

UNIVERSITEIT TWENTE

FACULTY OF ENGINEERING TECHNOLOGY
CIVIL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

VERGELIJKING TUSSEN EEN SEMI-PROBABILISTISCHE EN PROBABILISTISCHE PIPING BEOORDELING VOOR EEN DIJKVAK VAN DE STERKE LEKDIJK

DOOR:

JOUKE FREDRIK (J.F.) KUIPER – UNIVERSITEIT TWENTE

S2007797

BEGELEIDERS:

DR J.J. WARMINK – UNIVERSITEIT TWENTE

ING. I.M. VAN MIDDELKOOP-MOLENAAR – SWECO NEDERLAND B.V.

IR. J. STEENBERGEN-KAJABOVÁ – SWECO NEDERLAND B.V.

TWEEDE BEGELEIDER:

IR. R.N.F. SLOOT – UNIVERSITEIT TWENTE

30 JUNI 2020

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**



COLOFON

Uitgegeven door	Sweco, Universiteit Twente
Informatie	
Contact	
Uitgevoerd door	Jafeth Kuiper
Datum	30 juni 2020
Status	eindversie
Versienummer	2.0

VOORWOORD

Deze Bachelor Thesis is het eindproduct van de afronding van de Bachelor Civil Engineering aan de Universiteit Twente. Het onderzoek is uitgevoerd in de periode van april 2020 tot en met juni 2020 en gaat over het vergelijken van een semi-probabilistische en probabilistische piping beoordeling voor een dijkvak van de Sterke Lekdijk (dijktraject Wijk bij Duurstede – Amerongen). Sweco Nederland ondersteunde mij bij dit onderzoek, en ik maakte deel uit van het team waterkeringen.

Ik zou graag mijn begeleiders willen bedanken voor het helpen bij dit onderzoek. Allereerst wil ik graag mijn begeleider bij Sweco, Ing. I.M. van Middelkoop-Molenaar, bedanken voor haar ervaring en al haar hulp bij het uitvoeren van mijn opdracht. Daarnaast zou ik graag mijn begeleider bij de Universiteit Twente, Dr J.J. Warmink, willen bedanken voor zijn waardevolle feedback en het begeleiden van mijn afstuderen. Tot slot zou ik nog mijn tweede begeleider bij Sweco, Ir. J. Steenbergen-Kajabová, willen bedanken voor haar hulp bij het afronden van mijn opdracht, en Ir. R.N.F. Sloot voor het zijn van tweede beoordelaar vanuit de Universiteit Twente.

Tot slot zou ik Sweco in het algemeen willen bedanken voor het mogelijk maken van deze opdracht. Ondanks de omstandigheden heb ik toch prettig kunnen werken met een laptop die door Sweco beschikbaar werd gesteld.

SAMENVATTING

Sinds de nieuwe waterwet voor waterkeringen in 2017 worden grote delen van dijken afgekeurd. Dit Daarom wordt er veel onderzoek gedaan naar manieren om de dijken minder conservatief, maar wel realistisch, te beoordelen. Eén van deze manieren is een volledig probabilistische analyse. Deze beoordeling leidt in 80% van de gevallen tot een gunstigere faalkans dan een semi-probabilistische analyse, die normaal gesproken gedaan wordt. Een methodiek voor het probabilistische beoordelen van het mechanisme macrostabiliteit is relatief goed uitgewerkt en al vaker ook door Sweco toegepast. Het mechanisme piping zorgt echter tot veel meer noodzaak tot versterkingen. Daarom is de interesse voor een vergelijkbare aanpak als bij macrostabiliteit hoog vanuit alle betrokken partijen.

In dit onderzoek is gekeken naar het verschil in de resultaten van de semi-probabilistische en probabilistische beoordeling wat betreft het faalmechanisme piping. Dit onderzoek toont aan tot op welke hoogte een probabilistische beoordeling gunstiger kan zijn op basis van een analyse voor één dijkvak. Beide beoordelingen zijn uitgevoerd in de Probabilistic Toolkit (PTK)

De invoer van de semi-probabilistische beoordeling bestaat uit karakteristieke waarden van de stochasten (5%- of 95%-percentiel), de Waterstand Bij Norm (WBN), de deterministen en de schematiseringsfactoren. De invoer van de probabilistische beoordeling bestaat uit het gemiddelde, de standaarddeviatie, en het type kansverdeling voor de stochasten. Hierop heeft de PTK een kansverdeling gefit. De overige invoer voor de probabilistische beoordeling bestaat uit de deterministen, de Gumbel verdeling voor de waterstand, en de modelfactoren. De waarden van de deterministen zijn in beide beoordelingen hetzelfde. Dit onderzoek beschrijft hoe de invoerwaarden van de stochasten in beide beoordelingen consistent aan elkaar gemaakt kunnen worden.

De semi-probabilistische faalkans is berekend met vergelijkingen uit de kalibratiestudie van Deltares (2016b) ($3,60E-3$ per jaar). Deze vergelijkingen zijn zo gekalibreerd dat de probabilistische faalkans in 80% van de gevallen kleiner is dan de semi-probabilistische faalkans. De probabilistische faalkans is berekend met Crude Monte Carlo Simulatie met 500 000 realisaties ($3,83E-3$ per jaar). Het dijkvak faalt ruim voor beide beoordelingen, omdat de faalkansen voor dit dijkvak voor piping gelijk is aan $2,44E-7$ per jaar. De faalkansen van beide beoordelingen verschillen niet significant.

Dit onderzoek toont aan dat de Gumbel verdeling voor de waterstand erg bepalend is voor hoe groot het verschil in faalkans is tussen beide verdelingen. De Gumbel verdeling voor de waterstand heeft alleen effect op de probabilistische beoordeling en is zo gefit dat de probabilistische faalkans zo klein mogelijk is.

Daarnaast toont dit onderzoek aan dat de semi-probabilistische faalkans alleen afhankelijk is van het deelmechanisme terugschrijdende erosie. De probabilistische faalkans hangt echter af van alle drie de deelmechanismen van piping (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie), al is de rol van opbarsten en heave minimaal. De faalkansen van beide beoordelingen verschillen niet significant. Bij een gunstigere waarde voor de dijkbreedte is dit verschil groter, in het voordeel van de probabilistische beoordeling. De verwachting is dat bij gunstigere invoerwaarden de probabilistische faalkans significant kleiner is dan de semi-probabilistische faalkans. De deelmechanismen opbarsten en heave spelen bij gunstigere invoerwaarden namelijk een grotere positieve rol bij het berekenen van de faalkans in de probabilistische beoordeling.

INHOUDSOPGAVE

COLOFON	2
VOORWOORD	3
SAMENVATTING.....	4
LIJST VAN FIGUREN	7
LIJST VAN TABELLEN.....	8
LIJST VAN SYMBOLEN.....	9
1. INTRODUCTIE	11
1.1 Context.....	11
1.2 Probleemstelling	11
1.3 State of the art.....	11
1.4 Doel en onderzoeksvragen	12
1.5 Onderzoeksgebied	13
1.6 Algemene uitgangspunten.....	14
1.7 Leeswijzer.....	14
2. THEORETISCH KADER	15
2.1 Piping.....	15
2.1.1 Deelmechanisme 1: opbarsten van de deklaag	15
2.1.2 Deelmechanisme 2: heave	15
2.1.3 Deelmechanisme 3: terugschrijdende erosie	16
2.1.4 Faalkanseis	16
2.2 Probabilistische theorie	16
2.2.1 Introductie probabilistische theorie	16
2.2.2 Probabilistische rekenmethoden	18
2.3 Onzekerheden.....	19
3. METHODOLOGIE PER ONDERZOEKSVRAAG.....	20
3.1 Methode bepalen probabilistische eigenschappen stochasten	20
3.1.1 Bepalen stochasten.....	20
3.1.2 Methode bepalen probabilistische eigenschappen van de stochasten.....	22
3.1.3 Methode bepalen gemiddelde, standaarddeviatie en karakteristieke waarde per stochast	28
3.2 Methode uitvoeren semi-probabilistische piping beoordeling	36
3.2.1 Invoer semi-probabilistische beoordeling	36
3.2.2 Semi-probabilistische model.....	38
3.2.3 Faalkanseis	39
3.3 Methode uitvoeren probabilistische beoordeling.....	40

3.3.1	Invoer probabilistische beoordeling	40
3.3.2	Probabilistische model en bepalen faalkans.....	41
3.4	Methode verklaren verschil in faalkans tussen beide beoordelingen	42
4.	RESULTATEN.....	44
4.1	Resultaten bepalen probabilistische eigenschappen stochasten.....	44
4.1.1	Gumbel fit voor de buitenwaterstand	44
4.1.2	Vergelijking tussen oorspronkelijke gemiddelde en standaarddeviatie van de stochasten, en het aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie.....	46
4.1.3	Vergelijking met waarden uit eerdere beoordeling van WAM.....	47
4.2	Resultaten uitvoeren semi-probabilistische beoordeling.....	48
4.3	Resultaten uitvoeren probabilistische beoordeling.....	49
4.4	Resultaten verklaren verschil in faalkans tussen beide beoordelingen.....	50
5.	DISCUSSIE	52
6.	CONCLUSIE	54
7.	AANBEVELINGEN.....	55
8.	REFERENTIES	57
	Bijlage A: Waterstanden dijkvak per herhalingstijd.....	2
	Bijlage B: Instellingen Probabilistic Toolkit voor beide modellen.....	3
	Bijlage C: Grove lengteprofiel van het dijkvak	5
	Bijlage D: Gumbel fits hoge en lage waterstand	6

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1-1: Het piping proces.....	12
Figuur 1-2: Projectgebied ‘Wijk bij Duurstede – Amerongen’ (WAM)	13
Figuur 2-1: Voorwaarden optreden piping	15
Figuur 2-2: Visualisatie berekening faalkans probabilistische beoordeling	17
Figuur 2-3: Illustratie van de gezamenlijke kansdichtheid van de sterkte (R) en belasting (S) en hun faaldomein	18
Figuur 2-4: Overzicht bronnen van onzekerheid in een dijkbeoordeling	19
Figuur 2-5: Belangrijke typen onzekerheden.....	19
Figuur 3-1: Visualisatie kwelweglengte	22
Figuur 3-2: Flowchart bepalen probabilistische eigenschappen stochasten groep 1	26
Figuur 3-3: Flowchart bepalen probabilistische eigenschappen stochasten groep 2	27
Figuur 3-4: Flowchart bepalen probabilistische eigenschappen stochasten groep 3	28
Figuur 3-5: Dwarsprofiel van achterland bij doorsnede DP 11 + 35m.....	30
Figuur 3-6: Vereenvoudigd schematisch overzicht semi-probabilistisch model	36
Figuur 3-7: Schematisch model semi-probabilistische piping beoordeling	39
Figuur 3-8: Vereenvoudigd schematisch overzicht probabilistische model	40
Figuur 3-9: Schematisch overzicht model probabilistische beoordeling	42
Figuur 4-1: Lognormale Gumbel fit waterstand	45
Figuur 4-2: Gumbel fit waterstand.....	46
Figuur E-1: Grove lengteprofiel dijkvak	5
Figuur F-1: Gumbel verdeling waterstand gefit op de hoge waterstanden.....	6
Figuur F-2: Gumbel verdeling waterstand gefit op de lage waterstanden	6

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 3-1: Overzicht stochasten meegenomen in dit onderzoek met deelmechanisme(n) waar ze invloed op hebben	20
Tabel 3-2: Type kansverdeling en percentiel karakteristieke waarde per stochast	22
Tabel 3-3: Formules bepalen karakteristieke waarden semi-probabilistische beoordeling.....	23
Tabel 3-4: Vier groepen waar de stochasten in zijn verdeeld voor het bepalen van de probabilistische eigenschappen	24
Tabel 3-5: Probabilistische eigenschappen diktes deklagen voor- en achterland.....	29
Tabel 3-6: Probabilistische eigenschappen dikte deklaag bij het uittredepunt	30
Tabel 3-7: Probabilistische eigenschappen uittreelengte.....	31
Tabel 3-8: Probabilistische eigenschappen doorlatendheid zandlaag	31
Tabel 3-9: Probabilistische eigenschappen dikte zandlaag	32
Tabel 3-10: Probabilistische eigenschappen volumiek gewicht deklaag.....	33
Tabel 3-11: Probabilistische eigenschappen 70-percentiel waarde zandlaag.....	33
Tabel 3-12: Probabilistische eigenschappen freatisch peil bij uittredepunt	34
Tabel 3-13: Probabilistische eigenschappen polderpeil	34
Tabel 3-14: Probabilistische eigenschappen kritieke heave gradiënt	34
Tabel 3-15: Gemiddelde buitenwaterstand van het dijkvak per herhalingsstijd	35
Tabel 3-16: Overzicht karakteristieke waarden stochasten	37
Tabel 3-17: Deterministische input.....	37
Tabel 3-18: Schematiseringsfactoren	38
Tabel 3-19: Invoerwaarden berekening faalkanseis en resulterende faalkanseis.....	39
Tabel 3-20: Overzicht probabilistische eigenschappen stochasten voor probabilistische beoordeling	40
Tabel 3-21: Factoren modelonzekerheid probabilistische beoordeling	41
Tabel 4-1: Overzicht probabilistische eigenschappen stochasten.....	44
Tabel 4-2: Verdelingsparameters Gumbel verdeling waterstand.....	45
Tabel 4-3: Oorspronkelijke en aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie van de stochasten van groep 1 en 2	47
Tabel 4-4: Resultaten semi-probabilistische piping model.....	48
Tabel 4-5: Faalkans van eerdere beoordeling voor WAM voor het dijkvak van dit onderzoek	49
Tabel 4-6: Semi-probabilistische faalkans bij een dijkbreedte (L_2) van 50 meter	49
Tabel 4-7: Resultaten probabilistisch piping model.....	49
Tabel 4-8: Probabilistische faalkans bij een dijkbreedte (L_2) van 50 meter	49
Tabel 4-9: Vergelijking faalkansen bij verschillende Gumbel verdelingen voor de waterstand.....	50
Tabel 4-11: Semi-probabilistische faalkans voor verschillende schematiseringsfactoren	50
Tabel 4-10: Semi-probabilistische en probabilistische faalkans van dit onderzoek en in een situatie met een dijkbreedte van 50 meter	51
Tabel A-1: Waterstanden dijkvak per herhalingsstijd	2
Tabel B-1: Instellingen Probabilistic Toolkit voor semi-probabilistische beoordeling.....	3
Tabel B-2: Instellingen Probabilistic Toolkit voor probabilistische beoordeling.....	4

LIJST VAN SYMBOLEN

Symbool	Omschrijving	Eenheid
a	Fractie van de lengte van het traject dat gevoelig is voor piping	-
b	Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken voor piping	m
D	Dikte van de watervoerende zandlaag	m
d_1	Dikte van de deklaag in het voorland	m
d_3	Dikte van de deklaag in het achterland	m
d_{70}	70—percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping-gevoelige laag	m
$d_{70,m}$	Referentie d_{70} -waarde	m
d_{exit}	Dikte van de deklaag bij het uittredepunt	m
F_u	Berekende stabiliteitsfactor voor het deelmechanisme opbarsten	-
F_h	Berekende stabiliteitsfactor voor het deelmechanisme heave	-
F_p	Berekende stabiliteitsfactor voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie	-
g	Gravitatieversnelling	m/s^2
h	Buitenwaterstand ten opzichte van NAP	$m + NAP$
h_{exit}	Freatisch niveau bij het uittredepunt ten opzichte van NAP	$m + NAP$
ΔH	Aanwezig verval over de waterkering	m
ΔH_c	Kritiek verval over de waterkering	m
i	Berekende heave gradiënt	-
$i_{c,h}$	Kritieke heave gradiënt	-
k_1	Doorlatendheid van de deklaag in het voorland	m/s
k_3	Doorlatendheid van de deklaag in het achterland	m/s
k_z	Doorlatendheid van de watervoerende zandlaag	m/s
L	Kwelweglengte	m
L_1	Breedte van het voorland	m
L_2	Breedte van de dijk (buitenteen tot aan binnenteen)	m
L_3	Breedte van het achterland	m
L_i	(Fictieve) Intreelengte, lengte van het (fictieve) intredepunt tot aan de buitenteen van de dijk	m
L_u	Uittreelengte, lengte van de binnenteen van de dijk tot aan het uittredepunt	m
$L_{traject}$	Lengte van het dijktraject	m
m_u	Modelfactor voor opbarsten	-
m_p	Modelfactor voor piping	-
N_{dsn}	Lengte-effectfactor voor een doorsnede	-
$P_{eis;dsn}$	Faalkanseis per doorsnede	1/jaar
P_{norm}	De norm van het dijktraject	1/jaar
$P_{f;u}$	Berekende faalkans voor het deelmechanisme opbarsten	1/jaar
$P_{f;h}$	Berekende faalkans voor het deelmechanisme heave	1/jaar
$P_{f;p}$	Berekende faalkans voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie	1/jaar
P_f	Berekende faalkans van het dijkvak	1/jaar
R	Sterkte van de dijk	- (*)
R_u	Sterkte van de dijk wat betreft het deelmechanisme opbarsten	m
R_h	Sterkte van de dijk wat betreft het deelmechanisme heave	-
R_p	Sterkte van de dijk wat betreft het deelmechanisme terugschrijdende erosie	m

r_c	Reductiefactor voor de weerstand bij het uittredepunt	-
S	Belasting op de dijk	- (*)
S_u	Belasting op de dijk wat betreft het deelmechanisme opbarsten	m
S_h	Belasting op de dijk wat betreft het deelmechanisme heave	-
S_p	Belasting op de dijk wat betreft het deelmechanisme terugschrijdende erosie	m
Z	Grenstoestandsfunctie ($Z = R - S$)	- (*)
Z_u	Grenstoestandsfunctie voor het deelmechanisme opbarsten	m
Z_h	Grenstoestandsfunctie voor het deelmechanisme heave	-
Z_p	Grenstoestandsfunctie voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie	m
α, β	Verdelingsparameters Gumbel verdeling	-
β_{norm}	Betrouwbaarheidsindex van de norm	-
$\beta_{eis;dsn}$	Betrouwbaarheidsindex eis voor een doorsnede van de waterkering	-
γ_{nat}	Verzadigd volumiek gewicht van de deklaag	kN/m^3
$\gamma_{sub.partikel}$	Volumiek gewicht van zandkorrels onder water	kN/m^3
γ_w	Volumiek gewicht van water	kN/m^3
$\gamma_{b;u}$	Schematiseringsfactor voor deelmechanisme opbarsten	-
$\gamma_{b;h}$	Schematiseringsfactor voor deelmechanisme heave	-
$\gamma_{b;p}$	Schematiseringsfactor voor deelmechanisme terugschrijdende erosie	-
$\gamma_{n;u}$	Veiligheidsfactor voor deelmechanisme opbarsten	-
$\gamma_{n;h}$	Veiligheidsfactor voor deelmechanisme heave	-
$\gamma_{n;p}$	Veiligheidsfactor voor deelmechanisme terugschrijdende erosie	-
η	Coëfficiënt van White	-
θ	Rolweerstandshoek van de zandkorrels	°
κ	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag	m^2
λ_1	Lekfactor van het voorland	m
λ_3	Lekfactor van het achterland	m
μ	Gemiddelde waarde	-
ν	Kinematische viscositeit van water bij 10°C	m^2/s
σ	Standaarddeviatie	-
Φ	Standaard (cumulatieve) normale verdeling	-
φ_0	Stijghoogte in de rivier (gelijk aan buitenwaterstand h) ten opzichte van NAP	$m + NAP$
φ_1	Stijghoogte in de buitenteen van de dijk ten opzichte van NAP	$m + NAP$
φ_2	Stijghoogte in de binnenteen van de dijk ten opzichte van NAP	$m + NAP$
φ_3	Polderpeil (stijghoogte in de polder) ten opzichte van NAP	$m + NAP$
φ_{exit}	Stijghoogte bij het uittredepunt	$m + NAP$
$\Delta\phi$	Kritisch stijghoogteverschil over de deklaag (bij het uittredepunt)	m
$\Delta\phi_{c,u}$	Optredend stijghoogteverschil over de deklaag (bij het uittredepunt)	m
ω	Faalkansruimtefactor voor het betreffende faalmechanisme (piping = 0,24)	-
DP	Dijkpaal	
NAP	Normaal Amsterdams Peil	
VC	Variatiecoëfficiënt	
WAM	Wijk bij Duurstede – Amerongen; traject waar het dijkvak in dit onderzoek aan toebehoort	
WBI	Wettelijk Beoordelings Instrumentarium	

* Eenheid hangt af van het deelmechanisme

1. INTRODUCTIE

1.1 Context

Sinds 2017 zijn er nieuwe waterveiligheidsnormen opgenomen in de Waterwet (MinI&M, 2016). Dit resulteert in grote veranderingen voor de manier waarop dijken beoordeeld moeten worden. Een belangrijk punt binnen deze nieuwe normen is de overstap van de overschrijdingskans per dijkkring naar een overstromingskans per dijktraject (MinI&M, 2016). De overschrijdingskans is gebaseerd op het principe dat een bepaalde belasting, met een bepaalde herhalingstijd, niet mag resulteren in het falen van de dijk. Hierbij worden veilige aannames gedaan voor onzekerheden in sterkte berekeningen van een waterkering. In de nieuwe aanpak wordt er gewerkt met een overstromingskans. Dit is de kans dat de belasting op de waterkering groter is dan de sterkte van de waterkering. In deze aanpak worden de onzekerheden al in de overstromingskansberekening meegenomen, en daarbij wordt ook rekening gehouden met onzekerheden in de belasting op de waterkering.

Een ander belangrijk punt in de nieuwe normen is de overgang van een kans per dijkkring naar een kans per dijktraject. De gevolgen van overstromingen zijn afhankelijk van de doorbraakbraaklocatie binnen een dijkkring. Daarom is er besloten om bij de nieuwe normering dijktrajecten te onderscheiden in plaats van dijkkringen (MinI&M, 2016).

1.2 Probleemstelling

Sweco werkt aan projecten van diverse waterschappen en Rijkswaterstaat omtrent het beoordelen en ontwerpen van dijken volgens de nieuwe normen. Uit de praktijk blijkt dat de nieuwe normen erg streng zijn en dat veel dijkdelen afgekeurd worden als deze normen met het huidige instrumentarium (WBI2017 en OI2014 v4) gevolgd worden (Rijkswaterstaat, 2016). Daarom worden er mogelijkheden onderzocht om dijken nauwkeuriger te beoordelen waardoor minder dijkdelen afgekeurd worden.

Dijken worden over het algemeen semi-probabilistisch beoordeeld (en ontworpen). Een semi-probabilistische beoordeling is erg conservatief. Dijken worden getoetst met één enkele waterstand en zeer veilige invoerwaarden. Een probabilistische beoordeling houdt echter expliciet rekening met alle onzekerheden door middel van kansverdelingen in de invoer. De faalkans voor de semi-probabilistische beoordeling is daarnaast zo berekend dat de faalkans voor de probabilistische beoordeling in 80% van de gevallen gunstiger uitvalt (Deltares, 2016b). Het uitvoeren van een volledig probabilistische beoordeling kan er mogelijk voor zorgen dat minder dijkdelen worden afgekeurd.

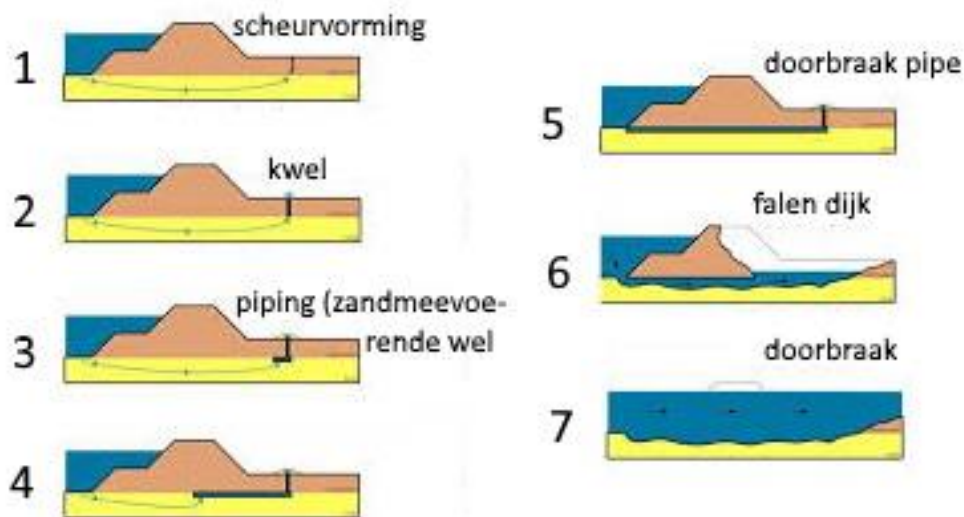
Een methode voor het probabilistische beoordelen van het faalmechanisme macro-stabiliteit is relatief goed uitgewerkt en al vaker ook door Sweco toegepast. Dit leidde tot gunstigere resultaten dan met een semi-probabilistische beoordeling. Het faalmechanisme STPH (Piping en Heave, vanaf nu: piping) zorgt bij de dijkversterkingsprojecten tot veel meer noodzaak tot versterkingen. Deze versterkingen zijn over het algemeen erg duur door de vele extra meters benodigde grond. De interesse voor een vergelijkbare aanpak als bij het faalmechanisme macro-stabiliteit is daarom hoog vanuit alle betrokken partijen (beheerders en ontwerpers).

1.3 State of the art

Het faalmechanisme piping bestaat uit drie deelmechanismen (Rijkswaterstaat, 2016): opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Als deze alle drie optreden, ontstaat er een pijp onder de dijk die ervoor zorgt dat de dijk faalt. Falen van de dijk betekent dat het zijn waterkerende functie verliest, en dat er mogelijk een doorbraak plaatsvindt.

Het faalmechanisme piping is nader uitgelegd aan de hand van Figuur 1-1. Bij hoge waterstanden loopt de waterdruk in de watervoerende zandlaag (gele laag) op. Dit zorgt voor kleine scheurtjes in de

deklaag in het achterland (oranje laag). Op het moment dat de waterdruk in de zandlaag hoger is dan het gewicht van de deklaag in het achterland, zal de deklaag opbarsten (1). Het punt waar dit gebeurt heet het uittredepunt. Als vervolgens de verticale stroom in het opbarstkanaal bij dit uittredepunt groot genoeg is, zullen zandkorreltjes meegenomen worden van de zandlaag naar het maaiveld (2). Dit wordt heave genoemd. Hierna kan door erosie van zandkorreltjes een “pipe” onder de deklaag gevormd worden (3, 4 en 5). Dit gebeurt als de dijk faalt op het deelmechanisme terugschrijdende erosie. Vervolgens zal de “pipe” bij een lange hoge waterstand groter worden en uiteindelijk zou dit kunnen resulteren in een dijkdoorbraak (6 en 7).



Figuur 1-1: Het piping proces (Aangepast overgenomen van (Deltares, 2012))

Sinds de nieuwe waterwet voldoen grote delen van dijken niet wat betreft het faalmechanisme piping. Daarom is er veel onderzoek gedaan naar manieren om dijken nauwkeuriger te beoordelen. Onderzoeken van Aguilar-López (2016) en Schweckendiek (2015) beschrijven bijvoorbeeld hoe verschillende bronnen van onzekerheid gekwantificeerd en gereduceerd kunnen worden. De reductie hiervan kan resulteren in een kleinere faalkans. Aguilar-López (2016) slaagt erin om de faalkans te reduceren met een factor van 1,7 door het meenemen van de correlatie tussen twee grondparameters in de piping beoordeling.

In het onderzoek van Roelofs (2019) is onderzocht hoe effectief bepaalde methoden zijn wat betreft het verkleinen van onzekerheden in de probabilistische piping beoordeling. Hierbij is een volledig probabilistische piping beoordeling uitgevoerd, omdat dit inzicht geeft in de exacte faalkans en de effecten van onzekerheden. Uit het onderzoek blijkt dat als er voortdurend ruimtelijke gegevens beschikbaar zijn, dit zorgt voor de grootste reductie van de faalkans. Dit is echter erg tijdrovend en daarom zouden de meest invloedrijke parameters in de beoordeling kunnen worden bepaald. Meer grondonderzoek naar deze parameters zou kunnen resulteren in een significant kleinere faalkans. Het is waardevol om probabilistische beoordelingen ook voor andere locaties uit te voeren, omdat dit resulteert in andere resultaten met mogelijk andere conclusies en aandachtspunten.

1.4 Doel en onderzoeksvragen

In dit onderzoek is een volledig probabilistische piping beoordeling uitgevoerd voor een dijkvak van de Sterke Lekdijk (zie Sectie 1.5). Deze beoordeling is vergeleken met een semi-probabilistische piping beoordeling om inzicht te krijgen in hoe een probabilistische beoordeling kan leiden tot mogelijk gunstigere resultaten. Het onderzoeksdoel is onderzoeken in hoeverre een volledig probabilistische

pipng beoordeling kan zorgen voor een gunstigere faalkans ten opzichte van een semi-probabilistische pipng beoordeling.

De onderzoeksvraag is:

“In welke mate kan een probabilistische pipng beoordeling resulteren in een gunstigere faalkans dan een semi-probabilistische pipng beoordeling?”

De onderzoeksvraag is opgedeeld in de volgende deelvragen:

1. Wat zijn de probabilistische eigenschappen van de stochasten van het faalmechanisme pipng voor dit specifieke dijkvak?
2. Wat is de faalkans van het dijkvak met een semi-probabilistische pipng beoordeling?
3. Wat is de faalkans van het dijkvak met een probabilistische pipng beoordeling?
4. Hoe kan het eventuele verschil tussen de resulterende faalkansen van beide beoordelingen verklaard worden?

Eerst zijn de probabilistische eigenschappen van de stochasten van pipng voor dit dijkvak bepaald (deelvraag 1). Dit zijn het gemiddelde, de standaarddeviatie, het type kansverdeling en de karakteristieke waarde (5%- of 95%-percentiel van de kansverdeling). Vervolgens zijn met deze waarden de faalkansen van het dijkvak bepaald met een semi-probabilistische en probabilistische aanpak (deelvragen 2 en 3). Deelvraag 4 gaat verder in op het verschil tussen de faalkansen in beide beoordelingen en hoe dit verschil tot stand komt.

1.5 Onderzoeksgebied

Dit onderzoek is gedaan binnen het lopende project ‘Wijk bij Duurstede – Amerongen’ (hierna: WAM). Dit project betreft de beoordeling van de Sterke Lekdijk (geel in Figuur 1-2). Het dijkvak waarvoor de beoordelingen in dit onderzoek gedaan zijn bestaat uit dijkpalen 6 tot en met 20, met een lengte van 1,5km. Het dijkvak is in rood weergegeven in Figuur 1-2.



Figuur 1-2: Projectgebied ‘Wijk bij Duurstede – Amerongen’ (WAM)

1.6 Algemene uitgangspunten

De algemene uitgangspunten in dit onderzoek zijn hieronder weergegeven. In Appendix A staat een overzicht van alle uitgangspunten en aannames die gedaan zijn in dit onderzoek. Deze komen in dit rapport ook langs.

Algemene uitgangspunten

- De semi-probabilistische en probabilistische beoordeling zijn uitgevoerd voor een dijkvak binnen de Sterke Lekdijk voor het faalmechanisme piping. Alle drie de deelmechanismen van piping – opbarsten, heave, en terugschrijdende erosie – zijn meegenomen. De rekenregels uit Rijkswaterstaat (2019) zijn gebruikt. Voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie is daarbij gerekend met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer (Deltares, 2009).
- In dit onderzoek is stationair gerekend, er is dus geen rekening gehouden met veranderingen van de waterstand en de sterkte van de dijk in de tijd. Daarnaast is er vanwege het tijdsbestek voor gekozen om anisotropie van de zandlaag niet mee te nemen.
- Ten behoeve van dit onderzoek is gerekend met een zichtjaar van 2023. Bij beoordelingen wordt er namelijk standaard met dit zichtjaar gerekend.

1.7 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het theoretische kader van dit onderzoek. Hierin zijn achtereenvolgens het faalmechanisme piping, de probabilistische theorie, en de soorten onzekerheid die een rol spelen bij dijkbeoordelingen beschreven.

Hoofdstuk 3 geeft de methodologie per onderzoeksvraag. Hierin is uitgelegd welke stochasten zijn meegenomen, hoe de probabilistische eigenschappen van deze stochasten zijn bepaald, en hoe de semi-probabilistische en probabilistische beoordeling is uitgevoerd.

Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten per onderzoeksvraag. De resulterende faalkansen voor beide beoordelingen zijn hier genoemd, en het verschil is verklaard.

Hoofdstuk 5 is de discussie, hierin zijn de resultaten besproken en belangrijke beperkingen in dit onderzoek benoemd.

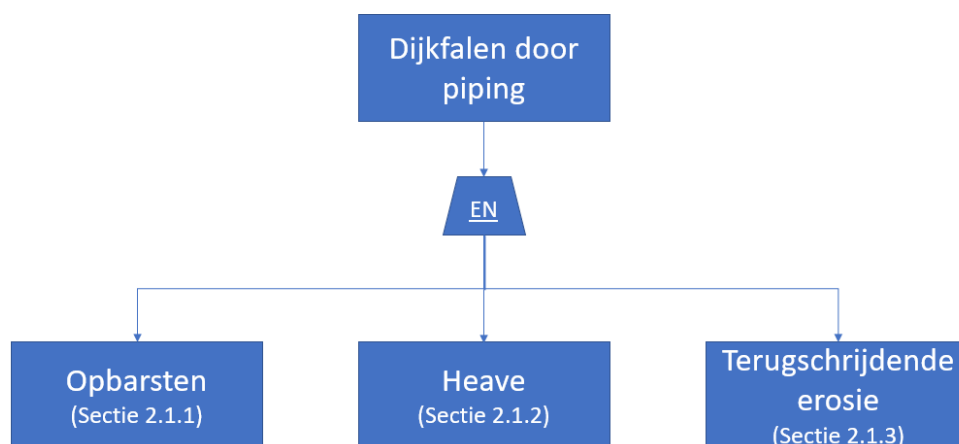
Hoofdstuk 6 is de conclusie en bespreekt wat dit onderzoek aantoont.

Hoofdstuk 7 geeft advies voor vervolgonderzoek en aanbevelingen voor verbeteringen.

2. THEORETISCH KADER

2.1 Piping

Een dijkvak kan (semi-)probabilistisch worden beoordeeld met de gedetailleerde toets zoals gedefinieerd in “Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III” (Rijkswaterstaat, 2016). Hierin is piping gedefinieerd als het overschrijden van het kritische verval waarbij het progressieve erosieproces niet meer tot evenwicht komt (Rijkswaterstaat, 2016). Er zijn drie deelmechanismen gedefinieerd: opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. Deze moeten alle drie voorkomen voordat er piping optreedt. Dit is weergegeven in Figuur 2-1. In de volgende paragrafen zijn de deelmechanismen gedetailleerder beschreven.



Figuur 2-1: Voorwaarden optreden piping (aangepast overgenomen van Rijkswaterstaat (2016))

2.1.1 Deelmechanisme 1: opbarsten van de deklaag

Opbarsten van de deklaag gebeurt als de waterdruk in de watervoerende zandlaag (belasting) hoger is dan het gewicht van de deklaag (sterkte). De toets om te bepalen of opbarsten voorkomt is dus gebaseerd op het verticale evenwicht ter plaatse van het uittredepunt.

De vergelijkingen die hierbij horen zijn Vgl. 2 en 3 in bijlage C van de “Schematiseringshandleiding piping” (Rijkswaterstaat, 2019, p. 92-93).

Onzekere parameters voor dit deelmechanisme zijn:

- Stijghoogte uittredepunt (φ_{exit})
- Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})
- Dikte van de deklaag bij uittredepunt (d_{exit})
- Verzadigd volumiek gewicht van de deklaag (γ_{nat})

2.1.2 Deelmechanisme 2: heave

Heave is de tweede voorwaarde voor het optreden van piping. Heave treedt op als de verticale stroom in het opbarstkanaal zo groot is, dat zandkorreltjes uit de watervoerende zandlaag meegevoerd worden naar het maaiveld (Rijkswaterstaat, 2016). Dit gebeurt als de verticale uitstroomgradiënt bij het uittredepunt (belasting) een kritieke waarde voor heave overschrijdt (sterkte).

De vergelijking die bij heave hoort is Vgl. 4 in bijlage C van de “Schematiseringshandleiding piping” (Rijkswaterstaat, 2019, p. 93).

Onzekere parameters voor dit deelmechanisme zijn:

- Stijghoogte uittredepunt (φ_{exit})
- Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})
- Dikte van de deklaag bij uittredepunt (d_{exit})
- Kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$)

2.1.3 Deelmechanisme 3: terugschrijdende erosie

Bij terugschrijdende erosie is er sprake van een erosieproces wat resulteert in een “pipe” onder de dijk. Dit proces begint bij het uittredepunt, en als de “pipe” een bepaalde lengte bereikt zal dit het falen van de dijk veroorzaken.

De vergelijkingen die hierbij horen zijn Vgl. 5 en 6 in bijlage C van de “Schematiseringshandleiding piping” (Rijkswaterstaat, 2019, p. 93-93). De aangepaste rekenregel van Sellmeijer komt uit Deltares (2009).

Onzekere parameters voor dit deelmechanisme zijn:

- Buitenwaterstand (h)
- Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})
- Dikte van de deklaag bij uittredepunt (d_{exit})
- 70-percentiel waarde zandlaag (d_{70})
- Doorlatendheid zandlaag (k_z)
- Dikte zandlaag (D)
- Kwelweglengte (L)

2.1.4 Faalkanseis

De kans dat het dijkvak faalt (faalkans) moet kleiner zijn dan een bepaalde eis, dit heet de faalkanseis. Het dijktraject waar het dijkvak deel uit maakt, heeft een bepaalde norm waar het aan moet voldoen. Dit is de maximaal toegestane kans dat ergens in het traject de dijk faalt als gevolg van een faalmechanisme. Deze norm kan met Vgl. 2.1 en 7.12 van Rijkswaterstaat (2016, p. 16, 45) omgerekend worden naar een faalkanseis voor een doorsnede.

2.2 Probabilistische theorie

2.2.1 Introductie probabilistische theorie

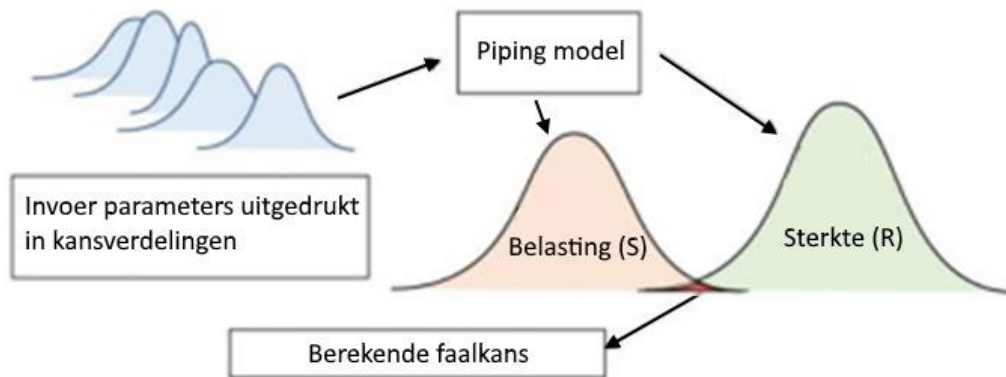
Het centrale onderwerp in dit onderzoek is het uitvoeren van een probabilistische piping beoordeling. Eerder in dit rapport (Sectie 1.2) zijn de eigenschappen van een probabilistische beoordeling kort behandeld. Deze sectie gaat daar gedetailleerder op in.

Een semi-probabilistische en probabilistische beoordeling komen op een aantal punten overeen. Beiden gaan uit van een model met een faalmechanisme en kansverdelingen voor de stochasten (variabele parameters) (Deltares, 2016b). En beiden hebben te maken met dezelfde faalkanseis. Het essentiële verschil tussen de twee beoordelingen is echter dat in een probabilistische beoordeling rekening wordt gehouden met alle mogelijke parameterwaarden en de bijbehorende kansen (modelinvoer bestaat uit kansverdelingen). Terwijl in een semi-probabilistische beoordeling, de invoer bestaat uit één enkele veilige waarde per stochast, de karakteristieke waarde. Deze is gelijk aan het 5%- of 95%-percentiel van de kansverdeling (“worst-case value”).

Een belangrijk punt is dat de waterstand in de semi-probabilistische beoordeling niet gelijk is aan een 5%- of 95%-percentiel, maar gelijk is aan de Waterstand Bij Norm (WBN). Dit is de waterstand die voorkomt bij een herhalingstijd gelijk aan de norm.

Figuur 2-2 laat zien hoe de faalkans in een probabilistische piping beoordeling berekend wordt. De stochastische parameters worden ingevoerd met hun eigen kansverdeling (blauwe parabolen), resulterend in een bepaalde kansverdeling voor de sterkte van het dijkvak (R, groene parabool) en de belasting op het dijkvak (S, oranje parabool). Het dijkvak faalt als de belasting groter is dan de sterkte ($S > R$). Dit is weergegeven met het oranje-rode gebied. De faalkans ($P(F)$) is de oppervlakte van dit gebied, en is als volgt gedefinieerd:

$$P(F) = P(R < S) \quad (2.1)$$



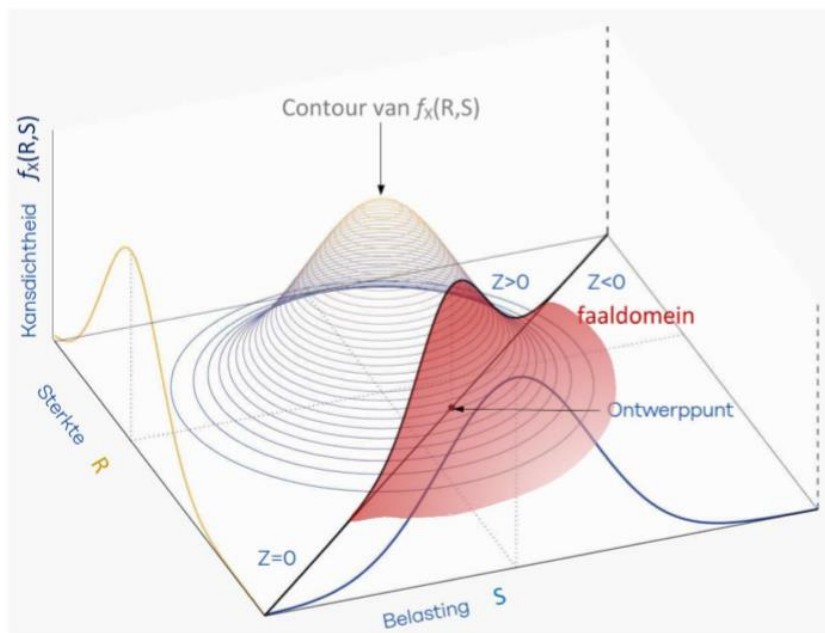
Figuur 2-2: Visualisatie berekening faalkans probabilistische beoordeling (aangepast overgenomen van (Roelofs, 2019))

In probabilistische beoordelingen wordt vaak gewerkt met een grenstoestandsfunctie Z , gedefinieerd als Vgl. 2.2. Het punt waar de sterkte (R) precies gelijk is aan de belasting (S) heet de grenstoestand ($R=S$). Dit is de grens tussen falen en niet-falen van het dijkvak. De grenstoestandsfunctie is dan gelijk aan nul.

$$Z = R - S \quad (2.2)$$

Figuur 2-3 laat de kansverdeling van deze grenstoestandsfunctie bij een probabilistische beoordeling zien (de 3D parabool). Op de assen staan de kansverdelingen van de sterkte (R) en de belasting (S). De grenstoestand ($Z = 0$) is weergegeven met een zwarte lijn, deze scheidt het veilige gebied van het faaldomein ($Z < 0$; weergegeven in rood). De faalkans is dus gelijk aan het volume van dit faaldomein:

$$P(F) = P(Z < 0) \quad (2.3)$$



Figuur 2-3: Illustratie van de gezamenlijke kansdichtheid van de sterkte (R) en belasting (S) en hun faaldomein (Schweckendiek et al., 2017)

Het faalmechanisme piping bestaat uit drie deelmechanismen. Deze moeten allemaal apart getoetst worden, wat resulteert in drie grenstoestandsfuncties en dus drie faalkansen ($P_{f;u}; P_{f;h}; P_{f;p}$). De uiteindelijke faalkans van het dijkvak (P_f) is gelijk aan de laagste faalkans van de drie, omdat alle drie de deelmechanismen moeten voorkomen voordat piping optreedt.

De kansverdelingen van de grenstoestandsfuncties ($Z_u; Z_h; Z_p$) kunnen niet bepaald worden met de hoeveelheid stochasten in de piping berekeningen. De faalkans wordt daarom benaderd met een probabilistische rekenmethode.

2.2.2 Probabilistische rekenmethoden

Een veelgebruikte probabilistische rekenmethode voor piping beoordelingen is Crude Monte Carlo Simulatie (C-MCS). Hiermee wordt de faalkans bepaald door simulaties te doen en te bekijken welk deel van die simulaties faalt. Bij voldoende simulaties kan de faalkans exact worden benaderd (Schweckendiek et al., 2017). De ADIS methode en Numerieke Integratie zijn andere probabilistische rekenmethoden die de faalkans exact kunnen benaderen. De ADIS methode is gebruikt in onderzoeken van Oosterlo (2015) en Oosterlo et al. (2018) en wordt ook veel gebruikt voor piping¹. Numerieke Integratie wordt minder gebruikt omdat het aantal simulaties voor deze methode exponentieel groeit per stochastische variabele (Schweckendiek et al., 2017).

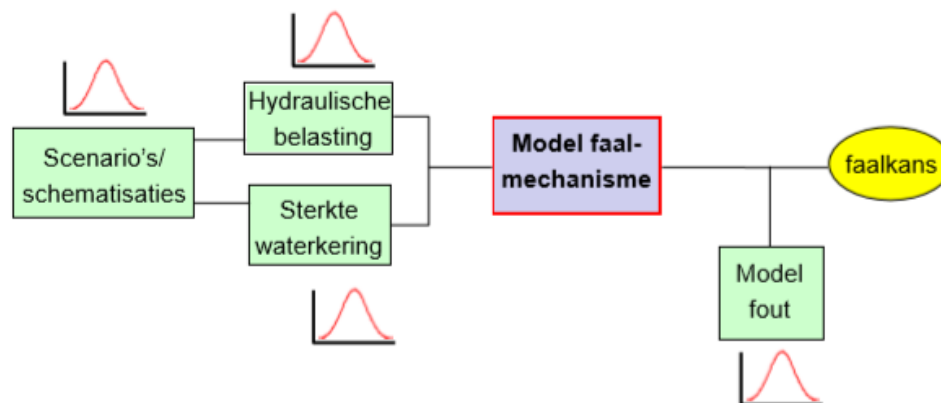
FORM is een methode met een heel kleine rekentijd. Deze methode werkt echter niet goed bij een complexe grenstoestandsfunctie (convergentieproblemen) en gaat uit van normale verdelingen in de in- en output, wat meestal niet het geval is (Schweckendiek et al., 2017) (CUR, 1997).

¹ Deze probabilistische rekenmethode is niet beschikbaar in het programma (Probabilistic Toolkit) dat is gebruikt voor het uitvoeren van de probabilistische beoordeling.

2.3 Onzekerheden

Een probabilistische piping beoordeling resulteert in een faalkans. Hierbij zijn een aantal bronnen die onzekerheid met zich meebrengen (zie de groene vlakken in Figuur 2-4):

- Het model: de faalkans is berekend met een model. Dit brengt onzekerheid met zich mee.
- De belasting en sterkte van de waterkering: deze zijn afhankelijk van een aantal onzekere variabelen
- Schematisatie van de ondergrond: de variabelen worden afgeleid aan de hand van een bepaalde schematisatie.

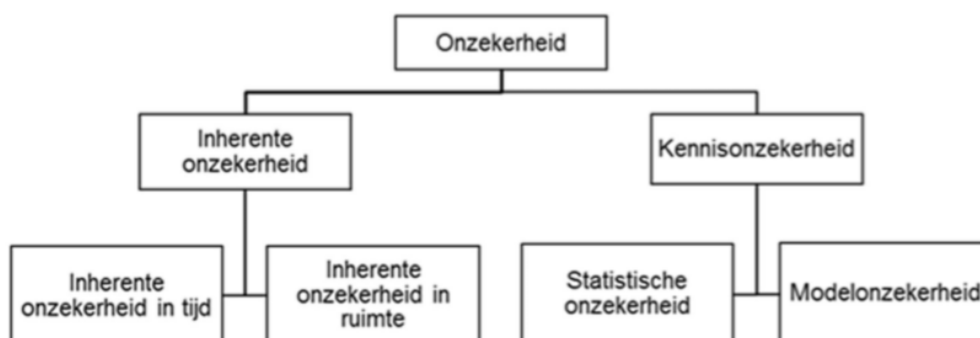


Figuur 2-4: Overzicht bronnen van onzekerheid in een dijkebeoordeling (Deltares, 2016a)

De onzekerheden in deze bronnen kunnen onderverdeeld worden in twee belangrijke groepen: inherente onzekerheid (ook wel natuurlijke variabiliteit), en kennisonzekerheid (zie Figuur 2-5) (Deltares, 2016b). De inherente onzekerheid is het gevolg van de variabiliteit die van nature aanwezig is in de tijd en ruimte. In dit onderzoek is de natuurlijke variabiliteit in tijd niet meegenomen.

Kennisonzekerheid bestaat uit statistische onzekerheid en modelonzekerheid. Statistische onzekerheid is de onzekerheid als gevolg van een beperkt aantal gegevens en/of metingen. Modelonzekerheid wordt veroorzaakt door een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid en de onzekerheid in modelparameters in de modellen die worden gehanteerd (Deltares, 2016b).

De natuurlijke variabiliteit in ruimte en de statistische onzekerheid kunnen in een dijkebeoordeling meegenomen worden door middel van het gebruik van kansverdelingen. De modelonzekerheid kan meegenomen worden door middel van modelfactoren.



Figuur 2-5: Belangrijke typen onzekerheden (Deltares, 2016b)

3. METHODOLOGIE PER ONDERZOEKSVRAAG

3.1 Methode bepalen probabilistische eigenschappen stochasten

De piping berekeningen bevatten een aantal invoerparameters die zodanig variëren in waarde dat het nodig is om de onzekerheid in deze parameters mee te nemen. Dit zijn de stochasten. De waarde varieert per locatie, of omdat er geen zekerheid over de waarde bestaat. Sectie 3.1.1 beschrijft de parameters die als stochast zijn meegenomen. De onzekerheid van deze stochasten is meegenomen door middel van kansverdelingen voor de probabilistische beoordeling, en karakteristieke waarden (5%- of 95%-percentiel) voor de semi-probabilistische beoordeling. Hiervoor zijn de volgende probabilistische eigenschappen per stochast bepaald:

- Type kansverdeling
- Gemiddelde waarde (μ)
- Standaarddeviatie (σ)
- Karakteristieke waarde (5%- of 95%-percentiel)

De kansverdelingen voor de stochasten zijn automatisch gefit door het programma dat voor de beoordelingen is gebruikt (Probabilistic Toolkit (PTK)). Dit gebeurt op basis van het type kansverdeling, gemiddelde waarde, en standaarddeviatie van de waarnemingen van de stochast.

3.1.1 Bepalen stochasten

De parameters die als stochast zijn meegenomen, zijn weergegeven in Tabel 3-1. Daarnaast laat deze tabel zien op welk(e) deelmechanisme(n) elke stochast invloed heeft. Deze lijst van stochasten verschilt met de onzekere parameters die Sectie 2.1 noemt. De dikte van de deklaag in het voor- en achterland ($d_1; d_3$), het polderpeil (φ_3), en de uittreelengte (L_3) zijn namelijk toegevoegd. En de stijghoogte bij het uittredepunt (φ_{exit}) en de kwelweglengte (L) zijn niet meegenomen als stochast. Deze laatste twee parameters ($\varphi_{exit}; L$) zijn namelijk berekend op basis van de andere parameters. In de volgende paragrafen is uitgelegd hoe de stijghoogte bij het uittredepunt, en de kwelweglengte zijn bepaald.

Tabel 3-1: Overzicht stochasten meegenomen in dit onderzoek met deelmechanisme(n) waar ze invloed op hebben

Stochast	Opbarsten	Heave	Terugschrijdende erosie
Buitenwaterstand (h)	X	X	X
Polderpeil (φ_3)	X	X	
Dikte deklaag voorland (d_1)	X	X	
Dikte deklaag achterland (d_3)	X	X	
Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})	X	X	X
Dikte deklaag uittredepunt (d_{exit})	X	X	X
Verzadigd volumiek gewicht deklaag (γ_{nat})	X		
Kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$)		X	
70-percentiel waarde zandlaag (d_{70})			X
Doorlatendheid zandlaag (k_z)	X	X	X
Dikte zandlaag (D)	X	X	X
Uittreelengte (L_u)			X

3.1.1.1 Berekenen stijghoogte bij het uittredepunt

Voor de berekening van de stationaire stijghoogte bij het uittredepunt (φ_{exit}) zijn drie modellen beschikbaar (4A, 4B, 4C) uit het "Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken" (TAW, 2004). Deze

modellen verschillen wat betreft de laagopbouw van de grond. In dit onderzoek is gerekend met model 4A, omdat dit het algemene model is en deze uitgaat van slecht doorlatende, afdekkende lagen in het voor- en achterland, met daaronder de watervoerende zandlaag. Dit komt overeen met de laagopbouw in het dijkvak. Model 4B houdt geen rekening met de slecht doorlatende, afdekkende deklagen. En model 4C rekent met de grenspotential (kritieke stijghoogteverval) als randvoorwaarde waardoor een deel van de stijghoogte wordt verwaarloosd.

Met het gebruik van model 4A zijn enkele aannames verbonden (1), en daarnaast wordt in dit onderzoek een aanname gedaan om dit model te vereenvoudigen (2).

Uitgangspunten:

- Uitgegaan van slecht doorlatende, afdekkende lagen in het voor- en achterland, zonder radiale intree of uitree van water. (1)
- Er is van uitgegaan dat de verhouding van de breedte van het voorland, en de lekfactor van het voorland groter is dan 1,8 à 2 ($\frac{L_1}{\lambda_1} > 1,8 \text{ à } 2$). Hetzelfde geldt voor het achterland ($L_3/\lambda_3 > 1,8 \text{ à } 2$). (2)

De tweede aanname is verantwoord om te maken gezien het relatief brede voor- en achterland waar het dijkvak over beschikt. Daarnaast resulteert dit in vereenvoudigde formules voor het berekenen van de stijghoogte bij het uittredepunt. Deze zijn te vinden in bijlage b4.4 van "Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken" (TAW, 2004, b4-6).

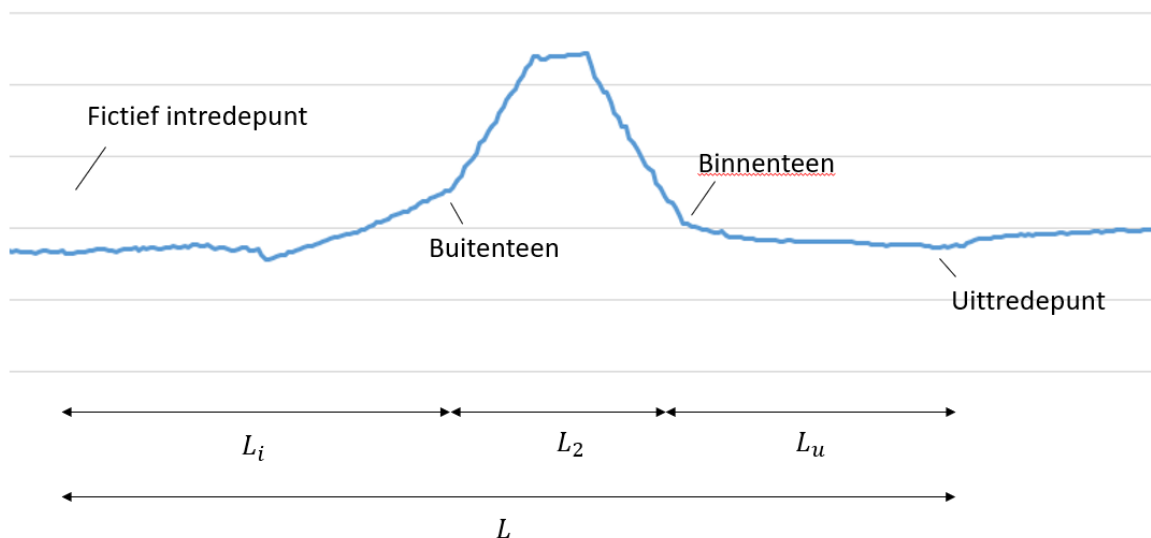
De volgende parameters zijn hiervoor nodig:

- Doorlatendheid zandlaag (k_z)
- Dikte zandlaag (D)
- Dikte deklaag voor- en achterland ($d_1; d_3$)
- Doorlatendheid deklaag voor- en achterland ($k_1; k_3$)
- Buitenwaterstand (h)
- Polderpeil (φ_3)

De doorlatendheden van de deklagen van het voor- en achterland zijn deterministisch meegenomen omdat hiervan geen data beschikbaar is. Voor beide is dezelfde waarde (1 m/d) gebruikt als in het rapport van WAM (HSDR, 2019a). De overige parameters zijn als stochast meegenomen.

3.1.1.2 Berekenen kwelweglengte

De kwelweglengte is opgedeeld in drie delen (zie Figuur 3-1). De (fictieve) intreelengte (L_i), de breedte van de dijk (L_2), en de uittreelengte (L_u). De (fictieve) intreelengte is de afstand tussen het (fictieve) intredepunt en de buitenteen. Het dijkvak in dit onderzoek heeft relatief grote stukken voorland, wat betekent dat het intredepunt ergens in het voorland zal zijn. De breedte van de dijk is de afstand tussen de buiten- en binnenteen en is deterministisch meegenomen (30m) omdat deze weinig varieert. De uittreelengte is de afstand tussen het uittredepunt en de binnenteen van de dijk. Deze is als stochast meegenomen.



Figuur 3-1: Visualisatie kwelweglengte

De meegenomen kwelweglengte mag zonder verdere onderbouwing maximaal gelijk zijn aan de dubbele dijkbasislengte (twee keer de afstand tussen de buitenteen en het uittredepunt) (Rijkswaterstaat, 2019, p. 97). Dit resulteert in een intreelengte die gelijk is aan de lengte van de dijkbasis:

$$L_i = \text{dijkbasis} = L_2 + L_u \quad (3.1)$$

3.1.2 Methode bepalen probabilistische eigenschappen van de stochasten

Voor de stochasten in Tabel 3-1 zijn het type kansverdeling, het gemiddelde, de standaarddeviatie, en de karakteristieke waarde bepaald. De stochasten zijn verdeeld volgens het type kansverdeling dat is weergegeven in Tabel 3-2. Deze typen kansverdelingen zijn per stochast aanbevolen in het WBI (Deltares, 2016c). Voor de buitenwaterstand (h) is een Gumbel verdeling gebruikt. Een Gumbel verdeling is een extreme waarden verdeling en wordt vaker voor de buitenwaterstand gebruikt, omdat daarmee de extreme waterstanden goed gefit kunnen worden.

Daarnaast laat Tabel 3-2 voor elke stochast het percentiel van de karakteristieke waarde (x_{kar}) zien. Dit is de veilige waarde die in de semi-probabilistische beoordeling wordt gebruikt voor de stochasten. Er zijn twee uitzonderingen: de buitenwaterstand (h) waarvoor de Waterstand Bij Norm (WBN) wordt ingevoerd in de semi-probabilistische beoordeling, en de kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$) waarvoor de karakteristieke waarde (0,3) in het WBI is aanbevolen (Deltares, 2016c).

Tabel 3-2: Type kansverdeling en percentiel karakteristieke waarde per stochast

Stochast	Type kansverdeling	Percentiel karakteristieke waarde	Stochast	Type kansverdeling	Percentiel karakteristieke waarde
h	Gumbel	= WBN	γ_{nat}	Lognormaal ²	5%

² Het gaat hier om een verschoven lognormale verdeling. Het volumieke gewicht van water ($9,81 \text{ kN/m}^3$) wordt van het verzadigd volumiek gewicht van de deklaag afgehaald, voordat er een lognormale verdeling op wordt gefit.

φ_3	Normaal	95%	$i_{c,h}$	Lognormaal	$x_{kar} = 0,3$
d_1	Lognormaal	5%	d_{70}	Lognormaal	5%
d_3	Lognormaal	5%	k_z	Lognormaal	95%
h_{exit}	Normaal	5%	D	Lognormaal	95%
d_{exit}	Lognormaal	5%	L_u	Lognormaal	5%

De PTK fit automatisch een kansverdeling wanneer het type kansverdeling, het gemiddelde en de standaarddeviatie voor een stochast zijn ingevoerd (invoer voor probabilistische beoordeling). De invoer voor de semi-probabilistische beoordeling zijn de karakteristieke waarden van de stochasten. Deze zijn bepaald zoals voorgeschreven in “Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen” (Deltares, 2012). De bijbehorende vergelijkingen zijn weergegeven in Tabel 3-3. Er is onderscheid gemaakt tussen de volgende situaties (Deltares, 2012):

- de waarnemingsreeks van de stochast is een lokaal of een regionaal gegevensbestand.
- de karakteristieke waarde van de stochast moet een representant zijn voor de individuele ‘punt’-waarde van de parameter (bijvoorbeeld de dikte van de zandlaag), of een representant voor de ‘laaggemiddelde’-waarde. Een ‘laaggemiddelde’-waarde wordt bijvoorbeeld gebruikt voor de doorlatendheid van de zandlaag, waarbij variaties van punt tot punt bij de grondwaterstroming min of meer worden uitgemiddeld.
- het type kansverdeling van de waarneming is normaal of lognormaal.

Tabel 3-3: Formules bepalen karakteristieke waarden semi-probabilistische beoordeling (Deltares, 2012)

Lokaal	Individuele puntwaarden	Normaal	$x_{kar} = \mu_x \pm t_{N-1}^{0,95} \sigma_x$	(3.2)
		Lognormaal	$x_{kar} = \exp(\mu_{\ln x} \pm t_{N-1}^{0,95} \sigma_{\ln x})$	(3.3)
	Laaggemiddelde waarde	Normaal	$x_{kar} = \mu_x \pm t_{N-1}^{0,95} \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$	(3.4)
		Lognormaal	$x_{kar} = \exp(\mu_{\ln x} \pm t_{N-1}^{0,95} \frac{\sigma_{\ln x}}{\sqrt{N}})$	(3.5)
Regionaal	Individuele puntwaarden	Normaal	Vgl. 3.2	
		Lognormaal	Vgl. 3.3	
	Laaggemiddelde waarde	Normaal	$x_{kar} = \mu_x \pm t_{N-1}^{0,95} \sigma_x \sqrt{\Gamma^2 + \frac{1}{N}}$	(3.6)
		Lognormaal	$x_{kar} = \exp\left(\mu_{\ln x} \pm t_{N-1}^{0,95} \sigma_{\ln x} \sqrt{\Gamma^2 + \frac{1}{N}}\right)$	(3.7)
Met $\Gamma^2 = 0,25$ (zie (TAW, 1989))				
<p>Met:</p> <p>x_{kar} karakteristieke waarde voor stochast x</p> <p>μ_x gemiddelde waarde van stochast x</p> <p>σ_x standaarddeviatie van stochast x</p> <p>$\mu_{\ln x}$ gemiddelde waarde van $\ln(x)$</p> <p>$\sigma_{\ln x}$ standaarddeviatie van $\ln(x)$</p> <p>N aantal waarnemingen voor stochast x</p> <p>$t_{N-1}^{0,95}$ Student-t factor</p>				

De karakteristieke waarde is bepaald met behulp van een Student-t factor. Dit betekent dat de karakteristieke waarden voor de semi-probabilistische beoordeling gelijk zijn aan de waarden van het 5%- of 95%-percentiel (afhankelijk van de stochast) van een Student-t verdeling. Voor de probabilistische beoordeling fit de PTK een lognormale of normale verdeling³ op basis van het gemiddelde en standaarddeviatie van de waarnemingen van de stochast. De waarden van het 5%- of 95%-percentiel van deze kansverdeling komen dus niet overeen met de karakteristieke waarden van de stochasten in de semi-probabilistische beoordeling. Het is echter erg belangrijk dat beide beoordelingen consistent zijn. Vooral omdat de resultaten van beide beoordelingen in dit onderzoek met elkaar zijn vergeleken. Het gemiddelde en standaarddeviatie op basis waarvan de PTK een kansverdeling fit zijn daarom aangepast, zodat de waarden van het 5%- of 95%-percentiel overeenkomen met de karakteristieke waarden in de semi-probabilistische beoordeling. De stochasten zijn hiervoor in vier groepen verdeeld (zie Tabel 3-4). Voor elke groep wordt in de volgende paragrafen (Secties 3.1.2.1-3.1.2.4) apart beschreven hoe de invoer voor de probabilistische en semi-probabilistische beoordeling wordt bepaald.

Tabel 3-4: Vier groepen waar de stochasten in zijn verdeeld voor het bepalen van de probabilistische eigenschappen

	Stochasten per groep	Omschrijving
Groep 1	$d_1; d_3; d_{exit}; k_z; L_u; D$	Voor deze groep stochasten zijn waarnemingen beschikbaar, en is een lognormale verdeling aanbevolen.
Groep 2	$\gamma_{nat}; d_{70}$	Voor deze groep stochasten zijn de waarnemingen niet beschikbaar. Daarnaast is voor deze stochasten een lognormale verdeling aanbevolen.
Groep 3	$h_{exit}; \varphi_3$	Voor deze groep stochasten zijn de waarnemingen beschikbaar, en is een normale verdeling aanbevolen.
Groep 4	$h; i_{c,h}$	Groep stochasten waarvoor de waarde staat voorgeschreven of op een andere manier wordt bepaald.

3.1.2.1 Groep 1

De stochasten van groep 1 zijn lognormaal verdeeld, en daarnaast zijn er waarnemingen beschikbaar. Figuur 3-2 laat zien in welke stappen het gemiddelde, de standaarddeviatie en de karakteristieke waarde zijn bepaald voor deze groep stochasten. Het gemiddelde en de standaarddeviatie van de waarnemingen zijn met Vgl. 3.8 en 3.9 bepaald.

$$\mu_x = \frac{\sum x_i}{N} \quad (3.8)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu_x)^2}{N - 1}} \quad (3.9)$$

Met:

x_i Waarde van waarneming i voor stochast x

De PTK kan met dit gemiddelde en standaarddeviatie een lognormale verdeling op fitten, maar zoals eerder in deze sectie is aangegeven, komen het 5% of 95%-percentiel van deze verdeling niet overeen met de karakteristieke waarde die berekend is voor de semi-probabilistische beoordeling. Het

³ Uitzondering hierop is de buitenwaterstand (h), waarvoor een Gumbel verdeling is gefit.

gemiddelde en standaarddeviatie zijn daarom zo aangepast dat dit wel het geval is, en beide beoordelingen consistent zijn. Dit is ook weergegeven in Figuur 3-2.

Eerst zijn de log-waarden van de waarnemingen bepaald, waar met Vgl. 3.10 en 3.11 het gemiddelde en de standaarddeviatie van zijn berekend. Hiermee is met Vgl. 3.3, 3.5 of 3.7 (afhankelijk van de situatie van de waarnemingen) de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling (groene vakje in Figuur 3-2) berekend.

$$\mu_{\ln x} = \frac{\sum \ln x_i}{N} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{\ln x} = \frac{\sum (\ln x_i - \mu_{\ln x})^2}{N - 1} \quad (3.11)$$

Het aangepaste gemiddelde ($\mu_{x,prob}$) en standaarddeviatie ($\sigma_{x,prob}$) zijn vervolgens bepaald met Vgl. 3.12, 3.13 en 3.14. Dit is de invoer voor de probabilistische beoordeling, waarop de PTK een lognormale verdeling fit.

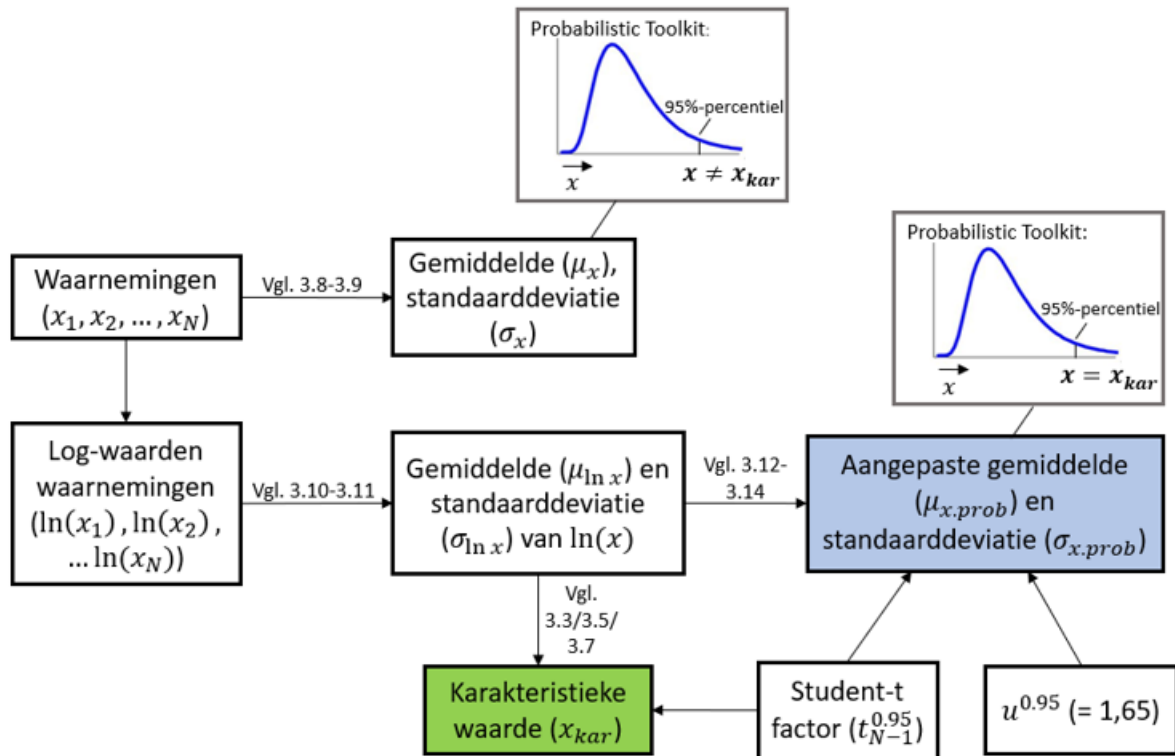
$$\sigma_{\ln(x),prob} \approx \frac{t_{N-1}^{0,95}}{u^{0,95}} \cdot \sigma_{\ln(x)} \cdot \sqrt{\Gamma^2 + \frac{1}{N}} \quad (3.12)$$

$$\mu_{x,prob} = \exp(\mu_{\ln(x)} + 0.5 \cdot \sigma_{\ln(x),prob}^2) \quad (3.13)$$

$$\sigma_{x,prob} \approx \mu_{x,prob} \cdot \left(\sqrt{\exp(\sigma_{\ln(x),prob}^2)} - 1 \right) \quad (3.14)$$

Waarin:

- Γ^2 Gelijk aan 0,25 voor een regionaal waarnemingsbestand, en gelijk aan 0 voor een lokaal waarnemingsbestand.
- $u^{0,95}$ De waarde van de normale verdeling bij 95% overschrijdingskans. Deze waarde is gelijk aan 1,65.
- N Bij laaggemiddelde waarde: aantal waarnemingen. Bij individuele puntwaarde: $N = 1$
- $\mu_{x,prob}$ Het aangepaste gemiddelde voor stochast x , die wordt ingevuld in de probabilistische beoordeling.
- $\sigma_{x,prob}$ De aangepaste standaarddeviatie voor stochast x , die wordt ingevuld in de probabilistische beoordeling.



Legenda:

- Invoer voor probabilistische analyse
- Invoer voor semi-probabilistische analyse

Groep 1

Figuur 3-2: Flowchart bepalen probabilistische eigenschappen stochasten groep 1

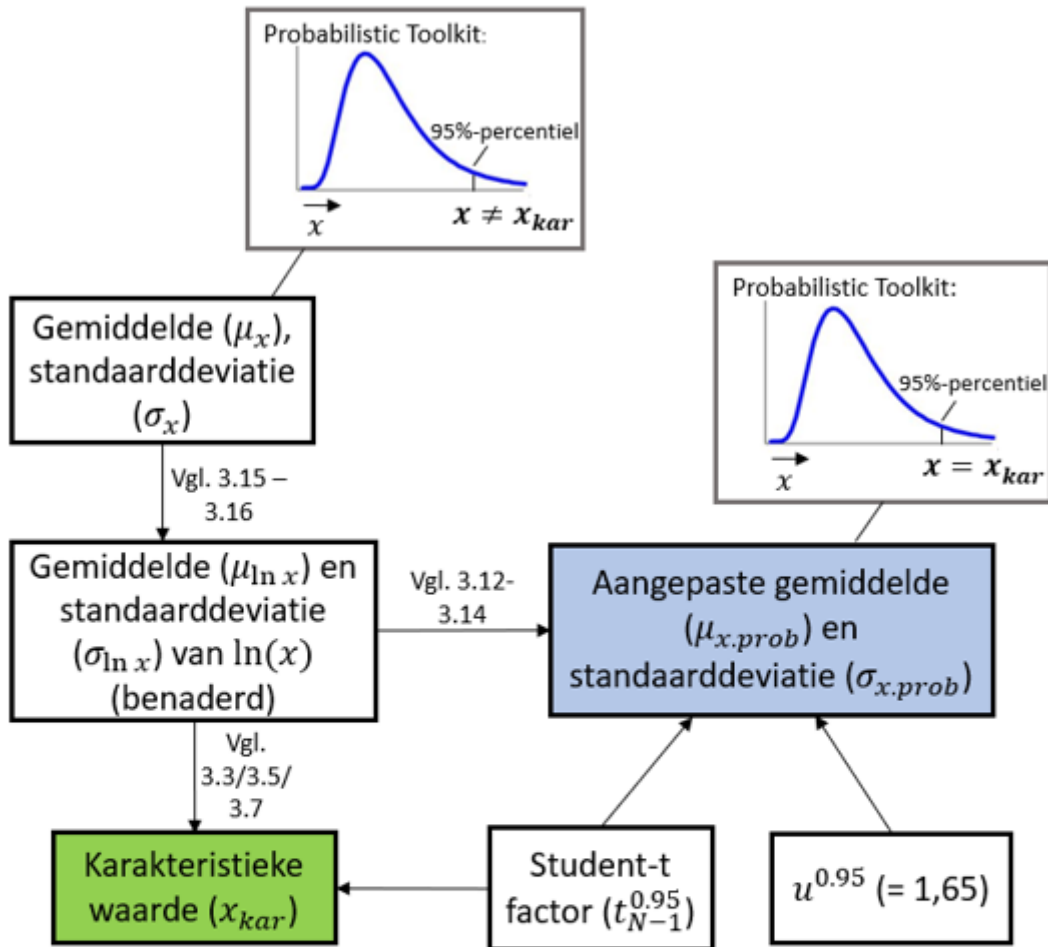
3.1.2.2 Groep 2

Voor de stochasten van groep 2 zijn geen waarnemingen beschikbaar. Daarnaast zijn ze, net als de stochasten van groep 1, lognormaal verdeeld. Figuur 3-3 laat schematisch zien hoe het aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie ($\mu_{x,prob}$; $\sigma_{x,prob}$), en de karakteristieke waarde (x_{kar}) de stochasten uit deze groep zijn bepaald. Omdat er geen waarnemingen beschikbaar zijn, zijn het gemiddelde en standaarddeviatie van de log-waarden van de waarnemingen ($\mu_{\ln x}$; $\sigma_{\ln x}$) benaderd op basis van het gemiddelde en standaarddeviatie van de stochasten (μ_x ; σ_x) (Vgl. 3.15 en 3.16). Deze zijn namelijk wel beschikbaar.

$$\sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right)} \quad (3.15)$$

$$\mu_{\ln x} = \ln(\mu_x) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln x}^2 \quad (3.16)$$

Vervolgens is, net zoals bij groep 1, het aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie bepaald met Vgl. 3.12-3.14, en de karakteristieke waarde met Vgl. 3.3, 3.5 of 3.7.



Legenda:

Invoer voor
probabilistische analyse

Invoer voor semi-
probabilistische analyse

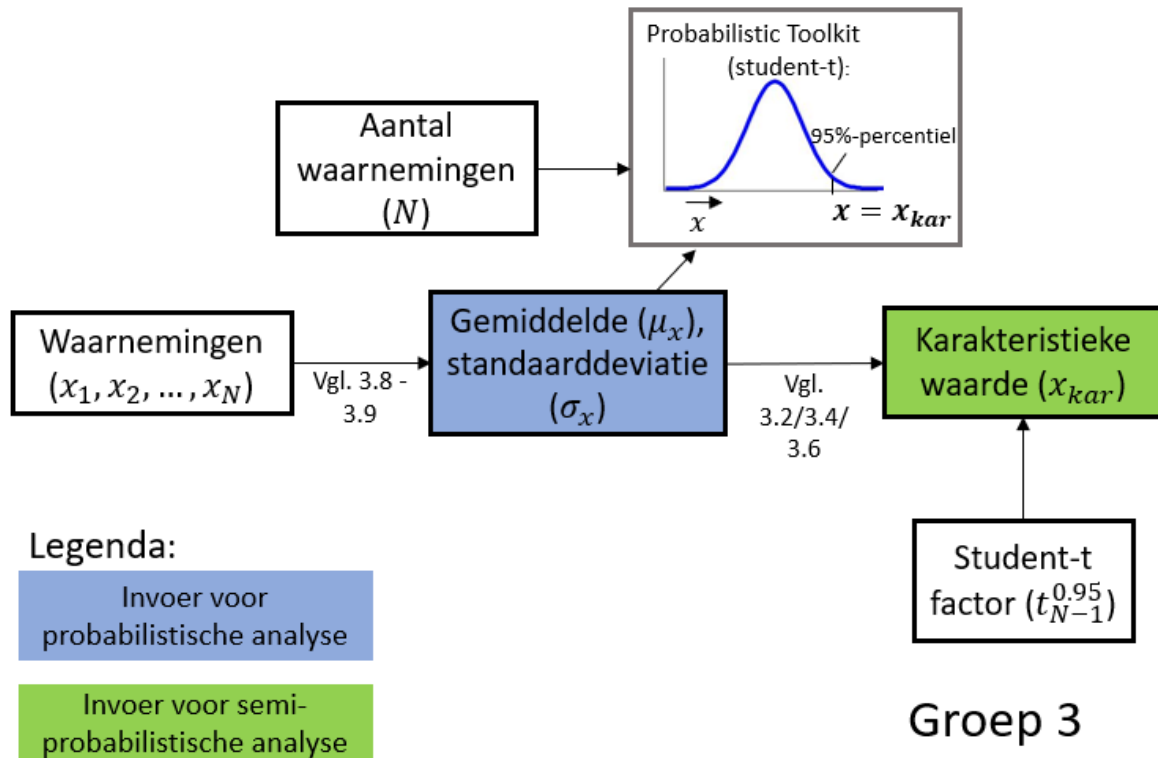
Groep 2

Figuur 3-3: Flowchart bepalen probabilistische eigenschappen stochasten groep 2

3.1.2.3 Groep 3

De stochasten uit groep 3 zijn normaal verdeeld. De vergelijkingen die gebruikt zijn om het gemiddelde en standaarddeviatie aan te passen in de vorige paragrafen (Vgl. 3.12-3.14) werken niet voor een normale verdeling. Daarom is gekozen om de PTK, op basis van het gemiddelde en standaarddeviatie van de waarnemingen (μ_x ; σ_x), een student-t verdeling te laten fitten met het aantal waarnemingen (N). Met voldoende waarnemingen komt deze verdeling praktisch overeen met een normale verdeling. Het voordeel is echter dat het 5%- of 95%-percentiel overeenkomt met de karakteristieke waarde die is berekend voor de semi-probabilistische beoordeling. Op deze manier zijn beide

beoordelingen ook voor de stochasten uit deze groep consistent. De flowchart in Figuur 3-4 laat de stappen zien.



Figuur 3-4: Flowchart bepalen probabilistische eigenschappen stochasten groep 3

3.1.2.4 Groep 4

Voor de stochasten uit deze groep zijn geen gemiddelde en standaarddeviatie berekend. De probabilistische eigenschappen van de kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$) zijn vanuit het WBI voorgeschreven (Deltares, 2016c) (zie Tabel ...). Voor de buitenwaterstand (h) is voor de probabilistische beoordeling een Gumbel fit gemaakt op basis van waarden uit het programma HydrANL. In de semi-probabilistische beoordeling wordt gerekend met de WBN.

3.1.3 Methode bepalen gemiddelde, standaarddeviatie en karakteristieke waarde per stochast

Deze sectie beschrijft per stochast welke waarnemingen zijn gebruikt, en hoe vervolgens het gemiddelde, de standaarddeviatie en karakteristieke waarde zijn bepaald (aan de hand van de methode beschreven in Sectie 3.1.2).

3.1.3.1 Groep 1

Dikte deklaag voor- en achterland

De diktes van de deklagen in het voor- en achterland ($d_1; d_3$) zijn bepaald aan de hand van de lengteprofielen. Lengteprofielen zijn profielen van de dijk in lengterichting, waaruit diktes van de verschillende lagen kunnen worden afgelezen. Deze lengteprofielen zijn beschikbaar voor het voorland, de kruin, en het achterland. De deklaag bestaat uit klei uit de formatie van Echteld. Binnen het dijkvak zijn acht boringlocaties ($N = 8$). Alleen voor die locaties is een dikte van de deklaag afgelezen (in het voor- en achterland), omdat tussen die locaties de dikte van de deklaag geïnterpoleerd is.

Het gemiddelde en de standaarddeviatie voor de probabilistische beoordeling ($\mu_{x.prob}; \sigma_{x.prob}$), en de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling zijn vervolgens berekend met de methode van Sectie 3.1.2.1 (zie Tabel 3-5). Het gegevensbestand van de waarnemingen is lokaal, en bij de dikte van de deklaag gaat het om een individuele puntwaarde. De karakteristieke waarde is het 5%-percentiel (“worst-case value”), met een lognormale verdeling. Met Vgl. 3.3 resulteert dit in de karakteristieke waarde die is weergegeven in Tabel 3-5. De dikte van de deklaag is in het achterland een stuk groter en constanter dan in het voorland (zie Tabel 3-5).

Tabel 3-5: Probabilistische eigenschappen diktes deklagen voor- en achterland

	Type kansverdeling	Percentiel	N	$\mu_{\ln x}$	$\sigma_{\ln x}$	x_{kar} [m]	$\mu_{x.prob}$ [m]	$\sigma_{x.prob}$ [m]
d_1	Lognormaal	5%	8	0,76	0,327	1,15	2,29	0,89
d_3	Lognormaal	5%	8	1,186	0,135	2,54	3,31	0,51

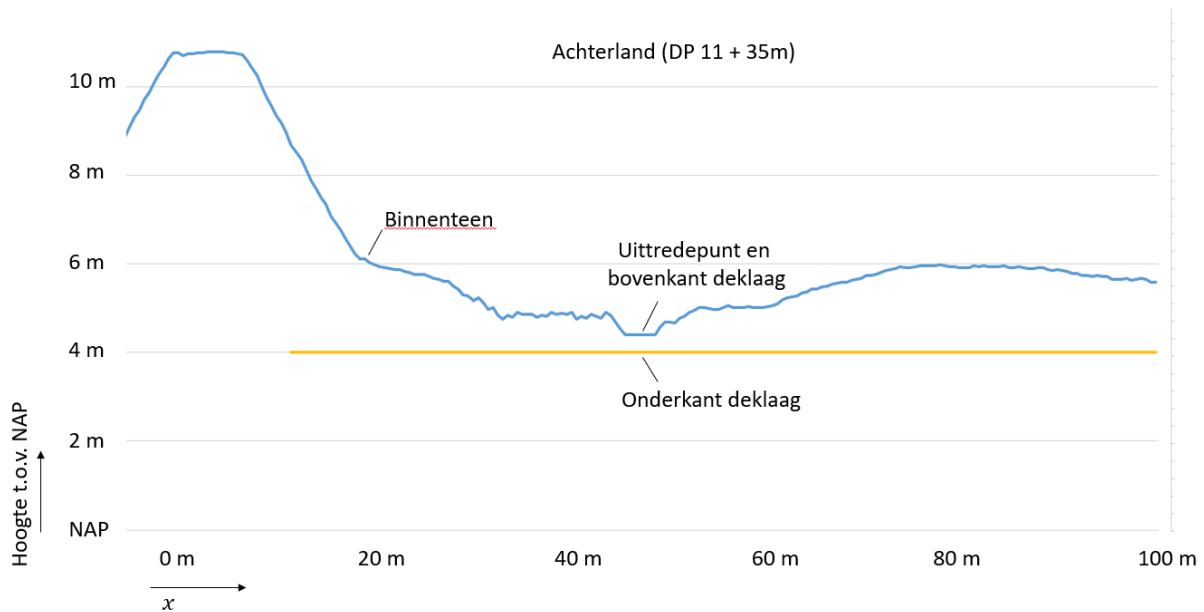
Dikte deklaag bij uittredepunt

De dikte van de deklaag bij het uittredepunt (d_{exit}) is het verschil tussen de bovenkant en de onderkant van de deklaag bij het uittredepunt. Hierbij is de dikte meegenomen als stochast, en dus niet de bovenkant en onderkant van de deklaag apart.

Voor elk van de vijftien dijkkpalen in het dijkvak is een deklaagdikte bij het uittredepunt bepaald ($N = 15$). De bovenkant van de deklaag bij het uittredepunt is gehaald uit de dwarsprofielen van het dijkvak (zie Figuur 3-5). De dwarsprofielen geven per doorsnede van de dijk (elke 25m) de bovenkant van de grond weer ten opzichte van NAP. Per dijkspaal zijn er vier dwarsprofielen beschikbaar. Deze dwarsprofielen gaan tot honderd meter in het voorland, en tot honderd meter in het achterland (vanaf de kruin gezien).

Voor het uittredepunt is uitgegaan van het laagste maaiveldpunt in het achterland. In het rapport van WAM “Beoordeling Piping en Heave” (HSDR, 2019a) bleek dit namelijk de meest maatgevende aanname. Dit betekent dat de bovenkant van de deklaag bij het uittredepunt gelijk is aan het laagste maaiveldpunt in het achterland. Figuur 3-5 geeft één van de dwarsprofielen van dijkspaal 11, en laat zien wat het uittredepunt voor deze doorsnede is.

De onderkant van de deklaag is gehaald uit de lengteprofielen van het achterland. Dit resulteert in één enkele waarde van de onderkant van de deklaag voor het hele achterland van één dijkspaal. Er is waarschijnlijk meer variatie in de onderkant van de deklaag, maar daar is geen informatie over beschikbaar. Door het uittredepunt te kiezen bij het laagste maaiveldpunt is de deklaagdikte al relatief dun, dus de variatie in de onderkant van de deklaag zal eerder gunstiger uitvallen.



Figuur 3-5: Dwarsprofiel van achterland bij doorsnede DP 11 + 35m

Uitgangspunten:

- Het uittredepunt in dit onderzoek is de locatie van het laagste maaiveld in het achterland.
- Voor elke dijkpaal is één dikte van de deklaag genomen. Hierbij is uitgegaan van het dwarsprofiel met de dunste deklaag per dijkpaal. In totaal zijn er vier dwarsprofielen beschikbaar per dijkpaal. Deze keuze is relatief conservatief, omdat per dijkpaal steeds de meest ongunstige waarde is genomen.
- Er is geen variatie in de onderkant van de deklaag over de dwarslengte van het achterland meegenomen.

Het gemiddelde en standaarddeviatie voor de probabilistische beoordeling ($\mu_{x.prob}; \sigma_{x.prob}$), en de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling (x_{kar}) zijn vervolgens berekend met de vijftien deklaagdiktes die bepaald zijn. Met de methode voor groep 1 (zie Sectie 3.1.2.1) resulteert dit in de waarden van Tabel 3-6. De waarnemingen van de dikte van de deklaag bij het uittredepunt zijn lokaal, en de karakteristieke waarde is een representant van de individuele puntwaarde (Vgl. 3.3).

Tabel 3-6: Probabilistische eigenschappen dikte deklaag bij het uittredepunt

	Type kansverdeling	Percentiel	N	$\mu_{\ln x}$	$\sigma_{\ln x}$	x_{kar} [m]	$\mu_{x.prob}$ [m]	$\sigma_{x.prob}$ [m]
d_{exit}	Lognormaal	5%	15	-0,57	1,13	0,078	1,16	2,09

De deklaagdikte bij het uittredepunt is relatief klein en heeft een grote spreiding. De deklaagdikte varieert van nul tot ongeveer twee meter in de waarnemingen. Dit komt doordat de deklaagdikte bij het uittredepunt voor sommige dijkpalen bijna gelijk is aan nul, en voor sommige dijkpalen bijna twee meter. Voor één dijkpaal is de deklaagdikte bij het uittredepunt gelijk aan nul, wat erg groot effect heeft op de standaardafwijking en het gemiddelde bij lognormale waarden. De waarde voor $\sigma_{\ln x}$ is relatief groot vergeleken bij die van de dikte van de deklagen in het voor- en achterland (Tabel 3-5).

Uittreelengte

De uittreelengte (L_3) is de afstand tussen het uittredepunt (laagste maaiveld punt) en de binnenteen van de dijk (zie Figuur 3-5). Deze afstand is voor elke dijkpaal bepaald met behulp van de dwarsprofielen en meegenomen als stochast.

Uitgangspunten:

- Voor elke dijkpaal is één uittreelengte bepaald (terwijl er vier dwarsprofielen beschikbaar zijn per dijkpaal), die correspondeert met het laagste maaiveldpunt voor die dijkpaal.

Het gemiddelde en standaarddeviatie voor de probabilistische beoordeling ($\mu_{x.prob}; \sigma_{x.prob}$), en de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling (x_{kar}) zijn vervolgens berekend met de vijftien uittreelengtes. Met de methode voor groep 1 (zie Sectie 3.1.2.1) resulteert dit in de waarden van Tabel 3-7. De waarnemingen van de uittreelengte zijn lokaal, en de karakteristieke waarde is een representant van de individuele puntwaarde (Vgl. 3.3).

Tabel 3-7: Probabilistische eigenschappen uittreelengte

	Type kansverdeling	Percentiel	N	$\mu_{\ln x}$	$\sigma_{\ln x}$	x_{kar} [m]	$\mu_{x.prob}$ [m]	$\sigma_{x.prob}$ [m]
L_u	Lognormaal	5%	15	2,64	0,73	3,87	18,9	17,3

De resulterende standaarddeviatie is enorm groot, omdat de uittreelengte afhankelijk is van waar het laagste maaiveldpunt zit per dijkpaal.

Doorlatendheid zandlaag

De doorlatendheid van de zandlaag (k_z) is bepaald op basis van waarden uit het WBI-SOS. Het WBI-SOS heeft de dijken verdeeld in segmenten. Binnen die segmenten zijn een aantal grondscenario's, en per type zand in die grondscenario's zijn waarden voor de doorlatendheid beschikbaar (uit proeven).

Uitgangspunten:

- Alleen waarden voor de doorlatendheid van de grootste zandlaag (boven de eerstvolgende kleilaag) zijn gebruikt (P_Rg_Zg). Het is namelijk voor nu te complex om te werken met gelaagdheid van het zand.
- Het dijkvak behoort tot WBI-SOS segmenten 44001 en 44002, en uit die segmenten zijn waarden voor de doorlatendheid genomen.

Dit resulteert in twintig waarden voor de doorlatendheid. Op basis van die waarden zijn met de methode van groep 1 (zie Sectie 3.1.2.1) het gemiddelde en standaarddeviatie voor de probabilistische beoordeling ($\mu_{x.prob}; \sigma_{x.prob}$), en de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling (x_{kar}) berekend (zie Tabel 3-8). De waarnemingen van de doorlatendheid komen uit een regionaal gegevensbestand, en de karakteristieke waarde van de doorlatendheid is een laaggemiddelde waarde (Vgl. 3.7).

Tabel 3-8: Probabilistische eigenschappen doorlatendheid zandlaag

	Type kansverdeling	Percentiel	N	$\mu_{\ln x}$	$\sigma_{\ln x}$	x_{kar} [m/s]	$\mu_{x.prob}$ [m/s]	$\sigma_{x.prob}$ [m/s]
k_z	Lognormaal	95%	20	-7,82	0,56	6,84E-4	4,22E-4	1,40E-4

Dikte zandlaag

De dikte van de watervoerende zandlaag (D) is bepaald op basis van ondergrondgegevens van Dinoloket (ondergrondmodel BRO REGIS II v2.2). Hieruit is over de gehele lengte van het dijkvak de dwarsdoorsnede gehaald, welke is opgenomen in Bijlage C (Figuur C-1). Deze doorsnede is grover dan de doorsnede van de lengteprofielen. Voor vijftien locaties binnen het dijkvak (zie Figuur C-1 voor de locaties) is een dikte van de zandlaag bepaald. De watervoerende zandlaag bestaat uit de zandlagen tot aan de eerste kleilaag (oranje laag, zie Figuur C-1). Zowel de holocene (groene laag) als de pleistocene (paarse) lagen zijn meegenomen.

Uitgangspunten:

- De dikte van de zandlaag is bepaald aan de hand van de doorsnede van het dijkvak uit Dinoloket (BRO REGIS II v2.2), waarbij zowel de holocene als de pleistocene zandlaag is meegenomen in de dikte.
- Voor de holocene laag is niet aangegeven welk deel klei en welk deel zand is. Er is daarom gewerkt met een absoluut maximum van de bovenkant van de zandlaag van 5 meter t.o.v. NAP. Uit de lengteprofielen blijkt namelijk dat vanaf deze hoogte overal in het dijkvak (zowel in het voor- en achterland, als bij de kruin), de deklaag zit.

Op basis van de resulterende vijftien waarden voor de dikte van de zandlaag zijn met de methode van groep 1 (zie Sectie 3.1.2.1) het gemiddelde en standaarddeviatie voor de probabilistische beoordeling ($\mu_{x.prob}$; $\sigma_{x.prob}$), en de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling (x_{kar}) berekend (zie Tabel 3-9). De dikte van de zandlaag is een individuele puntwaarde.

Tabel 3-9: Probabilistische eigenschappen dikte zandlaag

	Type kansverdeling	Percentiel	N	$\mu_{\ln x}$	$\sigma_{\ln x}$	x_{kar} [m]	$\mu_{x.prob}$ [m]	$\sigma_{x.prob}$ [m]
D	Lognormaal	95%	15	3,02	0,02	21,41	20,53	0,52

3.1.3.2 Groep 2

Voor de stochasten van groep 2 zijn geen waarnemingen beschikbaar. Het gemiddelde en de standaarddeviatie (μ_x ; σ_x) zijn daarom bepaald met behulp van literatuur.

Verzadigd volumiek gewicht deklaag

Het verzadigd volumieke gewicht van de deklaag (γ_{nat}) is overgenomen van een rapport van WAM over macro-stabiliteit (18,5 kN/m³) (HSDR, 2019b). Hierbij is een verschoven lognormale verdeling aanbevolen vanuit het WBI (Deltares, 2016c). Het volumiek gewicht van water (9,81 kN/m³) is er daarom vanaf gehaald.

Voor de variatiecoëfficiënt is de aanbevolen waarde (0,1) vanuit het WBI gebruikt (Deltares, 2016c). Hieruit is de standaarddeviatie berekend. Met de methode van groep 2 (zie Sectie 3.1.2.2) en de gemiddelde waarde en standaarddeviatie uit de literatuur (μ_x ; σ_x), zijn de probabilistische eigenschappen van het volumieke gewicht van de deklaag bepaald (zie Tabel 3-10). De gemiddelde waarde en standaarddeviatie zijn niet locatie-specifiek, en daarnaast is de karakteristieke waarde in dit onderzoek een representant van de individuele puntwaarde (Vgl. 3.3). De karakteristieke waarde kan ook meegenomen worden als laaggemiddelde waarde (resultierend in minder spreiding), maar omdat de variatiecoëfficiënt uit het WBI komt en de waarnemingen niet beschikbaar zijn, is ervoor gekozen om het volumiek gewicht mee te nemen als individuele puntwaarde.

Uitgangspunten:

- De deklaag bestaat uit zware klei ('klei zwaar' in het rapport (HSDR, 2019b)). Hiervan is uitgegaan omdat dit het meeste overeenkomt met monsters die genomen zijn in de deklaag.
- De karakteristieke waarde van het volumieke gewicht van de deklaag is een representant van de individuele puntwaarde, omdat de waarnemingen niet beschikbaar zijn.
- Voor het bepalen van de student-t factor is van vijftien waarnemingen uit gegaan.

Tabel 3-10: Probabilistische eigenschappen volumiek gewicht deklaag

	Type kansverdeling	Percentiel	μ_x [kN/m ³]	σ_x [kN/m ³]	x_{kar} [kN/m ³]	$\mu_{x.prob}$ [kN/m ³]	$\sigma_{x.prob}$ [kN/m ³]
$\gamma_{deklaag}$	Lognormaal	5%	8,69	0,4345	7,95	8,69	0,46

70-percentiel waarde zandlaag

Het gemiddelde (μ_x) en de standaarddeviatie (σ_x , variatiecoëfficiënt is 30%) voor de 70-percentiel waarde van de zandlaag (d_{70}) zijn overgenomen uit het rapport van WAM "Beoordeling Piping en heave" (HSDR, 2019a). Deze zijn weergegeven in Tabel 3-11. Deze waarden zijn bepaald op basis van 32 waarnemingen, uit een regionaal gegevensbestand. Met behulp van de methode voor groep 2 (zie Sectie 3.1.2.2) zijn de probabilistische eigenschappen van de 70-percentiel waarde van de zandlaag bepaald (zie Tabel 3-11). De karakteristieke waarde is een representant van de laaggemiddelde waarde (Vgl. 3.7).

Uitgangspunten:

- Alleen de 70-percentiel waarde van de holocene zandlaag is meegenomen. Bij de bepaling van de d_{70} is namelijk alleen de bovenste meter zand belangrijk, omdat daar het faalmechanisme optreedt (Deltares, 2012).

Tabel 3-11: Probabilistische eigenschappen 70-percentiel waarde zandlaag

	Type kansverdeling	Percentiel	N	μ_x [m]	σ_x [m]	x_{kar} [m]	$\mu_{x.prob}$ [m]	$\sigma_{x.prob}$ [m]
d_{70}	Lognormaal	5%	32	3,50E-4	1,05E-4	2,57E-4	3,40E-4	5,47E-5

3.1.3.3 Groep 3

Freatisch peil bij uittredepunt

Het freatisch peil (h_{exit}) bij het uittredepunt is bepaald aan de hand van de dwarsprofielen van het dijkvak. Dit zijn dezelfde dwarsprofielen als bij het bepalen van de uittreelengte en deklaagdikte bij het uittredepunt. Het freatisch peil is gelijk genomen aan de bovenkant van de deklaag (maaiveldniveau) bij het uittredepunt. Dit is een vrij conservatieve aanname, omdat bij hoogwater de sloten, waar nu vaak het uittredepunt is gekozen (zie als voorbeeld Figuur 3-5), vol staan met water. Het freatisch peil bij het uittredepunt is dus in werkelijkheid hoger.

Voor elke dijkspaal is één waarde van het freatisch peil bij het uittredepunt bepaald met behulp van de dwarsprofielen. Op basis van het gemiddelde en de standaarddeviatie van deze vijftien waarden heeft de PTK een Student-t verdeling gefit (zie Sectie 3.1.2.3 voor de methode). De waarnemingen zijn lokaal, en de representant van de karakteristieke waarde is een individuele puntwaarde. De karakteristieke waarde is dus berekend met Vgl. 3.2. De probabilistische eigenschappen van het freatisch peil bij het uittredepunt zijn weergegeven in Tabel 3-12.

Uitgangspunten:

- Het uittredepunt in dit onderzoek is de locatie van het laagste maaiveld in het achterland. Uit het rapport van WAM “Beoordeling Piping en Heave” (HSDR, 2019a) bleek dit namelijk de meest maatgevende aanname.
- Het freatisch peil ter plaatse van het uittredepunt is gelijk aan het maaiveld. Dit is een vrij conservatieve aanname omdat de sloten bij hoogwater meestal vol staan.
- Per dijkpaal is steeds één waarde voor het freatisch peil bij het uittredepunt genomen, terwijl er per dijkpaal vier dwarsprofielen beschikbaar zijn. Per dijkpaal is steeds de meest lage waarde gebruikt. In werkelijkheid ligt het freatisch peil bij het uittredepunt dus hoger.

Tabel 3-12: Probabilistische eigenschappen freatisch peil bij uittredepunt

	Type kansverdeling	Percentiel	N	μ_x [m + NAP]	σ_x [m]	x_{kar} [m + NAP]
h_{exit}	Student-t	5%	15	4,77	0,29	4,25

Polderpeil

De waarden voor het polderpeil (φ_3) zijn gehaald uit het rapport van WAM “Beoordeling Piping en Heave” (HSDR, 2019a). Voor elke dijkpaal ($N = 15$) is een polderpeil gegeven op basis waarvan het gemiddelde, de standaarddeviatie en de karakteristieke waarde zijn berekend (zie Sectie 3.1.2.3 voor de methode). Deze waarnemingen zijn lokaal, en het polderpeil is een individuele puntwaarde. De karakteristieke waarde is berekend met Vgl. 3.2. De probabilistische eigenschappen van het polderpeil zijn weergegeven in Tabel 3-13.

Uitgangspunten:

- Er is hier vanuit gegaan dat de waarnemingen lokaal zijn. Dit is niet zeker, maar omdat het polderpeil een individuele puntwaarde is maakt deze keuze geen verschil voor de resultaten. In beide gevallen zijn namelijk dezelfde vergelijkingen gebruikt.

Tabel 3-13: Probabilistische eigenschappen polderpeil

	Type kansverdeling	Percentiel	N	μ_x [m + NAP]	σ_x [m]	x_{kar} [m + NAP]
φ_3	Student-t	95%	15	4,54	0,46	5,34

3.1.3.4 Groep 4

Kritieke heave gradiënt

Voor het gemiddelde, de standaarddeviatie en de karakteristieke waarde van de kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$) zijn de voorgeschreven waarden vanuit het WBI gebruikt (Deltares, 2016c). Deze zijn weergegeven in Tabel 3-14.

Tabel 3-14: Probabilistische eigenschappen kritieke heave gradiënt

	Type kansverdeling	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Karakteristieke waarde
$i_{c,h}$	Lognormaal	0,5	0,1	0,3

Buitenwaterstand

De buitenwaterstand (h) is verdeeld volgens een Gumbel verdeling, dit is een extreme waarden verdeling. Een Gumbel verdeling wordt vaker gebruikt voor de buitenwaterstand, omdat (hoge) waterstanden hier goed gefit mee kunnen worden.

De Gumbel verdeling is gefit op basis van waarden uit Hydra-NL. Voor elke dijkpaal zijn de waterstanden voor twintig verschillende herhalingstijden uit Hydra-NL gehaald (zie ... in Appendix ...). De waterstand die correspondeert met de verschillende herhalingstijden varieert per dijkpaal. In deze variatie zit geen duidelijk patroon, de waterstand loopt namelijk niet geleidelijk af bij dijkpalen die meer stroomafwaarts zijn. De waterstand in het dijkvak varieert per herhalingstijd gemiddeld ongeveer 0,04 meter ten opzichte van de gemiddelde waterstand per herhalingstijd. Dit is relatief weinig, en daarom is ervoor gekozen om te rekenen met de gemiddelde waterstand per herhalingstijd. Deze waarden zijn weergegeven in Tabel 3-15.

Uitgangspunten:

- De waarden voor de buitenwaterstand zijn voor twintig verschillende herhalingstijden uit Hydra-NL gehaald. Dit is gedaan voor locatie NR_1_44-1_dk_236 tot en met NR_1_44-1_dk_250, overeenkomstig met de dijkpalen van het dijkvak. Hierbij is per herhalingstijd de gemiddelde waterstand genomen over het dijkvak.
- Er is gewerkt met Hydra-NL versie 2.7.1, en versie 3 van de database (WBI2017_Bovenrijn_44-1_v03). Er is gerekend met een zichtjaar van 2023, en modelonzekerheid en statistische onzekerheid zijn meegenomen.

De Waterstand bij Norm (WBN) voor de semi-probabilistische beoordeling is de waterstand bij een herhalingstijd van 10 000 jaar. Er is gerekend met een WBN van 9,4 meter (zie Tabel 3-15).

Een Gumbel verdeling heeft twee verdelingsparameters: de locatieparameter (α) en de "scale" parameter (β) (zie Vgl. 3.17). Deze parameters zijn zo bepaald dat de faalkans van de probabilistische beoordeling zo laag mogelijk is, en dat de verdeling tegelijkertijd overeenkomt met de gemiddelde waterstanden uit Hydra-NL (zie Tabel 3-15). Er is gewerkt met log-waarden van de overschrijdingskans, omdat daarmee beter bekeken kan worden hoe goed de Gumbel verdeling is gefit.

$$\text{Log} \left(P(\underline{h} > h) \right) = \text{Log} \left(1 - \exp \left(-\exp \left(-\frac{(h - \alpha)}{\beta} \right) \right) \right) \quad (3.17)$$

Waarin:

$P(\underline{h} > h)$	Overschrijdingskans van een bepaalde waterstand h
α	Locatieparameter Gumbel verdeling
β	"Scale" parameter Gumbel verdeling

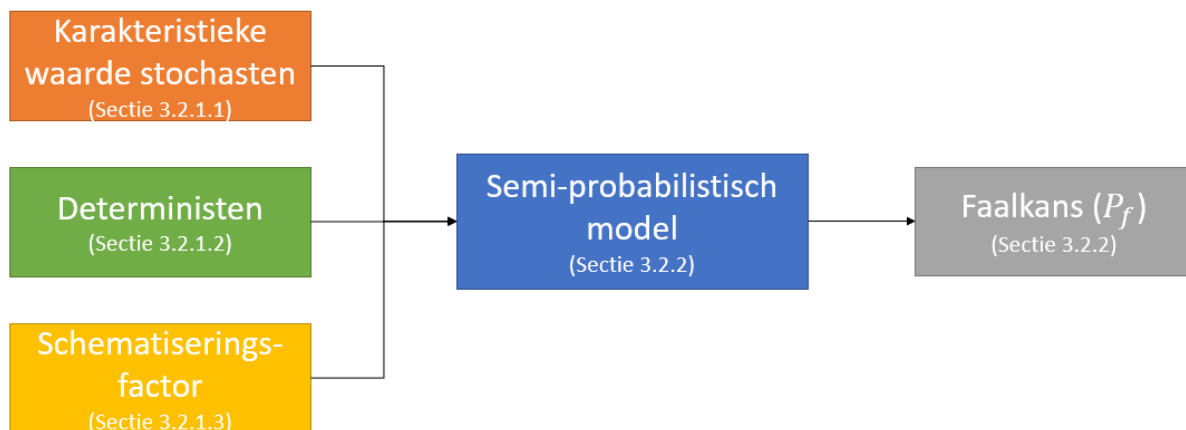
Tabel 3-15: Gemiddelde buitenwaterstand van het dijkvak per herhalingstijd

Herhalingstijd (T)	Overschrijdingskans $P(\underline{h} > h) = 1/T$	$\text{Log} \left(P(\underline{h} > h) \right)$	Gemiddelde waterstand (m + NAP)
10	0,1	-1	7,519
11	0,090909	-1,041	7,678
12	0,083333	-1,079	7,829
13	0,076923	-1,114	7,952
14	0,071429	-1,146	8,073

15	0,066667	-1,176	8,157
17	0,058824	-1,23	8,270
20	0,05	-1,301	8,370
25	0,04	-1,398	8,454
30	0,033333	-1,477	8,513
40	0,025	-1,602	8,590
100	0,01	-2	8,787
300	0,003333	-2,477	8,972
700	0,001429	-2,845	9,089
1000	0,001	-3	9,135
3000	0,000333	-3,477	9,255
7000	0,000143	-3,845	9,332
10000	0,0001	-4	9,369 ⁴
30000	3,33E-05	-4,477	9,457
70000	1,43E-05	-4,845	9,552

3.2 Methode uitvoeren semi-probabilistische piping beoordeling

Voor het uitvoeren van de semi-probabilistische piping beoordeling is een semi-probabilistisch model gemaakt in de Probabilistic Toolkit (PTK). Hiermee kunnen makkelijk probabilistische berekeningen worden uitgevoerd. Het model is vereenvoudigd weergegeven in Figuur 3-6. De invoer bestaat uit de karakteristieke waarde van de stochasten, de waarden voor de deterministen en schematiseringsfactoren. Vervolgens is op basis van deze waarden de faalkans berekend. Secties 3.2.1 en 3.2.2 gaan verder op de invoer en het model in. Sectie 3.2.3 geeft de faalkanseis waaraan het dijkvak moet voldoen.



Figuur 3-6: Vereenvoudigd schematisch overzicht semi-probabilistisch model

3.2.1 Invoer semi-probabilistische beoordeling

Deze sectie geeft de invoer voor de semi-probabilistische beoordeling: de waarden van de karakteristieke waarden van de stochasten, de deterministen en de schematiseringsfactoren

3.2.1.1 Karakteristieke waarden van de stochasten

De karakteristieke waarden van de stochasten zijn bepaald in Sectie 3.1.3. De methode is uitgelegd in Sectie 3.1.2. Door het gebruik van karakteristieke waarden is rekening gehouden met de ruimtelijke

⁴ Waterstand Bij Norm (WBN)

variabiliteit en statistische onzekerheid van de stochasten. Tabel 3-16 geeft een overzicht van de stochasten met de berekende karakteristieke waarden. De derde kolom geeft de vergelijking waarmee de karakteristieke waarde is bepaald.

Tabel 3-16: Overzicht karakteristieke waarden stochasten

Groep	Stochast	Vgl. karakteristieke waarde	Karakteristieke waarde
Groep 1	Dikte deklaag voorland (d_1)	(3.3)	1,15 m
	Dikte deklaag achterland (d_3)	(3.3)	2,54 m
	Dikte deklaag uittredepunt (d_{exit})	(3.3)	0,078 m
	Uittreelengte (L_u)	(3.3)	3,87 m
	Doorlatendheid zandlaag (k_z)	(3.7)	6,84E-4 m/s
	Dikte zandlaag (D)	(3.3)	21,41 m
Groep 2	Verzadigd volumiek gewicht deklaag ($\gamma_{deklaag}$)	(3.3)	7,95 kN/m ³
	70-percentiel waarde zandlaag (d_{70})	(3.7)	2,57E-4 m
Groep 3	Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})	(3.2)	4,25 m + NAP
	Polderpeil (φ_3)	(3.2)	5,34 m + NAP
Groep 4	Kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$)	- ⁵	0,3
	Buitenwaterstand (h)	- ⁶	WBN = 9,4 m + NAP

3.2.1.2 Deterministen

De deterministen hebben een vaste (voorgeschreven) waarde en zijn hetzelfde in beide beoordelingen. De waarden voor de deterministen en de bron staan beschreven in Tabel 3-17.

Tabel 3-17: Deterministische input

Parameter	Waarde	Bron
k_1	1,1574E-05 m/s (= 1 m/d)	(HSDR, 2019)
k_3	1,1574E-05 m/s	(HSDR, 2019)
L_2	30 m	Bepaald op basis van dwarsprofielen van het dijkvak
$\gamma_{sub.partikel}$	16,5 kN/m ³	(Deltares, 2016c)
θ	37°	(Deltares, 2016c)
d_{70m}	2,08E-04 m/s	(Deltares, 2016c)
ν	1,33E-06 m ² /s	(Deltares, 2016c)
η	0,25	(Deltares, 2016c)
g	9,81 m/s ²	(Deltares, 2016c)
γ_w	9,81 kN/m ³	(Rijkswaterstaat, 2019)
r_c	0,3	(Deltares, 2016c)

⁵ Karakteristieke waarde is voorgeschreven vanuit het WBI (Deltares, 2016c)

⁶ De Waterstand Bij Norm (WBN) is ingevoerd in de semi-probabilistische beoordeling

3.2.1.3 Schematiseringsfactor

Om rekening te houden met de schematiseringsonzekerheid in de semi-probabilistische beoordeling zijn schematiseringsfactoren gebruikt. In dit onderzoek is van dezelfde waarden uitgegaan als gebruikt in eerdere piping beoordelingen voor WAM. Deze waarden zijn weergegeven in Tabel 3-18.

Tabel 3-18: Schematiseringsfactoren

Faalmechanisme	Schematiseringsfactor
Opbarsten	1,0
Heave	1,0
Terugschrijdende erosie	1,1

3.2.2 Semi-probabilistische model

Het semi-probabilistische model is schematisch weergegeven in Figuur 3-7. Hierin is weergegeven hoe het model op basis van de (karakteristieke waarden van de) stochasten (oranje), deterministen (groen), en schematiseringsfactoren (geel) komt tot een faalkans (P_f). De vergelijkingen die hiervoor zijn gebruikt zijn de piping vergelijkingen genoemd in Sectie 2.1, en de vergelijkingen voor het berekenen van de stijghoogte genoemd in Sectie 3.1.1.1. Voor elk deelmechanisme is een faalkans uitgerekend met Vgl. 3.18-3.23 ($P_{f;u}$; $P_{f;h}$; $P_{f;p}$). Deze vergelijkingen zijn bepaald in de kalibratiestudie voor de semi-probabilistische en probabilistische piping beoordelingen (Deltares, 2016b). De resulterende faalkans is het minimum van de faalkansen van de drie deelmechanismen (zie Vgl. 3.24). De instellingen van de PTK voor het semi-probabilistische model zijn beschreven in Bijlage B.

$$F_u = \frac{\Delta\phi_{c,u}}{\Delta\phi} \quad (3.18)$$

$$P_{f;u} = \Phi\left(-\frac{\ln\left(\frac{F_u}{0,48}\right) + 0,27\beta_{norm}}{0,46}\right) \quad (3.19)$$

$$F_h = \frac{i_{c,h}}{i} \quad (3.20)$$

$$P_{f;u} = \Phi\left(-\frac{\ln\left(\frac{F_h}{0,37}\right) + 0,3\beta_{norm}}{0,48}\right) \quad (3.21)$$

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{h - h_{exit} - r_c D_{deklaag}} \quad (3.22)$$

$$P_{f;p} = \Phi\left(-\frac{\ln\left(\frac{F_p}{1,04}\right) + 0,43\beta_{norm}}{0,37}\right) \quad (3.23)$$

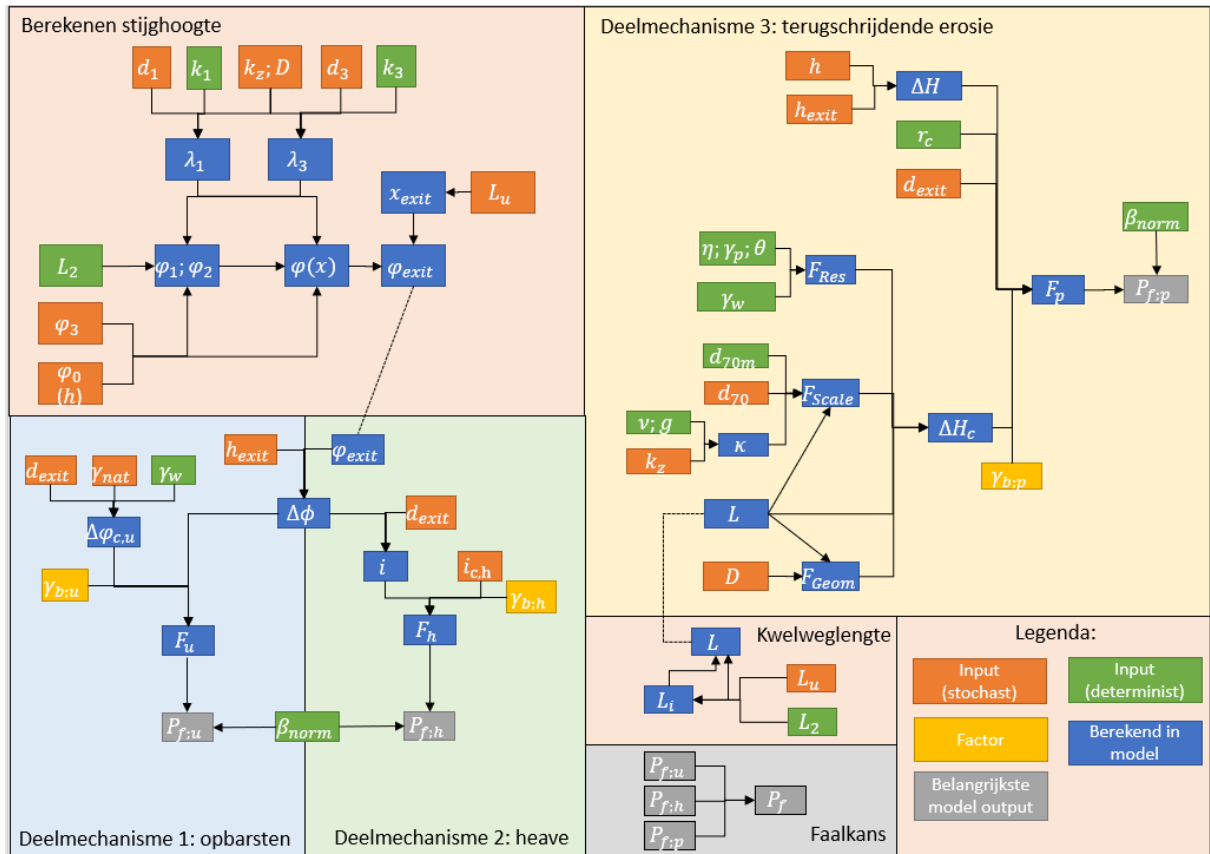
$$P_f = \min(P_{f;u}; P_{f;h}; P_{f;p}) \quad (3.24)$$

De betrouwbaarheidsindex die hoort bij de norm (β_{norm}) is berekend met Vgl. 3.25. De norm (P_{norm}) is gelijk aan een kans van 1/10000 per jaar. Dit resulteert in een betrouwbaarheidsindex van 3,72.

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P) \quad (3.25)$$

Waarbij:

Φ Cumulatieve standaard normale kansverdeling



Figuur 3-7: Schematisch model semi-probabilistische piping beoordeling

3.2.3 Faalkanseis

Het dijkvak voldoet als de berekende faalkans lager is dan de faalkanseis voor de doorsnede ($P_{eis;dsn}$). Deze faalkanseis is berekend met Vgl. 2.1 en 7.12 uit Rijkswaterstaat (2016, p. 16, 45).

Deze norm is met Vgl. 2.1 en 7.12 van Rijkswaterstaat (2016, p. 16, 45) omgerekend naar een faalkanseis voor een doorsnede. De betrouwbaarheidsindex van de faalkanseis is berekend met Vgl. 3.25. De resulterende faalkanseis is samen met de benodigde waarden voor de berekening weergegeven in Tabel 3-19.

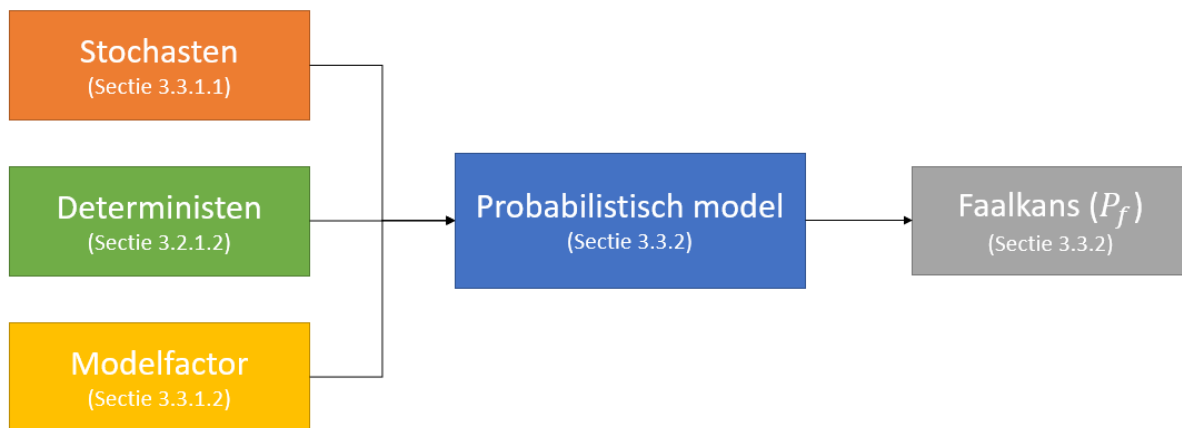
Tabel 3-19: Invoerwaarden berekening faalkanseis en resulterende faalkanseis

Parameter	Waarde
P_{norm}	1/10000 (HSDR, 2019a)
$L_{traject}$	32 400 m (HSDR, 2019a)
ω	0,24 (Rijkswaterstaat, 2016, p. 16)
a	0,9 (Rijkswaterstaat, 2019, p. 53)
b	300 m (Rijkswaterstaat, 2019)

β_{norm}	3,72
$P_{eis;dsn}$	2,44E-07 jaar ⁻¹
$\beta_{eis;dsn}$	5,03

3.3 Methode uitvoeren probabilistische beoordeling

Voor het uitvoeren van de probabilistische piping beoordeling is een probabilistisch model in de PTK gemaakt. Het model is vereenvoudigd weergegeven in Figuur 3-8. Er zijn enkele verschillen met het semi-probabilistische model. De invoerwaarden voor de stochasten zijn het gemiddelde, de standaarddeviatie en het type kansverdeling, in plaats van de karakteristieke waarde. De PTK fit op basis van deze gegevens een kansverdeling voor elke stochast. De invoerwaarden van de deterministen zijn wel hetzelfde als in de semi-probabilistische beoordeling (zie Sectie 3.2.1.2). Daarnaast is de berekening van de faalkans anders. In de probabilistische beoordeling is de faalkans namelijk berekend met behulp van Crude Monte Carlo Simulatie (C-MCS). Hierbij is niet automatisch de modelonzekerheid meegenomen, zoals in de semi-probabilistische beoordeling. Daarom is er gebruik van modelfactoren in het probabilistische model. Secties 3.3.1 en 3.3.2 gaan verder op de invoer en het model in.



Figuur 3-8: Vereenvoudigd schematisch overzicht probabilistische model

3.3.1 Invoer probabilistische beoordeling

3.3.1.1 Stochasten

De invoerwaarden van de stochasten voor de probabilistische beoordeling zijn het gemiddelde, de standaarddeviatie en het type kansverdeling. Tabel 3-20 geeft een overzicht van deze waarden, die in Secties 3.1.2 en 3.1.3 zijn bepaald. Door de stochasten mee te nemen als kansverdelingen, is er rekening gehouden met de ruimtelijke variabiliteit en statistische onzekerheid in de waarden van deze stochasten.

Tabel 3-20: Overzicht probabilistische eigenschappen stochasten voor probabilistische beoordeling

Groep	Stochast	Eenheid	μ	σ	Type kansverdeling
Groep 1	Dikte deklaag voorland (d_1)	m	2,29	0,89	Lognormaal
	Dikte deklaag achterland (d_3)	m	3,31	0,51	Lognormaal
	Dikte deklaag uittredepunt (d_{exit})	m	1,16	2,09	Lognormaal
	Uittreelengte (L_u)	m	18,9	17,3	Lognormaal
	Doorlatendheid zandlaag (k_z)	m/s	4,22E-4	1,40E-4	Lognormaal

	Dikte zandlaag (D)	m	20,53	0,52	Lognormaal
Groep 2	Verzadigd volumiek gewicht deklaag ($\gamma_{deklaag}$)	kN/m^3	8,69	0,46	Lognormaal
	70-percentiel waarde zandlaag (d_{70})	m	3,40E-4	5,47E-5	Lognormaal
Groep 3	Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})	$m + NAP$	4,77	0,29	Student-t
	Polderpeil (φ_3)	$m + NAP$	4,54	0,46	Student-t
Groep 4	Kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$)	-	0,5	0,1	Lognormaal
	Buitenwaterstand (h)	$m + NAP$	$\alpha = 7,0^7$	$\beta = 0,43^7$	Gumbel

3.3.1.2 Modelfactoren

De modelfactoren zijn meegenomen als kansverdeling, zoals door het WBI voorgeschreven (Deltares, 2016a). Het gemiddelde, de standaarddeviatie en het type kansverdeling zijn weergegeven in Tabel 3-21. Voor het deelmechanisme heave is geen modelfactor voorgeschreven.

Tabel 3-21: Factoren modelonzekerheid probabilistische beoordeling

Symbol	Faalmechanisme	Type kansverdeling	Gemiddelde	Standaarddeviatie
m_p	Terugschrijdende erosie	Lognormaal	1,0	0,12
m_u	Opbarsten	Lognormaal	1,0	0,10

3.3.2 Probabilistische model en bepalen faalkans

Het probabilistische model is schematisch weergegeven in Figuur 3-9. De vergelijkingen die hiervoor zijn gebruikt zijn de piping vergelijkingen besproken in Sectie 2.1, en de vergelijkingen voor het berekenen van de stijghoogte (zie Sectie 3.1.1.1). Op basis van de invoerwaarden berekent het probabilistische model voor elk deelmechanisme een sterkte en belasting op het dijkvak ($R; S$). Dit resulteert in een grenstoestandswaarde voor elk deelmechanisme ($Z_u; Z_h; Z_p$). De invoer bestaat uit kansverdelingen, en daarom is er een probabilistische rekenmethode gebruikt om de faalkans te benaderen.

De faalkans van de probabilistische beoordeling (P_f) is bepaald met de probabilistische rekenmethode Crude Monte Carlo Simulatie (C-MCS). Deze methode wordt veel gebruikt voor piping beoordelingen, en is beschikbaar in de PTK. Daarnaast benadert C-MCS de faalkans bij voldoende simulaties exact (Schweckendiek et al., 2017).

C-MCS berekent de faalkans door veel simulaties uit te voeren, en vervolgens te bekijken welk deel van die simulaties faalt, en welk deel niet faalt. Dit is uitgevoerd door de PTK. In elke simulatie trekt de PTK voor elke stochast een waarde uit de kansverdeling. Voor deze combinatie van waarden is er berekend of het dijkvak faalt. Het dijkvak faalt als de grenstoestandswaarden van alle drie de deelmechanismen ($Z_u; Z_h; Z_p$) onder de nul zijn. De faalkans is vervolgens bepaald door het aantal simulaties waarin het dijkvak faalt, te delen door het totaal aantal simulaties (Schweckendiek et al., 2017) (zie Vgl. 3.26).

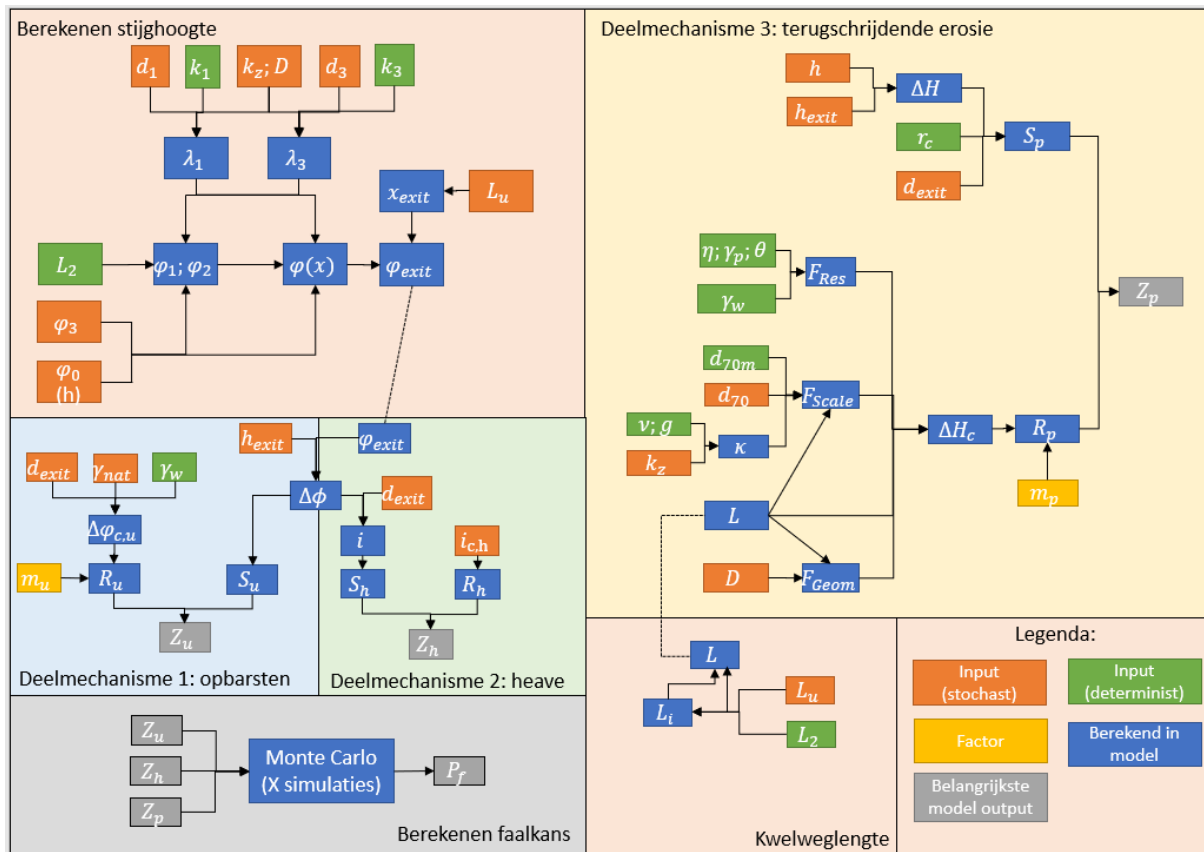
$$P_f \approx n_{failure}/n \quad (3.26)$$

⁷ Deze waarden zijn uitgelegd in sectie 4.1.2.

Er zijn minimaal 500 000 simulaties uitgevoerd, wat leidt tot een variatiecoëfficiënt (ε) van ongeveer 0,02. De variatiecoëfficiënt is de relatieve fout in de faalkans. Deze is gedefinieerd door Vgl. 3.27.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{P_f}}{P_f} \quad (3.27)$$

De instellingen voor de PTK zijn gegeven in Bijlage B.



Figuur 3-9: Schematisch overzicht model probabilistische beoordeling

3.4 Methode verklaren verschil in faalkans tussen beide beoordelingen

De vergelijkingen voor het berekenen van de semi-probabilistische faalkans (zie Sectie 3.2.2) zijn zo gekalibreerd dat de faalkans van de probabilistische beoordelingen in 80% van de gevallen gunstiger uitvalt (Deltares, 2016b). De probabilistische faalkans is dus in 80% van de gevallen kleiner, en in 20% van de gevallen groter dan de semi-probabilistische faalkans. De grootte van dit verschil, en voor welke beoordeling de faalkans gunstiger is, is dus verschillend per geval. De volgende punten hebben invloed op het verschil in faalkans tussen beide beoordelingen.

- Alle invoerwaarden: dit onderzoek met bijbehorende invoerwaarden resulteert in een bepaald verschil tussen beide faalkansen. Een verandering in de invoerwaarden maakt het onderzoek een ander geval. Dit resulteert in een ander verschil tussen de invoerwaarden. Alle invoerwaarden bij elkaar hebben dus een indirecte invloed op het verschil tussen beide faalkansen.
- Schematiseringsfactor: een andere schematiseringsfactor leidt tot een andere semi-probabilistisch berekende faalkans. De probabilistisch berekende faalkans verandert niet, omdat de schematiseringsfactor alleen is ingevoerd in de semi-probabilistische beoordeling.

- Waterstand Bij Norm (WBN): de WBN is alleen ingevoerd in de semi-probabilistische beoordeling. Een verandering in de WBN resulteert dus alleen in een verandering in de semi-probabilistische faalkans.
- De Gumbel verdeling van de waterstand: de probabilistische faalkans hangt af van de Gumbel verdeling van de waterstand, de semi-probabilistische faalkans niet.

4. RESULTATEN

4.1 Resultaten bepalen probabilistische eigenschappen stochasten

De probabilistische eigenschappen van de stochasten in dit onderzoek zijn weergegeven in Tabel 4-1. Het gemiddelde (μ), de standaarddeviatie (σ), en het type kansverdeling zijn ingevoerd in de probabilistische beoordeling. De karakteristieke waarde is ingevoerd in de semi-probabilistische beoordeling. Sectie 4.1.1 bespreekt de Gumbel fit van de waterstand. Secties 4.1.2 en 4.1.3 gaan verder op de probabilistische eigenschappen van de stochasten in.

Tabel 4-1: Overzicht probabilistische eigenschappen stochasten

Groep	Stochast	Eenheid	μ	σ	Type kansverdeling	Karakteristieke waarde
Groep 1	Dikte deklaag voorland (d_1)	m	2,29	0,89	Lognormaal	1,15
	Dikte deklaag achterland (d_3)	m	3,31	0,51	Lognormaal	2,54
	Dikte deklaag uittredepunt (d_{exit})	m	1,16	2,09	Lognormaal	0,078
	Uittreelengte (L_u)	m	18,9	17,3	Lognormaal	3,87
	Doorlatendheid zandlaag (k_z)	m/s	4,22E-4	1,40E-4	Lognormaal	6,84E-4
	Dikte zandlaag (D)	m	20,53	0,52	Lognormaal	21,41
Groep 2	Volumiek gewicht deklaag ($\gamma_{deklaag}$) ⁸	kN/m^3	8,69	0,46	Lognormaal	7,95
	70-percentiel waarde zandlaag (d_{70})	m	3,40E-4	5,47E-5	Lognormaal	2,57E-4
Groep 3	Freatisch peil uittredepunt (h_{exit})	m + NAP	4,77	0,29	Student-t	4,25
	Polderpeil (φ_3)	m + NAP	4,54	0,46	Student-t	5,34
Groep 4	Kritieke heave gradiënt ($i_{c,h}$)	-	0,5	0,1	Lognormaal	0,3
	Buitenwaterstand (h)	m + NAP	$\alpha =$ 7,14	$\beta =$ 0,375	Gumbel	WBN = 9,4 $m + NAP$

4.1.1 Gumbel fit voor de buitenwaterstand

Figuur 4-1 toont de lognormale Gumbel fit van de buitenwaterstand. Deze Gumbel verdeling is gefit op basis van de gemiddelde waterstanden in het dijkvak (zie Tabel 3-15) met de corresponderende lognormale overschrijdingskansen. De Gumbel verdeling is zo gefit dat de faalkans van de probabilistische beoordeling zo laag mogelijk is, en dat tegelijkertijd de verdeling kloppend is met de waterstanden van het dijkvak. De faalkans van de probabilistische beoordeling is het laagst als er een evenwicht is tussen:

- Het overschatten van de kans op de lagere waterstanden (lager dan 8 meter), en
- Het overschatten van de kans op hogere waterstanden (vanaf 9 meter)

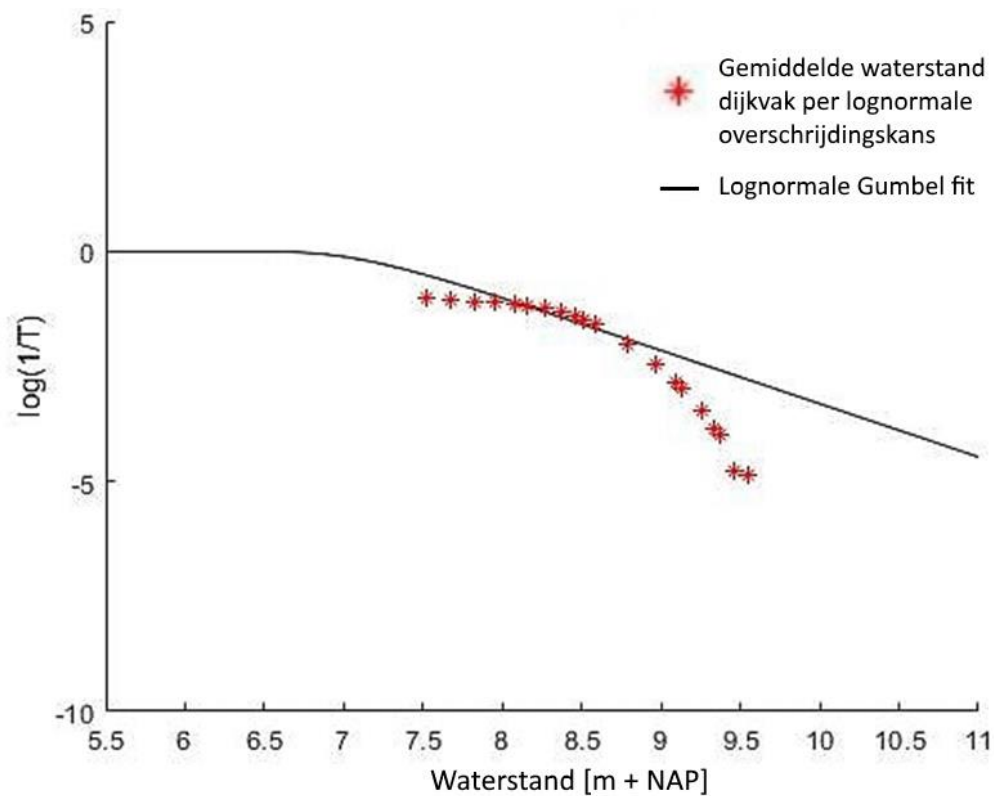
⁸ Het volumieke gewicht van water (9,81) is eraf gehaald, zoals voorgeschreven in het WBI (Deltares, 2016c).

Tabel 4-2 geeft de verdelingsparameters van de Gumbel verdeling van de waterstand.

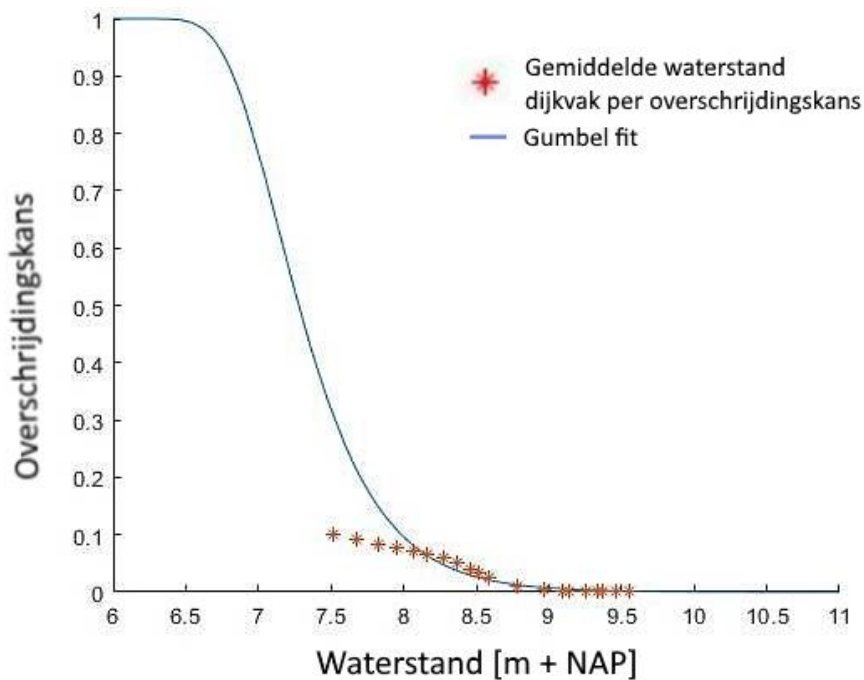
Figuur 4-2 toont aan dat de overschrijdingskans van de waterstanden rond 8,5 meter ten opzichte van NAP met deze Gumbel verdeling is onderschat. Dit verschil is echter verwaarloosbaar klein en wordt gecompenseerd doordat de overschrijdingskans bij andere waterstanden significant is overschat.

Tabel 4-2: Verdelingsparameters Gumbel verdeling waterstand

Verdelingsparameter	Waarde
Locatieparameter (α)	7,14
"Scale" parameter (β)	0,375



Figuur 4-1: Lognormale Gumbel fit waterstand



Figuur 4-2: Gumbel fit waterstand

4.1.2 Vergelijking tussen oorspronkelijke gemiddelde en standaarddeviatie van de stochasten, en het aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie

Het gemiddelde en de standaarddeviatie van de stochasten van groep 1 en 2 zijn zo aangepast dat beide beoordelingen consistent zijn met elkaar (zie Sectie 3.1.2). In deze sectie zijn deze aangepaste waarden met het oorspronkelijke gemiddelde en standaarddeviatie (op basis van de waarnemingen) vergeleken. De oorspronkelijke ($\mu_x; \sigma_x$) en aangepaste waarden ($\mu_{x,prob}; \sigma_{x,prob}$) zijn weergegeven in Tabel 4-3. De VC geeft de standaarddeviatie als het percentage van het gemiddelde weer. Hiermee is eenvoudig te zien of de spreiding voor een stochast wel of niet significant is veranderd.

Voor een aantal stochasten ($d_1; d_3; D; \gamma_{deklaag}$) is er geen significant verschil tussen de oorspronkelijke waarden voor het gemiddelde en de standaarddeviatie, en de aangepaste waarden. De waarden van de deklaagdikte bij het uittredepunt verschillen het meest. De standaarddeviatie verandert van 68% van het gemiddelde naar 180% van het gemiddelde. De oorzaak hiervan is dat de deklaagdikte bij een aantal dijkpalen bijna gelijk is aan nul. Dit resulteert in grote negatieve waarden als hiervan het natuurlijke logaritme wordt berekend. Op basis van die logaritmische waarden zijn uiteindelijk het aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie bepaald. Dit betekent dat die enorm kleine deklaagdiktes een grote (negatieve) invloed hebben op de spreiding.

De spreiding van de uittreelengte (L_u) is ook een stuk groter geworden (VC van 60% naar 92%). Dit komt doordat de uittreelengte al een grote spreiding had (60% van het gemiddelde). Dit is ook het geval voor de deklaagdikte bij het uittredepunt. Stochasten met een relatief grote spreiding krijgen met de aangepaste waarden een nog veel grotere spreiding. Terwijl bij stochasten met een relatief kleine spreiding, deze spreiding ongeveer gelijk blijft (bijvoorbeeld het volumiek gewicht).

De spreiding van de doorlatendheid van de zandlaag (k_z) en de 70-percentiel waarde van de zandlaag (d_{70}) zijn, in tegenstelling tot bij de andere stochasten, bij de aangepaste waarden een stuk kleiner dan bij de oorspronkelijke waarden. De reden hiervoor is dat deze beide stochasten meegenomen zijn als laaggemiddelde waarden, waardoor er een factor $1/\sqrt{N}$ in de berekeningen meespeelt (zie Sectie

3.1.2). Deze factor had ook moeten worden verdisconteert in de spreiding van de stochasten met een laaggemiddelde waarde, als in een probabilistische beoordeling ervoor was gekozen om met de oorspronkelijke waarden te rekenen. En beide beoordelingen dus niet consistent met elkaar te maken.

Tabel 4-3: Oorspronkelijke en aangepaste gemiddelde en standaarddeviatie van de stochasten van groep 1 en 2

Groep	Stochast	Eenheid	μ_x	σ_x	VC_x	$\mu_{x,prob}$	$\sigma_{x,prob}$	$VC_{x,prob}$
Groep 1	Dikte deklaag voorland (d_1)	m	2,24	0,70	31%	2,29	0,89	39%
	Dikte deklaag achterland (d_3)	m	3,3	0,46	14%	3,31	0,51	15%
	Dikte deklaag uittredepunt (d_{exit})	m	0,84	0,57	68%	1,16	2,09	180%
	Uittreelengte (L_u)	m	17,3	10,3	60%	18,9	17,3	92%
	Doorlatendheid zandlaag (k_z)	m/s	4,63E-4	2,38E-4	51%	4,22E-4	1,40E-4	33%
	Dikte zandlaag (D)	m	20,5	0,49	2,3%	20,53	0,52	2,5%
Groep 2	Volumiek gewicht deklaag ($\gamma_{deklaag}$)	kN/m ³	8,69	0,43	5%	8,69	0,46	5%
	70-percentiel waarde zandlaag (d_{70})	m	3,50E-4	1,05E-4	30%	3,40E-4	5,47E-5	16%

4.1.3 Vergelijking met waarden uit eerdere beoordeling van WAM

De invoerwaarden zijn vergeleken met de invoer van de piping beoordeling die al is uitgevoerd voor WAM (HSDR, 2019a). Omdat dit een semi-probabilistische beoordeling was, is in de vergelijking vooral gekeken naar de karakteristieke waarden. Daarnaast is alleen gekeken naar de volgende invoerwaarden:

- De invoerwaarden voor de dijpalen die overeenkomen met het dijkvak uit dit onderzoek (DP 6-20), en
- De invoerwaarden voor de beoordeling waarbij het uittredepunt gelijk is aan het laagste maaiveldpunt.

De 70-percentielwaarde van de zandlaag (d_{70}) en het polderpeil (φ_3) corresponderen met de waarden in de beoordeling van WAM, omdat deze daaruit zijn overgenomen. Er zijn echter voor een aantal stochasten noemenswaardige verschillen tussen de invoerwaarden van beide beoordelingen:

- d_{exit} : HSDR (2019a) gebruikt deklaagdiktes voor de dijpalen van het dijkvak die variëren tussen 1,02 meter en 2,38 meter. De karakteristieke waarde in dit onderzoek is 0,042 meter. De deklaagdiktes van HSDR (2019a) corresponderen meer met het gemiddelde in dit onderzoek (1,16 meter). Dit verschil zou ontstaan kunnen zijn doordat HSDR (2019a) geen karakteristieke waarden heeft gebruikt, of deze anders heeft berekend.
- D : HSDR (2019a) gebruikt diktes voor de zandlaag die variëren tussen 12 en 18 meter. De karakteristieke waarde in dit onderzoek is gelijk aan 21,41 meter. Dit verschil is zeer waarschijnlijk ontstaan doordat HSDR (2019a) alleen de dikte van de pleistocene zandlagen meeneemt.

- h_{exit} : HSDR (2019a) gebruikt waarden voor het freatisch peil bij het uittredepunt die variëren tussen 4,76 en 5,96 m + NAP. De karakteristieke waarde in dit onderzoek is 4,25 m + NAP. Daarnaast is het gemiddelde in dit onderzoek (4,77 m + NAP) ook relatief laag vergeleken bij de waarden van HSDR (2019a). Een deel van dit verschil komt doordat HSDR (2019a) geen karakteristieke waarde voor het freatisch peil bij het uittredepunt heeft gebruikt. Daarnaast gaat HSDR (2019a) er, in tegenstelling tot in dit onderzoek, vanuit dat sloten deels vol lopen bij hoge waterstanden. Dit zorgt voor een hogere freatische waterstand.
- k_z : HSDR (2019a) gebruikt een karakteristieke waarde van $8,10E-4$ m/s. In dit onderzoek is de karakteristieke waarde $6,84E-4$ m/s. Dit verschil komt waarschijnlijk doordat de doorlatendheid op basis van andere gegevens is bepaald. In tegenstelling tot de andere verschillen, is de waarde van de doorlatendheid in dit onderzoek gunstiger.
- L : HSDR (2019a) gebruikt kwelweglengtes tussen de 95 en 155 meter. De kwelweglengte in de semi-probabilistische beoordeling van dit onderzoek is 67,74 meter. De kwelweglengtes die berekend zijn in de simulaties van de probabilistische beoordeling in dit onderzoek variëren tussen de 60 en 130 meter. Dit is een relatief groot verschil met de kwelweglengtes in de eerdere beoordeling van WAM. De grootste oorzaak is waarschijnlijk dat de dijkbreedte in HSDR (2019a) minstens gelijk is aan 50 meter. Dit is een groot verschil met de breedte van de dijk in dit onderzoek, die gelijk is gesteld aan 30 meter. Hoe HSDR (2019a) tot een dijkbreedte van minstens 50 meter komt, is onduidelijk.

Er zijn dus een aantal grote verschillen tussen de invoerwaarden in HSDR (2019a) en de invoerwaarden in dit onderzoek. De twee belangrijkste redenen voor deze verschillen zijn ten eerste dat HSDR (2019a) voor sommige stochasten geen karakteristieke waarde berekent, waardoor de invoerwaarde een stuk gunstiger is. En daarnaast dat de waarden op basis van andere uitgangspunten en gegevens bepaald zijn, met inconsistenties als gevolg. Over het algemeen zijn de invoerwaarden van dit onderzoek minder gunstig. Hier is dus nog winst te behalen.

4.2 Resultaten uitvoeren semi-probabilistische beoordeling

Tabel 4-4 geeft de resultaten van de semi-probabilistische piping beoordeling, samen met de bijbehorende betrouwbaarheidsindices. De betrouwbaarheidsindex is een veelgebruikte waarde om faalkansen te vergelijken (berekend met Vgl. 3.25). De berekende faalkans is $3,60E-3$ per jaar. Dit is gelijk aan een herhalingsijd van ongeveer 278 jaar. De faalkanseis voor het dijkvak is een kans van $2,44E-7$ per jaar en de daarmee corresponderende betrouwbaarheidseis is 5,03 (zie Sectie 3.2.3). Dit betekent dat het dijkvak ruim faalt voor het faalmechanisme piping.

De berekende kans op het optreden van de deelmechanismen opbarsten en heave is honderd procent, wat betekent dat deze deelmechanismen geen invloed hebben op de semi-probabilistische faalkans. De berekende faalkans is alleen afhankelijk van het deelmechanisme terugschrijdende erosie.

Tabel 4-4: Resultaten semi-probabilistische piping model

Faalmechanisme	Faalkans ($P_{f;i}$) [1/jaar]	Betrouwbaarheidsindex (β_i)
Opbarsten	1,00	-4,38
Heave	1,00	-5,58
Terugschrijdende erosie	0,0036006	2,687
Totaal:	$P_f = 3,60E-3$	2,687

De berekende faalkans is vergeleken met de faalkans voor het dijkvak uit de eerdere beoordeling van WAM (HSDR, 2019a). In deze beoordeling is een faalkans per dijkpaal berekend. Tabel 4-5 geeft de hoogste faalkans van de dijken die overeenkomen met het dijkvak van dit onderzoek (DP 6-20). De orde van grootte van deze faalkans ($10E-5$) is significant kleiner dan de orde van grootte van de faalkans berekend in dit onderzoek ($10E-3$). Dit verschil is het resultaat van de grote verschillen tussen beide beoordelingen wat betreft de invoerwaarden van bepaalde parameters (zie Sectie 4.1.3).

Een significant verschil is dat HSDR (2019a) een dijkbreedte gebruikt die minimaal 50 meter is, terwijl in dit onderzoek de dijkbreedte (L_2) gelijk is aan 30 meter. Het gebruik van een dijkbreedte van 50 meter in dit onderzoek resulteert in een semi-probabilistische faalkans van $7,18E-05$ per jaar (zie Tabel 4-6). De orde van grootte van deze faalkans is gelijk aan de orde van grootte van de faalkans uit de eerdere beoordeling voor WAM (beide $10E-5$).

Tabel 4-5: Faalkans van eerdere beoordeling voor WAM voor het dijkvak van dit onderzoek

Dijkpaal	Faalkans [1/jaar]
18	$4,9E-5$

Tabel 4-6: Semi-probabilistische faalkans bij een dijkbreedte (L_2) van 50 meter

Faalkans [1/jaar]	$7,18E-5$
-------------------	-----------

4.3 Resultaten uitvoeren probabilistische beoordeling

De resultaten van de probabilistische beoordeling zijn weergegeven in Tabel 4-7. De berekende faalkans is $3,83E-3$ per jaar, met een convergentiewaarde van 0,02. Het verschil met de semi-probabilistische faalkans ($3,60E-3$ per jaar) is zeer klein. Het dijkvak voldoet dus voor beide beoordelingen niet aan de faalkanseis ($2,44E-7$, zie Tabel 3-19).

De orde van grootte van de faalkans van de probabilistische beoordeling ($10E-3$) is significant kleiner dan de orde van grootte van de faalkans die uit de eerdere beoordeling van WAM (HSDR, 2019a) volgt ($10E-5$, zie Tabel 4-5). Een testberekening met een dijkbreedte (L_2) van 50 meter resulteert echter in een faalkans met dezelfde orde van grootte als de faalkans uit de eerdere beoordeling van WAM. Tabel 4-8 toont deze faalkans. Het verschil in orde van grootte van de faalkansen in beide onderzoeken is dus te wijden aan de significante verschillen wat betreft invoerwaarden van bepaalde parameters (zie Sectie 4.1.3).

Tabel 4-7: Resultaten probabilistisch piping model

Betrouwbaarheidsindex (β)	Faalkans (P_f) [1/jaar]	Convergentiewaarde
2,667	$3,83E-3$	0,02 (2%)

Tabel 4-8: Probabilistische faalkans bij een dijkbreedte (L_2) van 50 meter

Faalkans [1/jaar]	$5,20E-5$
Betrouwbaarheidsindex [-]	3,881

Tabel 4-9 toont de grote verschillen in faalkans aan, die ontstaan bij andere keuzes wat betreft het fitten van de Gumbel verdeling voor de buitenwaterstand. De faalkans is berekend met als invoer een Gumbel verdeling die is gefit op basis van de hoge waterstanden (2), en een Gumbel verdeling die is

gefit op basis van de lagere waterstanden (3). De Gumbel fits zijn opgenomen in Bijlage D. De resulterende faalkansen zijn significant groter dan de faalkans met de huidige Gumbel verdeling. De faalkans met Gumbel verdeling 2 is een factor 10 groter, en de faalkans met Gumbel verdeling 3 is een factor 2 groter.

Tabel 4-9: Vergelijking faalkansen bij verschillende Gumbel verdelingen voor de waterstand

Nummer	Situatie	Verdelingsparameters Gumbel verdeling waterstand	Faalkans [1/jaar]	Betrouwbaarheids-index
1	Huidige verdelingsparameters	$\alpha = 7,14; \beta = 0,375$	3,7E-3	2,667
2	Gumbel verdeling gefit op basis van hoge waterstanden	$\alpha = 8,51; \beta = 0,094$	3,75E-2	1,781
3	Gumbel verdeling gefit op basis van lagere waterstanden	$\alpha = 5,80; \beta = 0,850$	7,771E-3	2,422

4.4 Resultaten verklaren verschil in faalkans tussen beide beoordelingen

Deze sectie bespreekt het verschil in faalkans tussen beide beoordelingen. Faalkansen zijn eenvoudig te vergelijken op basis van de betrouwbaarheidsindex. Daarom is in deze sectie ook gekeken naar de betrouwbaarheidsindices van beide beoordelingen.

Het verschil in faalkans tussen de beoordelingen is het gevolg van de kalibratiestudie voor beide beoordelingen (Deltares, 2016b). Tabel 4-11 toont aan dat de semi-probabilistische en probabilistische faalkans in dit onderzoek niet significant verschillen. Dit onderzoek is dus een grensgeval in de kalibratiestudie van Deltares (2016b). De grootte van het verschil in faalkans tussen beide beoordelingen is beïnvloed door een aantal invoerwaarden (zie Sectie 3.4).

Invoerwaarden die het verschil direct beïnvloeden zijn de schematiseringsfactor, de WBN, en de Gumbel verdeling van de waterstand (zie Sectie 3.4). Het gevolg van een andere Gumbel verdeling is besproken in Sectie 4.3 (zie Tabel 4-9). Dit resulteert in een significant grotere faalkans en resulteert dus ook in een groter verschil tussen de faalkansen van beide beoordelingen.

De schematiseringsfactoren die gebruikt zijn in dit onderzoek zijn overgenomen van eerdere beoordelingen van WAM. Het kan zijn dat de schematiseringsfactoren voor dit specifieke dijkvak verschillen. Tabel 4-10 toont aan hoe de semi-probabilistische faalkans verschilt voor andere schematiseringsfactoren voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie. De schematiseringsfactoren van de andere deelmechanismen zijn niet meegenomen omdat deze deelmechanismen geen rol spelen in de semi-probabilistische faalkans. Uit de relatieve verschillen blijkt dat kleine veranderingen in de schematiseringsfactor (5-10%) leiden tot relatief grote veranderingen in de faalkans. De probabilistische faalkans verandert niet bij een andere schematiseringsfactor.

Tabel 4-10: Semi-probabilistische faalkans voor verschillende schematiseringsfactoren

Schematiserings-factor terugschrijdende erosie ($\gamma_{b,p}$)	$L_2 = 30m$ (zelfde als in dit onderzoek)	
	Semi-probabilistische faalkans	Relatief verschil (percentage verschil met faalkans met $\gamma_{b,p} = 1, 1$)
1	1,62E-3	-55,0%

1,05	2,45E-3	-31,9%
1,1 (huidige schematiseringsfactor)	3,60E-3	0%
1,15	5,13E-3	42,5%
1,2	7,10E-3	97,2%

Het verschil tussen beide faalkansen is indirect afhankelijk van alle invoerwaarden in dit onderzoek (zie Sectie 3.4). Tabel 4-11 laat zien hoe het verschil in faalkans is beïnvloed door het invoeren van een andere breedte van de dijk ($L_2 = 50m$). Het verschil in de betrouwbaarheidsindex van beide beoordelingen is groter voor een situatie met een grotere dijkbreedte. Daarnaast is voor deze situatie de probabilistische beoordeling gunstiger.

Tabel 4-11: Semi-probabilistische en probabilistische faalkans van dit onderzoek en in een situatie met een dijkbreedte van 50 meter

	$L_2 = 30m$ (dit onderzoek)		$L_2 = 50m$	
	Faalkans	Betrouwbaarheidsindex	Faalkans	Betrouwbaarheidsindex
Semi-probabilistisch	3,60E-3	2,687	7,18E-5	3,802
Probabilistisch	3,83E-3	2,667	5,20E-5	3,881
Vershil	2,3E-4	0,02	1,98E-5	0,08

5. DISCUSSIE

Deze sectie beantwoordt de onderzoeksvraag, geeft een aantal belangrijke beperkingen van dit onderzoek en beschrijft mogelijk verder onderzoek.

De onderzoeksvraag is:

“In welke mate kan een probabilistische piping beoordeling resulteren in een gunstigere faalkans dan een semi-probabilistische piping beoordeling?”

De faalkans van de probabilistische piping beoordeling is in 80% van de gevallen gunstiger dan die van de semi-probabilistische piping beoordeling (Deltares, 2016b). Dit kan leiden tot significante verschillen. In dit onderzoek zijn de faalkansen van beide beoordelingen ongeveer gelijk. De grootte van dit verschil is door een aantal invoerwaarden beïnvloedt (WBN, Gumbel verdeling waterstand, schematiseringsfactor terugschrijdende erosie). De manier waarop de Gumbel verdeling voor de buitenwaterstand is gefit, heeft grote invloed op het verschil in faalkans tussen beide beoordelingen. Dit resulteert namelijk alleen voor de probabilistische beoordeling in significant andere faalkansen.

De invoerwaarden voor de stochasten zijn over het algemeen vrij conservatief. Dit blijkt ook uit de vergelijking met de invoerwaarden in een eerdere beoordeling van WAM (HSDR, 2019a). Dit zorgt voor relatief hoge faalkansen, ook in vergelijking met de faalkans van HSDR (2019a). De testberekening met een gunstigere waarde voor de breedte van de dijk (overeenkomstig met HSDR (2019a)) resulteert echter in significant lagere faalkansen. Daarnaast is ook het relatieve verschil tussen de faalkansen van beide beoordelingen groter, in het voordeel van de probabilistische beoordeling. Dit zou kunnen betekenen dat gunstigere invoerwaarden resulteren in een groter verschil in faalkans tussen beide beoordelingen, in het voordeel van de probabilistische beoordeling.

De faalkans van de semi-probabilistische beoordeling is alleen afhankelijk van het deelmechanisme terugschrijdende erosie. De semi-probabilistische faalkans voor opbarsten en heave zijn namelijk beide gelijk aan 1 per jaar. De faalkans van de probabilistische beoordeling is afhankelijk van alle drie de deelmechanismen (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie), al is de rol van opbarsten en heave minimaal. Bij gunstigere invoerwaarden voor de stochasten gaan deze deelmechanismen waarschijnlijk een grotere rol spelen in de faalkans. Dit zorgt er waarschijnlijk voor dat de probabilistische faalkans significant kleiner is dan de semi-probabilistische faalkans.

De probabilistische faalkans is berekend met C-MCS. Dit resulteert in een bepaalde onzekerheid in de faalkans. In dit onderzoek is gerekend met ongeveer 500 000 simulaties (10 minuten). De hoeveelheid benodigde simulaties voor lagere faalkansen zou echter kunnen resulteren in significant grotere rekentijden. Voor het uitrekenen van faalkansen is dit geen probleem, maar zodra er meerdere faalkansen moeten worden uitgerekend of situaties met elkaar worden vergeleken, dan zullen de rekentijden flink oplopen. In die situatie zou ervoor gekozen kunnen worden om FORM te gebruiken als probabilistische rekenmethode.

De resulterende faalkansen van beide beoordelingen in dit onderzoek zijn ongeveer gelijk aan elkaar. Het onderzoek toont echter aan dat voor andere (gunstigere) invoerwaarden de faalkans van de probabilistische beoordeling een stuk gunstiger kan zijn dan de faalkans van de semi-probabilistische beoordeling. Er kan mogelijk verder onderzoek worden uitgevoerd naar het volgende punt:

- Onderzoeken hoe de probabilistische en semi-probabilistische faalkans zich verhouden bij gunstigere invoerwaarden. De verwachting is dat de probabilistische faalkans significant kleiner is dan de semi-probabilistische faalkans omdat bij gunstigere invoerwaarden de deelmechanismen opbarsten en heave een grotere rol gaan spelen in de probabilistische

beoordeling. Vooral gunstigere waarden voor de stochasten die geen of weinig invloed hebben op terugschrijdende erosie ($d_1; d_3; \varphi_3; \gamma_{deklaag}; d_{exit}$) resulteren in een significant gunstigere probabilistische faalkans.

6. CONCLUSIE

In dit onderzoek is een semi-probabilistische piping beoordeling met een probabilistische piping beoordeling voor één dijkvak van de Sterke Lekdijk vergeleken. Beide modellen zijn gemaakt in de Probabilistic Toolkit (PTK). De invoer van de semi-probabilistische beoordeling bestaat uit karakteristieke waarden van de stochasten, de WBN, de deterministen en de schematiseringsfactoren. De invoer van de probabilistische beoordeling bestaat uit het gemiddelde, de standaarddeviatie, en het type kansverdeling voor de stochasten. Hierop heeft de PTK een kansverdeling gefit. De overige invoer voor de probabilistische beoordeling bestaat uit de deterministen, de Gumbel verdeling voor de waterstand, en de modelfactoren. De waarden van de deterministen zijn in beide beoordelingen hetzelfde.

De semi-probabilistische faalkans is berekend met vergelijkingen uit de kalibratiestudie van Deltares (2016b) ($3,60E-3$ per jaar). Deze vergelijkingen zijn zo gekalibreerd dat de probabilistische faalkans in 80% van de gevallen gunstiger is dan de semi-probabilistische faalkans. De probabilistische faalkans is berekend met Crude Monte Carlo Simulatie met 500 000 realisaties ($3,83E-3$ per jaar). Het dijkvak faalt dus ruim voor beide beoordelingen, want de faalkanseis is $2,44E-7$ per jaar. De faalkansen van beide beoordelingen verschillen niet significant.

Dit onderzoek maakt duidelijk hoe een probabilistische piping beoordeling kan worden uitgevoerd. Het onderzoek geeft weer wat de invoerparameters zijn, hoe deze worden bepaald en hoe vervolgens de faalkans wordt berekend. Op basis hiervan kan er verder onderzoek plaatsvinden wat betreft probabilistische piping beoordelingen.

Het onderzoek heeft daarnaast op een aantal punten nieuwe inzichten geleverd. De eerste is dat de invoerwaarden voor beide beoordelingen consistent gemaakt moeten worden. Het bepalen van de karakteristieke waarden voor de semi-probabilistische beoordeling gebeurt met student-t factoren. Hierdoor komen deze karakteristieke waarden niet overeen met het 5%- of 95%-percentiel van de lognormale en normale verdelingen die de PTK fit voor de stochasten in de probabilistische beoordeling. Dit onderzoek beschrijft hoe beide beoordelingen consistent gemaakt kunnen worden. Het gemiddelde en standaarddeviatie van de stochasten is zo aangepast dat het 5%- of 95%-percentiel van de kansverdeling voor de probabilistische beoordeling gelijk is aan de karakteristieke waarde voor de semi-probabilistische beoordeling.

Daarnaast toont dit onderzoek aan wat het belang is van het maken van een optimale Gumbel verdeling voor de buitenwaterstand. Het is belangrijk dat er een evenwicht is tussen het fitten op de hoge waterstanden, en het fitten op de lage waterstanden. Andere keuzes hierin leiden tot significante verschillen voor de probabilistische faalkans.

Een andere belangrijke conclusie is dat de faalkans van de semi-probabilistische beoordeling alleen afhankelijk is van het deelmechanisme terugschrijdende erosie. De faalkans van de probabilistische beoordeling is daarentegen afhankelijk van alle drie de deelmechanismen (opbarsten, heave, terugschrijdende erosie), al is de invloed van opbarsten en heave minimaal. Bij gunstigere waarden voor de parameters van de deelmechanismen opbarsten en heave gaan deze deelmechanismen een grotere rol spelen bij het bepalen van de faalkans, wat leidt tot een kleinere probabilistische faalkans.

Kortom, het onderzoek leidt tot een aantal belangrijke conclusies en inzichten rondom het uitvoeren van een probabilistische piping beoordeling. De basis van een probabilistische piping beoordeling is daarnaast ook gelegd. Hiermee kan meer onderzoek worden gedaan naar probabilistische beoordelingen met gunstigere invoerwaarden of voor andere dijkvakken.

7. AANBEVELINGEN

Het onderzoek leidt tot een faalkans die voor beide beoordelingen ongeveer hetzelfde is. Het lijkt er echter op dat bij gunstigere invoerwaarden de faalkans van de probabilistische beoordeling een stuk kleiner wordt vergeleken bij de semi-probabilistische beoordeling. Het is waardevol om hiernaar te kijken. De punten waarop de invoerwaarden van dit onderzoek gunstiger bepaald kunnen worden, zijn hieronder weergegeven.

Een ander belangrijk punt is dat bij de probabilistische faalkans alle drie de deelmechanismen een rol spelen, terwijl bij de semi-probabilistische faalkans alleen terugschrijdende erosie een rol speelt. Dit zal ook zo zijn voor significant gunstigere invoerwaarden omdat de semi-probabilistische faalkans voor opbarsten en heave gelijk is aan 1 per jaar. Gunstigere waarden voor parameters die geen of weinig invloed hebben op terugschrijdende erosie ($d_1; d_3; \varphi_3; \gamma_{deklaag}; d_{exit}$) kunnen dus resulteren in een significant kleinere probabilistische kans. Terwijl de semi-probabilistische kans (bijna) hetzelfde blijft.

Meer onderzoek naar de volgende punten kan leiden tot gunstigere waarden voor de parameters:

- Voor het bepalen van het freatisch peil is uitgegaan van het maaiveldniveau bij het uittredepunt. Dit uittredepunt is het laagste maaiveldpunt, het komt daardoor vaak voor dat het uittredepunt in een sloot is gekozen. Bij hoogwater lopen deze sloten vol. Het freatisch peil is in dit onderzoek dus conservatief gekozen, hier kan nog winst behaald worden. Daarnaast kan vanwege het 2D effect nog een andere betere keuze gemaakt worden bij het bepalen van het uittredepunt, omdat deze nu dus redelijk vaak gekozen is in sloten.
- Voor de d_{70} kunnen drie situaties worden vergeleken en de meest gunstige worden gepakt
 1. Gebruiken van het gemiddelde ($350 \mu m$) en variatiecoëfficiënt (30%) van de proeven van WAM, en hierbij uitgaan van een laaggemiddelde waarde (met $N = 32$ zoals in WAM) (huidige situatie).
 2. Gebruiken van het gemiddelde ($350 \mu m$) van de proeven van WAM, de aanbevolen variatiecoëfficiënt van het WBI (12%), en hierbij uitgaan van een individuele puntwaarde.
 3. Gebruik maken van WBI-SOS waarden voor de d_{70} , en hierbij uitgaan van een laaggemiddelde waarde.
- Bij het bepalen van de doorlatendheid van de zandlaag moet er eigenlijk gewerkt worden met gelaagdheid van het zand. In dit onderzoek is enkel uitgegaan van de doorlatendheid waarden van de grootste zandlaag. Daarnaast zou onderzocht kunnen worden of lokaal onderzoek (in plaats van regionaal onderzoek met WBI-SOS waarden) resulteert in een significant gunstigere faalkans.
- De schematiseringsfactoren zijn overgenomen van de eerdere beoordeling voor WAM (HSDR, 2019a). De schematiseringsfactoren voor het dijkvak uit dit onderzoek kunnen anders zijn. Deze zouden kunnen worden afgeleid en bekeken of dit de faalkans van de semi-probabilistische beoordeling erg beïnvloed. Dit heeft echter geen effect op de probabilistische beoordeling.
- Het volumiek gewicht van de deklaag is als individuele puntwaarde genomen, omdat er geen waarnemingen van beschikbaar zijn. Het volumieke gewicht mag echter ook als laaggemiddelde waarde genomen worden. Dit voegt een factor $1/\sqrt{N}$ toe aan de berekening van de probabilistische eigenschappen. Dit resulteert in gunstigere waarden voor het volumieke gewicht. Deze parameter heeft alleen invloed op het deelmechanisme opbarsten.

Gunstigere waarden voor deze parameter resulteert alleen in een kleinere faalkans voor de probabilistische beoordeling.

- In dit onderzoek zijn een aantal stochasten (d_{exit}, L_3, h_{exit}) bepaald aan de hand van de dwarsprofielen van het dijkvak. Er is voor elke dijkpaal één waarde genomen voor deze stochasten (dus in totaal 15 waarnemingen). Er zijn echter vier dwarsprofielen beschikbaar per dijkpaal, wat betekent dat nu steeds de meest conservatieve waarde is gebruikt per dijkpaal. Als alle dwarsprofielen worden gebruikt kan dit leiden tot gunstigere waarden voor deze stochasten. Gunstigere waarden voor d_{exit} zal vooral leiden tot een kleinere faalkans van de probabilistische beoordeling.
- Voor het polderpeil zijn waarden genomen uit HSDR (2019a). Deze waarden zijn mogelijk niet kloppend.

8. REFERENTIES

[Aguilar López et al., 2016]

Aguilar López, J., Warmink, J., Schielen, R., & Hulscher, S. (2016). *Soil stochastic parameter correlation impact in the piping erosion failure estimation of riverine flood defences*. *Structural Safety*, 60, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.01.004>

[CUR, 1997]

CUR (1997). *190 Kansen in de civiele techniek. Deel 1: probabilistisch ontwerpen in theorie*. Stichting CUR, Gouda.

[Deltares, 2009]

Knoeff, J., Lopez de la Cruz, J., Sellmeijer, J.B., Luijendijk, S., Van Beek, V.M. (2009). *SBW Piping - Hervalidatie piping. HP1 Ontwikkeling nieuwe rekenregel - HP1.2 Uitbreiding en aanpassing van de pipingregel*. Deltares-rapport 1200187-015-GEO-0004. Delft, 2009.

[Deltares, 2012]

Förster, U., Van den Ham, G., Calle, E., Kruse, G. *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002 in opdracht van RWS Waterdienst. Delft, Maart 2012.

[Deltares, 2016a]

Diermanse, F. (2016). *WBI – Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium*. Wettelijk Toetsingsinstrumentarium WTI 2017, RWS – WV, Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004, 132

[Deltares, 2016b]

Teixeira, A., Wojciechowska, K., Ter Horst, W. (2016). *Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping*. Wettelijk Toetsingsinstrumentarium WTI 2017, RWS – RVL, Deltares rapport 1220080-002-ZWS-0006, 165

[Deltares, 2016c]

Diverse auteurs (2016). *Complete WTI parameterlijst Aquo*. Deltares. <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/@205811/parameterlijst/>

[Deltares, 2017]

Chbab, H., Groeneweg, J. (2017) *Modelonzekerheid belastingen*, Wettelijk Toetsingsinstrumentarium WTI-2017, RWS – WV, Deltares rapport 1209433-008.

[Deltares, 2019]

Brinkman, R. (2019) *Probabilistic toolkit – manual*. Deltares rapport 11201523-001, 64

[HSDR, 2019a]

HSDR (2019). *Beoordeling Piping en Heave*. Dijkversterking Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM). Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HSDR). Sweco, Arcadis.

[HSDR, 2019b]

HSDR (2019) *Beoordeling binnen- en buitenwaartse macrostabiliteit*. Dijkversterking Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM). Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HSDR). Sweco, Arcadis.

[Mini&M, 2016]

Ministerie van Infrastructuur & Milieu (2016). *Regeling van de Minister van Infrastructuur en Milieu*. 2 december 2016, nr. IENM/BSK-2016/283517, <https://wetten.overheid.nl/BWBR0039040/2017-01-01>

[Oosterlo, 2015]

Oosterlo, P. (2015). *A method to calculate the probability of dike failure due to wave overtopping, including the infragravity waves and morphological changes*. Master Thesis, Delft University of Technology. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1375.0641>

[Oosterlo et al., 2018]

Oosterlo, P., McCall, R., Vulk, V., Hofland, B., Van der Meer, J., & Jonkman, S. (2018). *Probabilistic Assessment of Overtopping of Sea Dikes with Foreshores including Infragravity Waves and Morphological Changes: Westkapelle Case Study*. Delft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(2), 48; <https://doi.org/10.3390/jmse6020048>

[Rijkswaterstaat, 2016]

Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Water (2016). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III*. Uitgever: Ministerie van Infrastructuur en Water, zie www.helpdeskwater.nl

[Rijkswaterstaat, 2019]

Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Water (2019). *Schematiseringshandleiding piping*. Uitgever: Ministerie van Infrastructuur en Water, zie www.helpdeskwater.nl

[Roelofs, 2019]

Roelofs, S., Zomer, W., & Warmink, J. J. (2019). Dike safety assessment, effective methods to reduce uncertainty in dike safety assessment. *Conceptueel*, 28(2), 14-17.

[Schweckendiek, 2015]

Schweckendiek, T. (2015). *On reducing piping uncertainties: a bayesian decision approach*. PhD thesis, Delft University of Technology – Deltares, 271.

[Schweckendiek et al., 2017]

Schweckendiek, T., Van der Krogt, M., Rijnveld, B., & Teixeira, A. (2017). *Handreiking Faalkansanalyse Macrostabieliteit*. Deltares.

[STOWA, 2019]

STOWA (2019). *Nieuwe normering van waterveiligheid*. Deltafact.

[TAW, 1989]

Diverse auteurs (1989). *Leidraad voor het ontwerpen van Rivierdijken, deel 2 (overgangsgebied en Benedenrivieren)*. Uitgever: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, zie www.enwinfo.nl.

[TAW, 2004]

Diverse auteurs (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*. Uitgever: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, ISBN-90-369-5565-3, zie www.enwinfo.nl. Delft

[Van der Meer, 2019]

Van der Meer, A. (2019). *POVM Actuele Sterkte. Activiteit 9 – Voorbeeld Schuifsterkteschematisering*. POVM Macro-stabiliteit. https://www.povmacrostabiliteit.nl/wp-content/uploads/2019/10/POVM-AS_Voorbeeld_Schuifsterkteschematisering_v1.1_plus_oplegnotitie_20190319.pdf

Bijlagen

Bijlage A: Waterstanden dijkvak per herhalingstijd

Tabel A-1 geeft de waterstanden van het dijkvak weer per herhalingstijd. De herhalingstijden zijn weergegeven in de meest linker kolom. De waterstanden voor deze herhalingstijden zijn voor elke dijkpaal bepaald. In Hydra-NL heten deze punten 236-250, maar deze corresponderen met respectievelijk dijkpalen 6- 20.

Tabel A-1: Waterstanden dijkvak per herhalingstijd

	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250
10	7,44	7,44	7,43	7,43	7,43	7,42	7,42	7,42	7,41	7,41	7,72	7,71	7,71	7,71	7,70
11	7,62	7,62	7,62	7,62	7,61	7,61	7,61	7,61	7,60	7,59	7,83	7,83	7,83	7,82	7,81
12	7,79	7,79	7,79	7,79	7,78	7,78	7,77	7,77	7,76	7,76	7,94	7,94	7,93	7,93	7,92
13	7,93	7,93	7,93	7,93	7,92	7,92	7,91	7,91	7,90	7,90	8,04	8,04	8,03	8,02	8,01
14	8,07	8,07	8,07	8,07	8,06	8,06	8,05	8,05	8,04	8,03	8,12	8,11	8,10	8,10	8,08
15	8,17	8,17	8,17	8,16	8,16	8,15	8,15	8,15	8,14	8,13	8,18	8,18	8,17	8,17	8,15
17	8,30	8,30	8,29	8,29	8,29	8,28	8,27	8,27	8,26	8,25	8,26	8,26	8,25	8,25	8,23
20	8,41	8,41	8,40	8,40	8,39	8,38	8,38	8,38	8,37	8,36	8,35	8,34	8,34	8,33	8,32
25	8,49	8,49	8,49	8,49	8,48	8,47	8,46	8,46	8,45	8,44	8,43	8,43	8,42	8,41	8,40
30	8,55	8,55	8,55	8,55	8,54	8,53	8,52	8,52	8,51	8,50	8,49	8,48	8,48	8,47	8,45
40	8,63	8,63	8,63	8,62	8,61	8,61	8,60	8,60	8,59	8,58	8,57	8,56	8,55	8,55	8,53
100	8,84	8,83	8,83	8,82	8,81	8,80	8,80	8,79	8,78	8,78	8,76	8,75	8,75	8,74	8,72
300	9,02	9,02	9,01	9,01	9,00	8,99	8,98	8,98	8,97	8,96	8,95	8,94	8,93	8,93	8,91
700	9,14	9,14	9,13	9,13	9,11	9,10	9,10	9,10	9,09	9,08	9,06	9,06	9,05	9,04	9,03
1000	9,19	9,18	9,18	9,17	9,16	9,15	9,14	9,14	9,13	9,12	9,11	9,10	9,10	9,09	9,07
3000	9,30	9,30	9,29	9,29	9,28	9,27	9,26	9,26	9,25	9,24	9,23	9,22	9,22	9,21	9,20
7000	9,38	9,38	9,37	9,37	9,35	9,35	9,34	9,34	9,33	9,32	9,31	9,30	9,30	9,29	9,28
10000	9,42	9,41	9,41	9,40	9,39	9,38	9,38	9,37	9,36	9,36	9,34	9,34	9,33	9,33	9,31
30000	9,50	9,50	9,49	9,49	9,48	9,47	9,46	9,46	9,45	9,45	9,43	9,43	9,42	9,42	9,40
70000	9,60	9,59	9,59	9,58	9,57	9,56	9,56	9,55	9,55	9,54	9,53	9,52	9,52	9,51	9,50

Bijlage B: Instellingen Probabilistic Toolkit voor beide modellen

Instellingen semi-probabilistische model:

- Er wordt gewerkt met de task "Run model".
- In het tabje "Model" wordt er gewerkt met een "internal" model en de taal Python. De vergelijkingen voor piping zijn ingevoerd in de source code. De input parameters zijn ingevoerd bij de "Input". De parameters waarvan het resultaat belangrijk is zijn ingevuld bij de "Output".
- In het tabje "Variables" zijn de karakteristieke waarden van de stochasten, en de constante waarden van de deterministen ingevoerd.
- Door op "Run" te drukken start de berekening en worden de waarden van de parameters bij de "Output" weergegeven in het tabje "Run model".

De uitgebreide instellingen zijn weergegeven in Tabel B-1.

Tabel B-1: Instellingen Probabilistic Toolkit voor semi-probabilistische beoordeling

Task	Run model
Tabje "Model"	Type: Internal
	Max parallel runs: 1
	Logging: Warning
	Clean up realizations before run: Aan
	Keep realizations: Aan
	Language: Python
	Python file: Anaconda 3 gebruikt
	Version: Python 3.7
Tabje "Calculation"	Scenario type: Single run
	Use design values: Uit

Instellingen probabilistische model:

- Er wordt gewerkt met de task "Reliability".
- In het tabje "Model" wordt er gewerkt met een "internal" model en de taal Python. De vergelijkingen voor piping zijn ingevoerd in de source code. De input parameters zijn ingevoerd bij de "Input". De parameters waarvan het resultaat belangrijk is zijn ingevuld bij de "Output".
- In het tabje "Variables" zijn de standaarddeviatie, gemiddelde en type kansverdeling van de stochasten ingevoerd. En daarnaast ook de constante waarden voor de deterministen.
- In het tabje "Calculation – Failure definition" zijn de drie criteria ingevuld die alle drie moeten optreden voordat het dijkvak faalt ($Z_u < 0$; $Z_h < 0$; $Z_p < 0$). Hiervoor is het belangrijk om "Parallel (all fail)" te kiezen. Daarnaast moet in de "Failure combination" worden gekozen voor "Integrated" voor de "Calculation".
- In de "Calculation – Method" is Monte Carlo gebruikt als methode, en een convergentiecriteria van 0,005.
- Door op "Run" te drukken start de berekening. Deze gaat net zo lang door tot het convergentiecriteria (of ingevulde minimaal/maximaal aantal realisaties) is bereikt.

- In het tabje “Reliability” komt vervolgens de resulterende betrouwbaarheidsindex en faalkans.
- In het tabje “Realizations” komen alle realisaties te staan.

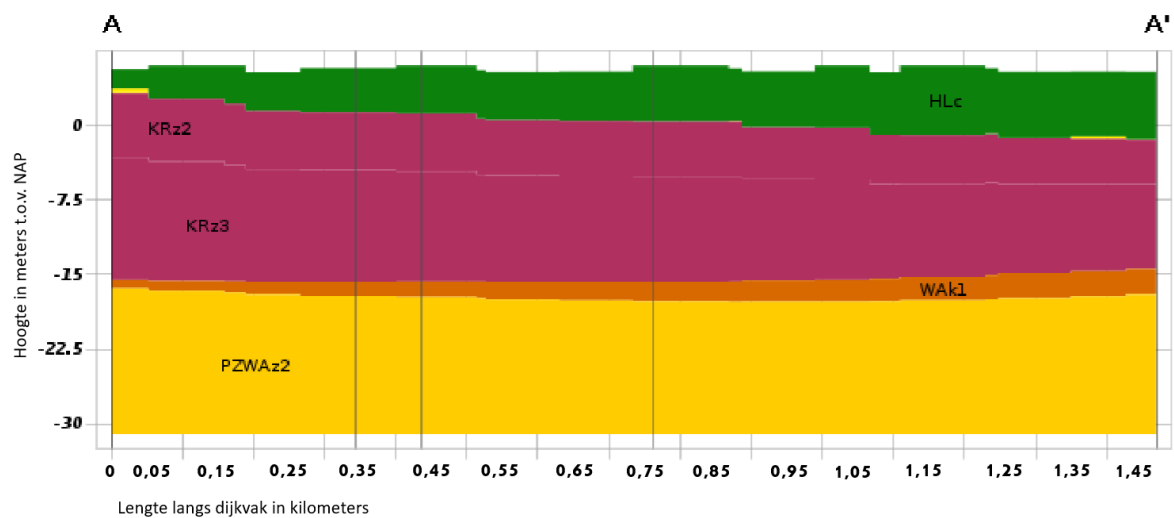
De uitgebreide instellingen staan in Tabel B-2.

Tabel B-2: Instellingen Probabilistic Toolkit voor probabilistische beoordeling

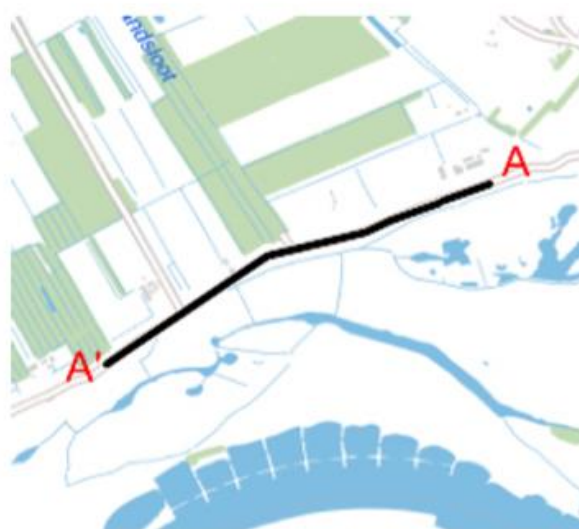
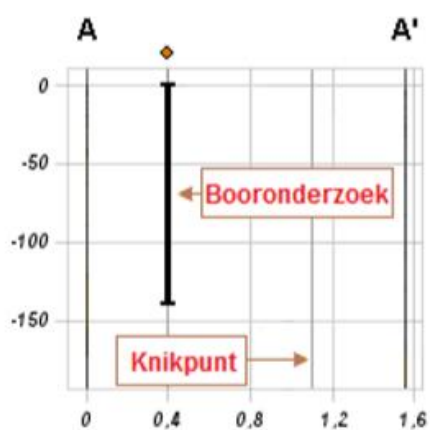
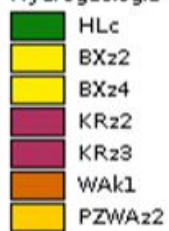
Task	Reliability	
Tabje “Model”	Type:	Internal
	Max parallel runs:	1
	Logging:	Warning
	Clean up realizations before run:	Aan
	Keep realizations:	Aan
	Language:	Python
	Python file:	Anaconda 3 gebruikt
	Version:	Python 3.7
Tabje “Calculation” – “Scenario”	Scenario type:	Single run
Tabje “Calculation” – “Failure definition”	Failure: Consider realizations as failing if:	Parallel (all fail)
	Calculation:	Integrated
Tabje “Calculation” – “Method”	Method:	Monte Carlo
	Random sequence type:	Random
	Design point determination	Nearest to mean (default)
	Min realizations	500 000
	Max realizations	1 000 000
	Realizations calc together	16 (default)
	Var coefficient failure	0,02

Bijlage C: Grove lengteprofiel van het dijkvak

Verticale Doorsnede BRO REGIS II v2.2



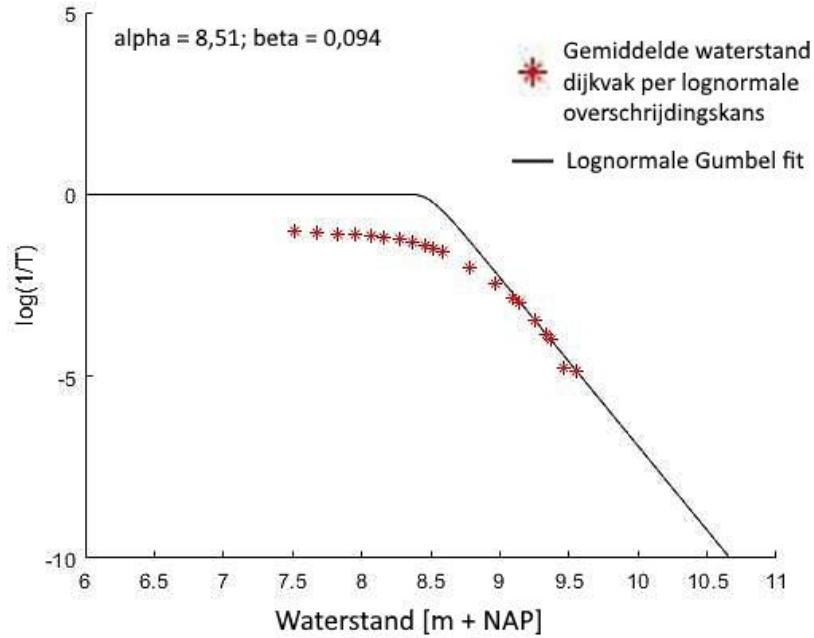
Hydrogeologie



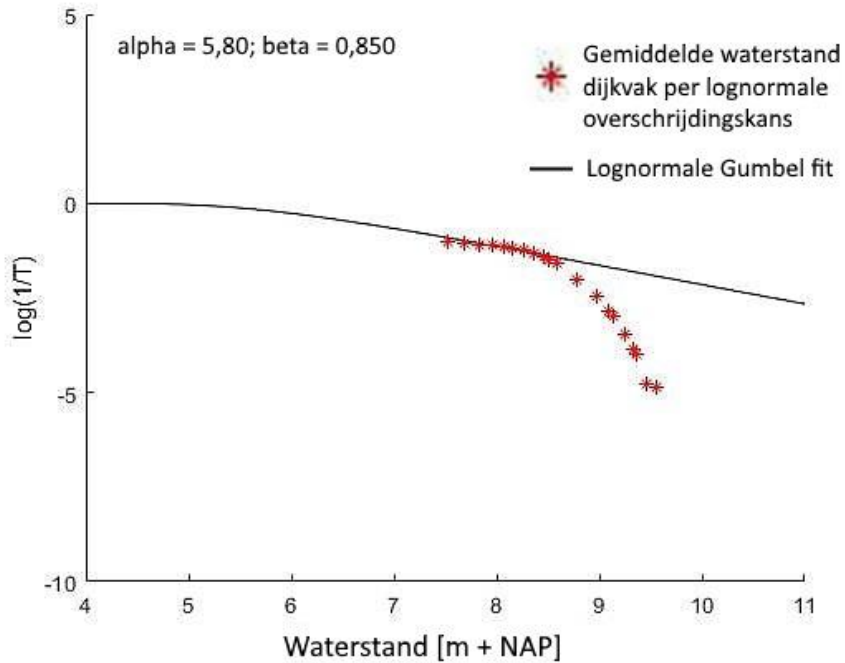
Figuur C-1: Grove lengteprofiel dijkvak (Dinoloket, REGIS II v2.2)

Bijlage D: Gumbel fits hoge en lage waterstand

Figuur D-1 en Figuur D-2 geven de lognormale Gumbel fits die gemaakt zijn op basis van alleen de hoge waterstanden, en op basis van alleen de lagere waterstanden.



Figuur D-1: Gumbel verdeling waterstand gefit op de hoge waterstanden



Figuur D-2: Gumbel verdeling waterstand gefit op de lage waterstanden