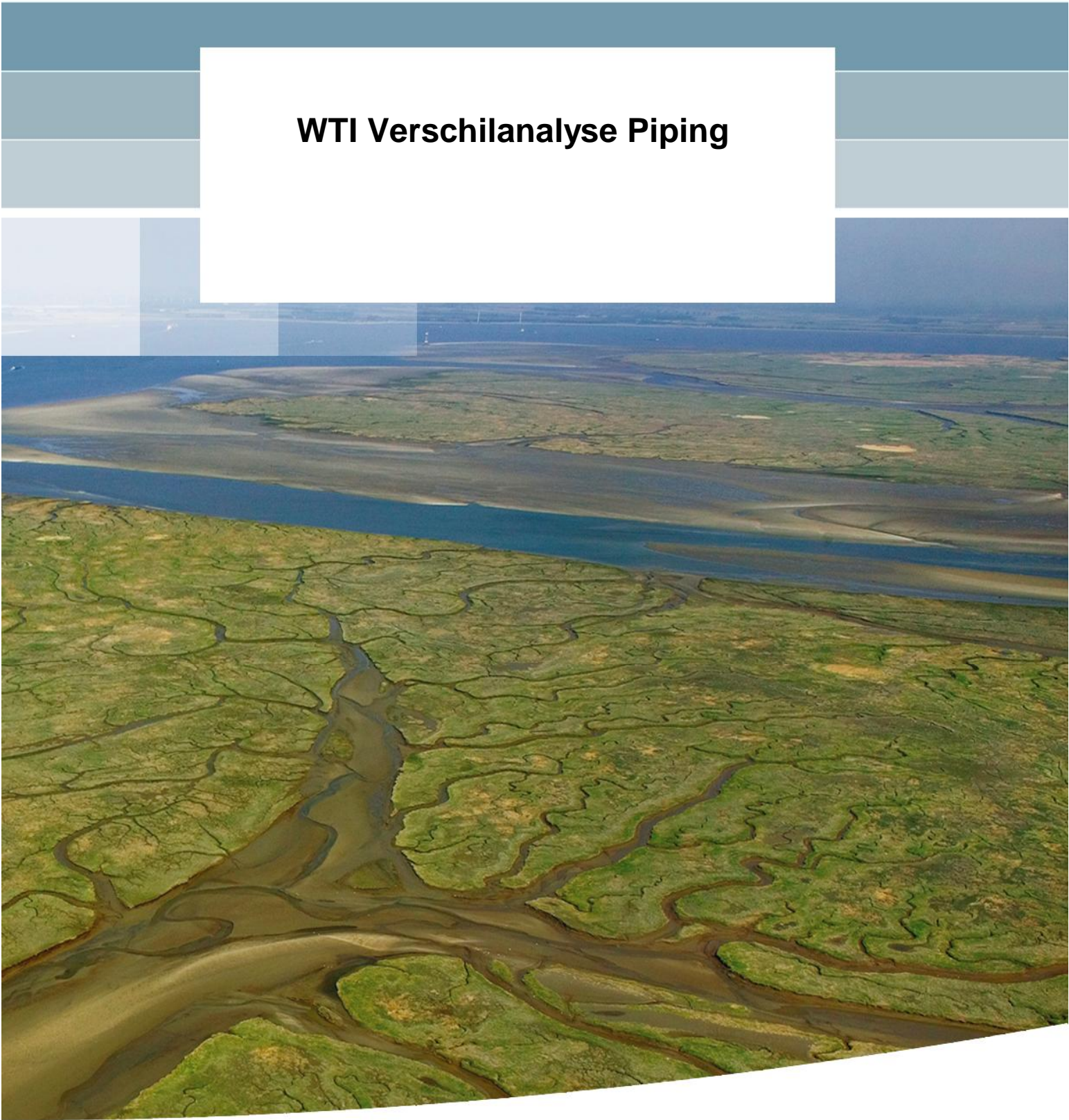


WTI Verschilanalyse Piping



WTI Verschilanalyse Piping

Dirk de Lange

1220078-002

Titel

WTI Verschilanalyse Piping

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1220078-002	1220078-002-GEO-0003- ydh	26

Trefwoorden

Raamwerk WTI, verschilanalyse, faalmechanisme piping

Samenvatting

Ter ondersteuning van het besluitvormingsproces rondom het vast te stellen WTI 2017 is het van belang om een beeld te hebben van de praktische en beleidsmatige consequenties van gemaakte keuzes en doorgevoerde veranderingen. Deze consequenties worden verkend in zogenoemde effectanalyses. De verschilanalyse is een onderdeel van de effectanalyse.

De verschillen tussen de referentie, concept WTI 2011 en het WTI 2017 worden in deze analyse inzichtelijk gemaakt voor het faalmechanisme piping. Daarbij ligt de focus op de aanpassing van de Sellmeijer-formule, de wijziging van de sterktefactoren, van de omgang met onzekerheden van de grondparameters en het meenemen van het heave-criterium. De wijzigingen in de omgang met de onzekerheid van de grondparameters (schematisatie en bepaling d70 en doorlatendheid) zijn alleen kwalitatief beschreven. De andere veranderingen zijn ook kwantitatief in kaart gebracht door representatieve doorsneden / scenario's door te analyseren. Daartoe is de VNK-database gebruikt.

Op basis van de gemaakte analyses is geconcludeerd dat de aanpassingen van de Sellmeijer-formule en van de sterktefactoren de grootste impact hebben. Het verlichtende effect van het meenemen van het heave-criterium is verwaarloosbaar. De nieuwe normering heeft invloed op het aanwezige tekort aan weerstand (de afwijking van de actuele veiligheidsfactor ten opzichte van de vereiste veiligheidsfactor). Dit zal dan ook om andersoortige maatregelen vragen dan de meer traditionele maatregelen. Verder laat de semi-probabilistische analyse conform WTI 2017 zien dat met name in het bovenrivierengebied de sterkste afwijkingen worden gevonden.

English summary

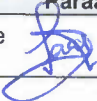

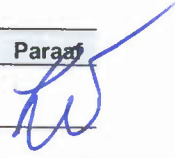
In order to support the decision making process of the WTI 2017, it is of importance to have a good impression of the practical and political consequences due to the choices made and the implemented changes. These consequences will be investigated in the so-called 'impact analysis'. The present discrepancy analysis is part of the impact analysis.

The differences between the reference case (VTV/HR 2006), the concept WTI 2011 and the WTI 2017 for the failure mechanism 'piping' are described in the present analysis. These include the modified Sellmeijer relation, the modified safety factors, the new approach of the uncertainties in soil parameters and the inclusion of the heave criterion. The differences in the approach of the uncertainties in soil parameters (the schematization and the determination of the d70 and the permeability) are only described qualitatively. The other differences are also presented numerically. These numbers are calculated by analyzing of representative sections / scenarios. To this end, the VNK-database has been used.

Titel
WTI Verschilanalyse Piping

Opdrachtgever Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Project 1220078-002
Kenmerk 1220078-002-GEO-0003-ydh
Pagina's 26

Based on the calculations made, it is concluded that the adjustments to the Sellmeijer model and the new safety factors have the greatest impact. Negligible is the effect of the inclusion of the heave criterion. The new norms affect the present lack of resistance, what will ask for more innovative measures (traditional measures might not be sufficient any longer). Further, based on the semi-probabilistic analysis according to WTI in 2017, it can be concluded that the strongest deviations are found in the "bovenrivierengebied".

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2015	ir. D.A. de Lange		drs. ir. J.G.Knoeff		ir. L. Voogt	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Beleidsmatige ontwikkelingen en gevolgen voor WTI 2017	1
1.2 Effectanalyses	1
1.3 Doelstelling van deze verschilanalyse	2
1.4 Afbakening	2
1.5 Leeswijzer	3
2 Veranderingen in toets op piping	5
2.1 Algemeen	5
2.2 Meenemen van het deelmechanisme Heave	5
2.3 Vereiste sterktefactor	6
2.4 Modelfactor	8
2.5 Ondergrondschematisering	8
2.6 Bepaling d70 en doorlatendheid	9
2.7 Rekenmodel: gereviseerde Sellmeijer-formule	11
2.8 Eenvoudige toets, schematisering voorland en getijdenafzettingen	13
3 Werkwijze en uitgangspunten	15
3.1 Te beschouwen verschillen	15
3.2 Referentiepunten voor de analyse	15
3.3 Opzet numerieke analyses	15
3.4 Gebruikte database	16
3.5 Uitvoering berekeningen	16
3.6 Overige aannamen	17
4 Resultaten	19
4.1 Algemeen	19
4.2 Resultaten benadering per scenario	19
4.3 Resultaten benadering per dijkvak	21
4.4 Duiding resultaten	22
5 Conclusies	25
Literatuur	1
Bijlage(n)	
A Resultaten scenario-benadering uitgesplitst per systeem	A-1
B Onderbouwing keuze VNK-database	B-1

1 Inleiding

1.1 Beleidsmatige ontwikkelingen en gevolgen voor WTI 2017

Het huidige veiligheidsbeleid is er op gericht om de primaire waterkeringen in Nederland in 2050 te laten voldoen aan de in de Waterwet gestelde veiligheidsnormen. Daarbij wordt minimaal 12-jaarlijks de stand van zaken gerapporteerd aan de eerste en tweede kamer. Voor deze rapportage wordt een toets uitgevoerd met het WTI. Voor de toetsing wordt een instrumentarium ter beschikking gesteld met Hydraulische Randvoorwaarden en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid.

Voor de uitvoering van de derde toetsronde, periode 2006-2011, zijn in september 2007 de Hydraulische Randvoorwaarden (HR2006) en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV2006) ter beschikking gesteld. Als gevolg van de afspraken op bestuurlijk/beleidsmatig niveau, gemaakt in het kader van het Bestuursakkoord Water (april 2011), is afgesproken dat de vierde toetsing wordt verlengd van 6 naar 12 jaar. Ontwikkelingen rondom een nieuwe norm hebben tot gevolg dat het concept Wettelijk Toets Instrumentarium 2011 (concept WTI 2011) niet is vastgesteld, maar het instrumentarium voor de vierde toetsronde in 2017 wordt uitgeleverd.

Binnen het project WTI 2017 wordt gewerkt aan de ontwikkeling van het toets instrumentarium voor de vierde landelijke toetsronde voor primaire waterkeringen. Ondanks dat het WTI 2011 de basis vormt voor het nieuwe instrumentarium, zal de uiteindelijke vorm en invulling van het WTI 2017 naar verwachting significant veranderen. Zo wordt een overstap gemaakt op een overstromingskansbenadering, wijzigt het toetsproces en wordt nieuwe kennis van faalmechanismen en watersystemen in het instrumentarium geïmplementeerd.

1.2 Effectanalyses

Ter ondersteuning van het besluitvormingsproces rondom het vast te stellen WTI 2017 is het van belang om een beeld te hebben van de praktische en beleidsmatige consequenties van gemaakte keuzes en doorgevoerde veranderingen. Deze consequenties worden verkend in zogenoemde effectanalyses.

De beoogde effectanalyses bestaan uit drie onderdelen, te weten:

1. Een *verschilanalyse* waarin de verschillen tussen de referentiesituatie (WTI 2011) en de te beoordelen situatie (WTI 2017) inzichtelijk worden gemaakt. Hierbij kan het gaan om getalsmatige verschillen in Hydraulische Randvoorwaarden, verschillen in rekenregels en/of algemene toets aanpak.
2. Een *gevolgenanalyse* waarin gebieden geïdentificeerd worden waar de in de verschilanalyse geconstateerde verschillen significante gevolgen hebben voor het rekenresultaat van beschouwde faalmechanismen (stap 1) en waarin de bevindingen tevens vertaald worden naar de gevolgen voor het landelijke veiligheidsbeeld (uit te voeren door Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving¹).
3. Een *consequentieanalyse*¹ waarin de geïdentificeerde gevolgen voor het veiligheidsbeeld vertaald worden naar consequenties voor lopende projecten en processen. Dit derde onderdeel wordt net als stap 2 uitgevoerd door Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving.

¹ Met KPR wordt overlegd op welke wijze deze analyses invulling krijgen. Hierbij is het de bedoeling dat consequentieanalyses voor OI en WTI worden geïntegreerd.

Op hoofdlijn zijn er twee belangrijke wijzigingen die in de effectanalyses beschouwd zullen worden, te weten de introductie van de overstromingskansbenadering (concept 'nieuwe normering') en de implementatie van nieuwe kennis (nieuwe rekenregels, modellen/toets instrumentarium en Hydraulische Belastingen).

De gevolgen van de nieuwe normering zijn op hoofdlijnen in kaart gebracht met de impactanalyse Nieuwe normering [1]. Uit een binnen het Deelprogramma Veiligheid uitgevoerd onderzoek [2] volgt dat de benodigde versterkingskosten (inclusief het opvangen van klimaatverandering tot 2050) ca. 12 tot 14 miljard euro bedragen.

Binnen WTI worden, gegeven de effecten van de nieuwe normering, de effecten van de nieuwe kennis in kaart gebracht. De selectie van de in de effectanalyses nader te onderzoeken WTI-aspecten heeft plaatsgevonden op basis van de rapportage "Verkenning impact WTI 2017 t.o.v. de concept nieuwe normering, selectie nader te onderzoeken aspecten" [1]. De in de rapportage beschreven vergelijking van uitgangspunten betreft een vergelijking op hoofdlijnen, waarbij de impact van geïdentificeerde verschillen op kwalitatieve wijze (expert judgement) heeft plaatsgevonden.

1.3 Doelstelling van deze verschilanalyse

Deze rapportage behelst stap 1 van de effectanalyses, een verschilanalyse. Doelstelling van deze verschilanalyse is inzicht te geven in de verschillen tussen het WTI 2011 en het WTI 2017 voor het faalmechanisme piping. Hierbij zijn de verschillen in de Sellmeijer-formulering, nieuwe veiligheidsfactoren, gewijzigde schematisering (bepaling en onzekerheden) van de grondparameters en het meenemen van het heave-criterium meegenomen. Centrale vraag achter deze verschilanalyse is:

Leiden de wijzigingen van de voorschriften voor piping in het WTI 2017 tot significant andere uitkomsten van analyses (bovenop de versterkingsopgave ten gevolge van het concept 'nieuwe normering' – dus gegeven de nieuwe normen)?

De verschillen tussen de voorschriften rondom het faalmechanisme piping zijn voor meerdere representatieve doorsneden voor zover mogelijk kwantitatief berekend. Hierbij is geprobeerd zo consistent mogelijk de ontwikkeling van het VTV/HR 2006 via het concept WTI 2011 naar het WTI 2017 in kaart te brengen, aangezien het VTV/HR 2006 voor veel beheerders het referentiepunt zal zijn. De verschillen in omgang met grondparameters en schematisering zijn alleen kwalitatief beschreven. Deze informatie is van belang als input voor de (beleidsmatige) besluitvorming.

1.4 Afbakening

De verschilanalyse is geen toetsing, het gaat om een eerste overzicht van de veranderingen door het toepassen van het WTI 2017. Hiertoe is gekozen voor een pragmatische insteek, waarbij de volgende keuzes en aannames zijn gedaan:

- De verschilanalyse wordt uitgevoerd op het niveau van toetslaag 2a (per vak en mechanisme, semi-probabilistisch). Daarbij wordt opgemerkt dat de semi-probabilistische toets conservatiever kan zijn dan de probabilistische toets op niveau 2b. Uit de kalibratiestudie voor piping volgt dat de conclusies van deze effectanalyse niet zullen veranderen bij een 2b analyse.
- De verschilanalyse piping heeft alleen betrekking op dijken (grondconstructies).
- De effecten van de combinatie van de veranderingen in de maatgevende belasting en rekenregels van de overige faalmechanismen zijn niet onderzocht. Deze analyse wordt uitgevoerd door het Kennisplatform Risicobenadering.

- De resultaten betreffen de getalsmatige verschillen. De analyse is gebaseerd op per gebied representatieve profielen. De specifieke informatie over de werkelijke robuustheid van de keringen (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een voorland) kan invloed hebben op het resultaat van deze analyse.

1.5 Leeswijzer

In dit rapport is de volgende indeling aangehouden: allereerst geeft hoofdstuk 2 het overzicht van de veranderingen in de benadering van het faalmechanisme piping tussen VTV/HR2006, concept WTI 2011 en WTI 2017. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de werkwijze en de uitgangspunten van de numerieke analyse beschreven. De resultaten van deze analyse zijn in hoofdstuk 4 gepresenteerd. Ten slotte geeft hoofdstuk 5 de conclusies van deze verschilanalyse.

2 Veranderingen in toets op piping

2.1 Algemeen

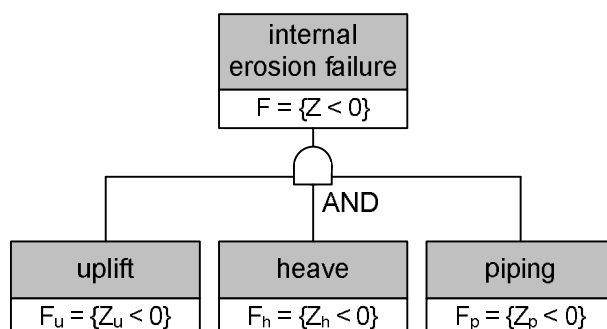
Er zijn een aantal veranderingen in de toets op piping in de loop der jaren opgetreden. Voor deze vershilanalyse wordt gekeken naar de veranderingen tussen VTV/HR 2006, concept WTI 2011 en WTI 2017. In de volgende paragrafen wordt per (theoretische) verandering beschreven wat de aanpassingen inhouden.

2.2 Meenemen van het deelmechanisme Heave

Tot op heden worden voor het toetsspoor piping (STPH) voor dijken zonder kwelwegverlengende elementen, zoals kwelschermen, slechts de deelmechanismen uplift van de binnendijkse deklaag en terugschrijdende (interne) erosie (ook wel aangeduid als piping) in de watervoerende zandlaag beschouwd. In WTI2017 wordt ook het deelmechanisme heave opgenomen voor dijken met een deklaag aan de landzijde.

Heave kan worden gezien als een logische tussenstap tussen uplift en terugschrijdende erosie, volgens het in Nederland gehanteerde conceptuele model voor het faalmechanisme piping. Het optreden van piping is nl. afhankelijk van het optreden van heave, want als er geen zand verticaal uittreedt, kan interne erosie niet op gang komen. Hetzelfde geldt voor uplift, als de deklaag niet opgedrukt wordt en opbarst, kan geen materiaaltransport optreden.

In termen van faalkansanalyses wordt deze afhankelijkheid gemodelleerd als een parallel systeem wat inhoudt dat de deelmechanismen in een foutenboom (Figuur 2.1) met een AND-gate zijn verbonden.



Figuur 2.1 Foutenboom faalmechanisme piping met onderliggende deelmechanismen

Dat houdt in dat alle deelmechanismen moeten optreden voor falen van de waterkering als gevolg van piping. Dat heeft zowel consequenties voor de probabilistische modellering als voor een semi-probabilistische toets. Voor de laatste betekent dit namelijk dat als maar één deelmechanisme als voldoende veilig kan worden beschouwd, het gehele faalmechanisme met voldoende betrouwbaarheid kan worden uitgesloten en dus ten aanzien van het toetsspoor piping goedgekeurd kan worden.

Zandtransport kan alleen optreden als de verticale uitstroomgradiënt bij de uitstredpunt een kritieke waarde voor heave overschrijdt. De corresponderende grenstoestandsfunctie is:

$$Z_h = i_{c,h} - i = i_{c,h} - \frac{\Phi_{uittrede} - h_{uittrede}}{d} \quad (2.1)$$

waarin geldt:

$i_{c,h}$	kritieke heave gradiënt [-];
i	gradiënt bij uittredepunt [-];
d	totale deklaagdikte [m];
$\Phi_{uittrede}$	stijghoogte bij uittredepunt [m];
$h_{uittrede}$	freatisch waterstand bij uittredepunt [m].

Op dit moment wordt een waarde van 0,3 gebruikt als kritieke heave gradiënt $i_{c,h}$. Deze waarde verschilt daarmee van de waarde van 0,5 die voor kunstwerken wordt gehanteerd. Het verschil tussen heave bij een kwelscherm en een deklaag is dat er bij een kwelscherm altijd een verticaal pad moet ontstaan door het aanwezige gepakte zand. Dit vergt fluidisatie van het zandpakket benedenstrooms van het kwelscherm, waarvoor een hogere gradiënt nodig is dan bij een deklaag waar de ontstane scheur gevuld wordt met een vloeibaar zand-watermengsel.

Het meenemen van het heave-criterium is meegenomen in de berekeningen voor de verschilanalyse.

2.3 Vereiste sterktefactor

Het veiligheidsformat voor piping bevat drie veiligheidsfactoren: een sterktefactor, een modelfactor (zie paragraaf 2.4) en een schematiseringsfactor (zie paragraaf 2.5). Deze paragraaf beschrijft de verschillen tussen de sterktefactor in het VTV 2006 en het WTI 2017.

De vereiste sterktefactor γ_n voor de originele Sellmeijer-formule in het WTI 2006 was gelijk aan 1,2. De vereiste sterktefactor voor de gereviseerde formule in het WTI 2017 zal afhangen van het vereiste betrouwbaarheidsniveau. Dit geldt ook voor de sterktefactoren voor de andere twee deelmechanismen. Het vereiste betrouwbaarheidsniveau wordt bepaald door het geldende normfrequentie, het lengte-effect (afhankelijk van lengte van een segment) en de faalkansruimtefactor voor het mechanisme piping. In het WTI 2011 hing de sterktefactor voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie ook af van de normfrequentie, waarbij indirect ook een lengte-effect was verdisconteerd. Hieronder is per toetsinstrumentarium de aanpak omtrent de sterktefactor gepresenteerd.

- VTV 2006: $\gamma_n = 1,2$ (voor het deelmechanisme uplift gold ook een constante waarde).
- WTI 2011: Zie Tabel 2.1 voor de sterktefactoren voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie (voor het deelmechanisme uplift gold een constante waarde).

Normfrequentie	γ_n
1:250	1,2
1:500	1,2
1:1250	1,4
1:2.000	1,4
1:4.000	1,4
1:10.000	1,5

Tabel 2.1 Voorgestelde sterktefactoren voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie voor alle normklassen (concept WTI 2011)

- WTI 2017:

In het WTI 2017 wordt de norm op doorsnedeniveau (toelaatbare faalkans) wordt bepaald met:

$$P_{T,doorsnede} = \frac{\omega * P_T}{N} \quad (2.2)$$

waarin:

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b} \quad (2.3)$$

waarin geldt:

P_T	is de toelaatbare faalkans van een dijktraject [per jaar]
$P_{T,doorsnede}$	is de toelaatbare faalkans van een dijkdoorsnede [per jaar]
N	is de lengte-factor [-]
$L_{traject}$	is de totale lengte van het traject [m]
a	is de fractie van de lengte die gevoelig is voor piping [-]
b	is een maat voor de intensiteit van het lengte-effect, binnen het segment dat gevoelig is voor piping [m]
ω	is de faalkansruimtefactor voor het faalmechanisme piping [-]

De parameters a en b zijn aanbevolen constanten (OI 2014, [6]). Voor het bovenrivierengebied wordt $a = 0,9$ toegepast en voor het benedenrivierengebied en de kust wordt $a = 0,4$ toegepast. De waarde van b is 300. Binnen de WTI kalibratie zijn deze waarden en andere onderzocht, maar als gevolg van de complexiteit van het probleem en het toegepaste berekeningsalgoritme heeft de kalibratiestudie geen concluderende resultaten opgeleverd. In deze verschilanalyse is gerekend met één constante waarde voor alle gebieden gelijk aan voor de parameter $a = 0,75$ (gemiddelde waarde). Dit resulteert in een onderschatting van het pipingprobleem voor het bovenrivierengebied en een overschatting in de andere systemen.

Het bij het dijkvak behorende vereiste betrouwbaarheidsniveau $\beta_{T,cross}$ wordt berekend met:

$$\beta_{T,doorsnede} = \Phi^{-1}(1 - P_{T,doorsnede}) \quad (2.4)$$

Het representatieve bereik van het vereiste betrouwbaarheidsniveau is $3,5 < \beta_{T,doorsnede} < 5,5$. De gekalibreerde formules om de sterktefactoren voor elk sub-mechanisme van het faalmechanisme piping te berekenen zijn, alleen geldig voor $1.0 \leq \gamma \leq 2.0$ [5]:

Uplift:

$$\gamma_{n,up} = 0,6 \times \beta_{T,doorsnede} - 1,5 \quad (2.5)$$

Heave:

$$\gamma_{n,he} = 0,6 \times \beta_{T,doorsnede} - 1,9 \quad (2.6)$$

Piping:

$$\gamma_{n,pip} = 0,7 \times \beta_{T,doorsnede} - 1,7 \quad (2.7)$$

De sterktefactoren voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie (piping) binnen het concept WTI 2011 en het WTI 2017 zullen hiermee gemiddeld hoger zijn dan binnen het WTI 2006 (vaste waarde), afhankelijk van de normering en de trajectlengte.

Binnen het VTV 2006 en het concept WTI 2011 was de sterktefactor voor het deelmechanisme uplift onafhankelijk van de normhoogte en daarmee een constante waarde. Het deelmechanisme heave was in deze instrumentaria geen criterium. De verschillen in de sterktefactoren voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie (piping) zijn meegenomen in de numerieke analyse. De wijzigingen in de sterktefactoren voor heave en uplift zijn niet onderzocht in de analyse op scenario-niveau (zie paragraaf 3.5) Binnen deze benadering is er dus gerekend met één waarde voor deze deelmechanismen. De nieuwe sterktefactoren voor uplift en heave zijn wel gebruikt om de actuele faalkansen per dijkvak te berekenen voor de semi-probabilistische analyse conform het WTI 2017.

2.4 Modelfactor

Binnen het WTI 2017 wordt de modelonzekerheid in rekening gebracht door middel van de modelfactor. Deze is voor de semi-probabilistische toets gelijk aan 1 en verschilt daarmee niet van de eerdere toetsinstrumenten, waar deze factor ontbrak. In deze gevallen was de modelonzekerheid verdisconteerd d.m.v. de sterktefactor. De modelfactor in de probabilistische berekeningen (ook van de kalibratie) heeft daarentegen wel een verdeling en houdt zo rekening met de imperfectie van het model (gemiddeld 1). Qua veiligheid zit ook dat onderdeel uiteindelijk in de overall vereiste veiligheidsfactor.

Om bovengenoemde redenen is invloed van de modelfactor is niet onderzocht in deze verschilanalyse.

2.5 Ondergrondschematisering

De ondergrondschematisering is van groot belang voor het faalmechanisme piping. Volgens het VTV 2006 was de interpretatie van grondonderzoek relatief vrij. Hierdoor werd er meestal gewerkt met conservatieve schematiseringen, wat weer leidde tot meer afkeuringen.

In 2011 is de schematiseringsfactor ingevoerd [8]. Het doel was hiermee de onzekerheid in de ondergrondschematisering (laagopbouw en waterspanningen) te verdisconteren. Deze factor kon een waarde aannemen tussen 1 en 1,4.

Binnen WTI 2017 wordt gebruik gemaakt van de stochastische ondergrondschematisering (WTI-SOS) [9]. Hiermee is de schematiseringsfactor komen te vervallen. Met de SOS wordt per dijkvak gerekend met meerdere ondergrondscenario's met een bijbehorende kans van voorkomen.

De verschillende aanpak van de ondergrondschematisering is niet meegenomen in de verschilanalyse. (Er is in de berekeningen niet gerekend met de schematiseringsfactor: deze is gelijk gehouden aan 1.) De SOS is een hulpmiddel om de onzekerheden van de ondergrond expliciet in rekening te brengen. Wanneer de ondergrondschematisering vroeger goed gemaakt is, zal dit niet tot verschillen leiden.

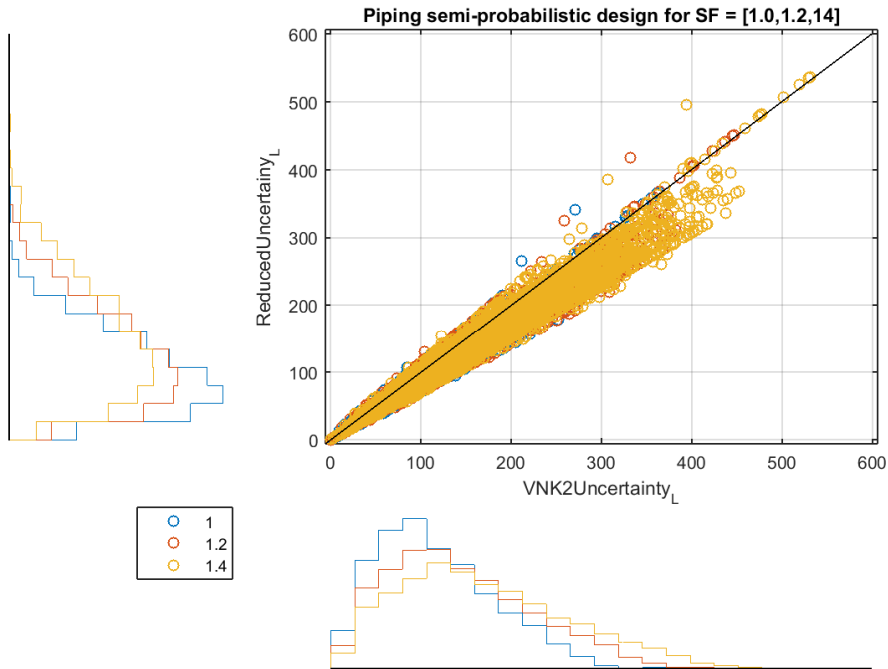
2.6 Bepaling d70 en doorlatendheid

Voor berekeningen met de rekenregel van Sellmeijer is als invoer een waarde voor de korreldiameter van het watervoerende pakket nodig. Om deze te karakteriseren is op basis van proeven op homogeen zand met zeer beperkte spreiding de d70 als maat voor de korrelgrootte vastgesteld. Het is uiterst lastig om een d70 in het veld te bepalen die representatief is voor het hele gebied waarin het pipingproces zich afspeelt. (Voordat piping tot een doorbraak leidt is het namelijk nodig dat een belangrijk deel van de zandkorrels in het traject van de pipe opgenomen en getransporteerd kunnen worden.) Aangezien natuurlijke zandpakketten een grote ruimtelijke variatie hebben en het effect hiervan nog niet voldoende geanalyseerd en eenduidig is vastgelegd, dient een equivalente waarde voor de d70, een $d70_{eq}$, te worden gebruikt. Voor de bepaling van de $d70_{eq}$ dienen de modale waarden van korrelgrootteverdelingen als uitgangspunt, welke representatief zijn voor het grootste deel van de zandpakketten in Nederland. De variatiecoëfficiënt van de modale waarde is een voldoende karakterisering van de variatie van de $d70_{eq}$ van de gedefinieerde zandpakketten. Voor de spreiding van de korrelgrootte wordt de spreiding van de modale waarde van eenheden in zandpakketten als representatief geacht. Uit analyse van de TNO database blijkt de variatiecoëfficiënt (COV) van de modale waarde van de d70 12% te zijn. De waarde voor variatiecoëfficiënten voor rivierzandpakketten is daarbij maatgevend geacht.

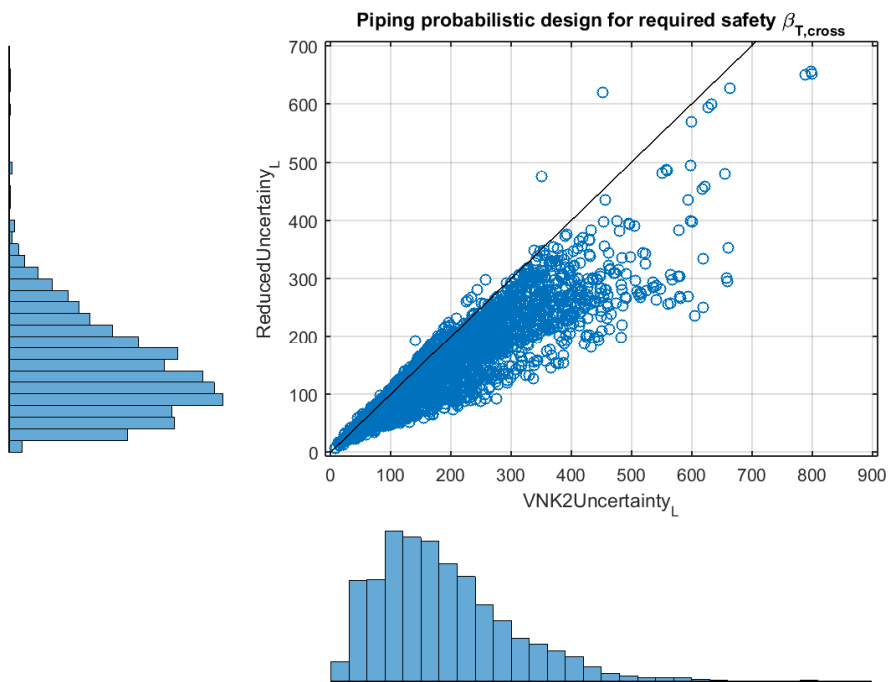
De parameter doorlatendheid is voor pipingberekeningen niet goed vast te stellen. De spreiding die in VNK is meegenomen is een theoretische spreiding en vanwege de stochastische benadering te groot. Bovendien is deze spreiding gebaseerd op minimale en maximale waarden van enkele laagjes die eventueel aanwezig kunnen zijn, maar nauwelijks invloed hebben op de bulkdoorlatendheid van het hele pakket waardoorheen de pipe zich moet gaan vormen. Door experts wordt aangegeven dat de gemiddelde waarde van de doorlatendheid, zoals opgenomen in de VNK-schematiseringen, over het algemeen correct is. Deze kan in werkelijkheid hooguit twee keer zo groot of klein zijn als deze gemiddelde waarde. Dat betekent dat als spreiding een COV van 50% kan worden gehanteerd.

In de kwantitatieve verschilanalyse is gerekend met karakteristieke waarden voor de d70 en de doorlatendheid k . Deze waarden zijn afgeleid van de gemiddelde waarden en de bijbehorende standaardafwijkingen zoals deze in de VNK-database zijn opgenomen. Gedurende het proces zijn discussies gevoerd en is vastgesteld dat deze spreidingen te groot zijn, zoals ook hierboven beschreven.

Het was echter niet meer mogelijk om bovenstaande 'default' waarden voor d70 en doorlatendheid mee te nemen. Deze aspecten zullen in een update van deze verschilanalyse in 2016 worden meegenomen. Indien gerekend wordt met een kleinere spreiding zal dit minder afkeur ten gevolg hebben. De verschillen in resultaten voor deze spreidingen zijn in onderstaande figuren gepresenteerd.



Figuur 2.2 Vergelijking tussen de semi-probabilistische analysesresultaten, kwelweglengte L met VNK onzekerheden en L met aangepaste onzekerheden ($COV(k)=0.50$ en $COV(d_{70})=0.15$)



Figuur 2.3 Vergelijking tussen de probabilistische analysesresultaten, kwelweglengte L met VNK onzekerheden en L met aangepaste onzekerheden ($COV(k)=0.50$ en $COV(d_{70})=0.15$)

2.7 Rekenmodel: gereviseerde Sellmeijer-formule

In het WTI 2017 zal een aangepaste Sellmeijer-formule worden toegepast.

In het VTV 2006 was het mogelijk een de toets uit te voeren met het model van Sellmeijer of met de empirische rekenregels van Bligh. Het toepassingsgebied voor het model lag tussen 10 en 18 ΔH . In het SBW onderzoek is aangetoond dat de regel van Bligh niet toepasbaar is in Nederland. Tevens heeft een hervalidatie van het rekenmodel van Sellmeijer plaatsgevonden. Deze rapportage beschrijft de verschillen tussen de oude en gereviseerde Sellmeijer-formule.

Onderstaand zijn de originele en aangepaste formulering weergegeven:

- Oude formule (VTV/HR 2006)

$$\frac{H_c}{L} = \alpha c \frac{\gamma_{sub.particles}}{\gamma_{water}} \tan(\theta_{Sellmeijer.original}) (0,68 - 0,1 \ln(c)) \quad (2.8)$$

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right) \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0.28}{2.8} - 1} \quad (2.9)$$

$$c = \eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.10)$$

$$\kappa = \frac{\nu_{water}}{g} k \quad (2.11)$$

- Nieuwe formule (WTI 2011/2017)

$$\frac{H_c}{L} = F_{resistance} F_{scale} F_{geometry} \quad (2.12)$$

$$F_{resistance} = \eta \frac{\gamma_{sub.particles}}{\gamma_{water}} \tan(\theta_{Sellmeijer.revised}) \quad (2.13)$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70.m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70.m}}\right)^{0.4} \quad (2.14)$$

$$F_{geometry} = 0,91 \left(\frac{D}{L}\right) \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0.28}{2.8} - 1 + 0.04} \quad (2.15)$$

waarin:

H_c	kritiek verval over de waterkering [m]
$\gamma_{sub.particles}$	(schijnbaar) volumiek gewicht van de zandkorrels onder water $\gamma_{sub.particles} = \gamma_{particles} - \gamma_{water}$ met ($\gamma_{particles} = 26,5$) [kN/m ³]
γ_{water}	volumegewicht van water ($\gamma_{water} = 9,81$) [kN/m ³]
θ	rolweerstandshoek van de zandkorrels ($\theta = 37$) [°]
η	coëfficiënt van White ($\eta = 0,25$) [-]
κ	intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m ²]
k	specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige/bovenste zandlaag [m/s]
ν_{water}	kinematische viscositeit van water bij 10°C ($\nu_{water} = 1,33 \cdot 10^{-6}$) [m ² /s]
g	versnelling van de zwaartekracht ($g = 9,81$) [m/s ²]

d_{70}	karakteristieke waarde van de 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]
$d_{70.m}$	gemiddelde d_{70} van de in de kleine schaalproeven toegepaste zandsorten, waarop deze formule is gefit ($d_{70.m} = 2,08 \cdot 10^{-4}$) [m]
D	karakteristieke waarde voor de dikte van het zandpakket [m]
L	karakteristieke lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]

De eerste term, $F_{resistance}$, beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe. De tweede term, F_{scale} , reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft. (Voor schaalproeven is dit een belangrijke verhouding.) De laatste term, $F_{geometry}$, beschrijft de invloed van de ondergrondgeometrie op de grondwaterstroming. Deze is afhankelijk van de verhouding tussen dikte en lengte van de aanwezige zandlagen. In geval van een meerlagensysteem is deze factor ook afhankelijk van het doorlatendheidscontrast tussen de zandlagen. De geometriefactor is situatieafhankelijk en moet worden bepaald met het eindige elementen model MSeep.

De verschillen tussen beide formuleringen zijn opgenomen in Tabel 2.2. In de aangepaste rekenregel, gebaseerd op het twee-krachtenmodel, is de invloed van de korreldiameter d_{70} op het kritieke verval gereduceerd, door deze te normaliseren aan de gemiddelde waarde uit de schaalproeven $d_{70.m}$. De aangepaste regel geeft hetzelfde resultaat als de originele regel voor een korrelgrootte d_{70} van 208 μm en gaat steeds meer afwijken naarmate de d_{70} meer afwijkt van deze waarde. Met betrekking tot de korrelgrootte is voor $d_{70} < d_{70.m}$ de gereviseerde formulering minder streng dan de originele, terwijl zij voor $d_{70} > d_{70.m}$ een strengere eis berekent.

De verlaging van de rolweerstandshoek θ zorgt voor een strengere eis t.o.v. berekeningen met de oude waarde. De aanpassing van de geometriefactor zorgt daarnaast ook voor een strengere eis. De invloed van het wegvallen van de factor $0,68 - 0,1 \ln(c)$ uit de oude 4-krachten-pipingregel (zie Tabel 2.1) hangt af van de d_{70} - en de k -waarde (doorlatendheid). De aangepaste Sellmeijer-formulering zal over het algemeen een kleiner kritiek verhang uitrekenen.

Origineel	Gerevisceerd
d_{70}	$d_{70.m} \left(\frac{d_{70}}{d_{70.m}} \right)^{0.4}$
$\theta_{\text{Sellmeijer.original}} = 41^\circ$	$\theta_{\text{Sellmeijer.revised}} = 37^\circ$
α	$0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{0.04} * \alpha$
$0,68 - 0,1 \ln \left(\eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$	—

Tabel 2.2 Overzicht verschillen tussen originele en aangepaste Sellmeijer-formule

De verschillen in de formulering is meegenomen in de berekeningen voor de verschilanalyse. Het toepassen van Bligh in 2006 en het afsnuiten op $18H$ is buiten beschouwing gelaten.

2.8 Eenvoudige toets, schematisering voorland en getijdenafzettingen

In de eenvoudige toets en rondom de schematisering van voorland en getijdenafzettingen zijn aanpassingen gaande. Op het moment van opstellen van deze verschilanalyse wordt nog een definitief besluit door ENW genomen of deze aanpassingen aan het VTV mogen worden toegevoegd.

Indien een belasting van hoog water kortdurend is, zal de kans op het vormen van een doorgaande pipe als gevolg van deze belasting klein zijn. Het ontwikkelen van een doorgaande pipe onder een kering kost namelijk tijd. De beslisregel voor de eenvoudige toets houdt in dat als een keringbeheerder voldoende betrouwbaar kan aantonen dat er in het verleden geen zandmeevoerende wellen zijn waargenomen, in de calamiteitenplannen voor de kering rekening is gehouden met maatregelen die moeten worden genomen wanneer twee hoogwatergolven achter elkaar optreden en er ook geen sprake is van een aansluiting op een constructie of van een doorgaande leiding onder een kering, dan mag de faalkans als verwaarloosbaar klein worden verondersteld, indien de kwelweglengte groter is dan 50 m en rivierafvoeren geen rol spelen bij de bepaling van het verval. Dit is het geval in volgende gebieden: Waddenzee (oost en west), Noordzeekust (noord, midden en zuid), Oosterschelde en Westerschelde. Deze regel in de eenvoudige toets leidt er dus toe dat in niet-riviergedomineerde systemen piping een minder grote rol speelt. De resultaten langs de windgedreven systemen zijn minder belangrijk omdat hier o.b.v. de eenvoudige toets al tot goedkeuren is gekomen. Let wel, meren zijn op dit moment uitgesloten van de eenvoudige toetsregel op tijdsafhankelijkheid omdat niet voldoende scherp kan worden afgebakend welke locaties binnen het systeem worden gedomineerd door de wind of door het meerpeil.

In gevallen waar sprake is van een voorland wordt bij de bepaling van de intredepunt dit in rekening gebracht in de vorm van een zogenaamde fictieve kwelweglengte. Voor de bepaling van dit fictieve intredepunt is een model beschikbaar, baserend op geohydrologische modellen die al beschreven staan in de Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken Deel 1 – Bovenriviereengebied [LOR1, Appendix B] en in het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken [TRWD, bijlage 4]. De ligging van het intredepunt voor de bepaling van de kwelweglengte (fictieve intredepunt) wordt beïnvloed door de configuratie van het buitendijkse gebied. De lengte van het tijdens hoogwater onder water staande voorland en de samenstelling van de bodemlagen hebben invloed op de ligging van het fictieve intredepunt. Door het optellen van deze fictieve kwelweglengteverandering t.o.v. de ligging van de buitenkruinlijn kan het intredepunt voor piping meer richting voorland worden verlegd. De geohydrologische beschouwing is theoretisch niet meer correct wanneer het kanaaltje onder het voorland loopt. Wanneer de fictieve kwelweglengte groter wordt dan de dijkbasis moet daarom worden aangetoond dat de fictieve kwelweglengte volledig mag worden meegenomen. Dit is mogelijk met bijvoorbeeld het programma DGFlow.

Het optreden van piping in een afzetting met een sterke afwisseling van klei- en zandlaagjes is slecht voorstelbaar. Het toepassen van de rekenregel van Sellmeijer voor deze gebieden zal leiden tot afkeuren van veel dijkstrekkings. In de Stochastische Ondergrond Schematisering (WTI-SOS) kunnen de eenheden van deze afzettingen waarin het optreden van piping naar Sellmeijer fysisch gezien niet waarschijnlijk is worden benoemd. Deze eenheden kunnen in de schematisatie als niet watervoerende laag worden gemodelleerd. Wanneer de getijdeafzetting aan het oppervlak of direct onder klei- en veenlagen ligt, maakt deze laag deel uit van de deklaag.

De genoemde aspecten in deze paragraaf zijn niet specifiek beschouwd in de getalsmatige verschilanalyse.

3 Werkwijze en uitgangspunten

3.1 Te beschouwen verschillen

In de rapportage “Verkenning impact WTI 2017 t.o.v. de concept nieuwe normering, selectie nader te onderzoeken aspecten” [1] is geconcludeerd dat de volgende, van het concept WTI 2011 afwijkende, WTI 2017 uitgangspuntenmogelijk significante impact hebben op de versterkingsopgave:

- Het toepassen van de gereviseerde Sellmeijer-formulering voor de beoordeling van piping;
- Het wijzigen van de sterktefactor op basis van het vereiste betrouwbaarheidsniveau, met inachtneming van het lengte-effect en de faalkansruimtefactor voor piping;
- Andere omgang met onzekerheden in grondparameters, te weten een nieuwe aanpak van de ondergrondschematisatie (en schematiseringsfactor) d.m.v. de zgn. stochastische ondergrondschematisatie (SOS) en een nieuwe benadering voor de d70-bepaling;
- Het verlichtend effect van het meenemen van het deelmechanisme ‘Heave’ bij de beoordeling van het faalmechanisme ‘Piping’.

De verschilanalyse betreft een kwalitatieve en kwantitatieve analyse van de veranderingen binnen het toets instrumentarium. De veranderde aanpak m.b.t. “onzekerheden in grondparameters” (SOS en bepaling d70), is alleen kwalitatief beschouwd.

3.2 Referentiepunten voor de analyse

Deze verschilanalyse beoogt inzicht te geven in de verschillen in toets voorschriften voor het faalmechanisme Piping tussen het WTI 2017 en het concept WTI2011. Er viel echter veel voor te zeggen om ook te kijken naar het verschil tussen het WTI 2017 en het VTV/HR 2006: de vierde toets ronde in 2011 is nl. niet van start gegaan en het concept WTI 2011 is nooit vastgesteld (VTV/HR 2006 is het laatst vastgestelde instrumentarium). Hoewel de verschillen tussen het concept WTI 2011 en het VTV/HR 2006 beschreven zijn in Effectanalyse Concept WTI2011 (2 juli 2012) [3], is het VTV/HR 2006 ook betrokken in de verschilanalyse, omdat dit instrumentarium voor veel beheerders het referentiepunt zal zijn.

3.3 Opzet numerieke analyses

Tabel 3.1 geeft weer welke analyses zijn uitgevoerd om de verschillen kwantitatief in kaart te brengen. In principe komt analyse A overeen met het VTV/HR 2006 en analyse C met het WTI 2017. Tussenstap B1 laat zien wat de invloed is van andere sterktefactoren en de gereviseerde Sellmeijer-formulering t.o.v. het VTV/HR 2006. Daarmee komt analyse B1 overeen met het concept WTI 2011. Tussenstap B2 maakt de overstap naar de nieuwe normering en bijbehorende hydraulische randvoorwaarden inzichtelijk. In de analyses A en B1 is gerekend met HR 2006. In de overige analyses is gerekend met de nieuwe hydraulische randvoorwaarden. Onderscheid tussen de afkeurwaarde (C1) en een signaalwaarde (C2) (ca. 3 keer strenger) is gemaakt voor analyse C. In geval van de oude normering zijn de HR 2006 [4] gebruikt en in geval van de nieuwe normering de HR 2017.

Analyse	Normering	Sterktefactor	Sellmeijer	Heave
A	Oud	Vaste waarde: 1.2	Origineel	Nee
B1	Oud	Afhankelijk van normering	Gereviseerd	Nee
B2	Nieuw (max. toelaatbaar)	Afhankelijk van normering	Gereviseerd	Nee
C1	Nieuw (max. toelaatbaar)	Afhankelijk van vaklengte, faalkansruimtefactor en normering	Gereviseerd	Ja
C2	Nieuw (normspecificatie)	Afhankelijk van vaklengte, faalkansruimtefactor en normering	Gereviseerd	Ja

Tabel 3.1 Overzicht uitgevoerde toetsen op de VNK-database

3.4 Gebruikte database

Voor het maken van de verschilanalyse is gekozen om gebruik te maken van de VNK-dataset. Zie Bijlage B voor een onderbouwing van deze keuze. Alleen vakken die zijn voorgeselecteerd binnen het kader van VNK konden worden doorgerekend (dit betreffen de meest piping-gevoelige vakken). Dit omdat voor andere vakken uit de database niet alle benodigde parameters voorhanden zijn.

De verschilanalyse is gemaakt op basis van de "huidige/feitelijke" toestand van de dijken, dus op basis van de VNK-database zoals deze is. Ter verduidelijking: de analyse is dus niet gemaakt op basis van parameterwaarden waarbij de keringen (precies) op orde zijn in de referentiesituatie.

In alle gevallen is gerekend met karakteristieke waarden van de aanwezige kwelweglengte, de dikte en het volumegewicht van de deklaag, de dikte en de doorlatendheid van de watervoerende lagen, de korreldiameter d_{70} en het polderpeil. Deze waarden zijn berekend met de waarden voor het gemiddelde en de (standaard)afwijking uit de VNK-database. Uitgangspunt is dat de karakteristieke waarden zoals deze worden gebruikt in het WTI2017 overeen komen met de representatieve waarden in het VTV/HR 2006 (deterministisch).

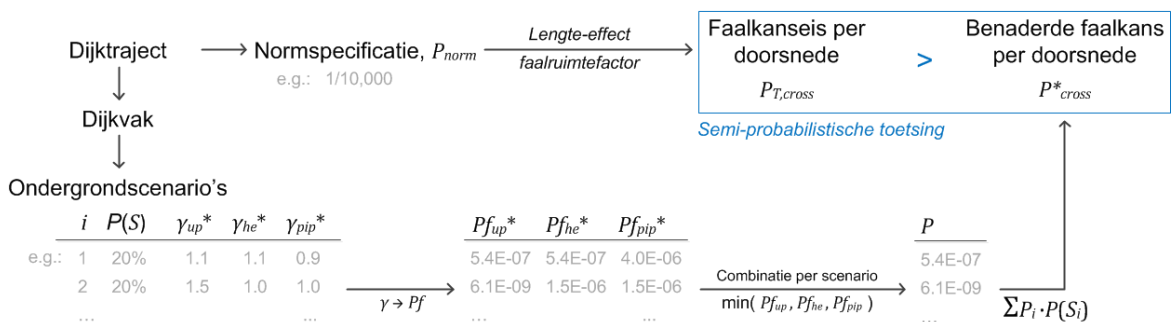
3.5 Uitvoering berekeningen

Drie benaderingen zijn gebruikt om resultaten te generen voor de vijf gedefinieerde analyses (zie Tabel 3.1):

- Op scenario-niveau

Binnen deze benadering is elk scenario afzonderlijk beoordeeld. Aan elk scenario is vervolgens een fictieve lengte toegekend. Dit is gedaan door de kans van voorkomen van het scenario te vermenigvuldigen met de bijbehorende dijkvaklengte. (Bijvoorbeeld, een scenario met een kans van voorkomen gelijk aan 40% binnen een dijkvak met een lengte van 1000 m krijgt de fictieve lengte van 400 m.) Het betreft dus voor alle vijf analyses een uniforme benadering. De benadering kan gezien worden als het opknippen van het dijkvak (wat tot de mogelijkheden behoorde binnen VTV 2006).

- Op dijkvak-niveau: grootste kans van waarschijnlijkheid vergeleken met semi-probabilistische aanpak
 Binnen deze benadering is per dijkvak beoordeeld. Voor de analyses A, B1 en B2 (voorschriften 2006 en 2011) is het scenario met de grootste kans van voorkomen representatief voor de gehele vaklengte. In geval van twee scenario's met gelijke kansen van voorkomen, is gekozen voor het meest conservatieve scenario van deze (zie ook volgende benadering). Voor toets C1 en C2 is de benadering conform WTI2017 (semi-probabilistisch). Hierbij worden alle scenario's meegenomen. Zie ook Figuur 3.2.
- Op dijkvak-niveau: meest conservatieve scenario vergeleken met semi-probabilistische aanpak
 Ook binnen deze benadering is per dijkvak beoordeeld. Voor toets A, B1 en B2 (voorschriften 2006 en 2011) is het meest conservatieve scenario representatief voor de gehele vaklengte. Onder het meest conservatieve scenario wordt verstaan het scenario dat het slechtste scoort voor de toets op het deelmechanisme piping. Als deze scenario's wel voldoen voor de deelmechanismen uplift en heave wordt hier van afgeweken door op zoek te gaan naar het scenario dat niet voldoet op alle deelmechanismen en het slechtste scoort voor de toets op het deelmechanisme piping. Voor toets C1 en C2 is de benadering conform WTI2017 (semi-probabilistisch). Hierbij zijn alle scenario's meegenomen.



Figuur 3.1 Schematische weergave semi-probabilistische toets voor het faalmechanisme piping

3.6 Overige aannamen

De semi-probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met gebruik van formules 2.5 t/m 2.7, om per scenario de actuele faalkansen per deelmechanisme te berekenen vanuit de actuele sterktefactoren. Opgemerkt wordt dat deze formules niet zijn gebruikt om de sterktefactoren voor de deelmechanismen uplift en heave te bepalen in analyse C1 en C2 binnen de benadering op scenario-niveau. Dit omdat aan het begin van het proces besloten is niet naar deze verschillen te kijken. In deze analyses is, net zoals in de analyses A, B1 en B2, gerekend met de constante waarden van:

- Y_{n;uplift} = 1,1 en
- Y_{n;heave} = 1.

Verder is in alle berekeningen gerekend met de constante waarden:

- i_c = 0,3 en
- r_{exit} = 0,7.

4 Resultaten

4.1 Algemeen

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de berekeningen die gemaakt zijn om de verschillen voor het faalmechanisme piping tussen het VTV/HR 2006, het concept WTI 2011 en het WTI 2017 in kaart te brengen. Daartoe zijn vijf verschillende analyses gedefinieerd, zie Tabel 4.1. De berekeningen zijn gemaakt voor alle dijkvakken uit de beschikbare VNK-database die geschikt zijn voor de toets op het faalmechanisme piping. Het betreft 673 dijkvakken (3220 scenario's) met een totale lengte van 712,8 km. Scenario's met onbruikbare data zijn weg gefilterd. Deze scenario's zijn buiten beschouwing gelaten en de kansen van voorkomen van de overgebleven scenario's zijn daarbij evenredig aangepast (zodat de som weer gelijk is aan 100%).

Analyse	Normering	Sterktefactor	Sellmeijer	Heave
A	Oud	Vaste waarde: 1.2	Origineel	Nee
B1	Oud	Afhankelijk van normering	Gereviseerd	Nee
B2	Nieuw (max. toelaatbaar)	Afhankelijk van normering	Gereviseerd	Nee
C1	Nieuw (max. toelaatbaar)	Afhankelijk van vaklengte, faalkansruimtefactor en normering	Gereviseerd	Ja
C2	Nieuw (normspecificatie)	Afhankelijk van vaklengte, faalkansruimtefactor en normering	Gereviseerd	Ja

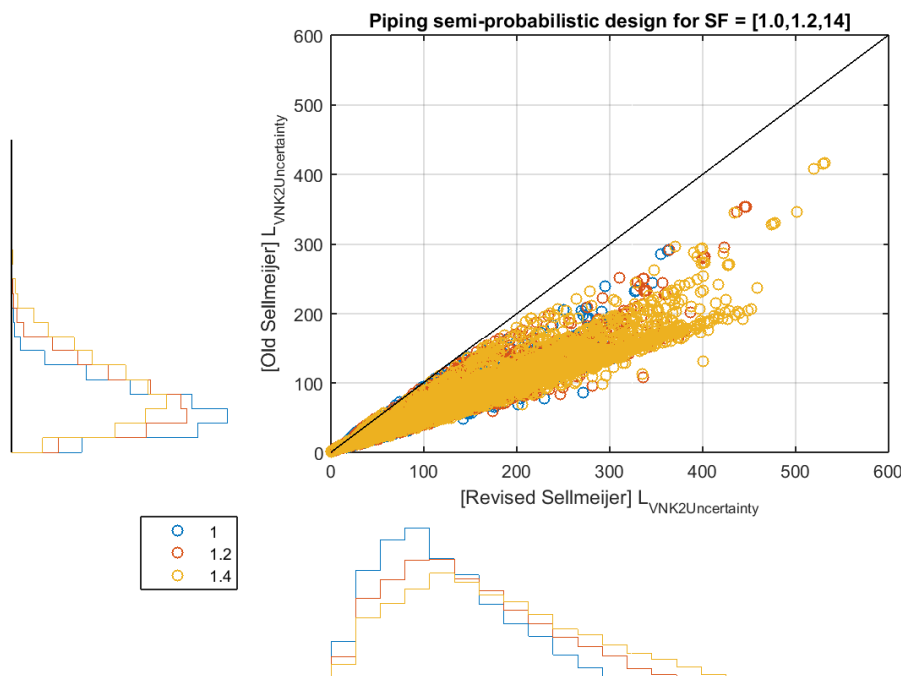
Tabel 4.1 Overzicht uitgevoerde toetsen op de VNK-database

4.2 Resultaten benadering per scenario

Tabel 4.2 toont de resultaten van de gemaakte sommen voor de benadering op scenario-niveau (alle scenario's zijn apart geanalyseerd). Het grootste verschil in berekende afgekeurde lengte zit tussen analyse A en B1. Daarmee kan gesteld worden dat de aanpassing van de Sellmeijer-formule samen (zie ook Figuur 4.1) met de normafhankelijke sterktefactoren de grootste impact hebben. Het meenemen van het heave-criterium heeft nauwelijks effect: 2 scenario's worden extra goedgekeurd t.o.v. analyse B2. Hierbij moet worden vermeld dat in deze benadering de sterktefactor voor heave niet is meegenomen (deze is gelijk aan 1 in de gemaakte berekeningen), terwijl deze waarde gemiddeld toch groter zal zijn dan 1. Wanneer de sterktefactoren wel in rekening worden gebracht zal op dit deelmechanisme meer cases niet voldoen. Ook zijn voor het deelmechanisme uplift de nieuwe sterktefactoren niet in rekening gebracht binnen analyse C1 en C2 (in alle berekeningen is een waarde van 1,1 aangehouden). De nieuwe sterktefactoren voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie (WTI 2017) en nieuwe normering zorgen voor extra afgekeurde scenario's in de gemaakte analyse. De kolom met de gemiddelde afwijking van de actuele veiligheidsfactor ten opzichte van de vereiste veiligheidsfactor laat zien dat de hogere normen ook impact hebben op de mate van het aanwezige tekort aan weerstand. Dit zal dan ook om andersoortige maatregelen vragen dan de meer traditionele maatregelen. In bijlage A worden de resultaten per deelsysteem weergegeven.

Analyse	Aantal afgekeurde scenario's	Bijbehorende fictieve lengte (km)	Gem. afwijking γ_{act} / γ_n	Verklaring
A	2327	499 ²	1,05	Verschillen met resultaten 3 ^{de} toetsronde worden verklaard door het gebruik van de VNK-systematiek, het niet toepassen van Bligh/afsnuiten van Sellmeijer en het niet in beschouwing nemen van tijdsafhankelijkheid.
B1	2806	603	0,70	Toepassen gereviseerde formule en normafhankelijk sterktefactoren (incl. vast lengte-effect)
B2	2891	618	0,62	Nieuwe normering en HR. Deze analyse betreft een tussenstap om tot een goede vergelijking te komen met het WTI 2017.
C1	2925	622	0,58	Sterktefactoren (incl. lengte-effect) conform WTI 2017
C2	2979	643	0,52	Normering WTI 2017

Tabel 4.2 Resultaten benadering scenario-niveau



Figuur 4.1 Vergelijking van de benodigde kwelweglengten berekend met het originele en gereviseerde Sellmeijer-model (semi-probabilistisch)

² Wanneer de formule van Sellmeijer wordt afgesneden op 15H voldoet in deze analyse een lengte van 368 km niet.

4.3 Resultaten benadering per dijkvak

Tabel 4.3 toont de resultaten van de gemaakte sommen waarbij voor analyse A t/m B2 per dijkvak het scenario met de grootste kans van voorkomen representatief is voor de gehele vaklengte, terwijl voor analyse C (1 en 2) een semi-probabilistische benadering is toegepast, waarbij alle scenario's worden meegenomen. Deze benadering heeft vergelijkbare resultaten als de benadering op scenario-niveau. De grotere afgekeurde lengten in analyse C1 en C2 t.o.v. de scenario-benadering (Tabel 4.2) kunnen deels verklaard worden met het feit dat bij de semi-probabilistische berekeningen wel de nieuwe sterktefactoren zijn meegenomen.

Analyse	Aantal afgekeurde vakken	Bijbehorende lengte (km)
A	458	487
B1	556	600
B2	571	611
C1	614	655
C2	634	676

Tabel 4.3 Resultaten benadering per dijkvak het scenario met grootste kans van waarschijnlijkheid vergeleken met semi-probabilistische benadering

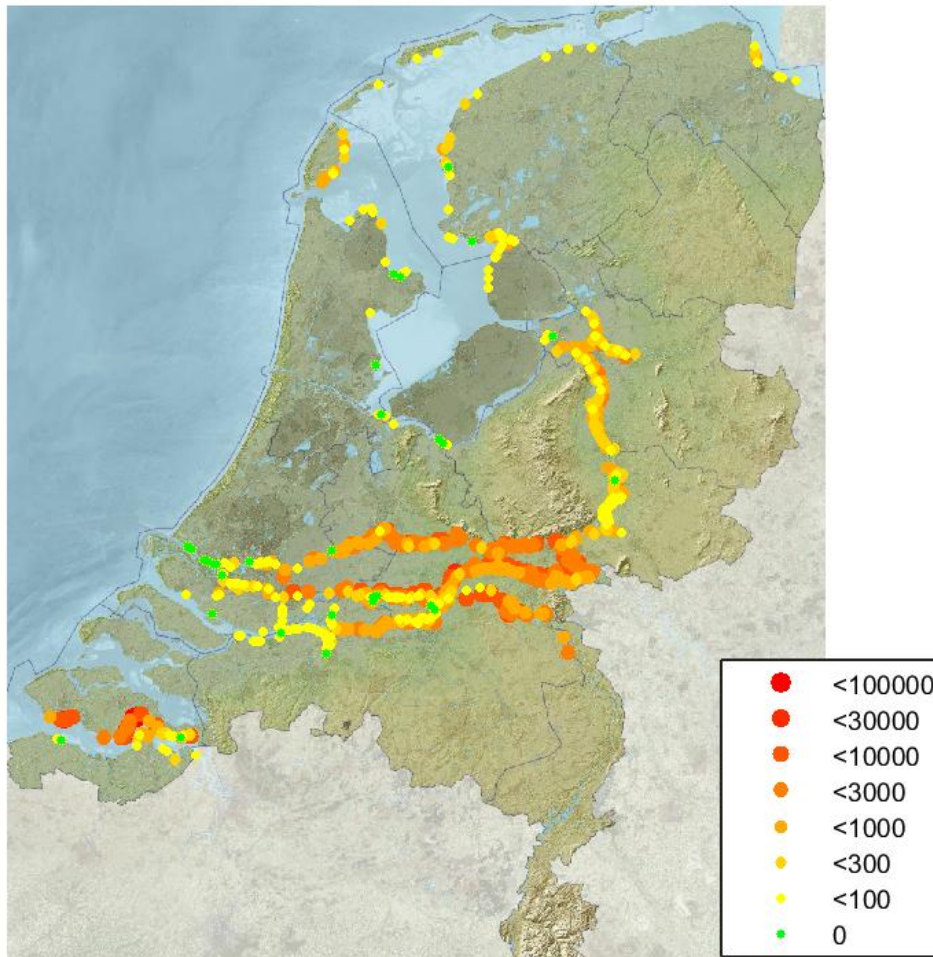
Tabel 4.4 toont de resultaten van de gemaakte sommen waarbij voor analyse A t/m B2 per dijkvak het meest conservatieve scenario representatief is voor de gehele vaklengte, terwijl voor analyse C (1 en 2) de semi-probabilistische benadering is toegepast (waarbij dus alle scenario's zijn meegenomen). Hiermee is de afgekeurde lengte in de eerste drie analyses (A t/m B2) aanzienlijk groter dan bij de twee voorgaande benaderingen. Omdat in analyse C1 en C2 per dijkvak alle ondergrondscenario's gewogen bijdragen, heeft dit een verlichtend effect ten opzichte van de eerste analyses. Ook hier hebben de aanpassing van de Sellmeijer-formule samen met de normafhankelijke sterktefactoren de grootste impact (overgang van analyse A naar B1), hoewel de verschillen tussen de analyses kleiner zijn dan bij de voorgaande benaderingen.

Analyse	Aantal afgekeurde vakken	Bijbehorende lengte (km)
A	585	630
B1	613	661
B2	625	671
C1	614	655
C2	634	676

Tabel 4.4 Resultaten benadering per dijkvak het meest ongunstigste scenario vergeleken met semi-probabilistische benadering

Figuur 4.2 geeft de resultaten van analyse C2 (semi-probabilistische benadering), welke overeenkomt met WTI 2017, grafisch weer. De mate waarmee de actuele faalkans verschilt van de maximaal toelaatbare faalkans verschilt per dijkvak. Om dit weer te geven zijn categorieën gemaakt waarin de verschilfactor ($P_{f,actueel}/P_{T,max.toelaatbaar}$) zich kan bevinden (zie legenda van de figuur). Des te groter deze factor, des te groter de afwijking van de actuele kans op piping t.o.v. de toelaatbare kans.

De analyse laat zien dat de vakken in het bovenrivierengebied samen met enkele vakken langs de Westerschelde en in het benedenrivierengebied het sterkste afwijken van de gestelde normen.



Figuur 4.2 Grafische weergave resultaten analyse C2 (de keur geeft inzicht in de verhouding tussen de actuele pipingkans en de toelaatbare pipingkans, ofwel het veiligheidstekort in kanstermen, zie ook de legenda)

4.4 Duiding resultaten

De resultaten betreffen de getalsmatige verschillen. De analyse is gebaseerd op per gebied representatieve profielen. Opmerkelijk is het grote percentage afkeuringen in de gemaakte analyses. 72-93% van alle beschouwde scenario's worden afgekeurd in de gemaakte analyses op scenario-niveau en 68-93% van alle beschouwde dijkvakken in de analyses op dijkvak-niveau. Hierbij moeten enkele kanttekeningen worden geplaatst. Allereerst zijn alleen vakken die zijn voorgeselecteerd binnen het kader van VNK doorgerekend, het betreft daarmee de meest piping-gevoelige vakken. Verder is gerekend met karakteristieke waarden voor de d_{70} en de doorlatendheid, die op basis van de gemiddelde waarde en de standaardafwijking uit de VNK-database zijn berekend. Dit leidt tot meer afkeuringen dan berekeningen op basis van karakteristieke waarden waar een grens is gesteld aan de maximale spreiding. Ook is gerekend met karakteristieke waarden van de aanwezige kwelweglengte, de dikte en het volumegewicht van de deklaag, de dikte van de watervoerende lagen en het polderpeil. Ook deze zijn volgens de VNK-systematiek bepaald.

Het is verder goed om in het achterhoofd te houden dat in het VTV 2006 naast Sellmeijer ook de formule van Bligh mocht worden toegepast. In de gevallen dat Sellmeijer is gebruikt bij de toets conform VTV 2006 werd deze afgeknot op $18H$. In werkelijkheid zijn de verschillen tussen VTV 2006 en concept WTI 2011 hiermee groter dan wanneer alleen naar de aanpassing formule wordt gekeken, zoals in de analyse is gedaan (zie ook voetnoot 2).

In de analyses C1 en C2 is gerekend met een gemiddelde parameterwaarde a uit de lengtefactor, terwijl deze gebiedspecifiek is. Dit resulteert in een onderschatting van het pipingprobleem voor het bovenrivierengebied en een overschatting in de andere systemen.

Naast bovenstaande opmerkingen moet worden vermeld dat de eenvoudige toets binnen het WTI 2017 ervoor zal zorgen dat keringen in windgedreven (niet-riviergedomineerde) gebieden over het algemeen niet worden afgekeurd op het mechanisme piping (i.v.m. tijdsafhankelijkheid). Ook specifieke informatie over de werkelijke robuustheid van de keringen (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een voorland) kan invloed hebben op het resultaat van deze analyse.

5 Conclusies

De centrale vraagstelling voor deze verschilanalyse was: "Leidt de implementatie van het faalmechanisme piping binnen het WTI 2017 tot getalsmatige verschillen tussen de oude toets voorschriften en nieuwe toets voorschriften (bovenop de versterkingsopgave ten gevolge van het concept 'nieuwe normering' – dus gegeven de nieuwe normen)?" Hierbij lag de focus op de aanpassing van de Sellmeijer-formule, van de sterktefactoren, van de omgang met onzekerheden van de grondparameters en het meenemen van het heave-criterium. De wijzigingen in de omgang met de onzekerheid van de grondparameters (schematisering en bepaling d70 en doorlatendheid) zijn alleen kwalitatief beschreven. De andere veranderingen zijn ook numeriek in kaart gebracht door representatieve doorsneden / scenario's door te analyseren. Daartoe is de VNK-database gebruikt (673 dijkvakken, 712,8 km lengte).

Op basis van gemaakte analyses zijn de volgende conclusies getrokken:

- Op basis van de benadering waarin alle ondergrondscenario's afzonderlijk zijn doorgerekend, kan worden geconcludeerd dat de revisie van de Sellmeijer-formule de grootste impact heeft: er werd 14% meer lengte afgekeurd ten opzichte van de situatie met de originele formule. Daarnaast hebben de aanpassingen van de sterktefactoren ook impact: respectievelijk werd er 9% en 10% meer lengte afgekeurd met de sterktefactoren uit het concept WTI 2011 en het WTI2017 ten opzichte van de situatie met een constante factor gelijk aan 1,2 (VTV 2006). Beide veranderingen samen geven een toename in afgekeurde lengte van 21%. Het beeld voor de riviergedomineerde systemen lijkt overeen te komen met het totaalbeeld. De nieuwe normering heeft ook invloed op het aanwezige tekort aan weerstand (de afwijking van de actuele veiligheidsfactor ten opzichte van de vereiste veiligheidsfactor). Dit zal dan ook om andersoortige maatregelen vragen dan de meer traditionele maatregelen.
- Het effect van meenemen van het heave-criterium is verwaarloosbaar klein.
- De resultaten van de benadering op dijkvakniveau waarin het ondergrondscenario met de grootste kans van voorkomen representatief is voor het hele dijkvak voor de analyses conform VTV 2006 en het concept WTI 2011 is vergeleken met de semi-probabilistische aanpak conform het WTI 2017, waarin alle scenario's gewogen worden meegenomen, ondersteunen deze bevindingen.
- De resultaten van de benadering op dijkvakniveau waarin het meest conservatieve scenario representatief is voor het hele dijkvak, voor de analyses conform VTV 2006 en het concept WTI 2011, is vergeleken met de semi-probabilistische aanpak conform het WTI 2017 geven relatief veel kleinere verschillen ten gevolge van de aanpassingen. Dit omdat in de analyses conform VTV 2006 en concept WTI 2011 worden bij deze benadering meer dijkvakken afgekeurd worden t.o.v. de bovengenoemde benaderingen.
- De semi-probabilistische analyse conform WTI 2017 laat zien dat in het bovenrivierengebied de sterkste afwijkingen van de gestelde normen worden gevonden.

Op te pakken in een evt. update van de verschilanalyse.

Indien volgend jaar in 2016 een update gemaakt wordt van deze analyse om de laatste wijzigingen in kaart te brengen wordt aanbevolen om de meest recente aanpak rondom de bepaling van de karakteristieke waarden van de doorlatendheid en d70 te gebruiken. Ook dienen de normafhankelijke sterktefactoren voor uplift en heave te worden geïmplementeerd in de analyses conform het WTI 2017.

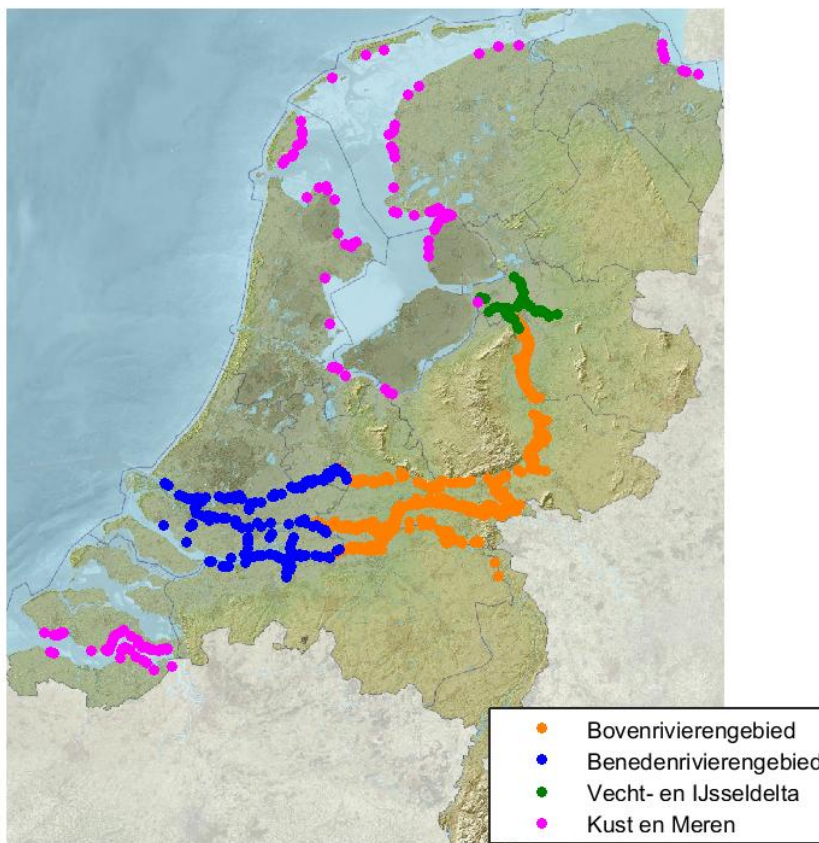
Literatuur

- [1] Hordijk, D.; de Vries, G.; Knoeff, H., 2014. Verkenning impact WTI 2017 t.o.v. de concept nieuwe normering - selectie nader te onderzoeken aspecten. Deltares. Kenmerk 1209429-001-GEO-0001-v02.
- [2] Deelprogramma Veiligheid, maart 2014.
- [3] Hordijk, D., 2014. Samenvatting effectanalyse nieuwe normering. Memo aan DGRW en Coördinatiegroep WTI 2017. Deltares memo, 3 juli 2014.
- [4] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006. Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006). Augustus 2007.
- [5] Teixeira, A.; Wojciechowska, K.; ter Horst, W., 2015. Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping. WTI 2017: Cluster C, piping failure mechanism. Deltares. Kenmerk:1220080-002.
- [6] OI2014v3 - Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen, juli 2015, CONCEPT
- [7] Förster, U; Schweckendiek, T., 2014. Beschrijving mechanismemodel voor uplift, heave en piping voor toetslaag 2a. Deltares, kenmerk 1209435-003-GEO-0001-m.
- [8] Deltares, 2012.Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen. Maart 2012.
- [9] Kruse, G.; Hijma, M.; van der Meij, R., 2014. WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS. Deltares. Kenmerk 12094320004-GEO-0001-v1.

A Resultaten scenario-benadering uitgesplitst per systeem

In figuur 4.2 zijn de locaties van de vakken uit de VNK-database grafisch weergegeven. Per watersysteem is een andere kleur gebruikt. De volgende systemen zijn onderscheiden:

- Bovenrivieren (Hydraulische regio's: 1 en 2).
- Benedenrivieren (Hydraulische regio's: 3 en 4).
- Vecht- en IJsseldelta (Hydraulische regio's: 5 en 6).
- Meren en Kust (Hydraulische regio's: 7- 10 en 15).



Figuur A.1 Geanalyseerde dijkvakken gesorteerd op watersysteem

Deze paragraaf presenteert de resultaten van de gemaakte analyses op scenario-niveau voor elk van deze vier watersystemen.

- Bovenrivieren

Het gaat in deze analyse om een lengte van 359 km (1854 scenario's). De resultaten van de analyses op scenario-niveau, zijn weergegeven in tabel A.1. 5. Doordat de actuele faalkans van de dijkvakken sterk afwijkt van de gestelde norm, heeft de aanscherping van de norm in dit gebied relatief weinig impact (zie verschil resultaten analyse C1 en C2). Het beeld komt verder overeen met het totaalbeeld (tabel 4.2).

Analyse	Aantal afgekeurde scenario's	Bijbehorende fictieve lengte (km)
A	1338	264
B1	1665	323
B2	1746	339
C1	1764	341
C2	1776	343

Tabel A.1 Resultaten benadering scenario-niveau voor het Bovenrivierengebied

- Benedenrivieren

Het gaat in deze analyse om een lengte van 166 km (657 scenario's). De resultaten van de analyses op scenario-niveau, zijn weergegeven in tabel A.2. Het beeld komt overeen met het totaalbeeld. Ook hier hebben de aanpassing van de Sellmeijer-formule samen met de normafhankelijke sterktefactoren de grootste impact.

Analyse	Aantal afgekeurde scenario's	Bijbehorende fictieve lengte (km)
A	458	107
B1	556	134
B2	560	134
C1	554	133
C2	573	139

Tabel A.2 Resultaten benadering scenario-niveau voor het Benedenrivierengebied

- Vecht- en IJsseldelta

Het gaat in deze analyse om een lengte van 43 km (243 scenario's). De resultaten van de analyses op scenario-niveau, zijn weergegeven in tabel A.3. Opvallend zijn de kleine verschillen ten opzichte van de andere systemen en het totaalbeeld. Dit komt mede door het grote percentage afkeuringen in analyse A (86%). Ook gaat het in dit deelsysteem om het minste doorgerekende profielen. Op basis van de doorgerekende profielen lijkt de nieuwe normering hier de grootste impact te hebben.

Analyse	Aantal afgekeurde scenario's	Bijbehorende fictieve lengte (km)
A	209	37
B1	222	37
B2	219	37
C1	224	38
C2	227	39

Tabel A.3 Resultaten benadering scenario-niveau voor de Vecht- en IJsseldelta

- Meren en Kust

Het gaat in deze analyse om een lengte van 145 km (466 scenario's). De resultaten van de analyses op scenario-niveau, zijn weergegeven in tabel A.4. Het beeld komt redelijk overeen met het totaalbeeld, alhoewel de aanscherping van de norm in dit gebied relatief een grote impact (zie verschil resultaten analyse C1 en C2). Dit omdat de actuele faalkans van de dijkvakken minder afwijkt van de gestelde norm dan in andere deelsystemen (zie Figuur 4.1). Hier moet wel worden opgemerkt dat de resultaten langs de windgedreven (niet-riviergedomineerde) systemen minder belangrijk zijn, omdat hier op basis van de eenvoudige toets in de meeste gevallen al tot goedkeuren is gekomen. Let wel, meren zijn op dit moment uitgesloten van de eenvoudige toetsregel op tijdsafhankelijkheid omdat niet voldoende scherp kan worden afgebakend welke locaties binnen het systeem worden gedomineerd door de wind of door het meerpeil.

Analyse	Aantal afgekeurde scenario's	Bijbehorende fictieve lengte (km)
A	322	91
B1	363	108
B2	366	107
C1	383	110
C2	403	123

Tabel A.4 Resultaten benadering scenario-niveau voor Meren en Kust

B Onderbouwing keuze VNK-database

De verschilanalyse is uitgevoerd op het niveau van toetslaag 2a (per vak en mechanisme, semi-probabilistisch). Om te kunnen rekenen zijn representatieve profielen met bijbehorende grondopbouw gekozen, waarbij is gestreefd naar een landsdekkende database met een zo groot mogelijk detailniveau.

Voor de keuze van de representatieve profielen waren de volgende opties aanwezig:

- 25 typische gevallen laten onderscheiden door experts, waarbij de verschillen liggen in geometrie en bodemopbouw. Ook de mate en plaats van voorkomen dient hierbij te worden vastgesteld.
- Gebruik maken van de bestaande WV21-dataset. Deze dataset is landsdekkend en is gebaseerd op door de beheerder gedefinieerde archetypen. De geometrie en ondergrondscenario's (SOS) zijn representatief voor een lengte van gemiddeld ca. 5 km. Er dient te worden besloten of dit met originele of "opgeblazen" (voldoen aan het WTI 2006) profielen wordt gedaan wordt.
- Gebruik maken van de bestaande VNK-dataset. Deze dataset is landsdekkend en omvat bestaande profielen (op basis van hoogtebestanden). Geometrie en ondergrondscenario's (SOS) zijn representatief voor een lengte van ca. 250m.
- Rekenen met synthetische profielen. Door het variëren van parameters (laagdikten, kwellengte, d70, doorlatendheid etc.) kunnen vele cases worden doorgerekend en trends en gevoeligheden worden onderzocht.

Bij de keuze waren landsdekkendheid, kwaliteit van de data, te leveren inspanning en flexibiliteit de bepalende factoren, zie Tabel B.1. Rekenen met synthetische profielen (laatste optie) geeft geen inzicht in de representativiteit van resultaten en het onderzoeken van parametergevoeligheden valt buiten het blikveld van dit project. Gekozen is om gebruik te maken van de VNK-dataset (gedetailleerd, realistisch en landsdekkend). Alleen vakken die zijn voorgeselecteerd binnen het kader van VNK konden worden doorgerekend (meest piping-gevoelige vakken). Dit omdat voor andere vakken uit de database niet alle benodigde parameters voorhanden zijn.

Data	Landsdekkend	Kwaliteit data	Inspanning	Flexibiliteit
25 typische gevallen	+/-	-	++	+
WV21	+	+/-	--	-
VNK	++	+	-	-
Synthetische profielen	--	--	-	+

Tabel B.1 Score op vier factoren bij keuze dataset