



HWBP Projectgebonden Innovatie "Naar een geohydrologische aanpak voor piping"



Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandfuncties

Waterschap Aa en Maas
07-11-2019

COLOFON

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

Document Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandfuncties
Datum 07 nov 2019
Referentie 109227/deelproduct2/07112019

Auteur(s) Ruben Jongejan (RMC)

Checklist	Door Wie	Vink of paraaf
Interne review	Guido van Rinsum (W+B), Wim Kanning (Deltares)	✓
Eindcontrole	CvE + TM	✓
Goedgekeurd door	TM Jacco Hoogewoud (Advies in Water)	✓
Vrijgegeven door	PM Martine Brinkhuis (Tauw)	✓

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

INHOUD

1	Inleiding	1
2	Faalpad	2
3	Grenstoestandfuncties	7
3.1	WBI2017-grenstoestandfuncties	7
3.2	Koppeling WBI2017-grenstoestandfuncties aan uitkomsten grondwaterstromingsmodel	10
4	Conclusies en aanbevelingen	17
4.1	Conclusies	17
4.2	Aanbevelingen	17
5	Referenties	18
Bijlage I	Stochastische variabelen WBI2017	19

1 INLEIDING

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 voelt op basis van ervaringen tijdens hoogwaters in het verleden als onrealistisch groot. 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 plan van aanpak voor de Innovatie Meanderende Maas worden 8 activiteiten onderscheiden [1]. Activiteit 2 behelst het volgende ([1], pag. 12):

‘Aangeven op welke wijze de uitkomsten van regionale grondwaterstromingsmodellen ingepast kunnen worden in de grenstoestandfuncties voor opbarsten, heave en piping (zoals in BOI). Ook aangeven hoe het volledige faalpad eruit ziet omdat dit mogelijk later nodig is om de relatie met veldwaarnemingen te kunnen leggen (...).’

In dit rapport worden de resultaten van deze activiteit beschreven. Grenstoestandfuncties vormen de basis voor probabilistische en semi-probabilistische beoordelingen. De rest van het faalpad is mogelijk in een latere activiteit van belang voor het meenemen van veldmetingen. Een grenstoestandfunctie is een modelmatige beschrijving van de fysica. Bij probabilistische beoordelingen worden grenstoestandfuncties gevoed met de kansverdelingen van de verschillende onzekere grootheden. Bij semi-probabilistische beoordelingen worden grenstoestandfuncties gevoed met veilige waarden van de onzekere grootheden, zg. rekenwaarden. Voor nadere toelichting wordt verwezen naar paragraaf 5.6 uit de Grondslagen voor Waterveiligheid [2].

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

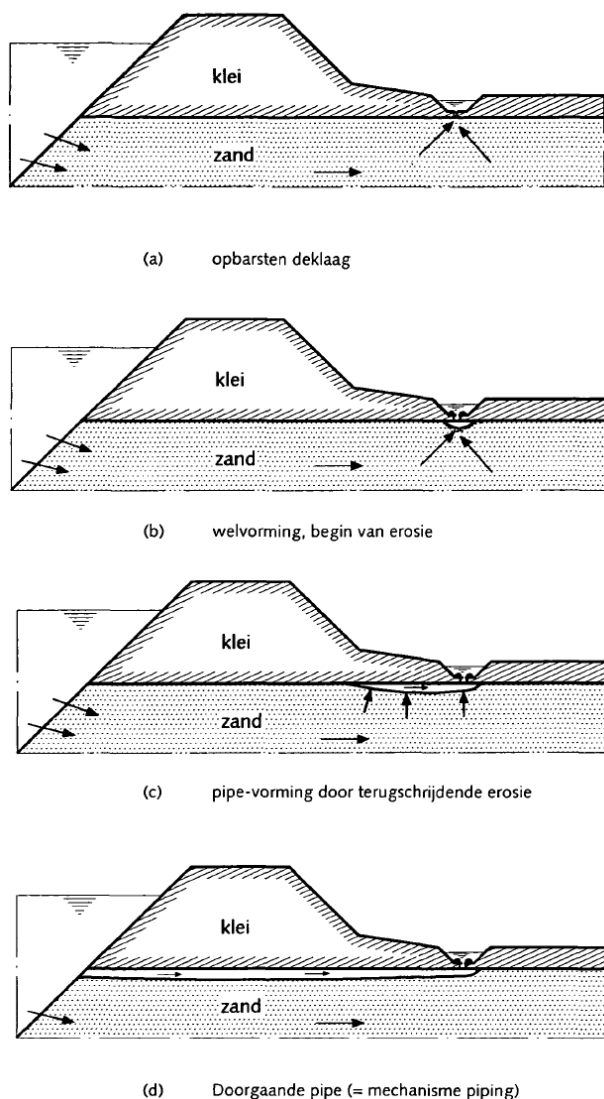
1. In hoofdstuk 2 wordt een gebeurtenissenboom/faalpad gegeven. Met behulp van deze gebeurtenissenboom wordt verduidelijkt wat de positie van een grondwaterstromingsmodel in de bredere modelketen is. Dit laat ook zien dat de Innovatie Meanderende Maas zich richt op een beperkt aantal schakels uit het faalpad.
2. In hoofdstuk 3 worden eerst de grenstoestandfuncties geïntroduceerd voor opbarsten, heave en piping die aan de basis staan van de voorschriften voor de gedetailleerde beoordeling uit Bijlage III van de Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 [3]. Deze modellen zijn onderdeel van het basisinstrumentarium voor de beoordeling en het ontwerp van primaire waterkeringen: het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI). Vervolgens wordt de relatie gelegd tussen deze grenstoestandfuncties en de uitkomsten van regionale grondwaterstromingsmodellen.

De resultaten van dit rapport zullen uiteindelijk worden verwerkt in een overkoepelende rapportage (activiteit 8 uit het plan van aanpak van de Innovatie Meanderende Maas).

Een gebeurtenissenboom of faalpad beschrijft de opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot een overstrooming ten gevolge van piping. Dit kan in verschillende maten van detail/verfijning. In het Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen (TRZW, [4], pag. 15) worden de volgende vijf opeenvolgende gebeurtenissen genoemd:

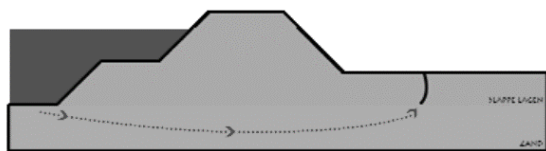
1. opdrijven van de afdekkende laag aan de binnenzijde van de dijk,
2. opbarsten van de afdekkende laag en het ontstaan van wellen,
3. eroderen van de zandlaag,
4. ontstaan van doorgaande pipes,
5. bezwijken van de waterkering.

In het TRZW is tevens een figuur opgenomen dat het proces van het opbarsten van de deklaag tot het ontstaan van een doorgaande pipe in stappen beschrijft (Figuur 1).

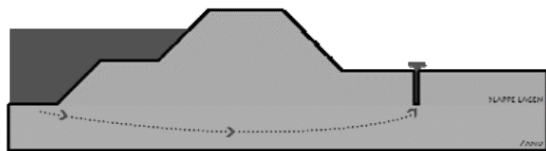


Figuur 1. Faalpad in het Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen tot het ontstaan van doorgaande pipes ([4], pag. 16)

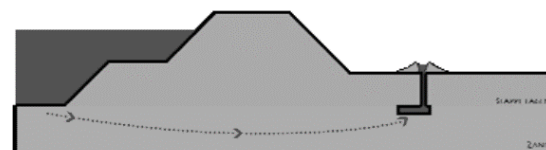
In het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen wordt het faalpad in meer detail beschreven, zie Figuur 2.



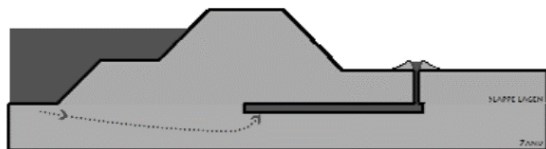
(a) opbarsten deklaag/heave



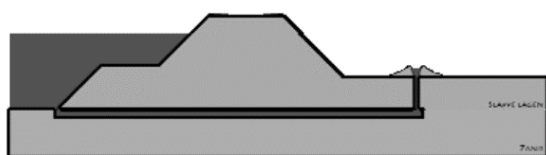
(b) kwel / welvorming, begin van erosie



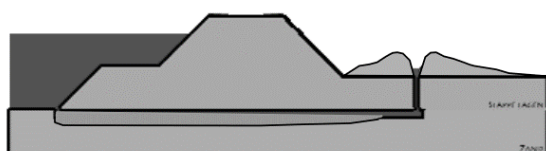
(c) beginnende pipe-vorming door terugschrijdende erosie



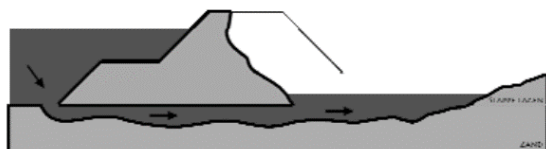
(d) pipe-vorming door terugschrijdende erosie



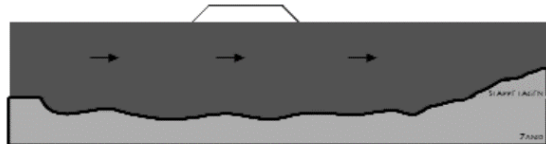
(e) doorgaande pipe / begin van ruimen (= mechanisme piping)



(f) ruimen (= verbreding van de pipe)



(g) bezwijken van de dijk



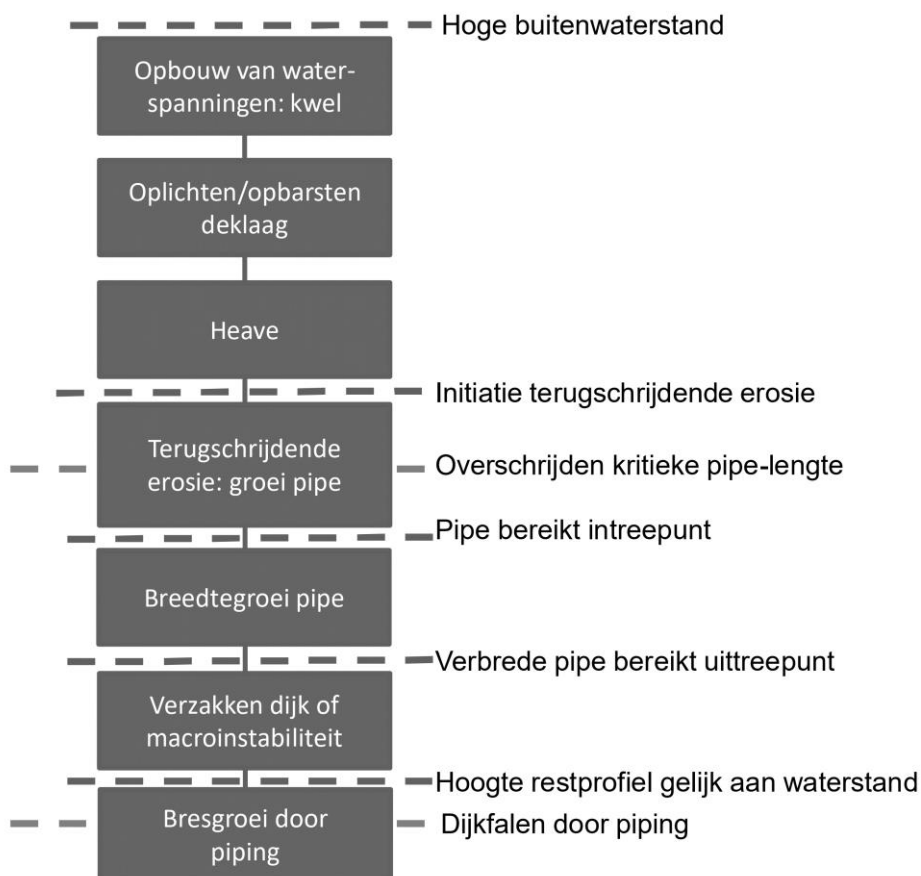
(h) dijkdorbraak

Figuur 2. Faalpad uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen ([5], pag. 31)

In paragraaf 4.2 van de fenomenologische beschrijving die in het kader van het WBI2017 is opgesteld worden de volgende gebeurtenissen onderscheiden [6]:

1. hoogwater,
2. opbarsten van de deklaag (hiervan moet sprake zijn bij waarneming van een watervoerende wel),
3. heave (hiervan moet sprake zijn bij waarneming van een zandmeevoerende wel),
4. pipevorming: initiatie en progressie,
5. pipe groeit terug tot aan intredepunt,
6. ruimen van de pipe naar het uittredepunt,
7. bezwijken van de dijk.

In paragraaf 4.3 van dit rapport wordt ook een fijnmazigere indeling gegeven, zie Figuur 3. Als faalcriterium wordt in de gedetailleerde beoordeling het overschrijden van het kritieke verval (in de figuur: de kritiek pipe-lengte¹) gehanteerd. Dit is het verval waarbij de pipe (bij een stationaire stroming) door zal groeien. In de gedetailleerde beoordeling wordt dus niet het gehele faalpad beschouwd.



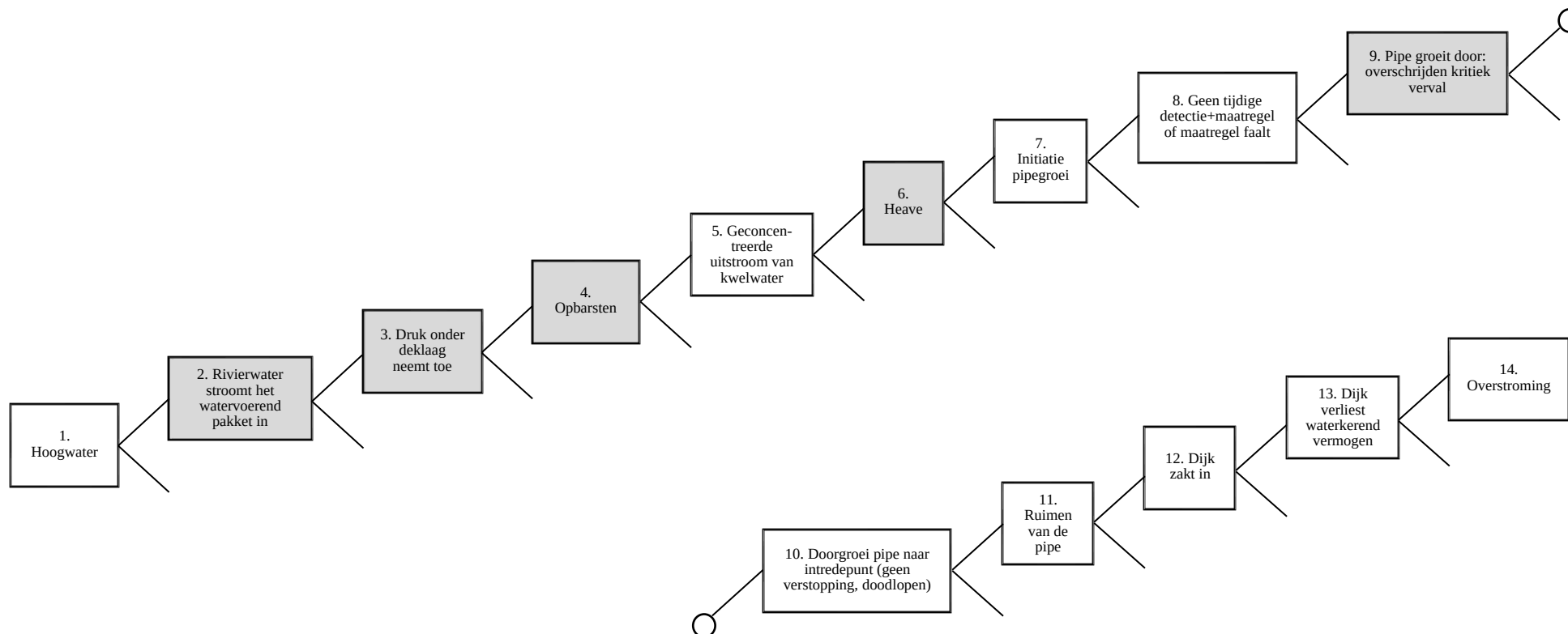
Figuur 3. Faalpad volgens figuur 4.20 uit [6].

Een meer uitgebreid faalpad is weergegeven in Figuur 4. De stappen die (deels) met behulp van een regionaal grondwaterstromingsmodel gemodelleerd kunnen worden, zijn grijs gearceerd weergegeven. Het betreft de volgende stappen:

¹ In het voorliggende document wordt gesproken over het kritieke verval en niet over de kritieke pipe-lengte aangezien de regel van Sellmeijer oorspronkelijk is ontwikkeld op basis van een evaluatie van het kritieke verval als functie van de erosielengte (beide genormaliseerd met de kwelweglengte), zie bijvoorbeeld pag. 61 uit [7].

1. De intrede van rivierwater in een watervoerend pakket en de toename van de druk onder een deklaag (gebeurtenissen 2 en 3 in Figuur 4) kunnen met een regionaal grondwaterstromingsmodel worden beschreven.
2. Opbarsten, heave en doorgroei van een pipe/overschrijding van het kritieke verval (gebeurtenissen 4, 6 en 9 in Figuur 4) kunnen worden gemodelleerd door de combinatie van een regionaal grondwaterstromingsmodel met de WBI2017-sterktemodellen voor de gedetailleerde beoordeling.² Alleen voor deze gebeurtenissen zijn in het WBI2017 grenstoestandfuncties opgenomen. De dempingsfactor of stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt of de buitenteen zoals die is berekend met een regionaal grondwaterstromingsmodel wordt dan ingevoerd in een WBI-sterktemodel. Dit wordt nader toegelicht in hoofdstuk 3 van dit rapport.

² Koppeling met complexere modellen (bijv. D-GeoFlow) is uiteraard ook een mogelijkheid. Voor een goed begrip en brede toepasbaarheid wordt echter zoveel mogelijk aangesloten op de relatief eenvoudige rekenregels uit het WBI2017/BOI.



Figuur 4. Faalpad piping (uitgebreid). De onderdelen waarvoor de overgangskans kan worden bepaald met behulp van (onder andere) een regionaal grondwaterstromingsmodel, zijn grijs gearceerd. Voor elke gebeurtenis op het faalpad is het complement (d.w.z. het *niet* optreden van de gebeurtenis op het faalpad) achterwege gelaten.

3.1 WBI2017-grenstoestandfuncties

In het kader van de gedetailleerde beoordeling voor Stabiliteit Piping & Heave (STPH) wordt in het WBI2017 de volgende, samengestelde grenstoestandfunctie gebruikt:

$$Z = \max(Z_{uplift}, Z_{heave}, Z_{pip}) \quad (1)$$

Waarin:

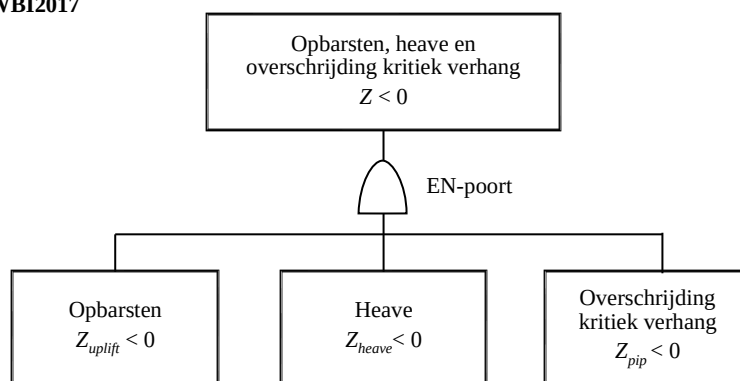
Z_{uplift} Grenstoestandfunctie voor opbarsten; $Z_{uplift} < 0$ betekent het optreden van opbarsten

Z_{heave} Grenstoestandfunctie voor heave; $Z_{heave} < 0$ betekent het optreden van heave

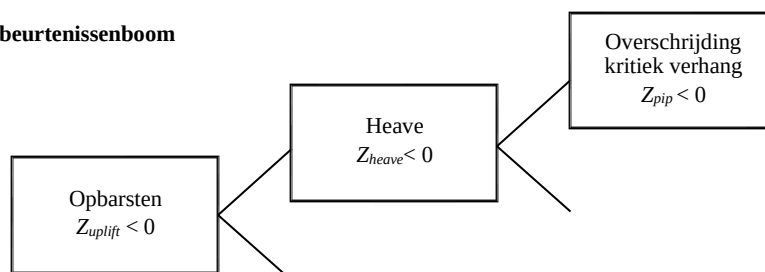
Z_{pip} Grenstoestandfunctie voor piping; $Z_{pip} < 0$ betekent het overschrijden van het kritieke verhang, ofwel: het optreden van een dusdanig verhang dat de pipe kan doorgroeien.

Dit betekent dat alle mechanismen moeten optreden om tot een overstroming door piping te leiden of, andersom, dat geen overstroming optreedt als een van de deelmechanismen niet optreedt. De bovenstaande, samengestelde grenstoestandfunctie is als volgt te visualiseren in een foutenboom (Figuur 5, boven) of, equivalent, in een gebeurtenissenboom (Figuur 5, onder).

Foutenboom WBI2017



Equivalente gebeurtenissenboom



Figuur 5. De foutenboom die de basis vormt voor de gedetailleerde beoordeling in het WBI2017 (boven) en een equivalente gebeurtenissenboom (onder).

Er zijn nog diverse andere gebeurtenissen die moeten plaatsvinden voordat een overstroming optreedt (zie ook Figuur 4). Deze andere mechanismen worden in dit rapport (en in het WBI2017) niet meegenomen, wat equivalent is aan de veronderstelling dat deze gebeurtenissen zeker zullen optreden.

De WBI2017 -grenstoestandfuncties voor opbarsten, heave en piping zijn als volgt (zie ook [8,9]). In Bijlage I is een overzicht opgenomen van de variabelen in deze grenstoestandfuncties die in het WBI2017 als stochastische variabelen worden behandeld, samen met hun veronderstelde statistische eigenschappen.

Opbarsten

$$Z_{uplift} = m_u \cdot D_{cover} \cdot \frac{\gamma_{sat,cover} - \gamma_{water}}{\gamma_{water}} - r_{exit} \cdot (H - h_{exit}) \quad (2)$$

Waarin:

m_u	Modelonzekerheidsfactor voor opbarsten	[-]
D_{cover}	Deklaagdikte	[m]
γ_{water}	Volumegegewicht van water	[kN/m ³]
$\gamma_{sat,cover}$	Verzadigd volumegegewicht van de deklaag	[kN/m ³]
r_{exit}	Dempingsfactor ter plaatse van het uittredepunt	[-]
H	Buitenwaterstand	[m+NAP]
h_{exit}	(Grond)waterstand ter plaatse van het uittredepunt	[m+NAP]

De deklaagdikte (D_{cover}) betreft de lokale deklaagdikte (inclusief de onzekerheden daaromtrent). Voor het grondwaterstromingsbeeld/stijghoogtes zijn lokale variaties in de deklaagdiktes van relatief weinig belang. Voor opbarsten is een lokaal dunne deklaag echter wel van groot belang.

De dempingfactor wordt door de gebruiker direct opgegeven [10]. Deze grootheid kan als volgt worden gerelateerd aan de onzekere, werkelijke stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt:

$$r_{exit} = \frac{\varphi_{exit} - h_{polder}}{H - h_{polder}} \quad (3)$$

Waarin:

φ_{exit}	Stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt	[m+NAP]
h_{polder}	Polderpeil, een gekozen deterministisch (niet onzeker) referentiepeil	[m+NAP]

In vergelijking (3) is het polderpeil, een deterministisch referentiepeil, als nieuwe variabele geïntroduceerd. Hiermee wordt “vaste grond onder de voeten” gecreëerd voor het bepalen van de dempingsfactor voor het beschouwde profiel. Het had wellicht logischer geleken om in vergelijking (3) h_{exit} te hanteren in plaats van h_{polder} maar dan zou sprake zijn van een dempingsfactor die een functie is van de variabele binnenwaterstand h_{exit} . In dat geval zou de dempingsfactor r_{exit} dus ook stochastisch afhankelijk zijn van h_{exit} . De dempingsfactor en de (grond)waterstand ter plaatse van het uittredepunt worden echter als onafhankelijke variabelen beschouwd in het WBI2017. Deze vereenvoudiging wordt hier en in het vervolg van dit rapport gevolgd. Gelet op de wijze waarop normaliter over de onzekere dempingsfactor wordt gesproken, ligt het in de rede om h_{polder} gelijk te stellen aan de rekenwaarde van h_{exit} in de semi-probabilistische beoordeling. In dat geval is h_{polder} gelijk aan het 5%-kwantiel van h_{exit} . Het verschil tussen h_{polder} en h_{exit} is binnen de uitvoering van de semi-probabilistische beoordeling dan niet langer relevant.

Het polderpeil (h_{polder}) kan per profiel verschillend zijn, net zoals bijvoorbeeld de buitenwaterstand en de deklaagdikte. Het polderpeil is dus niet een referentiepeil dat overal hetzelfde is zoals het NAP.

Het combineren van vergelijkingen (2) en (3) geeft:

$$Z_{uplift} = m_u \cdot D_{cover} \cdot \frac{\gamma_{sat,cover} - \gamma_{water}}{\gamma_{water}} - \frac{\varphi_{exit} - h_{polder}}{H - h_{polder}} \cdot (H - h_{exit}) \quad (4)$$

Heave

$$Z_{heave} = i_{crit} - \frac{r_{exit} \cdot (H - h_{exit})}{D_{cover}} \quad (5)$$

Waarin:

i_{crit} Kritieke heave-gradiënt [-]

In de grenstoestandfunctie voor heave is geen afzonderlijke modelonzekerheidsfactor opgenomen. De onzekerheid ten aanzien van het heave-model wordt tot uitdrukking gebracht door de onzekerheid ten aanzien van de kritieke heave-gradiënt.

Piping (= overschrijding kritiek verhang)

De grenstoestandfunctie is gebaseerd op het Sellmeijer-model van **2011** [11] en luidt als volgt:

$$Z_{pip} = m_p \cdot \Delta H_c - (H - h_{exit} - r_c \cdot D_{cover}) \quad (6)$$

Met:

$$\Delta H_c = F_{resistance} \cdot F_{scale} \cdot F_{geometry} \cdot L \quad (7)$$

$$F_{resistance} = \eta \cdot \frac{\gamma_{sub,particles}}{\gamma_{water}} \cdot \tan(\theta_{sellmeijer,rev}) \quad (8)$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70,m}}{(\kappa \cdot L)^{1/3}} \cdot (d_{70} / d_{70,m})^{0.4} \quad (9)$$

$$\kappa = \frac{v_{water} \cdot k}{g} \quad (10)$$

$$F_{geometry} = 0,91 \cdot (D / L)^c \quad (11)$$

$$c = 0,04 + 0,28 / ((D / L)^{2,8} - 1) \quad (12)$$

Waarin:

m_p Modelonzekerheidsfactor voor piping [-]
 ΔH_c Kritiek verval [m]

H	Buitenwaterstand	[-]
h_{exit}	(Grond)waterstand ter plaatse van het uittredepunt	[m+NAP]
r_c	Reductiefactor	[-]
D_{cover}	Deklaagdikte	[-]
η	White's drag coefficient	[-]
$\gamma_{sub,particles}$	Nat volumegewicht van zand	[kN/m ³]
γ_{water}	Volumegewicht van water	[kN/m ³]
$\theta_{sellmeijer,rev}$	Beddingsconstante voor zand voor het Sellmeijer-model van 2011	[°]
$d_{70,m}$	Gemiddelde van de d_{70} uit kleine schaalproeven	[m]
d_{70}	70%-waarde van de korrelverdeling voor de pipinggevoelige laag	[m]
k	Darcy-doorlatendheid van de aquifer	[m/s]
L	Kwelweglengte	[m]
ν_{water}	Kinematische viscositeit van water	[m ² /s]
g	Zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
D	Dikte van de aquifer	[m]

In de bovenstaande grenstoestandfunctie voor piping is de dempingsfactor geen stochastische variabele, anders dan in de grenstoestandfuncties voor opbarsten en piping. De dempingsfactor wordt mede bepaald door de doorlatendheid. Zodoende is sprake van een stochastische afhankelijkheid tussen de dempingsfactor en de doorlatendheid. Deze afhankelijkheid wordt in het WBI2017/BOI genegeerd bij het evalueren van de samengestelde grenstoestandfunctie voor Stabiliteit Piping & Heave (STPH) (zie vergelijking (1)).

Bij de bepaling van de kwelweglengte dient rekening te worden gehouden met de stromingsrichting. Deze staat niet noodzakelijk loodrecht op de dijk.

3.2 Koppeling WBI2017-grenstoestandfuncties aan uitkomsten grondwaterstromingsmodel

Een regionaal grondwaterstromingsmodel levert vlakdekkend voorspellingen op van de stijghoogte bij een gegeven hoogwater en geo(hydro)logie. De modelonzekerheid en de onzekerheid ten aanzien van invoerparameters zoals laagdiktes en doorlatendheden (parameteronzekerheid) moeten daarbij in rekening worden gebracht. Met de parameteronzekerheid kan op verschillende manieren worden omgegaan:

1. Expliciete modellering van parameteronzekerheid

Als een grondwaterstromingsmodel wordt gevoed met de gezamenlijke kansdichtheidfunctie van de onzekere (ondergrond)invoerparameters, dan komt de parameteronzekerheid tot uitdrukking in de spreiding van de modeluitkomsten. Alleen de modelonzekerheid hoeft dan nog in rekening te worden gebracht.

2. Beschrijving van het effect van parameteronzekerheid door een overall-onzekerheidsterm

Als een grondwaterstromingsmodel wordt gevoed met deterministische waarden van onzekere ondergrondparameters (zoals mediane waarden), dan moeten zowel de parameteronzekerheid als de modelonzekerheid nog in rekening worden gebracht. Deze twee onzekerheden kunnen pragmatisch samen worden genomen in een enkele onzekerheidsterm. Het definiëren van twee losse onzekerheidstermen voor het effect van de (invoer)parameteronzekerheid en het effect van de modelonzekerheid zouodeloos complex zijn: het zou een uitsplitsing vergen die niet van praktische betekenis is.

Voor de navolgende grenstoestandfuncties/formules maakt het geen verschil of sprake is van het eerste of het tweede geval. In beide gevallen is sprake van een term die de onzekerheid ten aanzien van de uitkomsten van grondwaterstromingsberekeningen beschrijft. Deze term bezit in de twee gevallen alleen een andere kansverdeling. In het eerste geval beschrijft de onzekerheidsterm namelijk alleen de modelonzekerheid, in het tweede zowel de modelonzekerheid als de parameteronzekerheid.

Om de uitkomsten van regionale grondwaterstromingsmodellen te koppelen aan de WBI2017 - grenstoestandfuncties uit paragraaf 3.1 worden de volgende aannamen gedaan:

Aanname 1: De dempingsfactor is onafhankelijk van de buitenwaterstand. Deze aanname kan uiteraard alleen redelijk zijn in het bereik van hoogwaterstanden waarbij de belastingsituatie vergelijkbaar is (“water tegen de dijk”). In het bereik van relatief lage waterstanden is een nauwkeurige modellering minder van belang omdat bij relatief lage waterstanden doorgaans geen dijkfalen wordt verwacht.

Aanname 2: De onzekerheid ten aanzien van de werkelijke dempingsfactor is proportioneel aan de met een grondwaterstromingsmodel berekende dempingsfactor. Anders gezegd: de variatiecoëfficiënt van de dempingsfactor is constant.

Deze aannamen liggen ook ten grondslag aan de WBI2017 -grenstoestandfuncties:

1. In het WBI2017 is de dempingsfactor geen functie van de buitenwaterstand.
2. In het WBI2017 wordt voor de dempingsfactor bij het uittredepunt (r_{exit}) een default-variatiecoëfficiënt van 0,1 aangehouden. De standaarddeviatie van de dempingsfactor is daarmee lineair afhankelijk van (proportioneel aan) de verwachtingswaarde van de dempingsfactor.

Met een grondwaterstromingsmodel en metingen (voor zover beschikbaar) is te bepalen of deze aannamen redelijk zijn. Het wordt aanbevolen om deze controles uit te voeren.

In formulevorm betekenen de bovenstaande aannamen het volgende voor de berekening van de dempingsfactor bij een deterministisch polderpeil (zie ook vergelijking (3)):

$$r(x, y) = m_{gm} \cdot r_{gm}(x, y) = m_{gm} \cdot \frac{\varphi_{gm}(x, y) - h_{polder}}{H - h_{polder}} \quad (13)$$

Waarin:

$r(x, y)$	Werkelijke (onzekere) dempingsfactor op locatie (x, y)	[-]
m_{gm}	Onzekerheid ten aanzien van de berekende dempingsfactor op locatie (x, y)	[-]
$r_{gm}(x, y)$	Berekende dempingsfactor op locatie (x, y)	[-]
$\varphi_{gm}(x, y)$	Berekende stijghoogte op een locatie (x, y) nabij de dijk	[m+NAP]
h_{polder}	Polderpeil (een deterministisch referentiepeil)	[m+NAP]

Merk op dat voor $r(x, y)$ ook kan worden geschreven:

$$r(x, y) = \frac{\varphi(x, y) - h_{polder}}{H - h_{polder}} \quad (14)$$

Het combineren van (13) en (14) geeft:

$$\frac{\varphi(x, y) - h_{polder}}{H - h_{polder}} = m_{gm} \cdot \frac{\varphi_{gm}(x, y) - h_{polder}}{H - h_{polder}} \quad (15)$$

Ofwel:

$$\varphi(x, y) - h_{polder} = m_{gm} \cdot (\varphi_{gm}(x, y) - h_{polder}) \quad (16)$$

Het herschikken van termen levert de volgende uitdrukking op voor de werkelijke, onzekere stijghoogte:

$$\varphi(x, y) = m_{gm} \cdot (\varphi_{gm}(x, y) - h_{polder}) + h_{polder} \quad (17)$$

Op grond van de bovenstaande uitdrukkingen kan als volgt de koppeling worden gemaakt met de grenstoestandfuncties voor opbarsten, piping en heave uit paragraaf 3.1:

Opbarsten

In de grenstoestandfunctie voor opbarsten kan voor de dempingsfactor worden uitgegaan van vergelijking (13).

In de onderstaande uitdrukking is de locatieaanduiding (x,y) steeds vervangen door het subscript 'exit':

$$Z_{uplift} = m_u \cdot D_{cover} \cdot \frac{\gamma_{sat,cover} - \gamma_{water}}{\gamma_{water}} - m_{gm} \cdot r_{gm,exit} \cdot (H - h_{exit}) \quad (18)$$

Uitschrijven op basis van vergelijking (17) geeft:

$$Z_{uplift} = m_u \cdot D_{cover} \cdot \frac{\gamma_{sat,cover} - \gamma_{water}}{\gamma_{water}} - m_{gm} \cdot \frac{\varphi_{gm,exit} - h_{polder}}{H - h_{polder}} \cdot (H - h_{exit}) \quad (19)$$

Wederom wordt opgemerkt wordt dat het onderscheid tussen h_{polder} en h_{exit} weinig elegant is. Hier wordt echter de vereenvoudiging uit het WBI2017 gevolgd, namelijk dat de dempingsfactor onafhankelijk is van de onzekere (grond)waterstand bij het uittredepunt maar berekend mag worden uitgaande van een vast/deterministisch polderpeil. In een nettere modellering wordt h_{polder} gelijk aan h_{exit} , maar dan moet:

1. bij de berekening van stijghoogtes $\varphi_{gm}(x,y)$ rekening worden gehouden met de onzekerheid ten aanzien van de (grond)waterstand bij het uittredepunt, en
2. bij de evaluatie van Z_{uplift} rekening worden gehouden met de afhankelijkheidsrelatie tussen h_{exit} en $\varphi_{gm}(x,y)$.

Het bovenstaande is aanmerkelijk complexer dan het volgen van de benadering uit het WBI2017.

Heave

Net zoals voor opbarsten kan in de grenstoestandfuncties voor heave bij de berekening van het verval worden uitgegaan van de stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt volgens vergelijking (17). Dit levert de volgende grenstoestandfunctie op:

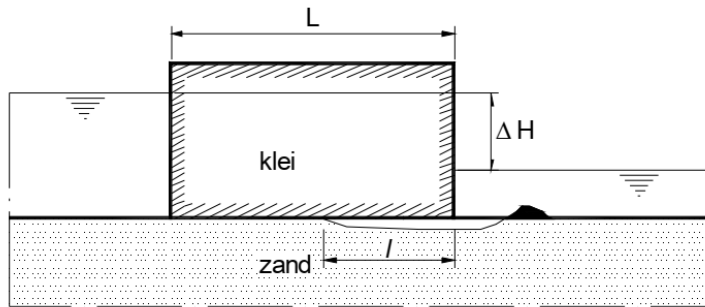
$$Z_{heave} = i_{crit} - \frac{m_{gm} \cdot r_{gm,exit} \cdot (H - h_{exit})}{D_{cover}} \quad (20)$$

Uitschrijven op basis van vergelijking (17) geeft:

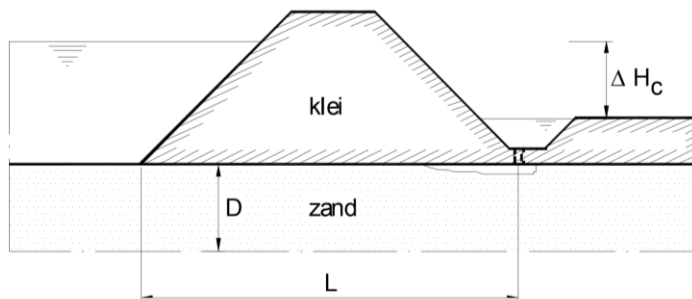
$$Z_{heave} = i_{crit} - \frac{m_{gm}}{D_{cover}} \cdot \frac{\phi_{gm,exit} - h_{polder}}{H - h_{polder}} \cdot (H - h_{exit}) \quad (21)$$

Piping (= overschrijding kritiek verhang)

Het oorspronkelijke model van Sellmeijer uit 1988 [7] (of liever: de op berekeningsresultaten gefitte formule van Sellmeijer) is gebaseerd op een stationaire, tweedimensionale stroming onder een horizontale, ondoorlatende constructie met een wel aan de benedenstroomse zijde (Figuur 6). Later is gekeken naar een basisconfiguratie met een ondoorlatende dijk op een homogene zandlaag (Figuur 7). In de loop der tijd zijn nog diverse verfijningen doorgevoerd op basis van o.a. de resultaten van experimenten [5,11]. De basisconfiguratie is daarbij echter steeds hetzelfde gebleven.



Figuur 6. Basisconfiguratie uit het proefschrift van Sellmeijer (bron: [5]: figuur 5.3, pag. 64).



Figuur 7. Basisconfiguratie model van Sellmeijer voor een dijk (bron: [5]: figuur 5.5, pag. 65).

Tussen het in- en uittredepunt in de basisconfiguratie uit Figuur 7 wordt in de formule van Sellmeijer uitgegaan van het stijghoogteverloop bij een stationaire stroming en een stijghoogte die aan de buitenteen gelijk is aan de buitenwaterstand. Dit gegeven kan worden gebruikt om de koppeling te maken met de stijghoogtes volgens een regionaal grondwaterstromingsmodel (waarmee ook niet-stationair kan worden gerekend). Concreet kan de koppeling middels de volgende twee stappen tot stand worden gebracht:

1. Stel de kwelweglengte in de Sellmeijer-formule gelijk aan de afstand tussen het uittredepunt en een punt aan de rivierzijde waar nog niet/nauwelijks sprake is van verticale instroming (hierna wordt dit punt gemakshalve steeds aangeduid als “de buitenteen” al zou het ook een verder gelegen punt kunnen zijn).

2. Hanteer de stijghoogte uit het grondwaterstromingsmodel ter hoogte van dit punt aan de rivierzijde (“de buitenteen”) als bovenstroomse randvoorwaarde en breng de onzekerheid ten aanzien van deze berekende stijghoogte in rekening conform vergelijking (17).

De grenstoestandfunctie is dan als volgt:

$$Z_{pip} = m_p \cdot \Delta H_c - (\varphi_{bu} - h_{exit} - r_c \cdot D_{cover}) \quad (22)$$

Ofwel:

$$Z_{pip} = m_p \cdot \Delta H_c - \left(m_{gm} \cdot (\varphi_{gm,bu} - h_{polder}) + h_{polder} - h_{exit} - r_c \cdot D_{cover} \right) \quad (23)$$

Met:

$$\Delta H_c = F_{resistance} \cdot F_{scale} \cdot F_{geometry} \cdot L_{corr} \quad (24)$$

Waarin:

φ_{bu}	Daadwerkelijke, onzekere stijghoogte ter plaatse van de buitenteen	[m+NAP]
$\varphi_{gm,bu}$	Berekende stijghoogte ter plaatse van de buitenteen	[m+NAP]
h_{polder}	Polderpeil (een deterministisch referentiepeil)	[m+NAP]
h_{exit}	(Grond)waterstand ter plaatse van het uittredepunt	[m+NAP]
L_{corr}	Afstand tussen het uittredepunt en de buitenteen.	[m]

In de bovenstaande aanpak wordt feitelijk bepaald of de groei van een eventuele pipe tussen het uittredepunt en de buitenteen tot stilstand zou komen in geval van een stationaire stroming. Of er onder een voorland met een enigszins doorlatende deklaag (dus met verticale instroming) wellicht alsnog een evenwicht zou kunnen ontstaan, wordt niet beschouwd. De Sellmeijer-formule is voor een dergelijke configuratie ook niet ontwikkeld/geschikt.

De doorlatendheid is zowel van invloed op de berekende stijghoogte aan de buitenteen van de dijk als op de waarde van de parameter F_{scale} . Tussen de berekende stijghoogte aan de buitenteen en de parameter F_{scale} bestaat zodoende een afhankelijkheid die in rekening gebracht moet worden.

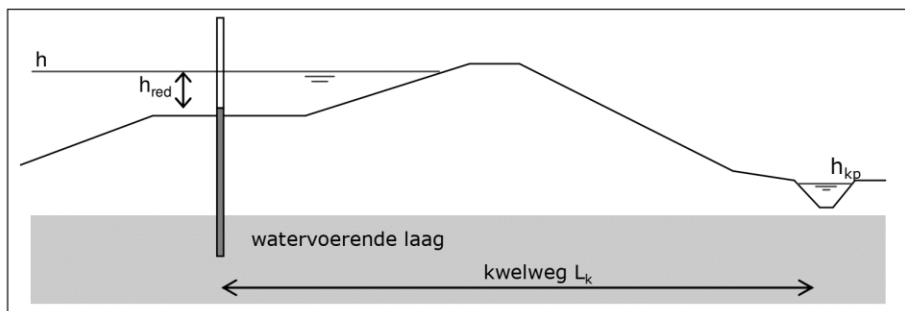
De bovengenoemde aanpak/grenstoestandfunctie leidt tot een overschatting van de kans op piping als de stroming duidelijk niet-stationair is. Alleen tot de buitenteen kan namelijk rekening worden gehouden met tijdsafhankelijkheid, daarna niet meer. In een grondwaterstromingsberekening kan de invloed van niet-stationariteit op de stijghoogte aan de buitenteen (de bovenstroomse randvoorwaarde van de Sellmeijer-formule) worden meegenomen. De formule van Sellmeijer berust echter op de veronderstelling dat de stijghoogte aan de buitenteen constant is in de tijd en deze stijghoogte wordt hier gelijk gesteld aan de maximale waarde binnen een voorbij trekkende hoogwatergolf.. I

De niet-stationair optredende stijghoogte bij de buitenteen van de dijk kan wezenlijk verschillen van de stationair optredende stijghoogte, mede afhankelijk van o.a. de duur van de hoogwatergolf, de geometrie van het dijklichaam, de grootte van het voorland en de dikte van de kleilaag in het voorland. Bij een hoogwatergolf van

ongeveer 16 dagen met een top die grofweg 2-3 dagen duurt, zou het verschil naar verwachting³ 0-1 meter kunnen bedragen. Alleen het meenemen van het effect van tijdsafhankelijkheid “tot aan de buitenteen” zou dus al van grote invloed kunnen zijn op beoordelingen en ontwerpverificaties.

In Bijlage E van de WBI2017-schematiseringhandleiding voor piping [10] wordt een methode gegeven met een fictieve kwelweglengte om intredeweerstand in het voorland te modelleren.⁴ Bij de toelichting op deze methode wordt in de schematiseringhandleiding de voorwaarde gesteld dat de fictieve kwelweglengte niet groter mag zijn dan twee keer de afstand tussen de buitenteen tot het uittredepunt. Dit heeft de volgende achtergrond. Het kritieke verval in de formule van Sellmeijer is *oorspronkelijk* afgeleid voor een erosielengte gelijk aan de helft van de kwelweglengte (de sterkte is bij deze verhouding grofweg maximaal) [7]. Als de erosielengte groter wordt dan de afstand tussen het uittredepunt en de buitenteen, dan zal de grondwaterstroming naar de pipe anders gaan verlopen dan in de basisconfiguratie uit Figuur 7. Voor de voorgestelde procedure is deze voorwaarde niet van belang. In de voorgestelde procedure wordt immers niet met een fictieve kwelweglengte gewerkt maar met een berekende stijghoogte ter plaatse van de buitenteen. De erosielengte blijft in dat geval (in de modelberekening) zeker kleiner dan de lengte tot de buitenteen zolang geen sprake is van overschrijding van het kritieke verval ($Z_{pip} > 0$).

Door het Waterschap Scheldestromen is eerder een soortgelijke aanpak gehanteerd om gemeten stijghoogtes te benutten in wettelijke beoordelingen. Daarbij is uitgegaan van de stijghoogte ter plaatse van de peilbuis (in plaats van de buitenwaterstand) en is de kwelweglengte gelijk gesteld aan de afstand tussen de peilbuis en het uittredepunt. In het project VNK2 is die aanpak ook gehanteerd, zoals bij dijkkring 31 Zuid-Beveland [12]. In Figuur 8 is deze aanpak schematisch weergegeven.



Figuur 8. Principeschets omgang met stijghoogtemetingen in de Sellmeijer-pipinganalyses voor dijkkring 31 in VNK2 (bron: [12], figuur 20, pag., 31).

In de Project Overstijgende Verkenning Piping (POV-Piping) is deze aanpak ook voorgesteld als een van de opties voor het gebruik van de resultaten van waterspanningsmetingen in piping-beoordelingen (naast het gebruik van een effectieve voorlandlengte), zie ook Figuur 9 [13].

³ Expertschatting, onderbouwd in fase 1 van de innovatie Meanderende Maas.

⁴ Als het voorland doorlatend is, dan is geen sprake van een eenduidig intredpunt. In geval van stationaire grondwaterstroming is de vorm van het stijghoogteverloop onafhankelijk van de buitenwaterstand. Het lineair doortrekken van het stijghoogteverloop levert dan een fictief intredpunt op. Voor nadere toelichting wordt verwezen naar het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken [11].

4.1 Conclusies

De uitkomsten van regionale grondwaterstromingsmodellen zijn als volgt te relateren aan de WBI2017/BOI-grenstoestandfuncties voor opbarsten, heave en piping:

1. Voor opbarsten en heave: neem als dempingsfactor het product van de berekende dempingsfactor en een modelonzekerheidsfactor.
2. Voor piping: beschouw de met het grondwaterstromingsmodel berekende stijghoogte aan de buitenteen (als functie van de buitenwaterstand) en hanteer als kwelweglengte de afstand tussen de buitenteen en het uittredepunt. Wederom moet met de onzekerheid ten aanzien van de uitkomsten van het grondwaterstromingsmodel rekening worden gehouden. De modelonzekerheid kan op betrekkelijk eenvoudige wijze in rekening worden gebracht als -in navolging van het WBI2017/BOI- wordt verondersteld dat de dempingsfactor onafhankelijk van de buitenwaterstand en de variatiecoëfficiënt ten aanzien van de dempingsfactor constant is. Deze veronderstellingen zijn alleen redelijk als de belastingssituatie in het relevante bereik van waterstanden weinig veranderlijk is (dus niet: wel/geen verdrongen voorlanden).

De onder het tweede punt beschreven koppeling met de formule van Sellmeijer uit het WBI2017/BOI is conservatief in geval van een niet-stationaire grondwaterstroming. Een andere bron van conservatisme is dat de WBI2017/BOI-sterktemodellen -ook bij koppeling aan een grondwaterstromingsmodel- slechts een deel van het totale proces tot overstroming omvatten.

4.2 Aanbevelingen

Voor het vervolg van het project Innovatie Meanderende Maas worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. De in dit document voorgestelde omgang met modelonzekerheid berust op de aannamen (1) dat de dempingsfactor (in het relevante bereik) geen functie is van de buitenwaterstand en (2) dat de onzekerheid ten aanzien van de dempingsfactor lineair afhankelijk is (in het relevante bereik) van de grootte van de dempingsfactor. Deze aannamen liggen ook ten grondslag aan de sterktemodellen voor opbarsten en heave uit het WBI2017/BOI. Het verdient aanbeveling om deze aannamen te verifiëren. Dit kan worden gedaan op basis van grondwaterstromingsberekeningen en/of metingen.
2. In het WBI/BOI wordt feitelijk verondersteld dat de stijghoogte (of: de dempingsfactor) onafhankelijk is parameters zoals de binnenwaterstand en de doorlatendheid in de schaalfactor uit de formule van Sellmeijer. Dat is onterecht. Deze afhankelijkheden kunnen in het project Meanderende Maas worden meegenomen door bij de bepaling van de totale onzekerheid ten aanzien van berekende stijghoogtes (activiteit 3 uit het Plan van Aanpak) te expliciteren welke ondergrondparameters welke bijdrage leveren. Vervolgens kan hiermee dan rekening worden gehouden in probabilistische analyses. Uiteindelijk verdient het aanbeveling om deze afhankelijkheden ook in het BOI/WBI mee te gaan nemen.

5 REFERENTIES

- [1] Projectteam Meanderende Maas. Innovatie Meanderende Maas. Naar een geohydrologische benadering voor het berekenen van de pipingopgave - plan van aanpak. referentie 109227/19-008.221, projectcode 109227/113164; 2019.
- [2] ENW. Grondslagen voor hoogwaterbescherming. Expertisenetwerk Waterveiligheid; 2016.
- [3] Ministerie van Infrastructuur en Milieu. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid. 2016.
- [4] TAW. Technisch Rapport: Zandmeevoerende wellen (in Dutch). Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; 1999.
- [5] Förster U, Van den Ham G, Calle E, Kruse G. Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen. Deltares; 2012.
- [6] 't Hart R. Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI. Deltares, 11200574-007-GEO-0005- ga; 2018.
- [7] Sellmeijer JB. On the mechanism of piping under impervious structures. Technische Universiteit Delft, 1988.
- [8] Teixeira A, Wojciechowska K, Ter Horst W. Derivation of the semiprobabilistic safety assessment for piping WTI 2017: Cluster C, piping failure mechanism. Deltares, report no. 1220080-002-ZWS-0006; version 4.1, 29 February 2016; 2016.
- [9] Jongejan RB. WBI2017 Code Calibration - Reliability-based code calibration and semi-probabilistic assessment rules for the WBI2017. Rijkswaterstaat; 2017.
- [10] Ministry of Infrastructure and the Environment. Schematiseringshandleiding piping WBI2017 (in Dutch). version 2.2, 2 January 2017; 2016.
- [11] Sellmeijer H, López de la Cruz J, Van Beek VM, Knoeff H. Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. Eur J Environ Civ Eng 2011;15:1139–54.
- [12] Bart PJ, Bossenbroek JC. Veiligheid Nederland in Kaart 2. Overstromingsrisico dijkring 31 Zuid-Beveland (oost). Consortium DOT; 2011.
- [13] Blinde J. Analyse Grondwatermonitoring piping, memo. Deltares; 2019.
- [14] Diermanse F. WBI - Onzekerheden Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium. Deltares, report no. 1220080-001-ZWS-0004-r, final; 2017.

De onderstaande tabel is overgenomen uit Bijlage B van het rapport 'WBI-onzekerheden' ([14], pag. 116).

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 volumiegewicht van sublaag	5%	Shifted logn. shift=10	Nom.	cov ⁶ = 0.05	0	300
r_{exit}	-	damping factor at exit	dempingsfactor bij uitredepunt	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 uitredepunt	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.