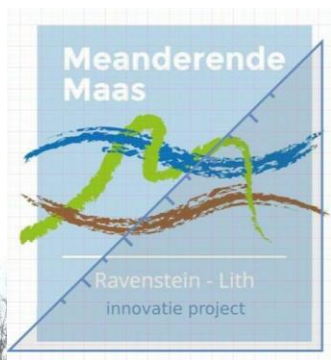




HWBP Projectgebonden Innovatie "Naar een geohydrologische aanpak voor piping"



Notitie verkenning probabilistische pipinganalyse

Waterschap Aa en Maas
24-01-2020

COLOFON

Aangeboden door Projectteam Projectgebonden Innovatie Meanderende Maas
Project HWBP Projectgebonden Innovatie "Naar een geohydrologische aanpak voor piping"
Opdrachtgever Waterschap Aa en Maas

Document Notitie verkenning probabilistische pipinganalyse_PGI Piping_def
Datum 24-01-2020
Referentie 109227/ Notitie verkenning probabilistische pipinganalyse_PGI Piping_def /24012020

Auteur(s) Guido van Rinsum

Checklist	Door Wie	Vink of paraaf
Interne review	Jos de Greef, Ruben Jongejan	
Goedgekeurd door	TM Jacco Hoogewoud (Advies in Water)	
Vrijgegeven door	PM Martine Brinkhuis (Tauw)	

Deze notitie vormt op termijn onderdeel van deelproduct 4, Uitvoerbaarheidstoets II

Commissie van betrokken experts (CvE)	Aandachtspunt
Ruben Jongejan Henk van Hemert Ane Wiersma Henk Weijers	Veiligheidsbenadering en probabilistiek Geotechniek en dijkontwerp Geologie en (gebrek aan) data. Communicatie en draagvlak

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Aanleiding.....	4
1.2	DOEL	4
1.3	Leeswijzer.....	4
2	Methode.....	5
2.1	Probabilistische en semi-probabilistische methode	5
2.1.1	Rekenregels semi-probabilistische aanpak	6
2.1.2	Rekenregels probabilistische aanpak	6
2.2	Rekenlocaties.....	6
2.3	Verdelingsparameters.....	6
2.4	Monte Carlo Analyse.....	7
2.5	Afkappen faalkansbijdrage.....	7
2.6	Schematiseringsfactor	8
3	Resultaten	9
3.1	Dijkpaal 435.2	9
3.2	Dijkpaal 442.5	9
4	Discussie.....	11
4.1	Gumbel verdeling waterstand	11
4.2	Spreading dikte deklaag en dikte zandpakket	11
4.3	Systeembetrouwbaarheid	11
4.4	Effect afkappen waterstand.....	12
5	Conclusies.....	13
5.1	Probabilistische aanpak levert lagere faalkans	13
5.2	Systeembetrouwbaarheid hoger dan betrouwbaarheid deelfaalmechanisme.....	13
6	Referenties.....	14
	Bijlagen.....	15

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De nieuwe norm voor waterveiligheid per 1 januari 2017 stelt het waterschap Aa en Maas voor de opgave om circa 100 km primaire dijk te versterken. De berekende pipingopgave is erg groot en lijkt op basis van ervaringen tijdens hoogwaters in het verleden onrealistisch te zijn. De bij deze opgave behorende versterkingsmaatregelen kosten veel geld en ruimte.

In het kader van de Innovatie Meanderende Maas wordt onderzocht hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes (of: de dempingsfactor) beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. De geohydrologische modellen worden hierbij gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen voor opbarsten, piping en heave.

In het innovatietraject wordt zo veel als mogelijk aangesloten bij het BOI (beoordelings- en ontwerpinstrumentarium). De gangbare praktijk is het werken met de semi-probabilistische rekenregels met gekalibreerde veiligheidsfactoren. Het is ook mogelijk een probabilistische analyse uit te voeren waarbij de onzekerheid expliciet meegenomen wordt. De probabilistische aanpak vergt meer rekencapaciteit en zal enkel toegepast worden als de verwachting is dat deze methode significant betere resultaten oplevert.

In deze memo is een verkennende analyse gepresenteerd waarin voor een tweetal doorsneden uit de verkenningsfase het verschil is onderzocht tussen de probabilistische en semi-probabilistische aanpak.

1.2 DOEL

Het doel van de voorliggende memo is het bepalen of een probabilistische pipinganalyse afwijkende, scherpere, resultaten oplevert ten opzichte van de semi-probabilistische aanpak.

1.3 Leeswijzer

De memo is opgebouwd uit de volgende hoofdstukken:

- Hoofdstuk 2: methode;
- Hoofdstuk 3: resultaten;
- Hoofdstuk 4: discussie van de resultaten;
- Hoofdstuk 5: conclusies;
- Hoofdstuk 6: referenties.

2 Methode

2.1 Probabilistische en semi-probabilistische methode

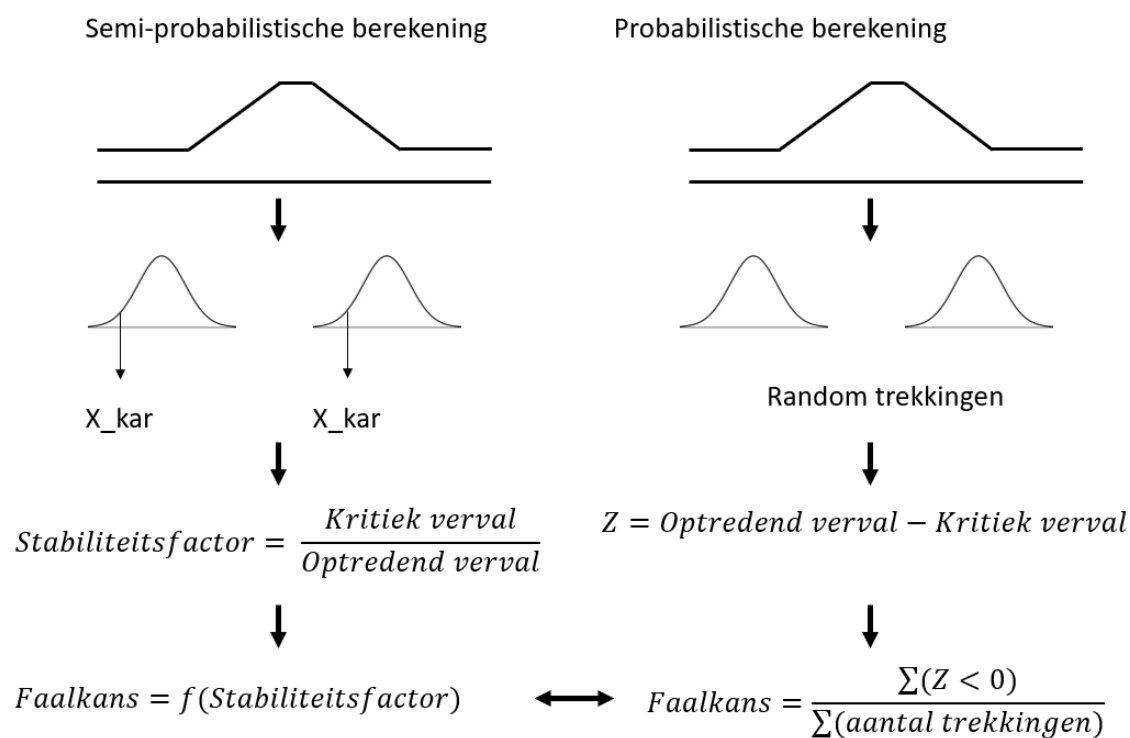
In de semi-probabilistische beschouwing worden de rekenregels uit het ontwerpinstrumentarium gevoed met rekenwaarden van de sterkteparameters. In de rekenregels wordt beschouwd of de weerstand groter is dan de belasting inclusief veiligheidsfactoren. Hierin worden de volgende veiligheidsfactoren meegenomen:

- schematiseringsfactor;
- normafhankelijke veiligheidsfactor.

De normafhankelijke veiligheidsfactor wordt bepaald op basis van een exponentiële relatie tussen faalkans en veiligheidsfactor. In het ontwerp wordt deze relatie gebruikt door op basis van de vereiste faalkans (vanuit de norm, uitgedrukt in een betrouwbaarheidsindex beta) de benodigde veiligheidsfactor te bepalen. Bij het beoordelen wordt dezelfde relatie gebruikt om op basis van de berekende veiligheidsfactor de actuele faalkans te bepalen. Deze relatie is in de voorliggende analyse gebruikt om te bepalen wat de verschillen zijn tussen de semi-probabilistische en probabilistische beschouwing.

In hoofdlijnen is de methodiek als volgt (zie ook Figuur 2-1):

- Bepaal de veiligheidsfactor voor de doorsneden op basis van de parameters uit de verkenningsfase;
 - Bepaal de actuele faalkans voor de doorsnede op basis van de relatie tussen de veiligheidsfactor en faalkans.
 - Voer een probabilistische beschouwing uit voor dezelfde doorsneden en vergelijk de uitkomsten.
- Let op dat voor een juiste vergelijking de verdeling gebruikt dient te worden die past bij de rekenwaarde uit de semi-probabilistische beschouwing¹.



Figuur 2-1: Vergelijking probabilistische en semi-probabilistische berekening

¹ Voorbeeld: in de semi-probabilistische beschouwing is een rekenwaarde van 0,8 voor de responsfactor gebruikt. Voor deze parameter is een lognormale verdeling met een CoV van 0,1 voorgeschreven. In de probabilistische beschouwing moet het gemiddelde zodanig gekozen worden dat de rekenwaarde overeenkomt met deze verdeling.

2.1.1 Rekenregels semi-probabilistische aanpak

Voor de semi-probabilistische rekenregels en de beta-afhankelijke veiligheidsfactoren wordt verwezen naar het ontwerpinstrumentarium (OI2014v4) [ref. 5].

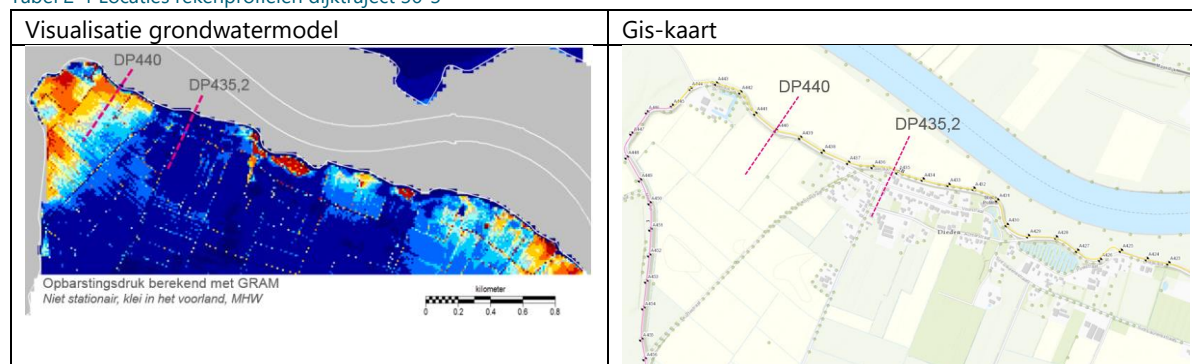
2.1.2 Rekenregels probabilistische aanpak

Voor de grenstoestandsfuncties en parameters uit de probabilistische aanpak wordt verwezen naar Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandsfuncties [ref. 11]. In deze memo is specifiek voor het innovatietraject beschreven welke grenstoestandsfuncties worden gehanteerd. Deze definities sluiten aan op het BOI (Beoordelings en Ontwerp Instrumentarium) [ref. 5].

2.2 Rekenlocaties

Op basis van de uitgevoerde geohydrologische analyse en de al uitgevoerde waterveiligheidsanalyses zijn twee locaties geselecteerd voor de berekeningen. Deze twee locaties zijn eerder gehanteerd in de haalbaarheidsstudie voor de geohydrologische aanpak, hierbij was gekozen voor de doorsnedes bij de dijken DP435.2 en DP440, zie Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Locaties rekenprofielen dijktraject 36-3



DP435.2 omdat:

- Uit het geohydrologische model volgt dat hier de opbarstkans laag is. Als hier geen winst behaald wordt is de verwachting dat dit nergens behaald wordt.
- Deze doorsnede is in eerdere fases ook is doorgerekend: (1) de parameters zijn dus al bepaald en (2) vergelijking met eerder ontwerp is mogelijk.

DP440 omdat:

- Er geen sprake is van bebouwing en daarmee bermoplossing mogelijk is.

2.3 Verdelingsparameters

In de probabilistische analyse is aangesloten op de in de verkenning uitgevoerde semi-probabilistische analyse. Dat betekent dat de karakteristieke waarde van de (weerstand)parameters bekend zijn. Het WBI/OI2014v4 schrijft distributieparameters voor (zie Bijlage 1). Deze waardes zijn niet bindend, op basis van lokale gegevens kan hiervan (onderbouwd) worden afgeweken. De distributieparameters dienen in de probabilistische analyse zo te worden gekozen dat de karakteristieke waarde uit die verdeling overeen komen met de semi-probabilistische analyse.

Een overzicht van de parameters is weergegeven in Tabel 2-2. Op basis van deze gegevens zijn de distributieparameters bepaald. Voor de methode zie bijlage 2 (*Bepaling gemiddelde waarde lognormale verdeling*). Voor de resulterende distributies zie bijlage 4.

Tabel 2-2. Overzicht verdelingsparameters

Parameter	Symbool	Dimensie	Semi-probabilistisch		Distributie (WBI)	Spreiding (WBI)
			DP435.2	DP442.5		
Maatgevend hoogwater bij Pmax	h_w	m+NAP	10,59	10,59*	Gumbel	n.v.t.
Polderpeil / maaiveldniveau	h_exit	m+NAP	7,16	6,85	Normaal	sigma=0.1
Responsfactor uittredepunt	r	-	0,8	0,8	Lognormaal	cov=0.1
Dikte deklaag opbarstkanaal	d	m	4	0,626	Lognormaal	cov=0.3
Doorlatendheid zandpakket	k	m/dag	65	65	Lognormaal	cov=0.5
70-percentielwaarde korrelverdeling	d70	µm	182	182	Lognormaal	cov=0.12
Kwelweglengte 0-situatie	L0	m	72	69	Lognormaal	cov=0.1
Dikte zandlaag	D	m	50	50	Lognormaal	cov=0.1
Verzadigd volumiek gewicht deklaag	y_sat	kN/m³	18,1	18,1	Lognormaal	cov=0,05, shift=10
Kritieke heave gradient	i_crit	-	0,3	0,3	Lognormaal	mu=0.5;sigma=0,1

* Voor de waterstand afgeweken van de verkenning. De waterstand bij DP442.5 is in werkelijkheid lager dan bij DP432.5. Er is afgeweken om dezelfde Gumbel-verdeling te kunnen gebruiken.

2.4 Monte Carlo Analyse

De probabilistische analyse is uitgevoerd middels een ruwe Monte Carlo analyse. In deze Monte Carlo simulatie wordt eerste een fragility curve afgeleid, de faalkans per waterstand (gediscrediteerd in 100 stappen). Deze kans wordt vermenigvuldigd met de kansdichtheid van de waterstand (gumbelverdeling). Het integreren van de resulterende kromme leidt tot de totale faalkans van de kering voor het faalmechanisme opbarsten. In formulevorm:

$$P(F) = \int \{P(F|H) \cdot P(H)\} dh$$

Waarin:

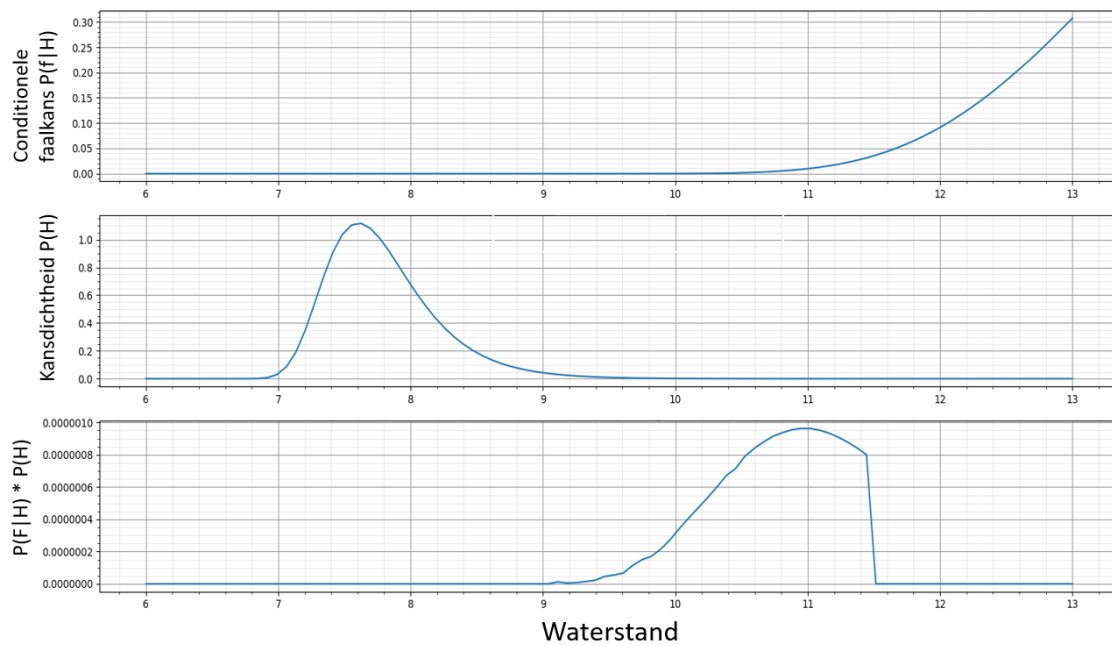
P(F)	=	Faalkans piping	[-]
P(F H)	=	Faalkans piping gegeven een vaste buitenwaterstand	[-]
P(H)	=	Kans op buitenwaterstand (Gumbelverdeling)	[-]

Deze methode is gehanteerd omdat dit leidt tot een relatief korte rekentijd. Hoe lager de kans van voorkomen hoe meer iteraties nodig zijn om tot een stabiele faalkans te komen. De faalkansen gegeven een bepaalde waterstand in het relevante domein zijn relatief hoog, terwijl de kans van voorkomen van een bepaalde waterstand laag is. Door alleen de kans op falen gegeven een bepaalde waterstand met de Monte Carlo simulatie te beschouwen wordt de rekentijd beperkt. Deze berekening is uitgevoerd voor het gehele beschouwde (discrete) bereik aan waterstanden.

2.5 Afkappen faalkansbijdrage

De faalkansbijdrage is afgekapt boven NAP+11,5m. De dijk loopt over bij deze waterstand. Hierin is marge aangehouden omdat de dijk hoger wordt aangelegd dan benodigd om zettingen te compenseren.

De methode is visueel weergegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-2. Afkappen faalkansbijdrage

2.6 Schematiseringsfactor

De onzekerheid in de ondergrondconfiguraties² wordt normaliter als volgt meegenomen:

- Ontwerpen: schematiseringsfactor;
- Beoordelen: ondergrondscenario's.

Voor de vergelijking tussen de probabilistische en semi-probabilistische analyse wordt de onzekerheid in verschillende ondergrondconfiguraties verwaarloosd. Dit betekent dat gerekend wordt met een schematiseringsfactor van 1,0 en dat de kans op de aangehouden ondergrondconfiguratie ook op 1,0 wordt gezet.

² De onzekerheid in laagdikte (deklaag en zandpakket) wordt expliciet meegenomen in de distributies van deze parameters.

3 Resultaten

3.1 Dijkpaal 435.2

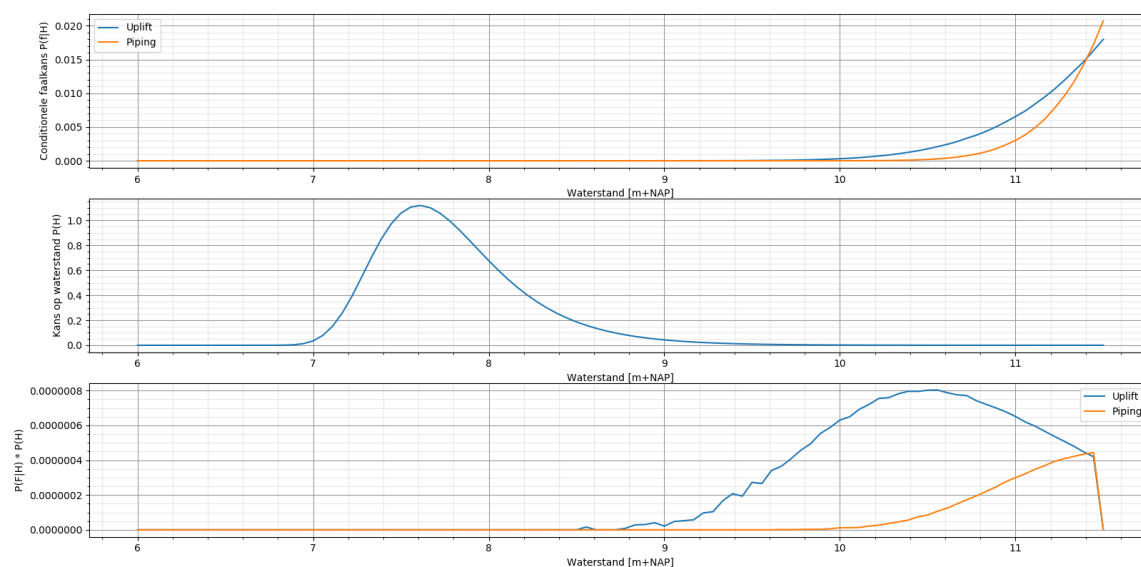
De resultaten van de probabilistische analyse voor dijkpaal 435.2 zijn weergegeven in Tabel 3-1 en Figuur 3-1. De faalkansen voor de drie deelfaalmechanismen zijn weergegeven. Falen treedt op als alledrie de deelfaalmechanismen optreden. Uplift en heave worden bepaald door dezelfde (sterkte)parameters (dikte deklaag, volumiek gewicht en stijghoogte), maar het relatieve belang van de onzekerheden t.a.v. deze parameters is verschillend. Piping wordt bepaald een additionele set (sterkte)parameters (d70, doorlatendheid etc.). Deze twee zaken samen betekenen dat de totale faalkans lager is dan de minimale faalkans.

Op basis van de analyse wordt geconcludeerd dat:

- De betrouwbaarheid voor de individuele deelfaalmechanismen is hoger voor de probabilistische aanpak;
- Het voordeel van de probabilistische aanpak is dat een totale faalkans wordt berekend. Deze systeemfaalkans is gunstiger dan de individuele faalkansen.

Tabel 3-1. Resultaat analyse DP435.2

	Probabilistisch		Semi-probabilistisch	
	Faalkans	Beta	Faalkans	Beta
Uplift	1,28E-06	4.70	1,16E-05	4,23
Piping	2,96E-07	4.99	5,40E-06	4,40
Heave	2,84E-04	3.45	3,77E-03	2,67
Totaal	3,37E-08	5.40	-	-



Figuur 3-1. Faalkans dijkpaal 435.2 (heave is niet weergegeven)

Voor opbarsten en heave is een FORM- analyse (First Order Reliability Method) uitgevoerd als controle op de uitkomsten van de Monte Carlo Analyse. De FORM-analyse geeft vrijwel gelijke uitkomsten voor de betrouwbaarheid.

3.2 Dijkpaal 442.5

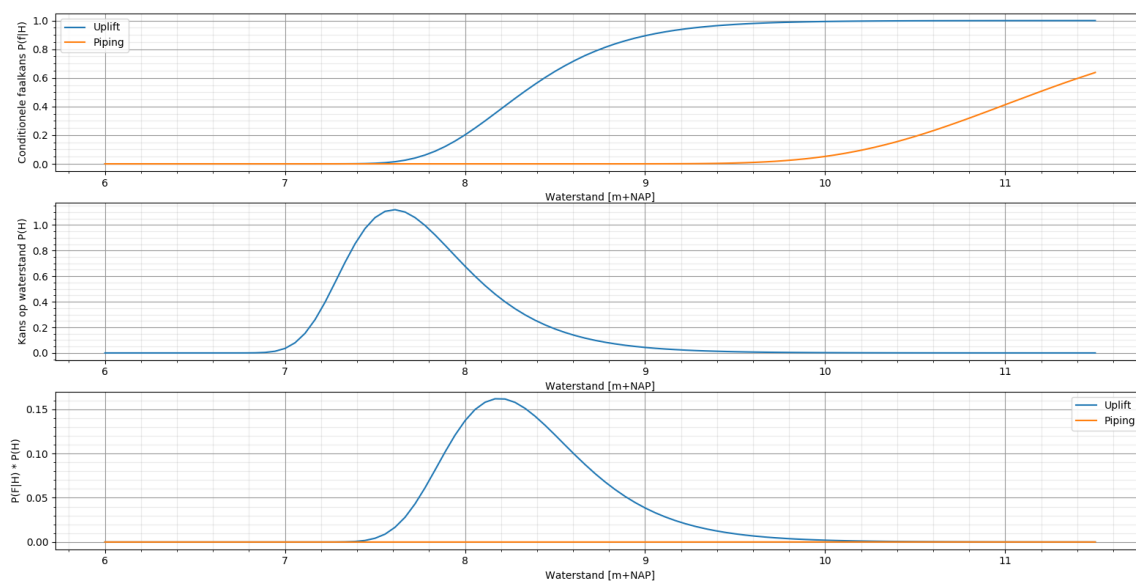
De resultaten van de probabilistische analyse voor dijkpaal 435.2 zijn weergegeven in Tabel 3-2 en Figuur 3-2. De faalkansen voor de drie deelfaalmechanismen zijn weergegeven. Falen treedt op als alle drie de

deelfaalmechanismen optreden. Uplift en heave worden bepaald door dezelfde (sterkte)parameters (dikte deklaag, volumiek gewicht en stijghoogte).

In dit geval is de totale faalkans nagenoeg gelijk aan de pipingfaalkans. Door de dunne deklaag aan de binnenzijde van de dijk is de kans op opbarsten en heave dusdanig hoog dat het weinig voor zal komen dat er genoeg weerstand is tegen uplift en heave terwijl piping wel (theoretisch) op zou kunnen treden.

Tabel 3-2. Resultaat DP442.5

	Probabilistisch		Semi-probabilistisch	
	Faalkans	Beta	Faalkans	Beta
Uplift	1,55E-01	1,01	4,95E-01	0,01
Piping	1,54E-04	3,61	1,14E-03	3,05
Heave	4,74E-01	0,06	9,15E-01	-1,37
Totaal	1,53E-04	3,61	-	-



Figuur 3-2. Faalkans dijkpaal 442.5 (heave is niet weergegeven)

Voor opbarsten en heave is een FORM- analyse (First Order Reliability Method) uitgevoerd als controle op de uitkomsten van de Monte Carlo Analyse. De FORM-analyse geeft vrijwel gelijke uitkomsten voor de betrouwbaarheid.

4 Discussie

4.1 Gumbel verdeling waterstand

Voor de waterstand is een Gumbelverdeling gehanteerd. In deze studie is niet onderzocht wat het effect is van een andere type verdeling op de totale faalkans. Als de probabilistische aanpak gehanteerd zal worden in het innovatietraject dient deze parameter nader te worden onderzocht aangezien het de bepalende factor is in de pipinganalyse.

4.2 Spreiding dikte deklaag en dikte zandpakket

Voor de dikte van de deklaag en de dikte van het zandpakket worden in het achtergrondrapport onzekerheden [ref. 7] en de schematiseringshandleiding piping [ref. 2] afwijkende waarden gepresenteerd, zie Tabel 4-1.

Voor de vergelijkingen tussen de probabilistische en semi-probabilistische aanpak is gebruik gemaakt van de parameters uit het achtergrondrapport onzekerheden. Met name voor DP435.2 zou de verdeling conform de schematiseringshandleiding voor de probabilistische analyse positiever uitpakken, de spreiding is dan lager (dikke deklaag).

Tabel 4-1. Spreidingsparameters

Bron	Parameter	Spreiding
Achtergrondrapport onzekerheden	Dikte deklaag	CoV = 0,30
	Dikte zandpakket	CoV = 0,10 - 0,60
Schematiseringshandleiding piping	Dikte deklaag	$\sigma = 0,50$ m
	Dikte zandpakket	$\sigma = 0,50$ m

Als de probabilistische aanpak in het innovatietraject zal worden toegepast is deze discussie minder van belang omdat de parameters dan lokaal kunnen worden bepaald.

4.3 Systeembetrouwbaarheid

De drie deelfaalmechanismen (opbarsten, piping en heave) zijn parallel geschakeld. Dit betekent dat alle mechanismen moeten falen voordat systeemfalen (falen t.g.v. piping optreedt). De totale faalkans wordt bepaald door de mate van (on)afhankelijkheid tussen de deelfaalmechanismen. In Figuur 4-1 is weergegeven hoe de systeembetrouwbaarheid wordt bepaald als functie van de relatie tussen de deelfaalmechanismen.

$P_{i,system}$ (with n components):

system	gate	operator	components		
			mutually exclusive	independent	fully dependent
series	 OR	$\cup$	$\sum_{i=1}^n P_i$ (upper bound)	$1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$	$\max\{P_i\}$ (lower bound)
parallel	 AND	$\cap$	0 (lower bound)	$\prod_{i=1}^n P_i$	$\min\{P_i\}$ (upper bound)

Figuur 4-1. Systeembetrouwbaarheid

Voor opbarsten, piping en heave komt een deel van de parameters in alle grenstoestandsfuncties voor (zoals de dikte van de deklaag en het volumiek gewicht van de deklaag). Andere parameters komen in slechts één grenstoestandsfunctie voor (zoals de d_{70}). Voor de systeembetrouwbaarheid betekent dit dat deze zich zal bevinden tussen onafhankelijk (product van de faalkansen) en afhankelijk (minimum van de faalkansen).

4.4 Effect afkappen waterstand

In de probabilistische analyse is de faalkansbijdrage voor waterstanden meer dan 11,5 m+NAP niet meegenomen in de faalkans (zie paragraaf 2.5). In Tabel 4-2 en Tabel 4-3 is het effect van deze methode op de resulterende betrouwbaarheid weergegeven.

Uit de tabellen is af te leiden dat het afkappen van de waterstand een positief effect heeft op de betrouwbaarheid. Voor lage faalkansen is het effect groter (DP435.2) dan voor de relatief hoge faalkansen (DP442.5).

Tabel 4-2. Effect afkappen waterstand DP435.2

	Betrouwbaarheid (beta)	
	Met afkappen waterstand	Zonder afkappen waterstand
Uplift	4,70	4,67
Piping	4,99	4,82
Heave	3,45	3,44
Totaal	5,40	5,19

Tabel 4-3. Effect afkappen waterstand DP442.5

	Betrouwbaarheid (beta)	
	Met afkappen waterstand	Zonder afkappen waterstand
Uplift	1,01	1,01
Piping	3,61	3,60
Heave	0,06	0,06
Totaal	3,61	3,60

5 Conclusies

5.1 Probabilistische aanpak levert lagere faalkans

De probabilistische aanpak levert voor de beschouwde doorsnedes lagere (gunstigere) faalkansen voor alle drie de deelfaalmechanismen:

- Dit betekent dat de semi-probabilistische aanpak (met de norm-afhankelijke veiligheidsfactoren) een conservatieve aanpak is. Met de probabilistische beschouwing kan een scherper ontwerp/beoordeling bereikt worden.
- De probabilistische beschouwing kan nog gunstiger uitpakken als voor de spreiding van de deklaagdikte een lagere waarde gehanteerd wordt (zie paragraaf 4.2). In de beschouwing is een hoge waarde van de spreiding gehanteerd.
- Bovendien biedt de probabilistische meer vrijheid en inzicht in effecten zoals het afkappen van de waterstand.

5.2 Systeembetrouwbaarheid hoger dan betrouwbaarheid deelfaalmechanisme

Een voordeel van de probabilistische aanpak is dat de systeembetrouwbaarheid bepaald kan worden. Piping treedt op als alle drie de deelfaalmechanismen (opbarsten, heave en piping) optreden. De systeemfaalkans (opbarsten, piping én heave) is lager dan de faalkans voor de individuele deelfaalmechanismen.

6 Referenties

1. Projectteam Meanderende Maas (2018). Technische uitgangspunten.
2. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). Schematiseringshandleiding piping.
3. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2012). Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen.
4. Arcadis (2018). Geotechnisch onderzoek Ravenstein-Lith. Proevenverzameling met d70m, S, m en POP almede phi.
5. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016). Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014.
6. Hoogewoud (2018). Geohydrologie en piping. Een verkennend geohydrologisch perspectief op risico's op piping en macrostabiliteit. Presentatie.
7. Deltares (2017). WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium.
8. Projectteam Innovatiespoor Piping (2019). Innovatiespoor Piping MeMa_Stappenplan nav overleg 26-2-2019.
9. Deltares (2016). WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium.
10. Projectteam Meanderende Maas (2019). Innovatie Meanderende Maas. Naar een geohydrologische benadering voor het berekenen van de pipingopgave - plan van aanpak. referentie 109227/19-008.221, projectcode 109227/113164.
11. Projectteam Projectgebonden Innovatie Meanderende Maas (2019). Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandsfuncties. Referentie: 109227/deelproduct2/07112019.

Bijlagen

Bijlage 1. Verdelingsparameters WBI

WBI onzekerheden [ref. 9]

B.3 Piping (STPH)

Onzekerheden van sterkte-parameters.

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
$\gamma_{sat,cover}$	kN/m ³	saturated volumetric weight of the cover layer	verzadigd volumiekgewicht van sublaag	5%	Shifted logn. shift=10	Nom.	cov ⁶ = 0.05	0	300
r_{exit}	-	damping factor at exit	dempingsfactor bij uittredepunt	95%	logn.	Nom.	cov = 0.1	0	∞
D_{cover}	m	total thickness of the cover	deklaagdikte	5%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.3	0	200,-
L	m	seepage length	Kwelweglengte	5%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.1	0	3000,-
D	m	thickness of the aquifer	dikte watervoerend pakket	95%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.1 – 0.6	0	1500,-
h_{exit}	m [NAP]	phreatic level at the exit point	freatische waterstand bij uittredepunt	5%	norm.	Nom.	σ = 0.1	1	Section length,-
$m_{...}$	-	model uncertainty	modelfactor	Zie onderstaande tabel				1	-
$i_{c,h}$	-	critical heave gradient	kritiek verhang m.b.t heave	0.3 ⁷	logn.	0.5	σ = 0.1	0	300,-
d_{70}	m	70%-quantile of the grain size of the aquifer	70%-fraktil van de korreldiameter in de aquifer	5%	logn.	Nom.	cov = 0.12	0	180,-
k	m/s	permeability of the aquifer	doorlatendheid aquifer	95%	logn.	Nom.	cov = 0.50	0	600,-

Modelonzekerheden

Sym.	Model	Dist.	μ	σ or CoV
m_p	piping	logn.	1.0	σ = 0.12
m_u	uplift	logn.	1.0	σ = 0.10

⁶ Onzekerheid in deze parameter is vaak ondergebracht in het stochastische ondergrondmodel. Het stochastische ondergrondmodel levert de variatiecoëfficiënt. Als gevolg daarvan kunnen de waarden voor deze parameter variëren.

⁷ Indien de getoonde waarde voor een kwantiel niet staat aangeduid als percentage, dan duidt dat er op dat de karakteristieke waarde zelf staat weergegeven en niet de kwantielwaarde.

Tabel 2.2 Toe te passen waarden voor parameters en type waarde te hanteren in semi-probabilistische toets

Stochast	Startwaarde	Nominale of boven/ondergrens waarde voor semi probabilistische toets
d_{70}	Startwaarde gemiddelde d_{70} is gegeven in tabel* Variatiecoëfficiënt is 0.12	Ondergrens
Doorlatendheid zandlaag (aquifer)	Startwaarde gemiddelde doorlatendheid is gegeven in tabel* Startwaarde variatiecoëfficiënt is 0.5	Bovengrens
Verzadigd volumiek gewicht cohesieve deklaag	Geen startwaarde. Deze waarde moet worden bepaald op basis van de lokale situatie. Uitgegaan wordt van verschoven lognormale verdeling, met verschuiving van 10 kN/m ³ . Zie par 7.2.7 Startwaarde variatiecoëfficiënt 0,05**	Ondergrens
Dempingsfactor	Geen startwaarde, zie par 7.2.16. Lognormale verdeling, startwaarde voor de variatiecoëfficiënt 0,1	Bovengrens. Zie Par 7.2.16
Kwelweglengte	Geen startwaarde, wordt bepaald door locaties intredepunt en uitredepunt. Lognormale verdeling, startwaarde voor variatiecoëfficiënt 0,1**	Ondergrens
Dikte deklaag	Geen startwaarde, wordt bepaald door boven- en onderzijde cohesieve laag. Lognormale verdeling, startwaarde voor standaardafwijking 0,5 m***	Ondergrens
Dikte aquifer	Geen startwaarde, wordt bepaald door onderkant deklaag en onderkant aquifer. Lognormale verdeling startwaarde voor standaardafwijking 0,5 m***	Bovengrens
Waterstand binnendijks	Geen startwaarde. Zie par 7.2.11 Standaard deviatie 0.1 m	Ondergrens

*Met deze waarde kan verantwoord de gedetailleerde toets worden uitgevoerd. Wanneer de beheerder de beschikking heeft over aantoonbaar betere waarden kan hij deze gebruiken. Het is niet noodzakelijk om in de gedetailleerde toets waarden uit de tabel nauwkeuriger vast te stellen.

** Zie ook *WBI-Onzekerheden Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium* [24].

*** Voor deze startwaarden is op basis van expert judgement afgeweken van de waarden in bovengenoemde rapportage.

Bijlage 2. lognormale verdeling

Lognormale verdeling

De kansdichtheidsfunctie van de lognormale verdeling is gelijk aan:

$$p(X = x) = \frac{1}{x \cdot \zeta \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \exp \left[-\frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta \cdot \sqrt{2}} \right]$$

De verdelingsfunctie van de lognormale verdeling is gelijk aan:

$$P(X \leq x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta \cdot \sqrt{2}} \right]$$

Waarin λ en ζ de location en scale parameters zijn. Het gemiddelde en standaardafwijking van het natuurlijk logaritme van de parameter. Deze kunnen bepaald worden door:

$$\lambda = \ln(\mu) - \frac{\zeta^2}{2}$$
$$\zeta = \sqrt{\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 \right)}$$

Waarin μ en σ de het gemiddelde en de standaardafwijking zijn van de normaal verdeelde parameter.

Bepaling gemiddelde waarde lognormale verdeling

Als de spreiding (variatiecoëfficiënt en de karakteristieke waarde van een stochast bekend is kan de gemiddelde waarde van de onderliggende lognormale verdeling als volgt worden bepaald:

$$P(X \leq x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta \cdot \sqrt{2}} \right]$$
$$\frac{P(X \leq x) - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} = \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta \cdot \sqrt{2}} \right]$$
$$\operatorname{erfinv} \left(\frac{P(X \leq x) - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} \right) = \frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta \cdot \sqrt{2}}$$
$$\operatorname{erfinv} \left(\frac{P(X \leq x) - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} \right) \cdot \zeta \cdot \sqrt{2} = \ln(x) - \lambda$$
$$\lambda = \ln(x) - \operatorname{erfinv} \left(\frac{P(X \leq x) - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} \right) \cdot \zeta \cdot \sqrt{2}$$

Bijlage 3. Afleiding gumbelverdeling waterstand

Voor de bepaling van de waterstanden zijn dezelfde uitgangspunten gehanteerd als in het reguliere project Meanderende Maas zie hiervoor de technische uitgangspuntennotitie [ref. 1]:

1. Bepaling waterstand voor de zichtjaren 2050 en 2100 voor met terugkeertijden met Hydra-NL ontwerpmodus. Er is gerekend met een waterstandsaling door rivierverruiming (effect orde 10 cm).
2. Gemiddelde waarde bepaald voor 2075.
3. 30 cm reductie op basis van het OI2014v4

De bovenstaande stappen zijn regulier. Door de berekende waterstanden is een Gumbelverdeling gefit. De parameters zijn weergegeven in Tabel 0-1.

Tabel 0-1. In- en output Hydra-NL

Terugkeertijd [jaar]	P(X>x)	Waterstand zonder 30 cm reductie	Waterstand met 30 cm reductie
Input Hydra-NL	1/Terugkeertijd	Output Hydra-NL	Output Hydra-NL - 30 cm
10	0.1	8.3135	8.0135
20	0.05	8.756	8.456
25	0.04	8.8865	8.5865
50	0.02	9.2425	8.9425
75	0.013333333	9.4235	9.1235
100	0.01	9.5395	9.2395
150	0.006666667	9.69	9.39
200	0.005	9.792	9.492
500	0.002	10.091	9.791
750	0.001333333	10.211	9.911
1000	0.001	10.3015	10.0015
1500	0.000666667	10.421	10.121
2000	0.0005	10.5025	10.2025
5000	0.0002	10.75	10.45
7500	0.000133333	10.852	10.552
10000	0.0001	10.92	10.62
15000	6.66667E-05	11.012	10.712
20000	0.00005	11.075	10.775
25000	0.00004	11.122	10.822
30000	3.33333E-05	11.1595	10.8595

De onderstaande stappen zijn gehanteerd voor het bepalen van de distributieparameters van de Gumbelverdeling.

1. De Gumbelverdeling is als volgt:

$$P(X \leq x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}}$$

2. P(X≥x) is bepaald met Hydra-NL dus is gebruik gemaakt van P(X≤x) = 1- P(X>x)

$$1 - P(X \geq x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}}$$

3. Herschrijven levert de volgende uitdrukking op:

$$-\ln(-\ln(1 - P(X \geq x))) = \frac{x - \mu}{\beta}$$

4. Herschikken van de termen:

$$-\beta \cdot \ln(-\ln(1 - P(X \geq x))) + \mu = x$$

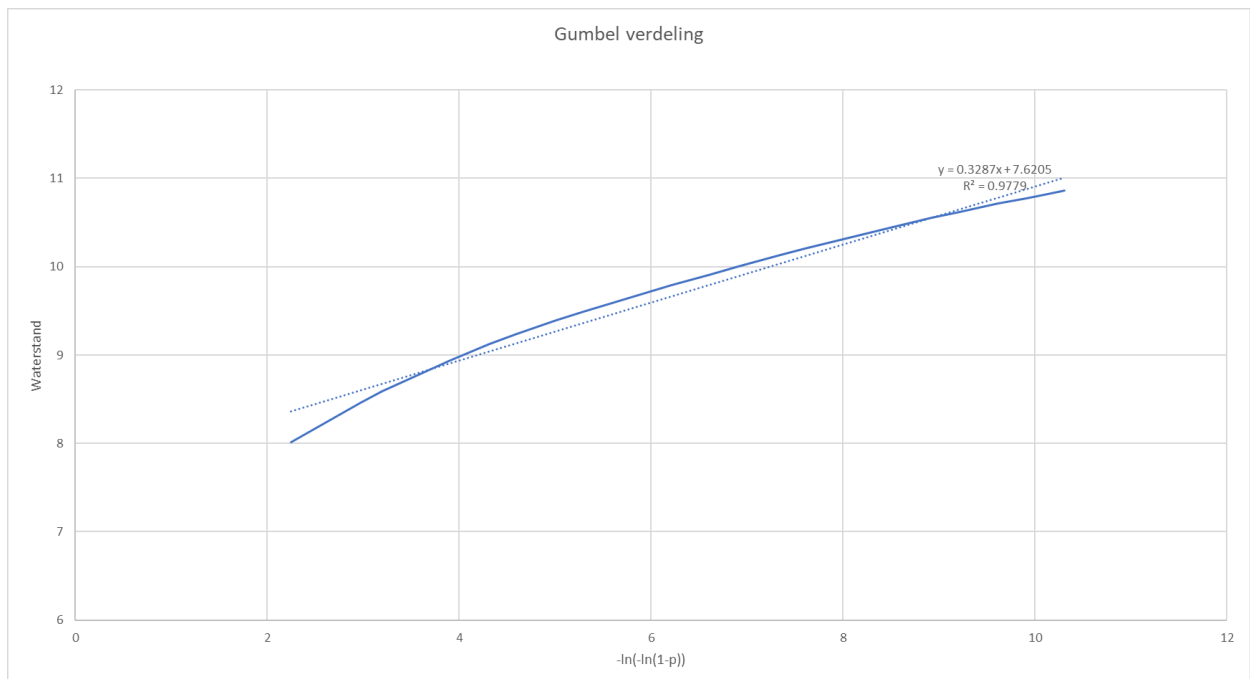
5. Wat resulteert is een lineaire relatie met de twee distributieparameters:

$$-\ln(-\ln(1 - P(X \geq x))) = A$$

$$x = \beta \cdot A + \mu$$

6. Op de bovenstaande relatie is in Excel de kleinste kwadraten methode toegepast. Dat levert de volgende relatie op (zie ook Figuur 0-1):

$$x = 0.3287 \cdot A + 7.6205$$



Figuur 0-1. Gumbelverdeling (horizontale as: gelineariseerde parameter)

Bijlage 4. Parameters probabilistische analyse