



RWS INFORMATIE

Schematiseringshandleiding piping

WBI 2017

Datum	28 mei 2021
Status	Definitief

In de release notes van 28 mei 2021 op de helpdeskwater staan de wijzigingen vermeld van deze schematiseringshandleiding:

Paragraaf	onderwerp	wijziging
2.2.4	Bijsluiter KvK	Referentie naar overzicht kennisontwikkeling 2018-2019
5.3	d_{70} van zandfractie	Toelichting hoe om te gaan met grindfractie
5.3	Factsheet D-Geo Flow	Referentie naar factsheet D-Geo Flow
7.2.6	d_{70} bepaling	Toelichting bepaling d_{70}

Colofon

Uitgegeven door	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Informatie	Helpdesk Water, www.helpdeskwater.nl
Contact	helpdeskwater@rws.nl
Uitgevoerd door	Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving
Datum	28 mei 2021
Status	Definitief
Versienummer	4.0

BELANGRIJK: De website van het Informatiepunt Leefomgeving (IPLO) is gelanceerd. Het IPLO is dé website voor experts met vragen over bodem, bouwen, water, milieu en de Omgevingswet. Het IPLO bundelt informatie over de uitvoering van de Omgevingswet met de kennis van Bodem+, Kenniscentrum InfoMil, Helpdesk Bouwregelgeving én Helpdesk Water. Alle relevante informatie van deze sites wordt overgebracht naar de IPLO-website en verder uitgebreid. Ook de vraagafhandeling van deze helpdesk gaat in de loop van 2021 via het IPLO verlopen. Dit betekent dat u steeds vaker wordt doorverwezen naar het IPLO. Kijk voor meer informatie op: www.iplo.nl

In de algemene en specifieke release notes van de release van 28 mei 2021 voor Riskeer 2021.1 op de helpdeskwater staan welke wijzigingen opgenomen zijn.

De functionaliteit van piping probabilistisch in Riskeer is nog niet beschreven in deze Schematiseringshandleiding.

Inhoud

1	Schematiseringshandleidingen en WBI	9
1.1	Schematiseringshandleidingen en WBI generiek	9
1.2	Uitgangspunten schematiseringshandleiding specifiek	13
1.3	Opbouw	14
2	Stappenschema	15
2.1	Inleiding	15
2.2	Toetsen	15
2.2.1	Eenvoudige toets	15
2.2.2	Gedetailleerde toets	15
2.2.3	Veiligheidsformat gedetailleerde toets	16
2.2.4	Toets op maat	18
2.3	Schematiseren	18
3	Hydraulische belastingen	20
3.1	Maatgevende belasting	20
3.2	Waterstandverlopen	20
4	Inventarisatie gegevens	22
5	Dijkvakindeling	23
5.1	Bepaling vakgrenzen	23
5.1.1	Vakgrootte	23
5.1.2	Administratieve grenzen	23
5.1.3	Vakgrenzen als gevolg van verschillen in belasting of sterkte	23
5.2	Bodemopbouw die niet pipinggevoelig is	24
5.3	Bodemopbouw waarbij het mechanisme piping een rol speelt	25
6	Schematisering per vak	29
6.1	Karakterisering van de ondergrondopbouw in de omgeving van de dijk	29
6.1.1	Algemeen	29
6.1.2	Stochastische Ondergrondschematisering (SOS)	29
6.2	Geohydrologische karakterisering	31
6.3	Geotechnische schematisering van de dijk en ondergrond in de directe omgeving ervan	32
6.3.1	Algemeen	32
6.3.2	Waarnemingen	32
6.3.3	Grond- en laboratoriumonderzoek	33
6.3.4	Relevante afmetingen van lagen voor het toetsspoor piping	34
6.3.4.1	Meetlocatieafstanden van 200 m	34
6.3.4.2	Meetlocatieafstanden van 100 m	34
6.3.4.3	Meetlocatieafstanden van 50 m	35
6.3.4.4	Samenvattend	35
6.3.5	Aandachtspunten	35
6.4	Keuze maatgevende dwarsprofielen (geometrie)	36
6.5	Scenario's vaststellen voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie	36
6.5.1	Gewicht van de grondkolom op een watervoerend pakket met bovenzijde op beperkte diepte	36
6.5.2	Continuïteit van watervoerende pakketten in het relevante dieptebereik	37
7	Parameters	38
7.1	Algemeen	38

7.2	Parameters	38
7.2.1	Intredepunt	38
7.2.2	Uittredepunt	40
7.2.3	Bovenzijde cohesieve deklaag	42
7.2.4	Onderzijde cohesieve deklaag	43
7.2.5	Onderzijde aquifer	44
7.2.6	d_{70}	45
7.2.7	Verzadigd volumegewicht cohesieve deklaag	46
7.2.8	Volumegewicht van zandkorrels onder water	47
7.2.9	Doorlatendheid zandlaag (aquifer)	48
7.2.10	Waterstand binnendijks (slootpeil)	49
7.2.11	Buitenwaterstand (hydraulische belasting)	50
7.2.12	Waterstandsverlooplijn (hydraulische belasting)	50
7.2.13	Volumegewicht water	50
7.2.14	Leklengte voorland en achterland	51
7.2.15	Waterspanningen watervoerende lagen	51
7.2.16	Dempingsfactor	53
7.2.17	Lengte-effectfactor	54
8	Voorbeeld	55
8.1	Algemeen	55
8.2	Beschrijving van de dijk	55
8.2.1	Het dijktracé	55
8.2.2	De dijk	57
8.2.3	Terrein	57
8.3	Beschikbare grondgegevens	59
8.3.1	Globale Stochastische Ondergrond Schematisering (WBI-SOS)	59
8.3.2	Lokale grondgegevens	63
8.4	Ondergrondschematisering	67
8.4.1	Grondopbouw	67
8.4.2	Doorlatendheid zandpakketten	71
8.4.3	d_{70} zandpakket onder deklaag	72
8.4.4	Verzadigd gewicht van de deklaag	73
8.5	Schematisering dwarsprofielen	73
8.5.1	Dijkvakindeling	73
8.5.2	Buitenwaterstand en waterstandsverloop	74
8.5.3	De binnendijkse waterstand	74
8.5.4	Dempingsfactor	74
8.5.5	Intredepunt	74
8.5.6	Uittredepunt	76
8.5.7	Kwelweglengte	78
8.6	Aanbeveling aanvullend grondonderzoek	78
A	Literatuur	81
B	Memo Optreden van piping in getijdenafzettingen	83
C	Berekeningsmodellen	92
C.1	Berekeningsmodellen	92
C.2	Bepaling effectieve laagdikte voor opdrijven bij een sloot	94
D	Overzicht van parameterwaarden (startwaarden c.q. aanbevolen)	96
E	Bepaling intredepunt bij voorland	97

F	Doorlatendheid van SOS zand- en grindeenheden voor de SOS segmenten	101
G	d_{70} van de SOS eenheden voor de SOS segmenten	102
H	Bepalingswijze van de doorlatendheid k en de d_{70} waarde van zandpakketten	103
H.1	Inleiding	103
H.2	Conceptueel model voor het faalmechanisme piping	103
H.3	Bepaling parameterwaarden	104
H.4	Vaststellen equivalente parameterwaarden d_{70eq}	112
I	VNKH en SOS: korrelgrootte d_{70} en doorlatendheid	117
I.1	Koppeling VNKH-parameters aan SOS eenheden	117
I.2	Output files	118
J	Schema werkwijze beoordeling piping	120
J.1	Toelichting op het schema werkwijze beoordeling	120
J.2	Schema werkwijze beoordeling Piping (STPH)	121
J.3	Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Piping (STPH)	121
K	Voorbeeld berekening leklengte en dempingsfactor	124
K.1	Introductie	124
K.2	Opgave	126
K.3	Uitwerking	129

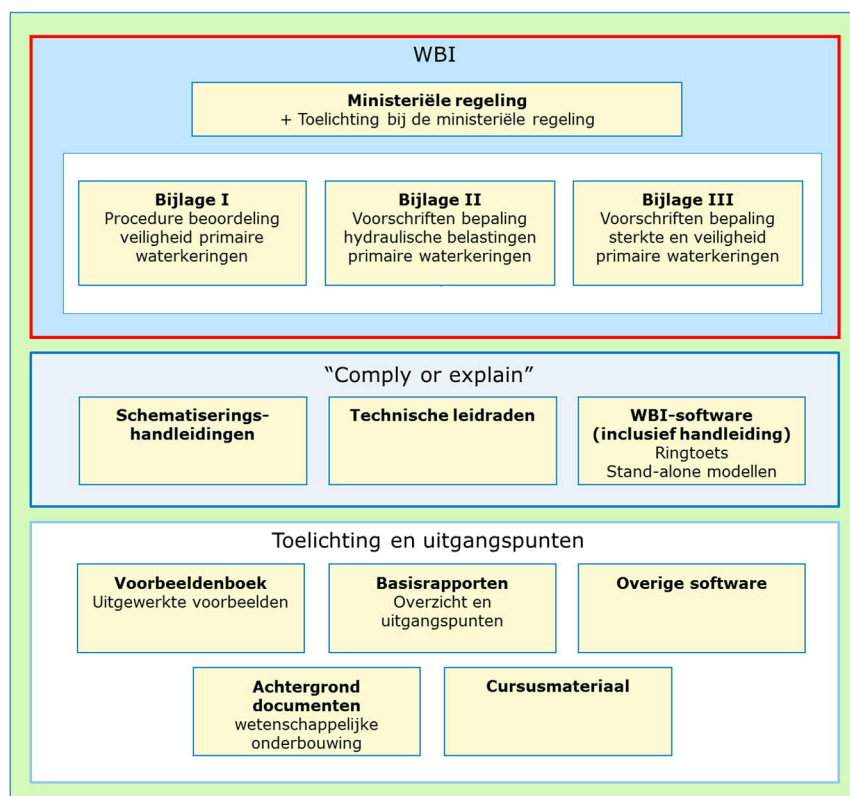
1 Schematiseringshandleidingen en WBI

1.1 Schematiseringshandleidingen en WBI generiek

Deze schematiseringshandleiding is opgesteld in het kader van het Wettelijk Beoordelings-instrumentarium (hierna: WBI 2017 of WBI). Het WBI voor de beoordelingsronde 2017-2023 bestaat uit de ministeriële regeling en 3 bijlagen. Die drie bijlagen zullen verder worden aangeduid als:

- *WBI 2017 Bijlage I Procedure.*
- *WBI 2017 Bijlage II Hydraulische belastingen.*
- *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.*

Het WBI bevat de voorschriften voor het uitvoeren van de beoordeling. In deze voorschriften wordt verwezen naar een aantal documenten en applicaties die de beheerder *ondersteunen* bij het uitvoeren van de beoordeling, waaronder de schematiseringshandleidingen en de WBI software. Een overzicht van de structuur van het WBI en de daaraan gerelateerde documenten staat in Figuur 1. Binnen het rode kader de formele WBI documenten, daarbuiten de ondersteunende documenten en applicaties.



Figuur 1 Het WBI 2017 en daaraan gerelateerde documenten

WBI software

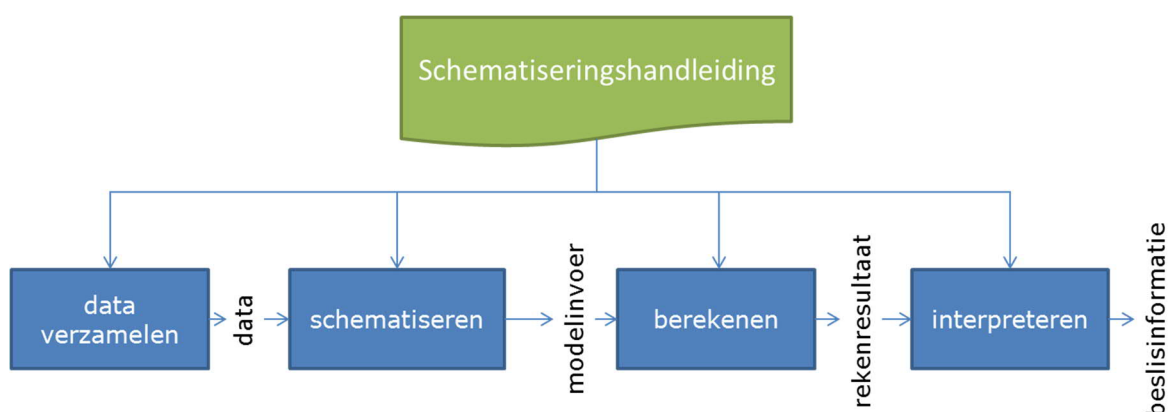
Er zijn meerdere 'WBI applicaties'. Ringtoets is feitelijk het 'beoordelings-platform' en staat daarom ook wel bekend als dé WBI software. De andere applicaties, waaronder de diverse Basismodules (zoals BM Gras Buitentalud, BM Asfalt en Steentoets) en D-Soilmodel maken echter ook nadrukkelijk deel uit van de WBI software-familie.

Ringtoets of Riskeer?

Ringtoets is de applicatie waarbinnen voor een aantal toetssporen de berekeningen en analyses kunnen worden uitgevoerd en de resultaten geassembleerd tot op het niveau van een oordeel per traject. Ringtoets versie 18.1.1 blijft de versie die primair bedoeld is voor de eenvoudige en de gedetailleerde toetsingen. Vanaf november 2019 is ook Riskeer beschikbaar, een doorontwikkelde versie van Ringtoets. Er is bewust gekozen voor de naamswijziging om het verschil tussen de applicatie t.b.v. de beoordeling (eenvoudig, gedetailleerd conform de regeling) te scheiden van de applicatie die ook kan worden ingezet voor enkele specifieke Toetsen op Maat en verificatie van overstromingskansen bij het ontwerp. In Riskeer 19.1.1 zijn namelijk nieuwe functionaliteiten beschikbaar en is ook nieuwe kennis toegepast. Wanneer overigens in Riskeer 19.1.1 met dezelfde instellingen wordt gerekend als in Ringtoets 18.1.1 leidt dat tot hetzelfde resultaat.

Doel schematiseringshandleiding

Het uitvoeren van een toets (eenvoudige toets, gedetailleerde toets per vak of toets op maat) voor het beoordelen van primaire waterkeringen bestaat op hoofdlijnen uit vier activiteiten, zie Figuur 2. In een schematiseringshandleiding wordt, gegeven een rekenmethode of model, de samenhang aangegeven tussen deze vier activiteiten: welke data benodigd is, hoe moet worden geschematiseerd, welke software hiervoor beschikbaar is en in sommige gevallen hoe de resultaten kunnen worden geïnterpreteerd.



Figuur 2 Activiteiten verbonden met een toets

De activiteit schematiseren wordt hier gedefinieerd als het vertalen van de gegevens over de waterkering naar invoer voor de methode (meestal een rekenmodel al dan niet in software) waarmee de toets wordt uitgevoerd. De gegevens kunnen meetgegevens zijn uit het veld of het laboratorium, ontwerp- of revisietekeningen zijn, maar kunnen ook kennis en ervaring betreffen. Bij het schematiseren speelt de beschikbare hoeveelheid gegevens en de kwaliteit ervan een grote rol. Bij weinig gegevens is de schematisering grof of globaal en met een grote onzekerheid. Naarmate er meer en betere gegevens beschikbaar zijn, wordt de schematisering fijner en preciezer, wat zal leiden tot een betere inschatting van de overstromingskansen. Vanzelfsprekend zit hier een optimum in, dat van geval tot geval verschilt. Meer gegevens is dus niet per definitie beter.

Faalmechanismen zijn vertaald in modellen. De meer complexe modellen zijn vervolgens weer in software gevat, omdat de berekeningen nu eenmaal niet meer op de achterkant van de sigarendoos kunnen worden gemaakt. Bij softwareontwikkeling worden keuzes gemaakt voor de (vrijheid van) invoer. Soms zijn modelparameters hard geprogrammeerd, in andere gevallen is het invoer gebruiker. De beschikbare software bepaalt dus in belangrijke mate de benodigde invoer. In algemene zin kunnen we wel stellen dat een schematisering bij een model óf applicatie hoort en niet bij een faalmechanisme. De faalmechanismen zijn beschreven in de [fenomenologische beschrijving WBI](https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@192499/fenomenologische/)¹. De beschikbare modellen en (bijbehorende) applicaties beschrijven soms maar een deel van het hierin beschreven faalspoor. In een aantal gevallen zijn er meerdere modellen beschikbaar en is het aan de gebruiker een keuze te maken.

¹ <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@192499/fenomenologische/>

Het doorlopen van de vier activiteiten uit figuur 2 is in veel gevallen een iteratief proces. Zeker als ervoor wordt gekozen om te starten met een grove schematisering. In de vierde activiteit wordt bekeken of door het inwinnen van extra gegevens en/of het verfijnen van de schematisering, het resultaat van de derde activiteiten kan worden aangescherpt. Het is uiteraard ook mogelijk om meteen te kiezen voor een gedetailleerde schematisering.

De schematiseringshandleiding geeft aanwijzingen voor het type en de benodigde hoeveelheid aan onderzoek om tot een goede schematisering te kunnen komen. Verder ondersteunt de schematiseringshandleiding gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de toets kan worden toegepast. De wijze waarop gegevens ingewonnen moeten worden (bijvoorbeeld hoe veldonderzoek of laboratoriumonderzoek uitgevoerd wordt) wordt slechts summier behandeld.

De schematiseringshandleiding is geen wet. Het is een handleiding die de gebruiker er niet van ontslaat zelf na te denken. Als de lokale situatie aanleiding geeft om af te wijken van wat in de Schematiseringshandleiding staat beschreven, is dat zelfs aan te raden.

Veel van wat in deze schematiseringshandleiding staat beschreven is ook toepasbaar bij het ontwerp van (primaire) waterkeringen, of bijvoorbeeld bij het toetsen van regionale keringen. Op een aantal plekken zijn ook specifiek ten aanzien van ontwerpen handvatten gegeven. De lezer moet zich echter nadrukkelijk realiseren dat deze schematiseringshandleiding is geschreven voor de beoordeling van primaire waterkeringen.

Uitgangspunten

Voor alle schematiseringshandleidingen gelden de volgende uitgangspunten:

- Voor de gegevens die in het rekenmodel voor het toetsspoor worden ingevoerd wordt een format voorgeschreven. Een rekenmodel kent immers toepassingsgrenzen. Het format sluit aan bij de Aquo standaard. Verdere informatie hierover is te vinden in de Handleiding datamanagement² WBI [6].
- Deze schematiseringshandleiding *ondersteunt* gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de beoordelingsmethoden kunnen worden toegepast.
- Deze schematiseringshandleiding geeft tevens *aanwijzingen* voor de waarden die voor parameters aangehouden kunnen worden. In de Handleiding Datamanagement WBI [6] (paragraaf 4.1) zijn vier typen waarden benoemd, die ook in deze schematiseringshandleiding worden gehanteerd:

Groep	Benaming	Toelichting
1	Vaste waarde	Parameterwaarden mogen door de gebruiker niet worden gewijzigd (voor de beoordeling).
2	Defaultwaarde of aanbevolen waarde	Parameterwaarden mogen door de gebruiker wel worden gewijzigd .
3	Startwaarde	Parameterwaarden worden bij voorkeur door lokale waarden vervangen.
4	Vrije waarde	Geen gegeven parameterwaarden. De gebruiker moet de regionale of lokale waarden bepalen of op ervaring inschatten.

Doelgroep

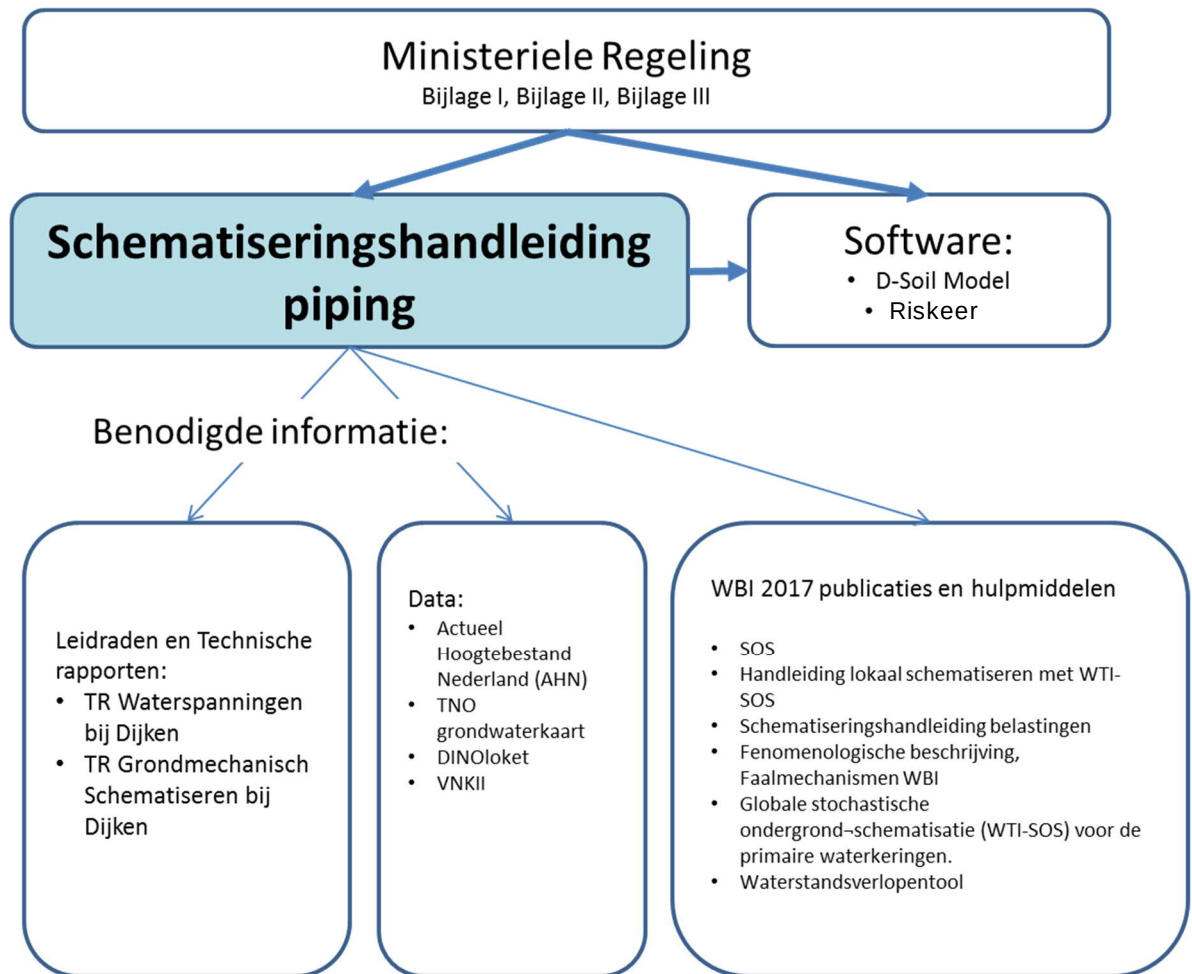
De schematiseringshandleiding is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en modellen die van toepassing zijn voor deze schematiseringshandleiding.

² <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina/zoeken-site/@205764/handleiding/>

1.2

Uitgangspunten schematiseringshandleiding specifiek

De positie van de Schematiseringshandleiding piping ten opzichte van de overige bouwstenen is in onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 1-1 De positie van de Schematiseringshandleiding piping ten opzichte van de overige bouwstenen.

Voor deze schematiseringshandleiding piping gelden de volgende uitgangspunten:

- Voor het schematiseren van de opbouw van de ondergrond is voor alle primaire waterkeringen in Nederland een globale stochastische ondergrond schematisering, SOS, beschikbaar. Voor het beoordelen van een faalmechanisme dient deze globale schematisering van de opbouw van de ondergrond als startpunt voor het maken van toepassingsspecifieke, lokale ondergrondschematisering op basis van informatie uit aanvullend geotechnisch onderzoek. In deze schematiseringshandleiding wordt verwezen naar de desbetreffende handleiding SOS [7]. In die handleiding worden ook aanwijzingen gegeven om op basis van de SOS schematisering een locatiespecifieke schematisering van de opbouw van de ondergrond kan worden gemaakt.
- Deze schematiseringshandleiding is voor zowel dijken als dammen geschikt. Met 'dammen' worden in deze context de dammen bedoeld die zijn aangemerkt als primaire waterkering, dus niet havendammen, strekdammen en dergelijke. Overigens zijn de meeste elementen hetzelfde voor havendammen en strekdammen en dergelijke, en is er vooral verschil in schematisering van waterstanden en waterspanningen.

- De handleiding is met name bedoeld voor de eenvoudige en gedetailleerde toets in *WBI 2017 Bijlage III sterkte en veiligheid*, maar kan ook gebruikt worden voor een Toets op Maat.
- In het voorschrift *WBI 2017 Bijlage I Procedure* is in paragraaf 6.6 gesteld: “De periodieke beoordeling van de waterkeringen gaat uit van het werkelijke profiel van de kering en toestand op de peildatum. Dit betekent dat ook het voorland moet worden meegenomen in de schematisering en de beoordeling als dit aanwezig is, ook als het voorland niet opgenomen is in de legger”.

1.3

Opbouw

De opbouw van deze handleiding is als volgt:

Onderwerp	Locatie
Stappenschema	Hoofdstuk 2
Hydraulische belastingen	Hoofdstuk 3
Inventarisatie gegevens	Hoofdstuk 4
Vakindeling	Hoofdstuk 5
Schematisering per vak	Hoofdstuk 6
Parameters	Hoofdstuk 7
Voorbeeld	Hoofdstuk 8

Het *stappenschema in hoofdstuk 2* vormt de basis van de schematiseringshandleiding. Dit stappenschema geeft een overzicht van de te volgen stappen voor het schematiseren. Per stap wordt een verwijzing gegeven naar een paragraaf of hoofdstuk van deze schematiseringshandleiding waarin dit verder wordt uitgewerkt. Dit hoofdstuk 2 kan dus als leeswijzer of leidraad voor het toepassen van dit rapport worden gebruikt.

Voor een omschrijving van begrippen wordt verwezen naar de algemene begrippenlijst die is opgenomen als Appendix B van *WBI 2017 Bijlage I Procedure*.

2 Stappenschema

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een stappenschema dat moet worden doorlopen om tot een schematisering te komen. Per stap is een verwijzing opgenomen naar bijbehorende paragraaf waar dit verder uitgewerkt wordt.

In de volgende paragrafen is de *eenvoudige toets* en de *gedetailleerde toets* beschreven.

2.2 Toetsen

2.2.1 *Eenvoudige toets*

De *eenvoudige toets* op piping bestaat uit drie stappen, namelijk een relevantietoets op basis van ondergrondkenmerken (dit is een toets of het mechanisme piping bij deze soort waterkering überhaupt speelt), een toets op tijdsafhankelijkheid, en een toets op geometrische kenmerken.

Bij de relevantietoets wordt gecontroleerd of er sprake is van een duin of zanddijk op een zandondergrond. Piping treedt namelijk niet op als er sprake is van een duin of een zanddijk op een goed doorlatende ondergrond, waarbij direct onder de basis van de zanddijk geen scheidende slecht doorlatende (klei en/of veen) lagen aanwezig zijn.

Bij de toets op tijdsafhankelijkheid wordt gecontroleerd of de duur van het hoogwater de tijdsduur benodigd voor het ontwikkelen van een volledige pipe overschrijdt.

Bij de geometrische toets wordt gecontroleerd of de dijk aan de toets op basis van veilige afmetingen voldoet. Bij een bepaalde verhouding tussen kwelweglengte en het waterdrukverschil over de waterkering, $L/\Delta H$, kan piping zeker niet optreden. De verhouding is afhankelijk van de dikte van de deklaag en de vereiste betrouwbaarheid.

De voor de beoordeling van de desbetreffende dwarsdoorsnede aanwezige quotiënt $L/\Delta H$ moet groter zijn dan de minimaal vereiste $L/\Delta H$ -waarden voor de desbetreffende deklaag dikte, volgens *WBI 2017 Bijlage III sterkte en veiligheid*. L is daarbij gedefinieerd als de afstand tussen intredepunt en uittredepunt.

2.2.2 *Gedetailleerde toets*

De *gedetailleerde toets* omvat de deelmechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. De in Riskeer gehanteerde grenstoestandsfuncties zijn beschreven in Bijlage C.

De *gedetailleerde toets* houdt in:

- De controle op de opbarstveiligheid komt neer op het bepalen van het verticale evenwicht van de grondspanning en de waterspanning ter plaatse van de onderkant van de deklaag.
- De controle op heave (verticaal zandtransport door de opgebarsten laag) komt neer op het bepalen van de verhouding tussen het maximaal optredende verhang over de verticaal gerichte grondwaterstroom ter plaatse van de opgebarsten deklaag en het kritieke verhang. Daarbij is de dikte van de deklaag de afstand waarover heave kan optreden.
- De controle op de aanwezigheid van voldoende horizontale kwelweglengte.

De *gedetailleerde toets* in het WBI 2017 kent twee vormen:

- Semi-probabilistische toets per dijkvak;
- Probabilistische toets per traject. Deze probabilistische toets wordt echter nog niet ondersteund.

2.2.3

Veiligheidsformat gedetailleerde toets

In de gedetailleerde toets worden onzekerheden expliciet meegenomen. Binnen een vak kunnen onzekerheden op verschillende manieren worden verdisconteerd. Voor een vak geldt dat deze als homogeen wordt beschouwd, dat wil zeggen dat de onzekerheid op elke plaats in het vak gelijk is. Nadere toelichting op de vakindeling wordt in hoofdstuk 5 gegeven.

Per variabele is in de volgende tabel aangegeven op welke wijze de onzekerheden kunnen worden meegenomen. De onzekerheid wordt slechts op één manier in rekening gebracht. Een parameter die als stochast wordt meegenomen heeft dan geen invloed op de gekozen scenario's. Nadere toelichting op de parameters wordt gegeven in hoofdstuk 7.

Tabel 2.1 Relevante parameters en manier waarop onzekerheid in rekening wordt gebracht.

Variabele	Symbool	Keuze representatief profiel	Stochast met verwachtingswaarde en spreiding	Scenario
Intredepunt				X
Uittredepunt				X
Kwelweglengte (wordt bepaald door intredepunt en uittredepunt)	L		X*	
Dikte deklaag	D_{cover}		X*	
Bovenzijde cohesieve laag		X		
Onderzijde cohesieve laag				X
Dikte watervoerend pakket	D		X*	
Onderzijde aquifer				X
d_{70}	d_{70}		X	
Verzadigd volumegewicht cohesieve deklaag	γ_{sat}		X	
Volumegewicht zandkorrels onder water**				
Doorlatendheid zandlaag (aquifer)	K		X	
Waterstand* binnendijks (slootpeil, polderpeil)	h_{exit}		X	X Zie par 7.2.11
Buitenwaterstand* (hydraulische belasting)	H		X Volgt uit Riskeer	
Waterstandsverlooplijn (hydraulische belasting)			X Zie par 7.2.13	
Volumegewicht water**	γ_{water}			
Waterspanningen watervoerende lagen	ϕ			X Zie par. 7.2.10
Leklengte voor- en achterland	λ		X*	
Dempingsfactor	r_{exit}		X*	

* wordt berekend met andere variabelen en parameters

** voor deze parameters is geen onzekerheid meegenomen.

Voor stochasten zijn in de onderstaande tabel startwaarden en variatiecoëfficiënten aangegeven voor D-Soil Model en Riskeer. Ook is aangegeven met welk type waarde in de semi-probabilistische gedetailleerde toets wordt gerekend.

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

Stochast	Startwaarde	Nominale of boven/ondergrens waarde voor semi probabilistische toets	Aanpassing verwachtingswaarde en standaardafwijking mogelijk?
d_{70}	Startwaarde gemiddelde d_{70} is gegeven in tabel* Variatiecoëfficiënt is 0,12	Ondergrens	alleen in D-SoilModel, niet in Riskeer
Doorlatendheid zandlaag (aquifer)	Startwaarde gemiddelde doorlatendheid is gegeven in tabel* Startwaarde variatiecoëfficiënt is 0,5	Bovengrens	alleen in D-SoilModel, niet in Riskeer
Verzadigd volumegewicht cohesieve deklaag	Geen startwaarde. Deze waarde moet worden bepaald op basis van de lokale situatie. Uitgegaan wordt van verschoven lognormale verdeling, met verschuiving van 10 kN/m ³ . Zie par 7.2.7 Startwaarde variatiecoëfficiënt 0,05**	Ondergrens	alleen in D-SoilModel, niet in Riskeer
Dempingsfactor	Geen startwaarde, zie par 7.2.16. Lognormale verdeling, startwaarde voor de variatiecoëfficiënt 0,1	Bovengrens. Zie Par 7.2.16	In Riskeer, startwaarde is 0,1
Kwelweglengte	Geen startwaarde, wordt bepaald door locaties intredepunt en uittredepunt. Lognormale verdeling, startwaarde voor variatiecoëfficiënt 0,1**	Ondergrens	Nee, vaste waarde in Riskeer is 0,1
Dikte deklaag	Geen startwaarde, wordt bepaald door boven- en onderzijde cohesieve laag. Lognormale verdeling, startwaarde voor standaardafwijking 0,5 m***	Ondergrens	Nee, vaste waarde in Riskeer is 0,5
Dikte aquifer	Geen startwaarde, wordt bepaald door onderkant deklaag en onderkant aquifer. Lognormale verdeling startwaarde voor standaardafwijking 0,5 m***	Bovengrens	Nee, vaste waarde in Riskeer is 0,5
Waterstand binnendijks	Geen startwaarde. Zie par 7.2.11 Standaard deviatie 0,1 m	Ondergrens	In Riskeer, startwaarde is 0,1

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

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

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

2.2.4 Toets op maat

In de toets op maat kunnen (naast geavanceerdere rekenmethoden en -modellen) geavanceerde methodes worden ingezet om de schematisering te verbeteren. Denk hierbij aan het nauwkeuriger bepalen van korrelgrootte, doorlatendheid, lengte-effectfactor, tijdsafhankelijkheid of bodemopbouw.

In het programma Kennis voor Keringen (KvK) zijn sinds 2018 verschillende factoren beschouwd waarmee een verfijndere pipinganalyse mogelijk is. Onderzoek is uitgevoerd op het gebied van anisotropie, fijne fractie, voorland en achterland, observaties, de 0,3D-regel, heterogeniteit in de baan van de pipe, 3D effecten en gecombineerde effecten. Veel van de kennis is nog niet gevalideerd. Echter, ten behoeve van de kennisoverdracht is een bijsluiter ontwikkeld [29] waarin de ontwikkelde KvK kennis is samengevat en resterende kennisleemtes zijn gepresenteerd. De bijsluiter biedt beheerders de mogelijkheid een weloverwogen besluit te nemen over het toepassen van de ontwikkelde kennis voor zover relevant voor zijn gebied. Het is aan de beheerder om de keuze te maken welke kennis voor een toets op maat (of ontwerp) wordt toegepast.

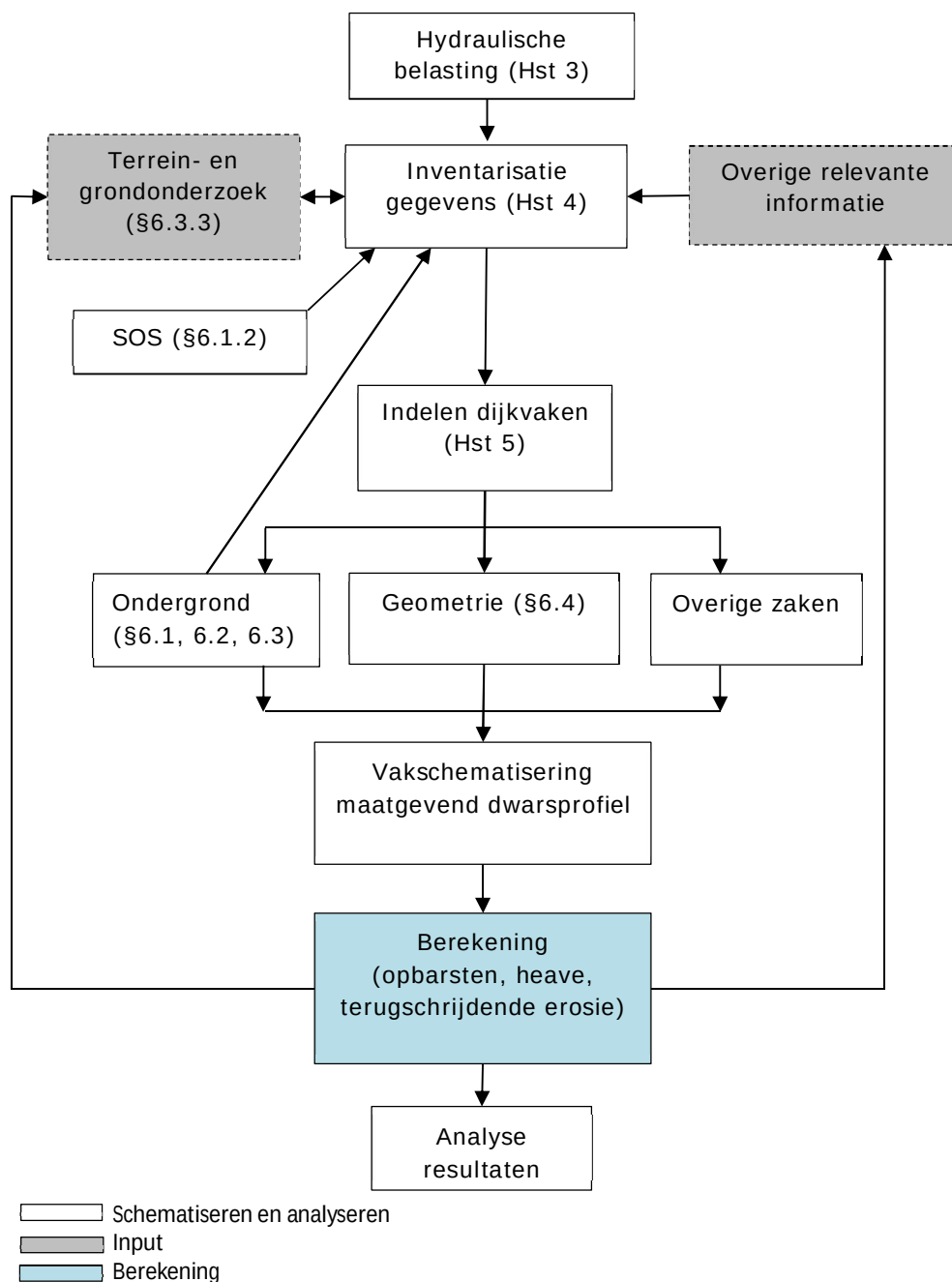
2.3 Schematiseren

In onderstaand schema zijn de stappen gegeven die doorlopen worden bij het schematiseren met betrekking tot het faalmechanisme piping.

In onderstaand schema is per aspect een verwijzing opgenomen naar het hoofdstuk in deze handleiding waar verdere informatie over dit aspect te vinden is.

Er kan van grof naar fijn gewerkt worden:

- Er is een wisselwerking tussen de inventarisatie van de benodigde terrein- en grondgegevens en het eventueel uitvoeren van terrein- en grondonderzoek.
- Na de analyse van de resultaten van de berekeningen kan blijken dat het zinvol is om aanvullend terrein- en grondonderzoek te doen en om eventueel de vakindeling aan te passen. Daarna kunnen de op de inventarisatie volgende stappen opnieuw worden doorlopen.



Figuur 2.1 Stappenschema schematiseren voor toetsspoor Piping

Opmerking: Parameterwaarden zijn geen onderdeel van SOS en moeten apart verzameld worden voor een schematisering.

3 Hydraulische belastingen

De Hydraulische Belastingen (HB) zijn gerelateerd aan de wettelijke veiligheidsnorm met betrekking tot overstroming, zoals die is vastgelegd in de *Waterwet*. Als gevolg van de overstap van overschrijdingskansnormen naar overstromingskansnormen zijn de rekenwaarden voor de buitenwaterstand bij de norm per toetsspoor afgeleid.

Een nadere beschrijving van de hydraulische belastingen is te vinden in *WBI 2017 Bijlage II Hydraulische belastingen*.

3.1 Maatgevende belasting

Piping is een verschijnsel dat kan optreden bij hoge waterstanden van het buitenwater (rivier, kanaal, boezem, meer of zee), waarbij het verval (dat is het verschil tussen buitenwaterstand en binnenwaterstand ofwel het verschil tussen buitenwaterstand en maaiveldhoogte c.q. polderpeil) zo groot is dat zandtransport als gevolg van terugschrijdende erosie onder een cohesieve deklaag plaats gaat vinden en een open kanaal ontstaat. Als gevolg van terugschrijdende erosie treden zandmeevoerende wellen op.

De hydraulische belastingen zijn:

- Waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm voor een semi-probabilistische stabiliteitsanalyse. Bij het uitvoeren van een pipinganalyse wordt deze waterstand probabilistisch berekend in Riskeer.
- Waterstandsverlooptlijnen worden gebruikt voor het in rekening brengen van niet-stationaire grondwaterstroming voor de bepaling van de stijghoogte in het zand. De waterstandsverlooptlijn is de tijdelijke belasting die via een leklengte en dempingsfactor in rekening wordt gebracht. Voor verschillende gebieden in Nederland geldt een specifieke waterstandsverlooptlijn (zie ook paragraaf 3.2. De wijze waarop de leklengte en dempingsfactor worden bepaald is beschreven in hoofdstuk 7)

Bij de bepaling van de stijghoogte in het zand met rekenmodellen spelen onzekerheden een belangrijke rol, omdat parameters voor die rekenmodellen moeilijk zijn te schatten. Die onzekerheden kunnen verminderd worden door het afregelen van de parameters in de geohydrologische modellen met behulp van waterspanningsmetingen.

3.2 Waterstandverlopen

De duur van de belasting wordt beschreven met het waterstandsverloop. Een waterstandsverloop geeft voor een locatie de tijdsafhankelijke waterstand aan tijdens het passeren van een storm of hoogwatergolf behorende bij de waterstand bij de norm, of soms ook bij een lagere waterstand.

Het waterstandverloop is van invloed op de ontwikkeling van de waterspanningen in de watervoerende en pipinggevoelige lagen onder en achter de dijk.

- Bij waterstanden van 'lange' duur is sprake van (semi-)stationaire grondwaterstroming.
- Bij waterstanden van 'beperkte' duur is sprake van niet-stationaire grondwaterstroming, ofwel tijdsafhankelijke grondwaterstroming.

Bij niet-stationaire grondwaterstroming zal de waterspanning in de watervoerende bodemlagen onder en achter de dijk bij gelijke buitenwaterstand minder hoog zijn dan bij stationaire grondwaterstroming. Dit is afhankelijk van het bergend vermogen van de bodemlagen (freatische berging in de onverzadigde grondlagen en elastische berging binnen het korrelskelet), de doorlatendheid en dikte van de bodemlagen en de duur van de belasting. Dit betekent dat de kracht op de korrels kleiner is dan bij stationaire grondwaterstroming. In het benedenrivierengebied, de estuaria en langs de kust treedt onder de maatgevende omstandigheden vrijwel altijd niet-stationaire grondwaterstroming op.

Bij het beoordelen van waterkeringen, die alleen een beperkte tijd worden belast, kan gebruik worden gemaakt van de waterstandsverlopen, zoals die worden gepresenteerd in de tool Waterstandsverloop (versie 2.0) . Hiervoor is een eigen gebruikershandleiding beschikbaar (zie [3]). Met deze tool kunnen eenvoudig waterstandsverlopen op een bepaalde locatie in Nederland worden opgevraagd en geëxporteerd.

De respons in de watervoerende en pipinggevoelige lagen onder en achter de dijk op de buitenwaterstand kan worden berekend met geohydrologische modellen of worden bepaald met behulp van peilbuismetingen in doorlatende lagen onder en landwaarts van de dijk. Voor de analyse van deze metingen en een voorspelling van de respons zijn meerdere methoden voor de *gedetailleerde toets* beschikbaar. Zie hiervoor Lambert [22] en het *TR Waterspanningen bij Dijken* [18].

Bovenrivierengebied

Bij dijken in het bovenrivierengebied is piping een belangrijk faalmechanisme, vooral omdat de hoge waterstanden relatief lang aanhouden. In het algemeen treedt één langdurig hoogwater op. Het waterpeil stijgt langzaam tot aan de piekwaarde en bouwt zich dan langzaam weer af. De hele hoogwatergolf kan ongeveer twee weken duren. Hier speelt tijdsafhankelijkheid voor maatgevende omstandigheden dus nauwelijks een rol, en kan stationair worden gerekend.

Benedenrivierengebied

In het benedenrivierengebied kan tijdsafhankelijkheid een belangrijke rol spelen. Hier wordt de waterstand deels bepaald door de rivierafvoer en deels bepaald door de waterstand op zee, waardoor de invloed van het getij enigszins merkbaar is en bovendien een kort durende waterstandsverhoging door een storm boven zee kan optreden.

Meren

In de meren wordt de waterstand voornamelijk door windopzet bij storm bepaald. Er is dus sprake van een korte belastingduur en dus van tijdsafhankelijkheid. Hiervoor zijn waterstanden bij de norm afgeleid en zijn waterstandsverlooplijnen beschikbaar.

Zee

Aan zee speelt tijdsafhankelijkheid een grote rol. Bij zeedijken wordt tijdens stormcondities de waterstand in het algemeen bepaald door de getijbeweging en de stormopzet. De getijamplitude varieert van springtij tot doottij. Bovenop het getij moet nog de invloed van de storm opgeteld worden: de stormopzet. Het verloop in de tijd van de stormopzet kan van storm tot storm sterk verschillen. Een korte storm met een opzet gedurende enkele uren zal slechts één hoogwater beïnvloeden en dus één extreme piek in de waterstand tot gevolg hebben. Een storm van enkele dagen zal meerdere pieken veroorzaken, die echter niet allemaal even hoog hoeven te zijn. Er is geen relatie tussen de duur van de opzet en de hoogte van de opzet.

4 Inventarisatie gegevens

Voordat aan de indeling in vakken begonnen wordt, worden de beschikbare informatie en gegevens betreffende de ondergrondsegmenten (definitie zie paragraaf 6.1.2) geïnventariseerd en in D-Soil Model vastgelegd, overzichtelijk in de lengte- of dwarsprofielen geordend en dan geanalyseerd. Daarmee kan op hoofdlijnen het te beoordelen dijktraject bekeken worden. In deze inventarisatie wordt gekeken naar alle beschikbare gegevens.

Gebruik hiervoor de volgende checklist:

- informatiebronnen en uitgangspunten uit eerdere beoordelingen en aanvullende archiefgegevens van de waterbeheerder, zoals oude bestekken voor de bouw en latere verhogingen of versterking;
- eventuele recente dijkverbeteringen;
- VNK2-database en resultaten;
- beschikbaar veld- en laboratoriumonderzoek;
- grondopbouwscenario's uit de globale stochastische ondergrondschematisering (SOS);
- historische vakindeling;
- geometrie van de waterkering (hoogte, taluds, bermen, overige aanpassingen grondlichaam), ook o.b.v. hoogtekaarten, actueel hoogtebestand Nederland;
- terreingegevens (maaiveld, sloten, ontgravingen, bebouwing);
- ervaringen van de beheerder over onderhoudsingrepen en geobserveerd gedrag bij hoge waterstanden in het recente verleden (decennia);
- historische kaarten;
- geologische kaarten (ondergrondkaarten, bodemkaarten, zandbanenkaarten, uiterwaardenkaarten);
- grondwater- en geohydrologische kaarten;
- peilkaarten;
- meetgegevens waterpeilen, stijghoogtes in ondergrond en andere monitoringsresultaten;
- geodatabank;
- satellietbeelden;
- waarnemingen van o.a. schadebeelden (zoals zandmeevoerende wellen) door en ervaringen van de beheerder (rapportage, interviews);
- gebiedskennis van de beheerder;
- informatie uit eerder nabij de waterkering uitgevoerd geotechnisch onderzoek met grondonderzoekgegevens (boor- en sondeerstaten, laboratoriumbepalingen op monsters).

Opgemerkt wordt dat deze lijst uitgebreid, maar niet volledig is.

Deze inventarisatie dient er toe om inzicht te krijgen in de lokale en regionale geohydrologische, geologische en geotechnische situatie. Hierdoor wordt focus verkregen voor het eventuele benodigde aanvullend grondonderzoek, een geschikte vakindeling en een plan om van grof naar fijn te werken. Hierbij kunnen de volgende onderdelen beschouwd worden:

- Hoeveelheid en kwaliteit van de beschikbare gegevens. Een mogelijke conclusie kan zijn dat er over één of meerdere belangrijke parameters onvoldoende informatie beschikbaar is.
- Zwaartepunten voor de beoordeling. Uit de inventarisatie kan blijken aan welk onderdeel in de schematisering meer of minder aandacht besteed zal moeten worden.

Op basis van de inventarisatie kan de eerste (voorlopige) vakindeling met ondergrondschematisering gemaakt worden. Dit is verder uitgewerkt in de volgende paragrafen.

Als het analyseresultaat niet tot een bevredigend oordeel leidt kan door het verzamelen van aanvullende informatie (zoals extra terrein- en grondonderzoek) worden getracht de vakindeling en/of de ondergrondschematisering aan te scherpen.

5 Dijkvakindeling

Essentie van de dijkvakindeling is dat een dijkvak in voldoende mate homogene eigenschappen bezit om voor het desbetreffende faalmechanisme een representatieve schematisering te kunnen maken. Voor het verkrijgen van representatieve schematiseringen is kennis van de geologie en de geohydrologie van de omgeving van de dijk nodig. Waterspanningen in en onder de dijk zijn het effect van zaken die zich in de omgeving van de dijk afspelen, zoals de respons op rivierwaterstanden of op grondwaterpeilbeheer.

Vanuit hier kan worden toegewerkt naar lokale schematiseringen van de dijk, de ondergrondopbouw in de directe omgeving ervan en de relevante waterspanningen. Hoewel uiteindelijk alleen de lokale schematiseringen in de analyse worden gebruikt, is kennis van de omgeving nodig om zoveel mogelijk te voorkomen dat bij deze lokale schematiseringen zaken over het hoofd worden gezien die invloed hebben op het proces van piping in de lokale situatie. Het omgevingsbeeld wordt gevormd door kennis van en informatie over de in de omgeving van de dijk voorkomende geologische en geohydrologische karakteristieken. Schematiseringen van ondergrondopbouw en waterspanningen onder en nabij de dijk komen tot stand door combineren van dit omgevingsbeeld met informatie uit grondonderzoek ter plaatse van en nabij de dijk.

Dit hoofdstuk geeft voor het toetsspoor *piping* de overwegingen om de vakgrenzen te bepalen inclusief aandachtspunten en voorbeelden.

5.1 Bepaling vakgrenzen

5.1.1 Vakgrootte

De spreiding in de data speelt bij de keuze van de vakgrenzen een rol. Het is vaak handig om er voor te kiezen van grof naar fijn te werken en dijkvakken in een latere fase eventueel verder op te knippen³. Het bepalen van de vakgrenzen en het schematiseren van de opbouw van de ondergrond en van terreinomstandigheden zijn nauw met elkaar verweven onderdelen, die bij het werken van grof naar fijn met veld- en laboratoriumgegevens en metingen dienen te worden onderbouwd.

5.1.2 Administratieve grenzen

Een eerste criterium voor het maken van vakken zijn administratieve grenzen, te weten:

- Beheerdersgrenzen. Daar waar de waterkering verandert van beheerder kan om praktische redenen een knip worden gelegd.
- Type waterkering. Daar waar de waterkering van type verandert, wordt een grens gelegd. Hierbij worden bijvoorbeeld de volgende typen waterkeringen onderscheiden: dijken, duinen, hoge gronden, kunstwerken en aansluitconstructies.
- Normklasse. Bij een overgang van de ene overstromingskansnorm naar een andere overstromingskansnorm wordt een grens gelegd.
- Grenzen van peilgebieden.

5.1.3 Vakgrenzen als gevolg van verschillen in belasting of sterkte

Systematische en duidelijke veranderingen in geometrie en sterkte-eigenschappen van de waterkering zijn onder andere aanleiding voor het aanbrengen van een vakgrens.

Er kan een knip gelegd worden op een locatie waar een duidelijke verandering is in bijvoorbeeld:

- Waterstanden behorende bij de desbetreffende norm;
- Grondopbouw, bijvoorbeeld bij:
 - o een segmentgrens in het stochastisch ondergrondmodel;
 - o wel of geen pipinggevoelige grondopbouw (zie 5.3);

³ Sommige waterschappen kiezen op basis van een aantal gevoeligheidsanalyses vooraf per faalmechanisme een standaard vakgrootte per faalmechanisme. Hierdoor is het werk minder iteratief en dus kan het efficiënter zijn.

- o dikte aanwezige deklaag van klei- en/of veen;
- Aanwezigheid, hoogteligging en aard van het voorland;
- Aanwezigheid (kop)- sloten/watergangen;
- Maaiveldhoogte binnendijks;
- Geometrie van de dijk (breedte, aanwezigheid berm);
- Waargenomen wellen;
- Aanwezigheid van kwelschermen, drainage of niet-waterkerende objecten;
- Lokaal onderzoek met peilbuismetingen.

Het toepassen van de bovenstaande grenzen kan leiden tot langere of kortere dijkvakken. Algemene regels voor een praktisch bruikbare lengte van een dijkvak zijn niet te geven. Dit hangt samen met de lokale situatie⁴. Binnen Riskeer kunnen per dijkvak meerdere dijkprofielen aanwezig zijn. Eén van deze dijkprofielen wordt door de gebruiker als het maatgevende dijkprofiel aangemerkt en geanalyseerd.

5.2

Bodemopbouw die niet pipinggevoelig is

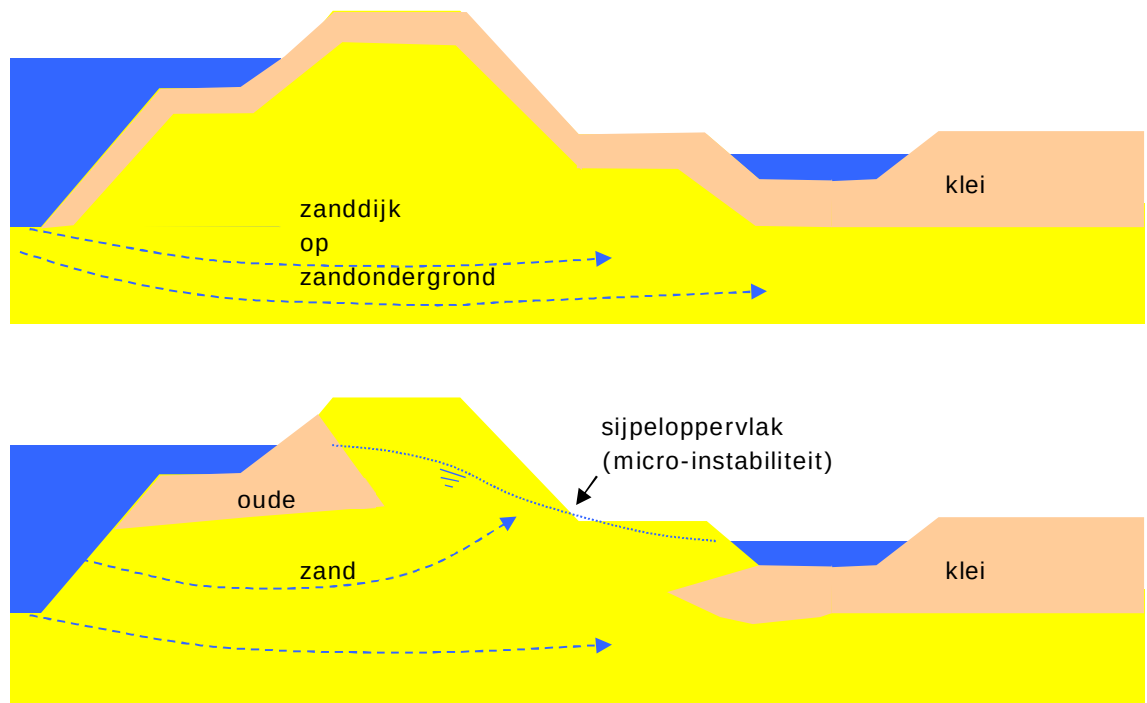
In Figuur 5.1 zijn twee voorbeelden van een configuratie van de opbouw geschetst waarbij piping geen rol kan spelen, te weten doorlatende grond tot ruim boven de verhanglijn, zoals bijvoorbeeld bij het ontbreken van een kleilaag(je) aan de basis van de zanddijk. In deze configuraties (zanddijk op zandige ondergrond) zal geen doorgaande pipe onder de dijk kunnen ontstaan. In het eerste voorbeeld bevindt zich een zanddijk op een zandondergrond. Hier vindt kwelstroming plaats via de ondergrond en door het dijklichaam zelf. Door een opening in de kleilaag kan wel zandtransport optreden, waardoor zand kan verdwijnen en eventueel een gedeeltelijke zakking van de kruin kan optreden, maar dit leidt niet tot een doorgaande pipe. Dit wordt ook wel micro-instabiliteit genoemd. Dit faalmechanisme wordt binnen WBI beoordeeld in het toetspoor *microstabiliteit*. De rekenregels voor piping zijn niet van toepassing.

In het tweede voorbeeld treedt het kwelwater uit aan het binnentalud van de dijk. Daar vormt zich een sijpeloppervlak. Hoewel hierbij erosie van zanddeeltjes kan optreden, zal een eventueel erosiekanaal dat zich begint te vormen instorten, omdat het zand cohesieloos is. Dit proces herhaalt zich continu, waardoor afkalving van het binnentalud plaatsvindt. Ook dit mechanisme is een vorm van micro-instabiliteit en moet in het toetspoor *microstabiliteit* worden beoordeeld.

Bij zanddijken op een goed doorlatende ondergrond moet worden opgemerkt dat er bij de aanleg van een dijk (opsputten van de dijk) een sliblaagje kan zijn achtergebleven waaronder een voor piping mogelijk kritieke kwelweg zou kunnen ontstaan. In algemene zin moet men er, om piping te kunnen uitsluiten, zeker van zijn dat er geen doorgaande slecht doorlatende laagjes in of onder de dijk aanwezig kunnen zijn. Indien men daar niet zeker van is, is geen sprake van een zanddijk op een goed doorlatende ondergrond en dient de toets te worden voortgezet met de toets op geometrische kenmerken. In geval van twijfel over de opbouw van de dijk moet altijd worden uitgegaan van een kleidijk. Indien kan worden aangetoond dat de dijk aan binnenwaartse zijde bestaat uit een zandlichaam, bijvoorbeeld door binnendijkse versterking in zand, dan mag voor de beoordeling van piping worden uitgegaan van een zanddijk. Aanbevolen wordt op basis van peilbuismetingen uit te sluiten dat piping een probleem is.

Tussenzandlagen van een dikte < 0.5 m, ingesloten tussen twee ondoorlatende lagen, zijn niet pipinggevoelig. In een dergelijk dunne laag kan niet voldoende waterdruk worden opgebouwd om het pipingproces in gang te zetten.

⁴ Grote vakgrenzen (vanaf orde 1 km) bij piping en macrostabiliteit leiden bij de assemblage (bij gebruik van de Excel-assemblagetool) tot te lage kansen op vakniveau. Dit omdat in de Excel assemblage bij deze mechanismen het lengte effect van doorsnede naar vak niet is meegenomen. In Riskeer gaat dit vanaf versie 18.1.1 wel goed.



Figuur 5.1 Twee voorbeelden van ondergrond- en dijkopbouw die ongevoelig zijn voor piping

5.3

Bodemopbouw waarbij het mechanisme piping een rol speelt

Met een pipinggevoelige situatie wordt bedoeld een zodanige bodemopbouw dat terugschrijdende erosie mogelijk een rol kan spelen. Kenmerkend voor een pipinggevoelige situatie zijn de volgende elementen:

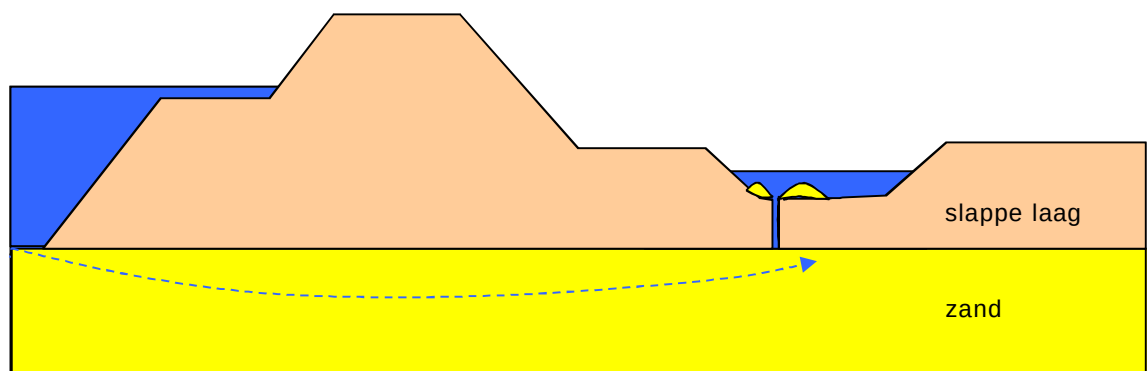
1. grondwaterstroming door een zandlaag van een waterreservoir (zee, rivier, watergang, (stuw)meer, et cetera) bovenstrooms met een hoge waterstand naar een uittreepunt benedenstrooms waar grondwater (met geërodeerd materiaal) vrij uit kan stromen. Vanaf het uittreepunt is de zandlaag in bovenstroomse richting overdekt door een relatief ondoorlatend oppervlak, bijvoorbeeld de onderkant van een cohesieve grondlaag of de onderkant van een op de zandlaag rustende betonnen of gemetselde constructie.
2. een intreepunt op een zodanig beperkte afstand van het uittreepunt, dat een open verbinding (hydraulische kortsluiting) kan ontstaan tussen het waterreservoir bovenstrooms en het uittreepunt benedenstrooms.

De rekenregel waarmee het eventueel optreden van piping wordt vastgesteld is de regel van Sellmeijer. De Sellmeijer regel is opgesteld voor niet-cohesieve korrels in een niet-cohesieve massa en is gevalideerd op homogeen zand zonder fijne fractie met een d_{70} van de zandfractie 150 μm tot 430 μm . Dit betekent dat de gedetailleerde toets alleen toegepast mag worden wanneer de d_{70} van het zand tussen deze waarden in ligt. Hoe de D_{70} bepaald kan worden en waar rekening mee moet worden gehouden staat uitgelegd in paragraaf d₇₀7.2.6

Op dit moment wordt onderzoek uitgevoerd naar de sterkte van getijdenzand. Voor een beschouwing over getijdenafzettingen in relatie tot piping en in welke WTI-SOS eenheden deze afzettingen voorkomen wordt verwezen naar bijlage B.1.3. Geadviseerd wordt hier de actuele ontwikkelingen nauwgezet te volgen.

In Figuur 5.2 is een referentieconfiguratie van de ondergrondopbouw geschetst waarbij piping een rol kan spelen. Het uittreepunt wordt in dit geval gevormd door een opening door de deklaag (bijvoorbeeld een scheur na opbarsten), waardoor water vanuit de zandlaag in de berm-sloot of naar maaiveld kan uitstromen en zanddeeltjes mee kan voeren. Voor een beschrijving van het opbarstmechanisme wordt verwezen naar het achtergrondrapport *Fenomenologische beschrijving, Faalmechanismen WBI* [2]. Wanneer de afdekkende kleilaag zo zwaar is dat opbarsten niet op kan treden, kan ook het erosiemechanisme niet optreden, omdat er geen zand kan worden afgevoerd. De bodemconfiguratie is dan ongevoelig voor piping, tenzij er door andere oorzaken een gat in de deklaag is ontstaan, bijvoorbeeld het trekken van een funderingspaal of een boring. Is de deklaag al doorboord dan moet het mechanisme opbarsten buiten beschouwing worden gelaten en resteert de toets op heave en terugschrijdende erosie.

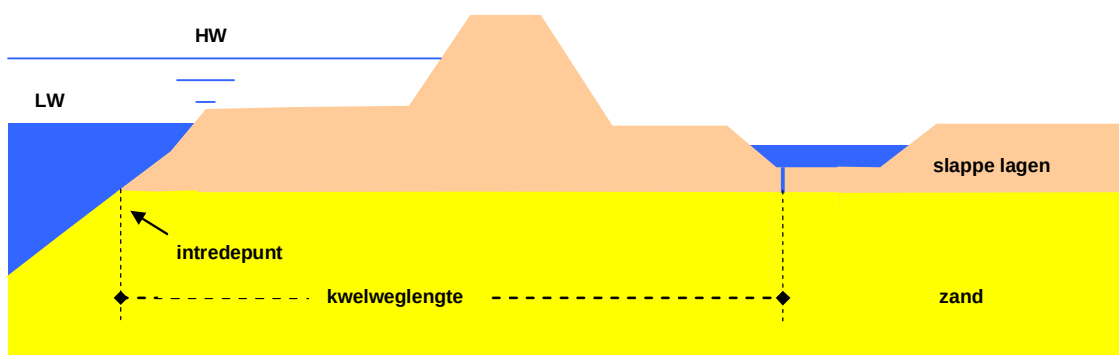
Het opbarstpunt dient bij brede sloten op de teen van het sloottalud aan de dijkzijde te worden gelegd. In Riskeer kan die ligging van het uittredepunt door de gebruiker zelf worden gevarieerd waarbij een nieuw rekenscenario wordt gedefinieerd.



Figuur 5.2 Opbarsten van de slappe deklaag onder de sloot

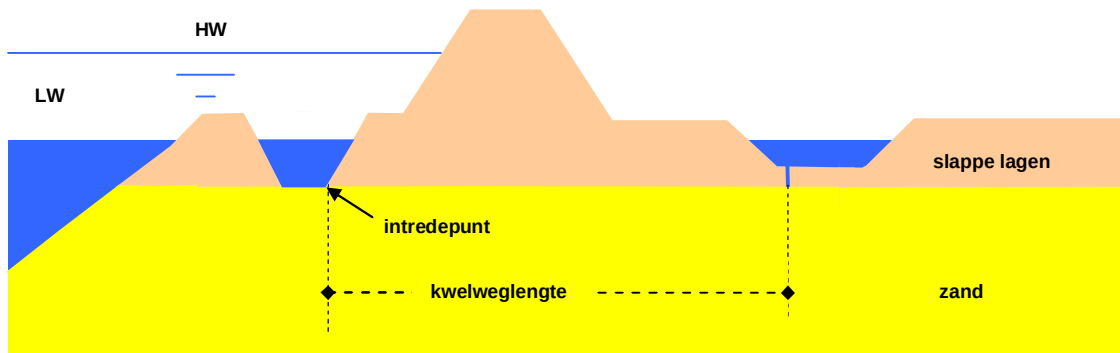
De figuren 5.2 tot en met 5.6 tonen een aantal (maar niet alle) voorkomende relevante dwarsdoorsneden. Figuur 5.3 en Figuur 5.4 schetsen situaties waarbij in het voorland een deklaag aanwezig is. Hierdoor verschuift het intredepunt meer richting het buitenwater, afhankelijk van het voorlandterrein.

Het intredepunt kan in Riskeer in de vorm van verschillende rekenscenario's worden gedefinieerd. Indien de deklaag op het voorland nog enigszins doorlatend is, mag voor bepaling van het intredepunt niet de volledige lengte worden meegenomen. Zie hiervoor ook paragraaf 7.2.1 en bijlage E.



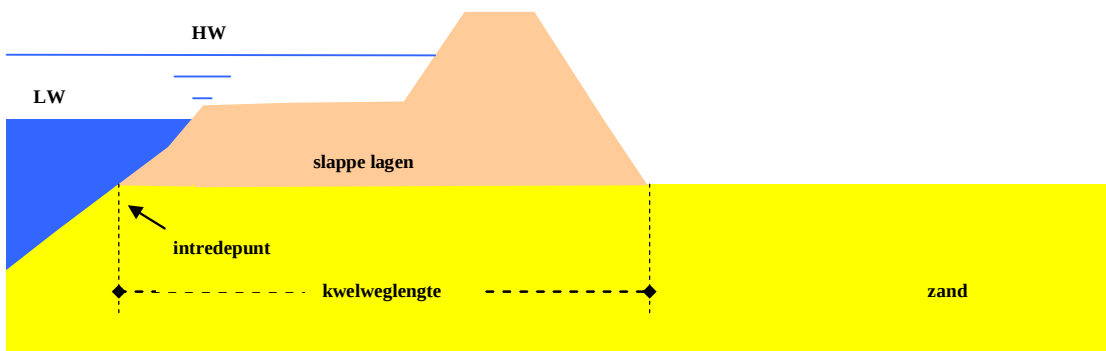
Figuur 5.3 Dijk met voorland

Voor een situatie zoals in Figuur 5.4 geschetst geldt dat een peilbuismeting ook bij rivieren soelaas biedt om het effect van de geul in het voorland in beeld te brengen.

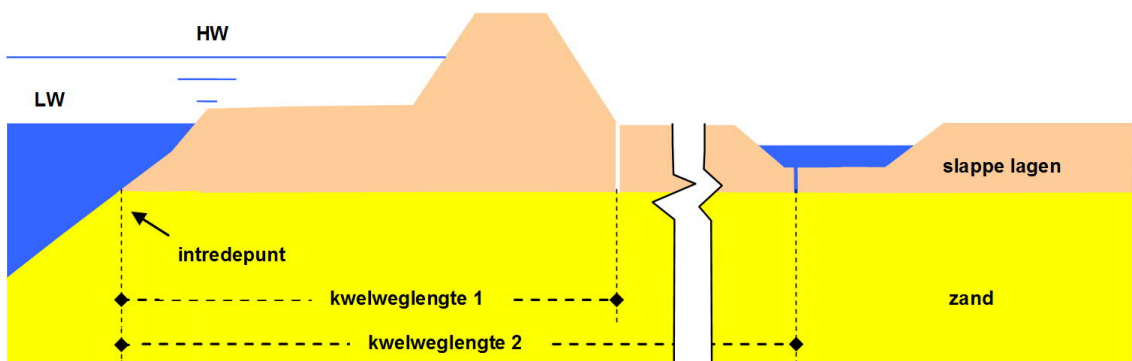


Figuur 5.4 Dijk met afgraving in het voorland

Figuur 5.5 toont de situatie waarbij binnendijs de deklaag nagenoeg ontbreekt. Het uittredepunt ligt bij de teen van de dijk.



Figuur 5.5 Geen deklaag aanwezig (opbarsten speelt hier geen rol)



Figuur 5.6 Deklaag met mogelijk twee uittredepunten, één relatief ver weg (sloot) en één dicht bij de teen omdat daar een onderbreking in de deklaag is.

In Figuur 5.6 ligt er een brede sloot relatief ver achter de dijk. In dit geval moeten twee verschillende kwelwegen worden gecontroleerd. De onderbreking in de deklaag kan bijvoorbeeld een gevolg zijn van menselijk ingrijpen, bijv. een slecht afgedichte sondering of getrokken funderingspaal. Hier kan de heave toets uitkomst bieden, omdat terugschrijdende erosie pas kan optreden als het zand in het opbarstkanaal in een gefluidiseerde toestand naar de oppervlakte kan worden gebracht.

6 Schematisering per vak

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen en aandachtspunten voor het opstellen van een voor piping relevante ondergrondschematisering. Dit betreft onder andere de stochastische ondergrondschematisering, de opzet van het grondonderzoek, het omgaan met scenario's en/of bepalen van een karakteristieke doorsnede. De schematisering moet uiteindelijk één (of meer) te beoordelen situatie(s) opleveren, die representatief is (zijn) voor het op piping te onderzoeken dijkvak.

Bij het schematiseren moeten de volgende stappen worden doorlopen om te komen tot schematiseringen van één of meer representatieve dwarsprofielen van de dijk in een beschouwd dijkvak. Deze stappen zijn:

- 1 karakterisering van de ondergrondopbouw in de omgeving van de dijk
- 2 geohydrologische karakterisering
- 3 geotechnische schematisering
- 4 keuze maatgevende dwarsprofielen

Veel informatie over de algemene aspecten (dus niet alleen piping) van het opstellen van een schematisering is terug te vinden in het TR Grondmechanisch Schematiseren [16].

Opmerking:

In het TR Grondmechanisch Schematiseren wordt voor piping een schematiseringsfactor gehanteerd. Deze additionele veiligheidsfactor dient om onzekerheden in de schematiseringen van de opbouw van de ondergrond en de optredende waterspanningen af te dekken. Binnen Riskeer worden aan verschillende ondergrondscenario's bepaalde kansen toegekend. Als gevolg van het werken met scenario's is het binnen Riskeer niet nodig nog een schematiseringsfactor te hanteren.

6.1 Karakterisering van de ondergrondopbouw in de omgeving van de dijk

6.1.1 Algemeen

Begin met een grove karakterisering van de omgevingsverschijnselen of processen. Deze karakterisering dient om inzicht te krijgen in de voorkomens van grondlagen en (onder)grondopbouw-typen die relevant zijn voor piping. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de aanwezigheid van zandbanen, zandlichamen, kleilenzen, grindbanken enzovoorts. Deze verschijnselen kunnen lokaal van aard zijn en zo beperkt van omvang dat ze bij standaard grondonderzoek in de directe omgeving van de dijk (bijvoorbeeld sonderingen om de 100 meter) niet worden opgemerkt. Deze karakterisering verschaft handvatten om, ook wanneer dit niet uit het standaard grondonderzoek bij de dijk zelf blijkt, met de mogelijke aanwezigheid ervan toch rekening te houden bij de schematisering van de dijk en de ondergrond.

De aard van de geologische ontstaansgeschiedenis van die voorkomens is al indicatief voor het type zand, afzettingscondities enzovoorts.

Verder dient deze karakterisering om een beeld te krijgen van het geohydrologisch systeem in de ondergrond. Denk hierbij aan respons van grondwaterstanden en grondwaterspanningen op de buitenwaterstand en peilbeheer binnendijks, maar bijvoorbeeld ook aan zaken in de omgeving als zandwinning (binnendijks), grondwateronttrekking, afgravingen in het voorland, enzovoorts.

Het resultaat van deze schematiseringstap is dat een (globaal) beeld wordt verkregen van de bodemopbouw in de omgeving van de dijk en geohydrologische systeemkenmerken.

6.1.2 Stochastische Ondergrondschematisering (SOS)

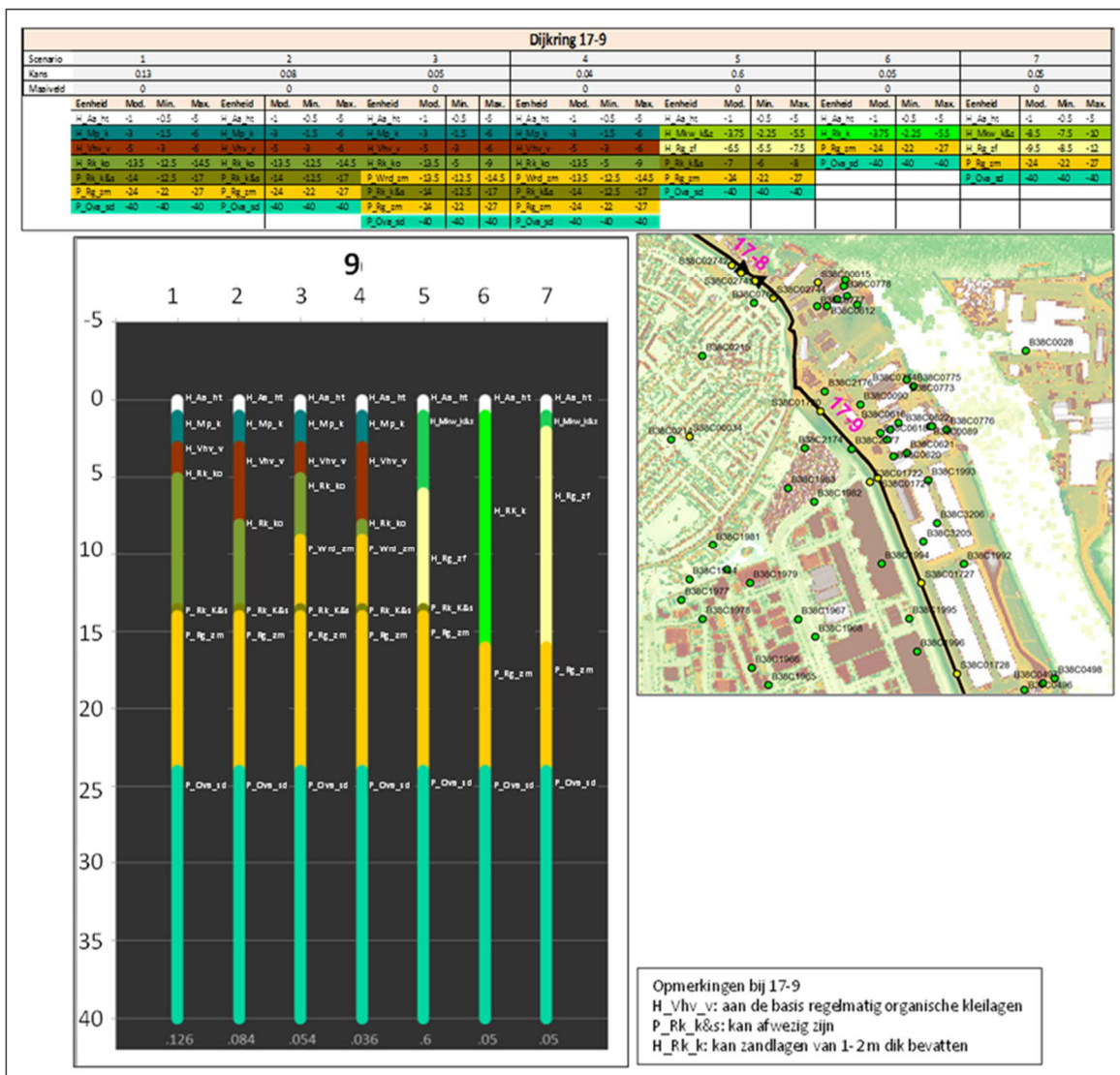
Voor alle primaire waterkeringen in Nederland is, afgezien van de duinen, een globale Stochastische Ondergrondschematisering (SOS) opgesteld. Bij het opstellen van de SOS zijn, op basis van de ondergrond, de primaire keringen opgedeeld in segmenten. In een SOS segment komen één of meerdere SOS ondergrondscenario's voor met een bepaalde kans van aantreffen.

De SOS scenario's leggen de opbouw van de ondergrond vast met een opeenvolging van SOS eenheden en de diepteligging van die eenheden. De diepteligging wordt gegeven met een representatieve (modale) diepte en indicaties van de minimale en maximale diepteligging van de eenheden. Het aantal scenario's per segment is wisselend en hangt af van de lengte van het segment en complexiteit van de opbouw. In veel gevallen zijn er 4-8 scenario's toegekend, maar in sommige gevallen zijn er 16-20 scenario's opgesteld.

Figuur 6.1 geeft een voorbeeld van de SOS informatie die beschikbaar is voor een bepaald segment. Door Hijma en Lam [4] wordt in detail beschreven hoe de SOS is opgezet en waaruit de SOS bestaat. De werkwijze met scenario's is opgezet omdat dat in vrijwel alle gevallen de hoeveelheid puntwaarnemingen, zoals sonderingen en boringen, niet voldoende is om met voldoende zekerheid de ondergrond te kunnen schematiseren voor beoordeling. De opbouw van de ondergrond kan namelijk heel variabel zijn over korte afstanden. Met een stochastisch ondergrondmodel wordt deze onzekerheid in rekening gebracht en worden alle mogelijke relevante scenario's bepaald.

Het stochastisch ondergrondmodel is opgesteld op basis van feitelijke gegevens, zoals sonderingen en boringen, en op basis van geologische kennis over de ontstaansgeschiedenis van een gebied.

Op basis van de SOS moet aan de hand van additioneel lokaal grondonderzoek, zoals boringen en sonderingen, een lokale ondergrondschematisering worden opgesteld. De manier waarop de SOS kan worden toegepast voor het opstellen van een lokale ondergrondschematisering voor het betreffende dijkvak met bijbehorende scenariokansen is uitgewerkt in de Handleiding Lokaal Schematiseren [7].



Figuur 6.1 Overzicht van de informatie die de SOS verschaft. Voor een SOS segment worden scenario's gegeven bestaande uit SOS eenheden die gespecificeerd zijn in termen van de aard van de grond en algemene aspecten van de diepteligging ervan in de scenario's. De kaart geeft de ligging van het segment weer en de gekleurde staafjes en de tabel de opbouw van de scenario's. In dit segment worden 7 scenario's onderscheiden met elk een kans van aantreffen. De modale diepteligging van de onderkant van de eenheden wordt gegeven, met daarbij ook een minimale en maximale diepteligging. Het ontstane dieptebeleid van een onderkant van een eenheid is het bereik waarbinnen de onderkant met enige zekerheid kan worden aangetroffen. Deze informatie is beschikbaar binnen het software pakket D-Soil Model.

6.2

Geohydrologische karakterisering

Op basis van de geïdentificeerde geologische systeemkenmerken in de vorige stap moet de geohydrologische schematisering verder worden opgetuigd. Voor piping moeten de waterspanningen in zandlagen onder de dijk, die bij de binnentoevoer voor opdrijven of opbarsten zouden kunnen zorgen, worden bepaald. Hiervoor moet de dempingsfactor worden bepaald.

De geohydrologische karakterisering is een schematisering van lagen die watervoerend zijn (zandlagen) en slecht doorlatende pakketten (klei en veenlagen). Van de watervoerende lagen moet aangegeven worden hoe die in verbinding kunnen staan met oppervlaktewater waarvan invloed op het waterspanningsbeeld in de dijk en de omgeving ervan uitgaat. Doel van de geohydrologische schematisering is primair het in beeld brengen van de mogelijke invloed van (veranderingen van) open waterpeilen en grondwaterpeilen in de omgeving op de ontwikkeling van waterspanningen in en nabij de dijk. Op basis van de geohydrologische schematisering

kunnen rekenmodellen voor grondwaterstroming worden gekozen om de waterspanningen behorende bij de maatgevend hydraulische belasting te berekenen of aan de hand van metingen te schatten (bijvoorbeeld extrapolatie van een meting van de getijderespons).

Net als voor de globale karakterisering van de ondergrondopbouw geldt dat de geohydrologische karakterisering in de lengterichting van de dijk variabel kan zijn. Verder geldt ook dat de beschikbare informatie niet toereikend kan zijn om tot een eenduidig geohydrologische karakterisering te komen. Met additioneel grondonderzoek (bijvoorbeeld metingen van waterspanningen) kan dan geprobeerd worden wel een eenduidig(er) beeld te verkrijgen. Maar ook dan kunnen verschillende mogelijkheden overblijven. Die moeten worden meegenomen in het verdere schematiseringproces.

De dempingsfactor (7.2.16) kan worden bepaald op basis van metingen of gebaseerd zijn op berekeningen.

6.3 Geotechnische schematisering van de dijk en ondergrond in de directe omgeving ervan

6.3.1 *Algemeen*

Op het schaalniveau van de dijk en de voor de pipinganalyse relevante directe ondergrond moeten de ruwe schematiseringen, die uit de eerdere stappen komen, verder worden gedetailleerd. Bij deze geotechnische schematisering wordt een min of meer driedimensionaal beeld van het verloop van grondlagen (in de diepte, in de richting loodrecht op de dijk en in de lengterichting ervan) gevormd. Meer gedetailleerde informatie over ligging en dikte van de grondlagen is hierbij van belang. Verder moet aan de hand van de geohydrologische karakterisering een beeld worden afgeleid van de binnen die grondlagen heersende waterspanningen. Op grond van deze schematisering moet het mogelijk zijn op elke locatie in de lengterichting van (het beschouwde vak van) de dijk een dwarsprofiel te genereren van dijk en ondergrond. Hierin zijn grondlagen en hierin optredende waterspanningen onder maatgevende omstandigheden vastgelegd.

De opbouw van dijk en ondergrond in deze schematiseringstap moet worden ontleend aan grondonderzoek. De basis hiervoor zijn boringen en sonderingen verdeeld over de lengterichting van de dijk en ook raaien loodrecht op de dijk. Aan de hand van de geïnterpreteerde boringen en sonderingen wordt een eerste beeld van de aanwezigheid van verschillende grondlagen en het verloop ervan in de lengterichting van de dijk geconstrueerd. Van de geïdentificeerde in het gebied aanwezige geologische structuren van beperkte afmeting, zoals zandbanen of kleilenzen, moet worden nagegaan of deze ook in de gedetailleerder geotechnische schematisering direct bij de dijk een rol kunnen spelen. De mogelijkheid bestaat, bijvoorbeeld, dat zandbanen of kleilenzen in de ondergrond nabij de dijk aanwezig kunnen zijn, gezien het voorkomen in de omgeving, maar dat die niet aan het licht gekomen zijn bij het grondonderzoek.

Het is dus denkbaar dat de beschikbare informatie niet leidt tot één eenduidige geotechnische schematisering, maar tot meerdere mogelijke schematiseringen.

6.3.2 *Waarnemingen*

Waarnemingen van (zandmeevoerende) wellen kunnen waardevolle aanvullende informatie geven. In alle gevallen wordt evaluatie van eventueel beschikbare waarnemingen dan ook aanbevolen. Het verdient de voorkeur waarnemingen al in beschouwing te nemen voordat met eventueel grondonderzoek wordt begonnen omdat geconstateerde wellen kunnen duiden op lokaal extra pipinggevoelige omstandigheden. Bij het grondonderzoek kan hier rekening mee worden gehouden.

Waarnemingen kunnen in twee categorieën worden onderverdeeld:

- waarnemingen tijdens (periodieke) inspecties;
- waarnemingen tijdens hoogwater.

Tijdens hoogwater dient met betrekking tot piping met name gelet te worden op water dat binnendijs uittreedt en indien dit het geval is, of er zand wordt meegevoerd. Als welvorming, al dan niet zandmeevoerend, is geconstateerd terwijl dat op grond van de beschikbare gegevens

niet verwacht zou worden, of niet in de mate die is geconstateerd, dan dienen alle aannamen en uitgangspunten zorgvuldig te worden nagegaan. Als geen verklaring kan worden gevonden, dan wordt aangeraden om lokaal nader onderzoek uit te laten voeren.

Voor het kunnen en mogen toepassen van de eenvoudige beoordelingsregel, waarmee piping op basis van de groeisnelheid van de pipeontwikkeling in getijdegebieden kan worden uitgesloten, is het een voorwaarde dat in het verleden nooit eerder een zandmeevoerende wel in het te beoordelen gebied is geconstateerd. Dit moet aan de hand van observaties worden gedocumenteerd.

6.3.3 Grond- en laboratoriumonderzoek

In de Handleiding Lokaal Schematiseren [7] wordt ook ingegaan op het benodigd grond- en laboratoriumonderzoek voor een beoordeling op piping. Met de startwaarden die voor een aantal relevante parameters in SOS gegeven worden kan een gedetailleerde toets worden uitgevoerd. Aanvullend grondonderzoek zal de onzekerheid over de ligging van begrenzingen van lokale segmenten verminderen en kan waar dat nodig is meer detaillering in de diktevariatie van deklagen voor en achter de dijk en van zandpakketten opleveren. In combinatie met aanvullend laboratoriumonderzoek kan bovendien de onzekerheid in grondparameters per zandlaag gereduceerd worden.

Het benodigde grond- en laboratoriumonderzoek voor het vaststellen van de aard en verdeling van zandlichamen wordt eveneens in de Handleiding Lokaal Schematiseren [7] beschreven.

Voor het vaststellen van de aanwezigheid en dikte van de deklaag in het voorland is de aard van het voorland van belang. Voor door mensenhanden aangelegd, opgehoogd voorland is de ruimtelijke variatie in dikte en samenstelling van het voorland groot en weinig systematisch. Het is dan nodig om een indruk van de aard van de ophoging te verkrijgen bijvoorbeeld of het om een hoofdzakelijke zandaanvulling gaat, of om oudere ophogingen met lokaal beschikbaar gekomen materiaal dat vaak veel kleiige grond bevat. In het algemeen volstaat een voldoende diepe boring of sondering per hectare, dan wel 100 m strekking van de dijk om de aard van een ophoging vast te stellen. Het is daarnaast van belang na te gaan of de dijk en de ophoging beide op een slecht doorlatende ondergrond zijn aangebracht, of dat er hydraulisch contact is tussen zandlichamen onder de dijk en zand in de ophoging. Aangezien het terrein onder de ophoging van invloed is op het beoordelen van de kans dat er kortsluiting bestaat, zijn historische kaarten en lokaal grondonderzoek nodig voor gedetailleerde afwegingen.

Voor het toetsspoor *piping* kan aanvullend uit te voeren grond- en laboratoriumonderzoek meer inzicht verschaffen in:

- De bodemopbouw, onder en naast de dijk, waarbij vooral het onderscheid in slappe lagen en niet slappe lagen belangrijk is (water ondoorlatende en water doorlatende lagen). Deze informatie kan met (hand) boringen, sonderingen en elektromagnetisch (EM) onderzoek worden verzameld.
- In geval van voorland is het uitvoeren van EM gecombineerd met traditioneel lokaal onderzoek een goede methode om een continu beeld van dikte van de (slappe) toplaag te bepalen, noodzakelijk voor het bepalen van het intredepunt.
- Aan de hand van peilbuismetingen kan de invloed van het hele voorland (intredeweerstand) meegenomen worden. Hiervoor dient het voorland tijdens de meting onder water te hebben gestaan.
- Gewicht van het in het achterland gelegen slappe lagen pakket (i.v.m. opdrijfpotentiaal)
- Doorlatendheden (k) van het zandpakket
- Korreldiameter d_{70} specifiek van de bovenste laag van het zandpakket
- Omdat de parameters k en de d_{70} in het veld moeilijk te bepalen zijn, worden aan de SOS eenheden gerelateerde gemiddelde waarden voor k en d_{70} beschikbaar gesteld. Deze zijn als databestand beschikbaar en kunnen via D-Soil Model worden toegepast. Zie hiervoor hoofdstuk 7 en bijlagen F, H en I. Deze waarden kunnen voor de gedetailleerde toets gebruikt worden.

6.3.4 *Relevante afmetingen van lagen voor het toetsspoor piping*

Het mechanisme piping wordt meestal gekoppeld aan de ontwikkeling van “pipes”, tunneltjes, in zand direct onder een afsluitende laag. De breedte van zich ontwikkelende “pipes” is zeer gering (zeer veel smaller dan 1 m). De afmetingen voor de relevante ruimtelijke variatie van de specifieke doorlatendheid, die de ontwikkeling van de “pipes” mede bepaalt, betreffen enige meters tot niet meer dan enige tientallen meters. Ook de maat voor de korrelgrootte (d_{70}) varieert aanmerkelijk binnen tientallen meters afstand. Er bestaat momenteel niet voldoende inzicht in de effecten van lokale variaties in de opbouw van zandpakketten op de ontwikkeling van “pipes”, om deze effecten te kunnen vast stellen. Er dient daarom rekening mee gehouden te worden dat het voorkomen van lagen van fijner zand en doorlatende pakketten met breedtes van 25 m en kleiner relevant zijn. Bij de zandpakketten in kust- en getijdengebieden (eenheden met H_Mg in SOS) betreft de variatie vooral de hoeveelheid fijn materiaal die bijgemengd is (meer of minder kleine kleilaagjes in relatief uniform zand). In zandpakketten in het rivierengebied (eenheden met H_Rg) gaat het om relatief grote ruimtelijke variatie in korrelgrootteverdeling en pakking over korte afstanden (10^{-1} m – 10^1 m) en in de aard van de gelaagdheid. Een relatieve uitzondering wordt gevormd door de zogenaamde dekzanden (eenheid P_Wdz_zf). Dat zijn zandpakketten met een relatief zeer uniforme korrelgrootteverdeling die in grotere gebieden in Nederland voorkomen, een dikte van één tot enige meters hebben en vaak direct onder de Holocene afzettingen zijn gelegen. De breedte van al deze zandpakketten bedraagt meestal minimaal enkele honderden meters. De variatie in dikte bedraagt voor een zandpakket, behoudens dekzand, vaak vele meters binnen enige tientallen meters afstand. In sommige gebieden in Nederland, onder andere het Benedenrivierengebied en in gebieden met door klei gedomineerde getijdenafzettingen in Noord-, West- en Zuidwest-Nederland komen ook smallere zandpakketten voor die voor piping relevant kunnen zijn.

In de volgende paragrafen wordt voor verschillende meetlocatieafstanden aangegeven met welke nauwkeurigheid de verschillende relevante parameters bepaald kunnen worden. Dit is gebaseerd op onder andere de resultaten van een in Kruse en Hijma [7] beschreven Monte Carlo simulatie. Hierbij is er van uitgegaan dat eenheden met een lengte van 25 m nog relevant zijn (zie ook Kruse en Hijma [7]). Onderstaande paragrafen zijn vooral beschrijvend en dienen vooral ter begripsvorming. Meer concrete aanwijzingen voor bepaling van de parameters worden in hoofdstuk 7 gegeven.

6.3.4.1 Meetlocatieafstanden van 200 m

Gezien de omvang van de meeste zandpakketten die voor piping van belang kunnen zijn, kan in veel gebieden met een meetlocatieafstand van 200 m met voldoende zekerheid vastgesteld worden of er een zandpakket in de ondergrond aanwezig is. Dit geldt niet voor situaties waar de dijk parallel ligt aan de horizontale begrenzing van een zandlichaam, (dit is de zijkant van de zandbaan, waar hij horizontaal overgaat in iets anders). Deze begrenzing kan erg abrupt zijn en het is daarom noodzakelijk na te gaan of de dijk op een dergelijke begrenzing ligt. Waar dat het geval is en voor de hierboven genoemde deelgebieden met zandbanen smaller dan 200 m is een meetafstand van 200 m vaak niet voldoende om met zekerheid de aanwezigheid van zandpakketten die onder de gehele dijk liggen uit te kunnen sluiten (zie Hijma en Kruse, [7]). Immers, het gaat niet om variatie binnen een laag, die door middel van gebruik van rekenwaarden en lengte-effect zal worden ondervangen. Opgemerkt wordt dat er over aanwezigheid van smalle zandpakketten in landelijk gebied met de bovenkant minder dan 2 - 5 m -mv gemakkelijk aanvullende informatie verkregen kan worden met bijvoorbeeld het AHN of elektromagnetische metingen. Relevante variatie over afstanden van 25 m kan niet goed worden aangetoond.

6.3.4.2 Meetlocatieafstanden van 100 m

Met een meetlocatieafstand van 100 m worden de meeste relevante zandpakketten in de ondergrond van een dijkvak aangetroffen. Ook hier is het noodzakelijk na te gaan of het dijklichaam mogelijk boven een horizontale begrenzing van een zandpakket is gelegen om het optreden opbarsten, piping en heave te kunnen beoordelen. De kans dat relevante pakketten korter dan 25 m gemist worden is kleiner dan 10%.

6.3.4.3 Meetlocatieafstanden van 50 m

Met een meetlocatieafstand van 50 m worden alle voor opbarsten, heave en piping relevante zandpakketten vastgesteld. Ook bij deze meetlocatie afstand blijft het nodig na te gaan of de binnentoe van de dijk of berm mogelijk is gelegen boven de horizontale begrenzing van een groter zandlichaam in verband met het mogelijke vormen van “pipes” onder de dijk door.

6.3.4.4 Samenvattend

De ruimtelijke variatie binnen zandpakketten, behoudens de genoemde dekzanden, is groot over relatief korte afstanden. Met een meetlocatieafstand van 50 m kan een deel van die ruimtelijke variatie in kaart gebracht worden, namelijk de grootschalige onderdelen van de zandpakketten. De spreiding in dikte en horizontale omvang van die onderdelen is in de meeste gevallen groot en vaak kan er ook met 50 m afstand tussen meetlocaties geen voldoende beeld van die onderdelen gevormd worden. Tenslotte is de variatie in korrelgrootte binnen die onderdelen zelf dermate groot dat deze nooit met sonderingen gevat kan worden. Deze variatie heeft echter een belangrijk effect op de ontwikkeling van ‘pipes’. Op basis van kennis van het afzettingsmilieu van het zandpakket is het wel mogelijk om deze variatie zodanig te omschrijven in termen van de te verwachten range in korrelgrootte en afstanden waarover de korrelgrootte varieert dat hier rekening mee gehouden zou kunnen worden. Ten aanzien van het beoordelen op opbarsten, heave en piping kan dus worden gesteld dat:

- Meetlocatieafstanden van 200 m geven een indruk van de grondopbouw in algemene zin en van het voorkomen van zandpakketten met een grotere omvang.
- Meetlocatieafstanden van 100 m geven een gedetailleerde indruk van het mogelijk voorkomen van relevante zandpakketten langs een dijkvak.
- Met meetlocatieafstanden van 50 m worden alle mogelijk relevante zandpakketten in de ondergrond in een dijkvak aangetroffen en kan de grootschalige opbouw van zandpakketten worden vastgesteld.
- De interne variatie van grondeigenschappen binnen de grootschalige onderdelen is groot en met een meetlocatieafstand van 25 m kan deze variatie nog niet voldoende gevat worden. Indien het dus gewenst is om naast elkaar liggende zandpakketten te begrenzen, is een zeer dicht net van waarnemingen nodig, in de meeste gevallen minder dan 25 m onderlinge afstand langs de dijk.
- De ligging van een dijklichaam boven een horizontale begrenzing van een zandpakket is van belang voor de beoordeling voor piping en heave. Vastgesteld moet worden of de binnentoe van de dijk of de berm mogelijk gelegen is binnen een dergelijk begrenzing. Indien dat het geval is kan met een meetlocatie afstand van minder dan 25 m de beoordeling geoptimaliseerd worden voor zulke dijkvakken.

De soms relatief geringe breedte van zandpakketten maakt dat het vaststellen van de mogelijke aanwezigheid ervan relatief dicht opeengelegde boor- en sondeerlocaties vergt. In de praktijk zal niet altijd voor een dergelijke dicht meetnet gekozen worden en is het nodig de SOS scenario's voor de segmenten te volgen. Om het grondonderzoek te optimaliseren moet de systematiek van de voorkomens van de betreffende zandpakketten in de ondergrond leidend zijn en zouden ook gegevens over het voorkomen van zandbanen in de ruimere omgeving gebruikt dienen te worden.

6.3.5 Aandachtspunten

Voor het vaststellen van de bodemopbouw van de dijk en de ondergrond dient het volgende in acht te worden genomen:

- Indien er wordt aangenomen dat er een slecht doorlatende ondergrond (klei of veen) aanwezig is, moet zijn geverifieerd of er lokaal geen potentieel pipinggevoelige lagen, zoals zandige geulopvullingen, tussenzandlagen of opduikingen van watervoerende pakketten aanwezig zijn. Indien er onvoldoende duidelijkheid bestaat over het al dan niet aanwezig zijn van zandige lagen dan dient deze onzekerheid in de schematisering van de bodemopbouw via de SOS in rekening te worden gebracht door een scenario op te stellen met een bepaalde kans van aantreffen. Bij grote onzekerheid over de aanwezigheid van zandige lagen kan dit betekenen dat de ondergrond moet worden geschematiseerd als een dijk op een goed doorlatende ondergrond, waarbij er direct onder de basis van de dijk geen afdekkende slecht doorlatende lagen aanwezig zijn;

- In de praktijk is het onderscheid tussen een kleidijk en een zanddijk niet altijd eenduidig vast te stellen, omdat dijken vaak zijn opgebouwd uit een combinatie van zand en klei/veen. Gedacht kan worden aan kleidijken die zijn verzwaard met zand of aan zanddijken met perskaden van keileem ter plaatse van het binnen- en buitentalud. In dergelijke gevallen kan als regel worden gehanteerd dat in geval van twijfel over de opbouw van de dijk ten behoeve van het faalmechanisme piping kan worden uitgegaan van een kleidijk. Indien kan worden aangetoond dat de dijk aan binnenwaartse zijde bestaat uit een zandlichaam, bijvoorbeeld door binnendijkse versterking in zand, dan mag voor het toetsspoor *piping* uitgegaan worden van een zanddijk.
- Bij kleidijken op een slecht doorlatende ondergrond moet men bedacht zijn op de aanwezigheid van ingesloten zandlagen die zijn ontstaan door de geschiedenis van dijkverhoging. Te denken valt bijvoorbeeld aan oude wegfunderingslagen. Als geen slecht doorlatende bekleding op het buitentalud aanwezig is en deze zandlagen lopen door over de volle breedte van de dijk, dan dient op piping te worden gecontroleerd.

6.4 Keuze maatgevende dwarsprofielen (geometrie)

Voor het dijkvak waarvoor de schematiseringen representatief moeten zijn dient een lengteprofiel met dwarsprofielen van de dijk en de ondergrond te worden opgesteld, waarin de voor piping relevante benodigde gegevens inzichtelijk worden gemaakt. Hierin worden de locaties met onderzoekspunten (of andere beschikbare informatie) aangegeven waarmee lokaal de vereiste schematisering voor de analyse kan worden gemaakt. Hierin worden ook de locaties vermeld waar (voldoende) informatie om een schematisering te maken nog ontbreekt. Op deze locaties is mogelijk nader (grond)onderzoek nodig.

De opbouw van de dijk en de ondergrond, maar ook waterspanningen in de dijk en de ondergrond kunnen variëren in de lengterichting van de dijk. Aan de hand van de geotechnische schematisering(en) moeten keuzes gemaakt worden voor dwarsprofielen die maatgevend zijn voor de veiligheid van een dijk.

De keuze van een geometrie of dwarsprofiel ter bepaling van het potentiële in- en uittredepunt ten behoeve van een pipinganalyse is afhankelijk van de afstand tussen buitenteenlijn en binnenteenlijn van de dijk en de aanwezigheid van:

- voorland
- berm (breedte)
- watergangen, zoals dijk- of kopsloten
- maaiveldhoogtes
- eventueel aanwezigheid van niet-waterkerende objecten (bomen, huizen et cetera).

Dit is mede uitgewerkt in 7.2.1 en 7.2.3. Opgemerkt wordt dat de kortste afstand tussen intrede- en uittredepunt niet per sé in een profiel loodrecht op de dijk hoeft te zijn. Het is soms veel nauwkeuriger als men vanuit potentiële uittredepunten en mogelijke kwelwegen naar dergelijke uittredepunten gaat denken. Per vak kunnen dan verschillende scenario's voor de maatgevende dwarsprofielen met hun kans van voorkomen worden meegenomen.

Het schematiseringsproces dient voor het te beoordelen dijkvak één representatieve locatie op te leveren, die qua dwarsprofiel van de dijk, in combinatie met de ondergrondopbouw en bijbehorende waterspanningen, maatgevend is. Het is uiteraard ook mogelijk dat nog niet één locatie als maatgevend kan worden aangewezen, maar dat er twee of meer locaties zijn, waarvan later moet blijken welke maatgevend is. In dat geval zullen voor al deze locaties analyses moeten worden gemaakt.

6.5 Scenario's vaststellen voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie

6.5.1 Gewicht van de grondkolom op een watervoerend pakket met bovenzijde op beperkte diepte

- Opgebrachte grond: Bij terugschrijdende erosie moet bij een kleiafdekking op het voorland worden nagegaan of de grond voornamelijk kleilig is dan wel door zand wordt gedomineerd. In het riviereengebied en plaatselijk langs de kust komt aanslibbing voor die regelmatig tot

meer dan een meter ophoging met veelal kleiige grond heeft geleid in de buitendijkse gebieden.

- De opbouw van de afdekkende laag binnendijs moet goed bekend zijn inclusief de volumieke massa's per voorkomende laag. In gebieden met een door veen gedomineerde bovenlaag zijn kleilagen in of op het veen vaak bepalend voor het effectieve gewicht van de grondkolom. Het is dan vooral voor opdrijven van belang om een goede karakterisering van het voorkomen en de dikte van de kleilaag (of kleilagen) te specificeren in de lokale scenario's voor het lokale segment. Het specificeren van lokale segmenten met meer of minder zware afdekklagen kan een optimalisatie van het beoordelen mogelijk maken. Bij dikkere afdekklagen kunnen binnen een segment meerdere bodemopbouwen binnen de afdeklaag voor komen. Het kan dan nodig zijn deze individuele opbouwen van de deklaag in lokale scenario's op te nemen in plaats van een totale dikte van de afdeklaag met een gemiddelde volumieke massa.

6.5.2

Continuïteit van watervoerende pakketten in het relevante dieptebereik

- Een mogelijkheid is dat een watervoerende zandlaag bij de binnenteen die een zeer beperkte dikte heeft (dunner dan 1 m), in directe verbinding staat met het buitenwater. Zo'n zandvoorkomen kan de rand van een dikker zandpakket betreffen dat buitendijs en onder de dijk ligt, of kan een zandlaag zijn zoals in het volgende punt besproken.
- De verdeling en karakterisering van zand in de ondergrondgegevens en de informatie van de betreffende SOS eenheid geven aanwijzingen over de continuïteit van zandlagen en dikte variaties. Zo kunnen zandlichamen van rivierzanden lokaal grote dikteverschillen vertonen. Langs (voormalige) kusten komen soms over honderden meters continue dunne zandlagen voor die zich onder de gehele dijk kunnen uitstrekken (SOS eenheid H_Mp_zf of als de dijk over voormalige strandjes is aangelegd, SOS eenheid H_Ova_zf).
- Voor een zandpakket dat buitendijs is aangetroffen kan uitbreiding tot voorbij de binnenteen of berm worden uitgesloten als de onderlinge afstand tussen boor- en sondeerlocaties voldoende klein is. In de praktijk moet die onderlinge afstand dan meestal minder dan 25 m zijn. Zie ook paragraaf 6.3.4.

7 Parameters

7.1 Algemeen

Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen voor waardebepaling van de relevante parameters. Per parameter wordt aangegeven wat de parameter precies inhoudt: hoe de waarde kan worden bepaald, wat aandachtspunten zijn et cetera. Daarnaast wordt een voorbeeld gegeven.

7.2 Parameters

In het volgende worden invoerparameters voor Riskeer, maar ook parameters ter voorbereiding van de invoerparameters beschreven.

7.2.1 Intredepunt

Wat is het

Locatie [m]

Bij de controle op piping gaat het erom vast te stellen of bij het gegeven verwachte optredende verval over de waterkering de veiligheid tegen erosie van de zandlaag (of zandlagen) in de ondergrond voldoende gewaarborgd is. De weerstand tegen erosie is, naast de eigenschappen van de zandlaag, voornamelijk afhankelijk van de kwelweglengte. Dit is de afstand tussen het intredepunt van de kwelstroming door de zandlaag en het uittredepunt.

Het intredepunt is het dichtst bij de dijk gelegen punt waar de watervoerende zandlaag in direct contact met het buitenwater staat of bij voorland met een beperkte intree weerstand een punt op enige afstand van de dijk, waarbij de afstand tot de dijk bij de kwelweglengte mag worden gerekend.

Het intredepunt wordt ook wel intreepunt genoemd.

Hoe te bepalen

- Bij schaaldijken kan de buitenteen ter plaatse van de laagwaterlijn als intredepunt gekozen worden.
- Een deel van het voorland kan meegerekend worden bij de bepaling van de kwelweglengte, indien daar een kleilaag van enige dikte aanwezig is. Het mee te rekenen deel kan maximaal de leklengte $\lambda_{\text{voorland}}$ zijn. In geval van een op die manier verschoven intredepunt wordt gesproken over een fictief intredepunt.
- Een overdreven veilige keuze voor het intredepunt is de buitenteen van de dijk.

In de Bijlage E is de methode voor de bepaling van het fictieve intredepunt beschreven en zijn voor een aantal situaties de fictieve voorlandlengtes bepaald.

Door het uitvoeren van grondonderzoek op het voorland kan worden vastgesteld of er een afdekkende laag in het voorland aanwezig is. Deze kan worden beschouwd als verlenging van de kwelweglengte indien wordt voldaan aan eisen ten aanzien van de hydraulische weerstand en er voldoende zekerheid over de toestand van het voorland bestaat.

Het laatstgenoemde betekent dat bij de bepaling van de lengte van het voorland moet worden nagegaan of is gewaarborgd dat de bestaande situatie in de periode tot de volgende veiligheidsbeoordeling niet in ongunstige zin wordt gewijzigd. Er moeten dus beheersmaatregelen worden genomen met betrekking tot bijvoorbeeld baggeren of afgraven of eroderen van de buitendijkse deklaag (in het voorland of in de onderwateroever) zodat er geen ingrijpende veranderingen zullen optreden.

Grondonderzoek

Het grondonderzoek voor de bepaling van het intredepunt is afhankelijk van de situatie en vooral van het al dan niet aanwezig zijn van voorland.

In het geval van voorland moet de dikte en de samenstelling van de aanwezige deklaag worden vastgesteld in verband met de doorlatendheid hiervan. EM onderzoek is een geschikte methode om in combinatie met traditionele handboring een uitspraak te kunnen doen over de dikte en continuïteit van de afdeklaag. Middels handboringen kunnen kleimonsters worden gestoken ter beproeving van de bulkeigenschappen van de klei.

Wanneer geen voorland aanwezig is wordt het intredepunt in de teenlijn van de dijk aangehouden en is het reguliere grondonderzoek voldoende.

Aandachtspunten

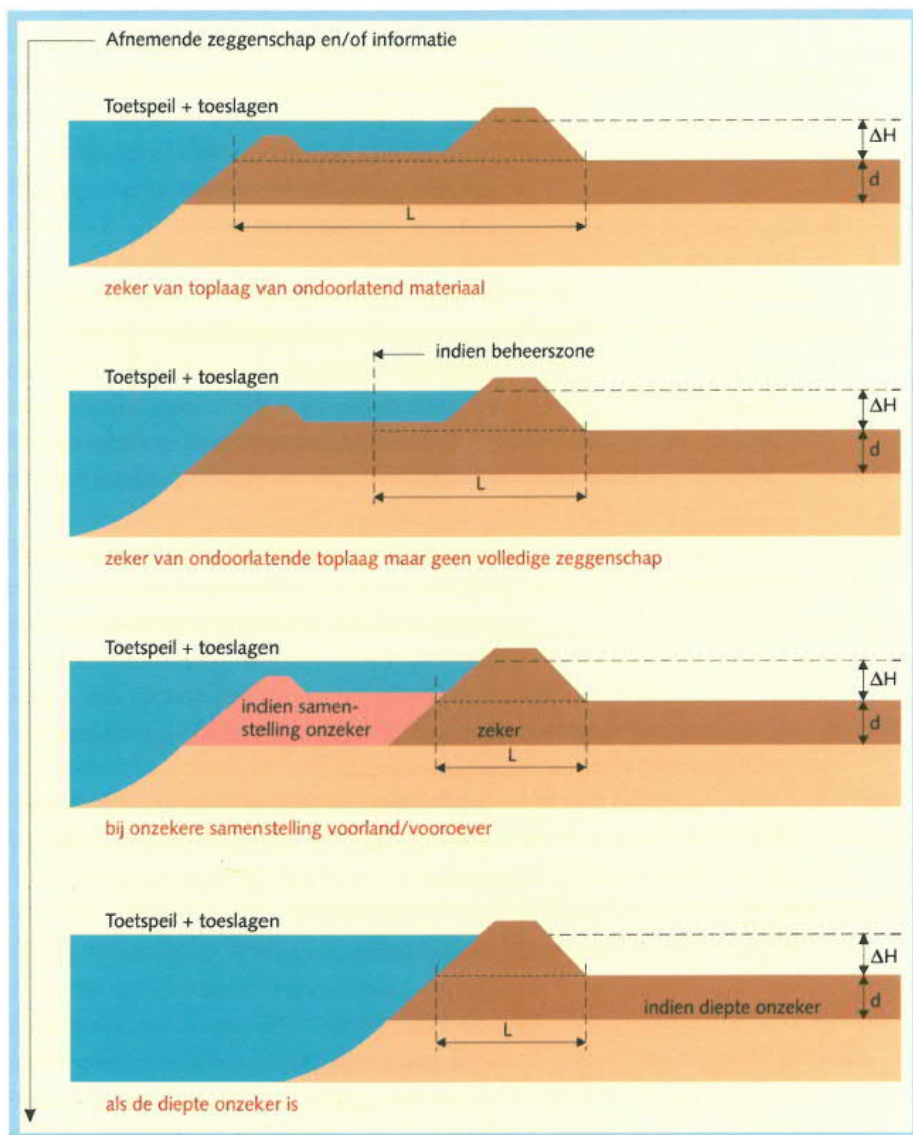
- Peilbuismetingen leveren waardevolle aanvullende informatie op. Het (fictieve) intredepunt op een bepaalde locatie kan tevens op basis van peilbuiswaarnemingen worden vastgesteld (Lambert [22]), mits het voorland onder water loopt. Aan de hand van de peilbuismetingen kan de stijghoogte bij het uittredepunt door extrapolatie onder maatgevende omstandigheden en hiermee de dempingsfactor worden bepaald. Deze is relevant voor de controle op opbarsten en heave. De peilbuiswaarnemingen kunnen dan bijvoorbeeld met een numeriek grondwaterstromingsmodel worden geanalyseerd. Een voordeel hiervan is dat het grondonderzoek buitendijks relatief beperkt kan blijven. Voor zinvolle waarnemingen is het van belang dat deze tijdens een voldoende hoogwater (wanneer het voorland onder water staat) gedaan kunnen worden. Deze metingen worden naar maatgevende omstandigheden geëxtrapoleerd. Aandachtspunt hierbij is, dat hiermee het waterremmende vermogen van de afdeklaag wordt gemeten, niet de aanwezige dikte. Het wordt daarmee niet inzichtelijk of de kleiafdekking op het voorland voldoende dik is en een voldoende dikke beschermingszone aanwezig is.
- (Zeer) lokaal dunnere kleilagen, bijvoorbeeld een sloot met onder de bodem van de sloot nog 0,5 m klei, dienen vanuit de veiligheidsbeoordeling niet meegenomen te worden en als niet aanwezig te worden beschouwd.
- In het geval dat een deklaag bestaat uit een afwisseling van dunne zand- en kleilagen, dient te worden onderzocht of de zandlaagjes wel of niet in verbinding staan met het rivierpeil en dus als afdeklaag of als watervoerend laagje moeten worden gerekend.
- Zandige lagen dunner dan 0,5 m mogen als niet doorgaand en daarmee als niet pipinggevoelig worden beschouwd.
- De ligging van het intredepunt kan afhangen van de gekozen bodemschematisering. Het intredepunt kan bijvoorbeeld voor een zandtussenlaag anders zijn dan voor het diep gelegen watervoerend pakket.
- De slecht waterdoorlatende deklaag in het voorland mag als afsluitend worden gezien indien het lutumgehalte meer dan 20% bedraagt en het zandgehalte minder is dan 35%. (Dit zijn ook bij labproeven gehanteerde waarden). De afsluitende kleilaag moet verzadigd en minimaal 1 m dik zijn, waarbij (afhankelijk van het landgebruik) deze kleilaag dient te worden beschermd met een toplaag bovenop deze kleilaag van 0,3 à 0,5 m dik. De kwelweglengte mag verlengd worden over de lengte van het voorland waar aan deze voorwaarden wordt voldaan, mits aaneengesloten aanwezig vanaf de buitenteen van de dijk.
- Het Sellmeijer model is niet gevalideerd voor situaties waarin er water op het voorland door de deklaag naar de pipe toestroomt. Hiervan kan sprake zijn als de pipe zich onder de deklaag in het voorland bevindt. Een vuistregel is dat de kritieke lengte van een pipe, dus de lengte waarbij de pipe bij een kleine verhoging van het verval 'doorschiet', ongeveer gelijk is aan de helft van de kwelweglengte. Wanneer de fictieve kwelweglengte groter wordt dan twee keer de dijkbasis (buitenteen tot uittredepunt) moet daarom door de beheerder met aanvullende checks worden aangetoond dat de fictieve kwelweglengte volledig mag worden meegenomen. Deze checks kunnen bestaan uit peilbuismetingen bij ondergelopen voorland waaruit afgeleid kan worden dat er geen toestroom door de deklaag naar de pipe te verwachten is, of berekeningen met een grondwaterstromingsmodel waarin het mechanisme piping is meegenomen⁵.

⁵ In de in 2019 verschenen Handreiking Voorland [25] wordt in paragraaf 4.5.2 een minimale dikte van 1,5 à 2 m genoemd waarbij aangenomen mag worden dat hydraulische kortsluiting tussen maaiveld en pipe of toestroom naar de pipe onder het voorland uitgesloten kan worden. De werkelijke minimale dikte hangt echter sterk af van de samenstelling. Zie zesde bullet hierboven.

- Indien Niet Waterkerende objecten aanwezig zijn aan de buitenzijde van de waterkering, moet het intredepunt hierop aangepast worden.

In Figuur 7.1 zijn enige voorbeelden van veilige aanname van het intredepunt weergegeven. Dit zijn wel veilige, maar niet altijd reële aannames. Het wordt daarom dringend aanbevolen om door nader grondonderzoek, monitoring, het uitvoeren van peilbuismetingen en uitbreiding van het gebied van zeggenschap en door het nemen van waarborgende maatregelen actief voor meer zekerheid hieromtrent te zorgen. De bovenste figuur is bij brede voorlanden niet veilig, zie bijlage E. De lengte van het mee te nemen voorland is maximaal gelijk aan $\lambda_{\text{voorland}}$. In de nieuwe beoordelingsmethode wordt gekeken naar de werkelijke situatie en niet naar de keurgrenzen, de tweede figuur wordt hierdoor niet meer toegepast.

Voorbeeld



Figuur 7.1 Veilige, maar niet altijd reële aannames voor ligging intrede- en uittredepunt

7.2.2 Uittredepunt

Wat is het Locatie [m]

Bij de controle op het mechanisme piping gaat het erom vast te stellen of bij het gegeven verval over de waterkering de veiligheid tegen erosie van de zandlaag (of zandlagen) in de ondergrond voldoende gewaarborgd is. De weerstand tegen erosie is, naast de eigenschappen van de zandlaag, voornamelijk afhankelijk van de kwelweglengte. Dit is de afstand tussen het intredepunt van de kwelstroming door de zandlaag en het uittredepunt.

Het uittredepunt is de locatie waar de kwelstroom aan het maaiveld komt.

Het uittredepunt wordt ook wel uittreepunt genoemd.

Hoe te bepalen

Het uittreepunt ligt vaak op natuurlijke wijze vast, bijvoorbeeld wanneer de sloot achter een dijk tot in de betreffende zandlaag reikt, of wanneer de zandlaag tot aan het maaiveld reikt. In het geval een afdekkende laag aanwezig is die opbarstgevoelig is wordt als uittreepunt de opbarstlocatie gekozen.

Het maatgevende uittreepunt ligt in het algemeen bij de binnenteen, indien het binnendijkse maaiveld horizontaal is. Bij een aflopend of onregelmatig maaiveld kan het uittreepunt verder van de dijk liggen, ter plaatse van een lokale laagte, of een sloot of kolk. Het is niet altijd meteen duidelijk waar het uittreepunt zich bevindt en bovendien hangt dit ook nog af van de locatie waar opbarsten plaatsvindt. Bij twijfel dient voor meerdere uittredepunten de toets uitgevoerd te worden. Dit kan binnen Riskeer door het toevoegen van extra rekenscenario's.

Door gericht terreinonderzoek in het achterland kunnen dikte en gewicht van het afdekkende pakket en de locatie van het uittredepunt worden vastgesteld. De intensiteit van het grondonderzoek is sterk locatie gebonden en afhankelijk van de verwachte heterogeniteit. Voor een generieke inschatting van de intensiteit wordt verwezen naar tabel 4.1 van het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken [16].

Om het uittredepunt te bepalen is de volgende informatie benodigd:

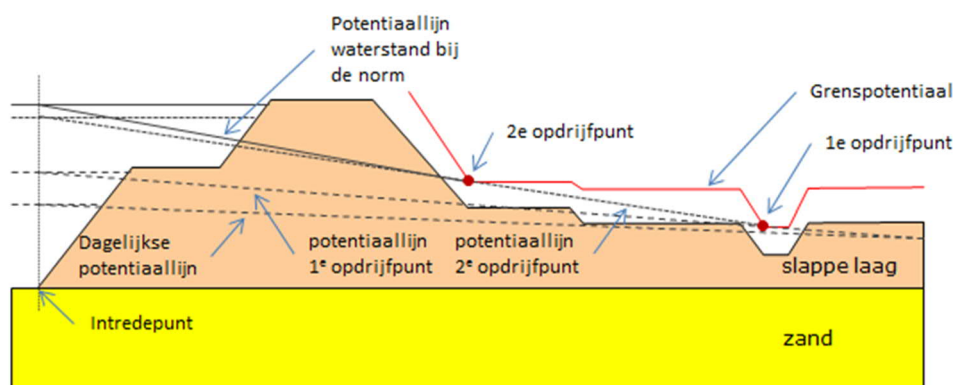
- Geometrie
- Dikte deklaag
- Gewicht deklaag (samenstelling)
- Verloop van de stijghoogte
- Bij aanwezigheid van een sloot ook slootpeil en niveau slootbodem

Aandachtspunten

- Bij flauw aflopende bermen en/of maaiveld is het vaak onduidelijk waar opbarsten op zal treden. Het is dan aan te bevelen op meerdere locaties na te gaan of opbarsten, heave en piping kunnen optreden. In figuur 7.2 is te zien dat als eerste opbarsten optreedt ter plaatse van de sloot. Op dit moment is de waterstand bij de norm nog niet bereikt. De grenspotentiaal ter plaatse van dit eerste opbarstpunt is dan tevens het punt waar de stijghoogte niet verder op kan lopen. Bij verder stijgen van de buitenwaterstand treedt dicht bij de dijk een tweede opbarstpunt op. De waterstand bij de norm is dan nog niet bereikt. Bij verder doorstijgen van de waterstand tot de waterstand bij de norm treedt geen volgend opbarstpunt meer op. Er zal dus voor twee (potentiële) opbarstpunten een toets moeten worden uitgevoerd. Bij het bepalen van het tweede opbarstpunt kan een veiligheidsfactor van 1 worden aangehouden.
- Let op kopsloten. Deze kunnen een maatgevend uittredepunt vormen, maar zijn niet altijd direct in dwarsprofielen te zien als deze dwarsprofielen om een bepaalde afstand genomen zijn (bijvoorbeeld om de 100m).
- Perforatie van de kleilaag: Er kan mogelijk een wel ontstaan in een voldoende dikke deklaag als de deklaag geperforeerd is door boor- of sondeergaten, of andere werkzaamheden van tijdelijke aard. Dit is in de praktijk niet of lastig te controleren. Tijdens hoogwater zullen dergelijke gaten mogelijk aan het licht komen.

- Indien binnendijks funderingspalen zijn toegepast, waar de grond niet goed omheen sluit, dan wordt er van uit gegaan dat langs de paal welvorming kan optreden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij palen met een verzwaarde paalvoet. Dit dient in ieder geval te worden gecontroleerd. In deze gevallen is het mogelijk dat piping niet optreedt doordat aan het heave criterium wordt voldaan.
- Ontgravingen binnendijks zijn door verkenning in het veld waar te nemen. Bij een lokale ontgraving zal zo nodig voor die specifieke locatie een controle op de kwelweglengte moeten plaatsvinden.
- Klei die regelmatig boven de grondwaterstand uitkomt kan uitdrogen. Er is dan mogelijk geen sprake meer van een aaneengesloten waterdichte laag en welvorming kan mogelijk optreden.
- Indien Niet Waterkerende Objecten (NWO's) aanwezig zijn aan de binnenzijde van de waterkering, moet gecontroleerd worden of deze van invloed zijn op het uittredepunt. Zo nodig moet het uittredepunt hierop aangepast worden. Dit houdt dus in dat de aanwezigheid van NWO's bij het toetsen piping reeds voor de start van het schematiseren bekend moet zijn.

Voorbeeld



Figuur 7.2 Voorbeeld bepalen uittredepunt aan de hand van de grenspotential.

Voor de overige voorbeelden wordt verwezen naar Figuur 5.5 en Figuur 5.6.

7.2.3 *Bovenzijde cohesieve deklaag*

Wat is het

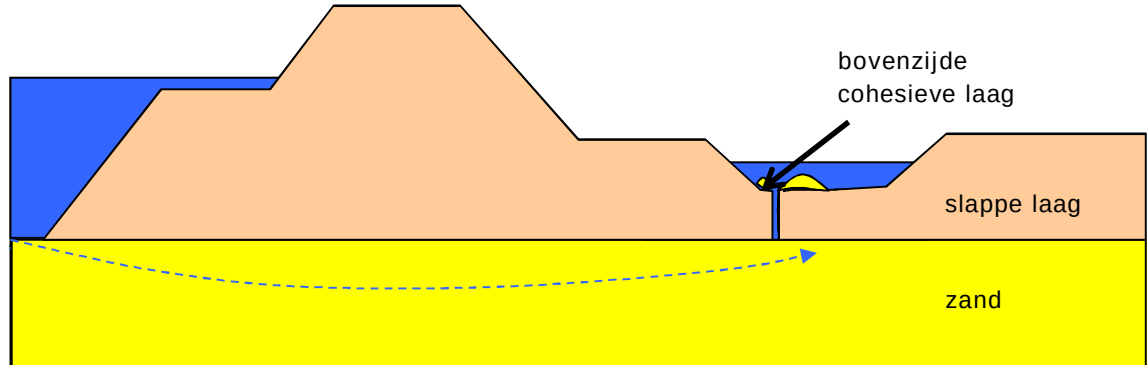
De bovenzijde cohesieve laag is het niveau van het maaiveld of de slootbodembodem ter plaatse van het uittredepunt [$m + \text{NAP}$].

Hoe te bepalen

Dit is het niveau ten opzichte van NAP van het gekozen uittredepunt. Wanneer het uittredepunt bekend is kan de bovenzijde van de cohesieve lagen eenvoudig worden bepaald.

In geval van een sloot wordt door Riskeer ten behoeve van de opbarstberekening onder de slootbodembodem de effectieve dikte van de cohesieve deklaag berekend. De methode wordt beschreven in bijlage C.2.

Voorbeeld



Figuur 7.3 Bovenzijde cohesieve laag in dit geval; de bodem van de kwelsloot. In het geval het uittredepunt in de binnenteen van de kering ligt is het de bovenzijde van het maaiveld (bovenzijde slappe lagen)

7.2.4 Onderzijde cohesieve deklaag

Wat is het

De onderzijde cohesieve laag is het niveau van de onderzijde van de deklaag nabij het uittredepunt [m+NAP].

Hoe te bepalen

Op basis van lokaal grondonderzoek dient een inschatting te worden verkregen de grondlagenopbouw op basis waarvan deze parameter kan worden afgeleid. Zie hiervoor ook de SOS handleiding.

Het optreden van piping in een afzetting met een sterke afwisseling van klei en zandlaagjes lijkt onwaarschijnlijk. Het toepassen van de rekenregel van Sellmeijer voor deze gebieden zal leiden tot onterecht afkeuren van veel dijkstrekkingen. Op basis van verschillende argumenten kan worden aangegeven in welke getijdenafzettingen het optreden van piping naar Sellmeijer niet waarschijnlijk is, zie hiervoor bijlage B in deze SH (overgenomen van *Scherper toetsen voor piping bij dijken WBI 2017 [23]*). In de stochastische ondergrond schematisering (WTI-SOS) kunnen van deze afzettingen de eenheden worden benoemd. Het betreft 4 eenheden:

- Getijdenrestgeulopvulling, H_Mr_kz
- Afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen, H_Mkw_z&k
- Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H_Mp_k
- Organisch materiaalrijke getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H_Mp_ko

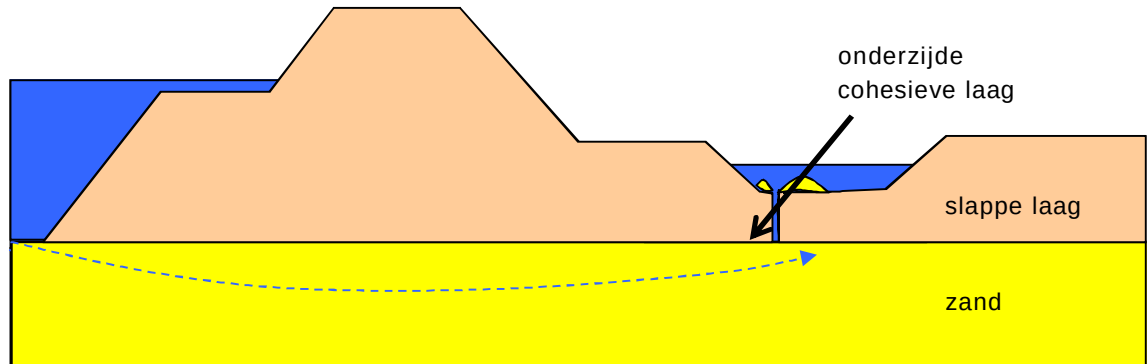
Deze eenheden worden in de schematisering als niet watervoerende laag gemodelleerd.

Wanneer de getijdenafzetting aan het oppervlak of direct onder klei en veenlagen ligt, maakt de laag deel uit van de deklaag.

Aandachtspunten

- Op basis van het grondonderzoek moet met zekerheid kunnen worden aangegeven of het zandige kleilagen zijn of kleiige zandlagen. Een waterspanningsindex gemeten met een piëzoconus kan hierbij van nut zijn. Bij twijfel moeten er boringen worden gemaakt waarbij het materiaal in het laboratorium wordt beschreven.

Voorbeeld



Figuur 7.4 Onderzijde cohesieve laag

7.2.5 Onderzijde aquifer

Wat is het

De onderzijde aquifer is het niveau van de onderzijde van het watervoerende pakket [m+NAP].

Hoe te bepalen

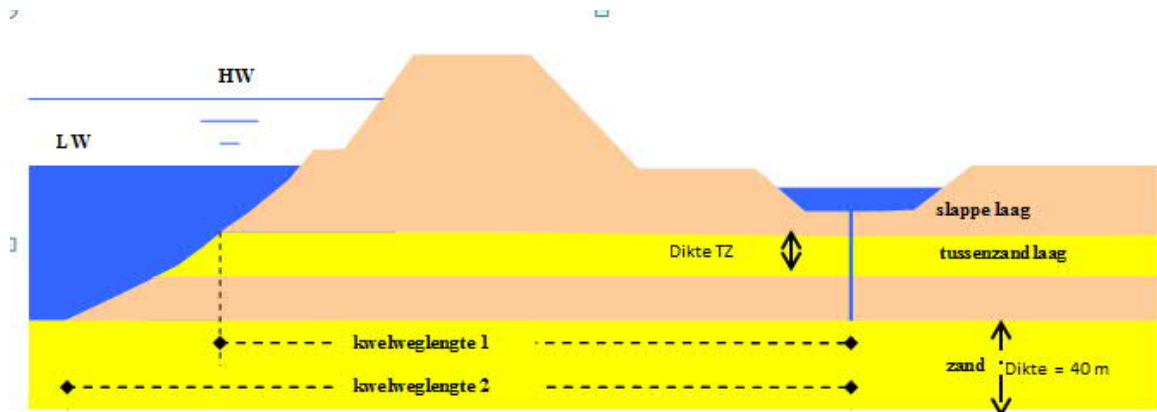
Ondiepere zandlagen kunnen worden vastgesteld met sonderingen en boringen. Hiervoor kunnen ook laagscheidingen uit de SOS of vanuit VNK-gegevens overgenomen worden of uit kaarten van de Universiteit Utrecht, bijvoorbeeld de zandbanenkaart of zanddieptekaart. De dikte van het watervoerend pakket in het SOS is gemaximaliseerd tot 40 m -mv. Waar het nodig is tot grotere diepte de onderkant van het watervoerende pakket te specificeren wordt verwezen naar de waarden in VNK II⁶.

Aandachtspunten

- De doorlatendheid is veelal gekoppeld aan een bepaalde dikte van de aquifer (de zogenaamde KD-waarde). Zorg dat deze parameters op elkaar afgestemd zijn.
- De dikte van de zandlaag staat in de aangepaste rekenregel van Sellmeijer in verhouding met de aanwezige kwelweglengte. De dikte van de watervoerende pakketten volgt veelal uit DINO gegevens.

⁶ Op basis van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer kan ingeschat worden wat het effect van een grotere dikte van het watervoerend pakket is.

Voorbeeld



Figuur 7.5 Voorbeeld dikte zandpakket (tussenzandlaag en pleistoceen)

7.2.6

d_{70}

Wat is het

De d_{70} is de zeefmaat [m] die 70% (massa) van de zandkorrels van de zandfractie laat passeren. Voor de beoordeling van piping is de d_{70} van de laag direct onder de toplaag van belang. De d_{70} wordt bepaald op de zandfractie (met of zonder grindfractie, zie toelichting hieronder), zonder de fijne fractie ($<63\mu\text{m}$)

Hoe te bepalen

In bijlage H wordt ingegaan op de wijze van vaststellen van de waarden voor de d_{70} voor een te beoordelen dijkvak. In deze bepalingswijze is inbegrepen het effect van de grote ruimtelijke variatie voor verschillende lengteschalen in zand wat betreft de korrelgrootteverdeling van zandlagen in de ondergrond van Nederland. De bepaling van de d_{70} voor piping in WBI 2017 verwijst naar een tabel met waarden voor d_{70} voor de verschillende SOS eenheden voor al de SOS segmenten van de waterkeringen (zie bijlage G). Met de gegevens over de ligging van het te beoordelen dijkvak en de identificatie van de SOS zand eenheid onder de deklaag op die locatie kan de te gebruiken d_{70} waarde worden vastgesteld. Met deze waarde kan verantwoord de gedetailleerde toets worden uitgevoerd, het is niet noodzakelijk om de waarden uit de tabel nauwkeuriger vast te stellen.

Er wordt uitgegaan van een representatieve waarde. Het effect op piping van de ruimtelijke variatie op kleine en grote lengteschalen is onvoldoende bekend om een voor piping relevante kansverdeling te kunnen vaststellen. Voor de *gedetailleerde toets* wordt een variatiecoëfficiënt van 12% gehanteerd voor een lognormale kansverdeling, zie ook *WBI-Onzekerheden Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium* [24]. De spreiding van 12% is gebaseerd op de spreiding van de meest voorkomende (modale) korrelgrootte.

Voor een lokale bepaling van de d_{70} is het van belang om over voldoende metingen in het gebied te beschikken, bij slechts een handvol zeefkrommes ligt het niet voor de hand om een lokale waarde te bepalen. Gezien de natuurlijke variatie in de zandpakketten dient ook de spreiding van de metingen het relevante gebied (de baan van de pipe) met voldoende dichtheid te dekken. Met name bij rivierzanden is een grote variatie te verwachten in de korrelgrootte en is de d_{70} per korrelgrootteverdeling onderhevig aan grote variatie. De d_{70} kan ook sterk beïnvloed worden door de aanwezigheid van grind, met name bij kleinere monstervolumes waar een of twee grindkorrels al een groot gewichtsperscentage van het totale monster uitmaken. Het wordt daarom aangeraden de representatieve d_{70} alleen zelf te bepalen met geologische kennis van het gebied, indien voldoende data beschikbaar is. De monsters moeten allen uit een vergelijkbare geologische afzetting komen en representatief zijn voor de lokale korrelgroottevariatie onder de deklaag. De keuzes die hierin worden gemaakt moeten goed worden onderbouwd.

Het bepalen van de d_{70} kan worden uitgevoerd met of zonder grindfractie. Zonder grindfractie is conservatief. Met grindfractie kan acceptabel zijn met als aandachtspunt dat er geen overdreven gradering moet zijn. Dit kan bepaald worden met de gelijkmatigheidscoëfficiënt van de zandfractie ($63\ \mu\text{m} - 2\ \text{mm}$) die niet groter mag zijn dan matig klein ($\leq 1,8$).

Als toelichting, voor zanden met een grote(re) grindfractie waardoor de d_{70} (van de zandfractie) grover is dan $430\ \mu\text{m}$ is de regel van Sellmeijer (nog) niet gevalideerd. Echter, in de literatuur is een aantal laboratoriumproeven beschikbaar op grover materiaal. Deze proeven wijzen erop dat grover materiaal meer sterkte heeft dan op basis van de regel van Sellmeijer kan worden verwacht. Het pipingproces verloopt wel hetzelfde. Daardoor is het de verwachting dat de regel van Sellmeijer een veilig (maar mogelijk ook te conservatief) beeld geeft van de weerstand tegen piping voor grover zand. Bij toepassing van de regel van Sellmeijer bij zanden met een grote grindfractie moet rekening worden gehouden met de onzekerheden door deze kennisleemte. Indien nodig kan de geohydrogische situatie beter geschematiseerd worden in D-Geo Flow [28], in een Toets op Maat. D-Geo Flow biedt de mogelijkheid om stroming door een meer complexe ondergrond mee te nemen in de bepaling van het kritiek verval. Het erosiemodel is echter hetzelfde voor de regel van Sellmeijer en D-Geo Flow. Daarom gelden dezelfde beperkingen voor D-Geo Flow als voor de regel van Sellmeijer ten aanzien van het gebruik in grover zand of grind.

7.2.7 Verzadigd volumegewicht cohesieve deklaag

Wat is het

Het verzadigd volumegewicht van de cohesieve deklaag (γ_{sat} [kN/m^3]) is het volumegewicht van de deklaag in verzadigde toestand. Onder maatgevende omstandigheden is het polderpeil relatief hoog en kan worden aangenomen dat de deklaag – ook als gevolg van capillaire stijging van het grondwater en kwel - tot aan maaiveld is verzadigd.

Hoe te bepalen

Het volumegewicht van de grond wordt in een laboratorium bepaald. Hiertoe worden een voldoende aantal representatieve grondmonsters onderzocht. Aanbevolen wordt om hiervoor continu gestoken boringen met continue ongeroerde monsternamen te gebruiken, zodat het totale gewicht van het afdekkende pakket kan worden bepaald en de gewichten per laag kan worden teruggerekend (zodanig dat het totale gewicht van het afdekkende pakket in de modelschematisering overeenkomt met het gemeten gewicht van het afdekkende pakket). In het geval dat gewerkt wordt met een proevenverzameling van volumegewichten wordt aanbevolen om de proevenverzameling over het gebied te spreiden en dan per afzetting (formatie) minimaal 10 metingen uit te voeren.

De deklaag kan uit verschillende grondlagen bestaan. In dat geval dient in DSoil Model per grondlaag de verwachtingswaarde en standaardafwijking van het verzadigd volumegewicht, de dikte van de lagen en de zogenaamde “verschuiving” te worden ingevoerd. Op basis van deze getallen wordt door Riskeer de karakteristieke waarde van het volumegewicht van de gecombineerde laag berekend. Voorwaarde voor Riskeer is dat voor elke grondlaag dezelfde standaardafwijking en dezelfde verschuiving van $10\ \text{kN/m}^3$ worden ingevuld. Als dat niet zo is, geeft Riskeer een foutmelding. Het eerste is gerechtvaardigd omdat de ervaring leert dat de standaarddeviatie van het volumegewicht niet sterk afhankelijk is van de waarde van het volumegewicht (in tegenstelling tot de doorlatendheid). Deze vaste standaardafwijking kan bepaald worden door het gewogen volumegewicht te bepalen, waarbij de dikte van de laag de weegfactor is, en vervolgens een variatiecoëfficiënt van 0.05 aan te houden. Door de “verschuiving” kan de rekenwaarde van het volumegewicht niet lager worden dan $10\ \text{kN/m}^3$, wat modelmatig niet mogelijk is.

De stappen die in Riskeer worden doorlopen om te komen tot de karakteristieke waarde van het volumegewicht voor de gecombineerde laag zijn (voor het geval Riskeer niet gebruikt zou worden):

1. Bepaal de gemiddelde waarde (μ) en standaardafwijking ($\sigma > 0$) per laag
 - vervolgens wordt de gewogen gemiddelde waarde berekend, waarbij gewicht op basis van de deklaagdikte afgeleid wordt

- de standaardafwijking en verschuiving moet per laag gelijk zijn (Riskeer eis), hier wordt dus geen gewicht toegekend

In de onderstaande stappen zijn μ en σ de gecombineerde waarden over de deklagen

2. Trek $10 \text{ m}^3/\text{s}$ af van het gemiddelde (vanwege het feit dat een verschoven lognormale verdeling wordt gebruikt met ondergrens $x_0 = 10 \text{ kN/m}^3$, de voorwaarde is dat $\mu > x_0$)

$$\mu = \mu - 10$$

3. Bepaal parameters (m en s) van de 2-parameter lognormale verdeling als volgt:

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

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

4. Bereken de karakteristieke waarde k, d.w.z., de 5% ondergrenswaarde, uit de formule van de 3-parameter lognormale verdeling met parameters x_0 , m en s. Dat wordt als volgt gedaan:

$$k = \exp(m - 1.645 \cdot s) + x_0$$

Aandachtspunten

- Wisselende samenstelling van de deklaag
- Wisselende dikte van de deklaag
- Natuurlijke spreidingen van de afzonderlijke grondsoorten. Let op: Indien de spreiding op het verzadigd volumegewicht wordt gezet kan het voorkomen dat de volumegewichten in een probabilistische berekening een ontwerppunt geven van kleiner dan 10 kN/m^3 dus lichter dan water.
- Indien het verzadigd volumegewicht van de deklaag kleiner is dan het verzadigd volumegewicht van water kan dit leiden tot negatieve veiligheidsfactoren voor opbarsten, daarom moet het verzadigd gewicht van de deklaag minimaal gelijk zijn aan het verzadigd gewicht van water.
- Bovenstaande twee punten zijn niet relevant indien Riskeer wordt gebruikt of de hiervoor genoemde stappen (die in Riskeer geïmplementeerd zijn) worden doorlopen voor bepaling van de karakteristieke waarde.
- Zie laatste aandachtspunt in paragraaf 7.2.6 over getijdeafzettingen.

7.2.8 Volumegewicht van zandkorrels onder water

Wat is het

Volumegewicht [kN/m^3]

Het volumegewicht van een zandkorrel onder water. Het gaat hier om het volumegewicht van de ondergedompelde korrel zelf dat door het pipingproces door het kanaal wordt getransporteerd en niet om het volumegewicht van de zandlaag (zoals beschreven in de NEN 9997 [10], tabel 2b) die immers ook poriënruimte bevat.

Deze waarde wordt in Riskeer automatisch bepaald aan de hand van onderstaande formule

$$\gamma_p' = \gamma_p - \gamma_w$$

waarin:

γ_p' : onderwater volumegewicht zand

γ_p : korrelgewicht, defaultwaarde $2650 \cdot 9,81 = 26,0$ kN/m³,

γ_w : volumegewicht van water.

7.2.9 Doorlatendheid zandlaag (aquifer)

Wat is het

De specifieke doorlatendheid, k , van een grondlaag is het debiet per seconde per 1 m² doorstroomd oppervlak bij een verhang van 1, gegeven in m/s (meters per seconde) of in m/d (meters per dag).

Hoe te bepalen

In bijlage H wordt ingegaan op de wijze van vaststellen van de waarden voor de doorlatendheid van het zand-of grindpakket voor een te beoordelen dijkvak. In deze bepalingwijze is inbegrepen het effect van de grote ruimtelijke variatie voor verschillende lengteschalen in zand voor de doorlatendheid van zand- en grindlagen in de ondergrond van Nederland. De doorlatendheid waarin deze effecten zijn verdisconteerd wordt de equivalente doorlatendheid, k_{eq} , genoemd. Dit is de doorlatendheid die in de Sellmeijer formule in de gedetailleerde toets dient te worden ingevoerd. De bepaling van de doorlatendheid voor piping in WBI 2017 verwijst naar een tabel met waarden voor een equivalente doorlatendheid voor zand- en grindpakketten die is vastgesteld voor de verschillende SOS eenheden voor al de SOS segmenten van de waterkeringen. Met de gegevens over de ligging van het betreffende dijkvak en de identificatie van de aanwezige SOS eenheden op die locatie kan de te gebruiken k_{eq} waarde worden vastgesteld. Zie paragraaf H.3.3.

Voor de *gedetailleerde toets* wordt een variatiecoëfficiënt van 50% gehanteerd voor een lognormale verdeling. Voor de *gedetailleerde toets* kan per geval een indicatie van de aanwezige variatie in doorlatendheid gegeven worden door ter zake deskundigen op basis van uitgebreid grondonderzoek.

In geval van meerdere aaneengesloten lagen onder de deklaag combineert Riskeer deze tot één laag met een dikte gelijk aan de som van de diktes van de lagen en een gewogen gemiddelde doorlatendheid (waarbij de dikte de weegfactor is) met een vaste variatiecoëfficiënt van 0,5 (zie H 3.4). Wanneer de bovenste van de twee lagen een hogere doorlatendheid heeft dan de onderste laag geeft het gewogen gemiddelde echter een te lage waarde. Daarom dient de gebruiker de doorlatendheid van de twee lagen aan te passen, of door de twee lagen door een laag te vervangen. De correcte doorlatendheid van de gecombineerde laag kan met de "Piping doorlatendheid rekentool" berekend worden, zie paragraaf H.3.4.

De in de formule toe te passen doorlatendheid is een soort bulkdoorlatendheid voor het hele watervoerende pakket tussen intrede- en uitredepunt. Lokale hoge doorlatendheden werken niet altijd door in de totale doorlatendheid. Om die reden zijn voor de toets gemiddelde doorlatendheden per SOS formatie beschikbaar gesteld, die via D-Soil Model kunnen worden toegepast. Pompproeven en peilbuismetingen kunnen aanvullende informatie met betrekking tot de k -waarde leveren die voor pipinganalyse op een locatie nodig is, maar worden met name gebruikt om een grondwatermodel te kunnen kalibreren. Bij het gebruik van doorlatendheden van pompproeven en peilbuismetingen moet aandacht worden besteed om dit terug te relateren aan een bulkdoorlatendheid van het watervoerende pakket.

Aandachtspunten:

- In de praktijk zal de verticale doorlatendheid doorgaans een stuk lager zijn dan de horizontale doorlatendheid. Dit verschil wordt anisotropie genoemd. Dit is onderwerp van lopend onderzoek. Het is nog niet mogelijk rekenwaarden van anisotropiefactoren af te leiden voor WTI-SOS eenheden. Hoe om te gaan met variaties in SOS eenheden en/of rekenwaarden in pipinganalyses hangt af van hoe variaties in anisotropie het pipingmechanisme beïnvloeden. Mogelijk kan met nieuwe technieken de anisotropiefactor bepaald worden. Ook dit is nog onderwerp van lopend onderzoek. Geadviseerd wordt hier de actuele ontwikkelingen nauwgezet te volgen.

- Op dit moment wordt onderzoek uitgevoerd naar de sterkte van getijdenzand. Voor een beschouwing over getijdenafzettingen in relatie tot piping en in welke WTI-SOS eenheden deze afzettingen voorkomen wordt verwezen naar bijlage B.1.3. Geadviseerd wordt hier de actuele ontwikkelingen nauwgezet te volgen.

7.2.10 Waterstand binnendijks (slootpeil)

Wat is het

Hoogteniveau [m+NAP]

Waterstand aan de binnenzijde van het dijklichaam. Er moet onderscheid gemaakt worden tussen het de waterstand ter plaatse van het uittredepunt (h_{exit} in Figuur C.1) en de waterstand in het verre achterland (ϕ_{polder} in Figuur C.1).

Hoe te bepalen

Ter plaatse van het uittredepunt is de binnendijkse waterstand gelijk aan het maaiveldniveau indien geen open water voorkomt. Indien wel open water voorkomt, is de binnendijkse waterstand ter plaatse van het uittredepunt gelijk aan de waterstand tijdens hoogwater in de binnendijkse waterpartij (slootpeil). Deze waterstand kan afhankelijk zijn van het maalbeheer. Indien de binnendijkse waterstand tijdens hoogwater niet bekend is, of niet gecontroleerd wordt, kan de gemiddelde waterstand worden genomen omdat de waterstand tijdens een hoogwater vrijwel altijd hoger zal zijn.

Het slootpeil tijdens hoogwater is lastig te bepalen, omdat het sterk afhankelijk is van de lokale situatie. De dikte van de deklaag en de doorlatendheid van het watervoerend pakket spelen een belangrijke rol in de hoeveelheid kwel. Daarnaast kan het gevoerde beheer tijdens hoogwater een grote rol spelen. In het ideale geval wordt het kwelslootpeil daarom door de beheerder (of in nauwe samenwerking met de beheerder) vastgesteld. De beheerder heeft immers de meeste kennis van het gevoerde beheer tijdens een dergelijke situatie. Het slootpeil kan ook worden bepaald door een sensor op een vaste locatie aan te brengen. Een vaste locatie kan zijn een brugpijler of een keerwand, zolang deze maar niet aan zetting onderhevig is.

In Riskeer vult de gebruiker de waarde voor de binnendijkse waterstand ter plaatse van het uittredepunt handmatig in, zowel wanneer deze waterstand gelijk is aan het maaiveldniveau als wanneer deze gelijk is aan het peil van open water.

Aandachtspunten

- Het polderpeil tijdens normale omstandigheden is geen goede indicatie voor het slootpeil tijdens hoogwaterperioden, maar wel een veilige benadering.
- De hoogte van het omringende maaiveld kan van invloed zijn op het (kwel)slootpeil. Het freatisch vlak in de omringende ondergrond zal veelal hoger liggen dan het slootpeil of polderpeil in het achterland. Bij de schematisering van het freatisch vlak moet hiermee rekening gehouden worden.
- Het slootpeil van de dijksloot kan lokaal opgestuwd zijn.
- Ervaringen van recente hoogwaterperioden zijn nuttig bij het bepalen van het maatgevende kwelslootpeil.
- Bij het schematiseren van het freatisch vlak in het achterland is de vraag relevant of het sloot- of polderpeil kan worden gehandhaafd bij extreem hoog buitenwater. Dit is waarschijnlijk niet het geval wanneer de indringingslengte gelijk is aan of groter is dan de dikte van de slecht doorlatende deklaag (kwelsituatie). Maar dan nog zal de pompcapaciteit veelal groter zijn dan de lekkage door de deklaag waardoor het effect op de stijging van de waterstand in een polder gering zou moeten zijn.
- In Riskeer kunnen verschillende peilen zoals zomer- en winterpeil als rekenscenario's worden toegevoegd.
- Indien het slootpeil (of polderpeil) lager ligt dan de bovenzijde van de aquifer (of in geval van een deklaag, de onderkant van de deklaag), is piping niet mogelijk. Riskeer kan in dat geval geen faalkans uitrekenen.

7.2.11 *Buitenwaterstand (hydraulische belasting)*

Wat is het

Oppervlaktewater waarvan de waterstand direct onder invloed staat van een hoge stormvloed, van hoog water van een van de grote rivieren, van hoog water van het IJsselmeer of Markermeer of van een combinatie daarvan. De grootte van de buitenwaterstand is een niveau, de eenheid is [m+NAP].

Hoe te bepalen

In de eenvoudige en gedetailleerde toets wordt de waterstand gebruikt waarbij de overschrijdingskans van de waterstand gelijk is aan de norm. Binnen het WBI 2017 wordt deze hydraulische belasting bepaald met Riskeer.

7.2.12 *Waterstandsverlooplijn (hydraulische belasting)*

Wat is het

Een waterstandsverloop geeft voor een locatie de tijdsafhankelijke waterstand aan tijdens het passeren van een storm of een hoogwatergolf behorende bij een de waterstand bij de norm. Bij het beoordelen van waterkeringen op geotechnische faalmechanismen is het essentieel te bepalen welk deel van de waterstand bij de norm veroorzaakt wordt door langdurig aanhoudende hoge waterstanden. Falen door piping treedt op door langdurig aanhoudende hoge waterstanden.

Hoe te bepalen

De waterstandsverlooplijnen worden per watersysteem bepaald en weergegeven in de tool Waterstandsverloop (versie 2.0). Hiervoor is een gebruikershandleiding beschikbaar [3].

Met deze tool kunnen eenvoudig waterstandsverlopen op een bepaalde locatie in Nederland worden opgevraagd en geëxporteerd.

Aandachtspunten

Het niet-stationaire karakter van het hoogwater kan in rekening worden gebracht bij het bepalen van de hoogte van de stijghoogten bij hoogwater. Het niet-stationaire karakter van het hoogwater leidt bij een kortdurend hoogwater tot een lagere stijghoogte dan bij aanname van een stationaire toestand. In bijlage 4 van het *TR Waterspanningen bij Dijken* [18] is beschreven dat men de stationaire leklengte λ kan corrigeren met de consolidatiecoëfficiënt van de slecht doorlatende deklaag en de tijdsduur van de hoogwaterbelasting. Dat levert een kleinere niet-stationaire λ op (zie 7.2.14), die men kan gebruiken om de tijdsafhankelijke stijghoogte te berekenen.

7.2.13 *Volumegewicht water*

Wat is het

Volumegewicht water (γ_{water} [kN/m³]) is de gewichtskracht uitgeoefend door het volume van één kubieke meter water.

Hoe te bepalen

Standaard wordt hiervoor 9,81kN/m³ aangehouden.

Aandachtspunten

- Zout- en brakwater hebben iets andere eigenschappen dan zoet water, in het bijzonder de viscositeit en de dichtheid variëren met zoutgehalte en temperatuur. Zoutwater heeft dan ook een ander volumegewicht. De rekenregels piping zijn afgeregeld op een volumegewicht van het water van 9,81kN/m³.
- De factor $\gamma_p' / \gamma_{water}$ bepaalt dan hoe zout water invloed heeft op het kritiek verval. Deze factor is bij een ρ_p van 2650 kg/m³ 1,65 voor zoet water en 1,58 voor zout zeewater. Het laatste geldt voor dichtheid van 1027 kg/m³ bij een zoutgehalte van 35‰ en temperatuur van ca. 10 graden. De kritieke vervallen zijn dus lager bij zout water. 1,58 is als een extreme waarde te beschouwen, omdat het zoutgehalte bij de kust en bij delta's lager zal zijn.

7.2.14 Leklengte voorland en achterland

Wat is het

De leklengte is de afstand waarover een stijghoogteverschil in een watervoerende zandlaag is afgenomen met een factor $1/e$ (van een hoge stijghoogte naar een lage stijghoogte) als gevolg van stroming door een slecht doorlatende deklaag. De leklengte combineert de eigenschappen van de watervoerende zandlaag en de slecht doorlatende deklaag. Andere benamingen voor leklengte zijn lekfactor of spreidingslengte, zie *TR Waterspanningen bij Dijken* [18].

De leklengte voor stationaire stroming wordt bepaald door de transmissiviteit T (kD) van de watervoerende zandlaag en de hydraulische weerstand (c) van de slecht doorlatende deklaag.

$$\lambda = \sqrt{Tc} = \sqrt{\frac{kDD'}{k'}}$$

waarin:

- λ leklengte [m].
- T transmissiviteit (kD -waarde) van het zandpakket [m^2/dag] ($T = kD$).
- c hydraulische weerstand in de slecht doorlatende deklaag [dag] ($c = D_{deklaag}/k'$).
- k doorlatendheid van zandlaag [m/dag].
- D dikte van de zandlaag [m].
- k' doorlatendheid van de deklaag [m/dag].
- D' dikte van de deklaag [m].

Het stijghoogteverloop in de zandlaag vertoont een afname volgens een e-macht, namelijk $\exp(-x/\lambda)$. Hieruit volgt dat een invloed van 5% merkbaar is op $x = 3\lambda$, immers $\exp(-3) = 0,05$.

Met peilbuiswaarnemingen kan de leklengte λ direct worden bepaald.

De leklengte voor niet-stationaire stroming wordt daarnaast bepaald door de consolidatiecoëfficiënt van de onderzijde van de slecht doorlatende deklaag en de tijdsduur van de verandering van de belasting (stijghoogte of buitenwaterstand). De stijghoogte verloopt van een hoge naar een lage stijghoogte over een afstand van 3 of 4 maal de leklengte.

De eenheid van de leklengte is [m]. De leklengte is in Riskeer een stochast met een verwachtingswaarde en een standaardafwijking.

Hoe te bepalen

De leklengte kan worden door analyse van metingen van de waterspanning in een watervoerende zandlaag. Zie hiervoor Bijlage 3 van *TR Waterspanningen bij Dijken* [18].

Wanneer geen stijghoogtemetingen beschikbaar zijn, kan een TNO-grondwaterkaart worden geraadpleegd om informatie over de leklengte te verkrijgen. Een grondwaterkaart geeft informatie over de transmissiviteit van de watervoerende zandlaag en over de hydraulische weerstand van de slecht doorlatende deklaag om de stationaire λ te bepalen.

In bijlage 0 is een voorbeeld uitgewerkt voor berekening van de leklengte en dempingsfactor.

Aandachtspunten

Het is lastig om de leklengte op een nette manier te bepalen, daarom worden hier veelal veilige aannames voor gedaan.

7.2.15 Waterspanningen watervoerende lagen

Wat is het

De waterspanning (of potentiaal) [kN/m^2] is de waterdruk op een willekeurige locatie in de ondergrond. De grootte van de waterdruk op een willekeurige locatie wordt bepaald door het niveau van de stijghoogte [$\text{m} + \text{NAP}$] op deze locatie. De stijghoogte is de hoogte die het water zou kunnen bereiken in een peilbuis.

In een pipinganalyse is de waterspanning het resultaat van een schematisering van de stijghoogten.

Hoe te bepalen

Peilbuismetingen kunnen een belangrijke bron van informatie vormen bij het verkrijgen van inzicht in de stijghoogte. Peilbuizen lenen zich goed voor stijghoogtemetingen in de zandondergrond. Zie ook §2.3 van het *TR Waterspanningen bij Dijken* [18].

Wanneer geen waterspanningen beschikbaar zijn, kan een TNO-grondwaterkaart worden geraadpleegd om informatie over de stijghoogten in watervoerende zandlagen te verkrijgen.

In bijlage 0 is een voorbeeld uitgewerkt voor berekening van de lek lengte en dempingsfactor.

De waterspanningen moeten worden vertaald naar de situatie met (extreem) hoge buitenwaterstanden. Hierbij is vaak het gebruik van grondwaterstromingsmodellen noodzakelijk. Belangrijkste invoerparameters zijn de dikte en doorlatendheid van de cohesieve deklaag op het voorland en achterland en die van de aquifer. In Bijlage 4 van het *TR Waterspanningen bij Dijken* [18] worden vier analytische modellen gegeven waarmee de stijghoogte op een willekeurige locatie onder de deklaag kan worden berekend en waarin rekening kan worden gehouden met toestroom door de deklaag op het voorland (inzijging) en uitstroom door de deklaag in het achterland (kwel), zie ook paragraaf 7.2.14. In het basismodel (4A) wordt uitgegaan van overwegend horizontale, stationaire stroming in de aquifer. In model 4B wordt ook rekening gehouden met radiale in- en uittrede van water. In model 4C is geschikt voor een situatie waarin de grenspotentiaal optreedt, dus in geval van opbarsten. De stijghoogte kan niet hoger worden dan de grenspotentiaal. Met de formules in modellen 4D-F tenslotte kan de stijghoogte voor niet-stationaire (tijdsafhankelijke) situaties berekend worden ten gevolge van een hoogwatergolf. Zie ook paragraaf 7.2.12. De formules van model 4D zijn in de software WATEX opgenomen. De formules voor stationaire stroming zijn vergelijkbaar met die uit de "blanket theory" die door de US Army Corps of Engineers is opgesteld en beschreven wordt in o.a. USACE [26].

Een alternatief voor analytische oplossingen zijn numerieke (stationaire of niet-stationaire) grondwaterstromingsmodellen.

Aandachtspunten

De interpretatie van waarnemingen (metingen) vraagt specifiek inzicht om deze te kunnen extrapoleren naar maatgevende omstandigheden. Men dient bij het ijken van het model en daarna bij het extrapoleren rekening te houden met volgende invloeden:

- De invloed van het bereiken van de grenspotentiaal bij opdrijven van de toplaag;
- De invloed van het onder water lopen van het voorland bij hoog buitenwater;
- Invloed van berging;
- De invloed van het wel of niet-stationaire karakter van de buitenwaterstand en het corresponderende stromingsveld.

Daarnaast zijn er nog enkele factoren die ertoe kunnen leiden dat metingen niet representatief zijn voor een maatgevende situatie:

- Bij het extrapoleren dient rekening te worden gehouden met mogelijke veranderingen in modelparameters in de toekomst (graven van gaten in voorland, baggerwerkzaamheden buiten de eventuele beheerzone, beëindigen grondwateronttrekking achter de dijk, etc.);
- Door erosie van de rivierbodem bij hoge waterstanden met de daarbij optredende hoge stroomsnelheden kan een deel van de bodemweerstand verdwijnen, waardoor hogere stijghoogten in de watervoerende zandlaag kunnen ontstaan;

- De invloed van bodemvorming (biologische factoren, et cetera).

Deze invloeden kunnen in Riskeer door subscenario's worden meegenomen, waarbij van een korte kwelweg wordt uitgegaan met een bepaalde kleine kans van voorkomen.

7.2.16 *Dempingsfactor*

Wat is het Factor [-]

Voor de opbarstberekening is de potentiaal in het watervoerend pakket van groot belang. De dempingsfactor legt de relatie tussen de hoogte van de stijghoogtepotentiaal bij het potentiële opbarst-/uittredepunt en de buitenwaterstand bij maatgevend hoogwater. Hiervoor is naast de dempingsfactor een referentiepeil (sloot of polderpeil, zie paragraaf 7.2.10) noodzakelijk.

De dempingsfactor geeft aan welke fractie van de verhoging van de buitenwaterstand aan de binnenzijde van de dijk nog 'voelbaar' is. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat er geen sprake is van opbarsten.

Bij een dempingsfactor r_{exit} van 0 (volledig gedempt) is de potentiaal gelijk aan het referentieniveau. Bij een dempingsfactor van 1 (ongedempt) is de respons gelijk aan de stijging van de buitenwaterstand. Dat is dus niet per definitie gelijk aan de buitenwaterstand. De demping is dus gedefinieerd als $(1 - \text{dempingsfactor})$. De dempingsfactor in Riskeer is zodoende een responsfactor.

Hoe te bepalen

Hoe de dempingsfactor wordt bepaald wordt bewust opengelaten, in principe kan dat via grondwaterstromingsanalyses (analytisch of numeriek, stationair of tijdsafhankelijk) of expert judgement gebeuren of nog beter via monitoring (bv. peilbuizen).

Als er goede peilbuismetingen beschikbaar zijn, is hieruit direct de respons af te leiden ter plaatse van de peilbuis. Dit moet dan nog vertaald worden naar het uittredepunt. Hiervoor zijn verschillende methodes (zie *TR Waterspanningen bij Dijken* [18] en Lambert [22]) en programma's beschikbaar. Voor het referentiepeil wordt het polderpeil aangehouden. Het polderpeil is in dit geval de potentiaal in het achterland tijdens normale omstandigheden.

Als er geen peilbuismetingen beschikbaar zijn, wordt de dempingsfactor teruggerekend uit de berekende potentiaal. Methoden voor berekening van de potentiaal in de zandlaag worden gegeven in paragraaf 7.2.15.

Binnen Riskeer wordt op basis van de dempingsfactor en het polderpeil vervolgens de potentiaal berekend.

In bijlage 0 is een voorbeeld uitgewerkt voor berekening van de lek lengte en dempingsfactor.

Veilige waarde

Voor een veilige berekening kan 1 als dempingsfactor aangehouden worden.

Aandachtspunten

- De bepaling van de dempingsfactor is vooral van belang bij relatief dikke deklagen. Als de kans op opbarsten groot is dan heeft een diepgaande analyse geen zin en hoeft dus niet te worden uitgevoerd.
- In grote delen van Nederland zijn geen of te weinig peilbuismetingen beschikbaar om de dempingsfactor te bepalen op basis van metingen. In deze delen is de potentiaal bij vorige beoordelingen berekend op basis van de analytische formules uit het Technisch Rapport *Waterspanningen bij Dijken* [18].

- De dempingsfactor is geldig voor een punt. Bij het verschuiven van het uittredepunt (of intredepunt) verandert in principe ook de dempingsfactor.
- Peilbuismetingen dienen bij relevante waterstanden en potentialen beschikbaar te zijn. Extrapolatie naar maatgevende omstandigheden is lastig.

7.2.17 Lengte-effectfactor

Wat is het

De lengte-effectfactor (N_{dsn} [-]) is een factor die het mogelijk maakt de faalkans per dijktraject om te rekenen tot een faalkans per dwarsdoorsnede.

Hoe te bepalen

De lengte-effectfactor wordt berekend met Vgl. 7.13 uit *WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de trajectlengte $L_{traject}$, de mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte (a_l [-]) en de lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject (b_l [m]).

De waarden voor a_l en b_l te hanteren bij de gedetailleerde toets zijn gegeven in Tabel 7.1. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen relatief pipinggevoelige trajecten in het bovenrivierengebied en elders. Als relatief pipinggevoelige dijktrajecten worden aangemerkt de dijktrajecten 36-1 (incl. 36a_1) t/m 44-1, 45-1 en 47-1 t/m 95-1.

Tabel 7.1 Te hanteren waarden voor a_l en b_l bij het berekenen van de lengte-effectfactor voor de gedetailleerde toets (specifiek voor het toetsspoor *piping*)

Parameter	Pipinggevoelige fractie van het dijktraject: a_l [-]	Referentie-lengte voor het lengte-effect: b_l [m]
Pipinggevoeligheid		
Relatief hoog	0,9	300
Relatief laag	0,4	300

In een toets op maat kunnen deze parameters worden aangepast als daar aanleiding voor bestaat.

8 Voorbeeld

8.1 Algemeen

Ter illustratie van de hiervoor beschreven werkwijze wordt in dit hoofdstuk een voorbeeld gegeven. Het voorbeeld behandelt een bestaand dijktracé in Nederland en gaat in op het afwegen en het vaststellen van:

- de lokale grondopbouwscenario's met de kans van aantreffen ervan in het lokale ondergrondsegment;
- de betreffende materiaalparameters voor de relevante doorlatende lagen in de lokale grondopbouwscenario's;
- de kwelweglengte per rekenprofiel in combinatie met de lokale grondopbouwscenario's; en
- de dempingsfactor per rekenprofiel in combinatie met de lokale grondopbouwscenario's.

Het voorbeeld is als volgt opgebouwd. Paragraaf 8.2 gaat in op het betreffende dijktracé en de beschrijving van de dijk en het omliggende terrein. De beschikbare grondgegevens zijn in paragraaf 8.3 gepresenteerd. De afwegingen bij het schematiseren en het vaststellen van de ondergrondschematisering voor het ondergrondsegment op basis van de beschikbare gegevens worden behandeld in paragraaf 8.4. Daarna wordt de schematisering vervolgd in paragraaf 8.5 met de parameters per rekenprofiel van de onderscheiden dijkvakken. Gezien de beperkte beschikbare grondgegevens worden er ook aanbevelingen gedaan voor aanvullend grondonderzoek om de schematisering te verfijnen, in het geval dat de beoordelingsresultaten daar aanleiding toe geven. Deze aanbevelingen zijn gegeven in paragraaf 8.6.

Dit voorbeeld is wat betreft het schematiseren van de grondopbouw (lokale SOS) ook gebruikt in de handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS [7].

8.2 Beschrijving van de dijk

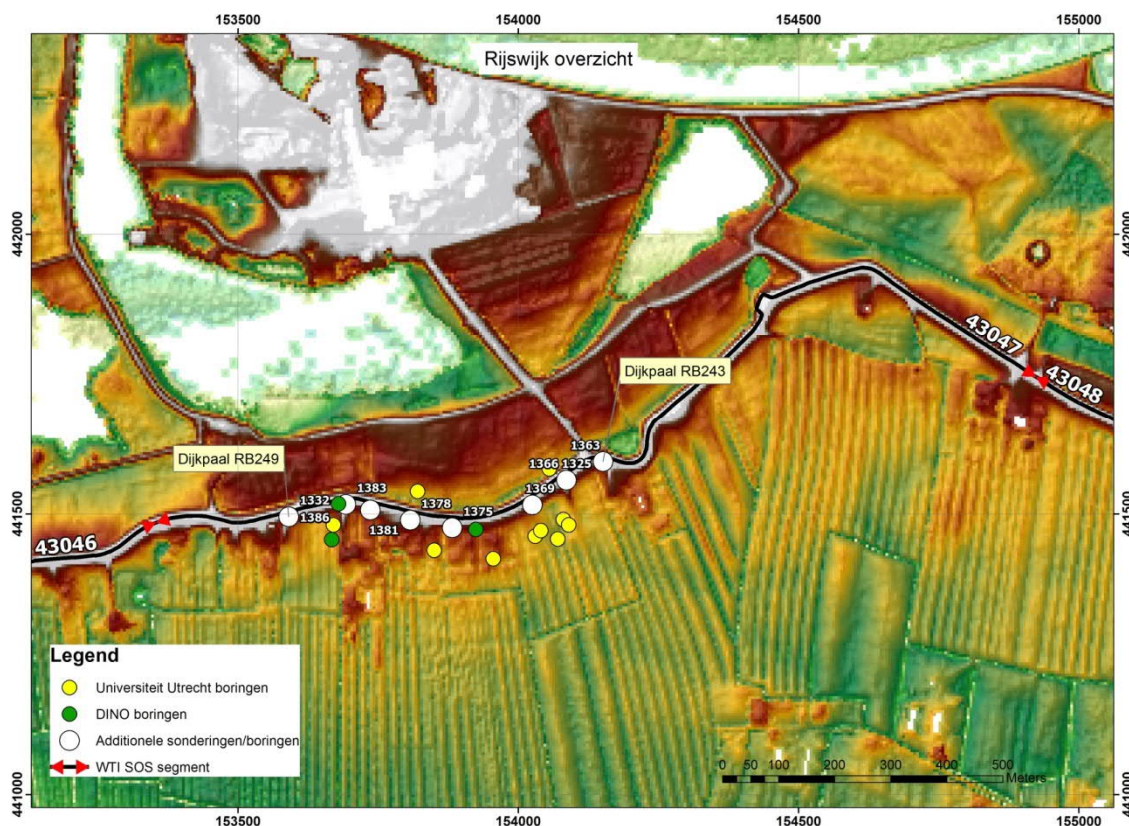
8.2.1 *Het dijktracé*

Het dijktracé betreft de Rijnbanddijk aan de zuidoever van de Nederrijn ten oosten van het dorp Rijswijk (Gelderland). De overzichtskaart in Figuur 1 geeft het dijktracé aan. Het dijktracé maakt onderdeel uit van het normtraject 43-2 en is daarmee geclassificeerd als een relatief pipinggevoelig dijktraject uit het bovenrivierengebied (zie paragraaf 7.2.17). In dit voorbeeld beschouwen we slechts een klein deel van het normtraject.



Figuur 8-1 Overzichtskaart van het dijktracé (dikke lijn) aan de zuidoever van de Nederrijn nabij het dorp Rijswijk (Gelderland). De blauwe lijn is het SOS-segment 43047. (Bron kaart: Open Street Map)

Het dijktracé is 600 m lang, bevindt zich tussen de dijkpalen RB249 en RB243, en ligt in het 1850 m lange SOS-segment 43047. Het beschikbare grondonderzoek bestaat uit boringen uit de DINO-database, boringen van de Universiteit Utrecht en aanvullend grondonderzoek (Figuur 8-2).



Figuur 8-2 Het dijktracé tussen de dijkpalen RB249 en RB243. Het dijktracé is onderdeel van het SOS-segment 43047 (tussen de rode pijlen) en is gelegen in het bovenrivierengebied. Tevens is het beschikbare grondonderzoek van dit dijktracé in het overzicht weergegeven.

8.2.2 De dijk

De foto in Figuur 8-3 geeft een indruk van de betreffende dijk. De dijk heeft een breedte aan de basis van 25 m en bestaat voornamelijk uit cohesieve grond. De kruin van de dijk ligt op NAP +9,45 m, ongeveer 4,4 tot 5 m boven het buitendijks maaiveld. Op de dijk ligt een publieke doorgaande weg.

8.2.3 Terrein

De foto in Figuur 8-3 geeft eveneens een indruk van de directe omgeving van de dijken, terwijl het Google Maps overzicht in Figuur 8-4 een indruk geeft van de ruimere omgeving. Figuur 8-5 geeft een AHN hoogtebeeld van de dijk en omgeving.

Voorland

Op een afstand van ongeveer 165 m van de buitenteen van de dijk is dieper open water aanwezig. Het betreft zandwinlocaties en het oppervlaktewater heeft daar direct contact met het zand onder de dijk (zie paragraaf 8.3).

Op 6 m van de buitenteen van de dijk is een 2 m brede sloot aanwezig waarvan de bodem op ongeveer NAP +3,9 m ligt, zo'n 0,8 m beneden maaiveld. De bodem heeft mogelijk contact met een ondiep voorkomende zandlaag, maar er staat in de zomer plaatselijk water in dat wijst op een mogelijk plaatselijk aanwezige afsluitende laag onder de sloot.

Het voorland in de omgeving van de dijk ligt op NAP +4,6 – 5,2 m.

In het voorland zijn verder geen aanwijzingen voor aanmerkelijk dieper gelegen delen zoals terreinlaagtes, kleiwinputten en verdere sloten.

Achterland

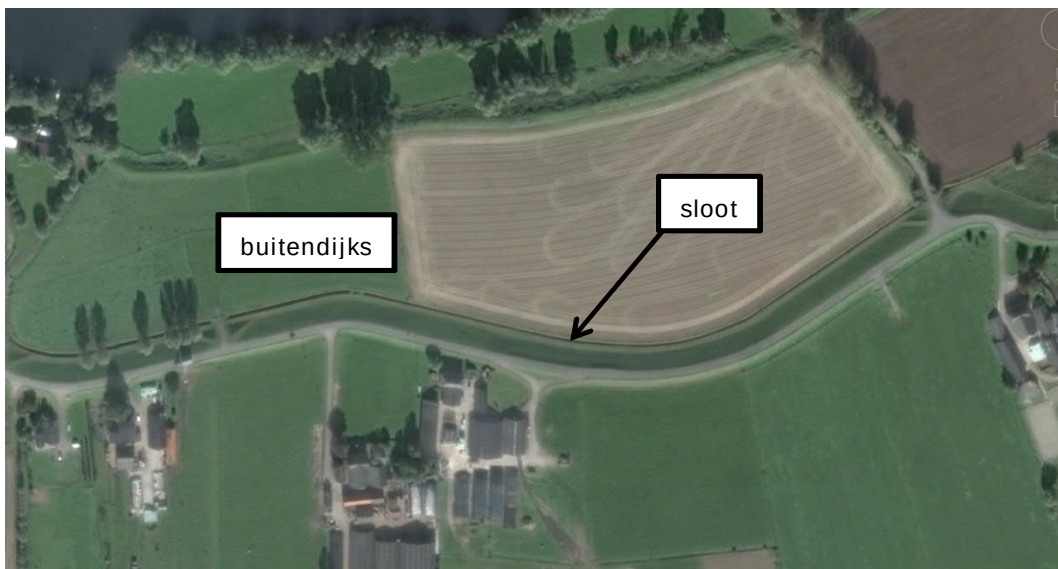
Het achterland ligt in de omgeving van de dijk op NAP +4,7 – 5 m. Er zijn geen sloten in het achterland. Er is wel een regelmatig reliëf van ongeveer 0,2 m, zeer lokaal 0,3 m, in de vorm van dwars op de dijk georiënteerde percelen met daartussen plaatselijk ondiepe greppels.

In het achterland zijn verder geen aanwijzingen voor lager gelegen terreindelen.

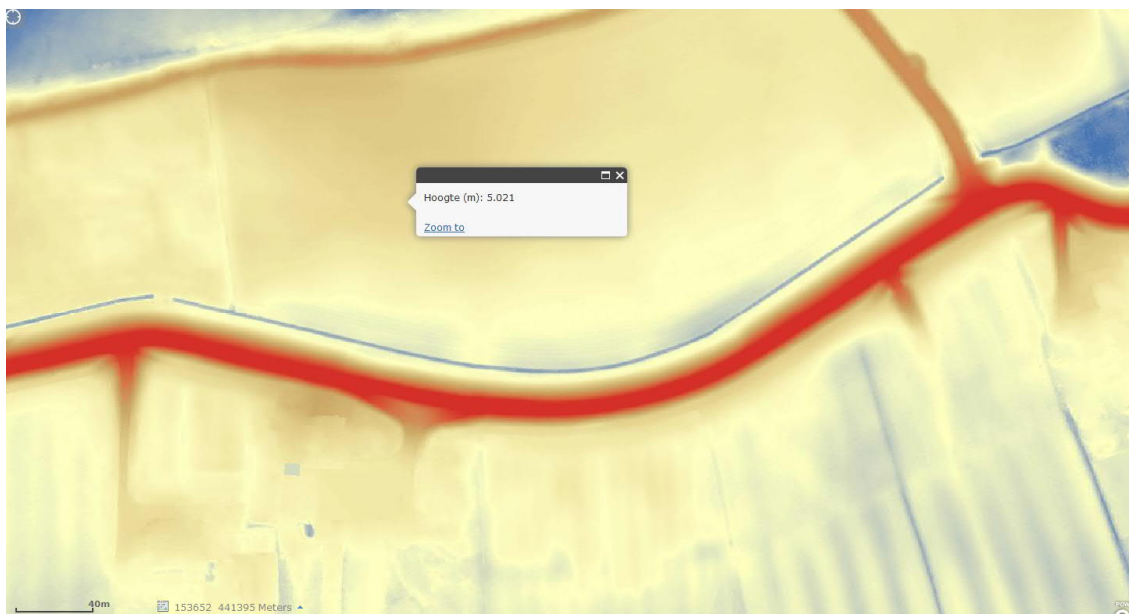
Aan de dijk zijn een aantal woningen en bedrijven (agrarisch) gelegen met opritten.



Figuur 8-3 Impressie van de betreffende dijk (Google Maps ©2015 Google) met voorland links dat zichtbaar hoger gelegen is dan het achterland. Er is behoudens ondiepe greppels geen sloot buitendijks



Figuur 8-4 Overzicht van het terrein langs het dijkvak (Google Earth ©2013 Google Inc.)



Figuur 8-5 AHN hoogtebeeld van het dijkvak. Rood is ca. NAP +9,5 m NAP en lichtblauw NAP +4,4 m (© Actueel Hoogtebestand Nederland).

8.3 Beschikbare grondgegevens

8.3.1 Globale Stochastische OndergrondSchematisering (WBI-SOS)

Voor vrijwel alle primaire waterkeringen is er door geologische/geotechnische experts een globale SOS opgesteld op basis van de kennis van en informatie over de systematische opbouw van de ondergrond (zie paragraaf 6.1.2). De globale SOS geeft voor elk (ondergrond)segment van een dijkstrekking scenario's van grondopbouw die in het segment voor kunnen komen en de kans van aantreffen daarvan. De grondopbouw in zo'n scenario is weergegeven in de vorm van een stapeling van dikkere en dunnere lagen bestaande uit eenheden (grondsoorten) zoals die in Nederland voorkomen. De grondeigenschappen van de lagen worden in hoofdlijnen bepaald op basis van de respectieve SOS-eenheden waartoe ze behoren. Voor het schematiseren voor het toetsspoor *pipng* zijn de specifieke doorlatendheid k en de d_{70} van doorlatende lagen in de grondopbouw door experts vastgesteld op basis van de SOS-eenheden waartoe die lagen in de grondopbouwscenario's behoren (zie hiervoor paragrafen 7.2.6 en 7.2.9). Deze waarden zijn beschikbaar gesteld en kunnen gebruikt worden als startwaarden voor de beoordeling van het toetsspoor *pipng* (zie ook bijlage F t/m I).

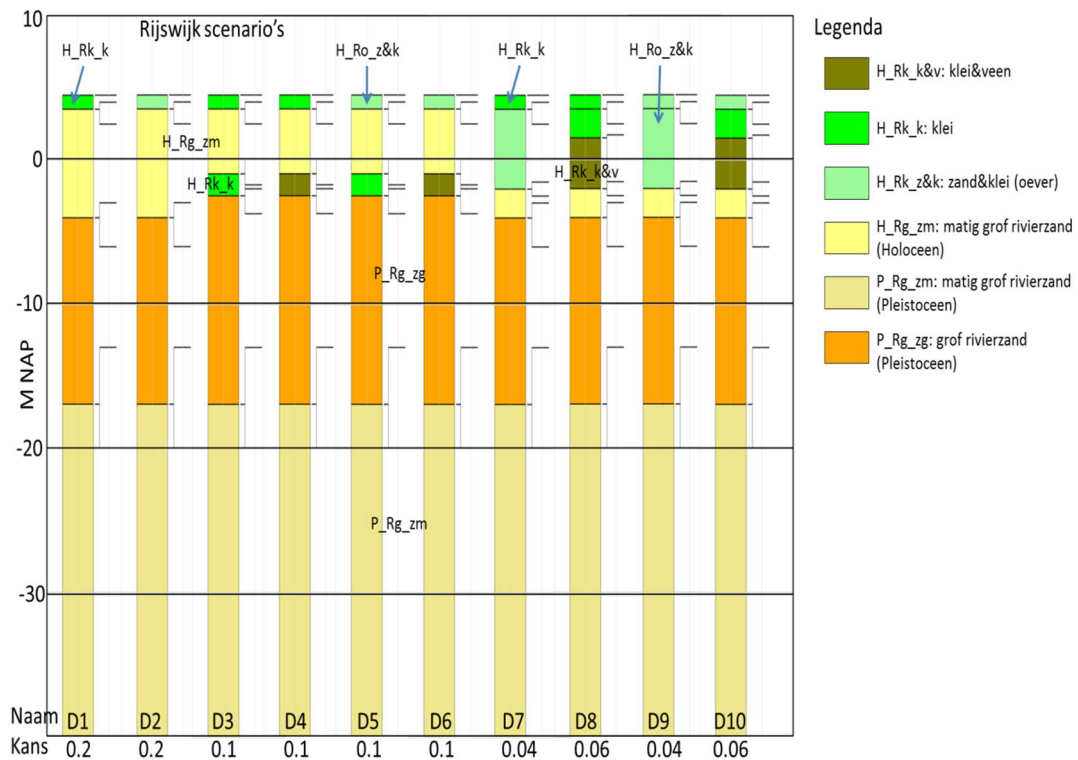
De globale SOS is beschikbaar in het softwareprogramma D-Soil Model, zodat deze direct bewerkt kan worden om tot een lokale SOS te komen. De startwaarden van de specifieke doorlatendheid k en de d_{70} van doorlatende lagen worden met het softwareprogramma D-Soil Model meegeleverd als separate csv-bestanden. De benodigde startwaarden kunnen in de bestanden worden opgezocht.

Zoals hierboven is aangegeven valt het voorbeeldtracé in het SOS-segment 43047. In de Figuur 8.6 is voor het SOS-segment 43047, de grondopbouw grafische weergegeven voor de verschillende SOS-scenario's die er aangetroffen kunnen worden. De Tabel 8.1 geeft de kans van aantreffen van de scenario's en de diepteligging van de bovengrens van de onderscheiden SOS-eenheden. De modale (meest voorkomende) diepte van de top van de eenheden in de scenario's zijn gegeven en een indicatie van de hoogste en laagste diepteligging (ongeveer 10 % kan hoger liggen dan de aangegeven maximale ligging en 10 % lager dan de minimale ligging).

Voor de specifieke doorlatendheid k en de d_{70} van doorlatende lagen in de grondopbouw voor het SOS-segment 43047 zijn de beschikbare startwaarden weergegeven in respectievelijk

Tabel 8.2 en Tabel 8.3.

Deze SOS-informatie betreft het gehele SOS-segment en wordt samen met lokale gegevens gebruikt om de lokale schematisering vast te stellen.



Figuur 8-6 SOS scenario's en kans van aantreffen in het SOS segment waarbinnen het dijktracé is gelegen. NB: dit is een samengesteld figuur en dergelijke figuren zijn niet direct beschikbaar voor andere locaties.

Tabel 8.1 Grondopbouw voor de verschillende SOS-scenario's in het SOS-segment waarbinnen het dijktracé is gelegen. De modale (meest voorkomende) diepte van de top van de eenheden in de scenario's zijn gegeven samen met indicatie van de hoogste en laagste diepteligging (ongeveer 10 % ligt hoger dan de maximale ligging en 10 % lager dan de minimale ligging).

Scenario	Kans van aantreffen	Eenheid	Modale top [m NAP)	Minimale diepteligging Top [m NAP)	Maximale diepteligging Top [m NAP)
Segment_43047_1D1	0.2	H_Rk_k	4.5	4.5	4.5
		H_Rg_zm	3.5	4	2.5
		P_Rg_zg	-4	-3	-6
		P_Rg_zm	-17	-13	-20
Segment_43047_1D2	0.2	H_Ro_z&k	4.5	4.5	4.5
		H_Rg_zm	3.5	4	2.5
		P_Rg_zg	-4	-3	-6
		P_Rg_zm	-17	-13	-20
Segment_43047_1D3	0.1	H_Rk_k	4.5	4.5	4.5
		H_Rg_zm	3.5	4	2.5
		H_Rk_k	-1	0	-2
		P_Rg_zg	-2.5	-1.75	-3.75

Scenario	Kans van aantreffen	Eenheid	Modale top [m NAP)	Minimale diepteligging Top [m NAP)	Maximale diepteligging Top [m NAP)
Segment_43047_1D4	0.1	P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Rk_k	4.5	4.5	4.5
		H_Rg_zm	3.5	4	2.5
		H_Rk_k&v	-1	0	-2
		P_Rg_zg	-2.5	-1.75	-3.75
Segment_43047_1D5	0.1	P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Ro_z&k	4.5	4.5	4.5
		H_Rg_zm	3.5	4	2.5
		H_Rk_k	-1	0	-2
		P_Rg_zg	-2.5	-1.75	-3.75
Segment_43047_1D6	0.1	P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Ro_z&k	4.5	4.5	4.5
		H_Rg_zm	3.5	4	2.5
		H_Rk_k&v	-1	0	-2
		P_Rg_zg	-2.5	-1.75	-3.75
Segment_43047_1D7	0.04	P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Rk_k	4.5	4.5	4.5
		H_Ro_z&k	3.5	4	2.5
		H_Rg_zm	-2	-1.5	-2.5
		P_Rg_zg	-4	-3	-6
Segment_43047_1D8	0.06	P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Rk_k	4.5	4.5	4.5
		H_Rk_k	3.5	4	2.5
		H_Rk_k&v	1.5	1.75	-2.5
		H_Rg_zm	-2	-1.5	-2.5
Segment_43047_1D9	0.04	P_Rg_zg	-4	-3	-6
		P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Ro_z&k	4.5	4.5	4.5
		H_Ro_z&k	3.5	4	2.5
		H_Rg_zm	-2	-1.5	-2.5
Segment_43047_1D10	0.06	P_Rg_zg	-4	-3	-6
		P_Rg_zm	-17	-13	-20
		H_Ro_z&k	4.5	4.5	4.5
		H_Rk_k	3.5	4	2.5
		H_Rk_k&v	1.5	1.75	-2.5
		H_Rg_zm	-2	-1.5	-2.5
		P_Rg_zg	-4	-3	-6
		P_Rg_zm	-17	-13	-20

Tabel 8.2 Startwaarden voor specifieke doorlatendheid k van doorlatende lagen in de grondopbouw voor de verschillende SOS-scenario's in het SOS-segment 43047 waarbinnen het dijktracé is gelegen. Zie ook bijlage F en I. In bijlage I is een beschrijving van de kolomnamen gegeven. (Bron: bestand WTI_SOS_VNK_kwaarde_1sep2016.csv zoals meegeleverd met het softwareprogramma D-Soil Model 16.1.3)

Scenario (soilprofile_id)	Modale top (Top_level) [m NAP]	Eenheid (soil_name)	Minimale diepteligging Top (Max- d) [m NAP]	Maximale diepteligging Top (Min-d) [m NAP]	Gemiddeld e k (k- mean) [m/dag]
Segment_43047_1D1	4.5	H_Rk_k	4.5	4.5	
	3.5	H_Rg_zm	4	2.5	15
	-4	P_Rg_zg	-3	-6	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D2	4.5	H_Ro_z&k	4.5	4.5	15
	3.5	H_Rg_zm	4	2.5	15
	-4	P_Rg_zg	-3	-6	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D3	4.5	H_Rk_k	4.5	4.5	
	3.5	H_Rg_zm	4	2.5	15
	-1	H_Rk_k	0	-2	
	-2.5	P_Rg_zg	-1.75	-3.75	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D4	4.5	H_Rk_k	4.5	4.5	
	3.5	H_Rg_zm	4	2.5	15
	-1	H_Rk_k&v	0	-2	
	-2.5	P_Rg_zg	-1.75	-3.75	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D5	4.5	H_Ro_z&k	4.5	4.5	15
	3.5	H_Rg_zm	4	2.5	15
	-1	H_Rk_k	0	-2	
	-2.5	P_Rg_zg	-1.75	-3.75	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D6	4.5	H_Ro_z&k	4.5	4.5	15
	3.5	H_Rg_zm	4	2.5	15
	-1	H_Rk_k&v	0	-2	
	-2.5	P_Rg_zg	-1.75	-3.75	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D7	4.5	H_Rk_k	4.5	4.5	
	3.5	H_Ro_z&k	4	2.5	15
	-2	H_Rg_zm	-1.5	-2.5	15
	-2.9	H_Rg_zm			45
	-4	P_Rg_zg	-3	-6	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
Segment_43047_1D8	4.5	H_Rk_k	4.5	4.5	
	3.5	H_Rk_k	4	2.5	
	1.5	H_Rk_k&v	1.75	-2.5	
	-2	H_Rg_zm	-1.5	-2.5	15

Scenario (soilprofile_id)	Modale top (Top_level) [m NAP]	Eenheid (soil_name)	Minimale diepteligging Top (Max- d) [m NAP]	Maximale diepteligging Top (Min-d) [m NAP]	Gemiddeld e k (k- mean) [m/dag]
Segment_43047_1D9	-2.9	H_Rg_zm			45
	-4	P_Rg_zg	-3	-6	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
	4.5	H_Ro_z&k	4.5	4.5	15
	3.5	H_Ro_z&k	4	2.5	15
	-2	H_Rg_zm	-1.5	-2.5	15
	-2.9	H_Rg_zm			45
	-4	P_Rg_zg	-3	-6	45
Segment_43047_1D10	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30
	4.5	H_Ro_z&k	4.5	4.5	15
	3.5	H_Rk_k	4	2.5	
	1.5	H_Rk_k&v	1.75	-2.5	
	-2	H_Rg_zm	-1.5	-2.5	15
	-2.9	H_Rg_zm			45
	-4	P_Rg_zg	-3	-6	45
	-17	P_Rg_zm	-13	-20	30

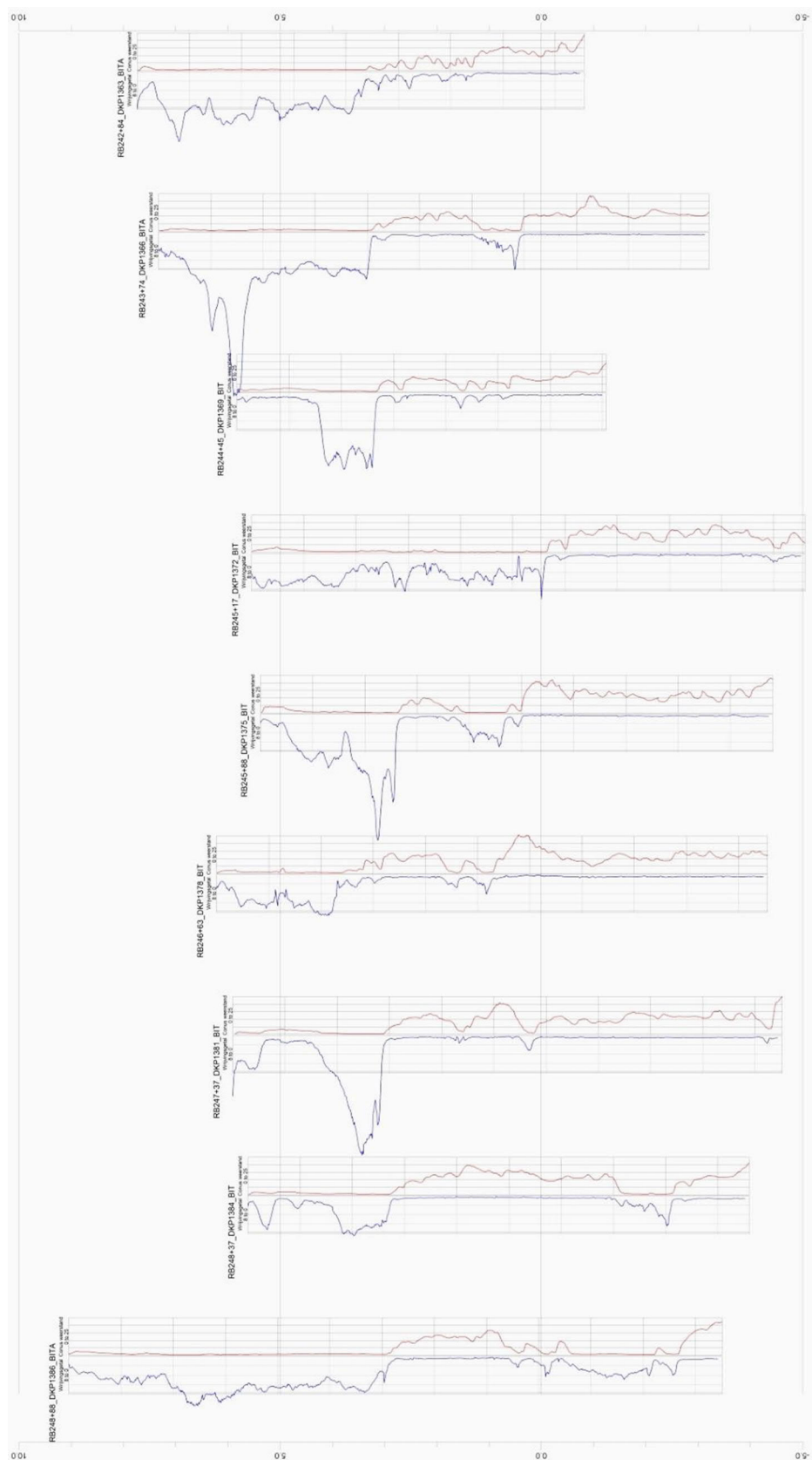
Tabel 8.3 Startwaarden voor specifieke d_{70} van doorlatende lagen in de grondopbouw voor de verschillende SOS-scenario's in het SOS-segment 43047 waarbinnen het dijktracé is gelegen. Zie ook bijlage G en I. In bijlage I is een beschrijving van de kolomnamen en afkortingen gegeven. (Bron: bestand WTI_SOS_D70_1sep2016.csv zoals meegeleverd met het softwareprogramma D-Soil Model 16.1.3)

WTI-segment	WTI-scenario	VNK-gebied	WTI-mv	D70_gem1	Fm1	d1	D70_gem2	Fm2	d2	D70_gem3	Fm3	d3	D70_gem4	Fm4	d4
43047	1D1	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D1	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D2	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D2	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D3	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D3	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D4	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D4	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D5	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D5	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D6	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D6	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D7	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D7	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D8	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D8	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D9	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D9	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2
43047	1D10	43_C	4.5	310	EC	3.5	310	EC	-3.3	310	EC	-1	410	KR	-10
43047	1D10	43_D	4.5	310	EC	5.67	310	EC	5.5	310	EC	3.5	360	KR	-2

8.3.2

Lokale grondgegevens

In Figuur 8.7 zijn de locaties van sondeer- en boorstaten bij het dijktracé weergegeven. Naast in DINO beschikbare boorstaten (zie Figuur 8-8), bijna alle met een diepte tot mv -1 – -5 m, zijn er sondeerstaten voor punten met een onderlinge afstand van ongeveer 75 m (Figuur 8.9). De sondeerstaten geven informatie tot NAP -2 – -5 m, (ongeveer tot 7 m beneden binnendijks maaiveld). Er zijn geen geofysische metingen of geotechnisch laboratoriumgegevens zoals korrelverdelingen en doorlatendheidsbepalingen beschikbaar voor het dijktracé.



Figuur 8-9 Sondeerstaten voor punten langs het dijktracé (zie Figuur 8.7 voor de locaties).

8.4 Ondergrondschematisering

8.4.1 Grondopbouw

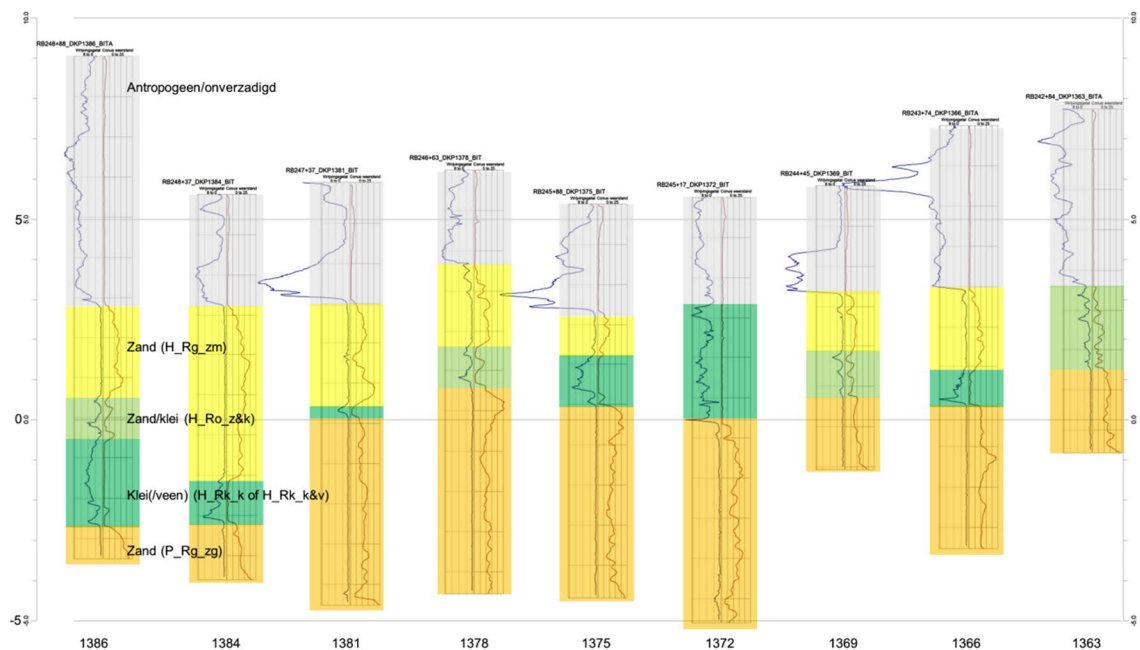
De grondopbouw van het dijktracé wordt vastgesteld op basis van de lokale grondgegevens en de beschikbare globale SOS. De SOS-informatie betreft de ondergrond bij de binnenteen van de dijk en wordt daarnaast als basis gebruikt om de opbouw onder de dijk en in het voorland vast te stellen. Opgemerkt wordt dat de beschrijving van de grondopbouw van dit dijktracé is gebaseerd op het voorbeeld in de *Handleiding lokaal schematiseren* [7]. Hieronder wordt voor de volledigheid beknopt de schematisering van de grondopbouw behandeld. Voor een uitgebreidere beschrijving van het schematiseren van de grondopbouw voor dit dijktracé wordt verwezen naar de *Handleiding lokaal schematiseren* [7].

Het schematiseren van de grondopbouw (inclusief de grondeigenschappen) vindt plaats in D-Soil Model. Het globale SOS is in D-Soil Model beschikbaar en de lokale grondgegevens kunnen in D-Soil Model worden ingelezen, mits deze gegevens in ondersteunende bestandsformaten staan. Een volledige ondergrondschematisering in D-Soil Model kan in Riskeer worden ingelezen en gebruikt voor verdere schematiseringen van de dwarsprofielen. Belangrijk om te beseffen is dat de ondergrondschematisering betrekking heeft op een ondergrondsegment en niet op een dwarsprofiel. De ondergrondschematisering wordt in Riskeer pas gekoppeld aan een dwarsprofiel. De schematisering van het dwarsprofiel is beschreven in paragraaf 8.5.

Binnenteen en achterland

De ondergrond bestaat vooral uit een afwisseling van klei- en zandlagen die rond NAP+ 0-1 m overgaat in een ononderbroken zandlaag (Figuur 8-10). Lokaal begint de ononderbroken zandlaag iets dieper. De sondeerstaten betreffen locaties op en in de teen van de dijk (binnendijs maaiveld is gelegen op NAP+ 4,7 – 5 m). Het bovenste deel van de sondeerstaten met hogere wrijvingsgetallen (linker grafieklijn in de sondeerstaten) betreft onverzadigd dijksmateriaal en het onverzadigde deel van de ondergrond. De beschikbare boringen reiken vrijwel allen zeer ondiep en laten aan de binnenteen een deklaag zien van 1-3,5 m dik die bestaat uit klei en/of klei met zandlaagjes.

Het ononderbroken zandpakket is van Pleistocene ouderdom (Formatie van Kreftenheye) en bestaat uit matig grof tot grof rivierzand. De ondiepere zandlagen bestaan uit Holoceen rivierzand. Het kleiige traject op het Pleistocene zand bevat soms veenlagen.



Figuur 8-10 Indeling van de sondeerstaten in zandpakketten (geel en oranje) en niet doorlatende lagen (geelgroen en groen). De sonderingen staan op de dijk en in de teen ervan.

Na classificatie van de sondeerstaten kunnen we het volgende over de grondopbouw vaststellen. Beneden de onverzadigde zone wordt in 7 van de 9 sondeerstaten een zandlaag van enige meters dikte aangetroffen die is gelegen op 1 tot 2 m klei, gelegen op een diepere zandlaag waarvan de sondering de basis niet bereikt. In twee van de sondeerstaten wordt beneden de onverzadigde zone een kleilaag, dan wel een kleilaag met veel zandinsluitingen, aangetroffen met een dikte van 2 tot 3 m, gelegen op genoemde diepere zandlaag.

Lokale scenario's

Voor dit dijktracé wordt op basis van de beschikbare grondgegevens een lokale SOS opgesteld waarbij het ondergrondsegment gelijk is aan het dijktracé. Dit ondergrondsegment is dus slechts een deel van het oorspronkelijke ondergrondsegment 43047. Hiervoor worden de hierboven geclassificeerde sondeerstaten vergeleken met de SOS-scenario's van het SOS-segment 43047 (zie Figuur 8.6) waarbinnen het dijktracé is gelegen. Op basis van de vergelijking kan worden vastgesteld dat de sondeerdata passen bij de scenario's die voor SOS zijn vastgesteld en dat alle daarin aanwezige SOS-eenheden voorkomen in het dijktracé. De bovenste kleiige laag in SOS (eenheden H_Rk_k en H_Ro_z&k) zijn niet als zodanig te herkennen in de sondeerstaten vanwege het daarin prominente effect van de onverzadigde zone.

Als de sondeerstaten worden vergeleken met de scenario's kan het volgende worden vastgesteld. De sonderingen 1384, 1378, 1375, 1369 en 1366 behoren tot een van de WBI-SOS scenario's D3, D4, D5, of D6. De zeer geringe dikte van de kleilaag op ca. NAP 0 m in sondering 1381 doet vermoeden dat WBI-SOS scenario D1 of D2 van toepassing zal zijn in het segment. De sonderingen 1386 en 1372 behoren tot de WBI-SOS scenario's D8 of D10 en de sondering 1363 tot WBI-SOS scenario D7 of D9.

Op basis van de aanvullende gegevens kunnen er geen WBI-SOS scenario's uitgesloten worden. Er zijn geen aanwijzingen dat nadere onderscheidingen naar lokale lagen binnen de SOS eenheden van invloed zijn. De lokale grondopbouw op basis van de sondeerstaten wordt reeds gerepresenteerd door de bestaande scenario's.

Aan de hand van de WBI-SOS-scenario's en de aanvullende gegevens kunnen de lokale scenario's voor drie diktes van de deklaag worden onderscheiden vanwege het mogelijke effect ervan op het oordeel met betrekking tot opbarsten en piping, geschematiseerd als respectievelijk 1 m, 1,5 m en 3,7 m dikte. Vanwege de aard van de deklagen (klei en zandige klei) en de

ligging ervan (geheel of grotendeels boven gemiddeld grondwaterpeil) wijst dit op een beperkte variatie in de grondeigenschappen ervan (o.a. het volumegewicht). Er wordt dus voor nu geen onderscheidende lagen in de deklaag meegenomen. Mocht er na berekening aanleiding ervoor zijn, dan kan op basis van de verschillen in grondeigenschappen de scenario's verder worden onderverdeeld.

Daarnaast kan in de te beschouwen scenario's een afsluitende laag onder het zandpakket worden meegenomen met een bovenkant op:

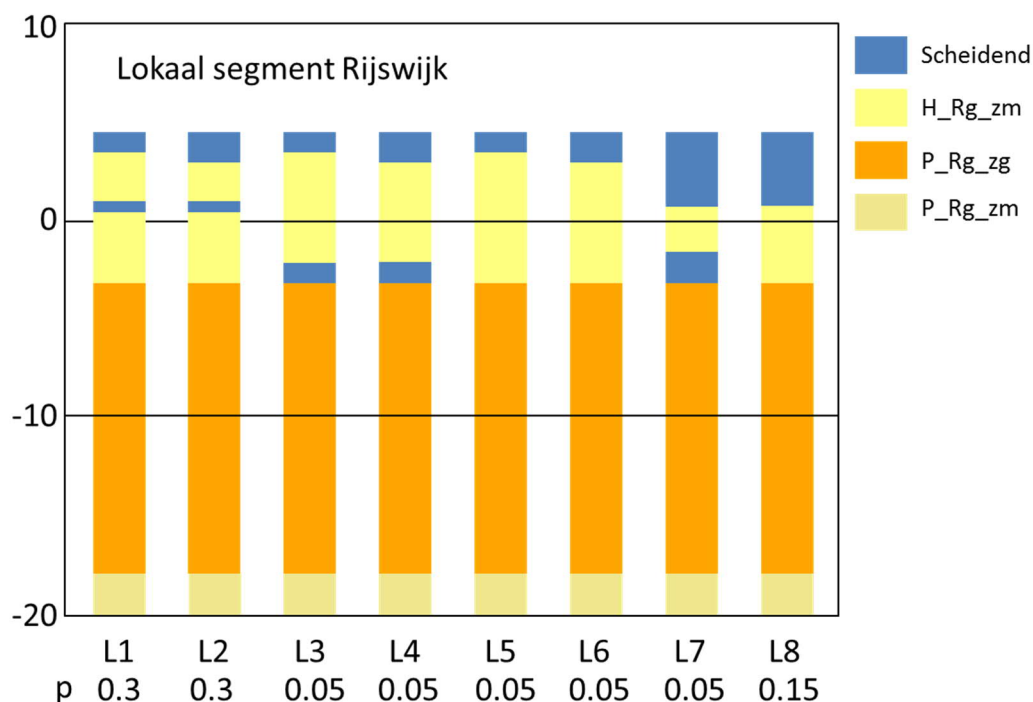
- NAP +0,8 m *of*
- NAP -2 m

Als er geen afsluitende laag in lokale gegevens is aangetroffen, dan is de basis van de zandlaag, zoals die in de WBI-SOS scenario's is vastgesteld, van toepassing.

Voor het bepalen van de kans van aantreffen van de scenario's worden de kansen in het WBI-SOS vergeleken met de lokale gegevens. Hierbij wordt gekeken naar de relevante (grondopbouw)karakteristieken in de lokale gegevens. In dit voorbeeld wordt gekeken naar de laagdikte van de deklaag, de aanwezigheid van een scheidende laag tussen de twee zandpakketten en de diepte van de onderkant van het eerste zandpakket. Door te tellen hoe vaak deze karakteristieken worden aangetroffen in de lokale gegevens ten opzichte van het totaal, kan een inschatting worden gemaakt wat de kans van aantreffen is van deze karakteristieken. Deze kans van aantreffen van een bepaalde karakteristiek, kan vergeleken worden met de kans van aantreffen van deze karakteristiek in de scenario's van het WBI-SOS. Dit kan het beeld in het WBI-SOS bevestigen of reden zijn om de kans van aantreffen aan te passen. Hierbij is het van belang om rekening te houden met het aantal beschikbare lokale grondgegevens ten opzichte van de lengte van het segment en de verdeling over het segment. Als er weinig lokale grondgegevens zijn is het beter om de WBI-SOS kansen aan te houden.

In dit voorbeeld geven de lokale gegevens geen aanwijzingen dat de kans van 20% voor een relatief dikke deklaag (optelsom van SOS scenario's D7-D10) lokaal anders is. Er zijn evenmin aanwijzingen dat de kans op aantreffen van een zeer dunne of iets dikkere deklaag lokaal afwijkt van de kans in het SOS-segment. De scenario's met een dunne deklaag hebben daarom een gezamenlijke kans van aantreffen van 80%. De kans op afwezigheid van een scheidende kleilaag tussen de twee zandpakketten wordt op basis van de sonderingen op 10% geschat. Tenslotte wordt op basis van de lokale gegevens en de aanwijzingen van WBI-SOS geschat dat de kans op een eerste zandpakket eindigend rond NAP +0,8 m 60% bedraagt en de kans op een eerste zandpakket eindigend op ongeveer NAP -2 m 10%. Figuur 8.11 geeft de onderscheiden lokale scenario's en de bijbehorende kansen. Scenario's L1-L4 zijn afgeleid van scenario's D3-D6, L5 en L6 van scenario's D1-D2 en scenario's L7 en L8 van scenario's D7-D10.

In het algemeen kan het uitvoeren van meer grondonderzoek het beeld met betrekking tot de kans van aantreffen van de scenario's verder verfijnen. Soms zal het ook gewenst zijn om met voldoende zekerheid te kunnen vaststellen dat een bepaald scenario afwezig is. Het aantal sonderingen in dit segment is beperkt, maar wel redelijk gelijkmatig verdeeld over het segment. In dit voorbeeld is het niet aannemelijk dat aanvullend grondonderzoek de kansen van aantreffen van de scenario's sterk zal veranderen. Bij het uitvoeren van grondonderzoek is het tevens van belang om ook rekening te houden met de te beschouwen karakteristieken. Om bijvoorbeeld de diepte van de onderkant van het eerste zandpakket of de aanwezigheid van een scheidende laag tussen de twee zandpakketten te kunnen bepalen, moeten de sonderingen of (hand)boringen wel voldoende diep worden uitgevoerd.



Figuur 8-11 Lokale scenario's en kans van aantreffen ervan (aangegeven met P). De klei- en zandige kleilagen zijn als scheidende lagen aangegeven.

Tabel 8.4 Specificatie van de grondopbouw voor piping van de onderscheiden lokale scenario's en kans van aantreffen p ervan. Aangegeven is respectievelijk de bovenkant van het zandpakket, de dikte van het bovenste zandpakket, de dikte van de deklaag, een voorlopige identificatie van het lokale scenario en de kans van aantreffen van het lokale scenario in het dijktracé.

Lokaal scenario	Ddeklaag [m]	Top zand [m NAP]	Dzand [m]	P
L1	1	3.5	2.5	0.30
L3	1	3.5	5.5	0.05
L5	1	3.5	40	0.05
L2	1.5	3	2	0.30
L4	1.5	3	5	0.05
L6	1.5	3	40	0.05
L7	3.7	0.8	2	0.05
L8	3.7	0.8	40	0.15

Nadere indeling van het dijktracé in lokale segmenten

Er zijn geen aanwijzingen in het lokale grondonderzoek en het terrein die aangeven dat onderverdeling van het dijktracé in meerdere lokale segmenten zal leiden tot het beperken van het aantal scenario's in één of meer lokale segmenten in het dijktracé. Het dijktracé betreft daarom een enkel lokaal segment.

Dijk

De voor het binnendijkse gebied opgestelde lokale scenario's geven relevante variatie in opbouw onder de dijk weer. Geen van de scenario's in combinatie met de opbouw van het dijklichaam zou leiden tot een andere schematisering met relevant afwijkende uitkomst voor het mechanisme piping leiden. De zetting van lagen onder de dijk zal zeer beperkt zijn door de dikte en aard van de aanwezige lagen. Mogelijk is de dijk enigszins in de ondiep gelegen 2 tot 3,5 m dikke klei dan wel kleiige laag van de scenario's D8 en D10 gezakt, hetgeen voor de toepassing voor piping niet verder is nagegaan.

Voorland

Er zijn geen gegevens over de opbouw van de ondergrond in het voorland. De lokale schematisering van de opbouw van de ondergrond in het voorland is daarom gebaseerd op de indeling voor het binnendijkse gebied. De dikte van de deklaag is voor een aantal lokale scenario's minder dan de diepte van de sloot bij de buitenteen van de dijk. In de praktijk kan de opbouw in het voorland wezenlijk anders zijn dan aan de binnenteen.

Binnendijks maaiveld

De wat lagere delen van het binnendijkse maaiveld is gelegen op NAP +4,7 m. Het is vanwege de doorlatende ondergrond aannemelijk dat tijdens een langdurige hoogwaterperiode de stijghoogte in de bovenste zandlaag tot tenminste aan het maaiveld komt.

Dikte deklaag buitendijks

De lokale scenario's (Tabel 8.4) geven de aan te houden mogelijke diktes van de deklaag buitendijks.

Dikte deklaag binnendijks

De lokale scenario's (Tabel 8.4) geven de aan te houden mogelijke diktes van de deklaag binnendijks.

Lagen in het zandpakket

Er komen 3 typen zandpakketten voor, te weten: H_Rg_zm, P_Rg_zg, P_Rg_zm. In een aantal scenario's bestaat het voor piping maatgevende zandpakket uit P_Rg_zg gelegen op P_Rg_zm met de grens ertussen op NAP -17 m (maximaal NAP -13 m en minimaal NAP -20 m, zie Tabel 8.1).

Basis zandpakket

De basis van het zandpakket is voor een aantal scenario's gegeven in Tabel 8.2. Waar deze basis niet is gegeven in de tabel wordt uitgegaan van een diepte van NAP -35,5 m (startwaarde gebruikt voor WBI-SOS).

8.4.2

Doorlatendheid zandpakketten

In dit voorbeeld worden de doorlatendheid van de verschillende zandlagen in de scenario's vastgesteld met Tabel 8.2 (of dezelfde tabel in bijlage F), omdat andere (meet)gegevens over de doorlatendheid niet beschikbaar zijn. De doorlatendheid in de verschillende SOS-eenheden worden voor het lokale segment in Tabel 8.5 samengevat weergegeven.

Tabel 8.5 Doorlatendheid [m/d] van de verschillende SOS eenheden in het dijkvak, het lokale segment.

SOS-eenheid in segment 43047	Doorlatendheid [m/d]
H_Rg_zm	15
P_Rg_zg	45
P_Rg_zm	30

In het geval dat de kritieke stijghoogte niet wordt bepaald met numerieke berekeningen waarin het optreden van piping is opgenomen, worden hieronder benaderingen gegeven om te komen tot de effectieve doorlatendheid.

De zandpakketten P_Rg_zg en P_Rg_zm liggen direct op elkaar in alle lokale scenario's in het lokale segment en vormen dus één enkele zandlaag in de schematisering voor piping in SOS. De zandpakketten H_Rg_zm en P_Rg_zg liggen direct op elkaar in een aantal lokale scenario's en vormen voor die scenario's met de eenheid P_Rg_zm een enkel zandpakket. De effectieve doorlatendheid van het totale zandpakket voor piping is het resultaat van de gecombineerde doorlatendheden van de gestapelde zandpakketten. Hieronder wordt een werkwijze gegeven om effectieve doorlatendheden te benaderen. De werkwijze kan per situatie verschillend zijn, dit hangt af van de dikte en diepte van de zandpakketten.

De effectieve doorlatendheid van de stapeling van de lagen van de eenheden P_Rg_zg en P_Rg_zm wordt bij de aangenomen kwelweglengte (zie paragraaf 8.5.7) gedomineerd door de bovenste ongeveer 15 m dikke P_Rg_zg die een hoge doorlatendheid heeft. De doorlatendheid

van de P_Rg_zg eenheid voor het dijkvak wordt daarom als de effectieve doorlatendheid gebruikt van het diepere zandpakket bij de lokale scenario's L5, L6 en L8.

Als het bovenste zandpakket van gestapelde zandpakketen de minder doorlatende laag betreft, is een naar dikte gewogen rekenkundige gemiddelde een veilige benadering en wel als in:

$$k_{eff} = \frac{d_1 k_1 + d_2 k_2}{D}, \quad D = d_1 + d_2$$

Met d_1 en d_2 de dikte van de bovenste en onderste laag in een 2-lagen opbouw en k_1 en k_2 de respectievelijke doorlatendheden van die lagen. De effectieve doorlatendheid voor piping voor de lokale scenario's L5, L6 en L8 op deze wijze vastgesteld is weergegeven Tabel 8.6.

Tabel 8.6 Effectieve doorlatendheid van het zandpakket voor piping. De waarden zijn voor de lokale scenario's L5, L6 en L8 bepaald met het gewogen rekenkundig gemiddelde en betreffen een conservatieve schatting.

lokaal scenario	k_{eff} zandlaag [m/d]
L1	15
L2	15
L3	15
L4	15
L5	40
L6	40
L7	15
L8	40

De doorlatendheid moet als stochast worden ingevuld. Bij gebrek aan gedetailleerde gegevens over de doorlatendheid wordt voor de variatiecoëfficiënt de defaultwaarde 0,5 aangehouden (zie bijlage D en de WBI parameterlijst [6]).

Deze doorlatendhedenstochasten moeten in D-Soil Model worden ingevuld bij de betreffende grondmaterialen van de betreffende grondlaag van het lokaal scenario (let op, D-Soil Model vraagt om m/s). In Riskeer wordt met de regel van Sellmeijer gerekend, gebaseerd op slechts één watervoerende grondlaag. Voor scenario's L5, L6 en L8 kunnen de gestapelde watervoerende lagen (SOS-eenheden) worden vervangen door één watervoerende laag, waarvoor de effectieve doorlatendheid moet worden ingevuld in plaats van de doorlatendheid van de betreffende watervoerende lagen. Het alternatief is om de verschillende lagen te laten staan, waarbij Riskeer een vaste variatiecoëfficiënt van 50% toepast. In D-Soil Model moeten alle watervoerende lagen bij de laageigenschappen ook worden "aangevinkt" als watervoerend (Is *aquifer*).

8.4.3 d_{70} zandpakket onder deklaag

De d_{70} van de zandlaag direct onder de deklaag is bepaald met de d_{70} van de betreffende SOS-eenheid in het SOS-segment waarin het dijkvak is gelegen (zie Tabel 8.3 of Bijlage G). In Tabel 8.3 worden per scenario meerdere d_{70} -waarden gegeven die bij verschillende dieptes horen. De te kiezen waarde van de d_{70} is de waarde die behoort bij een diepte direct onder de deklaag. In sommige gevallen kan een SOS-scenario op meerdere regels in de tabel voorkomen, omdat er gebruik is gemaakt van VNK2 gegevens. In dat geval kiest men uit de waarden van alle regels waar het SOS-scenario van toepassing is de waarde die behoort bij een diepte direct onder de deklaag.

De waarde voor de d_{70} is per lokale scenario's weergegeven in de Tabel 8.7.

Tabel 8.7 d_{70} van de zandlaag onder de deklaag voor de lokale scenario's.

Lokaal scenario	d_{70} [μm]
L1	310
L2	310
L3	310
L4	310
L5	310
L6	310
L7	310
L8	310

De d_{70} moet eveneens als stochast worden ingevuld. Bij gebrek aan gedetailleerde gegevens over de d_{70} wordt voor de variatiecoëfficiënt de defaultwaarde 0,12 aangehouden (zie bijlage D en de WBI parameterlijst [6]). Mochten er wel (meet)gegevens beschikbaar zijn voor de d_{70} in de zandlaag direct onder de deklaag, dan kan het gemiddelde en de variatiecoëfficiënt van de d_{70} uit de meetgegevens worden bepaald.

Deze waarden voor d_{70} moeten in D-Soil Model worden ingevuld bij de betreffende grondmaterialen van de betreffende grondlaag van het lokaal scenario.

8.4.4 *Verzadigd gewicht van de deklaag*

Het bepalen van de het verzadigd gewicht van de deklaag zal hier niet nader behandeld worden. Er wordt alleen opgemerkt dat Riskeer niet met een deklaag overweg kan die uit meerdere grondlagen bestaat met verschillende verzadigde gewichten. De gebruiker kan in D-Soil Model de verschillende grondlagen in de deklaag vervangen door één grondlaag met de gewogen waarde voor het verzadigd gewicht in de deklaag. Een andere optie is voor de verschillende grondlagen in de deklaag dezelfde gewogen waarde voor het verzadigd gewicht van de deklaag in te vullen.

8.5 Schematisering dwarsprofielen

8.5.1 *Dijkvakindeling*

Op basis van de ondergrondschematisering wordt een eerste aanzet voor een dijkvakindeling gegeven voor het beschouwde traject. In het beschouwde traject zijn meerdere segmenten aanwezig; dit vormt de minimale indeling. Het is mogelijk om de segmenten onder te verdelen in kleinere vakken, wanneer de lokaal aangetroffen variatie daar aanleiding toe geeft. In het huidige voorbeeld is dit niet het geval. Wanneer nadere beschouwing van de ondergrondgegevens aangeeft dat een ongunstig scenario met zekerheid wordt aangetroffen langs een gedeelte van het segment kan hier een afzonderlijk vak voor worden ingericht, waarbij een hoge kans van voorkomen aan het betreffende scenario wordt toegekend.

Nadat de vakindeling op basis van de ondergrond is vastgesteld, wordt aan de hand van andere parameters bekeken of verfijning in de vakindeling nodig is op basis van lokale informatie. Hierbij kan gekeken worden naar vrijwel alle parameters die bij de schematisering aan de orde komen: intredepunt, uittredepunt, buitenwaterstand en dempingsfactor. In Figuur 8.5 is te zien dat binnen het gehele beschouwde segment een sloot aan de buitendijkse zijde op vaste afstand aanwezig is, waardoor geen extra vak benodigd is m.b.t. deze parameter. Aan de binnendijkse zijde zijn enkele greppels te zien, maar deze zijn niet specifiek voor een gedeelte van het segment en staan droog. Er is geen grote variatie in binnendijkse waterstand of buitendijkse waterstand voor het beschouwde traject. Er is in dit voorbeeld daarom geen nadere opsplitsing van het dijkvak benodigd.

Voor elk dijkvak wordt een representatief profiel gekozen: dit betreft het meest ongunstige profiel in het vak. In het voorbeeld is gekozen voor een dwarsprofiel met een buitendijkse sloot en een greppel aan de achterkant: bij deze situatie is op het eerste gezicht sprake van de

grootste kans op opbarsten en de kortste kwelweglengte. Nadere bestudering van de parameters kan overigens nog tot verfijning van de vakindeling en van het representatieve dwarsprofiel leiden. De dijkvakindeling, ondergrondsegmenten met bijbehorende scenario's en representatieve dijkprofielen worden ingelezen in Riskeer, waarna per dwarsprofiel de navolgende parameters kunnen worden ingevoerd in Riskeer.

8.5.2 *Buitenwaterstand en waterstandsverloop*

De aan te houden buitenwaterstand kan worden berekend in Riskeer met de norm die in het tracé van toepassing is. Er wordt geen rekening gehouden met het waterstandsverloop, omdat het dijktracé zich bevindt in een typisch rivierengebied met lange hoogwaterduren waarbij de tijdsafhankelijkheid geen rol speelt.

In Riskeer wordt op basis van de norm een toetspeil berekend voor elk randvoorwaardenpunt langs het traject. De variatie in berekende toetspeilen kan aanleiding zijn tot nadere opsplitsing van de vakindeling. In het beschouwde segment is de variatie beperkt: NAP +8,95 – 9,0 m. Het randvoorwaardenpunt met de laagste waarde binnen het dijkvak wordt gekoppeld aan de berekeningen.

8.5.3 *De binnendijkse waterstand*

Vanwege de hoge doorlatendheid van de ondergrond in het gebied wordt aangenomen dat de binnendijkse waterstand bij hoogwater gelijk is aan het binnendijkse maaiveld ter plaatse van het uittredepunt, te weten NAP +5 m voor scenario L1 t/m L6 en NAP +4,5 m voor scenario L7 en L8. Er zijn enkele greppels binnendijks, maar deze staan droog.

8.5.4 *Dempingsfactor*

De dempingsfactor representeert de afname van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket ten gevolge van lek door het slappelagenpakket. Voor het beschouwde voorbeeld zijn geen peilbuismetingen beschikbaar, waardoor met behulp van analytische formules een schatting verkregen zou kunnen worden. De deklaag is echter dusdanig dun voor de scenario's L1 t/m L6 dat verlagings van de dempingsfactor in het voorbeeld niet tot significante verhoging van de opbarstveiligheid leidt. In Riskeer kan de dempingsfactor eenvoudig gevarieerd worden om te zien wat het effect ervan is, en of het zinvol is om deze factor nader te bepalen voor scenario L7 en L8. Uit een korte berekening blijkt dat het effect van variatie op de veiligheidsfactor gering is. Gezien de relatief korte afstand achter de dijk waar het eerste opbarstpunt gelegen is, lijkt het voor deze case niet zinvol om de factor nader te bepalen.

Een veilige aanname is dat dempingsfactor een waarde gelijk aan 1 heeft en dat de buitenwaterstand de aan te houden stijghoogte is voor het bepalen van mogelijk opbarsten bij de binnentoe. Hoewel dit is een erg conservatieve aanname is, omdat er altijd een bepaalde demping, bijvoorbeeld als gevolg van intredeweerstand in de rivierbodem aanwezig is, blijkt enige verlaging van de dempingsfactor in dit gebied niet tot significante verhoging van de opbarstveiligheid te leiden.

8.5.5 *Intredepunt*

Voor elk scenario wordt het intredepunt bepaald, wat zowel afhankelijk is van het gekozen profiel als het ondergrondscenario. In het voorbeeld ligt er een buitendijkse sloot op een afstand van ca. 6 m uit de buitentoe van de dijk met een bodem op ongeveer NAP +4 m. Het eerste watervoerende pakket ligt op een diepte van ongeveer NAP +3 tot 3,5 m voor de meeste scenario's, met uitzondering van scenario L7 en L8, waar het slappelagenpakket aanzienlijk dikker is. Door de geringe dikte van het slappelagenpakket kan voor scenario L1 t/m L6 worden aangenomen dat de sloot zeer waarschijnlijk over enige lengte contact maakt met het zandpakket (zoals beschreven in paragraaf 7.2.1 van deze handleiding), waardoor hier het intredepunt wordt gekozen. Het is mogelijk dat de sloot zodanig is aangelegd dat er geen hydraulische kortsluiting bestaat bij hoogwater tussen het buitenwater en het zandpakket. Nader terreinonderzoek kan daarover uitsluitsel geven. In het geval de slootbodem voldoende afdekking van het zandpakket heeft kan er voor alle scenario's meer voorland in rekening

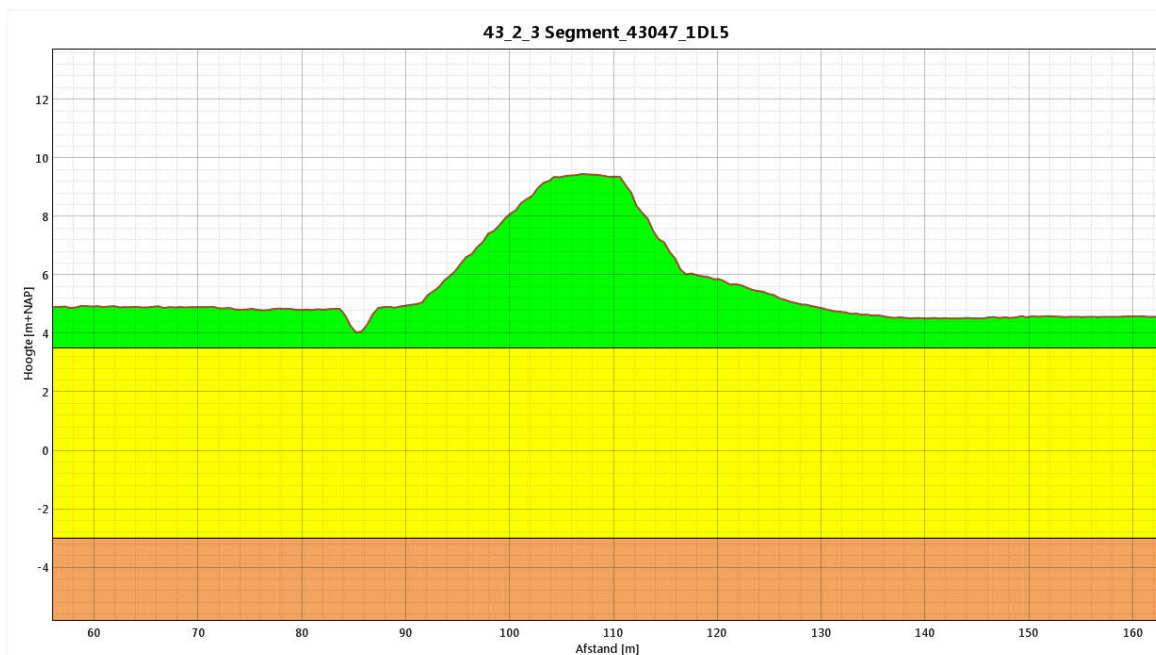
worden gebracht. Het fictieve intredepunt wordt bepaald op basis van de doorlatendheid van de deklaag en de eerste zandlaag kan worden berekend volgens bijlage E.

In de bronbestanden van Figuur 8.4 en Figuur 8.5 is te zien dat het voorland in het beschouwde tracé minimaal 100 m lang is. De verticale doorlatendheid van de deklaag $k1_v$ kan voor scenario L1 t/m L6 geschat worden op $3E-5$ m/s, aangezien deze dun en zandig is en waarschijnlijk omgeploegd. De deklaag in scenario L7 en L8 is dikker: hier wordt de doorlatendheid in eerste instantie ook geschat op $3E-5$ m/s, omdat de verwachting is dat de veenlagen niet continu zijn. Hierdoor levert de aanwezige veenlaag geen positieve bijdrage op de verticale doorlatendheid. De fictieve lengte is daarnaast afhankelijk van de dikte en (equivalente) doorlatendheid van het watervoerend pakket, welke varieert voor de verschillende scenario's. Op basis van de gemiddelde maaiveldhoogte van het voorland, ca. NAP +5 m wordt de dikte van de deklaag in het voorland geschat. In Tabel 8.8 zijn de berekende fictieve lengtes voor elk van de scenario's weergegeven. Uit deze tabel volgt dat voor scenario L1 t/m L4 het niet zinvol is om extra voorland in rekening te brengen, omdat de teensloot buitendijks op vrijwel dezelfde afstand ligt als het opnieuw berekende intredepunt.

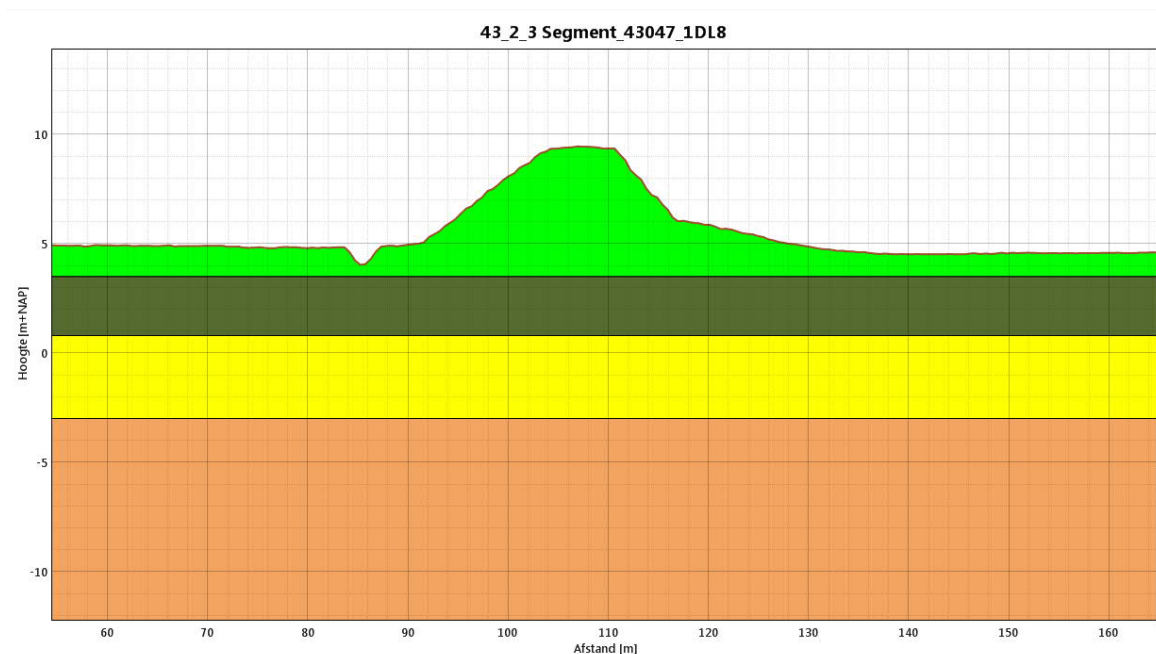
In scenario L6 t/m L8 is sprake van een gefundeerd zandpakket, waardoor er meer voorland meegenomen kan worden. Hierbij moet wel gekeken worden naar de maximaal toelaatbare kwelweglengte, omdat de pipe nooit verder mag groeien dan de buitenteen van de dijk tenzij aanvullende checks worden uitgevoerd (zie bijlage E), en onder kritische omstandigheden groeit de pipe tot maximaal de helft van de totale kwelweglengte. Aangezien de buitenteen op $x = 91$ m ligt en het opbarstpunt voor scenario L7 en L8 (zoals beschreven in navolgende paragraaf) op $x = 136$ m, is de afstand tussen buitenteen en uittredepunt 45 m, en mag de kwelweglengte niet groter zijn dan 90 m. Het intredepunt mag dus niet verder buitendijks van de dijkteen liggen dan $x = 46$ m. Op basis van de fictieve punten liggen de intredepunten voor L7 en L8 verder weg, waardoor voor deze scenario's het maximum intredepunt van $x = 46$ m wordt aangehouden.

Tabel 8.8 Voorland berekening

	Eenh.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
L1	m	100	100	100	100	100	100	100	100
k	m/s	1,74E-04	1,74E-04	1,74E-04	1,74E-04	5,85E-04	5,85E-04	6,11E-04	6,12E-04
D	m	2,5	2	5,5	5	43,5	43,5	37,8	40,8
mv	m tov NAP	5	5	5	5	5	5	5	5
top aquif	m tov NAP	3,5	2	3,5	3	3,5	3	0,8	0,8
d1	m	1,5	3	1,5	2	1,5	2	4,2	4,2
$k1_v$	m/s	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05	3,00E-05
labda1	m	4,66369	5,899152	6,917369	7,615773	35,66861	41,18657	56,87098	59,13145
fictieve L	m	4,7	5,9	6,9	7,6	35,4	40,6	53,6	55,2



Figuur 8-12: Profiel van de dijk gecombineerd met ondergrondscenario L5



Figuur 8-13: Profiel van de dijk gecombineerd met ondergrondscenario L8

8.5.6

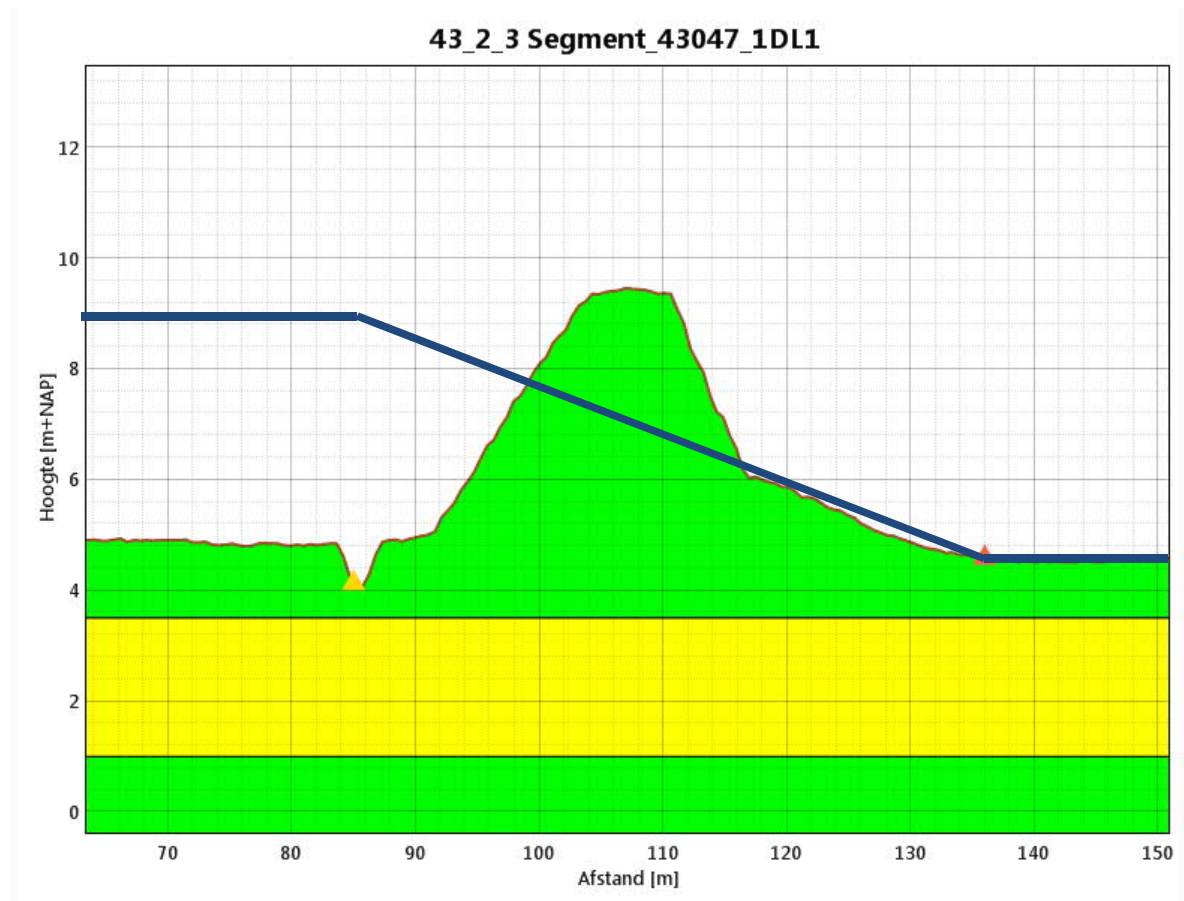
Uittredepunt

Omdat het uittredepunt afhankelijk is van zowel profiel als ondergrond, wordt deze voor ieder scenario bepaald. Het terrein achter de binnenteen van de dijk heeft geen eenduidig aan te wijzen zones of sloten waar opbarsten bij voorkeur zou optreden, dan wel zones of sloten waar vrije uitstroom van poriënwater, of uit een “pipe” optreedt bij hoogwater.

Het uittredepunt wordt bepaald door de locatie waar opbarsten zal kunnen optreden. De deklaag bestaat uit zandige klei en klei met een hoge volumieke massa, waarvoor een waarde van 14 kN/m³ wordt vastgesteld. In de scenario's L7 en L8 is een dikkere deklaag aanwezig, doordat er

een veenlaag direct onder de zandige klei ligt. Aan deze veenlaag is een volumieke massa van 13 kN/m^3 toegekend.

Om te bepalen waar opbarsten kan optreden wordt eerst het laagste punt in het profiel bekeken. In het voorbeeld ligt dit punt op $x=136 \text{ m}$, bij een maaiveldhoogte van $\text{NAP}+4,5 \text{ m}$. Dit is het punt waar bij het toenemen van het hoogwater als eerst opbarsten kan optreden. Wanneer dit punt inderdaad opbarst bij de beschouwde omstandigheden (afhankelijk van binnenwaterstand en dempingsfactor), moet gecontroleerd worden of er vervolgens opbarsten op kan treden op een tweede locatie dichtbij de dijk, gegeven de afstroming van water door de eerste opbarstlocatie. Het stijghoogteverloop in het watervoerend pakket kan hierbij lineair worden verondersteld van intredepunt naar de eerste opbarstlocatie, zoals schematisch aangegeven in Figuur 8.14. Om vast te stellen of op een punt dichtbij de dijk ook nog opbarsten kan optreden, kan in Riskeer het uittreepunt dichtbij de dijk worden gezet, waarbij rekening gehouden wordt met de afstroming van water naar het eerste opbarstpunt door de dempingsfactor aan te passen op basis van het veronderstelde stijghoogteverloop.



Figuur 8-14: Lineair verondersteld verloop van de stijghoogtelijn in het zandpakket na opbarsten

In het voorbeeld, uitgewerkt voor scenario L1, welke representatief is voor scenario L1-L6, blijkt dat de opbarstveiligheid op $x = 136 \text{ m}$ 0,033 is. Na opbarsten is de dempingsfactor aangepast en is voor $x = 117 \text{ m}$ ($m_v = \text{NAP} + 6 \text{ m}$) en $x = 128 \text{ m}$ ($m_v = \text{NAP} + 5 \text{ m}$) de opbarstveiligheid bepaald. Hierbij wordt opgemerkt dat de aangepaste dempingsfactor afhankelijk is van het gekozen intredepunt, de buitenwaterstand en het maaiveldniveau (binnendijkse waterstand). Met de aangepaste dempingsfactor wordt gevonden dat er voor dit scenario - gegeven een eerste opbarstpunt op $x=136 \text{ m}$ - geen tweede opbarstpunt mogelijk is op $x=128 \text{ m}$ en $x=117$, waarvoor de veiligheidsfactoren respectievelijk 1,19 en 2.69 zijn. Aangezien deze factoren groter zijn dan 1 en er geen andere opbarstpunten gevonden worden dicht bij de dijk waarvoor de

opbarstveiligheid kleiner is dan 1, wordt het eerste opbarstpunt aangehouden. Het uittreepunt moet voor deze scenario's dus gekozen worden op $x=136$ m.

Bij scenario L7 en L8 is er een dikkere deklaag aanwezig. Voor dit scenario is daarom ook gekeken waar het uittredepunt ligt op basis van de opbarstberekening. Ook bij dit scenario wordt op basis van het profiel een eerste opbarstberekening gemaakt voor $x = 136$ m. De opbarstveiligheid blijkt 0,15 te zijn, waardoor dit als eerste opbarstpunt wordt gekozen. Rekening houdend met de lagere stijghoogte door afstroming van water blijkt er op punten dichterbij de dijk geen opbarsten meer te kunnen optreden, waardoor voor deze scenario's het uittredepunt gekozen wordt op $x = 136$ m.

Na de bepaling van het uittredepunt wordt ten behoeve van de pipingberekening de dempingsfactor weer op de oorspronkelijke waarde gezet.

8.5.7 *Kwelweglengte*

De kwelweglengte is gedefinieerd als de afstand tussen het intredepunt en het uittredepunt. Dit verschil wordt na correctie voor de standaardafwijking in Riskeer als rekenwaarde weergegeven op basis van het ingevoerde in- en uittredepunt. Het is daarmee geen parameter meer die geschematiseerd wordt. Wel kan op basis van de verkregen kwelweglengte uit Riskeer een vergelijking worden gemaakt tussen profielen, wanneer er twijfel bestaat over welk profiel maatgevend is.

Voor het hier weergegeven voorbeeld verschillen de in- en uittredepunten voor de verschillende lokale scenario's, waardoor ook met verschillende kwelweglengtes wordt gerekend.

8.6 Aanbeveling aanvullend grondonderzoek

Afhankelijk van de invloed van de schematisering voor piping op de resultaten van de beoordeling kan overwogen worden aanvullend grondonderzoek uit te voeren. Dat onderzoek zou zich kunnen richten op (i) nader vaststellen van de ligging van de dikke slecht doorlatende laag, aangezien de aanwezigheid daarvan het mogelijk optreden van piping kan beperken in het dijkvak en op (ii) zekerheid over de dikte van de deklaag in het voorland en (iii) zekerheid over de horizontale verbreiding van de ondiepe zandlagen in zowel buitendijkse als binnendijkse richting.

In verband met de mogelijke deklaagdikte bij de sloot voor de buitenteen van de dijk kan nader terreinonderzoek voor lokaal scenario L7 tot een grotere kwelweglengte leiden dan de 4,5 m die op voorhand moet worden aangenomen. In lokaal scenario L7 is immers de verwachting dat er een grotere deklaagdikte bij de sloot aanwezig is, wat positief kan zijn voor de kwelweglengte. Deze kon in het voorbeeld niet in rekening worden gebracht, omdat deze in het lokaal grondonderzoek niet is onderzocht en daarmee ook niet kan worden aangetoond.

Verantwoording

Deze *Schematiseringshandleiding piping* is in opdracht van Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving opgesteld door Deltares. Dit document is als onderdeel van het WBI 2017 besproken met keringbeheerders in de WBI-coördinatiegroep en beoordeeld door de ENW Voorbereidingsgroep WBI 2017.

Schrijver:

U. Förster (Deltares).
G. van den Ham (Deltares)
H.T.J. de Bruijn (Deltares).
G.A.M. Kruse (Deltares).
M.P. Hijma (Deltares).
L.M. Vonhögen-Peeters (Deltares).

Regie 2016:

J. van der Hammen (RWS).
K.S. Lam (Deltares).
M.M. de Visser (Arcadis).

Review:

J.E.J. Blinde (Deltares).
J.J. Heerema (RWS).
T. Viehöfer (RHDHV).
H. van Hemert (RWS).
B. van Meekeren (Antea)
M. Bottema (RWS).

Eindredactie 2017:

R. 't Hart (Deltares).
A. Bizzarri (RWS).
M. Hazelhoff (RWS).

Eindredactie 2019

E. Plomp – van der Sar (RWS).

Eindcontrole 2019:

E. Plomp – van der Sar (RWS).
D. de Bake (RWS).
R.M. Slomp (RWS).

Eindredactie 2021:

M. Postma (RWS).
H. van Hemert (RWS).
I. Hergaarden (RHDHV)
U. Förster (Deltares).

A Literatuur

- [1] *Atlas of sedimentary structures in estuarine and tidally-influenced river deposits of the Rhine-Meuse-Scheldt system. Atlas of sedimentary structures in estuarine and tidally influenced river deposits of the Rhine Meuse Scheldt system their application to the interpretation of analogous outcrop and subsurface depositional systems.* A.W. Martinus, J. van den Berg. EAGE Publications. Houten, 2012.
- [2] *Fenomenologische beschrijving, faalmechanismen WBI.* Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [3] *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop, Versie 2.0.* A. Ansink, R. Kamp, C.M.P. Geerse. HKV, Rapport PR2803.10. Lelystad, mei 2014.
- [4] *Globale stochastische ondergrondschematisatieschematisering (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen.* M.P. Hijma, K.S. Lam. Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006. Delft, september 2015.
- [5] *Handleiding beplanting op en nabij primaire waterkeringen* STOWA 2000-06. ISBN 90.5773.086.3. Stichting Onderzoek Toegepast Waterbeheer, Utrecht, 2000.
- [6] *Handleiding datamanagement WBI.* Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- [7] *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS.* G. Kruse, M. Hijma. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015.
- [8] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 bovenrivierengebied.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, zie www.enwininfo.nl, ISBN 90-12-05169-X. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage, september 1985.
- [9] *MRST 2011: The MATLAB Reservoir Simulation Toolbox, version 2011a (2011).* URL <http://www.sintef.no/MRST/>
- [10] *NEN 9997-1+C1:2012 nl, Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels.* Nederlands Normalisatie Instituut. Delft, april 2012.
- [11] *On reducing piping uncertainties: a bayesian decision approach.* T. Schweckendiek. PhD. thesis Delft University of Technology. Delft, 271 pp. 2014.
- [12] *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.* U. Förster, G. van den Ham, E.O.F. Calle, G.A.M. Kruse. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002 in opdracht van RWS Waterdienst. Delft, Maart 2012.
- [13] *Rapportage bepaling ondergrondparameters piping VNK2.* Deltares rapport 1203622-000 voor VNK2, 37 pp. Delft, 2012.
- [14] *Relationship between sedimentary features and permeability at different scales in the Brussels Sands.* M. Possemiers, M. Huysmans, L. Peeters, O. Batelaan and A. Dassargues. *Geologica Belgica*, 15(3), 156-164. 2012.
- [15] *SBW Piping - Hervalidatie piping. HP1 Ontwikkeling nieuwe rekenregel - HP1.2 Uitbreiding en aanpassing van de pipingregel.* J. Knoeff, J. Lopez de la Cruz, J.B. Sellmeijer, S. Luijendijk, V.M. van Beek, Deltares-rapport 1200187-015-GEO-0004. Delft, 2009.

- [16] *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*, Expertise Netwerk Waterveiligheid. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, Lelystad, oktober 2012.
- [17] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS-DWW, ISBN 90-369-3776-0, zie www.enwininfo.nl. Delft, juni 2001.
- [18] *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, ISBN-90-369-5565-3, zie www.enwininfo.nl. Delft, september 2004.
- [19] *The Impact of Primary Sedimentary Structures on Groundwater Flow: A multi-scale sedimentological and hydrogeological study in unconsolidated eolian dune deposits*. E.H. van den Berg. PhD thesis, Free Un., Amsterdam, 186 pp., 2003.
- [20] *The Weakest Link - Length Effects for Piping*. W. Kanning, PhD thesis, 235 pp. Delft University of Technology, Delft, 2012.
- [21] *Van ruwe data tot overstromingsrisico*. VNK2, maart 2013.
- [22] *Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte*. J. Lambert. Deltares* notitie 1220088-003-VEB-0007-v2. Delft, 2015.
- [23] *Scherper toetsen voor piping bij dijken WBI 2017 versie 2*. J.J. Heerema. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, april 2016.
- [24] *WBI-Onzekerheden Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium Versie 3*. F. Diermanse. Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004. 132 pp. Delft. Aug 2016.
- [25] *Handreiking Voorland*. POV Voorlanden. April 2019
- [26] *Engineering and Design, Design and Construction of Levees* (Engineer Manual EM 1110-2-1913) U.S. Army Corps of Engineers (2000).
- [27] *SBW Piping 6C Invloed van damping van de belasting bij piping*. Deltares rapport 1206013-002-GEO-0001. Delft. December 2012.
- [28] *Factsheet D-Geo Flow, Voor toets op maat pipinganalyses*. Deltares notitie 11205758-037-GEO-0001, medeauteurs: Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en HWBP voor sterkte dijken. Delft. 25 mei 2020.
- [29] *KvK Piping 2018-2019: toepassing ontwikkelde kennis, Overzicht kennisontwikkeling KvK 2018-2019 voor beheerders en ontwerpers*. Deltares rapport 11205262-022-GEO-0001. Delft. 21-07-2020.

B Memo Optreden van piping in getijdenafzettingen

Deze memo is opgesteld als bijlage voor RWS WVL, Scherper toetsen voor piping bij dijken WBI2017, Informatie t.b.v. ENW-Vorbereidingsgroep april 2016 [24].

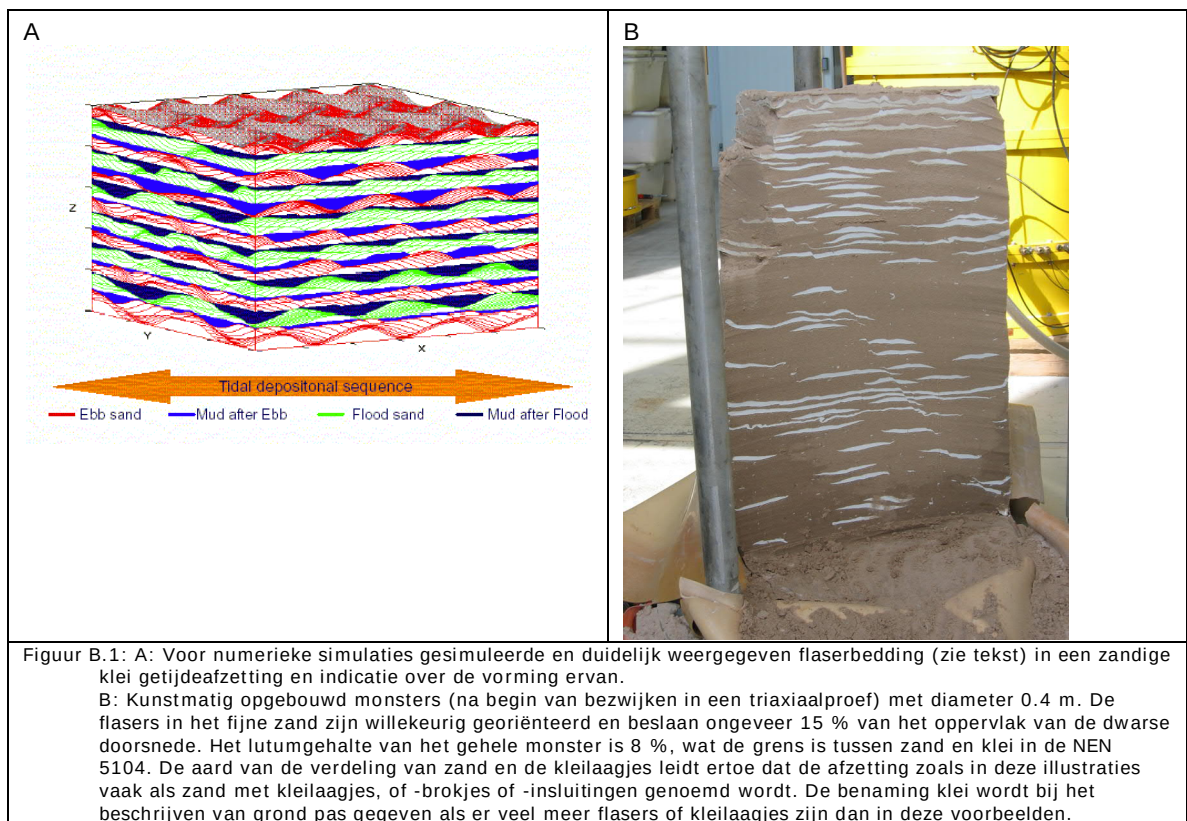
B.1.1 *Algemeen*

De in WTI 2017 opgenomen regel van Sellmeijer voor het vaststellen van de kans op piping is niet gevalideerd voor getijdenafzettingen. Deze afzettingen wordt gekarakteriseerd door het veelvuldig voorkomen van kleilaagjes die van invloed zullen zijn op de pipinggevoeligheid. In deze notitie wordt ingegaan op de aard van het zand in getijdenafzettingen en op de invloed van de ruimtelijke verdeling van klei in zulke afzettingen op de kans op piping. Er wordt op basis van een aantal argumenten een aanzet gegeven voor het vaststellen van getijdenafzettingen waarin het optreden van piping niet waarschijnlijk is. Op basis van deze indeling worden de WTI-SOS getijdeneenheden benoemd die niet piping-gevoelig zijn. Hieronder worden eerst de karakteristieken van getijdenafzettingen beschreven, gevolgd door een discussie van het mogelijk optreden van piping in getijdenafzettingen en afgeleide WTI-SOS eenheden.

B.1.2 *Karakteristieken van getijdenafzettingen met kleilaagjes in Nederland*

Getijdenafzettingen worden gevormd in gebieden waar de sedimentatie wordt gedomineerd door getijdenwerking en waar de invloed van golfwerking op de samenstelling van de afzetting beperkt is. Getijdengebieden worden gekenmerkt door een regelmatige afwisseling, meest dubbeldaags, van perioden van meer en minder stroming en aanvoer van sediment. Dit leidt in intergetijdengebieden tot periodiek droogvallen en een regelmatig afwisseling van de intensiteit van golfwerking. Rondom de getijdenkenteringen neemt de stroomsnelheid sterk af en kunnen de fijnere deeltjes uit de waterkolom ook afgezet worden.

In sommigen gevallen zijn de zeer fijne deeltjes homogeen verdeeld door de getijdenafzettingen als gevolg van een relatief hoog gehalte aan fijne deeltjes in het water. In de meeste gevallen komen de zeer fijne deeltjes echter geconcentreerd voor op en direct rond de grensvlakken die het gevolg zijn van de regelmatige onderbreking van transport en afzetten van zanddeeltjes. Dit kan leiden tot goed herkenbare kleilagen en –laagjes, maar ook tot slechts een hoger gehalte aan zeer fijne deeltjes direct rond het vlak. In zandige getijdenafzettingen zijn de kleilaagjes vaak dun (0.3 - 2 cm) en smal (0.1 – 0.2 m) en komen ze voor in sub horizontale pakketten van ten minste enige meters lengte. Ze kunnen ook als golvend gevormde laagjes aanwezig zijn over een groter oppervlak. Vanwege de vorm van de stroken in dwarsdoorsnede worden deze kleilaagjes vaak “flasers” genoemd en de afzetting met de golfvormige kleilaagjes “wavy bedding”. Figuur B.1 geeft voorbeelden van flasers in fijn zand en wel een weergave van ten behoeve van numerieke simulaties gesimuleerde flasers respectievelijk van random georiënteerde flasers in een kunstmatig opgebouwd. In getijdenafzettingen komen vaak bundels en ander concentraties van de stroken klei voor. Het aanwezige zand is in de meeste getijdenafzettingen fijn tot zeer fijn, zeker in de eerste meter onder het maaiveld, en soms matig grof op wat grotere diepte.



B.1.3

Piping in getijdenafzettingen

Vorming van tunneltjes in zand onder een dijk door is mogelijk volgens de benadering van Sellmeijer als er vrijliggende zandkorrels zijn bij het erosiefront van het tunneltje en de waterdrukgradiënten voldoende zijn voor opname en transport van de korrels door de tunnel. De stijghoogte verschillen over de dijk en directe omgeving moeten daarvoor voldoende hoog zijn, evenals de doorlatendheid van de grond onder de dijk en in de omgeving van het tunneltje. De tunneltjes groeien tegen de richting van de lokale poriewaterdrukgradiënt in en transport wordt bepaald door de gradiënt over grotere afstanden. De hoogte van de tunnels die mogelijk kunnen leiden tot piping is enige millimeters en de breedte ervan in de orde van 10 mm (zie ook Figuur B.2).



Figuur B.2 Spoor van een kleine tunnel (mm afmetingen), zoals waargenomen in het zand direct onder een kleiafdekking in een schaalproef. Het spoor van het tunneltje heeft dezelfde karakteristieken als in proeven met een laboratoriumopstelling (concentratie van korrels van zwaardere mineralen, verwilderend patroon, breedte van zo'n 10 mm). Deze sporen verdwenen en ontstonden direct onder de kleiafdekking bij kleine, centimeter schaal, onregelmatigheden in de basis van het kleidek.

Kleistrookjes en -laagjes in getijdenafzettingen kunnen de groei van tunneltjes van genoemde afmetingen hinderen en voorkomen, waarbij mogelijke effecten zijn:

- 1) De verticale en horizontale doorlatendheid van de afzettingen wordt door de kleistroken en overige lokale verhogingen van de fijne fractie beperkt. Lagere doorlatenheden leiden, onder overigens gelijkblijvende omstandigheden, tot hogere kritieke vervallen in de voor piping gehanteerde benadering.
- 2) De groei van tunneltjes wordt door barrière werking van kleilaagjes gehinderd en kan worden voorkomen.
- 3) mogelijk wordt de groei van tunneltjes beïnvloed door de invloed van de kleilaagjes op de lokale poriewaterdrukgradiënten.

Ten aanzien van de groei van tunneltjes is uit experimenten in laboratoriumopstellingen en terreinwaarnemingen gebleken dat een obstakel van geringe afmetingen de groei van tunneltjes onder de afdeklaag sterk hindert. Een obstakel, richeltje, onder de ondoorlatende bovenlaag met een dikte van 10 mm was in laboratoriumexperimenten voldoende om groei van een tunnel onder die laag voor realistische omstandigheden effectief te verhinderen (*Deltares 2008: ABW Piping kunstwerken: Factual reports laboratoriumexperimenten. Deltares rapport 433383-022, 19 pp.*). Met een kleilaagje van 0.125 m dik (en breed) ontstond er ook bij een verhang van bijna 1:1 in een laboratoriumopstelling geen doorgaande tunnel, terwijl zonder dat kleilaagje er bij een verhang van minder dan 1:2 wel een tunnel werd gevormd (*Deltares 2007: SBW Hervalidatie Piping: Inventarisatie COW proeven. Deltares rapport 427070-0036 voor RWS, Delft, 77 pp.*). De foto in Figuur B.2 betreft één van de sporen van tunneltjes die zijn waargenomen in het zand onder een kleiafdekking in een schaalproef (IJKdijkproef). Dergelijke tunneltjes begonnen en eindigden bij kleine, centimeterhoge onregelmatigheden van het zand-klei contact. In natuurlijke afzettingen moeten eventuele erosietunnels lateraal om dergelijke

obstakels heen groeien om tot piping te kunnen leiden. In getijdenafzettingen leidt dat tot een bijna altijd aanzienlijke verlenging van de tunnel. In getijdenafzettingen moet een tunneltje een omweg van gemiddeld ten minste enige meters maken voor het overbruggen van een afstand van 0.1 tot zo'n 0.5 m voor elke kleistrook die tegen de richting van het verval over de dijk in het pad van de tunnel ligt. In het geval een kleistrook een over reeds zeer korte afstand, convexe ligging in richting van het verval heeft, kan de tunnel niet verder groeien.

In afzettingen met een concentratie van kleistroken zoals in het voorbeeld in Figuur B.1B, is in de kwelweg (van het uittreepunt aan de binnenzijde van de waterkering naar het intreepunt aan de buitenzijde) om de ca. 0.1 à 0.4 m een kleistrook aanwezig, die de vorming van een erosietunnel hindert. Het wordt daarom onwaarschijnlijk geacht dat zich in zulke getijdenafzettingen een volledige erosietunnel kan ontwikkelen.

Het voorbeeld in de Figuur B.1B betreft grond met een lutumgehalte op de grens van zand en klei. De grond in dit voorbeeld wordt doorgaans niet aangeduid als klei, zoals volgens de NEN 5104, maar als fijn zand met kleilaagjes. Waar beschrijvingen van eenheden in getijdenafzettingen in boorstaten melding maken van klei is daarom bijna altijd de concentratie van kleistroken en -laagjes aanmerkelijk hoger dan in de voorbeelden in Figuur B.1.

Getijdenafzettingen die als zand zijn aangeduid bevatten daarom regelmatig ten minste de concentratie kleistrookjes als in het voorbeeld Figuur B.1B. Dit geldt ook voor de WTI-SOS getijdeneenheden, aangezien de naamgeving van de eenheden geënt is op de naamgeving in de boorstaten. WTI-SOS eenheden van getijdenafzettingen worden daarom eveneens vaak als zand aangeduid, ook eenheden met een hogere concentratie kleistroken dan in de Figuur B.1B.

Voor eenheden van getijdenafzettingen die als klei vermeld staan in de boorstaten kan op grond van bovenstaande gesteld worden dat er geen doorgaande tunnels gevormd kunnen worden. Ook in eenheden van getijdenafzettingen die zand met kleilaagjes, of gewoon kleilig zand genoemd worden in boorstaten, zal de vorming van doorgaande tunnels in veel gevallen verhinderd kunnen worden. De concentratie en ruimtelijke ligging en verdeling van kleistroken in zand is echter zodanig variabel dat niet zonder meer aangegeven kan worden in welke gevallen de vorming van een doorgaande tunnel meer of minder verhinderd zal worden.

Er is voorzover is na te gaan geen dijkfalen door piping opgetreden in getijdenafzettingen, in Nederland dan wel elders. De dijkdoorbraak bij Strijhenham (Tholen) in 1926 wordt wel toegeschreven aan piping, maar algemeen aangenomen wordt dat de pipe zich ontwikkelde in een met zand opgevulde rivierbedding. De exacte aard van de betrokken afzettingen bij Strijhenham is echter niet bekend. Er zijn wel enige meldingen van wellen door getijdenafzettingen en opbarsten van de bodem van sloten in getijdenzanden. Wellen betreffen zeer lokaal geconcentreerde verticaal omhoog gerichte stroming door een grondlaag. Er is geen oorzakelijk verband met de vorming van een tunnel onder die laag aangetoond. In een experiment in Noord-Holland zijn effecten van een voor piping significante polderpeilverlaging en van het doorgraven van een afsluitende laag in het boezemwater op de stijghoogte in getijdenafzettingen nagegaan. Er zijn geen tekenen van welvorming waargenomen (*Kwakman, L., M. Doeke Dam, & H. van Hemert 2013: Onderzoek naar hydraulische kortsluiting bij boezemkaden. Land + Water Nr 6, pp. 26-27*). Vorming van kleine wellen door zulke afzettingen is wel waargenomen bij graafwerkzaamheden. Figuur B.3 is een voorbeeld van een wel door klei en kleilig zand (getijdenafzettingen) op een locatie waar een zandpakket van een getijdengeul op minder dan 1 m beneden de bodem van de ontgraving voorkwam (er is op de locatie geen getij werking). Dergelijke waarnemingen zijn ook gemeld op Tholen waar wellen ontstonden bij graafwerkzaamheden tot meer dan 3 meter beneden maaiveld. Mogelijk ontstonden de wellen door getijdenafzettingen heen, maar het is ook mogelijk dat ze door rivierafzettingen ontstonden. In met name de westelijke delen van de Haarlemmermeerpolder is bij graafwerkzaamheden opbarsten van slootbodems geconstateerd in getijdenzand-afzettingen.

Het opbarsten betreft instabiliteit van de bodem als gevolg van een hoge stijghoogte in de directe ondergrond van de sloot.



Figuur B.3 Een wel (diameter van de conus 0.5 m) in een omgeving van getijdenafzettingen, ongeveer 8 m –NAP en 4 m beneden maaiveld en 1 m boven een getijdengeulafzetting.

Zoals in hoofdstuk 2 aangeven komen de kleilagen voor in sub horizontale (eventueel licht hellende) pakketten met horizontale afmetingen van enige tot tientallen meters. In verticale richting zijn de pakketten vaak een halve tot enige meters dik. Deze pakketten bestaan dus voornamelijk uit zand met daarin kleilaagjes. De lengte van het gehele te ondermijnen traject speelt daarom een rol in verband met de ruimtelijke variatie in de ondergrond. Een ondergrond van getijdenafzettingen direct onder en rond een dijk zal in veel gevallen een aanmerkelijke lokale variatie in concentratie en oriëntatie van kleistroken en kleilaagjes in de richting van de gradiënt van de stijghoogte over een dijk vertonen. De vorming van een doorgaande tunnel onder de dijk hangt af van het al dan niet voorkomen van eenheden in de getijdenafzettingen met een zodanige concentratie van kleistroken dat vorming zeker, of met grote waarschijnlijkheid wordt verhinderd. In hoofdstuk B.1.4 wordt ingegaan op de WTI-SOS eenheden die afzettingen beschrijven met regelmatig hoge concentraties aan kleistroken en – laagjes.

B.1.4

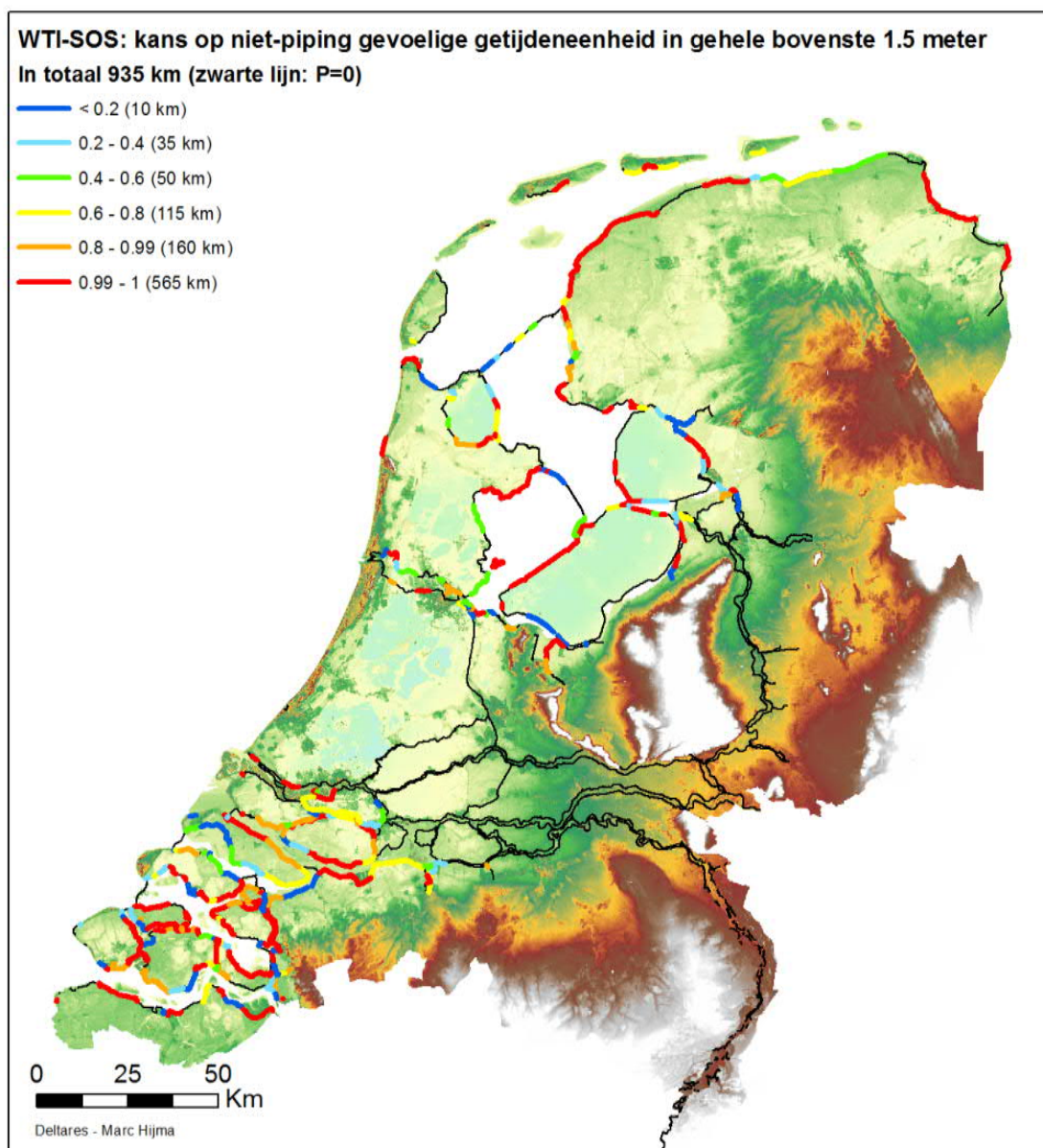
WTI-SOS eenheden waarin het ontstaan van piping vermoedelijk sterk wordt gehinderd

Met de criteria waarmee de WTI-SOS eenheden zijn gedefinieerd en zijn onderscheiden in sondeer- en boorstaten en overige informatie, kan het voorkomen van afzettingen met concentratie van kleilagen als in Figuur B.1 vastgesteld worden. Op basis van de argumentatie in hoofdstuk 3 wordt aangenomen dat het erg onwaarschijnlijk is dat zich een doorgaande tunnel met een lengte van meer dan enige tientallen meters kan vormen door de bovenkant van een pakket afzettingen met dergelijke concentraties aan kleilagen. Aangezien onderstaande WTI-SOS eenheden (Hijma en Lam, 2015) dergelijke concentraties bevatten, wordt voor nu gesteld dat het optreden van piping in deze eenheden daarom onwaarschijnlijk is:

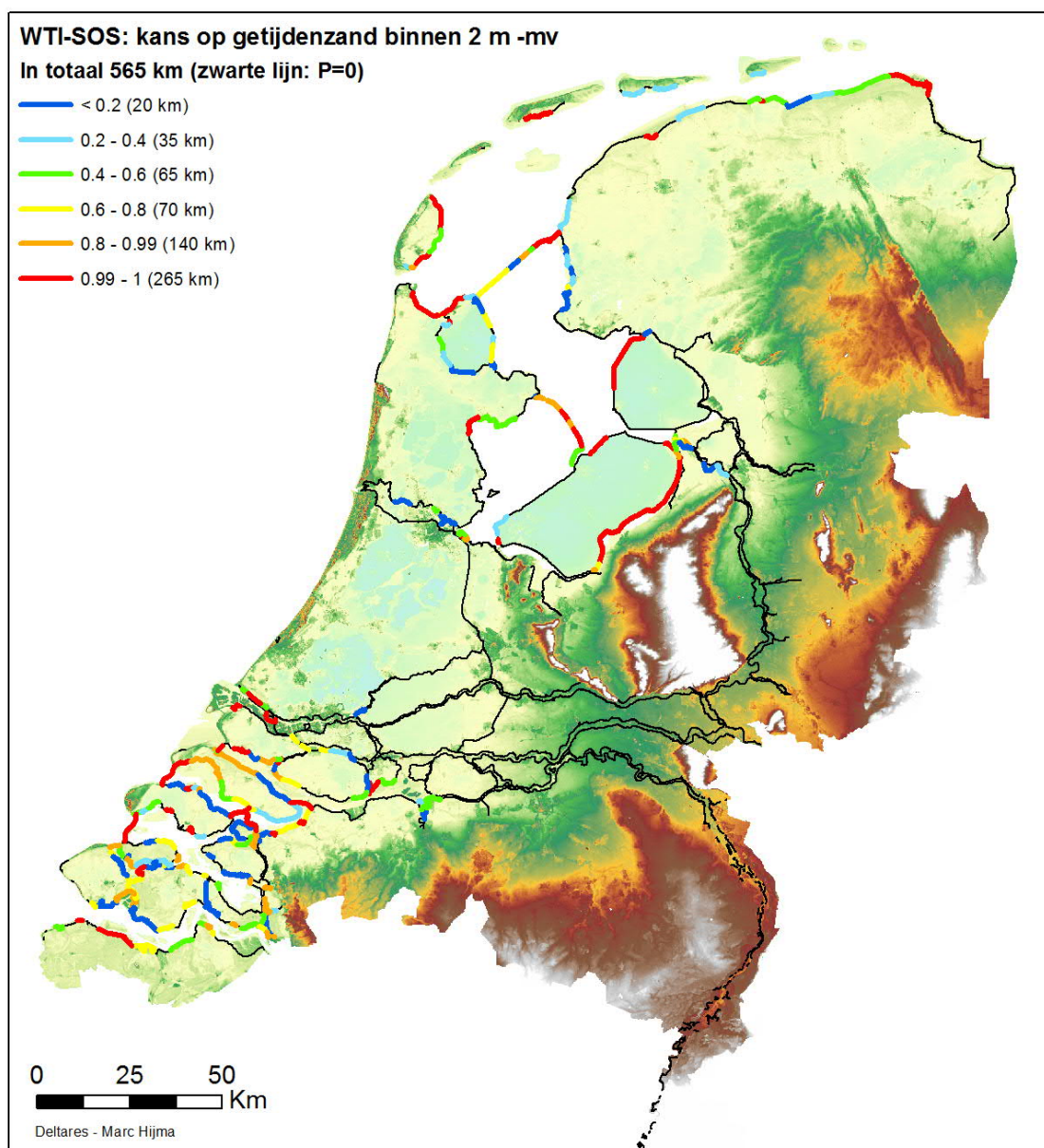
- Getijdenrestgeulopvulling, H_Mr_kz
- Afzettingen van kleine getijdenplaat- en kweldergeulen, H_Mkw_z&k
- Kleiige getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H_Mp_k
- Organisch materiaalrijke getijdenplaat- en kwelderafzettingen, H_Mp_ko

Opgemerkt wordt dat deze eenheden vaak de bovenste ten minste 1 tot 2 m van getijdenafzettingen domineren (Figuur B0.4). Deze eenheden kunnen in een ondergrond-schematisering als niet-watervoerende laag worden gemodelleerd. Wanneer de betreffende eenheid aan het oppervlak of direct onder klei en veenlagen ligt laag maakt de laag deel uit van de deklaag. In de overige WTI-SOS eenheden die getijdenafzettingen beschrijven kan dus wel piping optreden. Dit betreft de eenheden (Figuur B.5):

- Matig fijn tot zeer grof getijdengeulzand, H_Mg_zm
- Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand, H_Mg_zf
- Uiterst fijn tot matig fijn getijdengeulzand met dunne klei- en silt laagjes, H_Mg_zk
- Zandige getijdenplaatafzettingen, H_Mp_zf
- Matig fijn tot zeer grof estuarien getijdengeulzand, H_Eg_zm
- Uiterst fijn tot matig fijn estuarien getijdengeulzand, H_Eg_zf



Figuur B0.4 Locaties en kans van aantreffen waarbij de eerste anderhalve meter beneden maaiveld volledig bestaat uit één of een combinatie van de WTI-SOS eenheden H_Mr_kz, H_Mkw_z&k, H_Mp_k en H_Mp_ko. Deze eenheden zijn niet-pipinggevoelig.



Figuur B.5 Locaties en kansen van aantreffen van een pipinggevoelige WTI-SOS getijdeneenheid in de bovenste twee meter beneden maaiveld.

B.1.5

Conclusies

Bovenstaande argumenten rechtvaardigen de aanname dat in bepaalde getijdenafzettingen het optreden van tunnelerosie (conform het Sellmeijer model) ten minste sterk wordt gehinderd als gevolg van in die afzettingen aanwezige kleilaagjes. In hoofdstuk B.1.4 worden de WTI-SOS eenheden genoemd waarvoor dat van toepassing is. Er is momenteel echter onvoldoende experimenteel onderzoek uitgevoerd en er zijn geen evidente terreinwaarnemingen waarmee uitgesloten kan worden dat falen door piping door de genoemde getijdenafzettingen zal optreden. Een betere onderbouwing voor het al dan niet uitsluiten van zulk falen middels experimenteel en ander empirisch onderzoek wordt niet voor de korte termijn verwacht, maar

op termijn wordt zulk onderzoek wel noodzakelijk geacht. Niettemin wordt voorshands de kans dat zulk falen kan optreden erg klein geacht op basis van wel beschikbare experimenten en terreinwaarnemingen (de hierboven genoemde proeven op kleine schaal, de waarneming bij de veldproef, de praktijkproef bij een boezemkade in Noord-Holland en het ontbreken van meldingen van verschijnselen die wijzen op piping in gebieden met zulke afzettingen). Voor het WTI-2017 dient daarom een beslissing genomen te worden over het volgende dilemma:

De in het WTI voorgeschreven regel voor toetsing op piping (de –gemodificeerde- regel van Sellmeijer) is naar alle waarschijnlijkheid veel te conservatief voor piping in getijdenafzettingen met veel kleilagen. De beslissing om deze regel wel toe te passen bij dergelijke getijdenafzettingen zal leiden tot het vermoedelijk onterecht afkeuren van veel dijkstrekkingen. Het alternatief is dat er, op basis van de hierboven aangedragen argumenten, voorshands aangenomen wordt dat piping in dergelijke getijdenafzettingen niet op zal treden. Aangezien er voor die aanname thans onvoldoende onderbouwing bestaat, is niet uitgesloten dat de aanname leidt tot goedkeuringen, die later, op basis van nader onderzoek en analyse onterecht blijken te zijn. Naar de huidige inzichten wordt de kans op onterechte goedkeuring echter erg klein geacht.

De keuze voor acceptatie van onterechte afkeuringen enerzijds, of acceptatie van onterechte goedkeuringen anderzijds, kan in de gegeven omstandigheid alleen op basis van beleidsmatige afweging van effecten worden gebaseerd. Onterechte afkeuringen hebben als consequentie hoge kosten van ondoelmatige verbeteringsmaatregelen. Onterechte goedkeuringen leiden daarentegen wellicht tot onvoldoende veiligheid. Deze notitie geeft daarover geen uitsluitsel.

C Berekeningsmodellen

C.1 Berekeningsmodellen

In de volgende subparagrafen worden de berekeningsmodellen voor opbarsten (uplift), heave en terugschrijdende erosie in vorm van hun grenstoestandsfuncties beschreven.

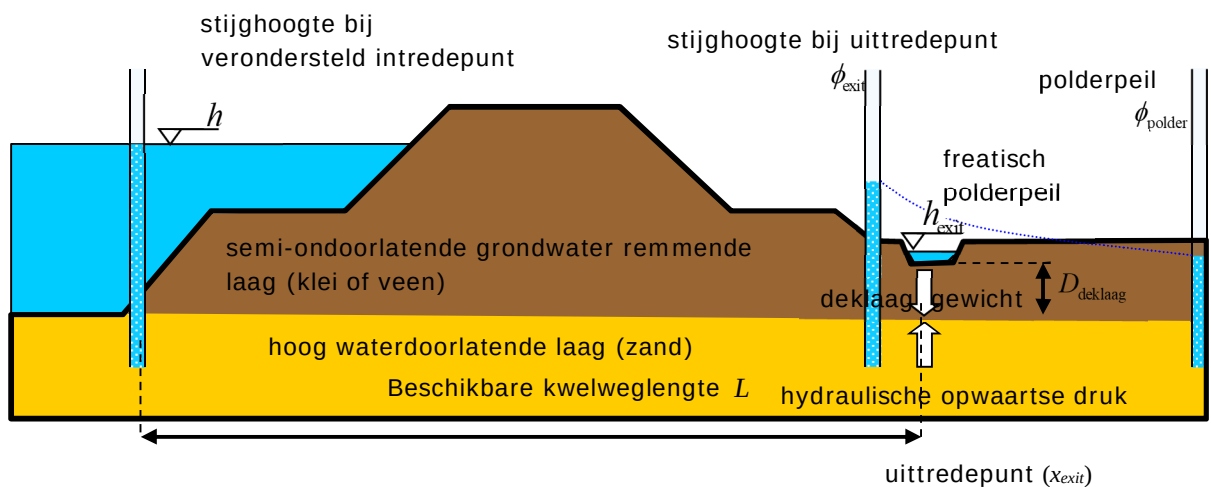
C.1.1 Stijghoogte

De beoordeling op opbarsten en heave vereist de bepaling van de stijghoogte in het watervoerende pakket bij het uittredepunt die als volgt is gedefinieerd:

$$\phi_{\text{exit}} = \phi_{\text{polder}} + r_{\text{exit}} (h - \phi_{\text{polder}}) \quad (1)$$

Waarin:

- h Niveau van de buitenwaterstand ten opzichte van NAP (verondersteld als stijghoogte bij intredepunt) [m].
- ϕ_{exit} Stijghoogte in de watervoerende laag bij het uittredepunt ten opzichte van NAP [m].
- ϕ_{polder} Stijghoogte in polder (stationaire toestand, randvoorwaarde aan rechterkant) [m].
- r_{exit} Dempingsfactor (over de afstand intredepunt – uittredepunt) [-].



Figuur C.1 Schematische dwarsdoorsnede dijk met de voor piping relevante parameters

Hoe de dempingsfactor wordt bepaald is binnen WBI 2017 bewust opengelaten, in principe kan dat via grondwaterstromingsanalyses (analytisch of numeriek, steady state of tijdsafhankelijk), monitoring (bv. peilbuizen) of expert judgement gebeuren. Aanwijzingen zijn gegeven door Lambert [22] en TR Waterspanningen bij dijken [18].

C.1.2 Opbarsten

De grenstoestandsfunctie voor opbarsten (uplift) (Z_u) is gebaseerd op een vergelijking van de naar beneden gerichte druk die door het gewicht van de deklaag wordt uitgeoefend (weerstand) en de naar boven gerichte waterdruk in de watervoerende zandlaag (belasting), hier uitgedrukt in vorm van een stijghoogteverschil⁷:

$$Z_u = \Delta\phi_{c,u} - (\phi_{\text{exit}} - h_{\text{exit}}) \quad (2)$$

⁷ Let op dat deze grenstoestandsfunctie equivalent is met een grenstoestandsfunctie uitgedrukt in totaalspanningen, de veiligheidsfactor verschilt alleen.

Waarin:

h_{exit} Het freatisch niveau, of hoogte maaiveld, bij het uittredepunt ten opzichte van NAP [m].
 $\Delta\phi_{c,u}$ Het kritieke stijghoogteverschil voor opbarsten, dat bepaald wordt door het effectieve gewicht van de deklaag onder water, zie vergelijking (3) [m].

$$\Delta\phi_{c,u} = \frac{D_{deklaag} (\gamma_{sat} - \gamma_{water})}{\gamma_{water}} \quad (3)$$

Waarin:

$D_{deklaag}$ Laagdikte van de deklaag [m].
 γ_{sat} Verzadigd volumegewicht van de cohesieve deklaag [kN/m³].
 γ_{water} Volumegewicht van water [kN/m³].

Let op, als de deklaag uit verschillende grondlagen bestaat, dan betreft het rechterlid van vergelijking (3) de sommatie over deze grondlagen.

C.1.3

Heave

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

$$Z_h = i_{c,h} - i = i_{c,h} - (\phi_{exit} - h_{exit}) / D_{deklaag} \quad (4)$$

Waarin:

$i_{c,h}$ Kritieke heave gradiënt [-].
 $D_{deklaag}$ Laagdikte van de deklaag [m].
 h_{exit} Freatisch waterstand bij uittredepunt [m].

C.1.4

Terugschrijdende erosie (volgens het aangepaste Sellmeijer model)

De grenstoestandsfunctie voor piping is een vergelijking van het kritieke verval H_c [m] (weerstand) en het daadwerkelijk aanwezige stijghoogteverschil

$$Z_p = m_p \Delta H_c - (h - h_{exit} - r_c D_{deklaag}) \quad (5)$$

met r_c als reductiefactor voor de weerstand in de deklaag bij de uittredepunt (op dit moment gebruikelijk $r_c = 0,3$) en de modelfactor m_p . Voor de beoordeling wordt het kritieke verval ΔH_c gebaseerd op het in 2011 aangepaste model van Sellmeijer, uitgedrukt in de verhouding van kritiek verval ΔH_c en kwelweglengte L [m], de dikte van het watervoerende pakket en andere eigenschappen van het zandpakket.

$$\frac{\Delta H_c}{L} = F_{resistance} F_{scale} F_{geometry} \quad (6)$$

Met:

$$F_{\text{resistance}} = \eta \frac{\gamma_{\text{sub,particles}}}{\gamma_{\text{water}}} \tan \theta$$

$$F_{\text{scale}} = \frac{d_{70,m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70,m}} \right)^{0,4}, \quad \kappa = \frac{\nu_{\text{water}}}{g} k$$

$$F_{\text{geometry}} = 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} + 0,04} \left(\frac{D}{L} \right)^{-1}$$

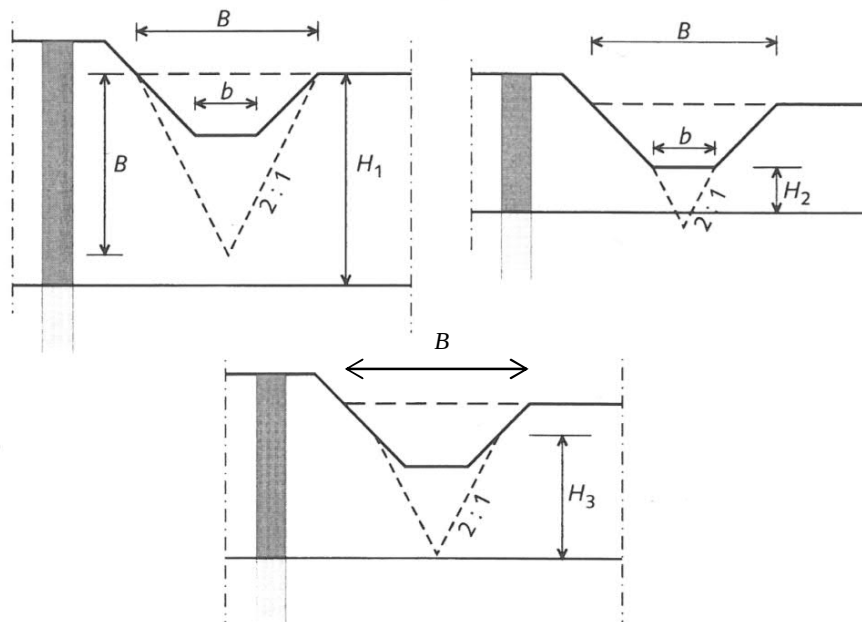
(7)

Waarin:

L	Kwelweglengte van in- tot uittredepunt: $L = x_{\text{exit}} - x_{\text{entry}}$ [m].
$\gamma_{\text{sub,particles}}$	Volumegewicht van zandkorrels onder water (= 16,5) [kN/m ³].
η	Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (= 0,25) [-].
d_{70}	70-percentielwaarde van de korrelverdeling van de piping-gevoelige laag [m].
κ	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m ²].
k	Darcy doorlatendheid [m/s].
ν	Kinematische viscositeit van water (voor grondwater van 10° Celsius: $1,33 \cdot 10^{-6}$) [m ² /s].
g	Zwaartekrachtversnelling (= 9,81) [m/s ²].
D	Dikte van de zandlaag [m].
$d_{70,m}$	Referentie d_{70} -waarde (= $2,08 \cdot 10^{-4}$) [m].
θ	Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel (= 37) [°].

C.2

Bepaling effectieve laagdikte voor opdrijven bij een sloot



Figuur C.2 Bepaling effectieve laagdikte d_{eff} voor opbarsten bij sloot

De hier beschreven werkwijze is geïmplementeerd in Riskeer.

De effectieve laagdikte d_{eff} voor opbarsten bij een sloot wordt als volgt bepaald:

- In het geval dat de breedte van de sloot op maaiveldniveau B [m] kleiner is dan de totale deklaagdikte buiten de sloot H_1 [m], en als de geometrie van de sloot binnen de driehoek valt die met de breedte van de sloot op maaiveldniveau de spanningsverspreiding

van 2:1 (verhouding verticaal : horizontaal) weergeeft, is de effectieve laagdikte d_{eff} gelijk aan de totale laagdikte: $B < H_1 \rightarrow d_{eff} = H_1$.

- b) Als de breedte van de slootbodem b [m] groter is dan de deklaagdikte in het midden van de sloot H_2 [m], dan dient de deklaagdikte in het midden van de sloot als effectieve laagdikte d_{eff} te worden gebruikt: $b > H_2 \rightarrow d_{eff} = H_2$.
- c) In alle andere gevallen wordt de effectieve deklaagdikte d_{eff} bepaald door het snijpunt van de sloottaludhelling en een 2:1 helling beginnend aan de onderkant van de deklaag in het midden van de sloot: $d_{eff} = H_3$.

Voor geometrische definities van B , b , H_1 , H_2 en H_3 zie Figuur C.2. Hier is ook te zien dat in het geval dat de deklaagdikte aan beide kanten van de sloot verschillend is of dat de sloot asymmetrisch is, de meest ongunstige situatie dient te worden beschouwd.

Als ter plaatse van de sloot de grenspotential wordt bereikt dan mag ervan worden uitgegaan dat op dat punt de potential zodanig wordt gereduceerd dat opdrijven van het achterliggende gebied niet meer kan optreden.

D Overzicht van parameterwaardes (startwaarden c.q. aanbevolen)

Symbol	opbarsten	heave	terugschrijdende erosie (Sellmeijer)	noot aan gebruiker
$\gamma_{sat, cover}$	X			(4)
r_{exit}	X	X		(3)
$D_{deklaag}$	X	X	X	(4)
L			X	(4)
D			X	(4)
h_{exit}	X	X	X	(4)
m_u, m_p	X		X	(1)
$i_{c,h}$		X		(1)
d_{70}			X	(2)
k			X	(2)

- (1) Startwaarde / aanbevolen waarde, gebruiker mag waarde niet veranderen
- (2) Startwaarde / aanbevolen waarde, gebruiker mag waarde veranderen
- (3) Startwaarde / aanbevolen waarde, echter aan het gebruik van lokale data is de voorkeur te geven
- (4) Start waarde / aanbevolen waarde, de gebruiker moet de benodigde parameter lokaal bepalen

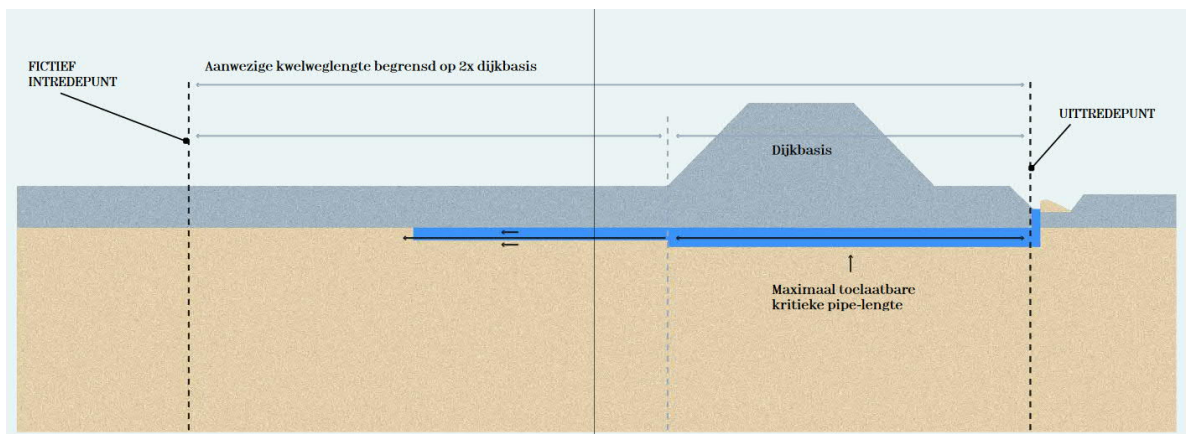
In de WBI parameterlijst wordt per parameter aangegeven of deze wel/geen stochast is, verdeling continue of discreet is (in het tweede geval wordt met scenario's gewerkt), type verdeling en basiswaarden voor verwachtingswaarde c.q. standaardafwijking of variatie-coëfficiënt en correlatielengte.

E Bepaling intredepunt bij voorland

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.

Zonder enige verdere onderbouwing mag als maximale kwelweglengte alleen de dubbele dijkbasislengte in rekening worden gebracht, uitgaande van de aanname dat de pipegroei tot de halve kwelweglengte nog een evenwichtssituatie gaat bereiken. Dit betekent dat in het geval van een kwelweglengte van 2x de dijkbasis (zie Figuur E.1) de pipe tot maximaal aan de buitenteen gaat doorgroeien. In dit geval kan ervan worden uitgegaan dat er boven de pipe voldoende deklaagdikte aanwezig zal zijn en geen doorbraak van de pipe door de deklaag gaat optreden.



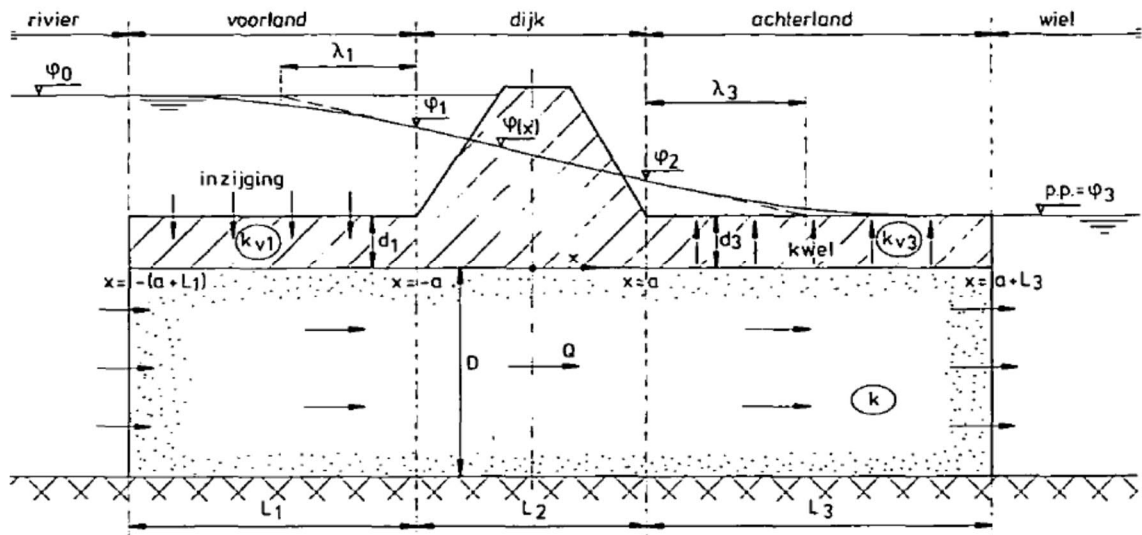
Figuur E.1 Begrenzing in rekening te brengen voorlandlengte

Als het onder water staande voorland geen water doorlaat, dan ligt het intredepunt aan de rand van het voorland.

Als het onder water staande voorland wel water doorlaat, dan ligt het fictieve intredepunt ergens tussen de rand van het voorland en de buitenteen van de dijk.

In de Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken Deel 1 – Bovenrivierengebied [8] Appendix B en in het *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken* [18] bijlage 4 worden geohydrologische modellen gegeven op basis waarvan een fictief intredepunt kan worden bepaald. Deze modellen gaan uit van stationaire stroming.

Voor het bepalen van het fictieve intredepunt wordt uitgegaan van het algemene model volgens Figuur E.2.



Figuur E.2 Schematisering grondwaterstroming

De stromingsweerstand van het zandpakket onder het voorland en door de deklaag op het voorland zijn van invloed op de ligging van het fictieve intredepunt.

De weerstand ter plaatse van het voorland wordt als volgt beschreven.

$$W_1 = \frac{\lambda_1}{kD} \tanh \frac{L_1}{\lambda_1}$$

Hierin is $\lambda_1 = \sqrt{kDd_1/k_1}$ de lek lengte van het voorland.

Soortgelijke termen zijn te formuleren voor de weerstand ter plaatse van de dijk en het achterland (polder).

De totale weerstand van het zandpakket met afdekkende lagen is $\Sigma W = W_1 + W_2 + W_3$.

De stijghoogte ter plaatse van de buiten teen van de dijk wordt als volgt beschreven.

$$\phi_1 = \phi_3 + (\phi_0 - \phi_3) \frac{W_2 + W_3}{\Sigma W} = \phi_3 + (\phi_0 - \phi_3) \frac{L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}{\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1} + L_2 + \lambda_3 \tanh \frac{L_3}{\lambda_3}}$$

De term:

$$\lambda_1 \tanh \frac{L_1}{\lambda_1}$$

is een fictieve lengte waar over de potentiaal daalt van ϕ_0 naar ϕ_1 .

Bij grote waarden van L_1/λ_1 (>2) wordt deze fictieve lengte gelijk aan de lek lengte λ_1 .

Bij kleine waarden van L_1/λ_1 ($<0,5$) wordt deze fictieve lengte gelijk aan de voorlandlengte L_1 .

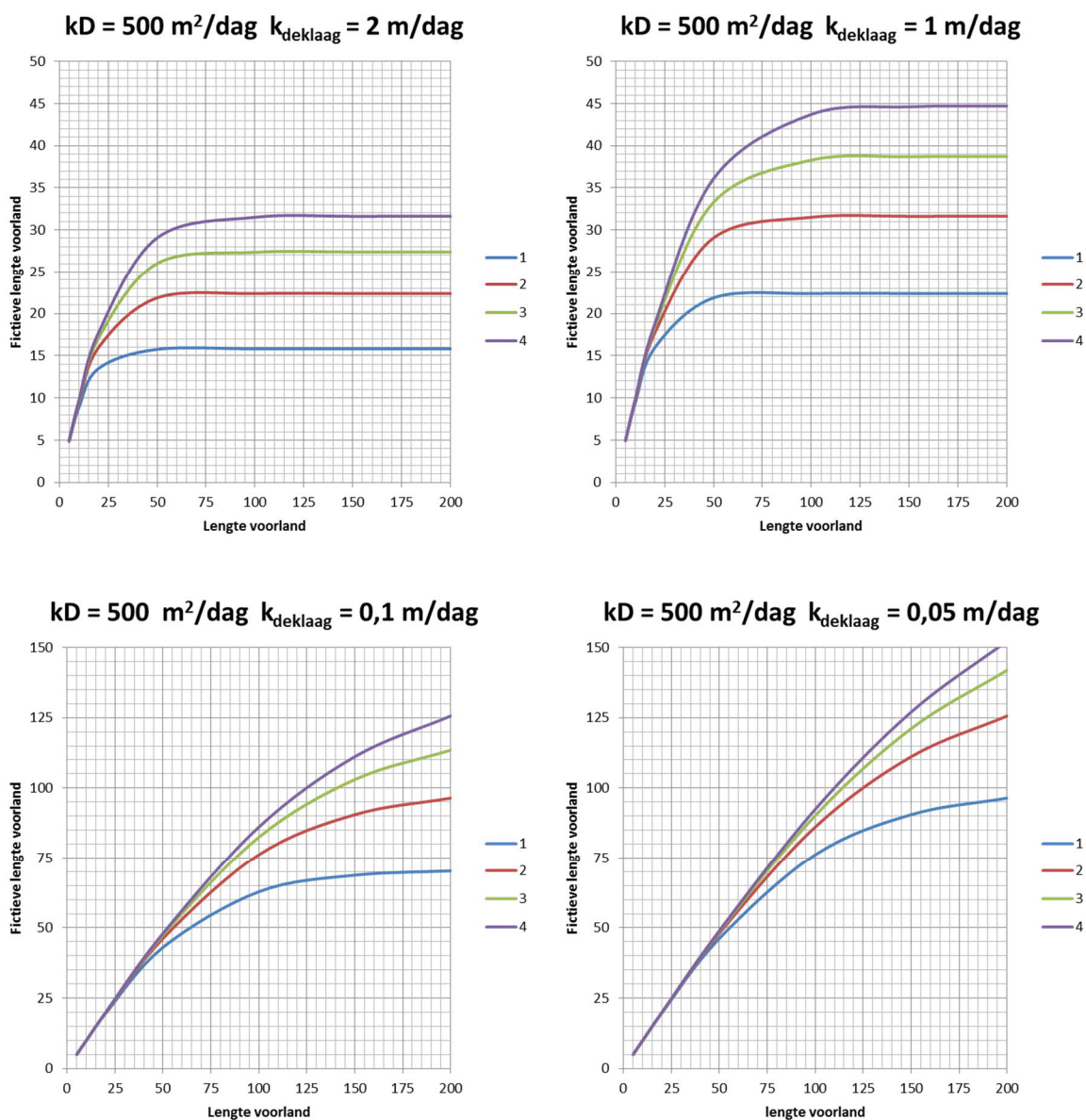
Dit is echter een puur geohydrologische beschouwing die theoretisch niet meer correct is wanneer het kanaaltje onder het voorland loopt. Dat wil zeggen, het Sellmeijer model is niet gevalideerd voor situaties waarin er toestroom naar de pipe toe is, in dit geval door de deklaag in het voorland heen. Een vuistregel is dat de kritieke lengte van een pipe, dus de lengte waarbij

de pipe bij een kleine verhoging van het verval 'doorschiet', ongeveer gelijk is aan de helft van de kwelweglengte. Wanneer de fictieve kwelweglengte groter wordt dan twee keer de dijkbasis (buitenteen tot uittredepunt) moet daarom door de beheerder met aanvullende checks worden aangetoond dat de fictieve kwelweglengte volledig mag worden meegenomen. Deze checks kunnen bestaan uit peilbuismetingen bij ondergelopen voorland waaruit afgeleid kan worden dat er geen toestroom door de deklaag naar de pipe te verwachten is, of berekeningen met een grondwaterstromingsmodel waarin het mechanisme piping is meegenomen.

In onderstaande grafieken, Figuur E.3, zijn voor een aantal situaties de fictieve voorlandlengtes bepaald.

Voor alle situatie is de kD -waarde het zelfde, $500 \text{ m}^2/\text{dag}$. Dit is bijvoorbeeld een zandlaag dikte van 20 m en een doorlatendheid van 25 m/dag.

Per grafiek wisselt de doorlatendheid van de deklaag en zijn voor 4 dikten van de deklaag (1, 2, 3 of 4 m) de resultaten weergegeven.



Figuur E.3 Fictieve leklengte als functie van de voorlandlengte.

F Doorlatendheid van SOS zand- en grindeenheden voor de SOS segmenten

Voorbeeld van de tabel met gemiddelde k-waarden voor de verschillende SOS zand- en grindeenheden in het segment waarin het dijkvak in het voorbeeld (hoofdstuk 8) in deze handleiding is gelegen. De waarden betreffen de gemiddelde waarde, de k_{eq} , bepaald voor het SOS segment op basis van VNK2 gegevens. De daadwerkelijk te hanteren waarden voor k_{eq} worden als bestand in D-Soil Model beschikbaar gesteld.

soilprofile_id	top_level	soil_name	k_{eq} [m / d]
43047_1D1	-4	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D1	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D1	3.5	10226_H_Rg_zm	15
43047_1D2	-4	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D2	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D2	4.5	10225_H_Ro_z&k	15
43047_1D2	3.5	10226_H_Rg_zm	15
43047_1D3	-2.5	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D3	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D3	3.5	10227_H_Rg_zm	15
43047_1D4	-2.5	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D4	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D4	3.5	10227_H_Rg_zm	15
43047_1D5	-2.5	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D5	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D5	4.5	10225_H_Ro_z&k	15
43047_1D5	3.5	10227_H_Rg_zm	15
43047_1D6	-2.5	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D6	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D6	4.5	10225_H_Ro_z&k	15
43047_1D6	3.5	10227_H_Rg_zm	15
43047_1D7	-2.9	10233_H_Rg_zm	45
43047_1D7	-4	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D7	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D7	3.5	10230_H_Ro_z&k	15
43047_1D7	-2	10233_H_Rg_zm	15
43047_1D8	-2.9	10233_H_Rg_zm	45
43047_1D8	-4	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D8	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D8	-2	10233_H_Rg_zm	15
43047_1D9	-2.9	10233_H_Rg_zm	45
43047_1D9	-4	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D9	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D9	4.5	10225_H_Ro_z&k	15
43047_1D9	3.5	10230_H_Ro_z&k	15
43047_1D9	-2	10233_H_Rg_zm	15
43047_1D10	-2.9	10233_H_Rg_zm	45
43047_1D10	-4	10234_P_Rg_zg	45
43047_1D10	-17	10235_P_Rg_zm	30
43047_1D10	4.5	10225_H_Ro_z&k	15
43047_1D10	-2	10233_H_Rg_zm	15

G d_{70} van de SOS eenheden voor de SOS segmenten

Voorbeeld van de tabel met de geldende d_{70} waarden voor de SOS zandeenheden onder de deklaag in het segment waarin het dijkvak in het voorbeeld (hoofdstuk 8) in deze handleiding is gelegen. De opgegeven waarden betreffen conservatieve schattingen van het gemiddelde op basis van VNK2 gegevens voor het SOS segment.

De daadwerkelijk te hanteren gemiddelde waardes voor d_{70} worden als bestand in D-Soil Model beschikbaar gesteld.

soilprofile_id	top_level	soil_name	d_{70} [μm]
43047_1D1	3.5	10226_H_Rg_zm	310
43047_1D2	3.5	10226_H_Rg_zm	310
43047_1D3	3.5	10227_H_Rg_zm	310
43047_1D4	3.5	10227_H_Rg_zm	310
43047_1D5	3.5	10227_H_Rg_zm	310
43047_1D6	3.5	10227_H_Rg_zm	310
43047_1D7	-2.9	10233_H_Rg_zm	310
43047_1D8	-2.9	10233_H_Rg_zm	310
43047_1D9	-2.9	10233_H_Rg_zm	310
43047_1D10	-2.9	10233_H_Rg_zm	310

Er ligt maar een type zandlaag, 10226_H_Rg_zm, onder de deklaag in het dijkvak van 600 m. Een voorbeeld van gemiddelde d_{70} waarden voor andere zand- en grindeenheden in het dijkvak van het voorbeeld in hoofdstuk 8 (deze zandeenheden komen niet onder de deklaag voor in het voorbeeld).

	d_{70}
soil_name	[μm]
P_Rg_zg	400
P_Rg_zm	350

H Bepalingswijze van de doorlatendheid k en de d_{70} waarde van zandpakketten

De bepalingwijze is gebaseerd op een notitie die is opgesteld in het kader van WBI 2017. De inhoud van de notitie is hier bijgewerkt voor gebruik als bijlage in deze schematiseringshandleiding.

H.1 Inleiding

De Nederlandse primaire waterkeringen worden periodiek beoordeeld conform de wettelijke voorschriften. In het WBI 2017 worden toetsen gegeven gebaseerd op normen voor maximaal toelaatbare overstromingskansen. Voor het falen van dijken als gevolg piping wordt in het WBI zowel een semi-probabilistische als een volledig probabilistische toets beschreven. Daarvoor is een wijze van vaststellen van de waarden voor de modelparameters k en d_{70} nodig. In deze bijlage wordt het bepalen van de parameterwaarde voor k voor het berekeningsmodel beschreven. Tevens wordt beschreven hoe de dikte van watervoerende lagen te bepalen.

De wijze van vaststellen van parameterwaarden berust op het kunnen identificeren van de aard van het zand in de ondergrond. Er worden op basis van het inzicht in de systematiek in de opbouw van zandlichamen en in de opbouw van de ondergrond van dijken soorten zand onderscheiden voor elk waarvan waarden voor specifieke doorlatendheid, k_{eq} , en $d_{70,eq}$ worden vastgesteld. In deze waarden zijn de invloeden van de verschillende aspecten van de heterogeniteit van zandlichamen op het mechanisme verenigd. De heterogeniteit wordt daarbij onderscheiden in variatie binnen zandpakketten op een locatie en voor de doorlatendheid ook in systematische variatie tussen zandpakketten op een locatie. Tevens wordt aangegeven hoe kan worden vastgesteld welke typen zand op een locatie aanwezig zijn. Uitgaande van de thans vigerende aannamen in de beschrijving van het mechanisme piping geeft deze bijlage een beknopte beschrijving van:

- de effecten van de systematiek in de opbouw van zandlichamen;
- de bepaling van de betreffende parameterwaarden;
- het identificeren van de onderscheiden typen zand.

H.2 Conceptueel model voor het faalmechanisme piping

Het berekeningsmodel voor piping in WBI 2017 (Sellmeijer 2011) is gebaseerd op krachtenevenwicht voor de korrels in het watervoerende pakket. In het algemeen is de aandrijvende kracht voor het in beweging komen van korrels gerelateerd aan het verhang ter plaatse. Daarnaast zijn er parameters die het effect van waterdruk gradiënten op de korrels en van de overige krachten op de korrel karakteriseren. Er is een kritiek verval, H_c , over de waterkering, waarbij de lokale gradiënt zodanig is dat er een doorgaande "pipe" kan ontstaan. Dit kritieke verval fungeert in een grenstoestandsfunctie.

De grenstoestandsfunctie, Z_p , voor piping is een vergelijking van het kritieke verval H_c [m] met het daadwerkelijk aanwezige stijghoogteverschil over een bepaalde horizontale afstand (zie Bijlage B):

$$Z_p = m_p H_c - (h_{rivier} - h_{uitree} - r_c d) \quad (1)$$

waarin:

r_c reductiefactor voor de weerstand in de deklaag bij de uitreedepunt (thans aangenomen $r_c = 0,3$)

$$H_c = f(L, D, k_{zand}, d_{70}) \quad (2)$$

waarin:

L	Kwelweglengte van in- tot uittredepunt: $L = x_{\text{exit}} - x_{\text{entry}}$ [m].
D	Dikte watervoerend pakket [m].
k_{zand}	Specifieke doorlatendheid watervoerend pakket [m/s].
d_{70}	70 ^{ste} percentiel waarde van korrelgrootteverdeling van het zand [m].

Voor de beoordeling wordt het kritieke verval H_c gebaseerd op het in 2011 aangepaste model van Sellmeijer, uitgedrukt in de verhouding van kritiek verval H_c en kwelweglengte L [m], en gebaseerd op de diktes en specifieke doorlatendheden van de watervoerende pakketten.

In het voor piping vigerende berekeningsmodel fungeren 2 lokaal te specificeren parameters die de grond van het watervoerende pakket karakteriseren, te weten de d_{70} en de k_{zand} . In het algemeen wordt met een toenemende d_{70} de weerstand tegen piping groter (leidt tot toename van H_c) en met het toenemen van de doorlatendheid (specifieke doorlatendheid en dikte van het betreffende watervoerende pakket) neemt de aandrijvende kracht toe (leidt tot afname van H_c).

H.3 Bepaling parameterwaarden

H.3.1 Algemeen

Het berekeningsmodel gaat uit van een homogene watervoerende laag met een vlakke horizontale en eenduidige begrenzing met een bovenliggende effectief ondoorlatende laag. De grond waarmee het berekeningsmodel in laboratoriumproeven en een grootschalige proef is gevalideerd en geijkt betreft gespoeld en of gezeefd homogeen fijn en middelgrof zand. De grond bevatte geen of een te verwaarlozen gehalte aan deeltjes kleiner dan ongeveer 50 μm . Dergelijke zandpakketten komen niet voor als natuurlijke grond en het is daarom nodig equivalente waarden voor de parameters voor natuurlijke grond vast te stellen voor de beoordeling van waterkeringen. De in het WBI voor de *gedetailleerde toets* (semi-probabilistisch per vak) gehanteerde model gaat uit van een voor de gehele dijk geldende specificatie van d_{70} en k_{zand} . Vanwege de aanwezige heterogeniteit dient de specificatie van de equivalente k_{zand} daarom tevens de in natuurlijke watervoerende pakketten aanwezige heterogeniteit en de invloeden daarvan onder en bij de gehele dijk te verdisconteren. De bevindingen van Kanning [20] en Schweckendiek [11] met betrekking tot de heterogeniteit worden hierbij gebruikt, maar er wordt niet expliciet naar verwezen omdat deze buiten de doelstelling van de aanpak hier liggen.

In het volgende wordt kort ingegaan op heterogeniteit in natuurlijke zandlichamen voor de afmetingen die gelden voor respectievelijk het vormen van de pipe en voor een dijklichaam waaronder een pipe zich kan ontwikkelen. Aansluitend wordt de aanpak voor het vaststellen van de equivalente parameterwaarden beschreven en de wijze waarop die kunnen worden bepaald.

H.3.2 Ruimtelijke variatie in eigenschappen van watervoerende pakketten

H.3.2.1 Variatie in zand en grindpakketten

De opbouw van doorlatende pakketten grond is uitvoerig bestudeerd, voornamelijk in het kader van delfstofwinning. De resultaten daarvan worden hier kort samengevat.

De wijze van afzetten van zand en grind in natuurlijke omstandigheden veroorzaakt een quasi ritmische structuur in zand en grindlichamen. Deze structuur betreft subhorizontale en, meest, hellende dunne laagjes die in zogenaamde sets zijn georganiseerd. De dunne laagjes hebben diktes van enige millimeters tot soms meer dan 0.3 m in grindafzettingen en de vorm van de laagjes is soms planair, maar meest enigszins komvormig. De sets zijn meest subhorizontaal georganiseerd en hebben diktes van ongeveer 0.1 m tot soms meer dan 1 m. In zand en grindafzettingen zijn de sets vaak onregelmatige, meestal uitwiggende lagen met afmetingen van enige meters tot tientallen meters. De sets zijn weer georganiseerd in grotere eenheden. De naamgeving van de grotere eenheden is afhankelijk van de toepassing, maar worden hier voor het gemak als lagen aangeduid. Ook deze lagen zijn in grotere verbanden georganiseerd in natuurlijk zand en grindafzettingen in wat hier pakketten zal worden genoemd. Voor een uitvoerige samenvatting van de heterogeniteit in zand en grindafzettingen wordt verwezen naar algemene referenties, onder andere Martinius en Van den Berg [1] en als voorbeeld voor

toepassing van de concepten over de heterogeniteit in delfstofwinning wordt verwezen naar MATLAB Reservoir Simulation Tool [9].

De dunne lagen, de sets, de lagen en de pakketten zijn onderscheiden door verschillen in samenstelling, vooral verschillen in korrelgrootteverdeling. De wijze van opbouw van de verschillen in korrelgrootte veroorzaakt variatie in doorlatendheid. In afzettingen waar kleilaagjes onderdeel van de structuur uitmaken zijn de verschillen in doorlatendheid vaak groot tussen laagjes en tussen sets (met een verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid van 10 of meer). Voor afwisselingen van grovere en fijne zanden zijn de verschillen minder extreem maar zijn tussen en binnen sets een factor 2 of, vaak, meer. Met name op de overgangen tussen sets en lagen treedt vaak extra weerstand op.



Figuur H.1 Voorbeelden van heterogeniteit van zandafzettingen op decimeter tot meters schaal. Links getijdenafzettingen in de Oosterschelde (zakmes voor schaal), beneden rivierafzettingen (de foto beslaat een hoogte van ongeveer 3 m).



De ruimtelijke variatie van eigenschappen die met korrelgrootte en pakking samenhangen is groot voor natuurlijke zand- en grindafzettingen. Het zou een net van waarnemingen (sonderingen, boringen en dergelijke) op onderlinge afstanden van enige meters vergen om de 3-dimensionale structuur van de ondergrond voor een locatie voldoende nauwkeurig vast te leggen om de lokale invloeden op de ontwikkeling van een piping pipe volgens de vigerende modellering te kunnen aangeven. De algemene karakteristieken van samenstelling en van de ruimtelijke structuur van watervoerende pakketten zijn echter wel te herleiden aangezien deze

samenhangen met de vorming ervan. Er is voldoende inzicht in de vorming van zandpakketten om de karakteristieken van samenstelling en opbouw te herleiden op basis van indirecte aanwijzingen over de vorming, zoals verticale ordening (te herkennen in boor- en sondeerstaten), plangeometrie en situering in de ondergrond van Nederland. De variatiepatronen in de zand- en grindafzettingen zijn karakteristiek voor de verschillende soorten afzettingen die de watervoerende pakketten in Nederland vormen. Op elke locatie zijn er verschillen in details van de opbouw, maar er zijn algemene karakteristieken die het mogelijk maken de pakketten te karakteriseren in termen van korrelgrootteverdeling en doorlatendheid.

H.3.2.2

Eenheden voor zand- en grindpakketten en grondopbouwscenario's in de SOS

Ten behoeve van het WBI 2017 is een schematisering van de ondergrond van de primaire waterkeringen van Nederland opgesteld de SOS (stochastische ondergrond schematisering) [4]. De schematisering geeft de ondergrond voor segmenten van de waterkeringen in termen van scenario's van de grondopbouw die kunnen voorkomen, met een kans van aantreffen van die scenario's.

De scenario's van de grondopbouw in de SOS schematisering zijn stapelingen van SOS eenheden. Deze eenheden zijn gedefinieerd op basis van de relevantie van de eenheid voor de toepassingen (geotechniek) en zijn elementen in het systeem in de ondergrond dat samenhangt met de vorming van de ondergrond. In deze eenheden zijn uiteraard ook de zand- en grindpakketten begrepen, met hun plaats in het systeem in de opbouw van de ondergrond. Deze eenheden hebben de algemene karakteristieken van samenstelling en ruimtelijke structuur van watervoerende pakketten die het mogelijk maken de pakketten te karakteriseren in termen van korrelgrootteverdeling en doorlatendheid.

De SOS is opgesteld ten behoeve van het schematiseren van de ondergrond voor de beoordeling van waterkeringen. Het is algemeen beschikbaar en is zodanig opgesteld en omschreven dat het breed gehanteerd kan worden bij het beoordelen conform het WBI 2017. Het omvat onder andere aanwijzingen voor het herkennen van de verschillende zand- en grindeenheden in grondonderzoekgegevens.

De eenheden die zand en grindpakketten betreffen zijn vooral:

- Holocene (jonge) getijdenzanden
- Holocene (jonge) kustzanden
- Holocene (jonge) rivierzanden
- Pleistocene (oudere) getijdenzanden
- Pleistocene (oudere) rivierzanden
- Pleistocene (oudere) windafzettingen (dekzand)
- Pleistocene (oudere) ijskap gerelateerde zand- en grindpakketten

Daarnaast zijn er nog enige hier niet nader genoemde soorten zandpakketten onderscheiden. Voor de eenheden wordt in de meeste gevallen respectievelijk een relatief fijne, middelgrove en grove variant onderscheiden waar dat nodig is.

De SOS eenheden hebben een grote overeenkomst met de eenheden die zijn gebruikt voor het karakteriseren van de watervoerende pakketten in VNK II. Het betreffen dezelfde eenheden in de opbouw van de ondergrond en hebben dezelfde eigenschappen als de overeenkomstige eenheden.

De SOS scenario's en de kans van aantreffen ervan wordt in een globale benadering vastgesteld voor dijksegmenten met een lengte van soms een halve tot enige kilometers, afhankelijk van de variatie in de grondopbouw. Deze op globale wijze vastgestelde segmenten kunnen op basis van lokaal beschikbaar grondonderzoek nader worden gedetailleerd indien relevant en mogelijk. Ook de SOS eenheden in de scenario's van het segment kunnen nader worden onderverdeeld waar lokaal grondonderzoek daar aanwijzingen voor geeft.

Het met relevante zekerheid lokaal detailleren van samenstelling en opbouw van zand- en grindpakketten voor de vorming van een "pipe" over tientallen meters lengte onder een dijk is met het courant beschikbare grondonderzoek echter slechts in zeer beperkte mate mogelijk. De

lokale detaillering van de SOS schematisering voor een locatie of tracé met lokaal grondonderzoek kan daarom de volgende specificaties betreffen, te weten

- de dikte van de lagen met de betreffende SOS eenheden
- detaillering van de segmenten op basis van de lokaal gespecificeerde diktes
- kans van aantreffen van scenario's met de gespecificeerde diktes in de gedetailleerde segmenten

De waarden voor de parameters benodigd voor het toetsspoor *piping* worden op basis van aanwezigheid van deze SOS eenheden vastgesteld. De specificatie van laagdiktes en kans van aantreffen van lagen met die eenheden is daarbij mogelijk.

H.3.3 Vaststellen equivalente parameterwaarde k_{eq}

H.3.3.1 Ruimtelijke variatie in specifieke doorlatendheid

In het berekeningsmodel gehanteerd voor de *gedetailleerde toets* voor *piping* is de specifieke doorlatendheid voor het watervoerende pakket onder en bij de dijk opgenomen. Er wordt echter voor de gehele dijk slechts één waarde voor k_{zand} gevraagd. Om de invloed van de heterogeniteit onder en bij de gehele dijk te verdisconteren dient er een equivalente k_{zand} gespecificeerd te worden, hier k_{eq} genoemd.

De vorming van een “pipe” onder een waterkering vergt dat deze zich ontwikkelt en in stand houdt over een lengte van ten minste de lengte van de kwelweg tussen intree- en uitredepunt. Deze afstand bedraagt gewoonlijk meer dan 50 m en kan zelfs meer dan 100 m bedragen. De “pipe” moet zich daarom door een grote variatie in korrelgrootte en lokale verschillen in doorlatendheid ontwikkelen. Deze variatie is niet met bemonstering van een locatie langs een waterkering in voldoende detail in kaart te brengen en evenmin kunnen effecten ervan op het ontwikkelen van een “pipe” nagegaan worden. De karakterisering van watervoerende pakketten voor het toetsspoor *piping* betreft daarom de voor het mechanisme geldende equivalente waarden voor de k_{zand} die is bepaald voor de ter plaatse aanwezige SOS eenheden in de ondergrond (zie paragraaf H.3.2.2). Tevens wordt de mogelijkheid gegeven het pakket in 2 lagen met SOS eenheden met elk een k_{zand} , te representeren om tot een representatieve doorlatendheid voor het gehele watervoerende pakket, k_{eq} , voor een locatie van of een dijkvak van een waterkering te komen. Deze specificatie van het watervoerend pakket kan, afhankelijk van de lokale opbouw van de ondergrond een betere karakterisering van de doorlatendheid geven. De equivalente waarden voor de k_{zand} van watervoerende pakketten op een locatie of voor een dijkvak worden met voor SOS eenheden vastgestelde waarden bepaald aan de hand van de er aanwezige SOS eenheden.

Voor de bepaling van de vastgestelde equivalente waarde is de aard van de opbouw van de verschillende zandpakketten en de daarmee samenhangende invloeden op het mechanisme *piping*, zoals gehanteerd voor WBI 2017, beschouwd. Een en ander wordt hieronder kort toegelicht.

Heterogeniteit van het watervoerend pakket is aanwezig voor de afmetingen die van belang zijn voor de directe omgeving van “pipes” (decimeters tot meters) en voor de afmetingen die de stijghoogteontwikkeling onder en bij de gehele dijk bepalen (lengte van tientallen tot meer dan honderd meter). Immers, in en bij de “pipe” moeten zandkorrels in beweging gebracht worden door de ter plaatse door stromend water uitgeoefende druk als gevolg van zeer lokale gradiënten. Deze lokale gradiënten ontstaan onder invloed van over grotere afstanden in het watervoerend pakket aanwezige gradiënten. Zoals in paragraaf H3.2 is beschreven, is de heterogeniteit in zandpakketten niet willekeurig, maar is in algemene trekken systematisch georganiseerd in een vorm die naar gelang de aard van het watervoerend pakket gekarakteriseerd kan worden. Met deze informatie kan de relevante ruimtelijke variatie van de specifieke doorlatendheid gekarakteriseerd worden. De invloed van lokale variatie over afmetingen van decimeters tot meters, in de sets en sommige soorten lagen, dempt over grotere afstanden uit.

De ruimtelijke afmetingen van relevante variatie in specifieke doorlatendheid in watervoerende pakketten zijn te klein om met reguliere technieken vast te leggen voor waterkeringen. De

verschillen in doorlatendheid over afstanden van decimeters tot meters bedragen vaak meer dan een factor 2 en soms meer dan een factor 10. Possemiers et al. [14] geeft voorbeelden voor de variaties over centimeters tot meters afstanden in een zandpakket in België dat sterk lijkt op bepaalde in Nederland voorkomende zandpakketten. Berg [1] neemt waar dat voor duinzand (met een zeer beperkte spreiding in korrelgrootte) relevante verschillen in de verticale en horizontale doorlatendheid op mm - cm afmetingen behalve met korrelgroottevariaties ook met pakkingverschillen samenhangen. Met de reguliere technieken kunnen hooguit patronen in de ondergrond met afmetingen van enige tientallen meters omvang vastgelegd worden. In de praktijk van het beoordelen is echter ook die karakterisering van de ondergrond met directe waarnemingen niet aan de orde.

Het vaststellen van de specifieke doorlatendheid van natuurlijk opgebouwde grond en van de variatie ervan langs een waterkering is een uitdaging. Het is mogelijk om op basis van inzichten in de opbouw van watervoerende pakketten de effecten van de lokale variatie voor de doorlatendheid op toepassingsschaal te berekenen. Op die wijze kan een stochastische karakterisering van de doorlatendheid voor stukken zand- of grindpakket met grotere afmetingen geformuleerd worden (zoals onder andere met MRST [9] en met het in ontwikkeling zijnde D-GeoFlow). Ook kunnen de effecten van de lokale variatie in watervoerende pakketten voor de doorlatendheid voor grotere afmetingen nagegaan worden door het bepalen van die grootschaliger doorlatendheid met de diverse daarvoor geschikte veldbepalingsmethoden. Zulke metingen zijn echter zeer schaars in Nederland. In het kader van WBI 2017 is het ook niet mogelijk gebleken de specifieke doorlatendheid van watervoerende pakketten in Nederland met genoemde berekeningen te karakteriseren. Met de informatie die wel beschikbaar is van respectievelijk veldmetingen, informatie uit korrelgrootteverdelingen en doorlatendheidsmetingen op laboratoriumschaal is aan de hand van overwegingen die aan genoemde berekeningen ten grondslag liggen, de specifieke doorlatendheid voor verschillende watervoerende pakketten in Nederland gekarakteriseerd. Deze karakterisering is in het kader van het project VNK II [13] uitgevoerd. Het betreft een gemiddelde waarde en aanduiding van de spreiding voor die pakketten. Deze watervoerende pakketten worden ook geïdentificeerd in de schematisering voor SOS en de aanwezigheid ervan wordt door de SOS voor de primaire keringen in Nederland gespecificeerd in grondopbouwscenario's.

De "pipes" ontwikkelen zich aan de bovenzijde van zandpakketten. Voor het vormen van "pipes" over grotere lengte door een zandpakket onder een waterkering is het nodig dat er over deze lengte overal langs de potentiële "pipe" zodanige waterdrukgradiënten bestaan dat de korrels in beweging komen en blijven. Daarvoor zijn de lokale gradiënten in de omgeving langs de "pipe" van belang en daarmee de lokale variatie in doorlatendheid. Deze lokale gradiënten hangen af van drukopbouw over grotere afstanden, zoals van buitenwater naar opbarstlocatie. Voor de gradiënten over grotere afstanden speelt de doorlatendheid van een watervoerend pakket over de gehele dikte ervan een rol. De variatie van de doorlatendheid over deze dikte kan op veel locaties worden onderscheiden in meerdere eenheden (zandlagen) met een systematisch verschil in doorlatendheid.

Met regulier beschikbaar grondonderzoek is het mogelijk om in de ondergrond van een dijk één of meerdere van die in SOS onderscheiden watervoerende pakketten te onderscheiden en de diepteligging daarvan vast te stellen. Elk van de lagen heeft daarin een doorlatendheid die van de betreffende eenheid afhangt en van de relatieve dikte ervan in het watervoerend pakket. Het effect van deze variatie over de gehele dikte van een watervoerend pakket, dat bestaat uit meerdere eenheden kan op verschillende wijzen benaderd worden voor piping. In het genoemde VNK II project is dat bepaald door uit te gaan van stroming die over grote afstanden parallel aan de lagen is. Deze aanname is vanwege de dikte van de beschouwde lagen in verhouding tot de lengte van de kwelweg tussen intree en uittrede locaties weinig specifiek. De bijdrage van de doorlatendheid van de laag direct onder de afdeklaag bij het vormen van een "pipe" kan met deze benadering in veel gevallen niet tot uitdrukking komen.

De specifieke doorlatendheid voor een watervoerend pakket dat uit meer dan één enkele SOS eenheid bestaat, kan ook worden bepaald door uit te gaan van de stroming door het gehele pakket van intreepunt tot uittredepunt. In zo'n eerste benadering wordt de doorlatendheid van de bovenste laag op de ontwikkeling van een "pipe" beter verdisconteerd dan bij aanname van

stroming parallel aan de lagen. Zo'n eerste benadering geeft onder andere een specificatie voor het debiet bij het uittredpunt, dat onder andere voor initiatie van een "pipe" van belang is.

H.3.3.2

Bepalen k_{eq}

Op basis van de bevindingen is in het kader van het project VNK II [13] voor de watervoerende pakketten de k_{zand} gekarakteriseerd voor de ondergrond van een groot deel van de primaire keringen in Nederland. De genoemde watervoerende pakketten in VNK II zijn op dezelfde grondslagen gedefinieerd en omvatten elk vaak meerdere eenheden die in de schematisering voor SOS zijn gebruikt. De k_{eq} van de betreffende watervoerende SOS eenheden voor de primaire keringen in Nederland is daarmee vastgelegd voor de SOS segmenten. Tevens geven de grondopbouwscenario's van de SOS de diepteligging, dikte, van de betreffende watervoerende eenheden in de ondergrond voor strekkingen, segmenten, van al de A, B en C keringen in Nederland.

In de tabel H.1, die als voorbeeld in deze notitie is opgenomen, wordt voor de onderscheiden eenheden een voorbeeld gegeven van de waarden van de betreffende parameters voor de karakterisering van de doorlatendheid gegeven. De waarden worden opgegeven voor de betreffende SOS eenheden en zijn geografisch nader gespecificeerd op basis van de VNK2-indeling van primaire waterkeringen. De te gebruiken spreiding (variatiecoëfficiënt) rondom de k_{eq} is vastgesteld op 50% (zie bijlage 5, sub bijlage 5B "Spreiding k_h -waarden voor stochastische analyse faalkans piping" van RWS WVL, 2016, Scherper toetsen voor piping bij dijken WBI2017, Informatie t.b.v. ENW-Voorbereidingsgroep april 2016 [24]). Opgemerkt wordt dat dit een eerste globale schatting van de spreiding in doorlatendheid betreft voor zandpakketten in Nederland.

De dikte van het watervoerende pakket zoals gespecificeerd in SOS bedraagt tot 40 m -mv. Waar het nodig is tot grotere diepte de onderkant van het watervoerende pakket te specificeren wordt verwezen naar de daarvoor opgegeven waarden in VNK II die in een daarvoor opgestelde tabel voor de SOS segmenten zijn opgenomen.

Indien gebruik gemaakt wordt van numerieke berekeningen waarin het mechanisme piping is opgenomen, kan de doorlatendheidsopbouw van de ondergrond rechtstreeks als parameterwaarden worden gehanteerd. In het geval er gebruik gemaakt wordt van de formulering van Sellmeijer voor piping met een enkele waarde voor de doorlatendheid van het zand- grindpakket dienen aannamen over de effectieve doorlatendheid gedaan te worden. De waarden uit het voorbeeld in tabel H.1 kunnen worden gebruikt om een k_{eq} vast te stellen als het watervoerend pakket uit 2 op elkaar gelegen eenheden bestaat. De k_{eq} kan worden bepaald als beschreven in de paragraaf H.3.4 van deze bijlage.

Opgemerkt wordt dat de SOS informatie naast de scenario's van de opbouw van de ondergrond voor een locatie en de eenheden in die scenario's, ook aanwijzingen geeft over het herkennen van de eenheden in boor- en sondeerstaten en over de aard van de grond, te weten de betreffende zand- en grindpakketten.

De gebruiker dient vast te stellen welke watervoerende SOS eenheden voorkomen in de voor een locatie geldende grondopbouwscenario's onder een afdeklaag. De gebruiker kan daarbij gebruik maken van de voor SOS eenheden geleverde beschrijvingen en het beschikbare lokale grondonderzoek. Met de gegevens van de eenheid kunnen de betreffende parameters worden vastgesteld.

In het geval de gebruiker beschikking heeft over lokale bepalingen van de specifieke doorlatendheid en k_D waarden kan de te gebruiken waarde op basis daarvan vastgesteld worden voor de locatie. Opgemerkt wordt daarbij dat de k_D waarde over afstanden van 100 m aanmerkelijk kan variëren in veel gebieden in Nederland (met name West en Noord Nederland, bovenrivierengebied).

Tabel H.1 Voorbeeld Voorbeeld van een tabel met de k_{eq} [m/s] te hanteren voor het toetsspoor *piping* voor de SOS eenheden in een SOS segment. De waarden worden opgegeven voor de betreffende eenheden en geografisch nader gespecificeerd op basis van de SOS segmenten.

Zandpakkettype	soort	SOS eenheid (voorbeeld)	SOS segment (dummy namen)	k_{eq} [m/s]
Holocene (jonge) getijdenzanden	fijn	H_Mg_zf/zk	N.W	1.0E-5
	middel	H_Mg_zm	N.W	9.4E-5
	grof	H_Eg/Mg_zm	N.W	2.8E-4
Holocene (jonge) kustzanden	fijn	H_Mp_zf	N.W	5.1E-5
	middel	H_Ova_zf	N.W	1.4E-4
	grof	H_Ova_zm	N.W	1.2.8E-4
Holocene (jonge) rivierzanden	fijn	H_Rg_zf	W,M,O,Z	5.1E-5
	middel	H_Rg_zm	W,M,O,Z	1.5E-4
	grof	H_Rg_zg	M,O,Z	3.9E-4
Pleist. (oudere) getijdenzanden	fijn	P_Mg_zk	N.W, O,Z	1.0E-5
	middel	P_Mg_zf/k	N.W	1.4E-4
	grof	P_Mg_zm	N.W	2.8E-4
Pleist. (oudere) rivierzanden	fijn	P_Rg_zf	N.W,M,O,Z	5.1E-5
	middel	P_Rg_zm	N.W,M,O,Z	1.5E-4
	grof	P_Rg_zg	N.W,M,O,Z	6.8E-4
Pleist. (oudere) dekzanden	fijn	P_Wrd_zf	N.W,M,O,Z	5.1E-5
	middel	P_Wrd_zm	N.W,M,O,Z	3.9E-4
Pleist. (oudere) ijskap gerelateerde zand- en grindpakketten	fijn	P_Om_zf	N.W,M,O,Z	5.1E-5
	grof	P_Gs_zg	N.W,M	9.8E-4

H.3.4

Bepalen doorlatendheid van 2 verschillende op elkaar gelegen zandlagen

De doorlatendheid van het zand-grindpakket wordt in de formulering van Sellmeijer voor piping met een enkele waarde vastgesteld. Zandpakketten in de ondergrond bestaan echter meest uit meerdere verschillende lagen in een complexe patronen. Voor toepassing voor piping moet die variatie gereduceerd worden tot een enkele laag. Vanwege systematische grote verschillen in doorlatendheid tussen grotere eenheden, lagen, zand- en grind in de verticaal die vaak wordt aangetroffen in het relevante dieptebereik, wordt hier beschreven hoe deze variatie voor 2 lagen tot een effectieve doorlatendheid voor een enkele laag kan worden gereduceerd voor piping beschreven met de formulering van Sellmeijer. Een belangrijke overweging voor de beschrijving is dat de invloed van beide lagen op stijghoogte bij de bovenkant van de bovenste laag tot uitdrukking moet komen. Er is een methodiek in ontwikkeling om tenminste voor een 2-lagen opbouw van het zand-grindpakket een effectieve doorlatendheid vast te stellen op basis van de dikte, diepteligging en doorlatendheidswaarden van beide pakketten. Voorshands dient met de volgende veilige aannamen rekening gehouden te worden bij het vaststellen van een effectieve doorlatendheid voor opeengeleggen zand- grindlagen, te weten:

- Voor een 2-lagen opbouw waarvan de bovenste laag het minst doorlatend is kan het gewogen rekenkundig gemiddelde aangehouden worden als in:

$$k_{eff} = \frac{d_1 k_1 + d_2 k_2}{D}, \quad D = d_1 + d_2$$

met d_1 en d_2 de dikte van de bovenste en onderste laag in een 2-lagen opbouw en k_1 en k_2 de respectieve doorlatendheden van die lagen

- Voor een 2 lagen opbouw waarin de bovenste laag de hoogste doorlatendheid heeft, dient de doorlatendheid van de bovenste laag te worden aangehouden tenzij de bovenste laag minder dan 1 m dik is, dan wel minder dan 10 % van de dikte van het gehele doorlatende pakket heeft.

LET OP: een gewogen gemiddelde doorlatendheid wordt momenteel automatisch uitgevoerd in Riskeer. In het geval van twee lagen waarbij de bovenste laag een hogere doorlatendheid heeft dan de onderste laag resulteert dit in een te lage waarde, daarom dient de gebruiker zelf de doorlatendheid van de bovenste laag aan te passen, of de twee lagen te vervangen door een laag.

Een gewogen gemiddelde kan niet in Riskeer verwerkt worden indien de standaarddeviatie van de doorlatendheid van de verschillende lagen niet gelijk is. Gezien de grote verschillen in doorlatendheid die op kunnen treden is het gelijk stellen van de standaarddeviatie hier niet wenselijk. Daarom wordt in Riskeer bij meerdere watervoerende lagen gewerkt met een vaste variatiecoëfficiënt van 0,5. Aanbevolen wordt om variatiecoëfficiënt in SOS ook aan te passen naar 0,5 om waarschuwingen te voorkomen. Indien een gebruiker zelf met een andere variatiecoëfficiënt wil werken voor het gehele pakket dient de schematisering in D-Soil Model te worden aangepast naar 1 laag.

Er is een rekentool beschikbaar om k_{eq} voor een tweelagensysteem te bepalen. De tool maakt gebruik van het VNK2 neurale netwerk.

H.4 Vaststellen equivalente parameterwaarden d_{70eq}

H.4.1 Algemeen

De vorming van een “pipe” onder een waterkering vergt dat deze zich ontwikkelt en instant houdt over een lengte van tenminste de lengte van de kwelweg tussen intree- en uittredepunt. Deze afstand bedraagt gewoonlijk meer dan 50 m en kan zelfs meer dan 100 m bedragen. De “pipe” moet zich daarom door een grote variatie in korrelgrootte en lokale verschillen in doorlatendheid ontwikkelen. Deze variatie is niet met bemonstering van een locatie langs een waterkering in voldoende detail in kaart te brengen. De formulering van het mechanisme houdt evenmin rekening met invloeden van deze lokale variatie. De karakterisering van watervoerende pakketten voor de beoordeling op piping betreft daarom equivalente waarden voor de d_{70} , hier als d_{70eq} aangeduid. De waarde voor d_{70eq} is voor de verschillende SOS eenheden vastgesteld.

Voor de bepaling van de vastgestelde equivalente waarde is de aard van de opbouw van de verschillende zandpakketten en de daarmee samenhangende invloeden op het mechanisme piping, zoals gehanteerd voor WBI 2017, beschouwd. De equivalente waarden voor de parameters d_{70} van watervoerende pakketten op een locatie worden met de voor SOS eenheden vastgestelde waarden bepaald aan de hand van de er aanwezige SOS eenheden. Voor WBI 2017 zijn op basis van VNK II-gegevens d_{70eq} -waarden vastgesteld en meegeleverd bij WBI SOS. De waarden zijn hierbij gekoppeld aan de voorkomende WBI SOS-eenheden. Grote delen van Limburg en alle categorie c-keringen zijn tijdens VNK II niet beschouwd en voor die locaties moeten nog d_{70eq} -waarden vastgesteld worden.

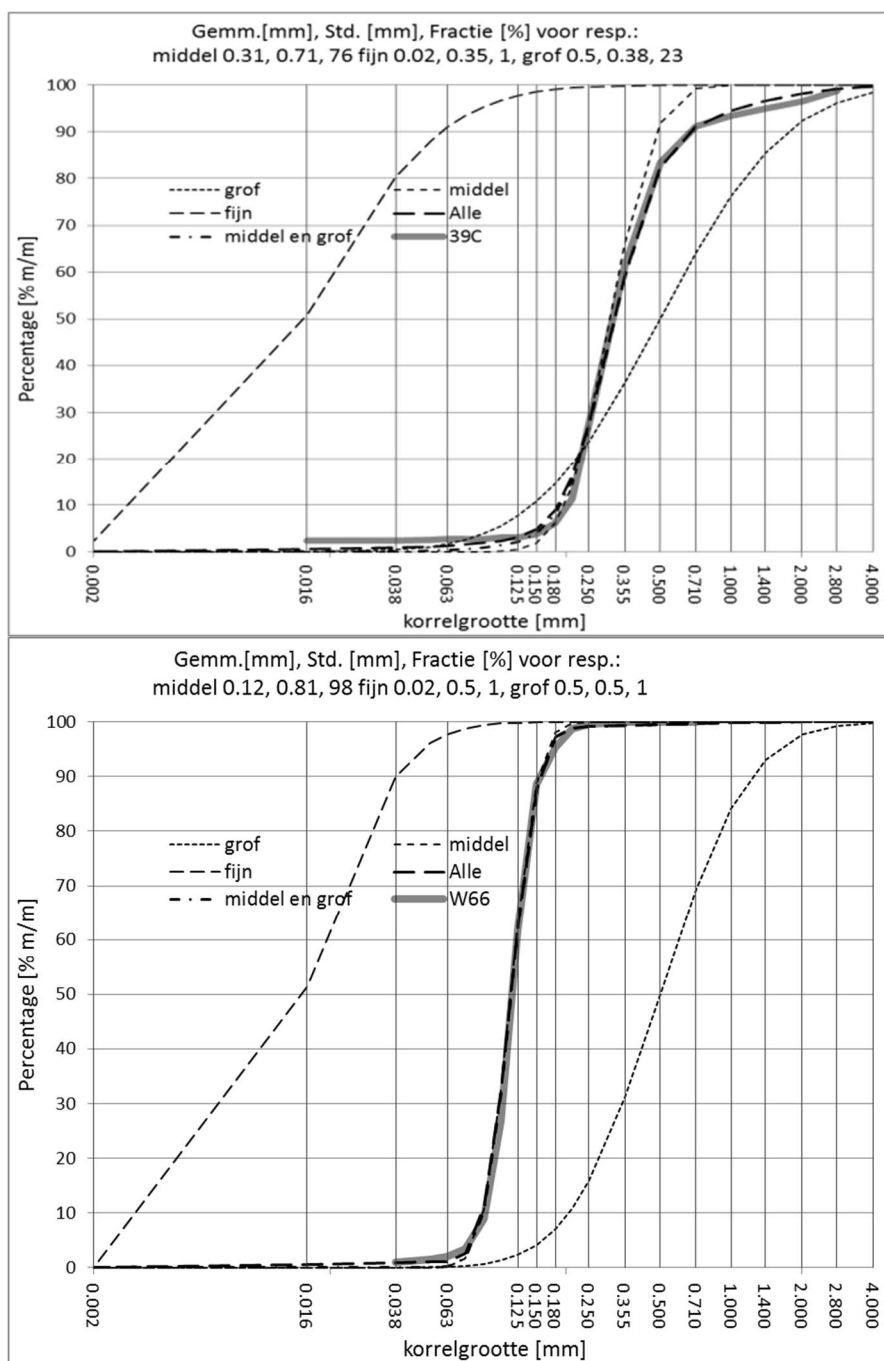
In de volgende paragrafen wordt het gebruik van een d_{70eq} onderbouwd, dit is dus geen handleiding hoe een d_{70eq} zelf te bepalen. De d_{70eq} is alleen bepaald voor situaties binnen de scope van de gedetailleerde toets. Dit zijn situaties die vallen binnen het toepassingsgebied van de regel van Sellmeijer, dat wil zeggen voor korrelgroottes tot 500 μm (zie ook WBI 2017 Bijlage III). Voor korrelgroottes buiten dit toepassingsgebied kan in een toets op maat onderbouwd worden geëxtrapoleerd.

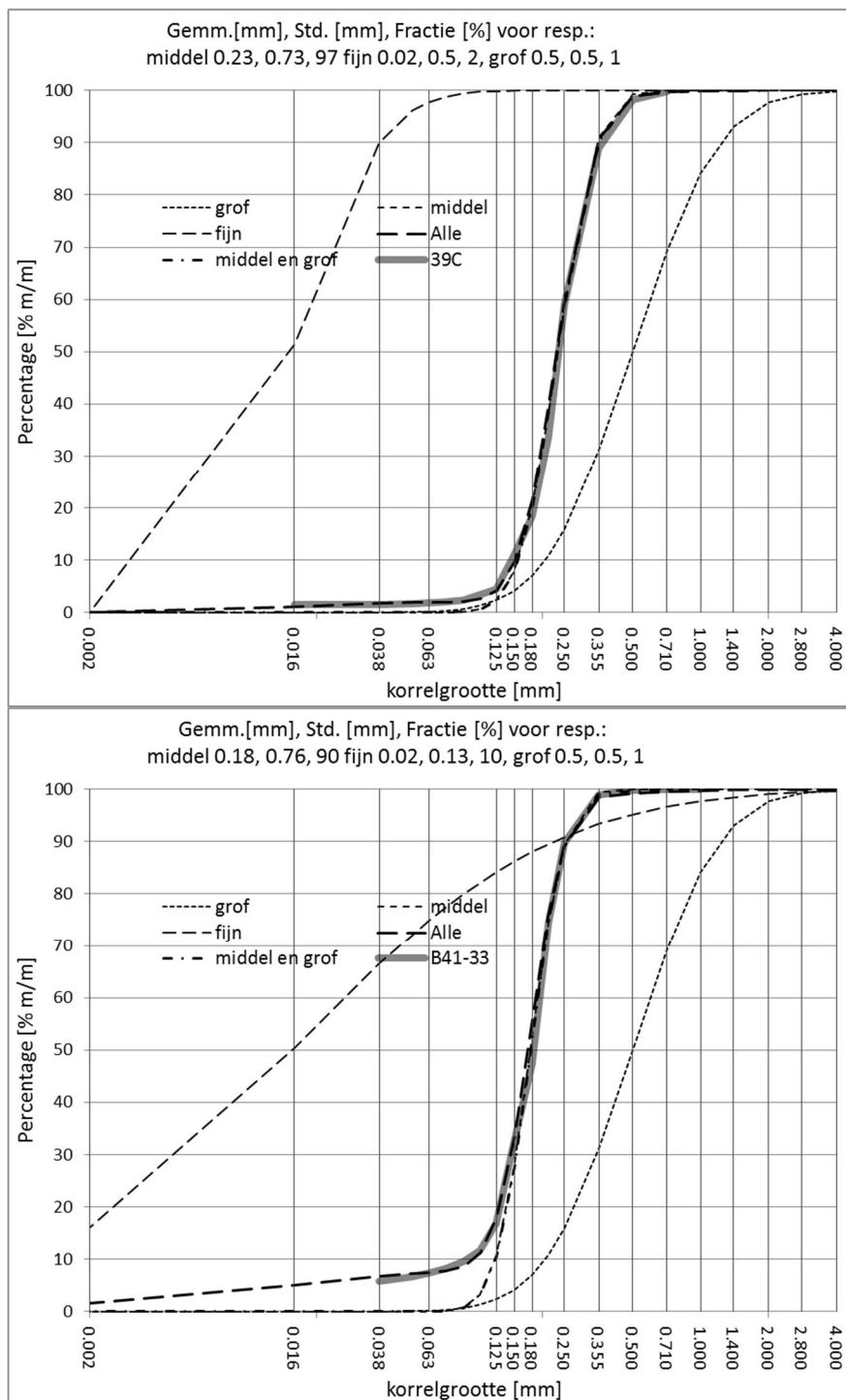
H.4.2 Aspecten van korrelgrootteverdeling en karakterisering zand- en grindpakketten

In deze paragraaf wordt ingegaan op de korrelgrootteverdeling van grond in watervoerende pakketten, met name:

- op aspecten van de korrelgrootteverdelingen van de zanden onder andere in verband met de zanden waarmee het berekeningsmodel is geijkt en het gebruik van die gegevens voor natuurlijk afgezette zanden;
- op de karakteristieken van de ruimtelijke variatie in de korrelgrootteverdeling in verband met de ontwikkeling van “pipes”.

De aanvoer- en afzettingsprocessen van zand en grind in stromend en golvend water of wind bepalen de korrelgrootteverdeling van de resulterende afzettingen. Voor zand, en in mindere mate grind, geldt dat daarbij een 3-tal samenstellende fracties met elk een log-normaal verdeling, de korrelgrootteverdeling van een regulier zandgrondmonster van ongeveer 250 - 500 g bepalen (voor grindhoudende afzettingen soms veel grotere monsters). In de Figuur H2 zijn de verdelingen van die drie log-normaal verdeelde fracties en de resulterende korrelgrootteverdeling weergegeven, samen met die van een zandmonsters. De respectieve fracties zijn aangeduid als een fijne component, die meestal met suspensiepopulatie wordt aangeduid, een grove component, de rollende populatie, en een midden component die als saltatie (springend) wordt aangegeven. Opgemerkt wordt dat van elk van de drie hier genoemde fracties het grootste deel ruimtelijk gescheiden voorkomt in natuurlijk afgezet zand over meest mm tot cm afstanden. De afwezigheid van de fijne suspensiepopulatie in het voor de proeven gebruikte zand heeft daardoor een zeer beperkte directe invloed op het in beweging komen van individuele korrels in natuurlijk afgezet zand.





Figuur H.2 Voorbeelden van korrelgrootteverdelingen van grondmonsters en van de daarin aanwezige log-normaal verdeelde fijne, middel en grove fracties die gezamenlijk de korrelgrootte benaderen van het monster. De verdeling van het monster onderaan betreft een getijdenezandafzetting (Waddenzeegebied).

De korrelgrootteverdelingen van de monsters in de Figuur H2 geven aan dat met de drie log-normaal verdeelde fracties de korrelgrootteverdeling van monsters van zanden in Nederland goed gerepresenteerd kan worden. De verdeling linksonder en rechtsboven in de figuur geven het effect weer van hogere aandelen van de suspensie, respectievelijk de rollende populatie, zijnde respectievelijk bijvoorbeeld getijdengebiedszanden (grote delen van de ondergrond van west en noord Nederland) en een wat grover rivierzand.

Het zand waarmee voor het berekeningsmodel voor piping zijn geijkt [15] betreft de middenfractie en soms een deel van de grovere fractie van natuurlijk afgezet zand. Het verhogen of verlagen van het aandeel van de fijnere fractie binnen voor Nederlandse zanden geldende grenzen (van 0 tot 15 %) beïnvloedt de d_{70} in zeer beperkte mate, minder dan 10 μm voor het meest algemeen voorkomende zand met relatief grote fijne fractie in de korrelgrootteverdeling. Het variëren van het aandeel van de grove fractie binnen aannemelijke grenzen voor zandpakketten in Nederland leidt tot aanpassingen van de d_{70} tot 15 % voor grondmonsters van 250 – 500 g.

Het zand dat de middenfractie van de korrelgrootteverdeling vertegenwoordigt in de sets in zandpakketten (zie paragraaf H2) domineert in de grotere lateraal meer continue eenheden in sets. Bij de overgangen tussen sets komen regelmatig grove of juist fijne lagen voor met relatief zeer beperkte dikte en meestal zeer beperkte laterale continuïteit over grotere afstanden (meer dan enige meters). De grotere continuïteit van de set-onderdelen met de korrelgrootteverdeling van de middenfractie leidt ertoe aan te nemen dat een eventuele “pipe” zich daardoor zal kunnen ontwikkelen over relevant grotere afstanden. Voor het vaststellen van de d_{70eq} van zandpakketten is het daarom nodig tenminste de middenfractie van sets in zandpakketten goed te karakteriseren.

De ontwikkeling van een “pipe” wordt beïnvloed, versterkt, door de dunne laagjes van de sets van grovere fractie, zoals in laboratoriumproeven te zien was. Dit zal versterkt worden als deze grovere dunne laagjes geconcentreerd voorkomen in bijvoorbeeld de basis van een set, hetgeen vaak het geval is. Opgemerkt wordt dat zo'n grovere basis een relatief groter aandeel van de grovere fractie bevat. De grootte van de grovere fractie in het zandpakket is daarom van invloed op het ontwikkelen van een “pipe” die zich vormt in het deel van de set met de midden fractie van het zand. Het wordt daarom niet uitgesloten dat de mate waarin een grovere fractie is bijgemengd invloed heeft op de ontwikkeling van een “pipe” en daarmee op de voor het zandpakket vast te stellen d_{70eq} .

De “pipes” ontwikkelen zich aan de bovenzijde van zandpakketten. De d_{70} van de sets aan de bovenzijde van zandpakketten moet daarom gekozen worden voor de bepaling van de d_{70eq} van zandpakketten. Voor het vormen van “pipes” over grote lengte door een zandpakket onder een waterkering is het nodig dat er een serie sets, met afmetingen van enige tot 10-tallen meters horizontaal, met een bepaalde maximale d_{70} aaneengesloten voorkomt in de bovenzijde van het zandpakket. De meest voorkomende d_{70} van sets aan de bovenzijde van zandpakketten vormt een indicatie voor de d_{70} die het meest waarschijnlijk is voor een aaneengesloten serie sets. De meest voorkomende d_{70} kan voor korrelgrootteverdelingen benaderd worden door de gemiddelde waarde, die daarbij een beperkte overschatting van de d_{70} geeft.

Voor WBI 2017 wordt daarom uitgegaan van de d_{70eq} van de midden en grovere fracties die de korrelgrootteverdeling van zandpakketten bepalen. Deze d_{70eq} is bijna nagenoeg hetzelfde als de d_{70} van de midden en grovere fractie van de meeste zandmonsters die van zandpakketten genomen worden. De spreiding van de monsterwaarden rond de gemiddelde d_{70eq} is een indicator van de in zandpakketten optredende spreiding. Voor de d_{70eq} van monsters van zandpakketten in Nederland is de d_{70} van de korrelgroottefractie groter dan 63 μm (zand- en grindgehalte) een goede benadering.

H.4.3

Vaststellen d_{70eq}

Op basis van een groot aantal zandmonsters van vooral de bovenkant van de in Nederland voorkomende zandpakketten is in het project VNK II de d_{70} vastgesteld. De eenheden waar de d_{70} voor vastgesteld is zijn met beperkte uitzonderingen dezelfde als die zijn gebruikt voor de zand- en grindpakketten in de SOS. De d_{70eq} van de SOS eenheden is op basis van de VNK II gegevens van de gelijksoortige eenheden vastgesteld. De nadere detaillering van de d_{70eq} ten opzichte van de d_{70} van de VNK II gegevensset is gebaseerd op de trend van de korrelgrootte van de betreffende SOS eenheden binnen de variatie in de VNK II gegevens, zie bijlage I. Voor locaties waar geen VNK II-gegevens beschikbaar waren, zijn voor WBI 2017 geen d_{70eq} -waarden bepaald en uitgeleverd. Voor die locaties zal tijdens het toetsen de d_{70eq} dus nog vastgesteld moeten worden. Dit kan niet op basis van een beperkt aantal korrelgroottemetingen. De vaststelling van

de d_{70eq} zou moeten gebeuren op basis van (geologische) kennis van de opbouw van de verschillende zandige SOS-eenheden. De te gebruiken variatiecoëfficiënt rondom de d_{70eq} is vastgesteld op 12 % (zie bijlage 5, sub bijlage 5C “Benadering van de spreiding van de d_{70} van zandpakketten voor piping evaluatie” van RWS WVL, 2016, Scherper toetsen voor piping bij dijken WBI2017, Informatie t.b.v. ENW-Voorbereidingsgroep april 2016) [24].

I VNKII en SOS: korrelgrootte d_{70} en doorlatendheid

In opdracht van VNK is door Deltares en TNO de ondergrond ter plaatse van categorie A primaire waterkeringen geschematiseerd. Hierbij zijn per geologisch deelgebied van iedere dijkkring voor ondergrondscenario's statistische parameters (gemiddelde en standaarddeviatie) bepaald van de geometrie (dikte en verbreiding) en de eigenschappen (horizontale doorlatendheid k en d_{70} ²) van de zandlagen. Het uitgangspunt bij WBI 2017 is deze waarden zoveel mogelijk te hergebruiken en als startpunt te gebruiken voor het bepalen van de equivalente d_{70} en doorlatendheid. Hoe deze laatste zijn afgeleid van de VNKII parameters en hoe deze te gebruiken wordt met name toegelicht in Bijlage H. Hieronder wordt eerst uitgelegd hoe de VNKII-parameters gekoppeld zijn aan de SOS eenheden, daarna worden de bijgeleverde tabellen nader toegelicht.

I.1 Koppeling VNKII-parameters aan SOS eenheden

De koppeling is zoveel mogelijk geautomatiseerd. Hierbij is bepaald in welke VNKII-deelgebieden de SOS segmenten liggen. Het is mogelijk dat een SOS segment door meerdere VNKII-deelgebieden loopt. In een volgende stap is de profielopbouw van de geologische formaties van VNKII vergeleken met de opbouw in de SOS scenario's en zijn formaties gekoppeld aan SOS eenheden die voor een groot deel uit zand (kunnen) bestaan).

I.1.1 Koppeling VNKII-gebieden met SOS segmenten

Wanneer meerdere VNK-gebieden met één WTI-segment overlappen, wordt het percentage van overlap van deze VNK-gebieden bepaald. Gebieden met minder dan 10% overlap worden niet meegenomen. Voor de koppeling van de doorlatendheden geldt dat als een WTI-segment meer dan 65% overlap heeft met een VNKII-gebied de waarden van dat VNK-gebied gebruikt worden. Voor de situaties waarbij de grootste overlap minder dan 65% is wordt bepaald met welk VNKII-gebied de SOS scenario's de meeste overeenkomst hebben. Hierbij zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Gekeken wordt in hoeverre de diepteligging van de geologische formaties in de verschillende VNKII-gebieden overeenkomen met de diepteligging van de corresponderende SOS eenheden. De diepteligging van de onder- en bovenkant van de geologische formaties in VNKII mag tot 2 meter afwijken van de binnen SOS opgegeven minimale en maximale diepteligging van de corresponderende SOS eenheid (zie Hijma en Kruse (lit. [6]), 2015 voor uitleg over de bepaling van de minimale en maximale diepteligging van de SOS eenheden).
2. Het VNKII-gebied waarvan de profielopbouw het meest overeenkomt met de SOS scenario's wordt gebruikt voor het toekennen van de waarden voor doorlatendheid.

I.1.2 Koppeling geologische formaties aan SOS eenheden

Per 'doorlatende' eenheid van SOS, worden doorlatendheden van de geologische formaties uit het gekozen gebied overgenomen. De minimum- en maximumwaarden van VNKII zijn niet hergebruikt voor het WBI 2017. Voor ieder SOS eenheid wordt hierbij gekeken of hij overlapt met een geologische formatie in VNKII. Indien deze overlap groter is dan 25% en de stratigrafie klopt, worden de doorlatendheden van deze formatie overgenomen voor de SOS eenheid. Indien de overlap kleiner is dan 25% wordt gekeken of op basis van de formatie, dus zonder diepte informatie, een doorlatendheid kan worden gekoppeld. Dit was in 4% van de vergelijkingen het geval. Uiteindelijk bleef er 2% over die handmatig moest worden gekoppeld. In sommige gevallen is de SOS eenheid dikker dan de VNKII-geologische formaties en matcht een SOS eenheid bijvoorbeeld met twee op elkaar liggende VNKII-formaties. In dat geval wordt de desbetreffende SOS eenheid gekopieerd naar een extra ingevoegde regel met als diepte-informatie de diepteligging van de top van de tweede VNKII-formatie. Om deze diepte wordt geen range gegeven. De onderste SOS eenheid eindigt altijd op -40 meter NAP. Eventueel doorlopende VNKII-formaties worden daar dan ook 'afgekapt'. In een extra kolom wordt wel de oorspronkelijke einddiepte van de VNK- formatie vermeld.

² De d_{70} is gedefinieerd als de zeefgrootte (in μm) waarbij 70% van de korrels door de zeef valt. De d_{70} wordt bepaald op alleen de zandfractie, dus zonder de fijne fractie ($<63 \mu\text{m}$).

I.2 Output files

I.2.1 Output file *korrelgrootte* (d_{70})

De output file bestaat uit de volgende kolommen (Tabel I.1):

1. WTI-segment: het SOS segment
2. WTI-scenario: de naam van het scenario in het segment
3. VNK-gebied: het VNK-gebied waarvan de d_{70} -waarden zijn gebruikt. Wanneer meerdere VNK-gebieden met één WTI-segment overlappen en de overlap groter is dan 10%, wordt de d_{70} van al deze VNK-gebieden onder elkaar vermeld in het output-bestand.
4. WTI-mv: de maaiveldhoogte (m NAP) voor het SOS segment
5. D70_gem1: de gemiddelde d_{70} voor de desbetreffende formatie
6. Fm1: De code van de formatie waarvoor de d_{70} geldt. De code wordt hieronder uitgelegd (Tabel I.2).
7. d1: de diepte waarop de d_{70} geldig is.
8. D70_gem2-6: de gemiddelde d_{70} voor de dieper liggende formaties. Soms zitten hier wat replicaties in.
9. Fm2-6: de naam van de dieper liggende formaties.
10. d2-6: de diepte waarop de d_{70} geldig is (± 0.5) voor de dieper liggende formaties.

Tabel I.1 Voorbeeld van de output file voor de gekoppelde d_{70} -waarden

WTI-segment	WTI-scenario	VNK-gebied	WTI-mv	D70_gem1	Fm1	d1	D70_gem2	Fm2	d2	D70_gem3	Fm3	d3
6011	1D1	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D1	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D1	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D2	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D2	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D2	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D3	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D3	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D3	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D4	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D4	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D4	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D5	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D5	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D5	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D6	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D6	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D6	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D7	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3
6011	1D7	6_W	0.5	140	NA	1.3	140	NA	-3.9	180	BX	-5.9
6011	1D7	6_X	0.5	140	BX	0.8	140	BX	-4.3	140	BX	-5.7
6011	1D8	6_V	0.5	180	NA	0	180	NA	-5	220	BX	-6.3

Tabel I.2 Overzicht van de gebruikte codes voor geologische formaties. Holocene is geen formatie maar een tijdvak. Soms staat in de tabel UR/ST, dit betekent dat de afzettingen tot de Formatie van Urk en/of de Sterksel behoren.

Code	Formatie	Code	Formatie	Code	Formatie
BE	Beegden	EE	Eem	OO	Oosterhout
BX	Boxtel	HL	Holocene	PE	Peelo
DN	Drachten	KR	Kreftenheye	PZ	Peize
DR	Drente	NA	Naaldwijk	ST	Sterksel
DRSC	Drente, Schaarsbergen	NAWA	Naaldwijk, Walcheren	SY	Stramproy
DT/GE	Gestuwd	NAWO	Naaldwijk, Wormer	UR	Urk
EC	Echteld	NAZA	Naaldwijk, Zandvoort	WA	Waalre

I.2.2 Output file *doorlatendheden* (k -waarde)

De output file bestaat uit de volgende kolommen (Tabel I.3):

11. Soil_profile_id: de naam van het scenario. Segment_1001_1D1 betekent bijvoorbeeld scenario 1 in segment 1 in dijkkring 1. Segment_6011_1D3 zou het derde scenario zijn in segment 11 in dijkkring 6 (zie ook Hijma en Lam, 2015 (lit. [4])).
12. Top_level: de diepteligging van de top van de SOS eenheid in m NAP

13. Soil_name: de naam van de SOS eenheid. Alle eenheden hebben nu een unieke identifier gekregen, waardoor het een lange naam is. WTISOS2014_1_H_Mkw_z&k is in feite eenheid H_Mkw_z&k. Wellicht dat in de toekomst het gedeelte "WTISOS2014" hier nog afgeknipt wordt.
14. Max-d: Geeft de bovenkant aan van de range waarin de top van de SOS eenheid kan voorkomen.
15. Min-d: Geeft de onderkant aan van de range waarin de top van de SOS eenheid kan voorkomen.
16. K_mean: de gemiddelde doorlatendheid van de SOS eenheid zoals afgeleid uit VNKII. De waarde is in m/dag.
17. New_bottom: als een geologische formatie in VNKII dieper reikt dan -40 m NAP wordt in deze kolom de einddiepte zoals opgegeven in VNKII gegeven.

Tabel I.3 Voorbeeld van de output file voor de gekoppelde doorlatendheden

soilprofile_id	top_level	soil_name	max-d	min-d	k-mean	new_bottom
Segment_1001_1D1	1.5	WTISOS2014_1_H_Mkw_z&k	1.5	1.5	5	
Segment_1001_1D1	-5	WTISOS2014_4_H_Mg_zf	-4	-6	5	
Segment_1001_1D1	-30	WTISOS2014_5_P_Om_zf	-28	-32	10	
Segment_1001_1D2	1.5	WTISOS2014_2_H_Mr_kz	1.5	1.5		
Segment_1001_1D2	-7.5	WTISOS2014_4_H_Mg_zf	-6	-8	5	
Segment_1001_1D2	-30	WTISOS2014_5_P_Om_zf	-28	-32	10	
Segment_1001_1D3	1.5	WTISOS2014_3_H_Mp_zf	1.5	1.5	5	
Segment_1001_1D3	-2.5	WTISOS2014_4_H_Mg_zf	-1.5	-3.5	5	
Segment_1001_1D3	-10	WTISOS2014_4_H_Mg_zf			5	
Segment_1001_1D3	-30	WTISOS2014_5_P_Om_zf	-28	-32	10	
Segment_2001_1D1	2	WTISOS2014_8_H_Ova_zf	2	2	5	
Segment_2001_1D1	1.5	WTISOS2014_9_H_Mkw_z&k	1.75	1.25	5	

Opmerking: voor de toets zijn alleen de gemiddelde waarden van belang. De minimum- en maximumwaarden worden niet gebruikt voor WBI 2017.

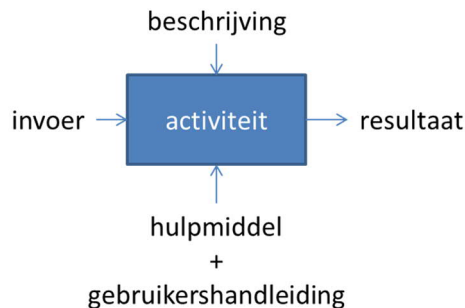
J Schema werkwijze beoordeling piping

Hieronder is schematisch de werkwijze van de beoordeling van het toetsspoor Piping (STPH) weergegeven (Figuur J.2).

J.1

Toelichting op het schema werkwijze beoordeling

De werkwijze bestaat uit opvolgende activiteiten waarbij het resultaat van de voorgaande activiteit de invoer is van de volgende activiteit. Deze activiteiten moeten doorlopen worden om te komen tot een oordeel. Per activiteit kan worden beschreven hoe men van de invoer komt tot de benodigde uitvoer. Daarnaast wordt aangegeven of een activiteit door hulpmiddelen wordt ondersteund. Het schema van een activiteit ziet er in het algemeen uit zoals Figuur J.1.

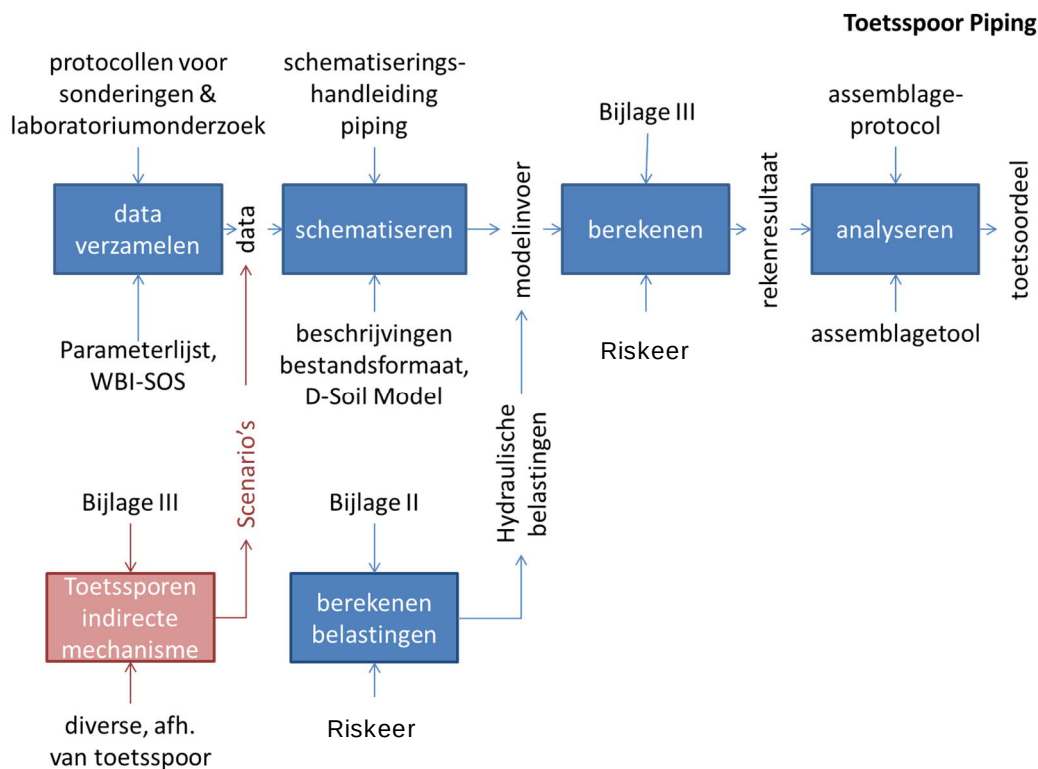


Figuur J.1 Het algemene schema van een activiteit. Een aaneenschakeling van benodigde activiteiten bij een beoordeling geeft de schematische werkwijze van de beoordeling weer.

Het beoordelingsinstrumentarium bestaat uit verschillende documenten en tools/software om te komen tot een oordeel. In het schema is aangegeven welke (hoofd) documenten en tools/software betrekking hebben op een activiteit. Bij de activiteit wordt in de referenties na het schema gerefereerd naar de alle beschikbare documenten en/of tools/software behorende bij de activiteit. Op deze manier kan de beoordelaar bij elke activiteit achterhalen welke documenten en/of tools/software van het beoordelingsinstrumentarium relevant zijn om die activiteit uit te kunnen voeren. Er wordt in het schema niet uitsluitend verwezen naar documenten en/of tools/software van het beoordelingsinstrumentarium.

Benadrukt wordt dat dit schema niet het beoordelingsproces beschrijft. Het beoordelingsproces wordt beschreven in Bijlage I 'Procedure' van de Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Het beoordelingsproces is iteratief waarbij één of meerdere activiteiten uit het schema meerdere malen kan worden doorlopen. Afhankelijk van waar men zich bevindt in het beoordelingsproces, kan de invulling van de activiteit anders zijn. Bijvoorbeeld bij de activiteit 'berekenen' kan dit door middel van een eenvoudige toets, gedetailleerde toets per vak of een toets op maat. Verder wordt benadrukt dat de beschrijvingen en hulpmiddelen niet uitputtend zijn. Niet alle invullingen van een activiteit zijn beschreven of worden ondersteund (denk hierbij aan toets op maat).

J.2 Schema werkwijze beoordeling Piping (STPH)



Figuur J.2 Schema werkwijze beoordeling Piping (STPH). In het schema zijn alleen de belangrijkste documenten en/of tools/software genoemd. De lijst met alle beschikbare documenten en tools/software die betrekking hebben op een activiteit wordt hieronder beschreven.

J.3 Referenties bij het schema werkwijze beoordeling Piping (STPH)

J.3.1 Activiteit 'data verzamelen'

Referenties beschrijving activiteit

- Voor de beschrijving van deze activiteit wordt verwezen naar de algemeen geaccepteerde en van toepassing zijnde protocollen, voorschriften en normen in de grond-, water- en wegebouw die te vinden zijn bij CROW en NEN.

Referenties hulpmiddel activiteit

- WBI-Parameterlijst (bijlage A uit Handleiding Datamanagement WBI 2017)*. K.S. Lam, Deltares-rapport 209432-002-GEO-0002, Delft, september 2016.
- WBI-SOS, Globale stochastische ondergrondschematisering voor de primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, december 2015. Wordt als bestand meegeleverd met D-Soil Model.
- Globale stochastische ondergrondschematisering (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen*. M. Hijma, K.S. Lam. Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006, Delft, december 2015.
- Doorlatendheid van SOS zand- en grindeenheden voor de SOS segmenten (bijlage F uit Schematiseringshandleiding Piping, WBI 2017)*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016. Wordt als bestand meegeleverd met D-Soil Model.
- d₇₀ van de SOS eenheden voor de SOS segmenten (bijlage F uit Schematiseringshandleiding Piping, WBI 2017)*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016. Wordt als bestand meegeleverd met D-Soil Model.

J.3.2 Activiteit 'schematiseren'

Referenties beschrijving activiteit

- *Schematiseringshandleiding Piping, WBI 2017*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.
- *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS*. G. Kruse, M. Hijma. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *D-Soil Model, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *D-Soil Model, Ondergrondschematiseringsproces voor geotechnische toepassingen, Handleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.

J.3.3 Activiteit 'berekenen hydraulische belastingen'

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belastingen primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Riskeer, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Tool Waterstandsverloop*
- *Gebruikershandleiding Waterstandsverloop, Versie 2.0*. J. Ansink, R. Kamp, C.P.M. Geerse. HKV, Rapport PR2803.10. Lelystad, mei 2014.

J.3.4 Activiteit 'berekenen toetsoordeel'

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Riskeer, Software voor de beoordeling van primaire waterkeringen*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Installatiehandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Riskeer, Gebruikershandleiding, Wettelijk Toets Instrumentarium 2017*. Deltares, Delft, september 2016.
- *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WBI*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

J.3.5 Activiteit 'analyseren'

Referenties beschrijving activiteit

- *Ministeriële Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen*. Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving. Lelystad, september 2016.

- *Assemblageprotocol WBI2017, Nadere uitwerking van het beoogde assemblageprotocol voor het wettelijke beoordelingsinstrumentarium.* F. Diermans, K.S. Lam, H. Knoeff, Deltares rapport 1230086-010-GEO-0001, Delft, juni 2016.

Referenties hulpmiddel activiteit

- *Assemblagetool WBI2017.* Nog in ontwikkeling.

J.3.6

Toelichting bij de referenties

Het softwareprogramma Riskeer kan verschillende (sub)activiteiten ondersteunen bij het berekenen van de hydraulische belastingen en bij het berekenen van het rekenresultaat. Daarom wordt Riskeer meerdere malen genoemd bij de referenties.

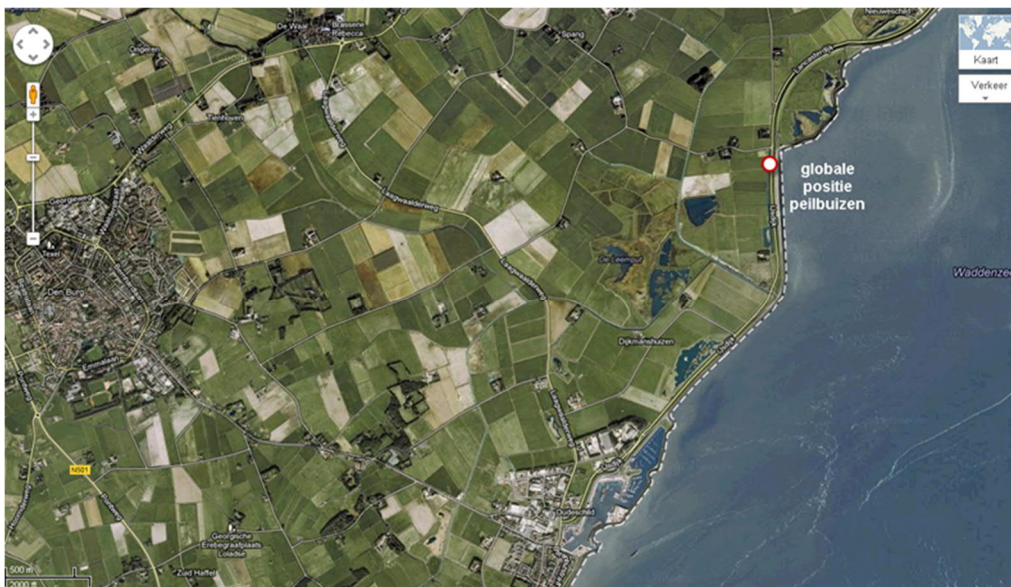
De bestandsformaten behorende tot een software of tool zijn beschreven in de handleiding van de betreffende software of tool.

K Voorbeeld berekening leklengthe en dempingsfactor

K.1 Introductie

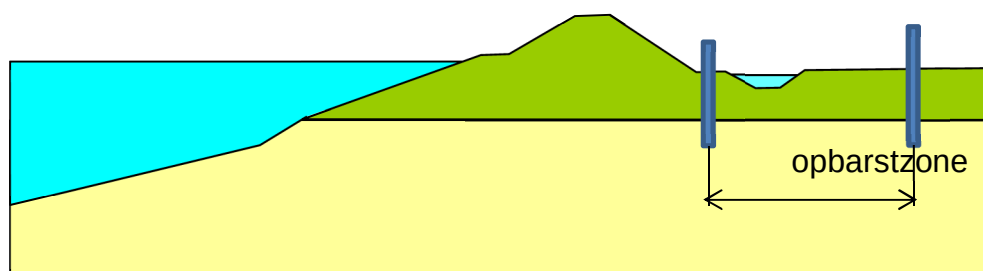
Het onderstaande rekenvoorbeeld is afkomstig uit het Deltares rapport [27] en is gebruikt in de leerlijn Geotechniek uit 2016.

Het rekenvoorbeeld is gebaseerd op een locatie langs de Waddenzee ten noorden van Oudeschild nabij km 11,96. Op deze locatie staan 2 peilbuizen in dwarsprofiel met een onderlinge afstand van circa 80 m. In de periode eind oktober 2005 tot medio november 2005 zijn ten behoeve van de toetsing de stijghoogten in de peilbuizen continu geregistreerd. Onderstaande figuur geeft een uitsnede van de locatie volgens Google Maps.



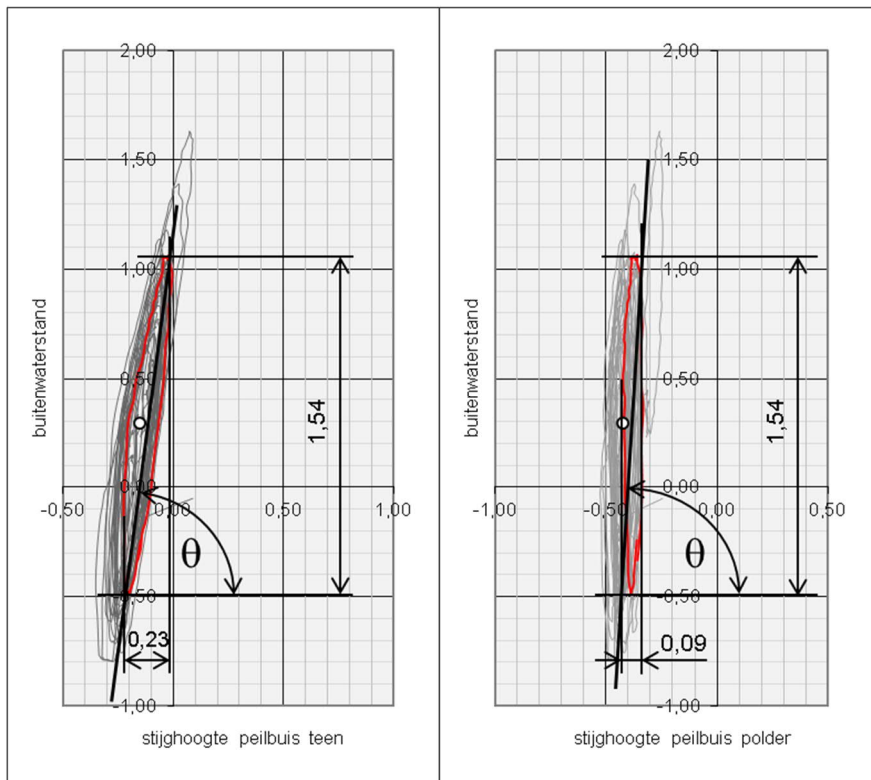
Figuur 1 locatie peilbuizen, uitsnede uit Google Maps

De maaiveldhoogte achter de dijk is vastgesteld met behulp van het Algemeen Hoogtebestand Nederland [AHN]. De hoogte van het poldermaaiveld nabij de locatie van de peilbuizen is circa NAP -0,1 m. Het slootpeil is circa NAP -0,8 m (zomerpeil) of circa NAP -1,0 m (winterpeil). De bodemopbouw ter plaatse is vastgesteld met behulp van boorprofielen uit de toetsing. Op basis van de beschikbare boringen en sonderingen in het gebied is vastgesteld dat de dikte van het afdekkende pakket varieert tussen de 4 m en de 8 m. Ter plaatse van de peilbuizen is het afdekkende pakket circa 7 m dik, ter plaatse van de percelen ter weerszijde is de dikte van het afdekkende pakket dunner, minimaal circa 4 m.



Figuur 2 schematisch dwarsprofiel rekenvoorbeeld

Beide peilbuizen zijn gedurende enkele weken geregistreerd. De metingen zijn uitgevoerd tijdens dagelijks getij.



Figuur 3. peilbuisregistraties

Voor de analyse van de peilbuisregistraties wordt een representatieve getij-peilbuis combinatie gekozen. In Figuur 3. is dat de rode 'ellips'.

Bij deze representatieve meting worden de volgende gegevens afgeleid:

Hoogwater t.o.v. NAP : +1,07 m
 Laagwater t.o.v. NAP : -0,47 m
 Gemiddelde waterstand t.o.v. NAP : +0,29 m
 Getij-amplitude : 1,54 m

Hoogste stijghoogte peilbuis teen t.o.v. NAP : +0,00 m
 Laagste stijghoogte peilbuis teen t.o.v. NAP : -0,23 m
 Gemiddelde stijghoogte teen t.o.v. NAP : -0,15 m
 Amplitude peilbuis teen : 0,23 m

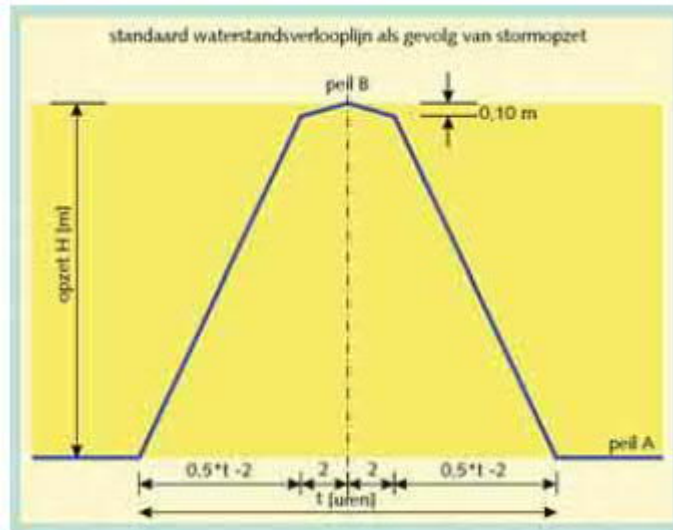
Hoogste stijghoogte peilbuis polder NAP : -0,33 m
 Laagste stijghoogte peilbuis polder NAP : -0,42 m
 Gemiddelde stijghoogte polder t.o.v. NAP : -0,41 m
 Amplitude peilbuis 2 : 0,09 m

Afstand tussen peilbuizen : 80 m
 Stijghoogte op grote afstand t.o.v. NAP : -1,10 m

Bij de ontwerpwaterstand behoren de volgende parameters:

toetspeil t.o.v. NAP : +4,50 m

Duur in uren : 35 uur



Figuur 4 waterstandsverloop

K.2

Opgave

- Bepaal de stationaire lekfactor

$$\lambda = x / \ln[\operatorname{tg} \theta] \quad \text{Waarin: } \operatorname{tg} \theta = \Phi_{\text{gemiddeld getij}} / \Phi_{\text{gemiddelde peilbuis}}$$

Waarin:

$$\Phi_{\text{gemiddeld getij}} = H - h_p$$

$$\Phi_{\text{gemiddelde peilbuis}} = \Phi_{x,t} - h_p$$

H = amplitude van het getij bij het intreepunt

h_p = polder randvoorwaarde (potentiaal watervoerende zandlaag op grote afstand)

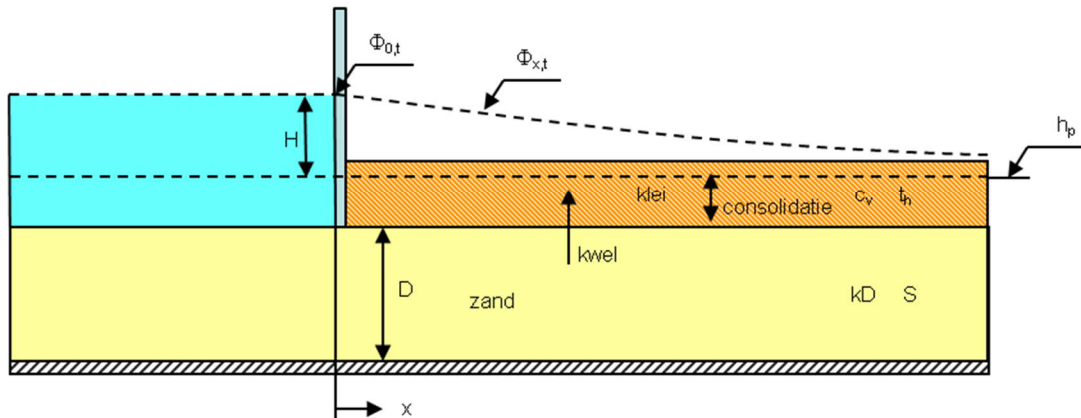
$\Phi_{x,t}$ = amplitude van de respons in de peilbuis

λ = stationaire lekfactor

- Bepaal de cyclische lekfactor

$$\lambda_{\omega} = x / \ln[\operatorname{tg} \theta] \quad \text{Waarin: } \operatorname{tg} \theta = \Phi_{\text{getij}} / \Phi_{\text{peilbuis}}$$

- Bepaal de cyclische lekfactor bij toetspeil
- Bepaal de stijghoogte bij het uittreepunt (gelegen op 30 m polderwaarts van de teen van de dijk) bij stationaire stroming. Hiervoor kan verondersteld worden dat de configuratie zonder voorland van toepassing is (Figuur 5).



Figuur 5: schematische geometrie dijk zonder voorland

De respons in de watervoerende zandlaag is voor deze situatie te beschrijven als

$$\Phi[x] = H \exp[-x / \lambda]$$

Waarin:

$\Phi[x]$ = stijghoogte in de watervoerende zandlaag ten opzichte van h_p polderpeil (randvoorwaarde polderzijde)

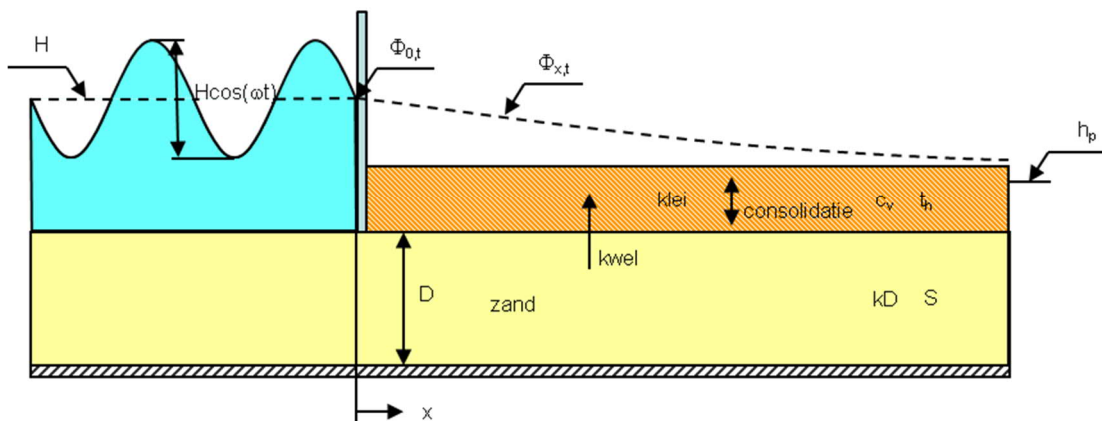
H = buitenwaterstand (randvoorwaarde rivier-/zeezijde) eveneens t.o.v. polderpeil

λ = lekfactor

x = afstand tot intreepunt

- Bepaal de stijghoogte en bijbehorende dempingsfactor bij het uittreepunt (gelegen op 30 m polderwaarts van de teen van de dijk) bij niet-stationaire stroming.

Hiervoor kan de onderstaande configuratie toegepast worden, voor een dwarsprofiel met een getij op de rivier of zee.



Figuur 6: schematische geometrie dijk zonder voorland

De respons in de watervoerende zandlaag is dan te beschrijven als

$$\Phi[x,t] = H \exp[-x / \lambda_\omega] \cos[\omega t - ax / \lambda_\omega]$$

Waarin:

$\Phi[x,t]$ = stijghoogte in de watervoerende zandlaag ten opzichte van de stijghoogte bij de gemiddelde waterstand (halftijstand)

H = halve amplitude van het getij bij het intreepunt.

λ_ω = cyclische lekfactor

x = afstand van uit het intreepunt (buitenteen van de dijk)

t = tijd

ω = hoeksnelheid van het getij = $2\pi/T$

T = golfperiode

De term $\Phi[x,t] = H \exp[-x / \lambda_\omega]$ geeft de respons op een afstand x uit het intreepunt.

De term $\cos[\omega t - ax / \lambda_\omega]$ geeft de faseverschuiving in de tijd weer. Op basis van metingen, o.a. van Texel is gebleken dat de fase verschuiving te verwaarlozen is.

Bepaling stationaire lekfactor

Voor de stationaire lekfactor geldt

$$\lambda = x / \ln[\operatorname{tg} \theta]$$

$$\operatorname{tg} \theta = \Phi_{\text{gemiddeld getij}} / \Phi_{\text{gemiddelde peilbuis}}$$

Ter plaatse van de peilbuis in de binnenteen geldt:

$$\operatorname{tg} \theta_1 = (0,29 - -1,10) / (-0,15 - -1,10) = 1,39 / 0,95 = 1,46$$

Ter plaatse van de peilbuis in de polder geldt:

$$\operatorname{tg} \theta_2 = (0,29 - -1,10) / (-0,41 - -1,10) = 1,39 / 0,69 = 2,01$$

De afstand tussen de peilbuizen is 80 m.

$$80 \text{ m} = x_2 - x_1$$

Met twee vergelijkingen en 2 onbekenden zijn x en λ oplossen.

De afstand van de peilbuis in de teen tot het (fictieve) intreepunt is $x_1 = 95 \text{ m}$.

De afstand van de peilbuis in de polder tot het (fictieve) intreepunt is $x_2 = 175 \text{ m}$

De stationaire lekfactor is $\lambda = 250 \text{ m}$.

Bepaling cyclische lekfactor

Voor de cyclische lekfactor geldt:

$$\lambda_{\omega} = x / \ln[\operatorname{tg} \theta]$$

$$\operatorname{tg} \theta = \Phi_{\text{getij}} / \Phi_{\text{peilbuis}}$$

Ter plaatse van de peilbuis in de binnenteen geldt:

$$\operatorname{tg} \theta_1 \text{ peilbuis teen is } 1,54 / 0,23 = 6,7$$

Ter plaatse van de peilbuis in de polder geldt:

$$\operatorname{tg} \theta_2 \text{ peilbuis polder is } 1,54 / 0,09 = 17,1$$

De afstand tussen de peilbuizen is 80 m.

$$80 \text{ m} = x_2 - x_1$$

Met twee vergelijkingen en 2 onbekenden zijn x en λ_{ω} oplossen.

De afstand van de peilbuis in de teen tot het (fictieve) intreepunt is $x_1 = 162 \text{ m}$.

De afstand van de peilbuis in de polder tot het (fictieve) intreepunt is $x_2 = 242 \text{ m}$

De cyclische lekfactor is $\lambda_{\omega} = 85 \text{ m}$.

Bepaling cyclische lekfactor bij toetspeil

Voor de omrekening van de lekfactor die behoort bij de duur van een getij naar de lekfactor die hoort bij de duur van de hoogwater-golf geldt:

$$\lambda_{\Omega} = \lambda_{\omega}^4 \sqrt{T_{\Omega} / T_{\omega}}$$

De stormduur is 35 uur, dit is een halve golfperiode

De cyclische lekfactor voor een hoogwater-golf van 35 uur bedraagt:

$$\lambda_{\Omega} = 85^4 \sqrt{\frac{35}{6,2}} = 131$$

Bepaling stijghoogte bij het uittredepunt bij stationaire stroming:

Als de waterstand stationair zou zijn, dan geldt:

$$\Phi[x,t] = H \exp[-x / \lambda]$$

H is het verval over de waterkering ten opzichte van polderpeil.

H = toetspeil - polderpeil

$$H = 4,50 \text{ m} + 1,10 \text{ m} = 5,60 \text{ m}$$

Stel het uittreepunt bevindt zich 30 m polderwaarts van de teen van de dijk. Ter plaatse van het uittreepunt is $x = 95 \text{ m} + 30 \text{ m} = 125 \text{ m}$

De stijghoogte ter plaatse van het uittreepunt $\Phi = \text{NAP} + 2,30 \text{ m}$

Bepaling stijghoogte bij het uittredepunt bij niet-stationaire stroming:

Het verloop van stijghoogte Φ is opgebouwd uit twee delen:

Een stationair deel: De stijghoogte bij de gemiddelde waterstand (halftijstand dagelijks getij).

De gemiddelde waterstand is peil A volgens Figuur 4.

Een niet-stationair deel: De waterstandsverhoging en duur als gevolg van de ontwerp storm. Het waterstandsverloop is aangegeven in Figuur 4.

Voor het stationaire deel geldt:

$$\Phi[x,t] = H \exp[-x / \lambda]$$

H is het verval over de waterkering ten opzichte van polderpeil.

H = gemiddeld getij - polderpeil.

$$H = 0,29 \text{ m} + 1,10 \text{ m} = 1,39 \text{ m}.$$

Stel het uittreepunt bevindt zich 30 m polderwaarts van de teen van de dijk. Ter plaatse van het uittreepunt is $x = 95 \text{ m} + 30 \text{ m} = 125 \text{ m}$.

De stijghoogte ter plaatse van het uittreepunt $\Phi = \text{NAP} - 0,26 \text{ m}$

Voor het niet-stationaire deel geldt:

$$\Phi[x,t] = H \exp[-x / \lambda_w]$$

H is de amplitude van het maatgevend hoogwater.

H = toetspeil - gemiddeld getij

$$H = 4,50 \text{ m} - 0,29 \text{ m} = 4,21 \text{ m}$$

Ter plaatse van het uittreepunt is $x = 162 \text{ m} + 30 \text{ m} = 192 \text{ m}$.

De respons ter plaatse van het uittreepunt $\Phi = 0,98 \text{ m}$.

De stijghoogte ter plaatse van het uittreepunt is de stijghoogte van het stationaire deel plus de respons van het niet stationaire deel. De totale stijghoogte ter plaatse van het uittreepunt $\Phi = \text{NAP} + 0,72 \text{ m}$.

De dempingsfactor wordt bepaald volgens:

$$r_{exit} = \frac{\varphi_{exit} - h_{exit}}{h - h_{exit}} = \frac{0.72 - -1}{4.5 - -1} = 0.31$$