,01

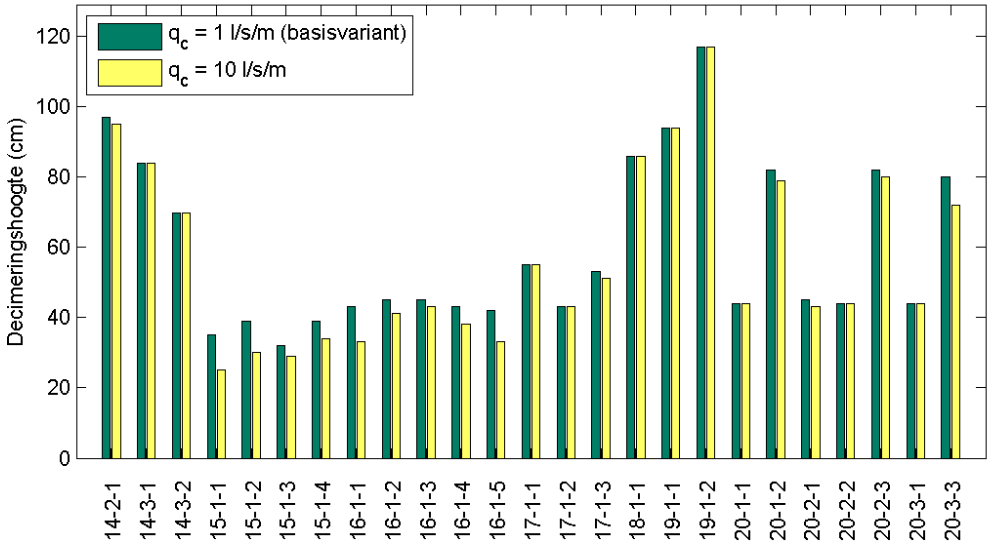
Traject	met aftoppen			zonder aftoppen		
	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)
20-1-1	44	44	1.03	44	44	1.03
20-1-2	76	82	0.96	76	82	0.96
20-2-1	43	45	1.02	43	45	1.02
20-2-2	44	44	1.14	44	44	1.15
20-2-3	70	82	1.19	70	82	1.19
20-3-1	44	44	1.13	44	44	1.13
20-3-3	62	80	0.92	62	80	0.92
21-1-1	42	49	0.95	42	49	0.95
21-1-2	43	43	0.96	42	43	0.97
21-1-3	42	42	0.97	42	42	0.98
21-1-4	38	38	0.84	38	38	0.84
21-1-5	40	51	0.92	40	51	0.92
22-1-1	41	44	0.97	42	45	1.00
22-1-2	42	49	0.89	42	49	0.90
22-1-3	42	47	0.95	42	47	0.96
22-1-4	40	56	0.92	40	56	0.92
24-1-1	14	35	0.68	57	65	1.40
24-1-2	26	35	0.93	53	56	1.39
24-1-3	42	61	1.00	43	61	1.05
25-2-1	44	44	1.02	44	44	1.02
25-2-2	44	49	0.94	44	49	0.95
34-1-1	43	61	0.96	43	61	0.97
34-1-2	43	63	1.00	43	63	1.02
34a-1-1	42	73	1.04	44	73	1.12
35-1-1	28	61	0.95	51	64	1,27

Tabel J.4 Decimeringshoogtes en relatieve waterstandstijging met en zonder aftoppen, BOR.

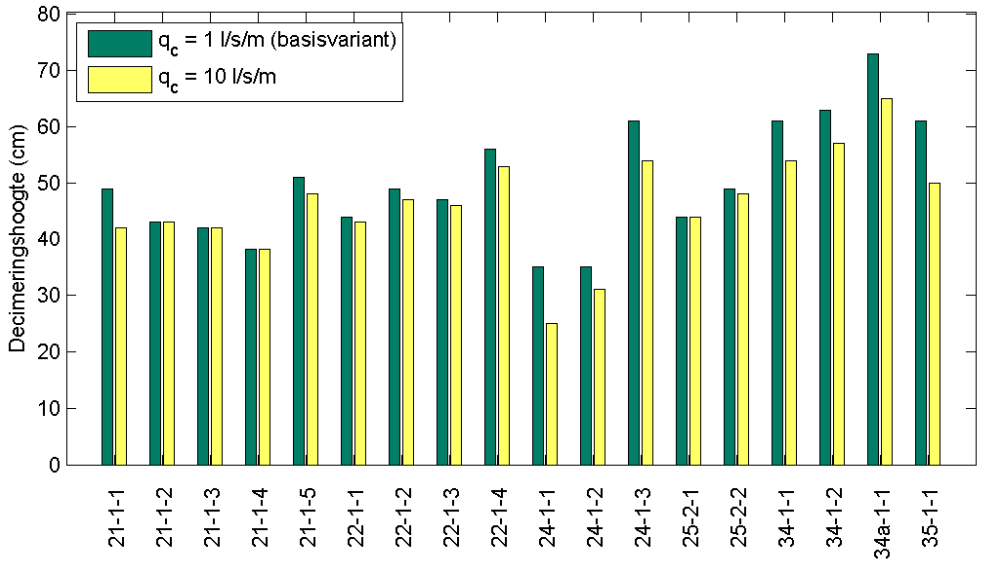
Traject	met aftoppen			zonder aftoppen		
	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)	dh_{10} waterstand (cm)	dh_{10} kruinhoogte (cm)	η (cm/jr)
38-1-1	32	56	1,04	97	97	2,05
40-2-1	9	45	0,73	97	97	2,13
41-1-1	34	58	1,00	101	101	2,13
42-1-1	32	59	0,89	93	93	1,99
42-1-2	34	59	1,03	104	104	2,18
43-1-1	11	39	0,19	11	39	0,19
43-1-2	12	38	0,19	12	38	0,19
43-1-3	11	35	0,19	11	35	0,19
43-1-4	11	34	0,27	11	34	0,27
43-1-5	12	30	0,21	12	30	0,21
43-1-6	18	41	0,49	45	53	0,95
43-1-7	35	55	1,00	102	102	2,17
43-1-8	34	60	1,00	102	102	2,14
43-1-9	34	58	0,98	98	98	2,01
44-1-1	12	36	0,27	12	36	0,27
45-1-1	12	37	0,28	12	37	0,28
47-1-1	20	29	0,53	52	52	1,19
47-1-2	11	37	0,19	11	37	0,19
48-1-1	29	53	0,85	86	87	1,86
48-1-2	25	59	0,70	76	77	1,65
48-1-3	20	50	0,55	52	61	1,11
48-2-1	18	44	0,58	44	52	1,02
48-2-2	26	37	0,85	74	74	1,70
49-1-1	25	42	0,80	79	79	1,74
50-1-1	24	49	0,92	82	82	1,81
50-1-2	25	40	0,81	79	79	1,74
50-1-3	17	31	0,81	73	73	1,66
51-1-1	17	29	0,81	73	73	1,66
51-1-2	29	34	0,82	82	82	1,83
52-1-1	27	43	0,75	76	76	1,67
52-1-2	27	40	0,82	81	81	1,79
53-1-1	32	52	1,05	90	90	2,05
53-1-2	28	47	0,89	85	85	1,94
53-1-3	26	40	0,88	79	79	1,83
53-1-4	29	48	0,92	83	83	1,91
53-1-5	31	48	0,99	92	92	2,09

K Figuren gevoeligheidsanalyse

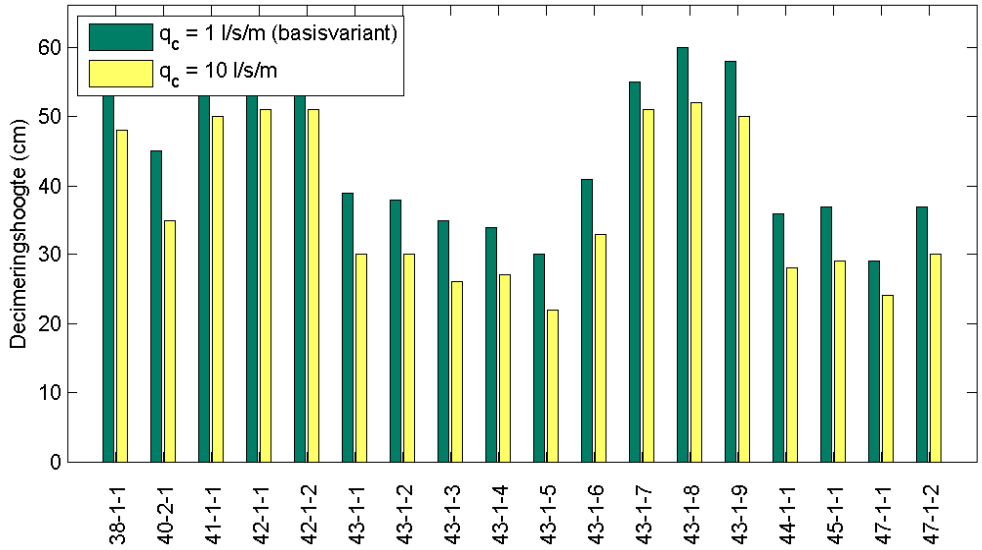
K.1 Kritiek golfoverslagdebiet



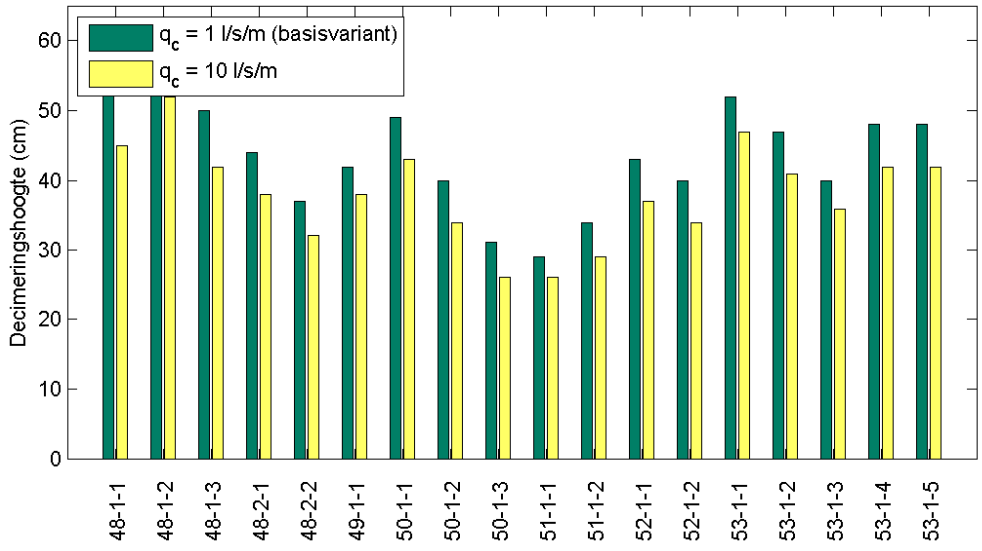
Figuur K.1 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Benedenrivierengebied (deel I).



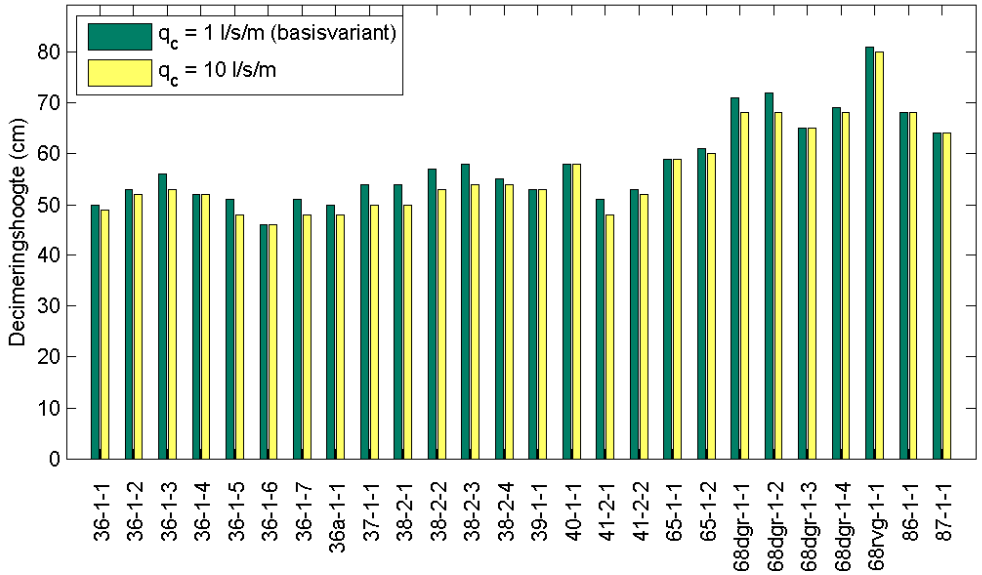
Figuur K.2 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Benedenrivierengebied (deel II).



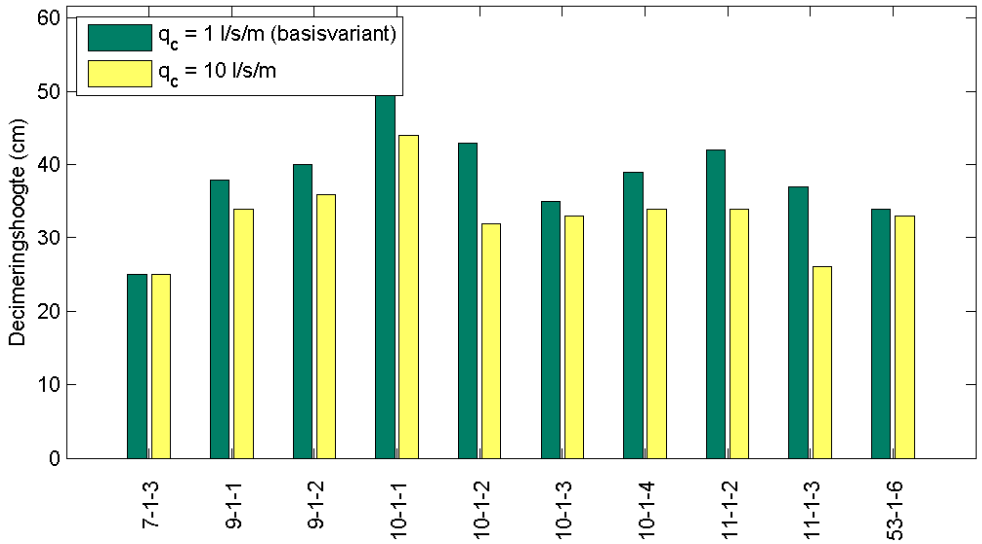
Figuur K.3 *Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Bovenrivierengebied (deel I).*



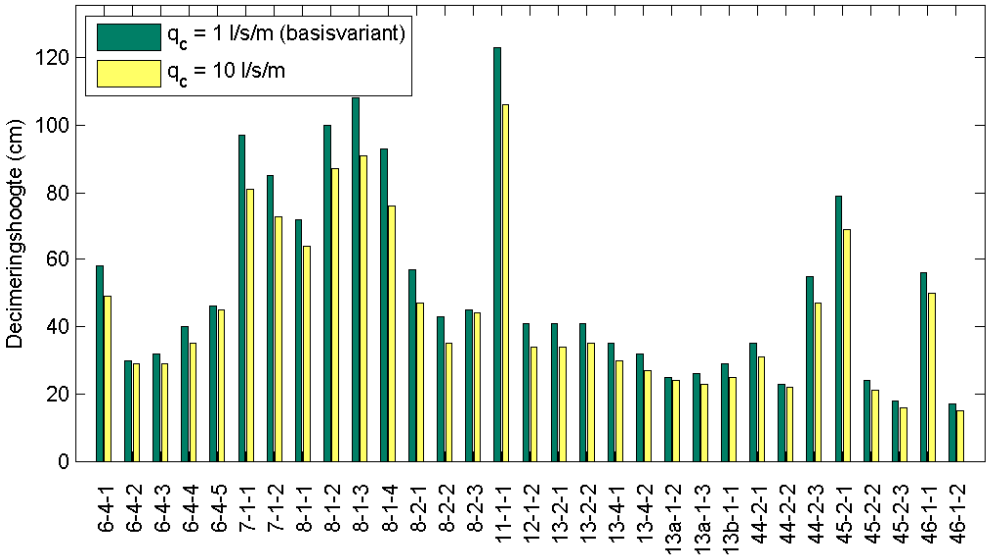
Figuur K.4 *Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Bovenrivierengebied (deel II).*



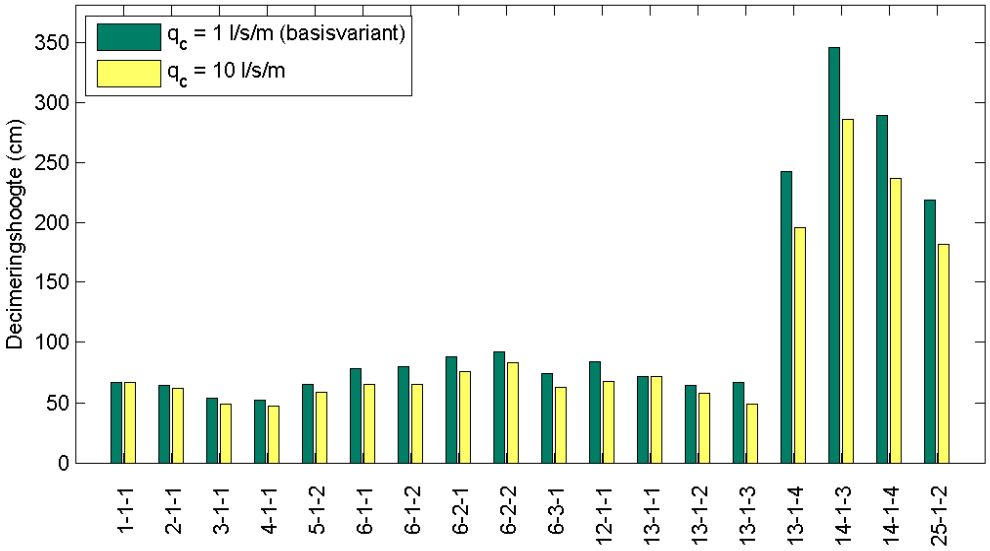
Figuur K.5 *Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, (Limburgse) Maas.*



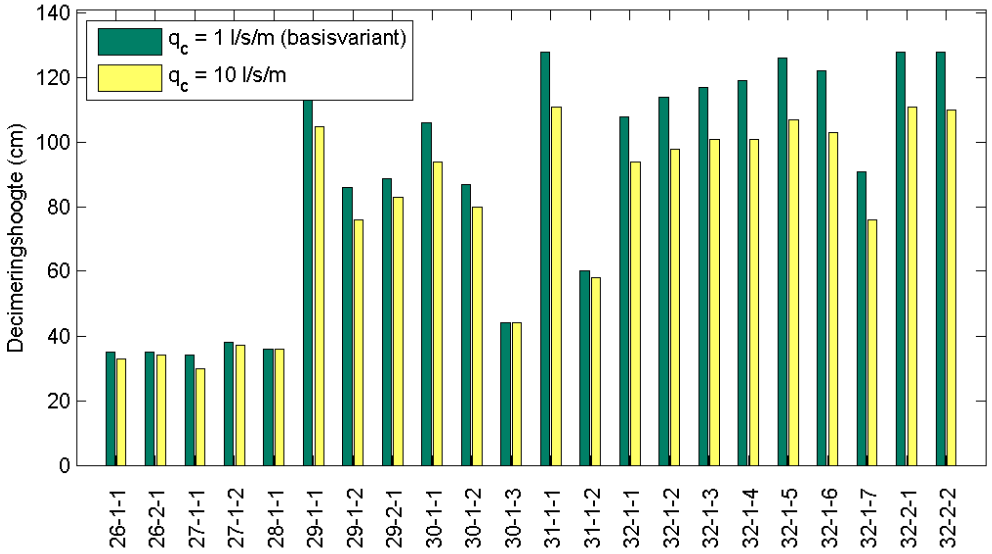
Figuur K.6 *Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, IJssel- en Vechtdelta.*



Figuur K.7 *Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Meren.*

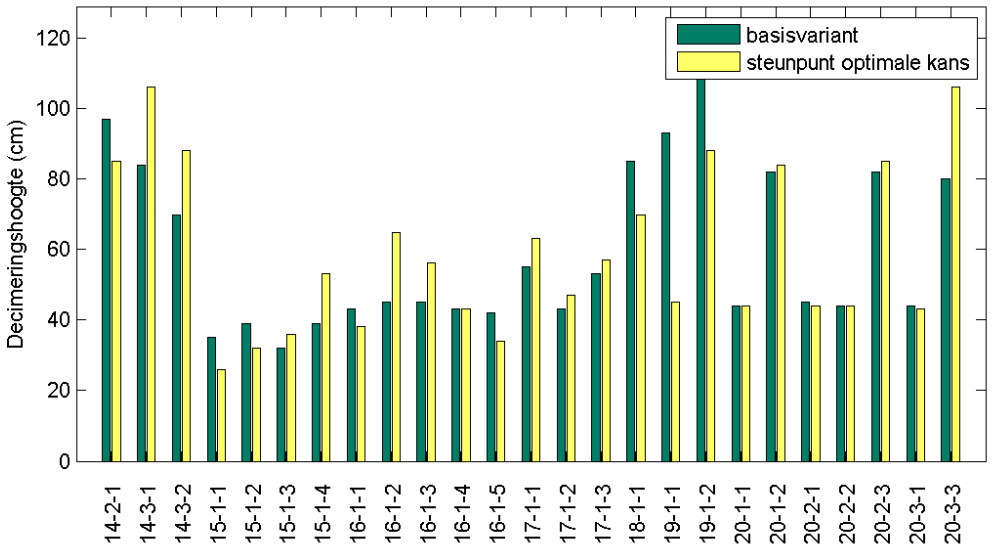


Figuur K.8 *Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Kust (deel I).*

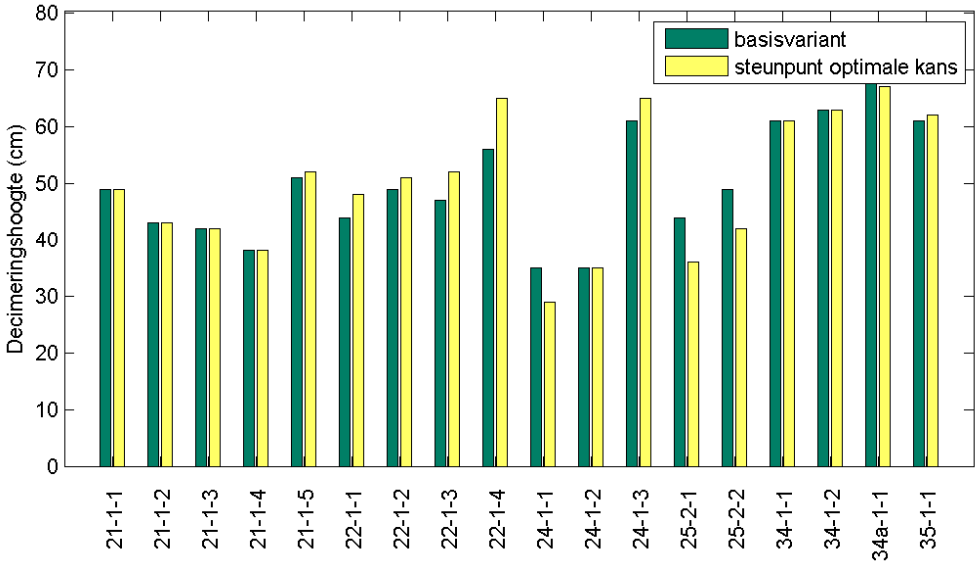


Figuur K.9 Decimeringshoogtes bij verschillend kritiek overslagdebiet, Kust (deel II).

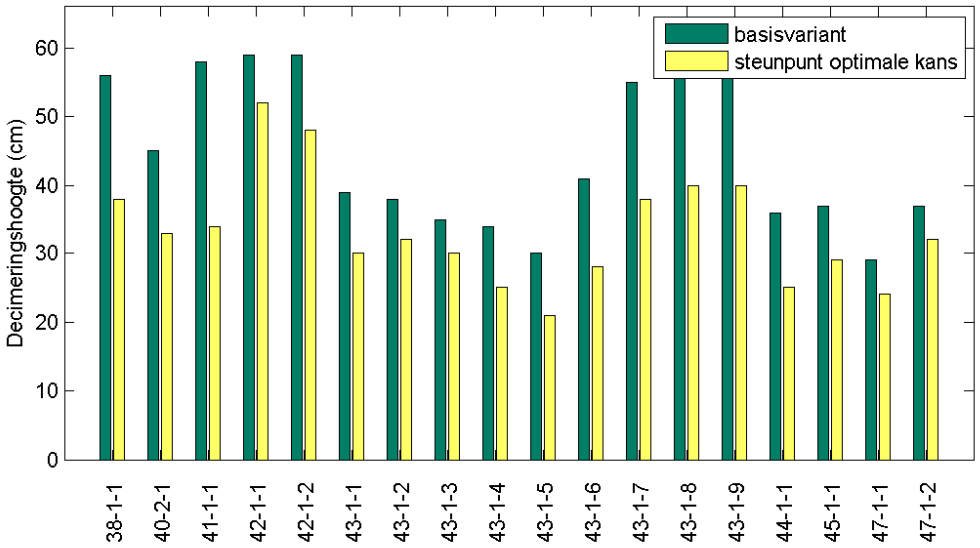
K.2 Methode raaklijnbepaling



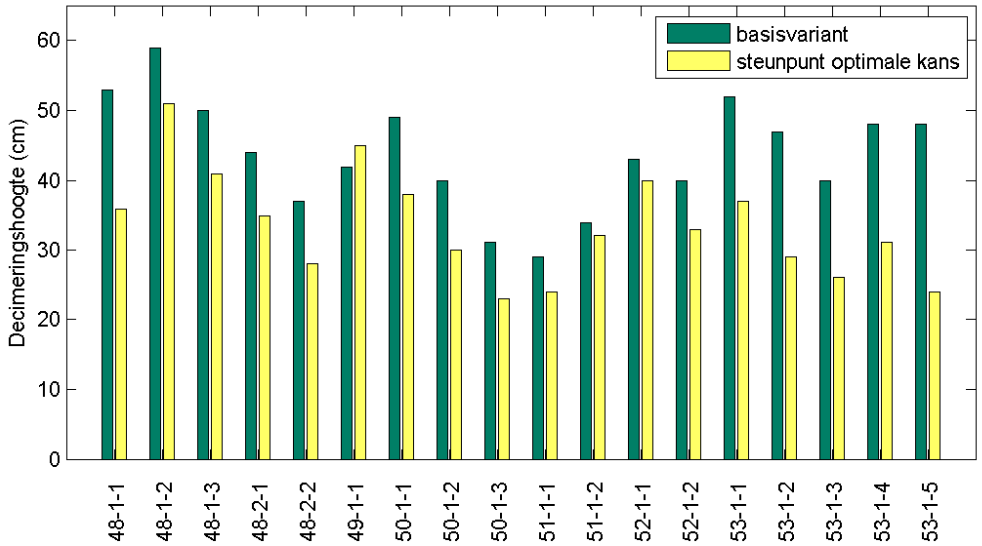
Figuur K.10 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Benedenrivierengebied (deel I).



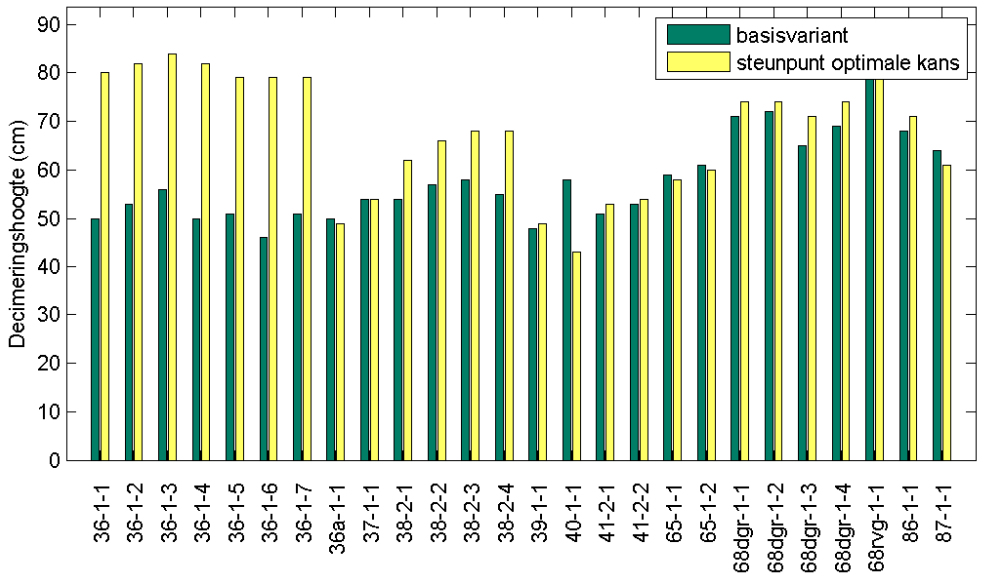
Figuur K.11 *Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Benedenrivierengebied (deel II).*



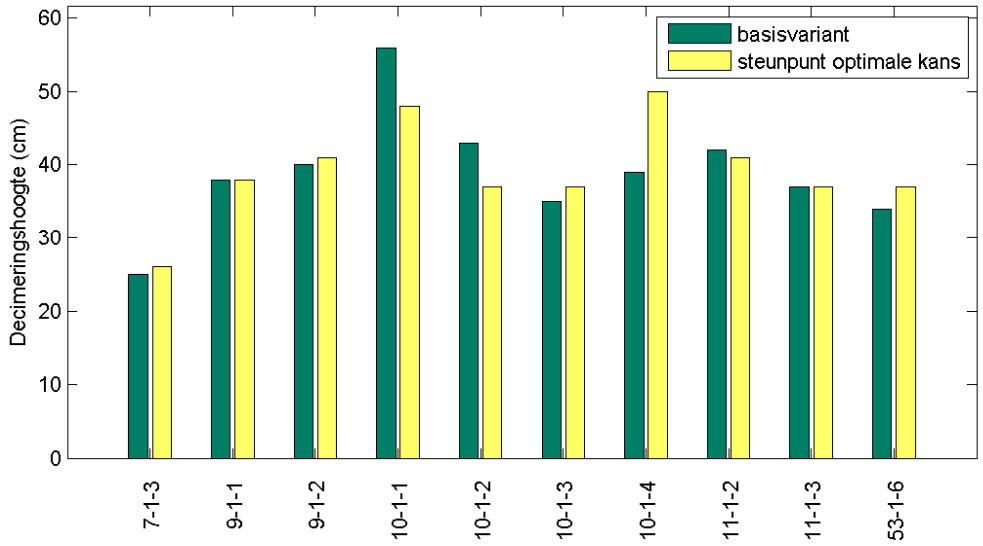
Figuur K.12 *Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Bovenrivierengebied (deel I).*



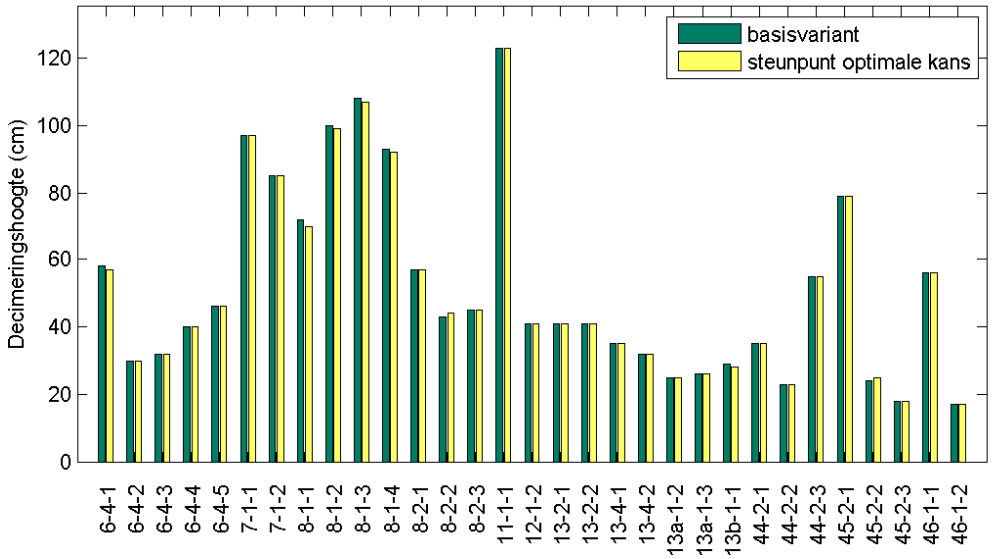
Figuur K.13 *Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Bovenrivierengebied (deel II).*



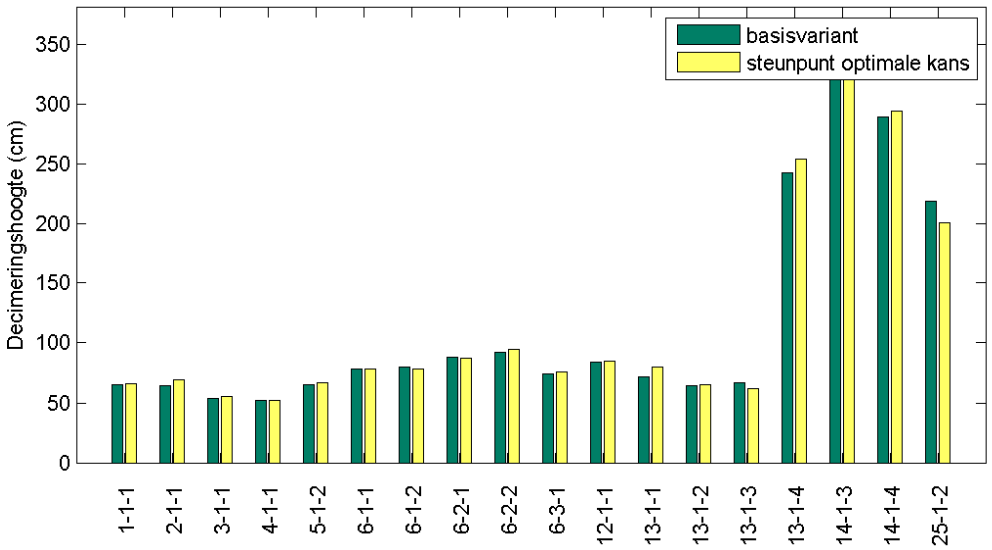
Figuur K.14 *Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling (Limburgse) Maas.*



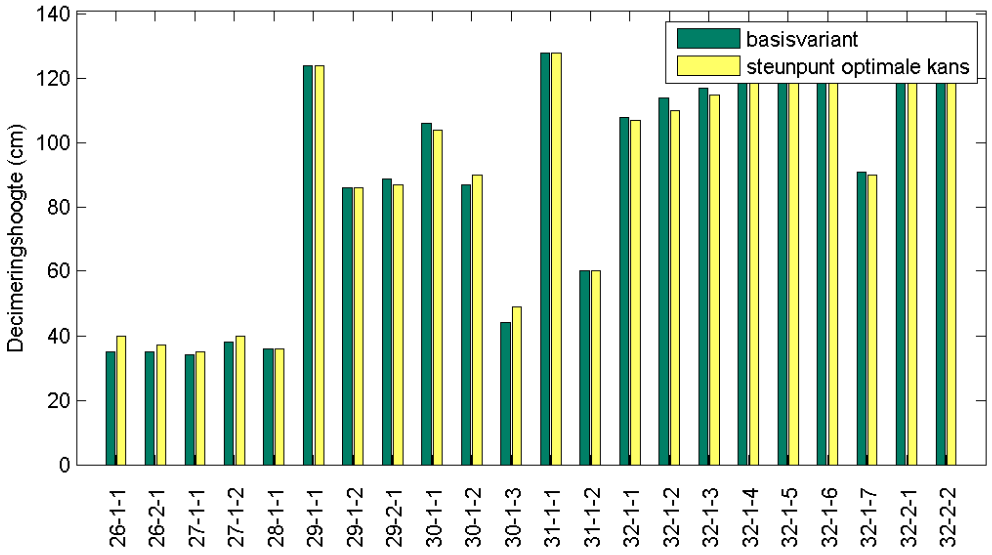
Figuur K.15 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling IJssel- en Vechtdelta.



Figuur K.16 Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Meren.



Figuur K.17 *Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Kust (deel I).*



Figuur K.18 *Decimeringshoogte kruinhoogte gevoeligheid raaklijnbepaling Kust (deel II).*