

Opdrachtgever: **Deltares**

# Faalkansendatabase duinen

Update voor de periode 1965-2017





Opdrachtgever: **Deltares**

# Faalkansendatabase duinen

Update voor de periode 1965-2017



Vincent Vuik  
Guy Dupuits



# Inhoud

<b>Lijst van tabellen .....</b>	<b>iii</b>
<b>Lijst van figuren .....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1 Context .....	1
1.2 Doelstelling .....	1
1.3 Afbakening .....	1
1.4 Leeswijzer .....	1
<b>2 Probabilistisch duinafslagmodel .....</b>	<b>3</b>
2.1 Duinafslagmodel .....	3
2.2 Kansverdelingen voor variabelen .....	5
2.3 Probabilistische benadering .....	7
2.4 Probabilistische rekenmethode .....	8
2.5 JarKus-raaien en profielen .....	9
2.6 Aantal berekeningen en rekestijd .....	10
<b>3 Vergelijking met PC-Ring en Morphan .....</b>	<b>11</b>
3.1 Vergelijking met PC-Ring .....	11
3.2 Vergelijking met Morphan .....	14
<b>4 Analyse van rekenresultaten .....</b>	<b>17</b>
4.1 Convergentie .....	17
4.2 Volumebalans .....	17
4.3 Grenstoestandsfunctie .....	18
4.4 Kwaliteitsoordeel .....	18
4.5 Grootte van faalkansen en trends in faalkansen .....	19
<b>5 Faalkansendatabase .....</b>	<b>21</b>
5.1 Beschrijving database .....	21
5.2 Overzicht faalkansen .....	22
5.3 Overzicht resultaten controles .....	22
<b>6 Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>25</b>
6.1 Conclusies .....	25
6.2 Aanbevelingen .....	25
<b>Referenties .....</b>	<b>27</b>
<b>Bijlage A: Overzicht van meegenomen raaien .....</b>	<b>29</b>
<b>Bijlage B: Overzicht van faalkansen per vak .....</b>	<b>43</b>



## Lijst van tabellen

Tabel 2-1	Parameters van de relatie tussen golfhoogte en waterstand, overgenomen uit Deltares (2017).....	6
Tabel 3-1	Vergelijking van berekende afslagpunten voor een tweetal raaien bepaald met Morphan en de Matlab implementatie beschreven in dit rapport. ....	14
Tabel 5-1	Aantal raai-jaar combinaties met een bepaalde kwaliteit (de rijen, zie paragraaf 4.4) en een bepaalde indicator voor handmatige wijzigingen (de kolommen, zie paragraaf 4.5).....	22
Tabel 5-2	Procentuele aantallen raai-jaar combinaties met een bepaalde kwaliteit (de rijen, zie paragraaf 4.4) en een bepaalde indicator voor handmatige wijzigingen (de kolommen, zie paragraaf 4.5) .....	23
Tabel 5-3	Procentuele aantallen raai-jaar combinaties met een bepaalde kwaliteit (de rijen, zie paragraaf 4.4) en een bepaalde indicator voor handmatige wijzigingen (de kolommen, zie paragraaf 4.5), code 99 (geen data) negerend.....	23

## Lijst van figuren

Figuur 1	DUROS+ afslagprofiel met (R) en zonder (R*) modelfactor. De modelfactor is een onzekerheidstoeslag, en is in deze figuur een toeslag van 25% op het afslagvolume. Overgenomen uit ENW (2007).....	3
Figuur 2	Afslagpunt ( $X_a$ ) en kritiek afslagpunt ( $X_k$ ), waarbij het kritieke afslagpunt is bepaald op basis van een kritiek afslagvolume ( $A_{gp}$ ). De horizontale afstand Z is gedefinieerd als $X_k - X_a$ , waarbij $Z < 0$ betekent dat er sprake is van falen. Overgenomen uit TNO (2007).....	4
Figuur 3	Tabel met parameters van de omni-directionele verdelingsfunctie van de waterstand. Overgenomen uit Rijkswaterstaat (2006).....	5
Figuur 4	Aanpassing van de raairichting voor een deel van de raaien (rood gemarkeerd), ten behoeve van de vertaling van waterstand- en golfrandvoorwaarden van diep water naar de kust.....	7
Figuur 5	Vergelijking faalkansen verkregen met behulp van FORM berekeningen uit PC-Ring en de nieuwe MATLAB implementatie voor raai 7002800.....	11
Figuur 6	Vergelijking faalkansen verkregen met behulp van FORM berekeningen uit PC-Ring en de nieuwe MATLAB implementatie voor raai 7004900.....	12
Figuur 7	Afslagprofiel in het gevonden ontwerppunt voor raai 7002800 in 1995, inclusief toeslag op basis van de modelfactor (de horizontale verschuiving ter hoogte van de waterlijn).....	13
Figuur 8	Afslagprofiel in het gevonden ontwerppunt voor raai 7004900 in 1995, inclusief toeslag op basis van de modelfactor (de horizontale verschuiving ter hoogte van de waterlijn).....	13
Figuur 9	Afslagprofiel volgens Morphan voor raai 7005375 in 2000.....	15
Figuur 10	Afslagpunt volgens de Matlab implementatie van DUROS+ voor raai 7005375 in 2000. ....	15
Figuur 11	Voor raai 7005475 blijft de grenstoestandsfunctie(Z-functie) in 1965 schommelen. Dit in tegenstelling tot 1966, waar de grenstoestandsfunctie duidelijk convergeert.....	17
Figuur 12	Voorbeeld van een incorrecte volumebalans (1977) en een correcte volumebalans (1978) voor raai 7001844 voor de met FORM gevonden afslagprofielen in het ontwerppunt. ....	18
Figuur 13	Voor raai 17001363 zijn een aantal faalkansen die significant afwijken vervangen door geïnterpoleerde faalkansen. Links staan de 'ruwe' faalkansen, rechts staan de faalkansen met geïnterpoleerde waardes. De kwaliteitsindicatoren zijn aangegeven met Q0, Q1, Q2 en Q3.....	19
Figuur 14	Overzicht van het relatieve aandeel van de verschillende kwaliteitsoordelen. Kwaliteitsoordeel 99 (geen data of niet doorgerekend) is in deze figuur buiten beschouwing gelaten.....	23



# 1 Inleiding

## 1.1 Context

De Nederlandse kust staat onder invloed van een combinatie van natuurlijke belasting door golven en stroming en menselijk ingrijpen. Door golven en stroming tijdens dagelijkse omstandigheden én gedurende zware stormen verandert de ligging van de kust voortdurend. Dit dynamische karakter van de kust zorgt ervoor dat de hoogwaterveiligheid door de tijd heen verandert. Een belangrijke indicator voor de toestand van de kust is de faalkans van de eerste duinenrij, ook wel aangeduid als de zeereep. Variaties in duinvolume en ligging van strand en vooroever leiden tot variaties in deze faalkans.

## 1.2 Doelstelling

In 2011 is door HKV een database samengesteld met faalkansen van alle JarKus raaien langs de Nederlandse duinenkust, voor de jaren 1965-2010 (HKV, 2011). Op basis van deze database zijn analyses uitgevoerd van de effecten van veranderingen in suppletiebeleid door de jaren heen op de faalkans van de duinen (HKV, 2012). Er is op dit moment behoefte aan een update van deze database voor de periode tot en met 2017.

De faalkansen in HKV (2011) waren berekend met het programma PC-Ring (TNO, 2003, TNO, 2007). Dit programma is buiten gebruik geraakt na afloop van het project VNK2 (Veiligheid Nederland in Kaart), en wordt vervangen door het programma Riskeer. Binnen Riskeer is de functionaliteit om faalkansen voor duinen te berekenen echter nog niet beschikbaar. Er is daarom gekozen voor het ontwikkelen van een probabilistische duinafslagmodel in Matlab.

De doelstelling van dit rapport is het beschrijven van het nieuw ontwikkelde probabilistische model, het vergelijken van de uitkomsten met bestaande softwarepakketten, en het analyseren van de kwaliteit van de rekenresultaten.

## 1.3 Afbakening

De faalkansen die berekend zijn in dit project zijn bedoeld voor het analyseren van trends in de context van KPP Beheer & Onderhoud Kust. De lengte van de profielen is bepaald aan de hand van de duinvorm, en niet op basis van een officiële legger. Hiermee hebben de faalkansen in absolute zin geen betekenis voor de officiële faalkans van de duinwaterkering. Het ontwikkelde probabilistische duinafslagmodel heeft daarnaast geen officiële status binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI).

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het probabilistische duinafslagmodel. Om vertrouwen te krijgen in het model, zijn de uitkomsten voor enkele raaien vergeleken met PC-Ring en Morphan. Deze vergelijking is beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de analyse van de rekenresultaten, en hoofdstuk 5 beschrijft enkele karakteristieken van de database met faalkansen. Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.



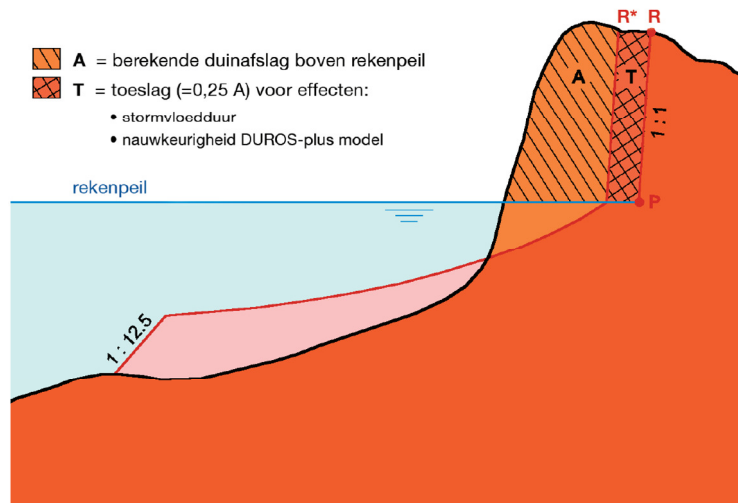
## 2 Probabilistisch duinafslagmodel

Dit hoofdstuk beschrijft achtereenvolgens het duinafslagmodel (paragraaf 2.1), de gebruikte parameters en kansverdelingen (paragraaf 2.2), de probabilistische beschrijving van duinafslag (paragraaf 2.3), de gebruikte probabilistische rekenmethode (paragraaf 2.4), de geselecteerde raaien en het bodemhoogteprofiel per raai (paragraaf 2.5), en tenslotte informatie over reken-tijden en gebruikte hardware (paragraaf 2.6).

### 2.1 Duinafslagmodel

Voor het berekenen van een afslagprofiel is gebruik gemaakt van het model DUROS+. Er is gekozen voor een eigen implementatie van DUROS+ in Matlab<sup>1</sup>, voor het minimaliseren van de rekentijd ten opzichte van de implementatie in PC-Ring. Daarnaast is het in Matlab eenvoudig om deze eigen implementatie te koppelen aan (bestaande) faalkansanalysetools geschreven in Matlab. Minimalisatie van de rekentijd is van belang voor het beheersbaar houden van de doorlooptijd van de faalkansberekeningen voor alle raaien langs de Nederlandse kust, voor een periode van 53 jaar.

DUROS+ is een empirisch balansmodel waarbij het afslagprofiel wordt bepaald aan de hand van het dwarsprofiel, de significante golfhoogte en piekperiode van de golven (beide bepaald op relatief diep water, namelijk NAP-20 m), de waterstand en de korreldiameter. De positie van dit nieuwe profiel wordt zo gekozen dat het afgeslagen volume gelijk is aan het depositievolume, zoals te zien is in Figuur 1.



*Figuur 1 DUROS+ afslagprofiel met (R) en zonder (R\*) modelfactor. De modelfactor is een onzekerheidstoeslag, en is in deze figuur een toeslag van 25% op het afslagvolume. Overgenomen uit ENW (2007).*

In een berekening met DUROS+ zijn dus de volgende variabelen van belang:

1. Het bodemhoogteprofiel van een duin in x,z coördinaten;
2. Mediane korreldiameter zand ( $D_{50}$ )
3. Waterstand (h)
4. Significante golfhoogte ( $H_s$ )

<sup>1</sup> Ondanks dat er al een Matlab DUROS+ implementatie in OpenEarthTools te vinden is, is er toch gekozen voor een eigen implementatie. Deze eigen implementatie is sneller en sluit beter aan op de faalkansdefinitie van PC-Ring.

5. Piekperiode golf ( $T_p$ )
6. Modelfactor

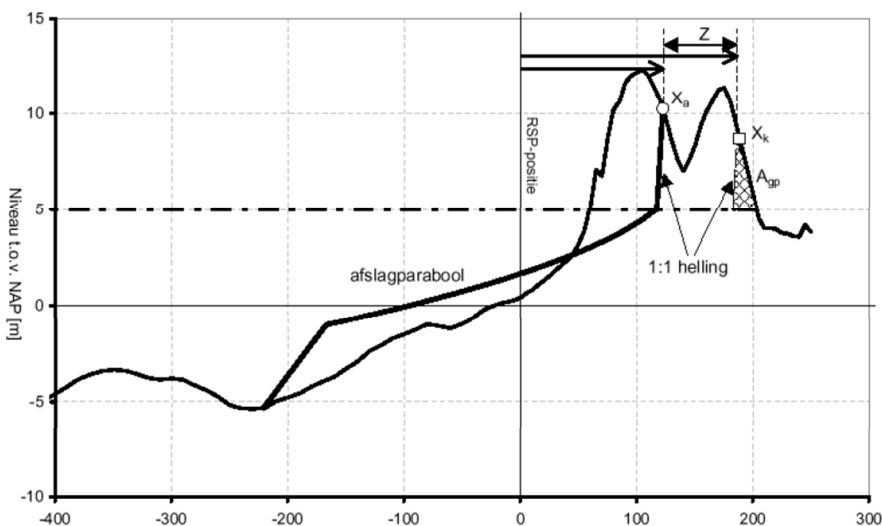
Het bodemhoogteprofiel wordt samengesteld uit gegevens vanuit de JarKus en AHN-databases. Zie paragraaf 2.5. De mediane korreldiameter  $D_{50}$  wordt bepaald op basis van interpolatie tussen de waarden uit het Technische Rapport Duinafslag (ENW, 2007). Dit rapport geeft voor diverse locaties langs de kust gemiddelden en variatiecoëfficiënten voor de mediane korreldiameter van het zand.

De waterstand en golfparameters hebben betrekking op de piek van de storm. Paragraaf 2.2 beschrijft de statistiek voor deze hydraulische belastingen. In DUROS+ is de duur van een storm geen variabele: het gaat uit van een vaste stormduur die als representatief wordt aangenomen voor een maatgevende storm langs de Nederlandse kust. Een bijdrage voor de variatie van de stormduur wordt, samen met modelonnauwkeurigheden, verrekend in een modelfactor. Dit is een toeslag op het afgeslagen volume, waardoor het maatgevende afslagpunt iets verder landinwaarts ligt dan het eerder berekende afslagpunt.

Voor een faalkansberekening met DUROS+ is een definitie van falen nodig. De faaldefinitie is identiek gekozen aan de gehanteerde faaldefinitie in PC-Ring zoals gebruikt in HKV (2011). Deze faaldefinitie houdt in dat er sprake is van falen zodra het berekende afslagpunt (R of R\* in Figuur 1) een kritiek afslagpunt overschrijdt, conform sectie 11.2.2 uit TNO (2007). In de Matlab routine zijn daarom drie fases te onderscheiden:

1. Inpassing initieel DUROS+ afslagprofiel (zonder modelfactor) in het duinprofiel
2. Verschuiving afslagprofiel om de modelfactor mee te nemen
3. Bepaling kritiek afslagpunt

Fase 1 is het afslagprofiel behorend bij punt R\* in Figuur 1, fase 2 is het afslagprofiel behorend bij punt R. Het kritieke afslagpunt van fase 3 wordt bepaald met behulp van een belastingafhankelijk afslagvolume (conform sectie 11.2.2 uit TNO, 2007), en is grafisch te zien in Figuur 2.



*Figuur 2 Afslagpunt ( $X_a$ ) en kritiek afslagpunt ( $X_k$ ), waarbij het kritieke afslagpunt is bepaald op basis van een kritiek afslagvolume ( $A_{gp}$ ). De horizontale afstand  $Z$  is gedefinieerd als  $X_k - X_a$ , waarbij  $Z < 0$  betekent dat er sprake is van falen. Overgenomen uit TNO (2007).*

## 2.2 Kansverdelingen voor variabelen

Voor de waterstand, golfhoogte en golfperiode wordt gebruik gemaakt van de statistiek conform WBI-2017. Deze statistiek is ongewijzigd ten opzichte van HR-2006, en daarmee ten opzichte van de implementatie in PC-Ring.

Voor de waterstand wordt gebruik gemaakt van statistiek op een aantal steunpunten op de 20 m dieptecontour, conform het Achtergrondrapport HR 2006 voor de Zee en Estuaria, Rijkswaterstaat (2006). De overschrijdingsfrequentie wordt beschreven met een conditionele Weibull verdeling:

$$P(H > h) = 1 - F(h) = \rho \exp \left\{ - \left( \frac{x}{\sigma} \right)^\alpha + \left( \frac{\omega}{\sigma} \right)^\alpha \right\}, \quad (x \geq \omega), \tag{1.1}$$

waarin  $P(H > h)$  de overschrijdingskans van de waterstand  $h$  (m+NAP) is,  $\alpha$  de vormparameter (-),  $\sigma$  de schaalparameter (m),  $\omega$  een drempelwaarde (m+NAP), en  $\rho$  de overschrijdingsfrequentie van drempelwaarde  $\omega$ . Zie Figuur 3 voor de waarden van deze parameters bij de verschillende steunpunten conform het Achtergrondrapport HR 2006.

Tabel 8.1  
Parameters van de omni-directionele verdelingsfunctie van de waterstand.

par	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder	Eierland	Borkum
$\omega$	1.95	1.85	1.6	2.25	1.85
$\rho$	7.237	5.341	3.254	0.5	5.781
$\alpha$	0.57	0.63	1.6	1.86	1.27
$\sigma$	0.0158	0.0358	0.9001	1.0995	0.535

Figuur 3 Tabel met parameters van de omni-directionele verdelingsfunctie van de waterstand. Overgenomen uit Rijkswaterstaat (2006)

Voor de significante golfhoogte wordt gebruik gemaakt van een deterministische relatie tussen waterstand en golfhoogte, conform WL | Delft Hydraulics (2004). Deze relatie is beschreven in het rapport Basisstochasten WBI-2017, Deltares (2017).

$$H_s = a + b \cdot h + c \cdot \max(0; d - h)^e \quad (h < d) \tag{1.2}$$

De parameters a tot en met e zijn opgesomd in onderstaande tabel.

Na berekenen van de golfhoogte op basis van deze formule, wordt een standaardafwijking van 0.6 m toegepast op deze golfhoogte, conform Rijkswaterstaat (2006) en Deltares (2015).

Steunpunt golven	a	b	c	d	e
Vlissingen	2.40	0.35	0.0008	7.00	4.67
Hoek van Holland	4.35	0.60	0.0008	7.00	4.67
IJmuiden	5.88	0.60	0.0254	7.00	2.77
Den Helder	9.43	0.60	0.68	7.00	1.26
Eierlandse Gat	12.19	0.60	1.23	7.00	1.14
Borkum	10.13	0.60	0.57	7.00	1.58

Tabel 2-1 Parameters van de relatie tussen golfhoogte en waterstand, overgenomen uit Deltares (2017)

De golfperiode is vervolgens weer gekoppeld aan de golfhoogte. Deze relatie is in WBI-2017 onveranderd ten opzichte van de HR-2006 (Deltares, 2017). Met uitzondering van Den Helder en het extra steunpunt voor de Waddenzee is per steunpunt een relatie met golfhoogte gelegd in de vorm van een tabel (HKV, 2005). Zie ook bijlage B uit Rijkswaterstaat (2006).

Na het berekenen van de golfperiode op basis van deze tabellen, wordt een standaardafwijking van 1.0 s toegepast, conform Deltares (2015).

De waarden ter plaatse van de steunpunten worden vertaald naar waarden per raai. Dit gebeurt door te interpoleren naar het punt op het kruispunt tussen de raai (doortrekken van de raairichting) en de 20 m dieptecontour tussen de steunpunten. Voor een deel van de raaien dient niet de raairichting, maar een andere richting te worden gehanteerd, conform Appendix C van Deltares (2014). Zie ook Figuur 4.

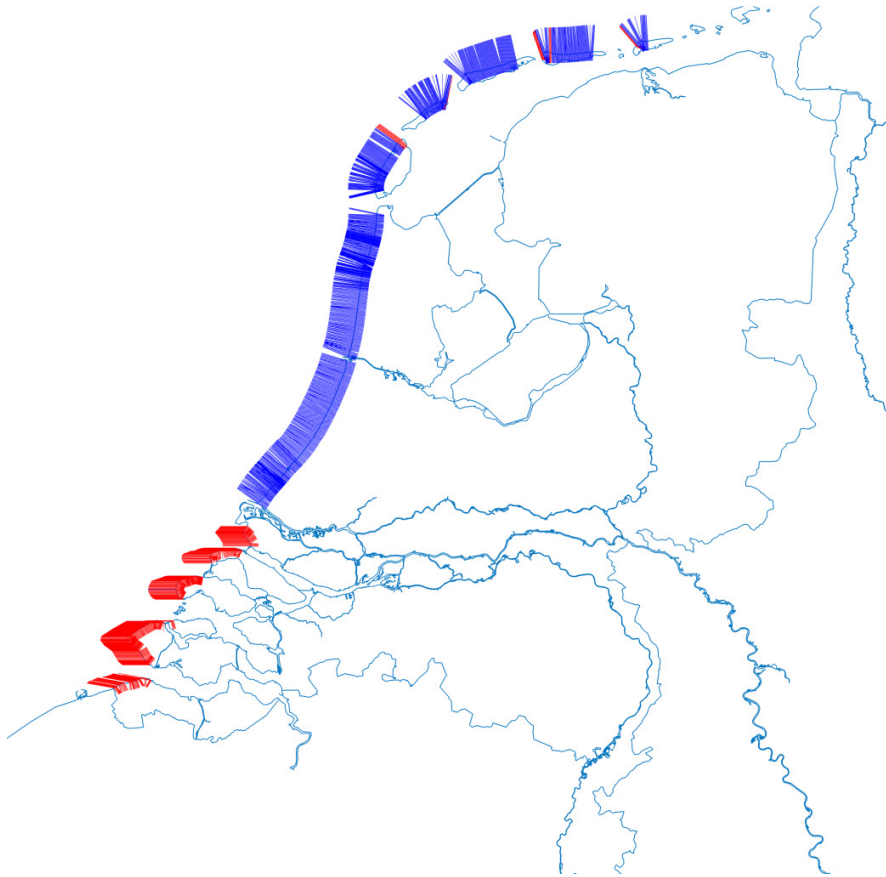
Voor een beschrijving van overige details en uitzonderingen op de algemene werkwijze wordt verwezen naar de vermelde rapporten. Al deze zaken zijn wel geïmplementeerd in de Matlab functies. De volgende bestaande Matlab functies uit de OpenEarthTools zijn gebruikt voor de statistiek van de verschillende statistiek parameters:

- Waterstand: `getWl_2Stations.m`
- Significante golfhoogte: `getHs_2Stations.m`
- Piekperiode golf: `getTp_2Stations2011.m`
  - Deze verwijst naar: `getTp_t2011.m`
  - Gebruik het argument `translationtable=1` (anders dan de default waarde)
  - Deze gebruikt tabellen uit: `getTpTable.m`

Deze functies zijn aanwezig in de map

`OpenEarthTools\trunk\matlab\applications\DUROS\probabilistic\bc\`

Voor de modelfactor is eenzelfde verdeling gebruikt zoals in PC-Ring: een lognormale verdeling met een gemiddelde van 1.0 en een standaardafwijking van 0.25. Ook de kansverdelingen voor de mediane korreldiameter (verschillend per raai) zijn identiek aan de waarden in PC-Ring.



*Figuur 4* Aanpassing van de raairichting voor een deel van de raaien (rood gemarkeerd), ten behoeve van de vertaling van waterstand- en golfrandvoorwaarden van diep water naar de kust.

## 2.3 Probabilistische benadering

Bij het berekenen van een faalkans wordt gebruik gemaakt van een grenstoestandsfunctie. De grenstoestandsfunctie beschrijft de grens tussen falen en niet falen van de duinwaterkering. De definitie van een grenstoestandsfunctie is  $Z = \text{sterkte} - \text{belasting}$ . Falen treedt op als  $Z < 0$ . Zowel de belasting als de sterkte kunnen worden beschreven op basis van kansverdelingen van de onderliggende parameters. De faalkans is dan de kans dat  $Z < 0$ .

Voor duinafslag is de belasting gedefinieerd als de afslaglengte, na toeslag op basis van de modelfactor. De sterkte is de resterende afstand tot aan het grensprofiel. Het verschil tussen sterkte en belasting is dan:

$$Z = X_k - X_a, \quad (1.3)$$

waarin  $X_k$  de kritieke positie van het afslagpunt is, behorend bij het grensprofiel, en  $X_a$  het berekende afslagpunt na toevoegen van de toeslag op basis van de modelfactor. Zie paragraaf 2.1 voor de wijze waarop deze twee punten worden berekend. Beide punten zijn gedefinieerd als de afstand (m) langs de raai ten opzichte van het nulpunt, de Rijksstrandpaal (RSP).

De faalkans is vervolgens gedefinieerd als:

$$P_f = P(Z < 0). \quad (1.4)$$

## 2.4 Probabilistische rekenmethode

Falen kan optreden bij een zeer hoge waterstand, met een kleine kans van voorkomen. Een andere mogelijkheid is een combinatie van een iets minder hoge waterstand, met een grote waarde voor de modelfactor. Of een combinatie met een kleine waarde voor de korreldiameter. Elke combinatie die tot falen leidt, heeft een kans van voorkomen. De First Order Reliability Method, kortweg aangeduid als FORM, is een methode die bepaalt welke combinatie die tot falen leidt de grootste kans van voorkomen heeft. Deze kans van voorkomen is de faalkans. De geselecteerde combinatie staat bekend als het ontwerppunt (Engels: design point). Voor duinen is in vrijwel alle gevallen de waterstand de maatgevende parameter. Zonder hoge waterstand treedt er geen sterke golfaanval op bij het duinfront, en is de kans op duinafslag nihil. In het ontwerppunt is daarom een hoge waterstand aanwezig, in combinatie met een enigszins (maar niet extreem) conservatief gekozen waarde voor de andere parameters.

FORM berekent het ontwerppunt op iteratieve wijze. Er wordt eerst een startpunt door de gebruiker gedefinieerd. Vervolgens wordt door FORM bepaald (1) hoe sterk de grenstoestandsfunctie reageert op een variatie van elke variabele (o.b.v. partiële afgeleiden), en (2) hoe sterk  $Z$  nog afwijkt van 0. Als  $Z > 0$ , en als bijvoorbeeld de partiële afgeleide voor de waterstand het grootste is, zal het ontwerppunt in de volgende iteratie vooral een hogere waterstand hebben.

Er is gebruik gemaakt van de implementatie van FORM in OpenEarthTools. Deze is terug te vinden in de OpenEarthTools repository in:

```
\trunk\matlab\applications\probabilistic\engines\FORM\FORM.m
```

Gehanteerde instellingen van FORM:

- Methode voor het berekenen van partiële afgeleiden: tweezijdige afgeleiden;
- Stapgrootte voor het bepalen van de afgeleiden in U-ruimte: `du = 0.35;`
- Relaxatiefactor: `Relaxation = 0.25;`
- Maximaal toelaatbare stapgrootte per iteratie in U-ruimte: `MaxItStepSize = 2.0;`
- Afbreekcriterium voor absolute waarde van  $Z$ : `maxdZ = 0.1;`
- Afbreekcriterium voor verschil in  $Z$ -waarde tussen iteraties: `epsZ = 0.01;`
- Afbreekcriterium voor verschil in  $\beta$  tussen iteraties: `epsBeta = 0.01;`
- Maximaal aantal iteraties: `maxiter = 100;`

Er zijn twee kleine wijzigingen toegepast ten opzichte van de implementatie in OpenEarthTools: een factor in  $du$  tussen opeenvolgende iteraties, en een factor in relaxatiefactor tussen opeenvolgende iteraties. Op deze manier kan worden afgedwongen dat de stapgrootte aan het begin van het iteratieproces groter is dan aan het eind, terwijl de relaxatie kan toenemen. Deze factoren zijn gezet op:

- Factor in stapgrootte: `du_factor = 0.97`
- Factor in relaxatie: `relaxatie_factor = 1.01`

Uit proefberekeningen bleek dat het wel of niet behalen van convergentie afhankelijk kon zijn van keuzes betreffende de instellingen van FORM. Daarom worden maximaal drie berekeningen uitgevoerd, waarin FORM wordt toegepast met verschillende instellingen, die leiden tot andere keuzes in het iteratieproces. Indien de eerste set van instellingen niet tot convergentie leidt, of een onwaarschijnlijke faalkans oplevert (bijvoorbeeld een jaarlijkse faalkans groter dan 0.1),



wordt een tweede berekening ondernomen. Mocht deze tweede berekening ook niet leiden tot een geconvergeerd en waarschijnlijk antwoord, wordt een derde en laatste berekening gedaan.

De hierboven beschreven instellingen van FORM zijn de keuzes voor de eerste berekeningspoging. De volgende pogingen brengen vooral wijzigingen aan in keuzes met betrekking tot de stapgrootte voor het bepalen van de afgeleiden in U-ruimte ( $du$ ) en de relaxatiefactor. Uit de proefberekeningen bleek dat de FORM berekeningen hier gevoelig voor zijn.

De tweede berekeningspoging wijzigt de volgende instellingen ten opzichte van de eerste poging:

- Stapgrootte voor het bepalen van de afgeleiden in U-ruimte:  $du = 0.30$ ;
- Relaxatiefactor: `Relaxation = 0.15`;
- Maximaal aantal iteraties: `maxiter = 50`;
- Factor in stapgrootte: `du_factor = 0.95`;
- Factor in relaxatie: `relaxatie_factor = 1.02`;

De derde berekeningspoging wijzigt de volgende instellingen ten opzichte van de eerste poging:

- Stapgrootte voor het bepalen van de afgeleiden in U-ruimte:  $du = 0.02$ ;
- Relaxatiefactor: `Relaxation = 0.50`;
- Maximaal aantal iteraties: `maxiter = 50`;
- Factor in stapgrootte: `du_factor = 1.00`;
- Factor in relaxatie: `relaxatie_factor = 1.00`;

## 2.5 JarKus-raaien en profielen

Er is een selectie gemaakt van alle beschikbare JarKus-raaien op basis van twee criteria:

1. de waterkering moet een duin betreffen (geen zeedijk), en
2. de duin in het profiel moet een waterkerende functie hebben.

Veel raaien op bijvoorbeeld de eilandkoppen van de Waddeneilanden vallen daarmee af. Bijlage A geeft een overzicht van alle doorgerekende raaien.

De methode voor het genereren van profielen is ongewijzigd overgenomen uit HKV (2011). Deze methode bestaat uit het inlezen van JarKus-data, aanvullen met AHN-data aan landwaartse zijde, en het verwijderen van eventuele dubbele duinenrijen. De begrenzingen aan land- en zeezijde zijn per raai altijd gelijk voor alle jaren, zodat de berekende faalkansen altijd betrekking hebben op hetzelfde gebied. Er is gebruik gemaakt van het gemiddelde profiel over de jaren voor het bepalen van eventueel te verwijderen dubbele duinenrijen. Aangezien de duinen op bepaalde locaties sterk zijn gewijzigd in de periode 1965-2017, kan het zijn dat in een deel van de jaren wel een meervoudig duin aanwezig is. Verdere details zijn te vinden in HKV (2011).

Er is een lichte gladstrijking toegepast op de profielen, op basis van een lopend gemiddelde van 3 punten in het profiel. Kleine profielvariëaties kunnen convergentie van FORM bemoeilijken. Tests toonden aan dat het glad strijken geen invloed heeft op de grootte van de berekende faalkansen.

## 2.6 Aantal berekeningen en rekestijd

In totaal zijn er 1492 raaien doorgerekend van de in totaal 2285 raaien. Elke raai is voor ieder jaar in de periode 1965 tot en met 2017 doorgerekend, wat neerkomt op 53 jaren per raai. Dit betekent dat er in totaal 79,076 unieke berekeningen mogelijk zijn: een unieke berekening is hier gedefinieerd als een specifieke raai in een specifiek jaar. Het daadwerkelijk aantal uitgevoerde unieke berekeningen ligt lager, omdat niet voor iedere raai-jaar-combinatie JarKus data beschikbaar is.

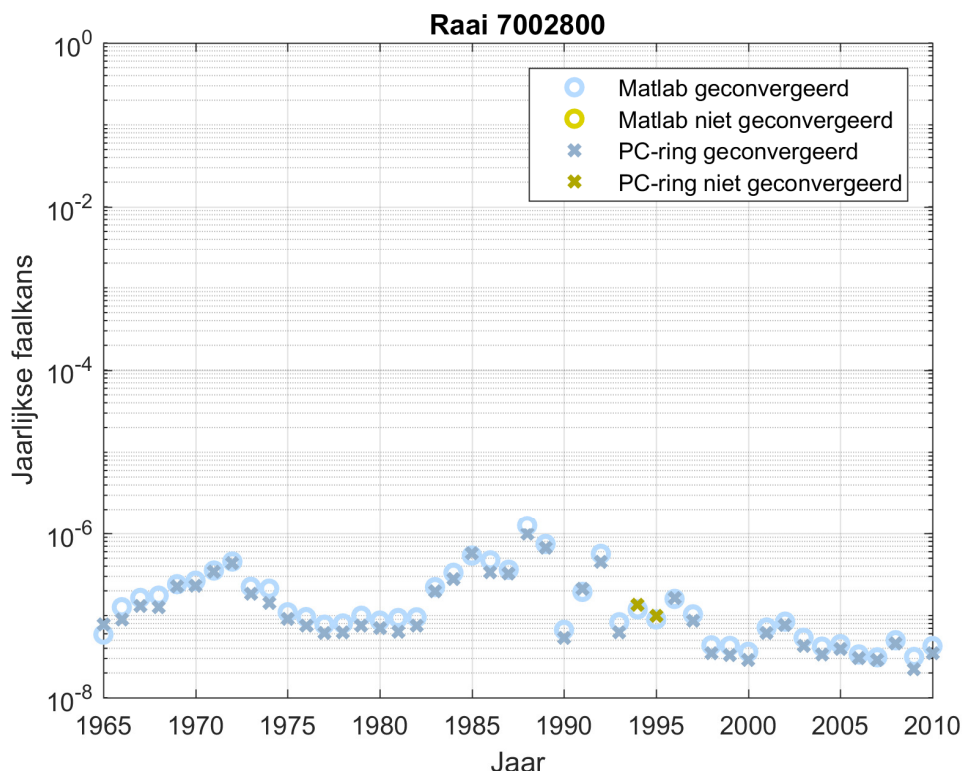
De rekestijd is sterk afhankelijk van de FORM berekening. Als de eerste FORM poging meteen en snel convergeert, dan kan een berekening voor een raai-jaar-combinatie in enkele seconden klaar zijn. Als er echter meerdere FORM pogingen nodig zijn, en deze allemaal het maximaal aantal opgegeven FORM iteraties gebruiken, kan de rekestijd voor een berekening oplopen tot meer dan een minuut. Deze getallen zijn gebaseerd op proefberekeningen die zijn uitgevoerd op een courante laptop. Uitgaande van het totaal aantal mogelijke unieke berekeningen, en een ietwat pessimistische schatting van 1 minuut per unieke berekening, is een totale rekestijd van ongeveer 55 dagen te verwachten. Gezien de doorlooptijd van het project hebben wij ervoor gekozen om de productieberekeningen op een rekencluster uit te voeren. Door meerdere berekeningen parallel uit te voeren (in ons geval 36) wordt de daadwerkelijke rekestijd teruggebracht tot enkele dagen.

### 3 Vergelijking met PC-Ring en Morphan

Dit hoofdstuk geeft een vergelijking van de rekenresultaten met het nieuw opgezette probabilistische duinafslagmodel met twee bestaande softwarepakketten. Allereerst is een vergelijking gemaakt met resultaten van PC-Ring (paragraaf 3.1), zoals gebruikt voor het berekenen van faalkansen voor de periode 1965-2010 in HKV (2011). Vervolgens zijn afslagprofielen volgens de eigen implementatie van DUROS+ vergeleken met afslagprofielen zoals berekend met Morphan (paragraaf 3.2).

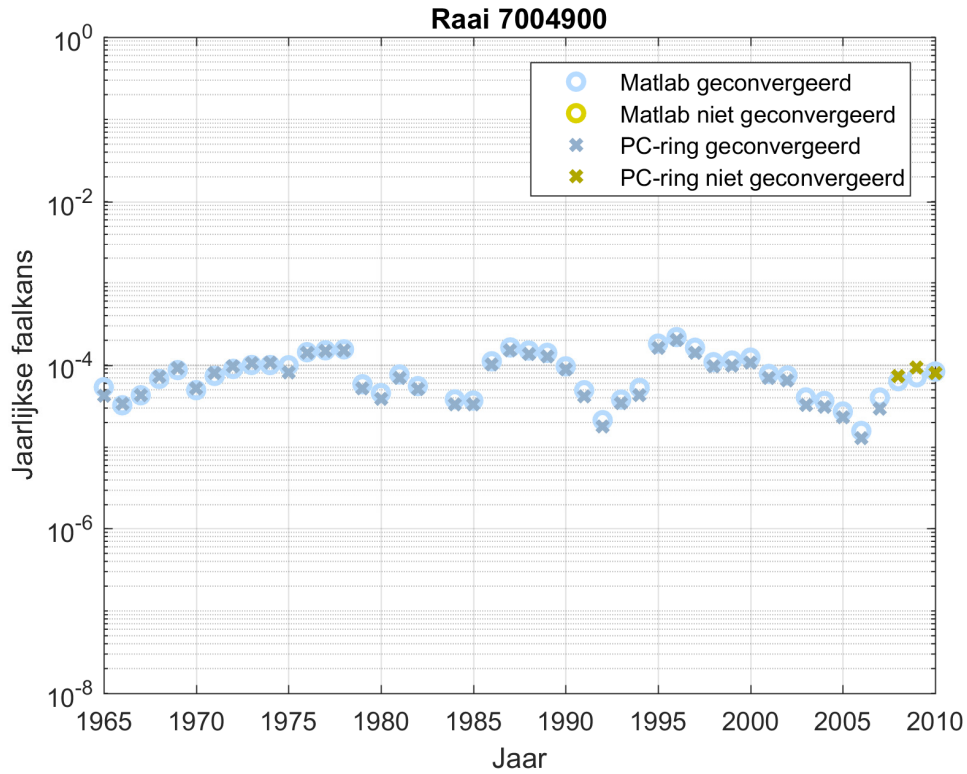
#### 3.1 Vergelijking met PC-Ring

Voor de raaien 70002800 en 7004900 langs de Noord-Hollandse kust zijn faalkansberekeningen met FORM uitgevoerd om te vergelijken met de eerder gevonden resultaten van PC-Ring. Deze vergelijking is te zien in Figuur 5 en Figuur 6. Te zien is dat de MATLAB implementatie van de faalkansberekeningen voor deze twee raaien in alle gevallen convergeert. Niet convergeren trad bij PC-Ring, voor de gekozen raaien, slechts enkele keren op, waarbij de niet-geconvergeerde waarden alsnog vergelijkbaar zijn met de Matlab resultaten<sup>2</sup>. Verder is te zien dat de MATLAB implementatie resultaten geeft die sterk in de buurt liggen van de PC-Ring resultaten, alhoewel de MATLAB implementatie de faalkansen consistent iets hoger inschat. De PC-Ring code is niet openbaar, waardoor het niet mogelijk was om de oorzaak van dit verschil te verklaren.



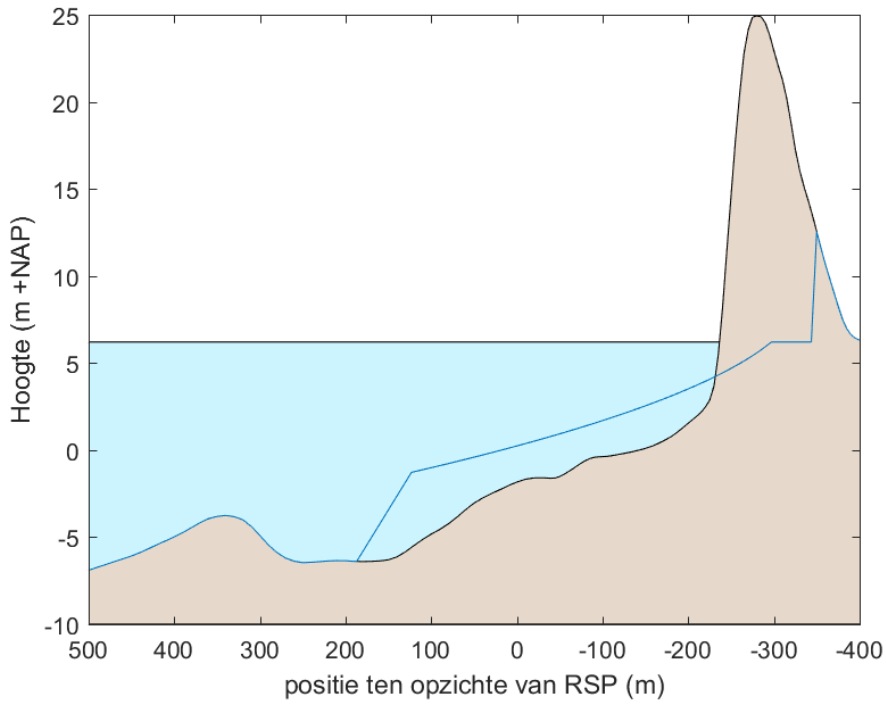
*Figuur 5 Vergelijking faalkansen verkregen met behulp van FORM berekeningen uit PC-Ring en de nieuwe MATLAB implementatie voor raai 7002800.*

<sup>2</sup> Deze twee raaien bevatten vrij standaard profielen. Niet alle raaien zullen zoveel geconvergeerde resultaten laten zien: raaien met grillige profielen zullen moeilijker (of soms zelfs helemaal niet) convergeren in FORM (zie ook hoofdstuk 4).

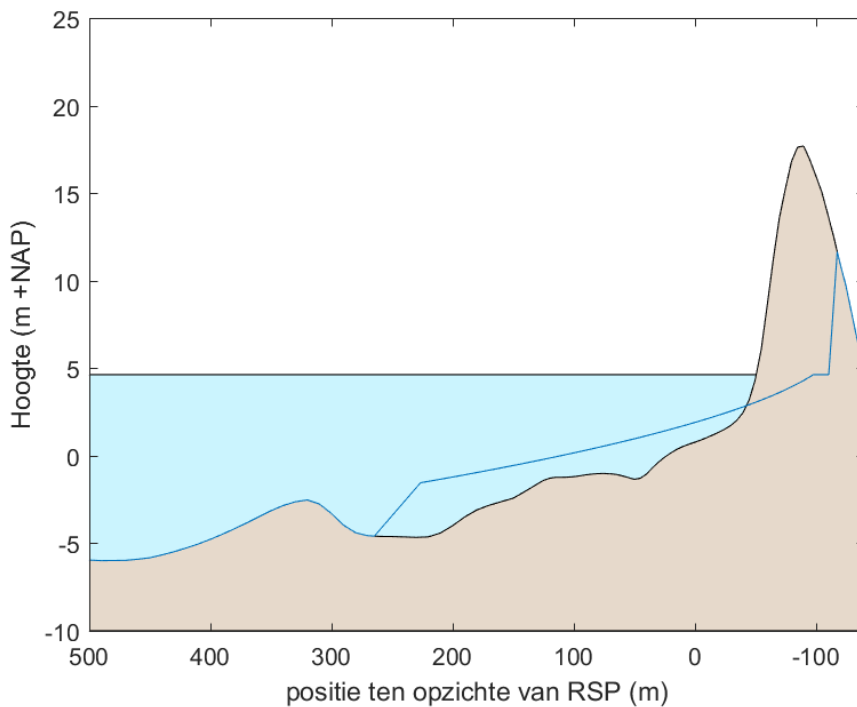


*Figuur 6* Vergelijking faalkansen verkregen met behulp van FORM berekeningen uit PC-Ring en de nieuwe MATLAB implementatie voor raai 7004900.

Verder worden in Figuur 7 en Figuur 8 voorbeelden van afslagprofielen in het ontwerp punt getoond. De volumes van afslag en depositie komen goed overeen. Het afgeslagen volume wordt vergroot op basis van de modelfactor. Dit is te zien als de horizontale verschuiving van het afslagprofiel ter hoogte van de waterlijn.



*Figuur 7 Afslagprofiel in het gevonden ontwerp punt voor raai 7002800 in 1995, inclusief toeslag op basis van de modelfactor (de horizontale verschuiving ter hoogte van de waterlijn).*



*Figuur 8 Afslagprofiel in het gevonden ontwerp punt voor raai 7004900 in 1995, inclusief toeslag op basis van de modelfactor (de horizontale verschuiving ter hoogte van de waterlijn).*

Het nieuwe probabilistische duinafslagmodel geeft faalkansen die zeer dicht bij de door PC-Ring berekende faalkansen liggen. De trends in de tijd zijn nagenoeg gelijk, en juist dit laatste is van

belang voor onderzoek binnen KPP Beheer en Onderhoud Kust. Om deze reden is gebruik gemaakt van het nieuwe probabilistische duinafslagmodel voor het aanmaken van de database met faalkansen voor alle raaien langs de Nederlandse kust.

### 3.2 Vergelijking met Morphan

De afslag zoals berekend met de Matlab implementatie van DUROS+ is vergeleken met het officiële duinafslagmodel Morphan, om vertrouwen te krijgen in de prestaties van het nieuw ontwikkelde model. Hiertoe zijn twee raaien (7005375 en 7005450) geselecteerd. Deze zijn doorgerekend voor een vijftal jaren (1970, 1980, 1990, 2000 en 2010). De afslagpunten van Morphan en DUROS zijn met elkaar vergeleken op basis van de volgende input:

- Significante golfhoogte: 9 meter,
- Piekperiode: 16 seconden,
- Hoogwaterstand: NAP+5 m,
- D50: 160  $\mu\text{m}$  (raai 7005375) en 186  $\mu\text{m}$  (raai 7005450),
- Modelfactor (ook wel: toeslag volume factor): 0.1.<sup>3</sup>

In Tabel 3-1 is de vergelijking tussen de Morphan en de Matlab implementatie te zien. Voor de Matlab implementatie zijn afslagpunten bepaald met en zonder gladstrijken van het Jarkus profiel, omdat dit tot kleine verschillen kan leiden.

Raai	Jaar	Morphan		Matlab (geen gladstrijken)		Matlab (met gladstrijken)	
		X [m+RSP]	Nauwkeurigheid [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]	X [m+RSP]	Nauwkeurigheid [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]	X [m+RSP]	Nauwkeurigheid [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]
7005375	1970	-138.7	0.0035	-138.8	0.20	-139.0	0.15
7005375	1980	-129.3	0.0072	-129.4	0.62	-128.7	0.43
7005375	1990	-91.9	0.0053	-92.1	1.06	-92.0	1.19
7005375	2000	-49.0	0.013	-54.9	0.44	-54.1	0.44
7005375	2010	-20.8	0.012	-20.8	0.65	-24.6	0.20
7005450	1970	-100.6	0.00017	-100.7	0.56	-100.8	0.44
7005450	1980	-61.5	0.014	-61.6	0.25	-61.5	0.46
7005450	1990	-28.5	0.029	-28.7	0.48	-28.4	0.25
7005450	2000	39.6	0.025	40.0	0.44	40.2	0.30
7005450	2010	68.9	0.012	68.6	0.70	65.4	0.12

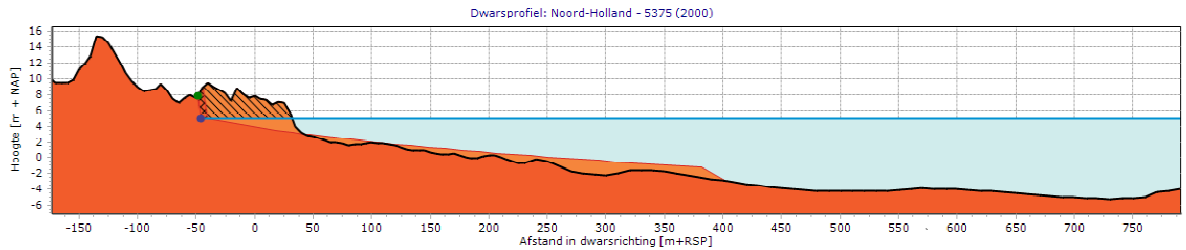
Tabel 3-1 Vergelijking van berekende afslagpunten voor een tweetal raaien bepaald met Morphan en de Matlab implementatie beschreven in dit rapport.

Tabel 3-1 laat zien dat de afslagpunten bepaald met Morphan en met de Matlab implementatie (zonder gladstrijken) nagenoeg gelijk zijn aan elkaar. De verschillen in nauwkeurigheid wat betreft de volumebalans berekeningen zijn toe te schrijven aan een verschil in instellingen: Morphan heeft een standaardinstelling dat de volumebalansberekening voldoende geconvergeerd is als het verschil kleiner is dan  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}$ , terwijl deze grens in de Matlab implementatie (met het oog op rekentijd) op  $1.0 \text{ m}^3/\text{m}$  is gezet.<sup>4</sup> Verder valt op dat de afslagpunten van raai

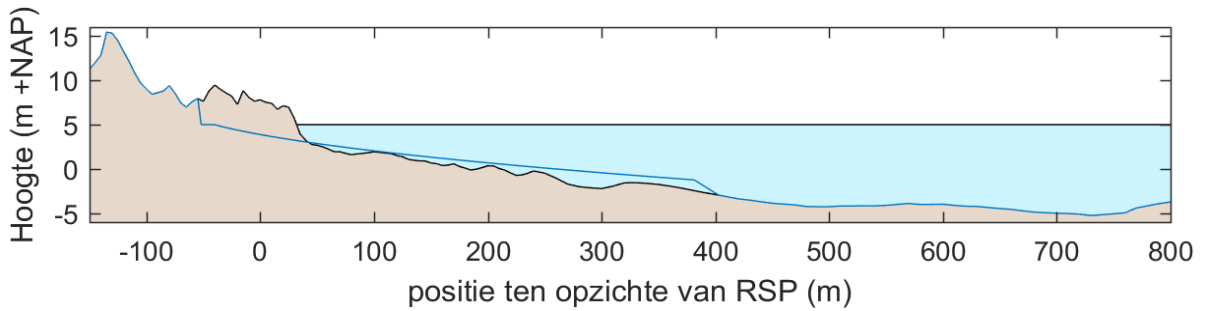
<sup>3</sup> In de semi-probabilistische aanpak van WBI 2017 wordt een toeslag van 0.25 gebruikt. In de probabilistische aanpak een stochast met gemiddelde van 1.00 en standaardafwijking van 0.25. In het ontwerp punt komt de toeslag dan vaak op ongeveer 0.1 uit. Het doel van dit voorbeeld is het vergelijken van de afslagprofielen van Morphan en de eigen Matlab implementatie van DUROS+. De exacte waarde van de gekozen toeslag is daarbij van minder belang.

<sup>4</sup> In de Matlab implementatie geldt dit criterium per volumebalansberekening. Om het afslagpunt te bepalen met de Matlab implementatie zijn een tweetal volumebalansberekeningen nodig (initieel afslagpunt en verschuiving voor toeslag

7005375 in 2000 bepaald met Morphan en de Matlab implementatie ongeveer vijf meter verschillen. Dit verschil is te verklaren door het specifieke profielverloop in de buurt van de afslagpunten (Figuur 9 en Figuur 10). Te zien is dat Morphan in Figuur 9 net voor een kleine 'kuil' het afslagpunt heeft bepaald. Als het afslagpunt van Morphan initieel niet wordt gevonden, moet vanwege deze kleine kuil en de volumebalans (die erosie en aanzanding balanceert) het afslagpunt meteen een paar meter verder landinwaarts gezocht worden (Figuur 10).



Figuur 9 Afslagprofiel volgens Morphan voor raai 7005375 in 2000.



Figuur 10 Afslagpunt volgens de Matlab implementatie van DUROS+ voor raai 7005375 in 2000.

volume) waardoor het totaal van de nauwkeurigheid de som is van de afwijkingen. Hierdoor kan in de tabel de nauwkeurigheid boven de 1.0 m<sup>3</sup>/m uitkomen.





## 4 Analyse van rekenresultaten

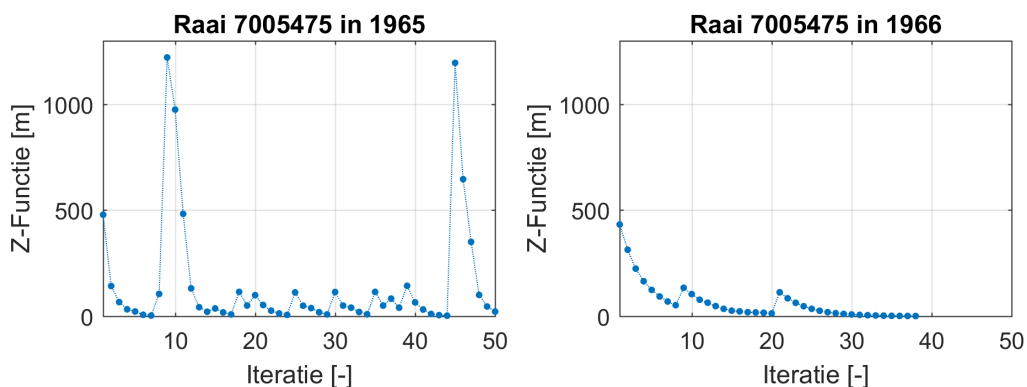
Dit hoofdstuk beschrijft de methoden die zijn toegepast voor het valideren van de resultaten van de faalkansberekeningen met het probabilistische duinafslagmodel. Deze validatie is uitgevoerd op basis van:

1. convergentie van de FORM berekening (paragraaf 4.1),
2. volumebalans met DUROS+ (paragraaf 4.2), en
3. de waarde van de grenstoestandsfunctie in het ontwerp punt (4.3).

Deze controles zijn gebruikt om tot een kwaliteitsindicator te komen per FORM berekening (paragraaf 4.4). Op basis van deze indicator zijn onbetrouwbare punten verwijderd of vervangen (paragraaf 4.5).

### 4.1 Convergentie

In bepaalde gevallen convergeert de iteratieve berekening met FORM niet, en wordt ook bij het maximale iteraties niet voldaan aan één of meerdere convergentiecriteria. Dit betekent dat de faalkans nog niet stabiel is over de iteraties, of dat de waarde van de grenstoestandsfunctie nog te ver van nul af ligt, of sterker varieert over de iteraties dan het opgegeven criterium. Dit gebeurt voornamelijk als de grenstoestandsfunctie rond het ontwerp punt niet-lineair is. FORM bepaalt een stap op basis van lineaire afgeleiden, en kan dan voorbij  $Z=0$  schieten. In een deel van de berekeningen zonder convergentie is er sprake van zulke schommelingen. De faalkans kan dan alsnog in de juiste orde van grootte liggen (Figuur 11). De andere controles (paragraaf 4.2 en 4.3) zullen voor zulke gevallen een positieve score opleveren. In sommige gevallen wordt  $Z=0$  niet benaderd. De oorzaak kan een grillig gevormde of extreem brede duin zijn. Afslagprofielen van DUROS+ worden dan onrealistisch, wat tot niet-convergeren kan leiden.

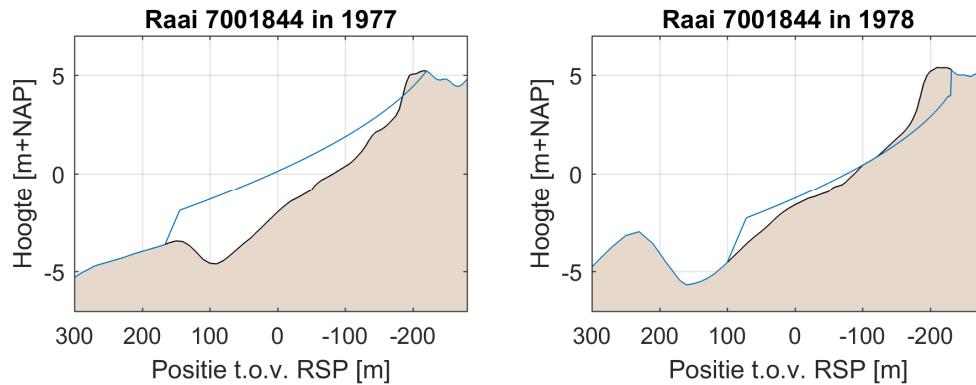


Figuur 11 Voor raai 7005475 blijft de grenstoestandsfunctie (Z-functie) in 1965 schommelen. Dit in tegenstelling tot 1966, waar de grenstoestandsfunctie duidelijk convergeert.

### 4.2 Volumebalans

Een berekening met DUROS+ behoort een gesloten volumebalans op te leveren, ofwel een zelfde volume ( $m^3/m$ ) aan erosie als aan depositie. Deze volumebalans dient kloppend te zijn na alle drie de stappen uit de routine van DUROS+ (zie paragraaf 2.1): na het bepalen van een afslagprofiel, na het toevoegen van de toeslag op basis van de modelfactor, en na het inpassen

van het grensprofiel. DUROS+ is ontwikkeld voor profielen met een reguliere profielvorm, zoals die bijvoorbeeld veelvuldig gevonden wordt langs de kust van Zuid- en Noord-Holland. Bij afwijkende profielvormen, zoals met een kleine voorduin, of een zeer breed en flauw aflopend strand, heeft DUROS+ moeite met het inpassen van een afslagprofiel. Grote verschillen tussen afslag en depositie zijn een indicatie van een onrealistische of minimaal een onnauwkeurige faalkans (Figuur 12), ook in het geval dat wel convergentie optreedt.



*Figuur 12 Voorbeeld van een incorrecte volumebalans (1977) en een correcte volumebalans (1978) voor raai 7001844 voor de met FORM gevonden afslagprofielen in het ontwerp punt.*

Er is gekozen om een volumebalans die een relatieve afwijking van minder dan 10% heeft (verschil tussen afslagvolume en depositievolumen, gedeeld door het afslagvolume) goed te keuren. Dit om volumebalansen die bijna in balans zijn alsnog goed te keuren. Hierdoor zouden theoretisch foutieve balansen onterecht goedgekeurd kunnen worden. Praktisch bleek echter dat als er sprake is van een foutieve volumebalans, de afwijking vaak ook direct in de honderden procenten ligt, zoals in het voorbeeld in de figuur.

### 4.3 Grenstoestandsfunctie

Deze controle gaat na wat de Z-waarde is in het ontwerp punt aan het eind van de berekening met FORM. Deze behoort zeer dicht bij 0 te liggen. Als dit niet het geval is, is er per definitie ook geen sprake van convergentie. Als er geen convergentie is, maar de Z-waarde bevindt zich wel nabij nul, is dit een indicatie dat de faalkans alsnog plausibel is. Er is gekozen om in het geval van een niet-geconvergeerde FORM berekening de Z-functie alsnog goed te keuren als de uiteindelijke Z-waarde tussen -20 en 20 meter ligt. Bijvoorbeeld in Figuur 11 is voor jaar 1965 de FORM berekening niet geconvergeerd. Desalniettemin ligt de Z waarde dicht bij 0 en vinden we de gevonden faalkans alsnog plausibel.

### 4.4 Kwaliteitsoordeel

De resultaten van bovenstaande controles zijn opgenomen als velden in de database. Op basis van deze resultaten kan een gebruiker de kwaliteit van de resultaten in detail beoordelen.

Daarnaast is een globaal kwaliteitsoordeel aan de database toegevoegd. Dit kwaliteitsoordeel luidt:

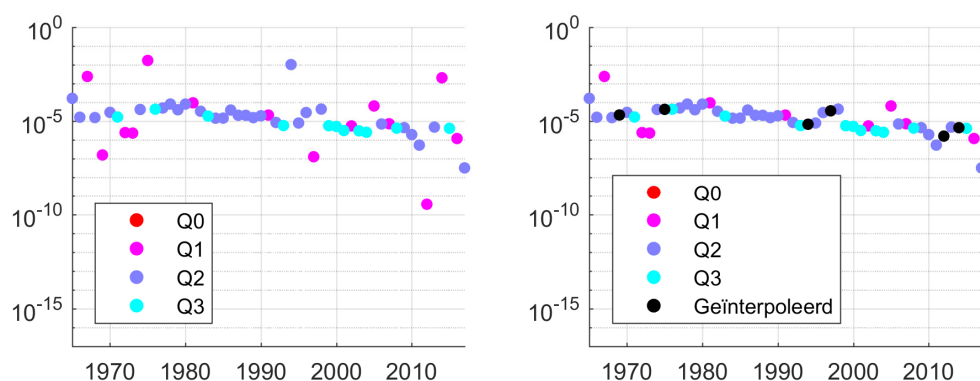
- Kwaliteitsoordeel = 99 in het geval dat:
  - De raai niet doorgerekend hoeft te worden
  - De raai wel doorgerekend moet worden, maar dat voor dit jaar geen Jarkus data beschikbaar is
- Kwaliteitsoordeel = 0 in het geval dat geen succesvolle berekening is gemaakt (de FORM berekening leidde tot een error);
- Kwaliteitsoordeel = 1 in het geval van een afkeuring bij de controles op Z-waarde OF volumebalans, ongeacht de controle op convergentie;
- Kwaliteitsoordeel = 2 in het geval van goedkeuring bij de controles op Z-waarde EN volumebalans, in combinatie met een afkeuring bij de controle op convergentie;
- Kwaliteitsoordeel = 3 bij een goedkeuring op alle controles.

In het geval van een groot aantal jaren met kwaliteitsoordeel van 0 en 1 zijn de profielen van de betreffende raai nogmaals aan een inspectie onderworpen. Als het profiel aanleiding geeft tot het lage kwaliteitsoordeel, zijn de begrenzingen aan land- of zeezijde van die profielen aangepast, en zijn alle FORM-berekeningen voor die raai nogmaals uitgevoerd.

## 4.5 Grootte van faalkansen en trends in faalkansen

Incidentele uitschieters in faalkansen kwamen voor bij toepassing van PC-Ring (HKV, 2011), en zijn ook nu nog in de database aanwezig. Te denken valt aan faalkansen in de orde van 1, of zeer kleine faalkansen (bijvoorbeeld  $10^{-16}$ ). Dergelijke faalkansen worden vaak al aangeduid met een laag kwaliteitsoordeel, maar zouden alsnog eventuele statistische analyses kunnen verstoren, zoals uitgevoerd in HKV (2012). Om die reden zijn overduidelijk onrealistische faalkansen handmatig uit de database verwijderd.

Als een individuele uitschieter in de faalkans zich binnen een verder nette tijdreeks bevindt, is in een aantal gevallen gebruik gemaakt van interpolatie tussen twee omliggende raaien. Deze interpolatie is gebaseerd op log-lineaire interpolatie tussen faalkansen (dat wil zeggen, lineaire interpolatie tussen  $\log(P_f)$ -waarden). Een voorbeeld van een raai waarbij interpolatie is toegepast is te zien in Figuur 13.



*Figuur 13* Voor raai 17001363 zijn een aantal faalkansen die significant afwijken vervangen door geïnterpoleerde faalkansen. Links staan de 'ruwe' faalkansen, rechts staan de faalkansen met geïnterpoleerde waarden. De kwaliteitsindicatoren zijn aangegeven met Q0, Q1, Q2 en Q3.

Aan de database is een veld toegevoegd met een indicator die aangeeft voor welke raai-jaar combinaties handmatige wijzigingen zijn aangebracht. Deze indicator kan de volgende waarden aannemen:

- Indicator = 99 in het geval dat er geen faalkans berekend was, door het ontbreken van een profiel (kwaliteitsoordeel 99) of een error in de berekening (kwaliteitsoordeel 0, zie sectie 4.4)
- Indicator = 0 in het geval dat de aanwezige faalkans niet handmatig veranderd is;
- Indicator = 1 in het geval dat de aanwezige faalkans een geïnterpoleerde waarde is tussen omliggende jaren;
- Indicator = 2 in het geval dat er een faalkans aanwezig was, maar dat deze verwijderd is vanwege onvoldoende betrouwbaarheid.

## 5 Faalkansdatabase

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de inhoud van de faalkansdatabase, opgeslagen in netCDF-formaat. Daarnaast worden per kustvak enkele globale karakteristieken gegeven van de grootte van de faalkansen en de resultaten van de controles.

### 5.1 Beschrijving database

De resulterende database is opgeslagen in netCDF formaat, en draagt de naam faalkans.nc. Dit bestand is opgeslagen op de OpenDAP server van Deltares, op de volgende locatie:

```
/thredds/fileServer/opendap/rijkswaterstaat/faalkans/faalkans.nc
```

De inhoud van dit bestand kan worden ingelezen met een netCDF toolbox in bijvoorbeeld Matlab, Python of R. In OpenEarthTools is bijvoorbeeld de functie `nc_varget` beschikbaar.

Een selectie van de inhoud van het bestand ziet er als volgt uit. De faalkans is opgeslagen in de variable `'probability_failure'`. De variable `'quality_probability_failure'` bevat de indicator voor kwaliteit (paragraaf 4.4), en de variable `'change_probability_failure'` de indicator voor de eventuele handmatige wijzigingen (paragraaf 4.5).

```
dimensions:
  time = 53 ;
  alongshore = 2285 ;
  stringsize = 100 ;

variables:
  int32 id(alongshore), shape = [2285]
    id:long_name = "identifier" ;
    id:comment = "sum of area code (x1000000) and alongshore coordinate";
  double alongshore(alongshore), shape = [2285]
    alongshore:long_name = "alongshore coordinate" ;
    alongshore:units = "m" ;
    alongshore:comment = "alongshore coordinate within the 15 coastal areas as
defined by rijkswaterstaat" ;
  double time(time), shape = [53]
    time:standard_name = "time" ;
    time:axis = "T" ;
    time:units = "days since 1970-01-01 00:00 +1:00" ;
    time:comment = "measurement year" ;
  double probability_failure(time,alongshore), shape = [53 2285]
    probability_failure:long_name = "Annual probability of failure of the
first dunerow" ;
    probability_failure:units = "-" ;
    probability_failure:comment = "Computed with a Matlab implementation of
DUROS+" ;
  double quality_probability_failure(time,alongshore), shape = [53 2285]
```

```

quality_probability_failure:long_name = "Quality of probability of failure." ;
quality_probability_failure:units = "-";
quality_probability_failure:comment = "0 error, 1 poor quality, 2 not converged, 3 good quality, 99 no calculation (see report).";
double change_probability_failure(time,alongshore), shape = [53 2285]
change_probability_failure:long_name = "Indication if a probability of failure was manually altered." ;
change_probability_failure:units = "-";
change_probability_failure:comment = "0 no change, 1 interpolation in time, 2 deleted, 99 no output (see report).";

//global attributes:
:title = "Probability of failure of dunes" ;
:institution = "HKV Lijn in Water" ;
:email = "v.vuik@hkv.nl" ;
:version = "1.0" ;
:report = "HKV (2017), Faalkansendatabase duinen, report pr2063.70";

```

## 5.2 Overzicht faalkansen

Bijlage B geeft voor elk kustvak een overzicht van de faalkansen per jaar.

## 5.3 Overzicht resultaten controles

Tabel 5-1 toont de aantallen berekeningen (raai-jaar combinaties) met een bepaalde combinatie van kwaliteit en indicator voor een handmatige wijziging. Tabel 5-2 toont dezelfde getallen, maar dan procentueel. Te zien is dat 43% van de raai-jaar combinaties niet is doorgerekend (kwaliteit 99, bijlage A), of geen profiel had. Nog eens 2% van de berekeningen leidde tot een error (kwaliteit 0), vrijwel altijd veroorzaakt door zeer grillige profielvormen. Bijvoorbeeld dat in een deel van de jaren sprake was van meerdere (voor)duinen in het profiel (zie paragraaf 2.5). Ook voor deze berekeningen is dus geen faalkans berekend.

	indicator 0	indicator 1	indicator 2	indicator 99	totaal
kwaliteit 0	0	134	0	2658	2792
kwaliteit 1	4003	1076	3355	0	8434
kwaliteit 2	7441	143	244	0	7828
kwaliteit 3	49612	7	242	0	49861
kwaliteit 99	0	1	0	52189	52190
totaal	61056	1361	3841	54847	121105

Tabel 5-1 Aantal raai-jaar combinaties met een bepaalde kwaliteit (de rijen, zie paragraaf 4.4) en een bepaalde indicator voor handmatige wijzigingen (de kolommen, zie paragraaf 4.5)

In Tabel 5-3 worden de percentages getoond, waarbij de raai-jaar combinaties zonder faalkans achterwege zijn gelaten. Te zien is dat 92% van de berekende faalkansen ongewijzigd in de database terecht is gekomen (indicator 0). In 2% van de gevallen is sprake van een interpolatie tussen kansen van omliggende jaren (indicator 1). Meestal was dan sprake van een slechte of matige kwaliteit van de berekening (kwaliteit 1 of 2). In 6% van de berekeningen waren de

berekeningen voor langere reeksen van jaren van zodanig slechte kwaliteit, dat de kansen handmatig verwijderd zijn (indicator 2). Zulke kansen werden geacht niet representatief te zijn voor de daadwerkelijke faalkans van het profiel. In bepaalde raaien (veelal langs de Waddeneilanden, waar DUROS+ moeite kan hebben met de grillige profielvormen) betrof dit zelfs alle jaren.

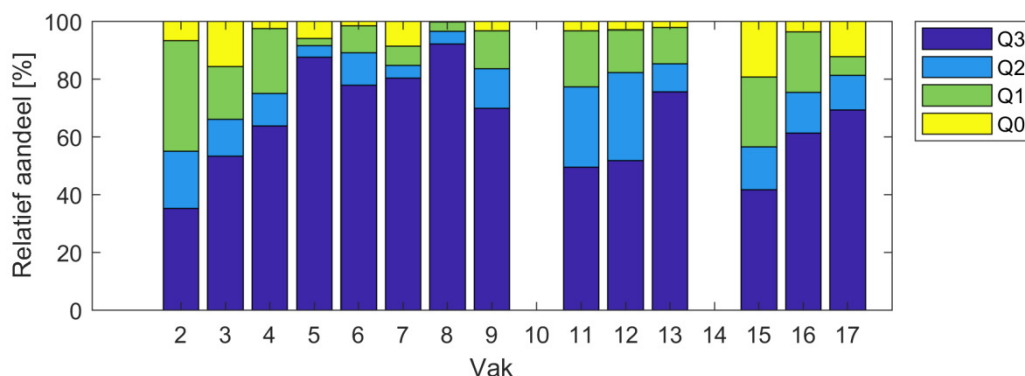
	indicator 0	indicator 1	indicator 2	indicator 99	totaal
kwaliteit 0	0%	0%	0%	2%	2%
kwaliteit 1	3%	1%	3%	0%	7%
kwaliteit 2	6%	0%	0%	0%	6%
kwaliteit 3	41%	0%	0%	0%	41%
kwaliteit 99	0%	0%	0%	43%	43%
totaal	50%	1%	3%	45%	

Tabel 5-2 Procentuele aantallen raai-jaar combinaties met een bepaalde kwaliteit (de rijen, zie paragraaf 4.4) en een bepaalde indicator voor handmatige wijzigingen (de kolommen, zie paragraaf 4.5)

	indicator 0	indicator 1	indicator 2	totaal
kwaliteit 0	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%
kwaliteit 1	6.0%	1.6%	5.1%	12.7%
kwaliteit 2	11.2%	0.2%	0.4%	11.8%
kwaliteit 3	74.9%	0.0%	0.4%	75.3%
totaal	92.2%	2.1%	5.8%	

Tabel 5-3 Procentuele aantallen raai-jaar combinaties met een bepaalde kwaliteit (de rijen, zie paragraaf 4.4) en een bepaalde indicator voor handmatige wijzigingen (de kolommen, zie paragraaf 4.5), code 99 (geen data) negerend.

Figuur 14 geeft een grafisch overzicht van de verhouding tussen de verschillende kwaliteitsindicatoren per kustvak. Te zien is dat het aandeel met de optimale kwaliteit (kwaliteit 3) het hoogste is voor de Hollandse Kust (vakken 7, 8 en 9), Texel (vak 6) en Vlieland (vak 5). Het hoogste aandeel met een slechte kwaliteit van de oorspronkelijke faalkansberekeningen (kwaliteit 1) is te vinden langs de kust van Schiermonnikoog (vak 2), Terschelling (vak 4) en Noord-Beveland (vak 15). Een deel van de bijbehorende faalkansen is vervangen of verwijderd uit de database.



Figuur 14 Overzicht van het relatieve aandeel van de verschillende kwaliteitsoordelen. Kwaliteitsoordeel 99 (geen data of niet doorgerekend) is in deze figuur buiten beschouwing gelaten.





## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

Dit rapport beschrijft hoe een database tot stand is gekomen met faalkansen voor duinen langs de gehele Nederlandse kust, voor de periode 1965-2017. Het probabilistische model dat is ontwikkeld, maakt gebruik van een nieuwe implementatie van het duinafslagmodel DUROS+. Deze implementatie levert resultaten die vrijwel identiek zijn aan de uitkomsten van Morphan, het officiële programma voor het berekenen van duinafslag. Daarnaast zijn berekende faalkansen vrijwel gelijk aan de uitkomsten van PC-Ring.

Het achterliggende duinafslagmodel DUROS+ geeft soms onrealistische afslagprofielen voor afwijkend gevormde profielen. Daarnaast kan de probabilistische rekenmethode moeite hebben met convergentie voor grillig gevormde duinen. Berekeningen zijn daarom gecontroleerd op (1) convergentie van het iteratieve rekenproces, (2) de balans tussen erosie en depositie, (3) of de waterkering daadwerkelijk op de grens van falen ligt in het ontwerppunt behorend bij de faalkans, en (4) of de trend van faalkansen in de tijd een aannemelijk verloop vertoont. Op basis van deze controles zijn aanpassingen uitgevoerd in de database, en is een kwaliteitsindicator toegevoegd aan de database.

### 6.2 Aanbevelingen

We merken op dat de resultaten van het onderzoek nog verder kunnen worden verbeterd en uitgebreid. Suggesties daarvoor zijn:

1. het verkennen van de toegevoegde waarde van het berekenen van faalkansen op basis van XBeach, met name voor duinen met een complexe geometrie;
2. het toepassen van stabielere probabilistische methoden dan FORM, met inachtneming van de rekentijd.

De database met faalkansen voor de periode 1965-2017 kan worden gebruikt voor uiteenlopende analyses. Te denken valt aan onderzoek naar:

1. de effecten van het recente suppletiebeleid op de ontwikkeling van de kust, conform de analyses voor 1965-2010 in HKV (2012);
2. de verandering van de faalkans van de waterkering door de aanleg van de Hondsbossche duinen, en de ontwikkeling van de faalkans in de tijd (2015-2017);
3. de relatie tussen de volumeverandering van de zandmotor en de ontwikkeling van de faalkans van de duinen van de aangrenzende delen van de kust;
4. de invloed van het extensiveren van het beheer van de duinen langs de Wadden op de variabiliteit van de faalkans in de ruimte en tijd.



## Referenties

- Deltares (2014). Methode voor het bepalen van HR Duinen voor WTI2017. Deltares rapport 1209433-004. Marien Boers, Pieter van Geer en Jacco Groeneweg.
- Deltares (2015). Semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor duinen ten behoeve van WTI2017. Deltares rapport 1220080-008. Ferdinand Diermanse en Pieter van Geer. December 2015.
- Deltares (2017). Basisstochasten WBI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-0007. Juni 2017.
- HKV (2005). Diepwater randvoorwaarden (ELD, EUR, YM6, SCW en SON), HKV lijn in water in opdracht van RIKZ, juli 2005.
- HKV (2011). Indicatoren voor kustlijnzorg. Analyse van indicatoren voor veiligheid en recreatie. HKV rapport pr2063.20. Wim van Balen, Vincent Vuik en Saskia van Vuren, 29 oktober 2011.
- HKV (2012). Indicatoren voor kustlijnzorg. Analyse van stormen, suppleties en kustveiligheid. HKV rapport pr2063.30. Vincent Vuik, Wim van Balen en Andries Paarlberg, 29 oktober 2012.
- Rijkswaterstaat (2006). Achtergrondrapport HR 2006 voor de Zee en Estuaria; Hydraulische Randvoorwaarden 2006; RWS RIKZ rapport 2006.029.
- ENW (2007). Technische Rapport Duinafslag - Beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006. WL | Delft Hydraulics, TU Delft en Alkyon, H4357, mei 2007.
- TNO (2003). Theoriehandleiding PC-Ring Versie 4.0 Deel C: Rekentechnieken. A.C.W.M. Vrouwenvelder en H.M.G.M. Steenbergen, 2003-CI-R0022, april 2003.
- TNO (2007). Theoriehandleiding PC-Ring Versie 5.0 Deel A: Mechanismenbeschrijvingen. H.M.G.M. Steenbergen, A.C.W.M. Vrouwenvelder en T. Koster, 2007-D-Rxxxx/A, september 2007.
- WL | Delft Hydraulics (2004). Golfstatistiek op relatief diep water 1979-2002, WL | Delft Hydraulics in opdracht van RIKZ, december 2004.

## **Bijlagen**

## Bijlage A: Overzicht van meegenomen raaien

Deze bijlage geeft weer voor welke raaien faalkansen zijn uitgerekend, aangegeven met een 'x' in de derde kolom (selectie).

Vak	Raai	Sel
2	100	
2	101	
2	102	
2	103	
2	104	
2	105	
2	106	
2	120	
2	140	
2	160	
2	180	
2	200	
2	201	
2	202	
2	203	
2	204	
2	205	
2	206	
2	220	X
2	240	X
2	260	X
2	280	X
2	300	X
2	301	X
2	302	X
2	303	X
2	304	X
2	320	X
2	340	X
2	360	X
2	380	X
2	400	X
2	401	X
2	420	X
2	440	X
2	460	X
2	480	X
2	500	X

Vak	Raai	Sel
2	501	X
2	502	X
2	520	X
2	540	X
2	560	X
2	580	X
2	600	X
2	620	X
2	640	X
2	660	X
2	680	X
2	700	X
2	720	
2	740	
2	760	
2	780	
2	800	
2	820	
2	840	
2	860	
2	880	
2	900	
2	920	
2	940	
2	960	
2	980	
2	1000	
2	1020	
2	1040	
2	1060	
2	1080	
2	1100	
2	1120	
2	1140	
2	1160	
2	1180	
2	1200	
2	1220	

Vak	Raai	Sel
2	1240	
2	1260	
2	1280	
2	1300	
2	1320	
2	1340	
2	1360	
2	1380	
2	1400	
2	1420	
2	1440	
2	1460	
2	1480	
2	1500	
2	1520	
2	1540	
2	1560	
2	1580	
2	1600	
2	1601	
2	1602	
2	1603	
2	1604	
2	1605	
2	1606	
2	1607	
2	1608	
2	1609	
2	1610	
2	1611	
2	1612	
2	1613	
2	1614	
2	1615	
2	1616	
2	1617	
2	1618	
2	1620	

Vak	Raai	Sel
2	1640	
2	1660	
2	1680	
2	1700	
2	1720	
2	1740	
2	1760	
2	1780	
2	1800	
2	1820	
2	1840	
2	1860	
2	1880	
2	1900	
2	1920	
2	1940	
2	1960	
2	1980	
2	2000	
2	2001	
2	2002	
2	2003	
2	2004	
2	2005	
2	2006	
2	2007	
2	2008	
2	2009	
2	2010	
2	2011	
2	2012	
2	2013	
2	2014	
2	2015	
2	2016	
2	2017	
2	2018	
2	2019	

Vak	Raai	Sel
3	100	X
3	101	X
3	102	X
3	103	X
3	104	X
3	120	X
3	140	X
3	200	X
3	201	X
3	202	X
3	203	X
3	204	X
3	220	X
3	240	X
3	260	X
3	280	X
3	300	X
3	301	X
3	302	X
3	303	X
3	304	X
3	320	X
3	340	X
3	360	X
3	380	X
3	400	X
3	401	X
3	402	X
3	420	X
3	440	X
3	460	X
3	480	X
3	500	X
3	520	X
3	540	X
3	560	X
3	580	X
3	600	X
3	620	X
3	640	X
3	660	X
3	680	X
3	700	X
3	720	X

Vak	Raai	Sel
3	740	X
3	760	X
3	780	X
3	800	X
3	820	X
3	840	X
3	860	X
3	880	X
3	900	X
3	920	X
3	940	X
3	960	X
3	980	X
3	1000	X
3	1020	X
3	1040	X
3	1060	X
3	1080	X
3	1100	X
3	1120	X
3	1140	X
3	1160	X
3	1180	X
3	1200	X
3	1220	X
3	1240	X
3	1260	X
3	1280	X
3	1300	X
3	1320	X
3	1340	X
3	1360	X
3	1380	X
3	1400	X
3	1420	X
3	1440	X
3	1460	X
3	1480	X
3	1500	X
3	1520	X
3	1540	X
3	1560	X
3	1580	X
3	1600	X

Vak	Raai	Sel
3	1620	X
3	1640	X
3	1660	X
3	1680	X
3	1700	X
3	1720	X
3	1740	X
3	1760	X
3	1780	X
3	1800	X
3	1820	X
3	1840	X
3	1860	X
3	1880	X
3	1900	X
3	1920	X
3	1940	X
3	1960	X
3	1980	X
3	2000	X
3	2020	X
3	2040	X
3	2060	X
3	2080	X
3	2100	X
3	2120	
3	2140	
3	2160	
3	2180	
3	2200	
3	2220	
3	2240	
3	2260	
3	2280	
3	2300	
3	2320	
3	2340	
3	2360	
3	2380	
3	2400	
3	2420	
3	2440	
3	2460	
3	2480	

Vak	Raai	Sel
3	2500	
3	2501	
3	2502	
3	2503	
3	2504	
3	2505	
3	2506	
3	2507	
3	2508	
3	2509	
3	2510	
3	2511	
3	2512	
3	2513	
3	2514	
3	2515	
3	2516	
3	4600	
3	4620	
3	4640	
3	4660	
3	4680	
3	4700	
3	4720	
3	4740	
3	4760	
3	4780	
3	4800	
3	4820	
3	4840	
3	4860	
3	4880	
3	4900	
3	4901	
3	4902	
3	4916	
3	4928	
3	4941	
3	4953	
3	4966	
4	0	
4	20	
4	40	
4	60	

Vak	Raai	Sel
4	80	
4	100	
4	101	
4	102	
4	103	
4	104	
4	105	
4	106	
4	107	
4	108	
4	120	
4	140	
4	160	
4	180	
4	200	
4	220	
4	240	
4	260	
4	280	
4	300	
4	320	
4	340	X
4	360	X
4	380	X
4	400	X
4	420	X
4	440	X
4	460	X
4	480	X
4	500	X
4	501	X
4	502	X
4	503	X
4	504	X
4	520	X
4	540	X
4	560	X
4	580	X
4	600	X
4	620	X
4	640	X
4	660	X
4	680	X
4	700	X

Vak	Raai	Sel
4	720	X
4	740	X
4	760	X
4	780	X
4	800	X
4	820	X
4	840	X
4	860	X
4	880	X
4	900	X
4	920	X
4	940	X
4	960	X
4	980	X
4	1000	X
4	1020	X
4	1040	X
4	1060	X
4	1080	X
4	1100	X
4	1120	X
4	1140	X
4	1160	X
4	1180	X
4	1200	X
4	1220	X
4	1240	X
4	1260	X
4	1280	X
4	1300	X
4	1320	X
4	1340	X
4	1360	X
4	1380	X
4	1400	X
4	1420	X
4	1440	X
4	1460	X
4	1480	X
4	1500	X
4	1520	X
4	1540	X
4	1560	X
4	1580	X

Vak	Raai	Sel
4	1600	X
4	1620	X
4	1640	X
4	1660	X
4	1680	X
4	1700	X
4	1720	X
4	1740	X
4	1760	X
4	1780	X
4	1800	X
4	1820	X
4	1840	X
4	1860	X
4	1880	X
4	1900	X
4	1920	X
4	1940	X
4	1960	X
4	1980	X
4	2000	X
4	2020	X
4	2040	X
4	2060	X
4	2080	X
4	2100	X
4	2120	X
4	2140	X
4	2160	X
4	2180	X
4	2200	X
4	2220	X
4	2240	X
4	2260	X
4	2280	X
4	2300	X
4	2320	X
4	2340	X
4	2360	X
4	2380	X
4	2400	
4	2420	
4	2440	
4	2460	

Vak	Raai	Sel
4	2480	
4	2500	
4	2520	
4	2540	
4	2560	
4	2580	
4	2600	
4	2620	
4	2640	
4	2660	
4	2680	
4	2700	
4	2720	
4	2740	
4	2760	
4	2780	
4	2800	
4	2820	
4	2840	
4	2860	
4	2861	
4	2862	
4	2863	
4	2864	
4	2865	
4	2866	
4	2867	
4	2868	
4	2869	
4	2870	
4	2880	
4	2881	
4	2900	
4	2901	
4	2902	
4	2903	
4	2904	
4	2905	
4	2920	
4	2921	
4	2940	
4	2941	
4	2960	
4	2961	

Vak	Raai	Sel
4	2962	
4	2963	
4	2964	
4	2965	
4	2966	
4	2980	
4	3000	
4	3001	
4	3002	
4	3003	
4	3004	
4	3100	
4	3120	
4	3140	
4	3160	
4	3180	
4	3200	
4	3220	
4	3240	
4	3260	
4	3280	
4	3300	
4	5902	
4	5903	
4	5904	
4	5905	
4	5906	
4	5907	
4	5908	
4	5909	
4	5910	
4	5911	
4	5912	
4	5913	
4	5914	
4	5915	
4	5916	
5	3300	
5	3320	
5	3340	
5	3360	
5	3380	
5	3400	
5	3420	

Vak	Raai	Sel
5	3440	
5	3460	
5	3480	
5	3500	
5	3501	
5	3502	
5	3503	
5	3504	
5	3505	
5	3506	
5	3507	
5	3508	
5	3509	
5	3510	
5	3511	
5	3512	
5	3513	
5	3514	
5	3515	
5	3516	
5	3520	
5	3540	
5	3560	
5	3580	
5	3600	
5	3620	
5	3640	
5	3660	
5	3680	
5	3700	
5	3720	
5	3740	
5	3760	
5	3780	
5	3800	
5	3820	
5	3840	
5	3860	
5	3880	
5	3900	
5	3920	
5	3940	
5	3960	
5	3980	

Vak	Raai	Sel
5	4000	
5	4020	
5	4040	
5	4060	
5	4082	
5	4086	
5	4098	
5	4111	
5	4115	
5	4128	
5	4140	
5	4144	
5	4158	
5	4170	
5	4174	
5	4187	
5	4200	
5	4204	
5	4217	X
5	4239	X
5	4253	X
5	4266	X
5	4279	X
5	4293	X
5	4307	X
5	4322	X
5	4340	X
5	4358	X
5	4377	X
5	4395	X
5	4414	X
5	4432	X
5	4451	X
5	4467	X
5	4485	X
5	4500	X
5	4519	X
5	4537	X
5	4554	X
5	4572	X
5	4591	X
5	4609	X
5	4627	X
5	4645	X

Vak	Raai	Sel
5	4663	X
5	4681	X
5	4700	X
5	4718	X
5	4735	X
5	4753	X
5	4772	X
5	4789	X
5	4808	X
5	4825	X
5	4844	X
5	4862	X
5	4880	X
5	4898	X
5	4915	X
5	4933	X
5	4952	X
5	4970	X
5	4988	X
5	4995	X
5	5005	X
5	5023	X
5	5041	X
5	5059	X
5	5077	X
5	5095	X
5	5113	X
5	5129	X
5	5146	X
5	5165	X
5	5175	X
5	5185	X
5	5200	X
5	5212	X
5	5227	X
5	5231	X
5	5250	X
5	5267	X
5	5271	X
5	5289	X
5	5307	X
5	5311	X
5	5329	X
5	5345	X



Vak	Raai	Sel
5	5353	X
5	5360	X
5	5367	
5	5371	
5	5374	
5	5379	
5	5384	
5	5390	
5	5395	
5	5400	
5	5405	
5	5410	
5	5415	
5	5420	
5	5440	
5	5460	
5	5480	
6	416	
6	440	
6	460	
6	480	
6	500	
6	520	
6	540	
6	560	
6	580	
6	600	
6	601	
6	602	
6	603	
6	604	
6	605	
6	606	
6	607	
6	608	
6	609	
6	700	
6	701	
6	702	
6	703	
6	704	
6	705	
6	706	
6	707	

Vak	Raai	Sel
6	708	
6	709	
6	800	
6	820	
6	840	
6	860	
6	880	
6	900	X
6	915	X
6	920	X
6	930	X
6	940	X
6	945	X
6	960	X
6	976	X
6	980	
6	1000	X
6	1001	X
6	1003	
6	1013	X
6	1033	X
6	1043	
6	1053	X
6	1073	X
6	1083	
6	1093	X
6	1098	
6	1100	
6	1102	
6	1108	X
6	1118	
6	1128	X
6	1148	X
6	1158	
6	1168	X
6	1176	
6	1178	
6	1180	
6	1190	X
6	1200	
6	1210	X
6	1230	X
6	1240	
6	1249	X

Vak	Raai	Sel
6	1269	X
6	1280	
6	1289	X
6	1298	X
6	1302	
6	1312	X
6	1332	X
6	1342	
6	1352	X
6	1372	X
6	1382	
6	1392	X
6	1410	X
6	1420	
6	1430	X
6	1450	X
6	1460	
6	1470	X
6	1490	X
6	1500	
6	1506	X
6	1526	X
6	1536	
6	1546	X
6	1566	X
6	1576	
6	1586	X
6	1604	X
6	1614	
6	1624	X
6	1644	X
6	1654	
6	1664	X
6	1684	X
6	1694	X
6	1703	X
6	1713	
6	1723	X
6	1733	
6	1743	X
6	1753	
6	1763	X
6	1773	
6	1778	X

Vak	Raai	Sel
6	1793	X
6	1813	X
6	1833	X
6	1853	X
6	1873	X
6	1893	X
6	1912	X
6	1932	X
6	1952	X
6	1972	X
6	1992	X
6	2011	X
6	2031	X
6	2051	X
6	2071	X
6	2091	X
6	2111	X
6	2131	X
6	2151	X
6	2171	X
6	2191	X
6	2211	X
6	2231	X
6	2251	X
6	2271	X
6	2291	X
6	2300	X
6	2320	X
6	2340	X
6	2360	X
6	2380	X
6	2400	X
6	2420	X
6	2440	X
6	2460	
6	2480	
6	2500	
6	2520	
6	2540	X
6	2560	X
6	2580	X
6	2600	X
6	2620	X
6	2640	X

Vak	Raai	Sel
6	2660	X
6	2680	X
6	2700	X
6	2720	X
6	2740	X
6	2760	X
6	2780	X
6	2800	X
6	2820	X
6	2840	X
6	2860	X
6	2880	X
6	2900	X
6	2901	X
6	2917	X
6	2937	X
6	2957	X
6	2977	X
6	3001	X
6	3021	X
6	3041	X
6	3061	X
6	3081	X
6	3100	
6	3101	
6	3102	
6	3103	
6	3104	
6	3105	
6	3106	
6	3107	
6	3108	
6	3109	
6	3110	
6	3200	
6	3212	
6	3232	
6	3252	
6	3272	
6	3292	
6	3312	
6	3332	
6	3352	
6	3372	

Vak	Raai	Sel
6	3390	
6	3412	
6	3432	
6	3452	
7	0	
7	20	
7	30	
7	40	
7	50	
7	60	
7	70	
7	90	
7	110	
7	130	
7	150	X
7	170	X
7	190	X
7	210	X
7	230	X
7	249	X
7	269	X
7	289	X
7	308	X
7	328	X
7	348	X
7	369	X
7	390	X
7	409	X
7	429	X
7	449	X
7	469	X
7	489	X
7	508	X
7	528	X
7	548	X
7	568	X
7	588	X
7	608	X
7	628	X
7	648	X
7	668	X
7	689	X
7	708	X
7	728	X

Vak	Raai	Sel
7	748	X
7	768	X
7	789	X
7	808	X
7	827	X
7	848	X
7	869	X
7	889	X
7	908	X
7	928	X
7	948	X
7	968	X
7	984	X
7	994	X
7	1000	X
7	1016	X
7	1023	X
7	1031	X
7	1047	X
7	1054	X
7	1062	X
7	1078	X
7	1085	X
7	1093	X
7	1108	X
7	1115	X
7	1123	X
7	1137	X
7	1145	X
7	1152	X
7	1167	X
7	1175	X
7	1182	X
7	1197	X
7	1205	X
7	1213	X
7	1228	X
7	1235	X
7	1243	X
7	1258	X
7	1265	X
7	1273	X
7	1288	X
7	1295	X

Vak	Raai	Sel
7	1303	X
7	1320	X
7	1340	X
7	1360	X
7	1381	X
7	1401	X
7	1421	X
7	1442	X
7	1462	X
7	1483	X
7	1503	X
7	1524	X
7	1544	X
7	1565	X
7	1585	X
7	1606	X
7	1626	X
7	1647	X
7	1668	X
7	1688	X
7	1708	X
7	1729	X
7	1748	X
7	1755	X
7	1763	X
7	1777	X
7	1784	X
7	1791	X
7	1808	X
7	1827	X
7	1844	X
7	1862	X
7	1880	X
7	1896	X
7	1903	X
7	1910	X
7	1925	X
7	1932	X
7	1940	X
7	1955	X
7	1962	X
7	1969	X
7	1983	X
7	1990	X

Vak	Raai	Sel
7	1996	X
7	2009	X
7	2015	X
7	2023	X
7	2041	X
7	2058	X
7	2071	X
7	2083	X
7	2100	X
7	2111	
7	2123	X
7	2134	
7	2146	X
7	2158	
7	2173	X
7	2187	
7	2200	X
7	2212	
7	2225	X
7	2238	
7	2251	X
7	2263	X
7	2283	X
7	2300	X
7	2317	X
7	2332	X
7	2345	X
7	2358	X
7	2371	X
7	2386	X
7	2400	X
7	2415	X
7	2427	X
7	2440	X
7	2454	X
7	2469	X
7	2487	X
7	2500	X
7	2512	X
7	2531	X
7	2557	X
7	2582	X
7	2600	X
7	2606	X

Vak	Raai	Sel
7	2629	X
7	2654	X
7	2677	X
7	2700	X
7	2716	X
7	2732	X
7	2747	X
7	2764	X
7	2782	X
7	2800	X
7	2816	X
7	2832	X
7	2847	X
7	2864	X
7	2882	X
7	2900	X
7	2923	X
7	2935	X
7	2945	X
7	2965	X
7	2987	X
7	3000	X
7	3025	X
7	3050	X
7	3075	X
7	3100	X
7	3125	X
7	3150	X
7	3175	X
7	3200	X
7	3225	X
7	3250	X
7	3275	X
7	3300	X
7	3325	X
7	3350	X
7	3375	X
7	3400	X
7	3425	X
7	3450	X
7	3475	X
7	3500	X
7	3525	X
7	3550	X

Vak	Raai	Sel
7	3575	X
7	3600	X
7	3625	X
7	3650	X
7	3675	X
7	3700	X
7	3725	X
7	3750	X
7	3775	X
7	3800	X
7	3825	X
7	3850	X
7	3875	X
7	3900	X
7	3925	X
7	3950	X
7	3975	X
7	4000	X
7	4025	X
7	4050	X
7	4075	X
7	4100	X
7	4125	X
7	4150	X
7	4175	X
7	4200	X
7	4225	X
7	4250	X
7	4275	X
7	4300	X
7	4325	X
7	4350	X
7	4375	X
7	4400	X
7	4425	X
7	4450	X
7	4475	X
7	4500	X
7	4525	X
7	4550	X
7	4575	X
7	4600	X
7	4625	X
7	4650	X

Vak	Raai	Sel
7	4675	X
7	4700	X
7	4725	X
7	4750	X
7	4775	X
7	4800	X
7	4825	X
7	4850	X
7	4875	X
7	4900	X
7	4925	X
7	4950	X
7	4975	X
7	5000	X
7	5025	X
7	5050	X
7	5075	X
7	5100	X
7	5125	X
7	5150	X
7	5175	X
7	5200	X
7	5225	X
7	5250	X
7	5275	X
7	5300	X
7	5325	X
7	5350	X
7	5375	X
7	5400	X
7	5425	X
7	5450	X
7	5475	X
7	5500	
8	5625	X
8	5650	X
8	5675	X
8	5700	X
8	5725	X
8	5750	X
8	5775	X
8	5800	X
8	5825	X
8	5850	X

Vak	Raai	Sel
8	5875	X
8	5900	X
8	5925	X
8	5950	X
8	5975	X
8	6000	X
8	6025	X
8	6050	X
8	6075	X
8	6100	X
8	6125	X
8	6150	X
8	6175	X
8	6200	X
8	6225	X
8	6250	X
8	6275	X
8	6300	X
8	6325	X
8	6350	X
8	6375	X
8	6400	X
8	6425	X
8	6450	X
8	6475	X
8	6500	X
8	6525	X
8	6550	X
8	6575	X
8	6600	X
8	6625	X
8	6650	X
8	6675	X
8	6700	X
8	6725	X
8	6750	X
8	6775	X
8	6800	X
8	6825	X
8	6850	X
8	6875	X
8	6900	X
8	6925	X
8	6950	X

Vak	Raai	Sel
8	6975	X
8	7000	X
8	7025	X
8	7050	X
8	7075	X
8	7100	X
8	7125	X
8	7150	X
8	7175	X
8	7200	X
8	7225	X
8	7250	X
8	7275	X
8	7300	X
8	7325	X
8	7350	X
8	7375	X
8	7400	X
8	7425	X
8	7450	X
8	7475	X
8	7500	X
8	7525	X
8	7550	X
8	7575	X
8	7600	X
8	7625	X
8	7650	X
8	7675	X
8	7700	X
8	7725	X
8	7750	X
8	7775	X
8	7800	X
8	7825	X
8	7850	X
8	7875	X
8	7900	X
8	7925	X
8	7950	X
8	7975	X
8	8000	X
8	8025	X
8	8050	X

Vak	Raai	Sel
8	8075	X
8	8100	X
8	8125	X
8	8150	X
8	8175	X
8	8200	X
8	8225	X
8	8250	X
8	8275	X
8	8300	X
8	8325	X
8	8350	X
8	8375	X
8	8400	X
8	8425	X
8	8450	X
8	8475	X
8	8500	X
8	8525	X
8	8550	X
8	8575	X
8	8600	X
8	8625	X
8	8650	X
8	8675	X
8	8700	X
8	8725	X
8	8750	X
8	8775	X
8	8800	X
8	8825	X
8	8850	X
8	8875	X
8	8900	X
8	8925	X
8	8950	X
8	8975	X
8	9000	X
8	9025	X
8	9050	X
8	9075	X
8	9100	X
8	9125	X
8	9150	X

Vak	Raai	Sel
8	9175	X
8	9200	X
8	9225	X
8	9250	X
8	9275	X
8	9300	X
8	9325	X
8	9350	X
8	9375	X
8	9400	X
8	9425	X
8	9450	X
8	9475	X
8	9500	X
8	9525	X
8	9550	X
8	9575	X
8	9600	X
8	9625	X
8	9650	X
8	9675	X
8	9700	X
8	9725	X
9	9740	X
9	9750	X
9	9770	X
9	9795	X
9	9807	X
9	9813	X
9	9830	X
9	9847	X
9	9853	X
9	9875	X
9	9897	X
9	9903	X
9	9925	X
9	9947	X
9	9953	X
9	9975	X
9	9997	X
9	10003	X
9	10025	X
9	10047	X
9	10053	X

Vak	Raai	Sel
9	10075	X
9	10097	X
9	10103	X
9	10125	X
9	10140	X
9	10193	
9	10197	
9	10200	X
9	10217	X
9	10235	X
9	10258	X
9	10264	X
9	10288	X
9	10309	X
9	10315	X
9	10338	X
9	10361	X
9	10367	X
9	10391	X
9	10414	X
9	10420	X
9	10437	X
9	10455	X
9	10461	X
9	10468	X
9	10488	X
9	10507	X
9	10527	X
9	10547	X
9	10567	X
9	10592	X
9	10605	X
9	10611	X
9	10623	X
9	10635	X
9	10641	X
9	10653	X
9	10665	X
9	10671	X
9	10683	X
9	10695	X
9	10700	X
9	10701	X
9	10713	X

Vak	Raai	Sel
9	10724	X
9	10725	X
9	10730	X
9	10731	X
9	10743	X
9	10754	X
9	10755	X
9	10760	X
9	10761	X
9	10773	X
9	10784	X
9	10785	X
9	10790	X
9	10791	X
9	10807	X
9	10823	X
9	10829	X
9	10845	X
9	10861	X
9	10867	X
9	10883	X
9	10897	X
9	10898	X
9	10903	X
9	10904	X
9	10920	X
9	10936	X
9	10942	X
9	10958	X
9	10974	X
9	10980	X
9	10996	X
9	11012	X
9	11018	X
9	11034	X
9	11050	X
9	11056	X
9	11072	X
9	11088	X
9	11094	X
9	11109	X
9	11125	X
9	11131	X
9	11147	X

Vak	Raai	Sel
9	11163	X
9	11169	X
9	11176	X
9	11196	X
9	11221	X
9	11244	X
9	11263	X
9	11282	X
9	11301	X
9	11319	X
9	11338	X
9	11356	X
9	11375	X
9	11394	X
9	11399	X
9	11412	X
9	11431	X
9	11450	X
9	11469	X
9	11488	X
9	11509	X
9	11510	X
9	11535	X
9	11560	X
9	11586	X
9	11611	X
9	11636	X
9	11662	X
9	11687	X
9	11700	X
9	11725	X
9	11750	X
9	11775	X
9	11800	X
9	11825	X
9	11850	X
10	0	
10	13	
10	25	
10	38	
10	50	
10	68	
10	75	
10	88	

Vak	Raai	Sel
10	100	
10	120	
10	140	
10	160	
10	180	
10	200	
10	220	
10	240	
10	260	
10	280	
10	300	
10	320	
10	340	
10	360	
10	380	
10	400	
10	420	
10	440	
10	460	
10	480	
10	500	
10	520	
10	540	
10	560	
10	580	
10	600	
10	620	
10	640	
10	641	
10	660	
10	661	
10	680	
10	681	
10	700	
10	701	
10	720	
10	721	
10	740	
10	741	
10	760	
10	761	
10	780	
10	781	
10	800	

Vak	Raai	Sel
10	801	
10	820	
10	821	
10	840	
10	841	
10	860	
10	861	
10	880	
10	881	
10	895	
10	900	
10	901	
10	910	
10	920	
10	921	
10	930	
10	940	
10	941	
10	950	
10	960	
10	961	
10	970	
10	976	
10	980	
10	989	
10	990	
10	1000	
10	1002	
10	1010	
10	1015	
10	1020	
10	1028	
10	1040	
10	1041	
10	1054	
10	1060	
10	1067	
10	1080	
10	1081	
10	1093	
10	1100	
10	1106	
10	1119	
10	1120	

Vak	Raai	Sel
10	1132	
10	1140	
10	1143	
10	1147	
10	1150	
10	1160	
10	1170	
10	1180	
10	1190	
10	1200	
10	1210	
10	1220	
10	1230	
10	1240	
10	1250	
10	1260	
10	1270	
10	1280	
10	1290	
10	1300	
10	1310	
10	1320	
10	1330	
10	1350	
10	1370	
10	1390	
10	1410	
11	400	
11	407	
11	420	
11	440	
11	460	
11	480	
11	500	
11	520	
11	540	
11	560	
11	580	
11	620	
11	640	
11	660	
11	680	
11	700	X
11	720	X

Vak	Raai	Sel
11	740	X
11	760	X
11	780	X
11	800	X
11	820	X
11	840	X
11	860	X
11	880	X
11	900	X
11	920	X
11	940	X
11	960	X
11	980	
11	1000	X
11	1001	X
11	1002	X
11	1003	X
11	1004	X
11	1020	
11	1040	X
11	1060	X
11	1080	X
11	1100	X
11	1120	X
11	1140	X
11	1160	X
11	1180	X
11	1200	X
11	1220	X
11	1240	X
11	1260	X
11	1280	X
11	1300	X
11	1320	X
11	1340	X
11	1360	X
11	1380	X
11	1400	X
11	1420	X
11	1440	X
11	1460	X
11	1480	X
11	1500	X
11	1501	X

Vak	Raai	Sel
11	1520	X
11	1540	X
11	1560	X
11	1580	X
11	1600	X
11	1601	
11	1620	
11	1640	
11	1660	
11	1680	
11	1700	
11	1720	
11	1740	
11	1760	
11	1780	
11	1800	
11	1801	
11	1820	
11	1830	
12	280	X
12	300	X
12	320	X
12	325	X
12	330	X
12	350	X
12	375	X
12	400	X
12	425	X
12	450	X
12	475	X
12	500	X
12	525	X
12	545	X
12	550	X
12	555	X
12	575	X
12	600	X
12	625	X
12	650	X
12	675	X
12	700	X
12	725	X
12	750	X
12	775	X

Vak	Raai	Sel
12	800	X
12	825	X
12	850	X
12	875	X
12	900	X
12	925	X
12	950	X
12	975	X
12	1000	X
12	1025	X
12	1050	X
12	1075	X
12	1100	X
12	1125	X
12	1150	X
12	1175	X
12	1200	X
12	1225	X
12	1250	X
12	1275	X
12	1300	X
12	1325	X
12	1350	X
12	1375	X
12	1400	X
12	1425	X
12	1450	X
12	1475	X
12	1500	X
12	1501	X
12	1502	X
12	1525	X
12	1550	X
12	1575	X
12	1600	X
12	1601	X
12	1602	X
12	1625	X
12	1650	X
12	1675	X
12	1700	X
12	1701	X
12	1702	X
12	1725	X

Vak	Raai	Sel
12	1750	X
12	1775	X
12	1800	X
12	1801	X
12	1802	X
12	1825	X
12	1850	X
12	1875	X
12	1900	X
12	1901	
12	1902	
12	1925	
12	1950	
12	1975	
12	2000	
12	2020	
12	2040	
12	2060	
12	2080	
12	2100	
12	2120	
12	2140	
12	2160	
12	2180	
12	2200	
12	2220	
12	2240	
12	2260	
12	2280	
12	2300	
12	2320	
12	2340	
12	2360	
12	2380	
12	2400	
12	2420	
12	2440	
12	2460	
12	2480	
12	2495	
12	2510	
12	2525	
13	74	X
13	84	X

Vak	Raai	Sel
13	95	X
13	106	X
13	117	X
13	126	X
13	133	X
13	141	X
13	148	X
13	155	X
13	162	X
13	172	X
13	184	X
13	197	X
13	209	X
13	222	X
13	236	X
13	251	X
13	267	X
13	284	X
13	301	X
13	319	X
13	337	X
13	357	X
13	377	X
13	397	X
13	417	X
13	437	X
13	454	X
13	469	X
13	484	X
13	499	X
13	514	X
13	529	X
13	544	X
13	559	X
13	574	X
13	589	X
13	604	X
13	619	X
13	634	X
13	649	X
13	664	X
13	679	X
13	694	X
13	710	X

Vak	Raai	Sel
13	726	X
13	742	X
13	759	X
13	779	X
13	799	X
13	819	X
13	839	X
13	859	X
13	879	X
13	899	X
13	919	X
13	939	X
13	959	X
13	979	X
13	982	X
13	984	X
13	1004	X
13	1024	X
13	1044	X
13	1064	X
13	1084	X
13	1104	X
13	1124	X
13	1144	X
13	1164	X
13	1184	X
13	1196	X
13	1208	X
13	1228	X
13	1248	X
13	1268	X
13	1288	X
13	1308	X
13	1322	X
13	1335	X
13	1355	X
13	1375	X
13	1395	X
13	1411	X
13	1425	X
13	1445	X
13	1465	X
13	1485	X
13	1505	X

Vak	Raai	Sel
13	1525	X
13	1537	X
13	1548	X
13	1568	X
13	1588	X
13	1608	X
13	1628	X
13	1648	X
13	1668	X
13	1688	X
13	1697	X
13	1706	X
13	1719	X
13	1733	X
13	1742	X
13	1750	X
13	1760	X
13	1770	X
13	1781	X
13	1800	X
14	20	
14	40	
14	60	
14	80	
14	100	
14	120	
14	140	
14	160	
14	180	
14	200	
14	220	
14	240	
14	260	
14	280	
14	300	
14	320	
14	340	
14	360	
14	380	
14	400	
14	420	
14	440	
14	460	
14	480	

Vak	Raai	Sel
14	500	
14	520	
14	540	
14	560	
14	580	
14	600	
14	620	
14	630	
14	631	
14	632	
14	633	
14	634	
14	640	
14	660	
14	680	
14	700	
15	0	
15	20	
15	40	
15	60	
15	70	
15	80	
15	100	
15	120	
15	140	
15	160	
15	180	
15	200	X
15	220	X
15	240	X
15	260	X
15	280	X
15	300	X
15	320	
15	340	
15	360	
15	380	
15	400	
15	420	
15	440	
15	460	
15	480	
15	500	
15	520	

Vak	Raai	Sel
16	540	X
16	560	X
16	580	X
16	600	X
16	620	X
16	640	X
16	660	X
16	670	X
16	680	X
16	700	X
16	720	X
16	740	X
16	760	X
16	780	X
16	800	X
16	820	X
16	840	X
16	860	X
16	880	X
16	900	X
16	920	X
16	940	X
16	950	X
16	965	X
16	985	X
16	1005	X
16	1025	X
16	1045	X
16	1065	X
16	1085	X
16	1105	X
16	1125	X
16	1145	X
16	1165	X
16	1185	X
16	1205	X
16	1225	X
16	1245	X
16	1265	X
16	1286	X
16	1306	X
16	1326	X
16	1346	X
16	1366	X

Vak	Raai	Sel
16	1386	X
16	1406	X
16	1428	X
16	1448	X
16	1469	X
16	1489	X
16	1509	X
16	1530	X
16	1550	X
16	1571	X
16	1591	X
16	1612	X
16	1632	X
16	1653	X
16	1673	X
16	1694	X
16	1714	X
16	1735	X
16	1755	X
16	1775	X
16	1795	X
16	1814	X
16	1832	X
16	1850	X
16	1870	X
16	1883	X
16	1894	X
16	1905	X
16	1917	X
16	1927	X
16	1938	X
16	1948	X
16	1959	X
16	1970	X
16	1990	X
16	2000	X
16	2015	X
16	2030	X
16	2040	X
16	2060	X
16	2080	X
16	2100	X
16	2120	X
16	2133	X



Vak	Raai	Sel
16	2143	X
16	2153	X
16	2165	X
16	2180	X
16	2185	X
16	2195	X
16	2215	X
16	2225	X
16	2235	X
16	2255	X
16	2275	X
16	2287	X
16	2300	X
16	2312	X
16	2325	X
16	2337	X
16	2349	X
16	2362	X
16	2374	X
16	2386	X
16	2397	X
16	2408	X
16	2419	X
16	2430	X
16	2443	X
16	2456	X
16	2470	X
16	2484	X
16	2499	X
16	2513	X
16	2527	X
16	2541	X
16	2555	X
16	2569	X
16	2583	X
16	2597	X
16	2610	X
16	2622	X
16	2635	X
16	2647	X
16	2660	X
16	2677	X
16	2694	X
16	2713	X

Vak	Raai	Sel
16	2730	X
16	2750	X
16	2770	X
16	2790	X
16	2810	X
16	2830	X
16	2850	X
16	2870	X
16	2890	X
16	2910	X
16	2930	X
16	2950	X
16	2970	X
16	2990	X
16	3010	X
16	3033	X
16	3059	X
16	3084	X
16	3110	X
16	3134	X
16	3153	X
16	3165	X
16	3177	X
16	3189	X
16	3202	X
16	3215	X
16	3226	X
16	3239	X
16	3251	X
16	3264	X
16	3276	X
16	3289	X
16	3301	X
16	3320	X
16	3340	X
16	3360	X
16	3380	X
16	3400	
16	3420	
16	3440	
16	3458	
16	3476	
16	3494	
16	3510	

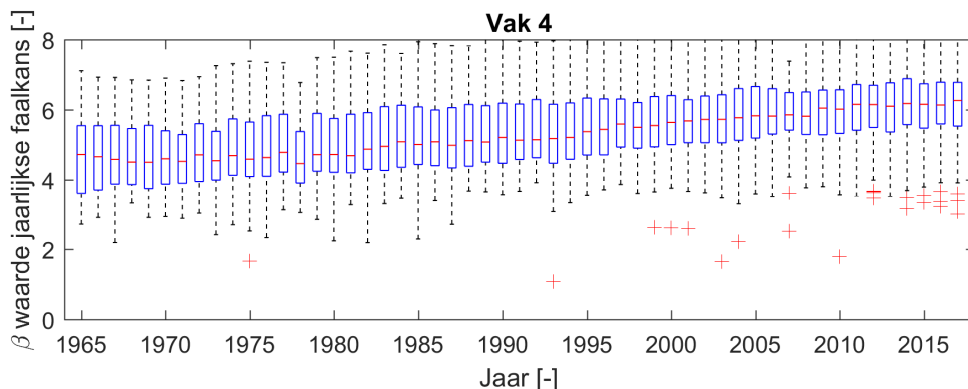
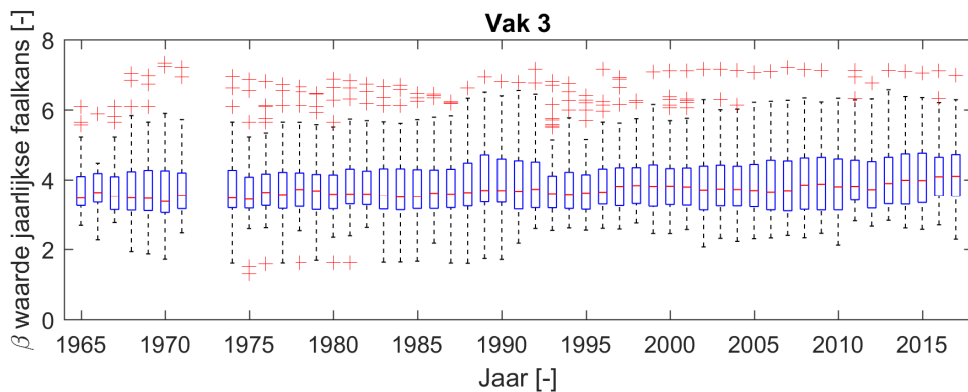
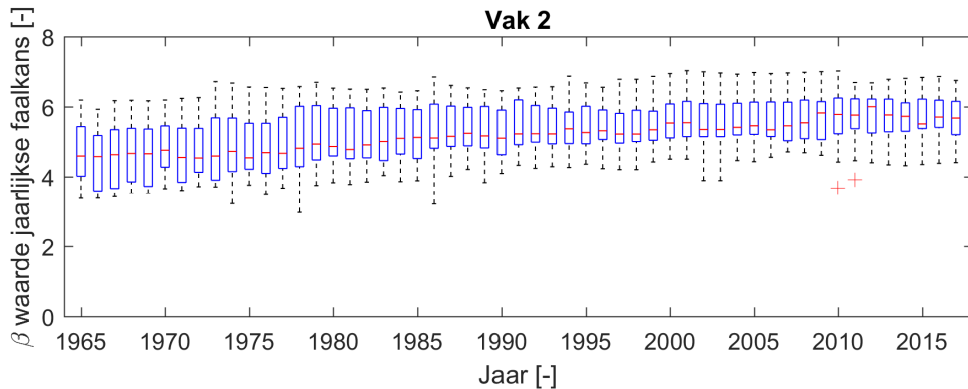
Vak	Raai	Sel
16	3526	
16	3540	
16	3547	
16	3555	
16	3562	
16	3570	
16	3590	
16	3610	
16	3630	
16	3650	
16	3660	
16	3670	
16	3680	
16	3690	
16	3700	
16	3710	
16	3720	
16	3730	
16	3750	
17	11	X
17	31	X
17	47	X
17	51	X
17	58	X
17	71	X
17	138	
17	141	
17	146	
17	161	
17	171	
17	188	
17	208	X
17	230	X
17	251	X
17	271	
17	290	
17	308	
17	324	
17	336	
17	352	
17	373	
17	396	
17	413	
17	421	

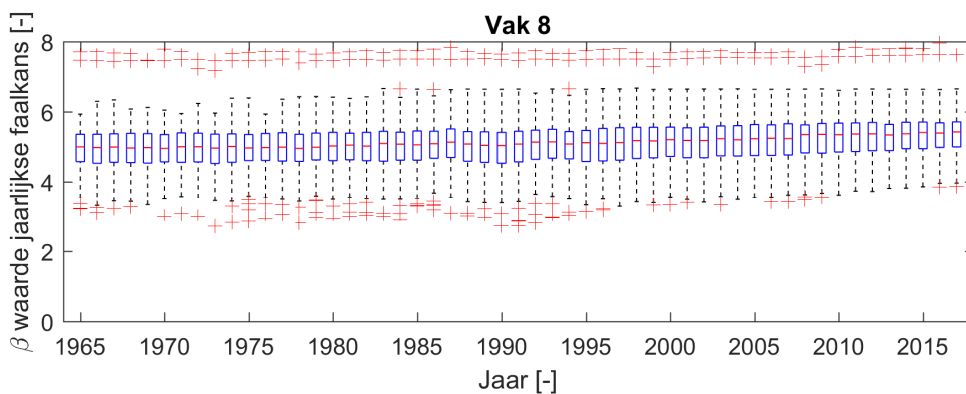
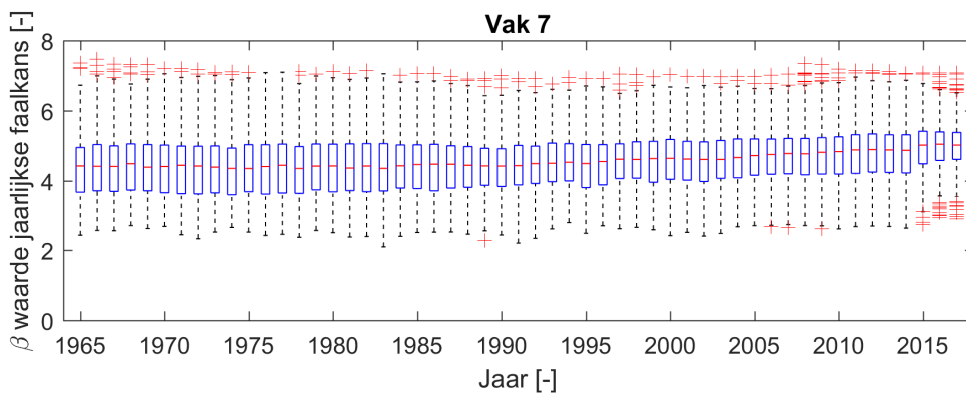
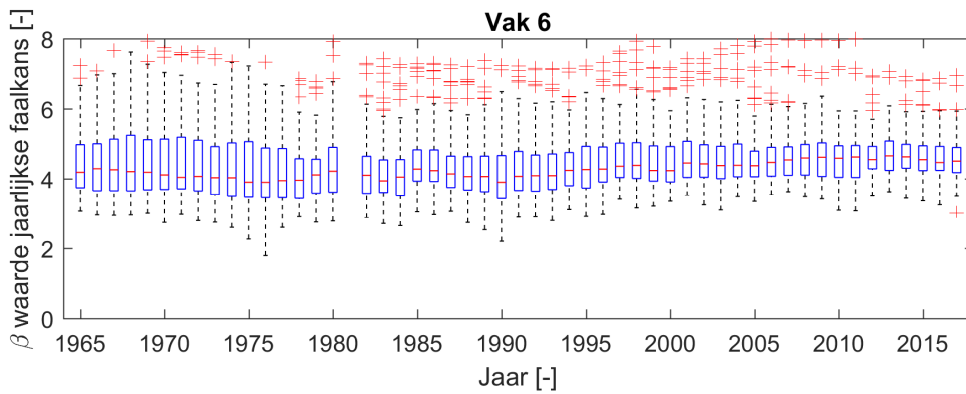
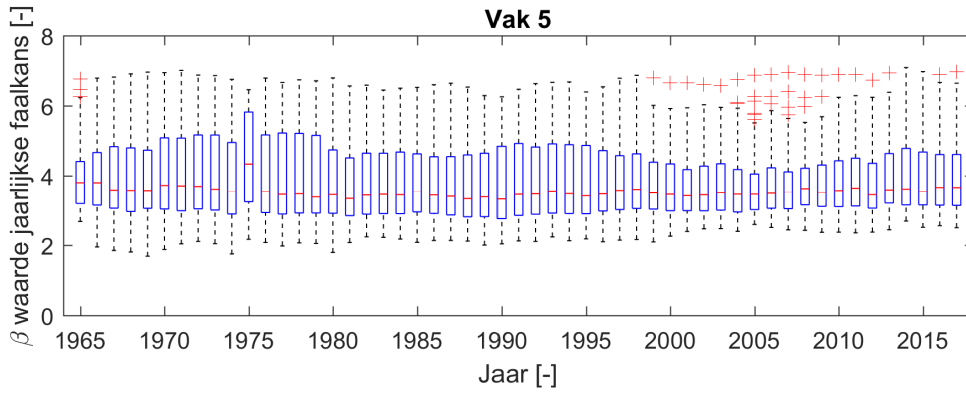
Vak	Raai	Sel
17	441	
17	461	X
17	472	X
17	483	X
17	496	X
17	512	X
17	530	X
17	558	X
17	584	X
17	602	X
17	619	X
17	638	X
17	663	X
17	684	X
17	705	X
17	730	X
17	751	X
17	768	X
17	778	X
17	791	X
17	802	X
17	822	X
17	834	X
17	838	X
17	851	X
17	877	X
17	886	
17	890	
17	903	
17	916	
17	920	
17	936	
17	951	
17	962	
17	979	
17	985	
17	993	
17	1007	
17	1021	
17	1032	
17	1046	X
17	1068	X
17	1092	X
17	1112	X

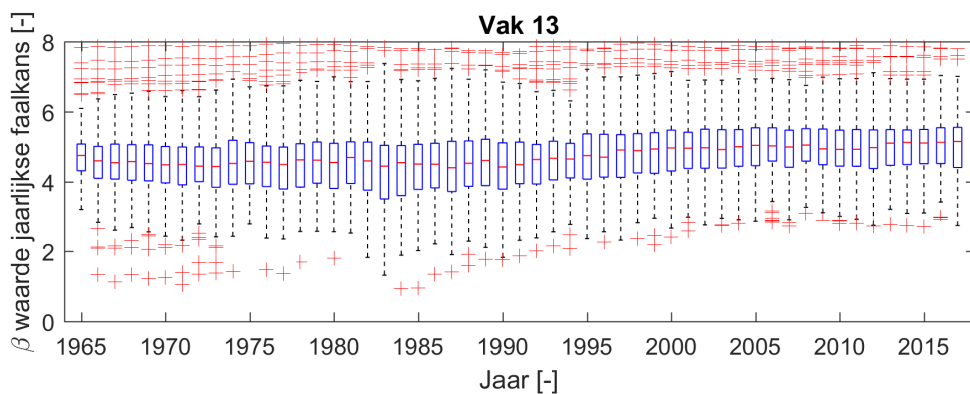
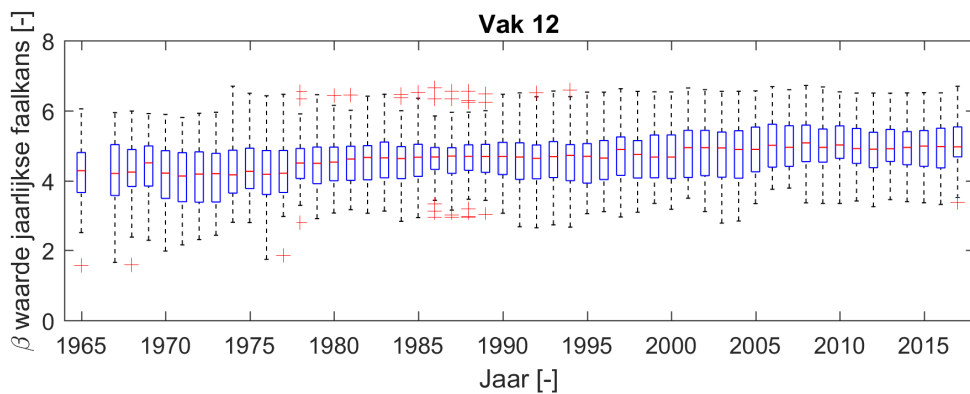
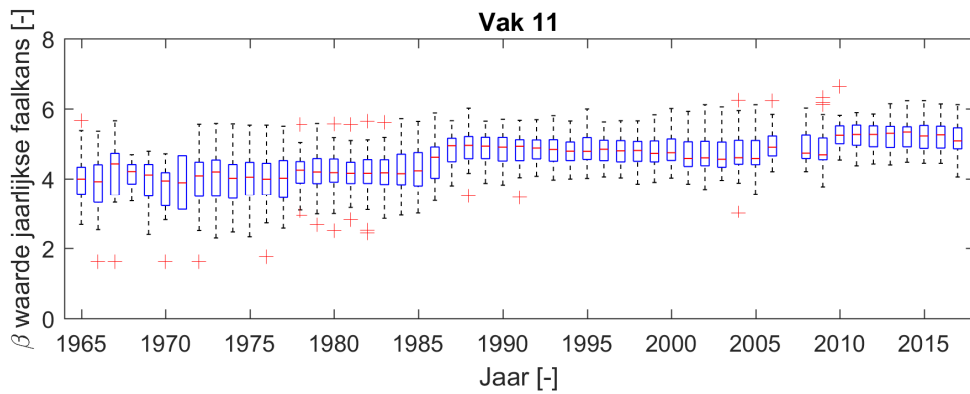
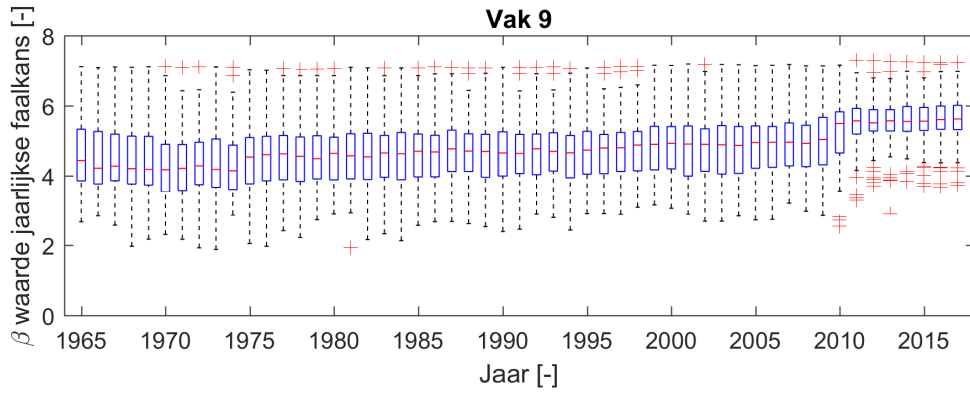
Vak	Raai	Sel
17	1136	X
17	1162	X
17	1191	X
17	1214	X
17	1241	X
17	1262	X
17	1282	X
17	1300	
17	1318	
17	1335	
17	1354	X
17	1363	X
17	1372	X
17	1381	X
17	1391	X
17	1401	X
17	1412	X
17	1427	X
17	1450	X
17	1467	X
17	1487	X

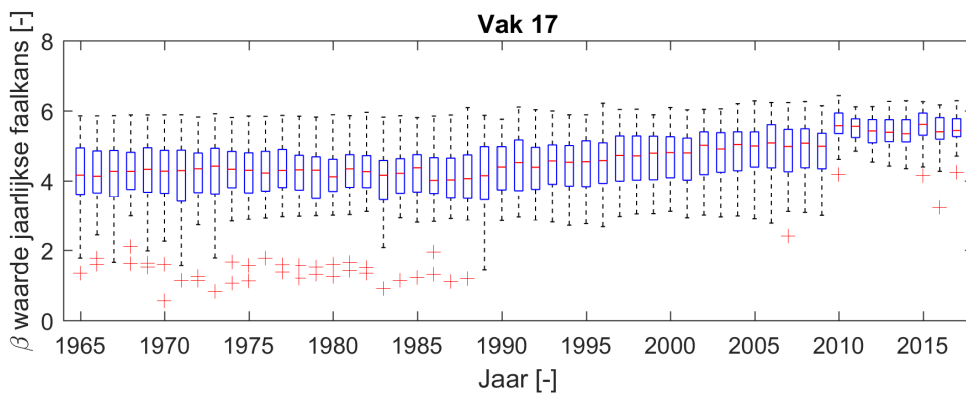
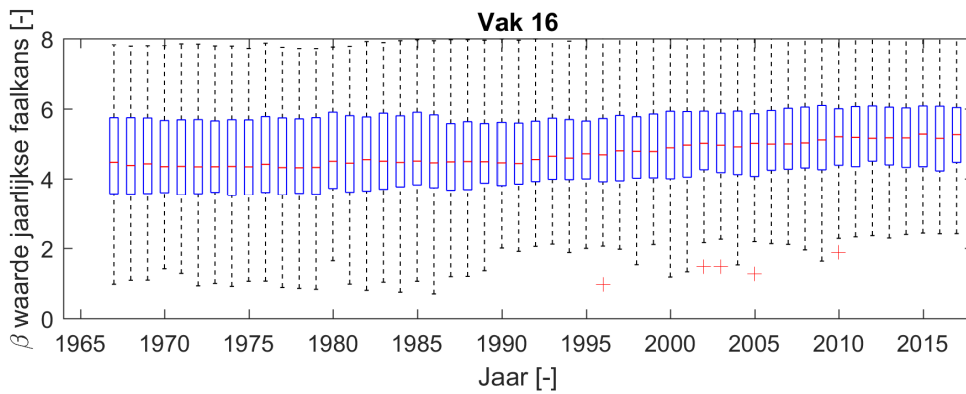
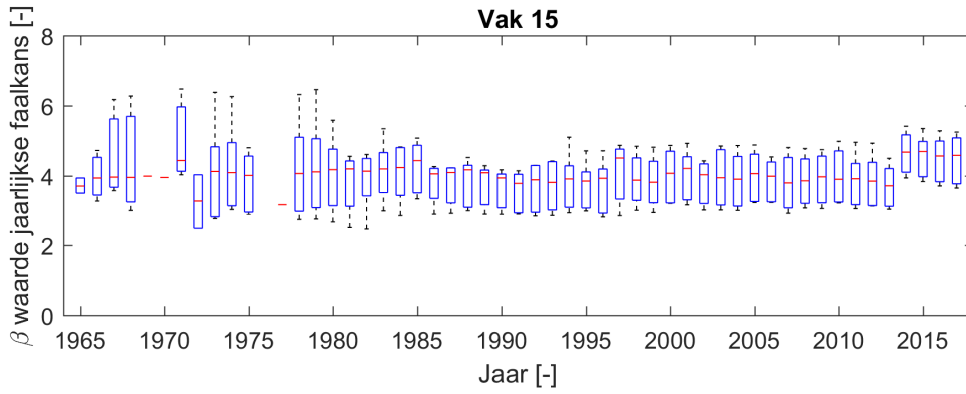
## Bijlage B: Overzicht van faalkansen per vak

Deze bijlage geeft per kustvak een overzicht van de spreiding van de faalkansen over de vakken in elk jaar, in de vorm van een boxplot. De rode waarde geeft de mediane  $\beta$  waarde per jaar (faalkans is gelijk aan  $\Phi(-\beta)$ , waarin  $\Phi$  de cumulatieve standaard-normale verdeling is). De blauwe box geeft de 25% en 75% percentielwaarden. De zwart gestippelde range geeft de minima en maxima. Rode '+' symbolen worden door de boxplot-routine beschouwd als uitschieters. In werkelijkheid kunnen dit raaien zijn met relatief kleine of juist grote duinen ten opzichte van de gemiddelde raai langs het betreffende kustvak.













HKV lijn in water BV

Postbus 2120  
8203 AC Lelystad

Botter 11-29  
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42  
[info@hkv.nl](mailto:info@hkv.nl)  
[www.hkv.nl](http://www.hkv.nl)