

TNO-rapport
98-CON-R1431

THEORIEHANDLEIDING PC-RING

Deel B: Statistische modellen

TNO Bouw

Datum

september 1999

Auteur(s)

Prof.ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder *aw*

Ir. H.M.G.M. Steenbergen

Ir. K.A.H. Slijkhuis (RWS)

Lange Kleiweg 5, Rijswijk
Postbus 49
2600 AA Delft

Telefoon 015 284 20 00
Fax 015 284 39 90



8 APR. 2002

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1999
TNO

Thema : -

WP-onderwerp : 221

Trefwoord(en) : PC-Ring, statistische modellen

Projectnaam : PC-Ring

Projectno. : 08.21.3.8091

Pagina's : 45

Tabellen : -

Figuren : -

Bijlagen : -

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	8
2. Modelleren van stochastische eigenschappen en processen	9
2.1 Kansverdeling	9
2.2 Ruimtelijke spreiding en spreiding in het tijdsdomein	9
2.3 Grondmechanische parameters	12
3. Eigenschappen waterkering	15
3.1 Gegevens voor de geometrie per dijkvak	15
3.2 Gegevens per mechanisme	16
3.2.1 Overloop/overslag	16
3.2.2 Afschuiving	17
3.2.3 Opbarsten/piping	18
3.2.4 Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	19
3.2.5 Piping kunstwerken	20
3.2.6 Niet-sluiten van kunstwerken	21
3.2.7 Duinen	23
4. Belastingmodellen	24
4.1 Inleiding	24
4.2 Rivier-afvoer-debiet	24
4.2.1 Rijn bij Lobith	24
4.2.2 Vecht	25
4.3 IJsselmeerstand	26
4.4 Wind	27
4.5 Waterstand op de Noordzee	28
4.6 Gecombineerde wind-waterstandstatistiek Hoek van Holland/Terschelling	29
4.7 Gecombineerde Wind-waterstandstatistiek kust Groningen Friesland	30
4.7.1 Een enkele locatie	30
4.7.2 Wind-waterstand-statistiek langs de hele waddenkust	34
4.8 Tabellen	36
5. Lokale waterstanden	40
5.1 Waarderlanden	40
5.2 Lingerwaard	40
5.3 Grofriland	41
5.4 Kabeljauwsche Waard	41
5.5 Kamperland	41
5.6 Schelland	41
5.7 Volland	42
5.8 Noord-Schuddeland	43
6. Literatuur	44

Notatie

Deze notatielijst geldt voor handleidingen deel A en B gezamenlijk.

α	: Factor mbt eindige dikte vd watervoerende zandlaag, [-]
α	: Variantieverhoudingsfactor, [-]
α^2	: Bijdrage aan de variantie, [-]
α_{eq}	: Equivalente helling buitentalud (tangens van de hoek), [°]
α_i	: Helling van het binnentalud, [°]
α_u	: Helling van het buitentalud, [°]
$\alpha_{u,b}$	: Helling van het buitentalud boven de berm, [°]
β	: Hoek van golfival, [°]
β	: Betrouwbaarheidsindex, [-]
β_{ns}	: Betrouwbaarheidsindex falen sluitprocedure, [-]
γ	: Parameter pareto verdeling, [-]
γ_a	: Volumegewicht asfaltbekleding, [ton/m ³]
γ_β	: Reductiefactor m.b.t. de hoek van golfival, [-]
γ_b	: Reductiefactor m.b.t. de berm, [-]
γ_f	: Reductiefactor m.b.t. de ruwheid, [-]
γ_n	: Stabiliteitsfactor, [-]
γ_p	: Volumegewicht zanddeeltjes, [kN/m ³]
γ_v	: Reductiefactor m.b.t. een verticale wand op het talud, [-]
γ_w	: Volumegewicht water, [kN/m ³]
μ	: Gemiddelde
μ	: Afvoercoëfficiënt
η	: Constante van White, (sleepkrachtfactor), [-]
η	: parameter in duinmodel [m]
κ	: Intrinsieke doorlatendheid, [m ²]
ξ	: Brekerparameter bij bekledingsberekening, [-]
ξ	: Verhoudingsgetal in ijkpunteisen, [-]
ξ_{eq}	: Equivalente brekerparameter, [-]
ξ_{op}	: Brekerparameter, [-]
ϕ	: Windrichting, [°]
ϕ'	: Hoek van inwendige wrijving, [°]
ψ	: Richting van de normaal van de dijk, [°]
θ	: Rolweerstandshoek, [°]
τ	: Schuifspanning, [N/m ²]
σ	: Normaalspanning, [N/m ²]
σ	: Parameter pareto verdeling
σ	: Standaardafwijking
ν	: Kinematische viscositeit, [m ² /s]
ρ	: Parameter windmodel, [-]
ρ_x	: Correlatie, [-]
ρ_x	: Correlatie-functie voor ruimtelijke spreiding, [-]

ρ_t	: Correlatie-functievoor spreiding in de tijd, [-]
Γ	: Stabiliteitsfactor, [-], Invloedsfactor wrijving en traagheid bij bekledingsmodel, [-]
Δ	: Relatieve dichtheid, [-]
Δ_h	: Drukverschil onder de asfaltbekleding in m waterkolom, [m]
Δ_d	: Variatie in bodemligging, [m]
Δh_{ZW}	: Modelterm ZWENDL, [m]
Δ_t	: Correlatie-afstandtijdsintervallen[s], [uur], [jaar]
Δ_u	: Verschil tussen werkelijke en berekende waterspanning in een dijk, [N/m ²]
Φ	: Verdelingsfunctie van de normale verdeling
Ω	: Relatief open oppervlak van de bekleding, [-]

a, b	: Parameters statistisch wadmodel en windmodel
$a_{h\phi}$	: Parameter waterstand gegeven de windrichting, [m]
A	: Parameter Gumbelverdeling
A	: Doorstroomopening, [m ²]
A_{kom}	: Kombergend oppervlak, [m ²]
$b_{h\phi}$	: Parameter waterstand gegeven de windrichting, [m]
B	: Breedte van de berm, lengte van de kwelweg, [m]
B	: Steenbreedte, [m]
B	: Doorlaatbreedte, [m]
B	: Parameter Gumbel verdeling
c	: Coëfficiënt mbt eigenschappen van zand in watervoerende laag, [-]
C	: Coëfficiënt in het overslagmodel voor de volkomen overlaat, [-]
c_a	: Coëfficiënt in de leklengte-bepaling, [-]
c_b	: Coëfficiënt in de leklengte-bepaling, [-]
c_f	: Coëfficiënt erosiebestendigheid steenzetting op granulair filter, [-]
c_g	: Coëfficiënt erosiebestendigheid grasmat, [(ms) ⁻¹]
c'	: Cohesie, [N/m ²]
c_k	: Coëfficiënt erosiebestendigheid steenzetting op klei, [-]
c_L	: Constante van Lane
c_{RB}	: Coëfficiënt m.b.t. reststerkte van de dijkkern, [m ² s]
c_{RK}	: Coëfficiënt m.b.t. reststerkte van de afdeklaag, [m ² s]
c_o	: Coëfficiënt sterktemodel asfaltbeton, [-]
c_t	: Coëfficiënt in de leklengte-bepaling, [-]
C	: Ruwheidsfactor van Chézy, [m ² /s]
C_b	: Constante van Bligh, [-]
C_{bear}	: Constante van bear = κ/d_{10}^2
d	: Bodemligging tov NAP, [m], dikte van de afsluitende laag, [m]
d_d	: Ontwerpwaarde korreldiameter, [m]
d_f	: Dikte van het de granulaire filterlaag, [m]
d_h	: Waterdiepte aan de teen van het talud tov NAP, [m]
d_w	: Dikte graszode, [m]
d_x, d_y	: De horizontale respectievelijk verticale fluctuatieschaal, [m]

d_{10}	: 10%-fractiel van de zandkorrelverdeling, [m]
d_{50}	: Mediane Korreldiameter duinafslagberekening [m]
d_{70}	: 70%-fractiel van de zandkorrelverdeling, [m]
D	: Dikte van de doorlatende zandlaag, [m],
D	: dikte asfalt of steenbekleding [m]
D_{f15}	: Korrelgrootte 15 % gewichtsfractioneel filtermateriaal [mm]
g_k	: Volumegewicht opbarstende grond, [kN/m ³]
E_g	: Erosiesnelheid, [m/s]
F	: Strijklengte, [m]
f_b	: Correctiefactor i.g.v. bepaling van q_o voor brekende golven, [-]
f_g	: Factor m.b.t. de kwaliteit van de grasmatten, [-]
f_n	: Correctiefactor i.g.v. bepaling van q_o voor niet-brekende golven, [-]
F	: Verdelingsfunctie, [-]
F	: Stabiliteitsfactor, [-]
F_M	: Falen van de mobilisatiefase, [-]
F_{ns}	: Technisch/menselijk falen sluitproces, [-]
F_{SF}	: Falen van de sluitingsfase, [-]
F_W	: Falen van de waarschuwingfase, [-]
g	: Zwaartekrachtsversnelling, [m/s ²]
h	: Lokale waterstand tov NAP, [m]
h_b	: Binnenwaterstand tov NAP, [m]
h_B	: Hoogte van de berm tov NAP, [m]
h_c	: Kritieke waterstand voor opbarsten tov NAP, [m]
h_{HvH}	: Waterstand op de Noordzee, in Hoek van Holland tov NAP, [m]
h_k	: Kruinhoogte tov NAP, [m]
h_m	: Waterdiepte aan de teen van het talud tov NAP, [m]
h_m	: Meerpeil ijsmeer, [m]
h_{MM}	: Waterstand op de Noordzee, in de Maasmond tov NAP, [m]
h_{NZ}	: Waterstand op de Noordzee tov NAP, [m]
h_{ok}	: Hoogte open keerhoogte tov NAP, [m]
h_p	: Kritieke waterstand voor piping tov NAP, [m]
h_{pv}	: Toegestane waterpeilverhoging in de polder, [m]
$\hat{h}_s$	: Opzet, [m]
H_m	: Gemiddelde golfhoogte, [m]
H_s	: Significante golfhoogte, bepaald met Bretschneider, [m]
k	: Ruwheid binnentalud, [m]
L	: Lengte van de kwelweg, [m]
L_B	: Breedte van de dijk kern, [m]
L_{BK}	: Breedte van de dijk kern aan de top, [m]
L_h	: Lengte van de horizontale kwelweg, [m]
L_K	: Breedte van de afdekkende kleilaag, [m]
L_v	: Lengte van de verticale kwelweg, [m]
M_A	: Aandrijvend moment, [Nm/m]
MBT	: Maximaal Beschikbare Tijd, [minuten]

m_c	: Modelfactor Bligh/Lane, [-]
m_D	: Modelfactor duinafslag, [-]
m_{gH}	: Modelfactor golfgroeimodel (bijv. Bretschneider) voor de golfhoogte, [-]
m_{gT}	: Modelfactor golfgroeimodel (bijv. Bretschneider) voor de golfperiode, [-]
m_h	: Modelfactor waterstand, (dempingswaarde), [-]
m_{kom}	: Modelfactor kombergend vermogen, [-]
m_L	: Modelfactor kwelweglengtebepaling, [-]
m_{in}	: Modelfactor instromend water bij open keermiddel, [-]
m_O	: Modelfactor voor het mechanisme 'opbarsten', [-]
m_p	: Modelfactor piping, [-]
m_{qo}	: Modelfactor optredend overslagdebiet, [-]
m_{qc}	: Modelfactor kritiek overslagdebiet, [-]
m_{sp}	: Modelfactor sluitproces, [-]
m_Z	: Modelfactor ZWENDL, [-]
M	: Parameter windmodel, [-]
MHW	: Maatgevend hoogwater, [m]
M_R	: Tegenwerkend moment, [Nm/m]
n	: Porositeit van het filter, [-]
n_j	: Aantal vragen per jaar, [-]
$norm$	: Normfrequentie, [1/jaar]
p	: Verhoudingsgetal in ijkpunten, [-]
P	: Kans, [-]
P_{ns}	: kans op niet sluiten kunstwerk gegeven vraag, [-]
q	: Modelonzekerheid Bishop-berekening [-]
q	: Overslagdebiet, [m ² /s]
q_c	: Kritiek overslagdebiet waarbij falen optreedt, [m ² /s] of [ℓ /m/s]
q_o	: Optredend overslagdebiet, [m ² /s] of [ℓ /m/s]
$q_{c\ over}$	: Debiet waarbij overbelasting optreedt, [m ² /s] of [ℓ /m/s]
$q_{c\ toel}$	: Toelaatbaar overslagdebiet, [m ² /s] of [ℓ /m/s]
Q	: Afvoerdebiet van de rivier, [m ³ /s]
Q	: Debiet, [m ³ /s]
Q_b	: Dimensieloos overslagdebiet bij brekende golven, [-]
Q_n	: Dimensieloos overslagdebiet bij niet-brekende golven, [-]
Q_{in}	: Instromend debiet bij inundatie, [-]
r	: Richtingsreductiefactor, [-]
r_b	: Reductiefactor voor de bermbreedte, [-]
r_{dh}	: Reductiefactor voor de bermligging, [-]
r_x, r_y	: De horizontale respectievelijk verticale afstand tussen twee punten, [m]
R	: Straal van de glijcirkel bij afschuiven, [m]
R_b	: Dimensieloze kruinhoogte bij brekende golven, [-]
R	: Regressie duinafslag, [m]
R_c	: Kritieke regressie duin (sterkte), [m]
R_n	: Dimensieloze kruinhoogte bij niet-brekende golven, [-]
s, d	: Parameters waddenmodel, [-]

S_{op}	: Golfsteilheid, [-]
t_e	: Tijdsduur, [s of uur]
t_{RB}	: Reststerkte van de dijk kern, [s]
t_{RK}	: Reststerkte van de afdeklaag van klei onder het filter, [s]
t_{RT}	: Reststerkte van de graszode, [s]
t_s	: Stormduur, [uur]
T	: Herhalingsduur, [jaar]
T_m	: Gemiddelde golfperiode, [s].
T_M	: Benodigde tijd voor mobilisatiefase, [minuten].
T_p	: Piekperiode (van het golfspectrum), [s]
T_s	: Significante golfperiode, [s]
T_{SF}	: Benodigde tijd voor sluitingsfase, [minuten]
T_{SP}	: Benodigde tijd voor het sluitproces, [minuten]
T_W	: Benodigde tijd voor waarschuwingfase, [minuten]
u	: Parameter pareto verdeling
u	: Standaardnormaal verdeelde parameter, [-]
u	: Water(over)spanning, [N/m ²]
U	: Uniformiteitsmaat = d_{10}/d_{70} , [-]
v_{ns}	: Variabele voor de intrinsieke onzekerheid van de gebeurtenis “niet sluiten kunstwerk”, [-]
v_c	: Kritieke stroomsnelheid, [m/s]
V	: Windsnelheid, [m/s]
V	: Variatie-coëfficiënt, [-]
V_i	: Volumina in duinafslagberekening [m ³]
V_{in}	: Ingestroomd volume, [m ³]
V_{kom}	: Bergend vermogen van een polder [m ³]
W	: Onafhankelijk deel windsnelheid, [m/s]
x, y	: Standaard exponentieel verdeelde variabelen, [-]
z	: Golfoploop, [m]
Z	: Grenstoestandsfunctie

1. Inleiding

Deze handleiding beschrijft de statistische modellen die gebruikt worden in het programma PC-Ring. Met dit programma wordt de faalkans berekend van een dijkkring die bestaat uit een aantal dijkvakken, duinraaien en/of kunstwerken, waarbij bezwijken kan optreden door verschillende mechanismen.

Het rapport maakt deel uit van een serie rapporten rondom het programma PC-Ring. De serie omvat:

1. Gebruikershandleiding

Hierin worden de berekeningsmogelijkheden aangegeven, de wijze waarop de dijkkring in het programma geschematiseerd wordt, de aansturing van het programma, de samenstelling van de in- en uitvoer files en een aantal voorbeelden.

2. Theoriehandleiding

Deze bestaat uit:

Deel A: Mechanismebeschrijvingen

Deel B: Statistische modellen

Deel C: Rekentechnieken

3. Programmeurshandleiding

Hierin wordt informatie gegeven over de opbouw van het programma, de wijze van programmeren en de bijzondere in- en uitvoeropties. Deze handleiding is bedoeld voor personen die het programma willen uitbreiden of verbeteren.

Het onderhavige document is deel B van de theoriehandleiding. Het behandelt de algemene modellering van stochasten zoals toegepast bij het opstellen van het programma PC-Ring. Het document geeft verder, bij wijze van voorbeeld, getalwaarden die kunnen worden aangehouden voor dijkgegevens, voor zover deze niet specifiek en lokaal voor een bepaalde dijkvakken gelden. Deze getalwaarden zijn grotendeels ontleend aan de eerste fase van de ONIN-studie [14]. Specifieke gegevens (zoals bijvoorbeeld de kruinhoogte van een bepaald dijkvak) worden uiteraard niet vermeld, of hooguit een range als dat zinvol is. Tenslotte gaat het document in op de beschrijving van de belangrijkste hydraulische randvoorwaarden en de voor de 8 dijkringen van de Marsroute Case Studies gehanteerde modellen.

Het programma PC-Ring berekent op basis van de hier gegeven statistische modellen, de lokale invoergegevens en de in deel A gegeven fysische modellen voor de faalmechanismen de faalkansen voor de afzonderlijke dijkvakken en mechanismen. Daarna worden deze samengesteld tot een faalkans over alle mechanismen voor de gehele ring. Details over de daarvoor gebruikte theorie vindt men in deel C. Voor details over de invoerverzorging en het draaien van het programma wordt verwezen naar de gebruikershandleiding.

2. Modellerings van stochastische eigenschappen en processen

2.1 Kansverdeling

In deel A van deze handleiding zijn voor een aantal mechanismen de mechanismevergelijkingen of grenstoestandfuncties opgesteld. In elk van die functies komen variabelen voor die in meer of minder mate onzeker zijn: de stochasten.

De onzekerheid in de stochasten wordt in probabilistische analyses beschreven door de kansdichtheidsfunctie dan wel de cumulatieve kansverdelingsfunctie. Iedere willekeurige positieve functie met oppervlak 1.0 kan daarbij als kansdichtheidsfunctie fungeren. Meestal wordt echter een keuze gemaakt uit een in de kansrekening bekend aantal kansdichtheidstypen. Voorbeelden zijn de normale verdeling, de lognormale, de uniforme, de exponentiële, de Gumbel, de Pareto, de Weibull, etc.. De meeste van deze verdelingen hebben een relatief handige mathematische vorm en soms ook een theoretische achtergrond, zoals de centrale limietstelling bij de normale verdeling.

In de tabellen in dit rapport worden voor de verschillende verdelingen de volgende afkortingen gebruikt:

det = deterministisch
nor = normaal (Gaussisch)
log = lognormaal
exp = exponentieel
gum = Gumbel
wei = Weibull
par = Pareto
dis = kansverdeling voor eindig aantal discrete waarden

De formules voor de verschillende verdelingen (uitgezonderd "dis") zijn te vinden in bijlage 1

Het type verdeling legt de kansdichtheidsfunctie overigens niet helemaal vast. Er moeten in de meeste gevallen ook nog een of meer parameters worden gekozen. Onderscheiden worden parameters voor het vastleggen van de ligging (zoals gemiddelde), van de spreiding (standaardafwijking, variatiecoëfficiënt) en eventueel de verdere vorm. Indien mogelijk biedt het voordelen gemiddelde en standaardafwijking of variatiecoëfficiënt te nemen, omdat deze het meest tot de verbeelding spreken.

2.2 Ruimtelijke spreiding en spreiding in het tijdsdomein

Veel van de stochasten die een rol spelen in bij de betrouwbaarheidsanalyse van dijken vertonen een fluctuatie in het tijdsdomein of een fluctuatie in de ruimte of beide. Het kennen van de realisering van een stochast op plaats $\underline{x}$ en tijdstip t hoeft niet te leiden tot het opheffen van de onzekerheid op een andere plaats en op een ander tijdstip. Meestal zal wel in de omgeving van het punt $\underline{x}$ en gedurende

zekere tijd na het tijdstip t de onzekerheid verminderd zijn. De mate waarin dat gebeurt wordt meestal vastgelegd met behulp van de correlatie-functie. Deze functie geeft de correlatie-coëfficiënt weer als functie van de afstand of het tijdsverschil tussen twee punten.

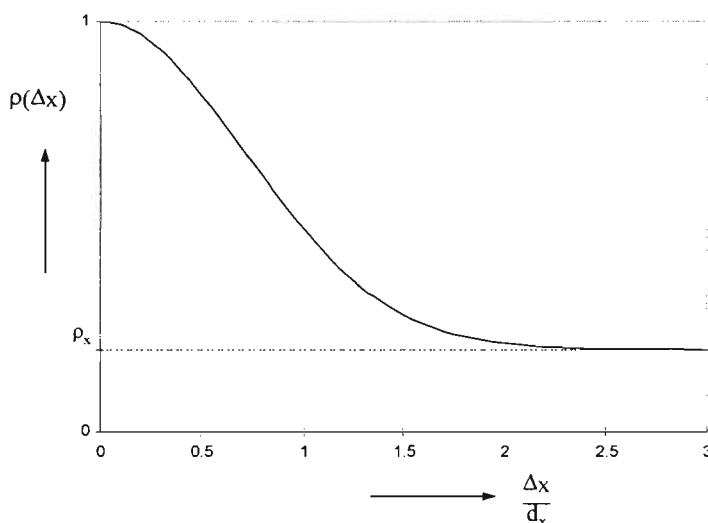
Als algemene vorm voor de (eendimensionale) ruimtelijke correlatie wordt in het programma PC-Ring gehanteerd:

$$\rho(\Delta x) = \rho_x + (1 - \rho_x) \exp\left\{-\frac{\Delta x^2}{d_x^2}\right\}$$

ρ_x constante correlatie

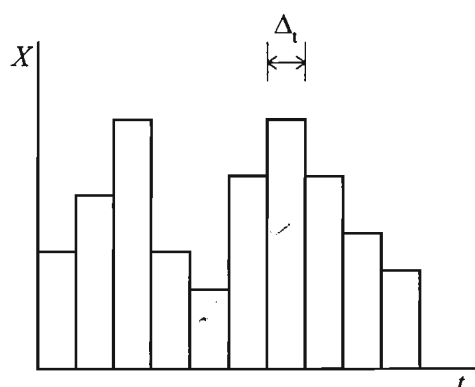
d_x correlatie-afstand

De functie begint dus bij 1.0 en bestaat dus uit een constant deel en een uitdempend deel. De vorm is weergegeven in figuur 2.1



Figuur 2.1: Algemene vorm van de ruimtelijke correlatie-functie

Om operationele redenen worden in het programma de processen in het tijdsdomein gediscrètiseerd als een Borges Castanheta model met intervallen Δ_t waarbinnen volledige correlatie is en waartussen een constante correlatie ρ_t heerst. Een geschematiseerde weergave van een dergelijk proces is weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: Borges Castanheta model voor modellering van fluctuaties in de tijd.

Samenvattend:

De meeste stochastische variabelen (processen) worden derhalve beschreven door:

- verdelingstype
- gemiddelde μ
- standaardafwijking σ of variatie-coëfficiënt V
- correlatie-functie voor ruimtelijke spreiding met parameters d_x en ρ_x
- correlatie-functie voor spreiding in de tijd met parameters Δ_t en ρ_t

ofwel:

type, μ , V , d_x , ρ_x , Δ_t , ρ_t

Het gemiddelde is vaak afhankelijk van lokale omstandigheden, zodat deze manual daar geen uitsluitsel over kan geven. Denk bijvoorbeeld aan de kruinhoogte. In die gevallen geeft de tabel:

nom = nominale waarde = waarde volgens tekening of bestek

In sommige gevallen wordt ook een range gegeven die dan meestal duidt op verschillende mogelijk kwaliteiten of afmetingen.

Uiteraard zijn er veel variabelen waarvoor de ruimtelijke fluctuatie of de fluctuatie in de tijd van zo weinig belang is dat deze kan worden verwaarloosd. Dit uit zich dan bijvoorbeeld voor de ruimtelijke fluctuatie door de keuze van $d_x = \infty$ en $\rho_x = 1.0$. Dit wordt overigens genoteerd als $d_x = --$ en $\rho_x = -$. Analoog voor de correlatie in de tijd.

2.3 Grondmechanische parameters

Bij de stochastische grondsterkte-parameters als cohesie c' en de hoek van inwendige wrijving $\tan(\phi')$ moet rekening worden gehouden met een drie-dimensionale ruimtelijke spreiding. Daarbij wordt de volgende autocorrelatiefunctie gehanteerd:

$$\rho(r_x, r_y) = \exp(-(r_x/d_x)^2) \{ (1-\alpha) + \alpha \exp(-(r_y/d_y)^2) \}$$

waarin r_x en r_y de horizontale respectievelijk verticale afstand tussen twee punten is, d_x en d_y de horizontale respectievelijk verticale fluctuatieschaal en α een variantieverhoudingsfactor. Gebruikelijke waarden voor de fluctuatieschalen in natuurlijke afzettingen zijn:

$$d_x = 30 \text{ à } 70 \text{ m} \quad \text{en} \quad d_z = 0.25 \text{ à } 0.5 \text{ m}$$

De variantieverhoudingsfactor α is het quotient van de variantie die lokaal (langs een verticaal) wordt gevonden en de totale variantie die in het veld wordt gevonden. Het bijbehorende model is in figuur 2.3 weergegeven. De figuur stelt een langsdoorsnede van de ondergrond, bijvoorbeeld in de lengterichting van een dijk voor. Op de locaties x_1 , x_2 en x_3 wordt langs de verticaal de grondparameter (schuifsterkte) gemeten, dit levert de functies $c(x_1, z)$, $c(x_2, z)$ en $c(x_3, z)$ op. De functiewaarden fluctueren rond de lokale verwachtingswaarden $\bar{c}(x_1)$, $\bar{c}(x_2)$ en $\bar{c}(x_3)$ en de variantie van de fluctuaties is σ_f^2 . De lokale verwachtingswaarden op hun beurt fluctueren in de lengterichting om de verwachtingswaarde $\bar{c}$ van het gehele veld. De variantie van die fluctuaties is $\sigma(\bar{c})$. De totale variantie van het veld is dan:

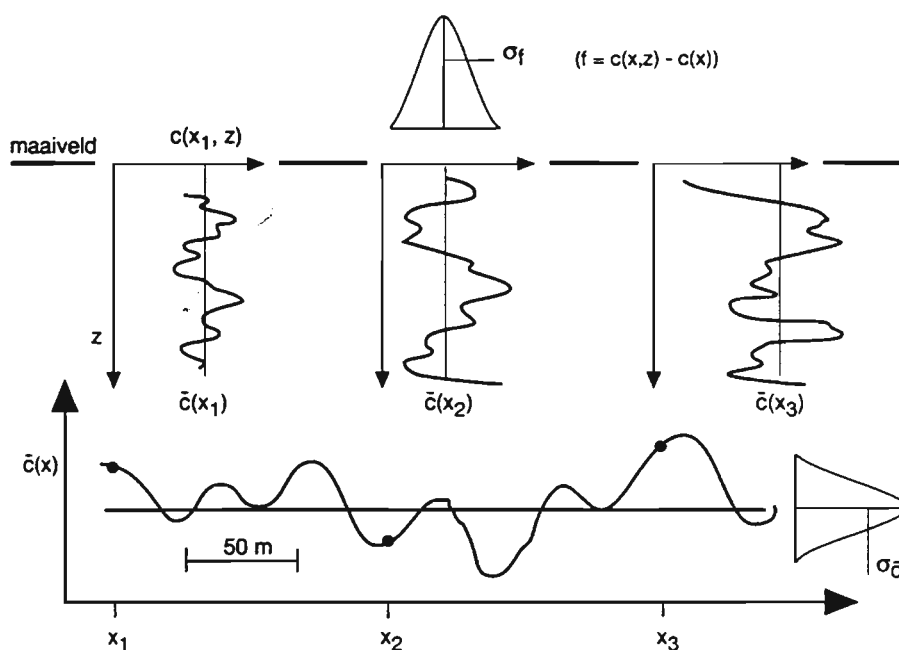
$$\sigma_c^2 = \sigma_f^2 + \sigma_{\bar{c}}^2$$

De variantieverhouding α wordt gedefinieerd als:

$$\alpha = \sigma_f^2 / \sigma_c^2$$

Indien $\alpha = 1$ gekozen wordt, dan is $\sigma(\bar{c}) = 0$. Het model voor de ruimtelijke variatie wordt daardoor gereduceerd tot het model dat in de literatuur veel gebruikt wordt. De consequentie van dit gereduceerde model is dat door uitmiddeling van fluctuaties langs één verticaal de verwachtingswaarde voor het gehele veld wordt gevonden. In de praktijk blijkt, o.a. uit bestudering van conusweerstandregistraties in zowel klei als zandlagen, dat zo'n model niet altijd verdedigbaar is. Gevonden waarden van α liggen tussen 0.5 en 1.0.

Binnen het model wordt gerekend met natuurlijke fluctuaties van de schuifsterkteparameters (punt tot punt variatie) en variatie die de onzekerheid ten aanzien van de schattingen van de verwachtingswaarde reflecteert. De maat voor de eerste is de variantie van de ruimtelijke fluctuaties (veldvariantie), de maat voor de laatste is gelijk aan de veldvariantie gedeeld door het aantal waarnemingen op basis waarvan de verwachtingswaarde wordt geschat. Natuurlijke variatie wordt in het programma,



Figuur 2.3. Voorbeeld van een ruimtelijk variatiepatroon van schuifsterkte in een kleilaag

bij sommatie van schuifsterkten langs een glijvlak, gedeeltelijk uitgemiddeld. Onzekerheid in de schatting van de verwachtingswaarden niet, immers een fout in die schatting is op elk punt binnen de beschouwde grondlaag precies even groot.

Bij beschouwing van opeenvolgende segmenten binnen een dijkvak en opeenvolgende dijkvakken wordt aangenomen dat natuurlijke fluctuaties tussen de segmenten binnen een dijkvak en tussen de dijkvakken onderling ongecorreleerd zijn. Onzekerheden ten aanzien van de verwachtingswaarden zijn volledig gecorreleerd, wanneer voor de verschillende segmenten en voor de dijkvakken uitgegaan wordt van dezelfde proevenverzamelingen voor de schuifsterkteparameters (z.g. regionale proevenverzamelingen). Wanneer verschillende (onafhankelijke) proevenverzamelingen worden gebruikt (lokale grondonderzoeken) zijn ook de onzekerheden m.b.t. de verwachtingswaarden ongecorreleerd.

Bij een aantal van de case studies zijn regionale proevenverzamelingen gebruikt voor het bepalen van statistische kentallen van de schuifsterkte-eigenschappen. Bij regionale proevenverzamelingen worden de resultaten van laboratoriumproeven op grondmonsters uit een bodemlaag over een groot geografisch gebied (bijvoorbeeld een hele dijkkring) samengenomen. Voor een aantal dijkkringgebieden zijn in het kader van dijkversterkingswerkzaamheden regionale proevenverzamelingen opgebouwd. Bij andere cases zijn geen proevenverzamelingen beschikbaar. De schattingen van verwachtingswaarde en spreiding de schuifsterkteparameters zijn dan bepaald aan de hand van het beschikbare lokale grondonderzoek.

Schattingen van droge en natte volumegewichten kunnen eveneens worden bepaald aan de hand van proevenverzamelingen of van lokaal grondonderzoek. In de probabilistische stabiliteits- en piping-analyses worden deze grondparameters, vanwege de geringe spreiding, als deterministische grootheden opgevat.

Ten aanzien van water(over)spanningen worden twee typen onzekerheden beschouwd, namelijk:

- de onzekerheid van water(over)spanningen bij een gegeven buitenwaterstand en
- de onzekerheid over de buitenwaterstand zelf.

De onzekerheid over de water(over)spanningen bij een gegeven buitenwaterstand reflecteert de onnauwkeurigheid van de modellen om bij een gegeven buitenwaterstand de freatische lijn in de dijk en de wateroverspanning in de bodemlagen te berekenen. Deze onnauwkeurigheid is lokaal van karakter en de onzekerheden zijn van dijksegment tot dijksegment niet of nauwelijks gecorreleerd. Deze onzekerheden worden gemodelleerd als normaal verdeelde stochasten.

De onzekerheid van de buitenwaterstand zelf (extreme waardenverdeling) zorgt uiteraard voor onzekerheden ten aanzien van de verwachte freatische lijn in de dijk en de verwachte wateroverspanningen in de ondergrond (in de watervoerende zandlagen die in verbinding staan met de buitenwaterstand). Deze onzekerheden worden via een benaderende AFDA-procedure meegenomen in de probabilistische stabiliteitsanalyse. Tussen de dijksegmenten en tussen de dijkvakken onderling is deze onzekerheid volledig gecorreleerd, althans voor zover de buitenwaterstand tussen de dijkvakken onderling volledig gecorreleerd is.

3. Eigenschappen waterkering

3.1 Gegevens voor de geometrie per dijkvak

In deze paragraaf wordt de stochasten van de dijkvakgeometrie. De gegevens zijn verzameld in tabel 3.1. Voor de afkortingen wordt in de kolom Type verwezen naar het overzicht in hoofdstuk 2.1.

Tabel 3.1: Gegevens geometrie-parameters

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
h_k	kruinhoogte	m	nor	nom	$\sigma = 0.10$ m	300 m	0	-	-
h_l	teenhoogte	m	nor	nom	$\sigma = 0.20$ m	300 m	0	-	-
tg $\alpha_{u,b}$	helling buitentalud (boven)	-	nor	nom	$V = 0.05$	150 m	0	-	-
tg $\alpha_{u,o}$	helling buitentalud (onder)	-	nor	nom	$V = 0.05$	150 m	0	-	-
tg α_l	helling binnentalud	-	nor	nom	$V = 0.05$	150 m	0	-	-
B	bermbreedte	m	nor	nom	$\sigma = 0.15$ m	300 m	0	-	-
h_B	bermhoogte	m	nor	nom	$\sigma = 0.20$ m	300 m	0	-	-
Δd	fout in bodemligging	m	nor	0.0 m	$\sigma = 0.30$ m	900 m	0	1 jaar	0.5

De belangrijkste stochast in de geometrie is de kruinhoogte. De schatting van de spreiding en correlatielengte is gebaseerd op een meting van Grondmechanica Delft van enkele jaren geleden [15]. De andere getalwaarden zijn pure schattingen.

Afgezien van de bodemligging wordt elke variable behandeld als constant in de tijd. Het programma kent niet de mogelijkheid om een effect als een geleidelijke daling van de kruin mee te nemen. Als men dit wil berekenen moet men dus een berekening maken voor verschillende gemiddelde kruinhoogten en die vervolgens zelf combineren.

3.2 Gegevens per mechanisme

3.2.1 Overloop/overslag

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de specifiek voor het mechanisme overloop/overslag benodigde statistische invoergegevens. De variabelen in deze tabel zijn vaak voor een aantal dijkvakken van een dijkkring identiek.

De onzekerheden in de parameters f_b en f_n zijn ontleend aan de waargenomen spreidingen in de proeven (zie de rapportage van Van der Meer over het betreffende overslagmodel, 1997, [6]). De overige spreidingen berusten op schattingen.

De modelfactor voor het optredende overslag debiet m_{qo} geeft aanvullend op de onzekerheden in f_b en f_n de onzekerheid in het verschil tussen laboratoriumproeven en de werkelijkheid.

Tabel 3.2: Variabelen het mechanisme 'overloop/overslag'

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	p_x	Δ_t	ρ_t
k	ruwheid binnentalud	m	log	0.015	$V = 0.25$	300 m	0.5	-	-
f_b	factor voor bepaling Q_b	-	nor	5.2	$\sigma = 0.55$	-	-	-	-
f_n	factor voor bepaling Q_n	-	nor	2.6	$\sigma = 0.35$	$-\infty$	-	-	-
m_{qc}	modelfactor kritiek overslagdebiet	-	log	1.0	$\sigma = 0.50$	1500 m	0.4	-	-
m_{qo}	modelfactor optredend overslagdebiet	-	log	1.0	$\sigma = 0.50$	vak	0.7	-	-

N.B.: Bij de lognormale verdeling worden het gemiddelde en de standaardafwijking van de werkelijke lognormale verdeling gegeven en niet van de onderliggende normale verdeling.

3.2.2 Afschuiving

Voor die freatische lijn, gegeven een buitenwaterstand, wordt een beperkte onzekerheidsmarge met een standaardafwijking van 0.10 m aangenomen. De water(over)spanningen worden opgevat als (normaal verdeelde) stochasten. In de berekeningen voor de case studie zijn variaties van water(over)spanningen (freatische lijn en waterspanning in een watervoerende zandlaag onder de dijk, die communiceert met het buitenwater) volledig gecorreleerd gedacht met de buitenwaterstand. Hieraan wordt correlatie tussen de dijkvakken onderling ontleend, omdat de waterstandsvariaties bij de verschillende dijkvakken als volledig gecorreleerd worden opgevat.

De statistische grootheden voor de grondsterkteparameters omvatten de gemiddelde grondsterkte van c en $\tan \phi$, hun standaardafwijking en de correlatie. Het gemiddelde is gebaseerd op een beperkte hoeveelheid lokale proeven of op een proevenverzameling voor een grondlaag of geologische afzetting. Rekening wordt gehouden met de onzekerheid door het beperkt aantal proeven. Daartoe worden de gemiddelden zelf als stochasten opgevat. Bij alleen lokale waarnemingen is deze onzekerheid niet ruimtelijk gecorreleerd; bij een proevenverzameling over een grotere afstand wel.

Voor de modelonzekerheid in de Bishop-berekening wordt verwezen naar [16]

Tabel 3.3: Variabelen van het mechanisme 'afschuiven'

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x d_y	ρ_x	Δ_t	ρ_t
Δ_u	afwijking in de berekende watersp.	N/m ²	nor	0	1000	vak -	0	-	-
c'	cohesie (per laag)	N/m ²	log	$\mu(c')$	$\sigma(c')$	50 m 0.25 m	0	-	-
$\tan \phi'$	inwendige wrijving (per laag)	°	log	$\mu(\tan \phi')$	$\sigma(\tan \phi')$	50 m 0.25 m	0	-	-
$\mu(c')$	gemiddelde cohesie (per laag)	N/m ²	log	nom	$\sigma(c')/\sqrt{n}$	∞ ∞	0 - 1	-	-
$\mu(\tan \phi')$	gem inwendige wrijving (per laag)	°	log	nom	$\sigma(\tan \phi')/\sqrt{n}$	∞ ∞	0 - 1	-	-
q	modelonzekerheid Bishop	-	log	1.0	$V = 0.08$	-	-	-	-

N.B.: nom = nominale waarde (bijvoorbeeld waarde volgens tekening of bestek).

3.2.3 Opbarsten/piping

Tabel 3.4 geeft een overzicht van de specifiek voor het mechanisme opbarsten/piping benodigde statistische invoergegevens. Voor achtergronddiscussies wordt verwezen naar [17].

Opgemerkt wordt dat de gemiddelde rolweerstandshoek (53 graden) veel groter is dan de aanbeveling in de TAW-B- aanbeveling. Dit wordt gecompenseerd door de modelfactor m_p die een gemiddelde heeft van 0.67.

Tabel 3.4: Variabelen voor het mechanisme 'opbarsten/piping'

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
h_b	binnenwaterstand	m	nor	nom	$\sigma = 0.10$ m	-	-	48 uur	0
d	dikte afsluitlaag	m	log	nom	$V = 0.30$	300 m	0	-	-
γ_k	volumegewicht opbarstende grond	kN/m ³	nor	nom	$V = 0.05$	300 m	0	-	-
γ_p	volumegewicht zand	kN/m ³	nor	nom	$V = 0.05$	300 m	0	-	-
B	breedte waterkering	m	log	nom	$V = 0.10$	3000 m	0	-	-
D	dikte zandlaag	m	log	nom	$V = 0.10$	300 m	0	-	-
κ/d_{10}^2	factor C-Bear	l/ms	log	nom	$V = 0.15$	450 m	0	-	-
d_{70}/d_{10}	uniformiteit	-	log	nom	$V = 0.15$	750 m	0	-	-
θ	rolweerstandshoek	°	log	54°	$\sigma = 3^\circ$	750 m	0	-	-
d_{70}	korrelgrootte	m	log	nom	$V = 0.15$	180 m	0	-	-
η	constante van White	-	log	0.3	$V = 0.15$	-	-	-	-
m_o	modelfactor opbarsten	-	log	1.2	$V = 0.1$	-	-	-	-
m_p	modelfactor piping	-	log	0.7	$V = 0.1$	-	-	-	-
m_h	modelfactor waterstand (damping)	-	log	nom	$V = 0.1$	-	-	-	-

N.B.: nom = nominale waarde (bijvoorbeeld waarde volgens tekening of bestek).

3.2.4 Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam

Tabel 3.5 geeft een overzicht van de specifiek voor het mechanisme beschadiging bekleding en erosie dijklichaam benodigde invoergegevens. De schattingen zijn deels ontleend aan proeven [18,19] en deels aan schattingen door deskundigen.

Tabel 3.5: Variabelen voor het mechanisme 'beschadiging bekleding en erosie dijklichaam'

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	p_x	Δ_t	ρ_t
L_K	breedte afdeklaag van klei	m	log	nom	$\sigma = 0.10$	900 m	0	-	-
L_{BK}	breedte dijk kern op kruinhoogte	m	log	nom	$\sigma = 0.20$	1500 m	0	-	-
$tg \alpha_u$	helling buitentalud kern	-	nor	nom	$V = 0.05$	150 m	0	-	-
$tg \alpha_i$	helling binnentalud kern	-	nor	nom	$V = 0.05$	150 m	0	-	-
c_{rk}	modelfactor erosie afdeklaag	m^2s	log	nom	$V = 0.30$	-	-	12 uur	0
c_{rb}	modelfactor erosie dijk kern	m^2s	log	nom	$V = 0.30$	-	-	-	-
d_w	bewortelingsdiepte gras	m	log	nom	$V = 0.20$	150 m	0	-	-
c_g	modelfactor gras	$(ms)^{-1}$	log	nom	$V = 0.10$	300 m	0	-	-
D	steendikte	m	log	0.20-0.25	$V = 0.05$	1500 m	0	-	-
Δ	relatieve dichtheid	-	log	1.4	$V = 0.02$	1500 m	0	-	-
c_k	coëfficiënt steenzetting op klei	-	log	3.5	$V = 0.14$	vak	1	-	-
d_f	dikte van het de granulaire filterlaag,	m	log	0.05-0.10	$V = 0.20$	300 m	0.7	-	-
D_{p5}	korrelgrootte 15 % fractiel filter	m	log	0.02	$V = 0.10$	300 m	0.5	-	-
Ω	relatief open oppervlak bekleding	-	log	0.05	$V = 0.16$	300 m	0.5	-	-
c_f	coëfficiënt steenzetting op filter	-	log	6	$V = 0.16$	-	-	-	-
c_a	coëfficiënt in de leklengte-bepaling,	-	log	1	$V = 0.35$	-	-	-	-
c_b	coëfficiënt in de leklengte-bepaling,	-	log	1	$V = 0.35$	-	-	-	-
c_i	coëfficiënt in de leklengte-bepaling	-	log	1	$V = 0.35$	-	-	-	-
D	asfaltbeton	m	log	0.25	$V = 0.10$	vak	1	-	-
Δ	relatieve dichtheid	-	log	1.15	$V = 0.02$	1500 m	0	-	-
c_o	modelfactor	-	log	0.8	$V = 0.13$	-	-	-	-
Δ_h	drukverschil onder asfaltlaag	m	nor	0.0	$\sigma = 0.50$	1500 m	0	-	-

3.2.5 Piping kunstwerken

Tabel 3.6 geeft een overzicht van de specifiek voor het mechanisme piping kunstwerken benodigde invoergegevens. De achtergrond is grotendeels intuïtief.

Tabel 3.6: Variabelen voor het mechanisme 'piping kunstwerken'

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_L	model parameterkwellingte	-	log	3.0	$\sigma = 0.20$	vak	0	-	-
m_c	model parameter Bligh/Lane	-	nor	1.0	$\sigma = 0.10$	vak	0	-	-
L_v	verticale kwellingte	m	nor	nom	$V = 0.10$	vak	0	-	-
L_h	horizontale kwellingte	m	nor	nom	$V = 0.10$	vak	0	-	-
c	constante van Lane	-	nor	nom	$\sigma = 0.10$	vak	0	-	-
h_b	binnenwaterstand	m	nor	nom	$\sigma = 0.10$	vak	1	48 uur	0

3.2.6 Niet-sluiten van kunstwerken

De basisgegevens voor de beoordeling van het mechanisme “niet-sluiten” in de onderscheiden fasen zijn:

Waarschuwingfase	Bemande of onbemande kering Aantal alarmeringssystemen Aantal schakels
Mobilisatie fase	Aantal op te roepen personen Aantal personen nodig voor sluiten
Sluitingsfase	Aantal keermiddelen Sluiting in de natte of in de droge Aantal aandrijfsystemen Beschikbaar aandrijfsysteem Externe instantie nodig of niet

Met behulp van deze kenmerken kunnen via [2], [3] de faalkansen behorende bij iedere kering voor de verschillende fasen gevonden worden. Eventueel kan ook de onzekerheid in deze kansen worden gekwantificeerd en meegenomen.

Met behulp van onderstaande kenmerken kan een uitspraak worden gedaan over het gemiddelde en de standaardafwijking voor de benodigde sluitingsduur T_{sp}

Waarschuwingfase	1 ^e alarmeringssysteem Aantal schakels in waarschuwingssketen
Mobilisatie fase	Aantal personen dat opgeroepen moet worden Reistijd (min)
Sluitingsfase	Tijd nodig voor sluiting 1 ^e keermiddel (min) Open keerhoogte, h_{ok} t.o.v. NAP Gesloten keerhoogte t.o.v. NAP

Het programma PC-Ring heeft dan vervolgens de volgende invoer nodig (de getalwaarden zijn zuiver subjectief bepaald):

Tabel 3.7: Variabelen en constanten voor het mechanisme 'niet sluiten kunstwerk'

X	Omschrijving	Een- heid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
β_{ns}	betrouwbaarheid sluiten	-	nor	via [3]	via[3]	-	1		
v_{ns}	intrinsieke onzekerheid sluiten	-	nor	1.0	$V = 0.0$	-	0		
T_{sp}	sluitduur	uur	log	via [3]	via[3]	-	0		
m_{kom}	modelfactor kombergend volume	-	log	1.0	$\sigma = 0.2$	vak	0	-	-
m_{in}	modelfactor instromend volume	-	log	3.0	$\sigma = 0.2$	vak	0.4	-	-
c	coëfficiënt	-	log	nom	$\sigma = 0.1$	vak	0	-	-
A_{kom}	kombergende oppervlakte	m ²	log	nom	$\sigma = 0.1$	vak	0	-	-
h_{pv}	peilverhoging	m	nor	nom	$\sigma = 0.2$	vak	0	-	-
B	breedte overlaat	m	log	nom	$\sigma = 0.1$	vak	0	-	-
h_{ok}	open keerhoogte	m	nor	nom	$\sigma = 0.1$	vak	0	-	-
A	oppervlak leiding/koker	m ²	log	nom	$\sigma = 0.1$	vak	0	-	-
μ	afvoercoëfficiënt	-	nor	nom	$\sigma = 0.2$	vak	0	-	-

3.2.7 Duinen

Voor het mechanisme duinen moeten naast de geometrische informatie over de raai en de belastingmodellen de volgende grootheden in PC-Ring worden ingevoerd:

X	Omschrijving	Eenheid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d_x	ρ_x	Δ_t	ρ_t
m_D	modelfactor duinafslag (Leidraad)	-	log	1.0	$V = 0.25$	3000 m	0.9	-	1
d_{50}	mediane korreldiameter	mm	log	nom	$V = 0.15$	600 m	0.1	-	1

De variatie-coëfficiënten zijn geschat aan de hand van het onderzoek dat destijds is uitgevoerd als voorbereiding voor het opstellen van de leidraad Duinafslag (zie [20]).

4. Belastingmodellen

4.1 Inleiding

Voordat een dijk faalt door welk mechanisme dan ook, zullen de belastingen bijzonder groot moeten zijn. Er zal sprake zijn van extreme lokale waterstanden bij het dijkkringgebied en/of extreme windsnelheden. Een extreme lokale waterstand wordt gevormd door een extreme zeewaterstand en/of een extreme rivierafvoer of een extreme combinatie. In dit hoofdstuk zullen de statistische modellen worden toegelicht voor achtereenvolgens:

- Rivierafvoeren
- IJsselmeerstand
- Windsnelheden
- Waterstanden op de Noordzee
- Wind-waterstand-correlatie

Tabel 4.1 geeft een overzicht.

Vervolgens zal in hoofdstuk 5 in het kort verteld worden hoe uit de verschillende basisvariabelen (zeewaterstand, rivierafvoer, meerpeil, wind) voor de verschillende dijkkringen een lokale waterstand en golfbelasting wordt berekend. De onzekerheden die daarmee samenhangen zijn echter ook opgenomen in tabel 4.1.

4.2 Rivier-afvoer-debieten

4.2.1 Rijn bij Lobith

De kans op voorkomen van een extreem afvoerdebiet Q van de Rijn bij Lobith wordt berekend met behulp van de werklijn, die gegeven wordt in [7].

Het afvoerdebiet Q met een bepaalde terugkeertijd T_t ($1 / T_t$ = kans op overschrijden) wordt in het programma PC-Ring gegeven door de vier afvoerdebieten Q_i lijnen (zie figuur 4.1):

$$Q_1 = A_{Q1} + B_{Q1} \cdot \ln(T_t)$$

$$Q_2 = A_{Q2} + B_{Q2} \cdot \ln(T_t)$$

$$Q_3 = A_{Q3} + B_{Q3} \cdot \ln(T_t)$$

$$Q_4 = A_{Q4} + B_{Q4} \cdot \ln(T_t)$$

De getalwaarden van de A- en B-coëfficiënten staan in tabel 4.1.

De eerste 3 afvoerdebieten zijn één op één vergelijkbaar met de werklijn die uit 3 delen bestaat en beschreven wordt in "Toetsing uitgangspunten rivierdijk-versterkingen". Hiervan wordt, in tegenstelling met de literatuur, steeds de kleinste waarde genomen en niet met een geldigheidsgebied per voor verschillende intervallen van de terugkeertijd. Dit is gedaan om te voorkomen dat er fysisch onmogelijke verschijnselen zullen optreden als de onzekerheid van de parameters A_{Qi} en B_{Qi} meege-nomen wordt.

Voor het deel van de lage afvoeren is nog een vierde tak toegevoegd. Dit is gedaan om het Borges Castanheta model met blokken van twee dagen mogelijk te kunnen maken (zie hieronder). Deze tak is actief in het gebied onder de ca $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ en overschrijft daar de eigenlijk actieve tak 1. Voor een volledig overzicht van de afvoerstatistiek.

Het Borges Castanheta model (zie hoofdstuk 2) voor de rivierafvoer houdt in dat verondersteld wordt dat een rivierhoogwater 2 dagen aanhoudt ($\Delta_t = 2$ dagen). De verdeling voor een periode van 2 dagen is dan te vinden via:

$$P(Q_{N\Delta t} < q) = [P(Q_{\Delta t} < q)]^N$$

Omdat in het geval van waterstanden per definitie uitsluitend naar maxima in een periode van 180 dagen, het winterhalfjaar, wordt gekeken, geldt in dit geval:

$$P(Q_{jr} < q) = [P(Q_{2dgn} < q)]^{90}$$

Met $P(Q < q) = 1 - P(Q > q)$ is hieruit af te leiden dat ook geldt:

$$P(Q_{2dgn} > q) = 1 - [1 - P(Q_{jr} > q)]^{\frac{1}{90}}$$

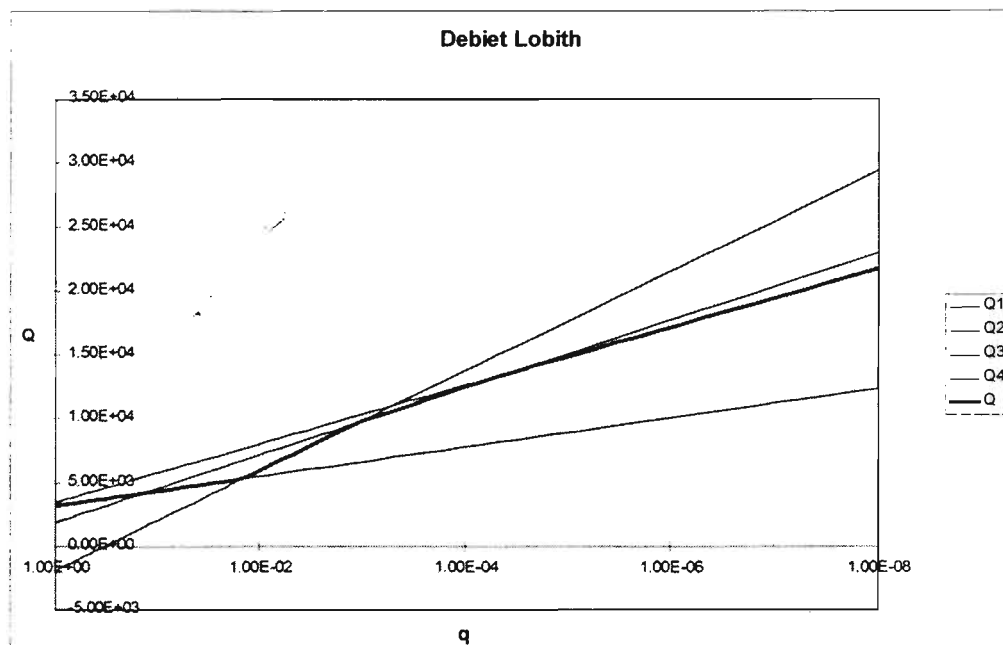
In dit geval wordt de momentane verdeling dus uit het jaarmaximum teruggerekend.

4.2.2 Vecht

Voor de jaarafvoer op de Vecht is een Gumbel verdeling gefit op een afvoer van $490 \text{ m}^3/\text{s}$ voor 1250 jaar en een afvoer van $380 \text{ m}^3/\text{s}$ voor 100 jaar. Dit resulteerde in:

$$F_{Q_{\text{jaar}}}(Q) = \exp(-\exp(-(Q - A)/B))$$

met $A = -178 \text{ m}^3/\text{s}$ en $B = 44 \text{ m}^3/\text{s}$. Uitgaande van een Borges-Castanheta model komen we voor de verdeling van een hoogwater van twee dagen op $A = -20 \text{ m}^3/\text{s}$ en $B = 44 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 4.1 Statistiek voor de Rijnaafvoer bij Lobith

4.3 IJsselmeerstand

De lokale waterstand “ergens langs het IJsselmeer” wordt berekend op basis van:

- de gemiddelde waterstand van het IJsselmeer: h_m
- de snelheid van de wind: v

Wind en meerstand gelden als onafhankelijk. Als windsnelheidstatistiek wordt Den Helder aangehouden. Hiervoor wordt verder verwezen naar hoofdstuk 4.4. In sommige case studies is ook van belang hoe snel de storm komt opzetten, de zogenaamde steilheid van de voorflank.

In dit hoofdstuk beperken we ons tot de gemiddelde waterstand op het IJsselmeer. Deze heeft bij benadering een Gumbel verdeling volgens:

$$F_{hm}(h_m) = \exp(-\exp(-(h_m - A) / B))$$

met $B = 0.11$ m en $A = -0.55$ m. Deze verdeling geldt voor een willekeurige periode van 12 uur en is gekalibreerd via:

$$P(h_m > 0.52 \text{ m}) = 0.01072 \text{ keer per jaar en}$$

$$P(h_m > 0.78 \text{ m}) = 0.00105 \text{ keer per jaar}$$

Bij $h_m = 0.52$ m is de overschrijdingsfrequentie 0.01072 keer per jaar met een overschrijdingsduur van 0.01074 dagen per jaar. Dit duidt dus op een gemiddelde duur van 1 dag.

Bij $h_m = 0.78$ m is de overschrijdingsfrequentie 0.001053 keer per jaar met een overschrijdingsduur van 0.000726 dagen per jaar. Dit duidt dus op een gemiddelde duur van 0.7 dag.

Per saldo lijkt het een goede benadering om uit te gaan van het volgende model:

$$\text{duur meerpeil} = a/h_m \leq 10 \text{ dagen}$$

Met $a = 0.5$ dag/m levert dit bijvoorbeeld bij $h_m = 0.5$ m een duur op van 1.0 dag en bij $h_m = 1.00$ m een duur van 0.5 dag. De bovengrens van 10 dagen geldt voor lage en negatieve meerpeilen.

Uit de analyses van RWS blijkt dat de duur richtingsafhankelijk is. Bij oostenwind en voor een windsnelheid groter dan 11 m/s is de duur van de waterstand veel kleiner is dan het gemiddelde. Aangezien het lastig is (niet onmogelijk) om rekening te houden met de windsnelheid is ervoor gekozen om voor westenwind uit te gaan van een duur van 1.5 dag en voor oostenwind van een duur van 0.5 dag. Voor het oostelijk deel van het IJsselmeer (waar we dit model in de case studies toepassen) is oostenwind toch grotendeels aflagend en heeft daardoor weinig invloed.

4.4 Wind

Voor de wind, gegeven een bepaalde windrichting φ wordt een Gumbel-verdeling aangehouden:

$$F_V(v | \varphi) = \exp(-\exp(-(v - A_\varphi) / B_\varphi))$$

Er worden verder 12 of 16 windrichtingen onderscheiden. De kansverdeling in 12 uur ongeacht de windsnelheid volgt uit:

$$F_V(v) = \sum F_V(v | \varphi) P(\varphi)$$

In de tijd wordt wind gemodelleerd als een Borges-Castanheta model (zie hoofdstuk 2). Aangenomen wordt dat de wind elke 12 uur een nieuwe onafhankelijke waarde aanneemt, dus:

$$\Delta_t = 12 \text{ uur en } \rho_t = 0$$

Het jaarmaximum ongeacht de windrichting volgt dan uit:

$$F_{V_{\text{jaar}}}(v) = F_{V_{12 \text{ uur}}}(v)^{360}$$

Hierbij is er van uitgegaan dat alleen het winterhalfjaar bijdraagt aan de kans op grote jaarmaxima.

Als locaties wordt in de huidige versie van PC-Ring onderscheid gemaakt tussen:

- Schiphol
- Deelden
- Den Helder

De windstatistiek op andere locaties is hiervan afgeleid.

Voor de locaties **Schiphol** en **Deelden** zijn de getalwaarden voor A_φ en B_φ opgenomen in tabel 4.2. Deze getalwaarden horen bij de genoemde periode van 12 uur. Verder is in deze tabel ook nog de kans op de windrichting gegeven. Voor de locatie **Den Helder** worden de windsnelheden met een herhalingsstijd van 10 jaar (3600 getijden) gelijk gehouden aan die van Schiphol terwijl de nepereringshoogtemet 0.8 wordt vermenigvuldigd:

$$B_{\text{Den Helder}} = 0.8 B_{\text{Schiphol}}$$

$$A_{\text{Den Helder}} = A_{\text{Schiphol}} + (B_{\text{Schiphol}} - B_{\text{Den Helder}}) \ln(3600)$$

Dit is het beeld dat uit het boek van Rijkoord en Wierenga (figuur 5.18) naar voren komt

Voor de berekening van het lokale waterstanden op het IJsselmeer is ook nog de stormsteilheid nodig. Voor deze stochast worden vier discrete waarden geïntroduceerd: 3, 8, 14 en 23. met respectievelijk kansen van 25%, 35%, 25% en 15%. Dit is dus een discrete stochastische variabele.

4.5 Waterstand op de Noordzee

De verdeling van de extreem hoge waterstanden voor de locaties **Hoek van Holland** en **Terschelling** wordt gegeven in [8]. De voorgestelde verdeling is een Pareto-verdeling voor jaarmaxima:

$$P(h_{HvH_{jaar}} > h) = 0.5 \left(1 + \gamma \frac{(h-u)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\gamma}}$$

Deze verdeling geldt alleen voor $h > u$. In het programma wordt de kans voor lagere waarden van h opgevat als een frequentie.

De waarden van de parameters u , σ , γ zijn te vinden in tabel 4.1. Voor deze statistiek is echter geen uitsplitsing naar windrichtingen (φ) beschikbaar. Daarom wordt de oude statistiek, waarvan de uitsplitsing op getij-niveau wel beschikbaar is, evenredig aangepast volgens:

$$P(H_{HvH_{12uur}} > h | \varphi = \varphi_i) = P_{oud}(H_{HvH_{12uur}} > h | \varphi = \varphi_i) \frac{P(H_{HvH_{jaar}} > h)}{P_{oud}(H_{HvH_{jaar}} > h)}$$

Met (zie [11]):

$$P_{oud}(H_{HvH_{12uur}} > h | \phi = \phi_i) = 1 - \exp\left\{-\exp\left[-(h - A_{h\phi}) / B_{h\phi}\right]\right\}$$

$$P_{oud}(H_{HvH_{jaar}} > h) = 1 - \exp\left\{-\exp\left[-(h - A_h) / B_h\right]\right\}$$

De parameters $A_{h\phi}$ en $B_{h\phi}$ gelden voor één enkel getij. Voor A_h en B_h moet het jaarmaximum worden aangehouden. De waarden van de parameters worden gegeven in tabel 4.3.

NB: voor $h < u$ wordt ook voor P_{oud} overgestapt op de frequentie, ofwel $P_{oud} = \exp(-(h - A_h)/B_h)$

Na deze bewerking volgt dus een verdeling van de zeewaterstand per getij en per windrichting. Een getij is de grootste tijdseenheid waarbinnen de waterstand als volkomen afhankelijk beschouwd kan worden en de kleinste tijdseenheid waarbij de opvolgende eenheden als onafhankelijk beschouwd kunnen worden, vergelijkbaar met een Borges Castanheta model (zie hoofdstuk 2).

Voor de locaties **Harlingen** en **Delfzijl** wordt uitgegaan van een Gumbel verdeling voor iedere windrichting. Voor de getalwaarde van de parameters A en B wordt verwezen naar de tabellen 4.4 en 4.5.

4.6 Gecombineerde wind-waterstandstatistiek Hoek van Holland/Terschelling

Tussen de optredende windsnelheid en de waterstand op de Noordzee is een gedeeltelijke correlatie. In het model van Volker [10] wordt dit gemodelleerd door de windsnelheid te splitsen in twee delen. Eén deel volkomen afhankelijk van de waterstand en één deel onafhankelijk van de waterstand (zie figuur 4.2):

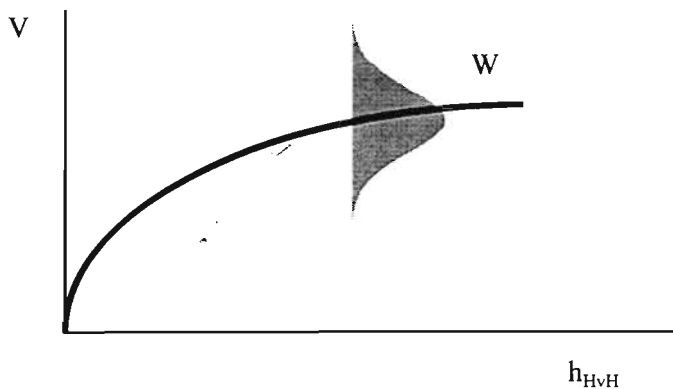
$$V = W + \frac{\rho}{b} \left[\frac{h_{NZ} - A_{h\phi}}{B_{h\phi}} \right]$$

De windsnelheid W geeft het onafhankelijke deel weer. Het afhankelijke deel is te bepalen met behulp van de waterstand op de Noordzee, h_{NZ} . De waarden van de parameters ρ en b en de parameters $A_{h\phi}$ en $B_{h\phi}$ zijn voor Hoek van Holland te vinden in tabel 4.3.

W is het deel van de windsnelheid dat niet gecorreleerd is met de waterstand op de Noordzee. W heeft de volgende kansverdeling:

$$F_w(W) = \exp\left(-\exp\left[\frac{-a - bW}{M}\right]\right)$$

In het model wordt de spreiding van W constant verondersteld. De waarden van de parameters a , b , M voor Hoek van Holland worden gegeven in tabel 4.3.



Figuur 4.2: Model Volker voor de windsnelheid

4.7 Gecombineerde Wind-waterstandstatistiek kust Groningen Friesland

4.7.1 Een enkele locatie

Uitgangspunt voor de gezamenlijke wind-waterstand-statistiek is dat op een bepaalde locatie de marginale windstatistiek en waterstandstatistiek bekend zijn.

Als voor de staarten van de verdelingen exponentiële functies worden aangenomen, is het voor het vastleggen van de afzonderlijke verdelingen voldoende als een enkele fractiel en de nepereringshoogte bekend zijn. Voorgesteld wordt fractiel en nepereringshoogte te bepalen voor de maatgevende omstandigheden. De fout die gemaakt wordt door het aannemen van de exponentiële verdelingen is dan gering als de "echte" verdeling anders is.

Voor de waterstand h op een bepaalde locatie wordt uitgegaan van een exponentiële verdeling gedefinieerd via:

$$h = a + b x$$

Met a een verschuivingsconstante en b de nepereringshoogte. De variabele x is een standaardexponentieelverdeelde variabele met:

$$P(x > x) = \exp(-x)$$

Als de nepereringshoogte b bekend is volgt de schaalconstante a (per jaar of per 12 uur) uit:

$$P(h > MHW) = \exp(-(MHW - a) / b)$$

Voor de statistiek van de windsnelheid V wordt eveneens uitgegaan van een exponentiële verdeling:

$$V = A + B y$$

Analoog aan de situatie bij de waterstand is A een verschuivingsconstante, B de nepereringssnelheden y een standaardexponentieelverdeelde variabele. De waarde van A volgt op soortelijke wijze als bij de waterstand uit een windfractiel met een kleine overschrijdingskans (bij voorkeur de gebiedsfrequentie).

In het vervolg wordt $x = (h - a) / b$ aangeduid als de gereduceerde waterstand en $y = (V - A) / B$ als de gereduceerde windsnelheid.

Voor het correlatiemodel wordt aangenomen dat bij een bepaalde gegeven gereduceerde waterstand x de bijbehorende gereduceerde windsnelheid y kan worden beschouwd als zijnde normaal verdeeld met gemiddelde $x + y_0$ en standaardafwijking s :

$$y = y_0 + x + u s$$

Hierin is y_0 een constante en u een normaal verdeelde variabele met gemiddelde 0.0 en standaard afwijking 1.0. In figuur 4.2 is dit verband geschetst. In de formule box aan het eind van deze paragraaf wordt aangetoond dat voor de staart van de verdeling van y geldt:

$$P(y > y) = \exp(-(y - y_0 - s^2 / 2))$$

Daaruit volgt dat y het aangenomen correlatiemodel $y = y_0 + x + u s$ althans asymptotisch niet strijdig is met de eerder veronderstelde exponentiële verdeling van y . Kennelijk moet wel genomen worden:

$$y_0 = -s^2 / 2$$

Daarmee gaat de correlatie-betrekking over in:

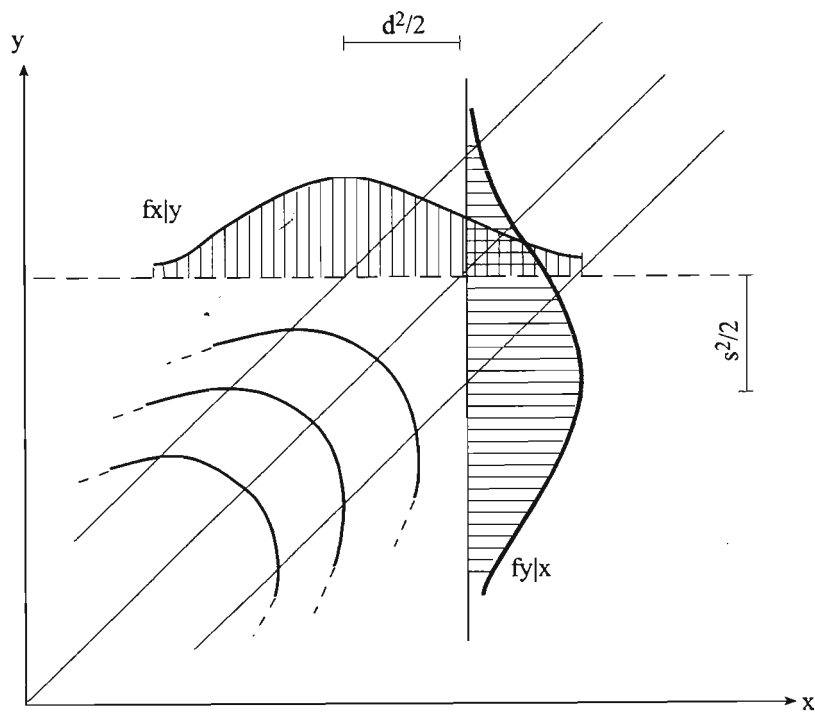
$$y = x + u s - s^2 / 2$$

Volgens een notitie van Volker (RWS, 20-4-1995) is de verschuivingsterm in de 10^{-4} kwantiel van de windsnelheid bij Maatgevend Hoog Water gemiddeld ongeveer $^a V = 4$ m/s bedraagt. Hiermee kan dan s worden berekend (zie figuur 4.3):

$$^a V / B = s^2 / 2$$

$$s = \sqrt{2 \cdot ^a V / B}$$

Met $^a V = 4$ m/s en $B = 3$ m/s volgt $s = 1.6$. Daarmee ligt het gehele model vast.



Figuur 4.3: Gezamenlijke kdf van x en y

Opmerkingen:

1. Het is niet nodig de statistiek voor jaarmaxima eerst om te rekenen naar een statistiek voor getijden. Voor zowel de gereduceerde wind als de waterstand betekent dit gewoon een verschuiving van $\ln n = \ln 730 = 6.59$.
2. De verdere uitwerking moet per windrichting gebeuren.

Formulebox

Ga uit van:

$$y = x + u \sigma$$

De y_0 term wordt dus eenvoudshalve buiten beschouwing gelaten. Gezocht wordt:

$$P(y > y) = \int P(y > y | u = u) f_u(u) du = \int P\{x > y - u\sigma\} f_u(u) du$$

Invullen van de verdelingsfunctie van x (exponentieel):

$$P(y > y) = \int_{y-u\sigma > 0} \exp\{-(y-u\sigma)\} f_u(u) du + \int_{y-u\sigma < 0} f_u(u) du$$

De eerste integraal geldt voor $x > 0$, de tweede voor $x < 0$. Verder uitwerken:

$$\begin{aligned} P(y > y) &= \int_{-\infty}^{y/\sigma} \exp\{-(y-u\sigma)\} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\{-\frac{u^2}{2}\} du + \int_{y/\sigma}^{\infty} f_u(u) du \\ &= \int_{-\infty}^{y/\sigma} \exp\{-(y-\frac{\sigma^2}{2})\} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\{-\frac{(u-\sigma)^2}{2}\} du + \int_{y/\sigma}^{\infty} f_u(u) du \\ &= \exp\{-(y-\frac{\sigma^2}{2})\} \Phi(\frac{y}{\sigma} - \sigma) + [1 - \Phi(\frac{y}{\sigma})] \approx \exp\{-(y-\frac{\sigma^2}{2})\} \end{aligned}$$

In bovenstaande is $\Phi(\cdot)$ de verdelingsfunctie van de standaard normale verdeling.
Voor $y \rightarrow x$ en dus $\alpha \rightarrow 0$ gaat $\Phi(y/\sigma)$ naar 1.0.

4.7.2 Wind-waterstand-statistiek langs de hele waddenkust

Uiteindelijk zijn we geïnteresseerd in de gecombineerde windwaterstandstatistiek voor de hele waddenkust. In deze paragraaf wordt dit gecombineerde model opgezet. Uitgangspunt is dat voor een dijkvak langs de waddenkust het in 4.7.1 gehanteerde model moet gelden. In dit geval is het echter zinvol het model om te keren en de waterstand uit te drukken in de windsnelheid:

$$x(i) = y + \hat{u}(i) d - d^2 / 2$$

Om verwarring te voorkomen wordt hier de letter d in plaats van s gebruikt. Uit symmetrie-overwegingen geldt overigens wel dat $d = s$ (zie figuur 4.3). Verder is i het dijkvaknummer.

De correlatie van de waterstanden langs de kust is nu te regelen via de correlatie van de parameters $u(i)$. Indien de $u(i)$ voor alle stations volledig gecorreleerd worden genomen, ontstaat een volledige correlatie van de lokale waterstanden $h(i)$. Dat wil dus zeggen dat de waterstand met een herhalingstijd van bijvoorbeeld 100 jaar gelijktijdig in Harlingen en in Delfzijl optreedt. Indien de correlatie tussen de $u(i)$ nul wordt genomen is de correlatie tussen de waterstanden niet meer volledig, maar ook niet nul. De resterende gedeeltelijke correlatie is het gevolg van het feit dat alle waterstanden gecorreleerd zijn met de wind.

Beschouw nu de twee plaatsen Harlingen (1) en Delfzijl (2).

Voor de schatting van $\rho(u_1, u_2)$ gaan we uit van hoogwater in Harlingen. Neem aan dat het hoogwater bij Delfzijl in dat geval niet hoger reikt dan *h onder het vergelijkbare kwantiel. (Voorbeeld: een waterstand van MHW bij Harlingen gaat gemiddeld gepaard met MHW minus 1 m bij Delfzijl; dan is $^*h = 1$ m). De verwachtingswaarde voor dit verschil kan gevonden worden via een probabilistische som. Via $x_1 = y + u_1 d - d^2/2$ en $x_2 = y + u_2 d - d^2/2$ geldt voor het verwachte verschil ($x_1 - x_2$)

$$E\{x_1 - x_2\} = E\{(u_1 - u_2)d\}$$

Wegens correlatie ρ tussen u_1 en u_2 kan u_2 geschreven worden als $u_2 = \rho u_1 + v \sqrt{1 - \rho^2}$, met v een nieuwe onafhankelijke Gaussische standaard verdeelde variabele. Daarmee:

$$E\{x_1 - x_2\} = E\{(1-\rho)u_1 d + \dots\}$$

Op de plaats van de puntjes staan termen met verwachting nul. De verwachtingswaarde u_1 gegeven een bepaalde hoge waarde van x_1 volgt via een nivo-II som.

$$Z = x_1 - y - u_1 d + d^2 / 2$$

waarbij d de waarde 1.6 heeft.

Als x_1 zodanig wordt gekozen dat $\beta = 3.7$, dan volgt als design point $y_d = 3.6$ en $u_{1d} = 1.5 - d$, ofwel:

$$^*h = E\{x_1 - x_2\} = (1 - \rho) b d^2$$

Op basis van het 10 jaren overzicht valt te achterhalen dat in de periode 1981-1990 Δh gemiddeld gelijk was aan ca. 0.30 m bij waterstanden rond de 3 m. Voor waterstanden rond de 6 m geldt dan als schatting $\Delta h = 0.6$ m.

Verder uitgaande van $b = 0.3$ m, $d = 1.6$ volgt dan $p = 0.2$. Gemakshalve is de nepereringshoogte bij Harlingen en Delfzijl gelijk gekozen.

4.8 Tabellen

Tabel 4.1: Statistische modellen Belastingparameters

X	Omschrijving	Een- heid	Type	Parameters		Ruimtelijke spreiding		Variatie in de tijd	
				ligging	spreiding	d _x	ρ _x	Δ _t	ρ _t
Algemeen									
m _{gH}	modelfactor Bretschneider voor H _s	-	log	1.0	σ = 0.15	900 m	0.7	-	1
m _{gT}	modelfactor Bretschneider voor T _s	-	log	1.0	σ = 0.15	900 m	0.7	-	1
Δh _{zw}	fout in ZWENDL	m	nor	0.0	σ = 0.15 m	6000 m	0.5	-	1
β*	afw. Golfrichting	°	nor	0.0	σ = 20°	vak	0	1 jaar	0.5
t _s	stormduur	uur	log	7.5	V = 0.25	-	1	12 uur	0
-	flanksteilheid	-	dis	zie 5.5	zie 5.5	-	1	12 uur	0
Rijnafvoer									
Q	Debiet Lobith (jaar)	m ³ /s	gum	A _Q	B _Q	-	1	48 uur	0
A _{Q1}	parameter Q1	m ³ /s	nor	5727.	V = V _{uA}	-	-	-	-
B _{Q1}	parameter Q1	m ³ /s	nor	1699.	V = V _{uB}	-	-	-	-
A _{Q2}	parameter Q2	m ³ /s	nor	7020.	V = V _{uA}	-	-	-	-
B _{Q2}	parameter Q2	m ³ /s	nor	1150.	V = V _{uB}	-	-	-	-
A _{Q3}	parameter Q3	m ³ /s	nor	7900.	V = V _{uA}	-	-	-	-
B _{Q3}	parameter Q3	m ³ /s	nor	995.	V = V _{uB}	-	-	-	-
A _{Q4}	parameter Q4	m ³ /s	nor	5400.	V = V _{uA}	-	-	-	-
B _{Q4}	parameter Q4	m ³ /s	nor	500.	V = V _{uB}	-	-	-	-
Vechtafvoer									
Q _v	Debiet Vecht (2 dagen)	m ³ /s	gum	A _Q	B _Q	-	-	48 uur	0
A _Q	parameter	m ³ /s	det	-0,20	-	-	-	-	-
B _Q	parameter	m ³ /s	det	0.44	-	-	-	-	-
IJsselmeerstand									
h _m	Gemiddelde meerpeil (12 uur)	m	gum	A=0.55 m	B=0.11 m	-	-	a/h _m a=0.5 dag/m	0
Wind Hoek van Holland (=Schiphol) en Deelden									
V	Windsnelheid	m/s	gum	tabel 4.2	tabel 4.2	-	-	12 uur	0

Waterstand Noordzee Hoek van Holland ¹⁾									
h_{HvH}	waterstand HvH	m	par	u	σ, γ	-	1	12 uur	0
u	parameter h_{HvH}	m	nor	2.53	$V = 0.03$	-	1	-	1
σ	parameter h_{HvH}	m	nor	0.2474	$V = 0.05$	-	1	-	1
γ	parameter h_{HvH}	-	nor	0.0364	$V = 0.06$	-	1	-	1
Waterstand NoordzeeTerschelling ²⁾									
h_{ter}	waterstand Ter	m	par	u	σ, γ	-	1	12 uur	0
u	parameter h_{ter}	m	nor	2.61	$V = 0.03$	-	1	-	1
σ	parameter h_{ter}	m	nor	0.324	$V = 0.05$	-	1	-	1
γ	parameter h_{ter}	-	nor	-0.106	$V = 0.06$	-	1	-	1
Waterstand Noorzee Harlingen/Delfzijl									
h_{har}	waterstand	m	gumr	A	B, γ	-	-	12 uur	0
A	parameter	m	det	tab 4.4/4.5					
B	parameter	m	det	tab 4.4/4.5					
Ongecorrleerd deel Wind Hoek van Holland									
W	onafhankelijk deel windsnelheid	m/s	gum	a_{hqp}, M	b_{hqp}, M	-	1	12 uur	0
a_{hqp}	parameter W	-	det	tabel 4.3	-	-	-	-	-
b_{hqp}	parameter W	s/m	det	tabel 4.3	-	-	-	-	-
a	parameter W	-	nor	tabel 4.3	$V = 0.03$	-	1	-	1
b	parameter W	s/m	nor	tabel 4.3	$V = 0.05$	-	1	-	1
ρ	parameter W	-	det	tabel 4.3	-	-	-	-	-
M	parameter W	-	det	tabel 4.3	-	-	-	-	-
φ	windrichting	-	dis	tabel 4.3	-	-	1	12 uur	0

N.B. Bij de lognormale verdeling worden het gemiddelde en de standaardafwijking van de werkelijke lognormale verdeling gegeven en niet van de onderliggende normale verdeling

- ¹⁾ Om dit resultaat te krijgen met het richtingenmodel volgens 4.5 moet $u = 2.4378$ m, $\sigma = 0.2660$ m en $\gamma = 0.0364$ worden ingevoerd.
- ²⁾ Om dit resultaat te krijgen met het richtingenmodel volgens 4.5 moet $u = 2.4269$ m, $\sigma = 0.338$ m en $\gamma = -0.106$ worden ingevoerd

Tabel 4.2: Statistiek voor de windsnelheid (12 uur waarden, gegeven de richting)

Windrichting		Schiphol			Deelen		
φ [°]		P(φ)	A [m/s]	B [m/s]	P(φ)	A [m/s]	B [m/s]
0.0	N	0.047	9.19	1.35	0.051	4.48	2.34
11.5	NNO	0.045	9.60	1.21	0.045	4.25	2.20
45.0	NO	0.056	9.61	1.10	0.052	4.71	1.90
67.5.5	ONO	0.0645	9.25	1.10	0.052	4.66	1.75
90.0	O	0.0576	9.21	1.10	0.046	4.96	1.77
112.5	OZO	0.0415	8.82	1.14	0.036	4.99	1.72
135.0	ZO	0.0445	8.02	1.83	0.039	4.59	2.13
157.5	ZZO	0.0583	8.64	1.37	0.041	4.44	1.98
180.0	Z	0.0746	9.19	1.55	0.066	4.82	2.24
202.5	ZZW	0.0908	10.70	1.60	0.080	5.39	2.60
225.0	ZW	0.0961	12.45	1.65	0.102	5.78	2.75
247.5	WZW	0.0910	12.16	1.85	0.118	6.28	2.94
270.0	W	0.0760	11.74	2.07	0.093	6.09	3.00
292.5	WNW	0.0576	13.07	1.82	0.079	5.73	3.01
315.0	NW	0.0509	11.55	1.77	0.050	4.62	2.54
337.5	NNW	0.0496	10.62	1.52	0.051	4.54	2.60

Tabel 4.3: Statistische gegevens Wind-Waterstand Hoek van Holland

Windrichting		Kans	Parameters gegeven φ per getij					
φ [°]		P(φ)	$A_{b\varphi}$ [m]	$B_{b\varphi}$ [m]	a [-]	b [s/m]	ρ [-]	M [-]
0.0	N	0.0472	1.08	0.185	-1.0	0.30	0.36	0.67
22.5	NNO	0.0453	1.14	0.072	-9.6	1.00	0.00	1.21
45.0	NO	0.0558	1.11	0.078	-9.6	1.00	0.00	1.10
67.5	ONO	0.0645	1.06	0.052	-9.3	1.00	0.00	1.10
90.0	O	0.0576	1.05	0.065	-9.2	1.00	0.00	1.10
112.5	OZO	0.0415	0.82	0.098	-8.8	1.00	0.00	1.14
135.0	ZO	0.0445	1.16	0.047	-8.0	1.00	0.00	1.83
157.5	ZZO	0.0583	1.11	0.073	-8.6	1.00	0.00	1.37
180.0	Z	0.0746	1.16	0.087	-9.2	1.00	0.00	1.55
202.5	ZZW	0.0908	1.27	0.063	-10.7	1.00	0.00	1.60
225.0	ZW	0.0961	1.32	0.109	-1.72	0.39	0.67	1.00
247.5	WZW	0.0910	1.38	0.119	-1.46	0.33	0.56	1.00
270.0	W	0.0760	1.17	0.250	-1.03	0.24	0.50	0.67
292.5	WNW	0.0576	1.08	0.304	-1.13	0.30	0.67	0.67
315.0	NW	0.0509	1.05	0.326	-1.16	0.31	0.68	0.67
337.5	NNW	0.0496	1.05	0.261	-1.5	0.40	0.78	0.67
Jaarmaximum over alle richtingen:			2.20	0.33				

Tabel 4.4 Waterstand te Harlingen (gegeven de windrichting, 12 uur)

Harlingen	P(h > 4.59 m)	Nepererings hoogte [m]	A [m]	B [m]
WZW	1.1 E-6	0.135	2.27	0.135
W	5.6 E-5	0.157	2.53	0.157
WNW	3.1 E-4	0.175	2.65	0.175
NW	3.7 E-4	0.181	2.63	0.181
NNW	2.5 E-4	0.183	2.54	0.183
N	9.8 E-6	0.167	2.19	0.167

Tabel 4.4 Waterstand te Delfzijl (gegeven de windrichting, 12 uur)

Delfzijl	P(h > 5.57 m)	Nepererings hoogte [m]	A [m]	B [m]
WZW	6.0 E-7	0.180	2.36	0.180
W	5.2 E-5	0.218	2.70	0.218
WNW	5.6 E-4	0.255	2.89	0.255
NW	1.9 E-4	0.237	2.85	0.237
NNW	1.9 E-4	0.245	2.76	0.245
N	8.4 E-6	0.220	2.38	0.220

5. Lokale waterstanden

5.1 Waarderlanden

Om de lokale waterstand langs een dijkkring in het benedenrivierengebied te bepalen wordt gebruik gemaakt de resultaten van het RWS-programma ZWENDL. Dit programma berekent voor een aantal combinaties van de waterstand bij Hoek van Holland (eigenlijk Maasmond) en de Rijnafvoer bij Lobith de lokale waterstanden in een aantal stations. In totaal gaat het om 54 combinaties, te weten 6 waterstanden en 9 afvoeren.

De waterstand in de Maasmond, h_{MM} volgt uit die van Hoek van Holland h_{HvH} via:

$$h_{MM} = h_{HvH} - 0.05m$$

Voor dijkvakken die tussen de stations in liggen worden de lokale waterstanden gevonden via lineaire interpolatie.

Voor de Windstatistiek wordt uitgegaan van Hoek van Holland.

Voor de kering(en) zijn er vier mogelijkheden (het onderscheid dat de kering in de Nieuwe Waterweg open is en de Hartelkering dicht of omgekeerd wordt niet beschouwd):

- 1) kering is dicht en moest dicht zijn;
- 2) kering is dicht maar had open moeten zijn;
- 3) kering is open en moest open zijn;
- 4) kering is open en moest dicht zijn.

Aangenomen wordt dat het sluitregime zodanig is dat falen bij een open kering, die ook bedoeld is open te zijn, niet optreedt. Daaruit volgt dat de uiteindelijke faalkans alleen wordt bepaald door de mogelijkheden 1), 2) en 4). In geval 4) wordt de kans op "ten onrechte niet sluiten" gesteld op 0.004. Er volgt dus:

$$P(F) = P(F \mid \text{dichte kering}) + 0.004 P(F \mid \text{open kering})$$

Het open of dicht zijn van de kering heeft daarbij alleen invloed op de fysica van de locale waterstand en niet op de statistiek van de basisvariabelen "waterstand Noordzee" en "afvoer Lobith".

5.2 Lingerwaard

De Lingerwaard heeft dezelfde berekeningsgrondslag als Waarderlanden alleen is in de huidige case alleen met een open kering gewerkt. Alleen de windstatistiek is die van Deelen.

Opgemerkt wordt dat de zee bij de Lingerwaard natuurlijk slechts een uiterst marginale invloed heeft. Men zou dit rekenmodel eventueel kunnen vereenvoudigen.

5.3 Grofriland

Voor de dijkvakken langs de Waddenkust wordt voor de waterstand lineair geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd tussen de waterstanden in Harlingen en Delfzijl.

Voor de dijkvakken langs het IJsselmeerdeel zijn door RIZA berekeningen gemaakt van de lokale waterstand, de golfhoogte en de piekperiode als functie van de waterstand op het IJsselmeer en de wind bij Schiphol.

5.4 Kabeljauwsche Waard

De Kabeljauwsche Waard heeft dezelfde berekeningsgrondslag als Waarderlanden. Bij de berekening van de lokale waterstanden wordt verder bij de berekening van de HQ-combinaties rekening gehouden met de windrichting. De HQ-relaties zijn bepaald voor de richtingen West, West-Noord-West en Zuid-West. Deze zijn als volgt gebruikt:

resultaten W	voor richting W
resultaten WNW	voor richtingen WNW, NW, NNW en N
resultaten ZW	voor richtingen ZW, WZW, en NNO t./m. ZZW

Verder is als lokale correctie een windopzet (in m) per windrichting doorgevoerd.

5.5 Kamperland

De basisvariabelen voor de berekening van de waterstanden rond de dijkkring Kamperland zijn:

1. IJssel (afvoer bedraagt 15% van de Rijn-afvoer)
2. Vecht
3. Waterstand IJsselmeer
4. Wind Schiphol
5. Steilheid van de stormflank

Door RIZA zijn berekeningen gemaakt voor de bepaling van de waterstanden op enkele stations.

5.6 Schelland

De wind en waterstandstatistiek is die van Terschelling. De golven volgen uit HISWA-berekeningen. De resultaten daarvan zijn vertaald in de K_1 K_2 -correctiefactoren op de Bretschneider-berekening.

In de case study wordt de volgende overschrijdingslijn voor Terschelling gebruikt (kans per jaar, Paretoverdeling, geldig voor $h > 2.61 \text{ m} + \text{NAP}$):

$$P(H > h) = 0.5 \left[1 + \gamma \frac{(h - A)}{B} \right]^{(-1/\gamma)}$$

h = waterstand ten opzichte van NAP

$A = 2.61 \text{ m}$, $B = 0.3244 \text{ m}$ en $\gamma = -0.10595$

De overeenkomstige Gumbel heeft $A = 2.20 \text{ m}$ en $B = 0.33 \text{ m}$

5.7 Volland

Rivierdijken

De hoogwaterstanden die in het Zuid-Hollands benedenrivierengebied kunnen voorkomen, worden bepaald door een samenspel van enerzijds de Bovenrijnafvoer en anderzijds de hoogwaterstanden te Hoek van Holland/Maasmond in combinatie met de sluitingsstrategie van de stormvloedkeringen in de Nieuwe Waterweg en het Hartelkanaal. Per station zijn deze hoogten vastgelegd in 54 combinaties van Rivierafvoer en Zeestand.

In het deel Maasmond - SVKW wordt rekening gehouden met seiches van 0.40 m (opzet).

Hollandsche IJssel

De Provincie Zuid Holland heeft ook voor stations langs de Hollandsche IJssel voor 54 combinaties van waterstand Hoek van Holland en rivierafvoer de waterhoogte bepaald. Alle invloeden genoemd in 2.5 zijn hierin verwerkt. De waterstanden treden alleen op bij de windrichting tussen NW en ZW.

Keringen

De keringen SVKW en SVKH worden gesloten bij de volgende combinaties van Bovenrijnafvoer en verwachte hoogwaterstand te Hoek van Holland monding (z.g. SVSD-lijnen).

Bovenrijnafvoer [m ³ /s]	Sluitpeil SVKW	Sluitpeil SVKH
600	3.43	3.16
2000	3.35	3.09
4000	3.27	3.00
6000	3.16	2.89
8000	2.88	2.78
10000	2.60	2.56
13000	2.26	2.24
16500	1.95	1.95
18000	1.81	1.81

Op deze wijze wordt bereikt dat, na een zeespiegelrijzing van 0,10 m, in Rotterdam een waterstand van NAP +3.60 m een overschrijdingsfrequentie heeft van 1:10000 per jaar en dat in Dordrecht een waterstand van NAP +3.00 m een overschrijdingsfrequentie heeft van 1:2000 per jaar.

De gecombineerde faal- en bezwijkkans van de keringen is 0,004 bij volledig afhankelijk falen. Zie verder: Waarderlanden.

N.B.: Voor de Hollandsche IJssel is altijd met de SVKW dicht gerekend.

Deining

In het deel Maasmond - SKVW wordt rekening gehouden met deining:

De combinatie met de gewone golven vindt plaats via:

$$H_s^2 = (H_s^2)_{deining} + (H_s^2)_{golf}$$

$$(T_p^4 H_s^2) = (T_p^4 H_s^2)_{deining} + (T_p^4 H_s^2)_{golf}$$

5.8 Noord-Schuddeland

Noordzee

De waterstand ter plaatse van de monding van de Oosterschelde h_{os} wordt gevonden via:

$$h_{os} = 0.86 h_{H_{VH}} + 1.07 \text{ m}$$

Voor een mechanisme waarbij de wind geen rol speelt kan direct met de over alle windrichtingen gesommeerde functie gerekend worden. Ook deze is voor Hoek van Holland gegeven.

Oosterscheldebekken

Als verwacht wordt dat de buitenwaterstand een bepaalde waarde overschrijdt, wordt de kering in de Oosterschelde gesloten. De waterstand op het bekken voor de kust van Noord-Beveland wordt vervolgens gegeven door:

$$h_{bekken} = 0.3 h_{os} + 1.98 \text{ m} = 0.26 h_{nz} + 2.20 \text{ m}$$

6. Literatuur

- [1] Calle, E. & Weijers, J. 1994. *Technisch rapport voor controle op het mechanisme piping*. Delft: Technische Adviescommissie Waterkeringen.
- [2] Cooke, R.M. & Noortwijk van, J. & Bedford, T.J., *Uncertainty analysis of inundation probabilities*, TU Delft & HKV, 1998.
- [3] Elst van, N.P. 1997. *Betrouwbaarheid van het Sluitproces van Beweegbare Waterkeringen*. Delft: Delft University Press.
- [4] Frijters, M.P.C. & Slijkhuis, K.A.H. 1997. *Eindrapport onzekerheidsanalyse inundatiekans*. Utrecht: Bouwdienst Rijkswaterstaat ONIN-1-98016
- [5] Meer van der, J.W. 1993. *Golfploop en golfoverslag bij dijken*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium H638.
- [6] Meer van der, J.W. 1997. *Golfploop en golfoverslag bij dijken*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium H2458/H3051.
- [7] Passchier, R.H. 1993. *Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterkingen: Aanvullend rapport 2: Werklijn Rijn en Maas*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium Q1664.
- [8] Phillippart, M.E., Dillingh, D. & Pwa, S.T. 1995. *De basispeilen langs de Nederlandse kust; De ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen*. Den Haag: Rijks Instituut voor Kust en Zee.
- [9] Technische Adviescommissie voor de waterkeringen. 1989. *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken; Deel I-Bovenrivierengebied* Den Haag.
- [10] Vrouwenvelder, A.C.W.M. et al. 1994. *Case Study Noord-Schuddeland*. Delft: TNO 94-CON-R0122.
- [11] Vrouwenvelder, A.C.W.M. et al. 1997. *Case Study Noord-Schuddeland*. Delft: TNO 97-CON-R0752.
- [12] Vrouwenvelder, A.C.W.M. et al. 1997. *Case Study Kabeljauwsche Waard*. Delft: TNO 96-CON-R1326.
- [13] Vrouwenvelder, A.C.W.M. et al. 1993. *Rekenmethoden voor een probabilistische dijkkring-analyse*. Delft: TNO 93-CON-R1332.
- [14] Slijkhuis, K., 1998. *Onzekerheidsanalyse Inundatiekans - Mechanisme beschrijvingen*, Beschrijvingenbundel ONIN-1-98017
- [15] Best, H., Calle, E.O.F. 1993. *Statistische karakterisering van gemeten fluctuaties van dijkhoogten*, GD-Rapport CO 333470/12
- [16] Calle E.O.F. 1997 *Ijkpunt marsroute TAW case hoeksche Waard: modelfactor macro stabiliteit*, Delft, GD-Rapport CO 367060/30
- [17] Calle E.O.F. 1990 *Een probabilistische aanpak voor de analyse van piping onder waterkeringen*, Delft, GD-Rapport CO 290531/23
- [18] Meijer D.G. en Verheij H.J. 1998; *Grasdijken - analyse meetresultaten grootschalig modelonderzoek*, WL-Delft Hydraulics, Q1584
- [19] Klein-Breteler M, 1994, *Case Study Noordschuddeland - betrouwbaarheidsfuncties voor dijkbekledingen inclusief reststerkte*, WL-Delft Hydraulics, H1687
- [20] Graaff, J. van de 1993. *Probabilistische Methoden bij de Duinontwerp. Achtergronden van de TAW-Leidraad "Duinafslag"*, TU Delft.

Bijlage 1 - Verdelingsfuncties

Type	Parameters	Momenten
Normaal $\sigma > 0$ $f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$	$1 = \mu$ $2 = \sigma$	$m = \mu$ $s = \sigma$
Lognormaal $x > 0, \zeta > 0$ $f_x(x) = \frac{1}{x\zeta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right)$	$1 = \lambda$ $2 = \zeta$	$m = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$ $s = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right) \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$
sLognormaal $x > \varepsilon, \zeta > 0$ $f_x(x) = \frac{1}{(x-\varepsilon)\zeta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-\varepsilon) - \lambda}{\zeta}\right)^2\right)$	$1 = \lambda$ $2 = \zeta$ $3 = \varepsilon$	$m = \varepsilon + \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$ $s = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right) \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$
sExponentieel $x \geq \varepsilon, \lambda > 0$ $f_x(x) = \lambda \exp(-\lambda(x-\varepsilon))$	$1 = \varepsilon$ $2 = \lambda$	$m = \varepsilon + \frac{1}{\lambda}$ $s = \frac{1}{\lambda}$
Gamma $x \geq 0, b > 0, p > 0$ $f_x(x) = \frac{b^p}{\Gamma(p)} \exp(-bx) x^{p-1}$	$1 = p$ $2 = b$	$m = \frac{p}{b}$ $s = \frac{\sqrt{p}}{b}$
Beta $a \leq x \leq b, r, t \geq 0$ $f_x(x) = \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{t-1}}{(b-a)^{r+t-1} B(r,t)}$	$1 = a$ $2 = b$ $3 = r$ $4 = t$	$m = a + (b-a) \frac{r}{r+t}$ $s = \frac{b-a}{r+t} \sqrt{\frac{rt}{r+t+1}}$
Gumbel $-\infty < x < +\infty, \alpha > 0$ $f_x(x) = \alpha \exp(-\alpha(x-u) - \exp(-\alpha(x-u)))$	$1 = u$ $2 = \alpha$	$m = u + \frac{0.577216}{\alpha}$ $s = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$
Weibull $\varepsilon \leq x < +\infty, u, k > 0$ $f_x(x) = \frac{k}{u-\varepsilon} \left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^k\right)$	$1 = u$ $2 = k$ $3 = \varepsilon$	$m = \varepsilon + (u-\varepsilon) \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$ $s = (u-\varepsilon) \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$
Pareto $h > u$ $P(h_{HvH} > h) = 0.5 \left(1 + \gamma \frac{(h-u)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}$	$1 = u$ $2 = \sigma$ $3 = \gamma$	