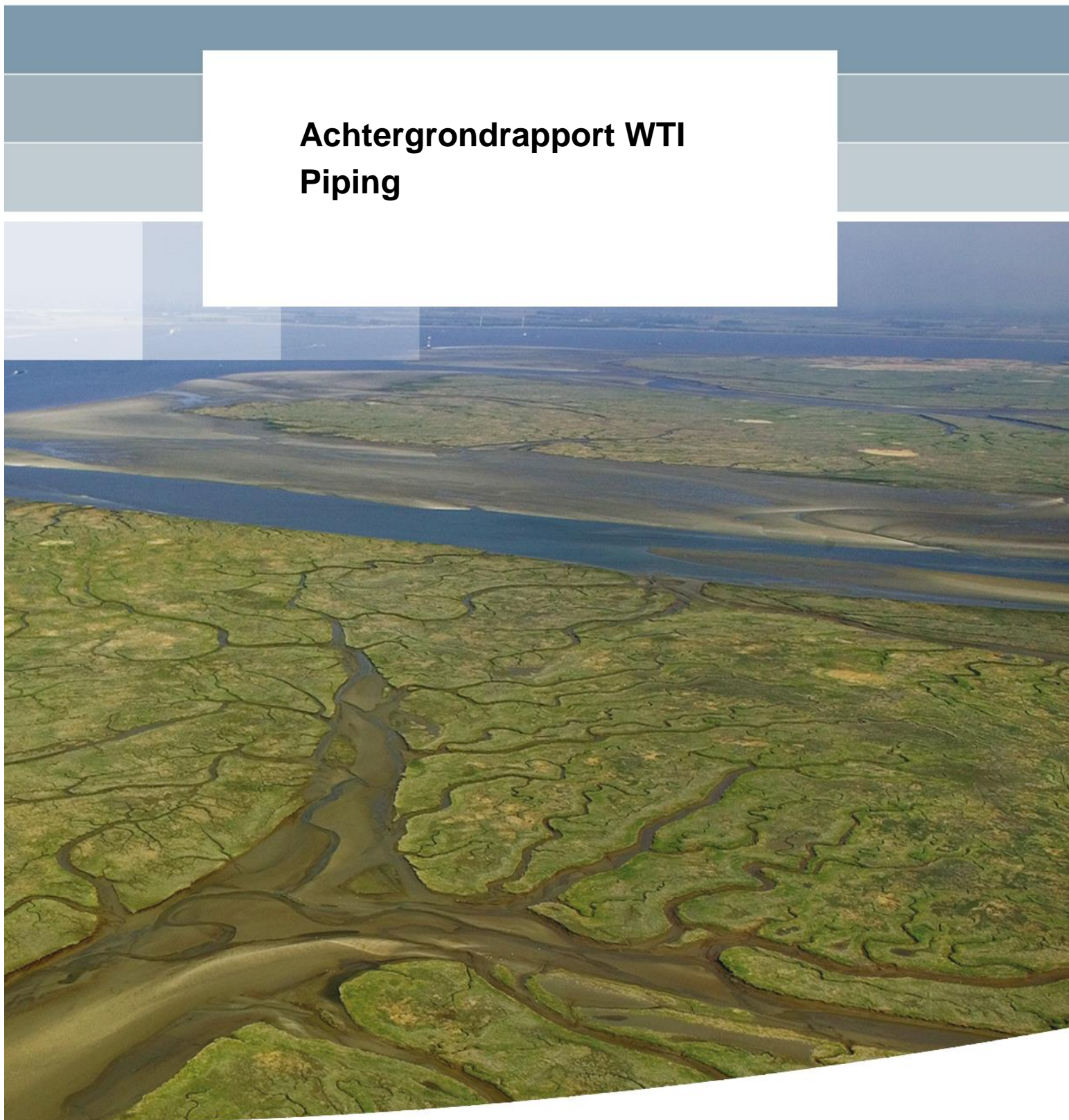


**Achtergrondrapport WTI
Piping**



Achtergrondrapport WTI Piping

Esther Rosenbrand

1230086-021

Titel

Achtergrondrapport WTI Piping

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL	1230086-021	1230086-021-GEO-0001	69

Trefwoorden

Opbarsten, heave, terugschrijdende erosie, piping, d70, doorlatendheid, kritiek gradiënt.

Samenvatting

Deze rapportage geeft een overzicht over alle binnen de onderzoeksprogramma's Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) en Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI, voormaals WTI) uitgevoerde onderzoeken, rapportages en notities met betrekking tot het beoordelingsspoor piping. Per rapportage wordt aangegeven op welke deelaspecten van het pipingfenomeen het desbetreffende onderzoek is gericht, waarbij de doelstelling, een beknopte samenvatting en de voornaamste conclusies worden gepresenteerd. Veel van de kennis die opgedaan is in het SBW onderzoek heeft een plek gekregen in de bouwstenen van het WBI 2017. Voor ieder onderwerp is aangegeven in welke WBI bouwstenen de kennis is geland.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	dec. 2016	dr.ir. E. Rosenbrand		ir. U. Förster		ir. L. Voogt	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding voor het SBW Piping onderzoek	1
1.2	Aanleiding voor het aanpassen van de pipingregel van Sellmeijer	1
1.3	Afwegingen en gemaakte keuzes	2
1.4	Uitgangspunten voor het WBI	3
1.5	Leeswijzer	3
2	Overzicht van bestaande kennis	5
2.1	SBW rapporten	6
2.1.1	SBW Piping - Hervalidatie piping. Identificatie en plan van aanpak witte vlekken	6
2.1.2	SBW Piping - Hervalidatie piping. Inventarisatie gegevens zandmeevoerende wellen in de praktijk.	7
2.1.3	SBW Piping - Hervalidatie piping. Invloed van heterogeniteit op het pipingproces	7
2.1.4	SBW Piping - Hervalidatie piping. Inventarisatie COW proeven	7
2.1.5	SBW Piping - Hervalidatie piping. Inventarisatie buitenlandse kennis	8
2.1.6	SBW Piping - Hervalidatie piping. Hondsbroeksche Pleij	8
2.1.7	SBW Piping - Hervalidatie piping. A. Vooronderzoek kleine schaal laboratoriumproeven (A1. Literatuurstudie)	9
2.1.8	SBW Piping - Hervalidatie piping. A2. Kleinschalige laboratoriumproeven - Factual Reports 1-3	9
2.1.9	SBW Piping - Hervalidatie piping. B3. Analyse kleinschalige laboratoriumproeven	9
2.1.10	SBW Piping - Hervalidatie piping. Centrifugeproeven deel 1 - Factual Reports kleine centrifuge proeven en delen 2.1, 2.2 en 2.3 Factual reports grote centrifuge proeven	10
2.1.11	SBW Piping - Hervalidatie piping. A4. Analyse Centrifugeproeven	10
2.1.12	SBW Piping - Hervalidatie piping. A5. Ontwerp medium-scale proef	11
2.1.13	SBW Piping - Hervalidatie piping. B1. Bureaustudie zandeigenschappen (factual report) (Zandsoorten gebruikt in kleinschalige labproeven)	11
2.1.14	SBW Piping - Hervalidatie piping. B4. Methode voor bepaling zandeigenschappen voor piping	12
2.1.15	SBW Piping - Hervalidatie piping. C1. Bureaustudie schematisatie doorlatendheid voor pipinganalyse	12
2.1.16	SBW Piping - Hervalidatie piping. C2. Schematisatiehandreiking watervoerende zandlaag	12
2.1.17	SBW Piping - Hervalidatie piping. C3 Modelleren van het pipingproces in MSeep	13
2.1.18	SBW Piping - Hervalidatie piping. E. Evaluatie 0,3d rekenregel	13
2.1.19	SBW Piping - Hervalidatie piping. G. Opstellen 5 praktijkcases. G1. Verzamelen gegevens	14
2.1.20	SBW Piping - Hervalidatie piping. G. Opstellen 5 praktijkcases. G2. Berekeningsresultaten inventarisaties G1	14
2.1.21	SBW Piping - Hervalidatie piping. G. Opstellen 5 praktijkcases. G3. Beoordeling en analyse methodiek	15

2.1.22	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP1. Ontwikkelen nieuwe rekenregel Kleine schaalproeven: Relatieve dichtheid (factual reports)	HP1.1. 15
2.1.23	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP1. Ontwikkelen nieuwe rekenregel	16
2.1.24	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP2.1. Medium-schaalproeven (factual reports)	16
2.1.25	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP2.2 Medium-schaalproeven (analyserapport)	16
2.1.26	SBW Piping- Hervalidatie piping HP3. gedrag van klei	17
2.1.27	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP4. 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen onder een dijk ter bepaling piping gevoeligheid	18
2.1.28	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.1. Draaiboek IJkdijk full-scale piping proef18	
2.1.29	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.2a. Medium-scale proeven voor IJkdijk (factual report)	19
2.1.30	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.2 Medium-scale proeven voor IJkdijk (analyserapport)	19
2.1.31	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.3 Predictie full-scale proef	19
2.1.32	SBW Piping - Hervalidatie Piping. HP5.4. Inrichting en aanleg full-scale experiment	20
2.1.33	SBW Piping – Hervalidatie Piping HP 5.4b Full scale proeven (factual report proef 1 t/m factual report proef 4)	20
2.1.34	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.5a Analyse en validatie full-scale proeven	21
2.1.35	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.5b Samenvatting resultaten theoretisch onderzoek SBW Piping voor WTI (Notitie aangepaste piping rekenregel voor WTI) 22	
2.1.36	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP6. Internationale audit	22
2.1.37	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP8a Veiligheidsconcept Piping Grondslagen, methodes en stappen voor het afleiden van een aangepaste toetsregel voor het mechanisme piping	23
2.1.38	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP8b Kalibratie van de veiligheidsfactoren	23
2.1.39	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP.9. Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen Herziene versie 2011	24
2.1.40	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP11a. Medium-schaalproeven t.b.v. afbakening rekenregel	24
2.1.41	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP11b. Medium-schaalproeven t.b.v. afbakening rekenregel	24
2.1.42	SBW Piping - Hervalidatie piping. HP12. Afbakening relevantie displacement piping bij losse pakking	25
2.1.43	SBW Piping Kunstwerken. KW1. Inventarisatie piping bij waterkerende kunstwerken.	25
2.1.44	SBW Piping Kunstwerken. KW2 Beschouwing grondwaterstroming rond kunstwerken in relatie tot verlies aan waterkerende of waterscheidende functies	26
2.1.45	SBW Piping Kunstwerken. KW3. Piping in cohesief materiaal literatuurstudie	26
2.1.46	SBW Piping Kunstwerken. KW4a. Factual Reports Laboratorium experimenten Fase 1	27
2.1.47	SBW Piping Kunstwerken. KW4b. Factual Reports Laboratorium experimenten Fase 2	27

2.1.48	SBW Piping Kunstwerken. KW5. Simulatie grondwaterstroming sluis Hasselt. 28	
2.1.49	SBW Piping Kunstwerken. KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken.	28
2.1.50	SBW Piping Kunstwerken. KW8. Rapport Gevoeligheidsanalyse grondwaterstroming	29
2.1.51	SBW Piping Kunstwerken. KW9. Analyse kleine schaal proeven	30
2.1.52	SBW Piping. 2A. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregel, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit. Plan van aanpak	30
2.1.53	SBW Piping. 2B. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregel, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit. Eindrapport	31
2.1.54	SBW Piping. 3A Onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting.	32
2.1.55	SBW Piping. 3B Onderzoeksrapport macro-heterogeniteit in verticale richting	32
2.1.56	SBW Piping Kunstwerken. 4. Bureaustudie inventarisatie problemen en oplossingen piping bij historische kunstwerken.	33
2.1.57	SBW Piping 5A: Model development for initiation of piping	34
2.1.58	SBW Piping 5B: Progression of piping	34
2.1.59	SBW Piping. 6A. Evaluatie monitoringstechnieken	35
2.1.60	SBW Piping. 6B. Modelling transient groundwater flow and piping under dikes and dams	35
2.1.61	SBW Piping. 6C. Invloed van demping van de belasting bij piping	36
2.2	Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, 2012	36
2.2.1	Doel van het rapport	36
2.2.2	Beschrijving van het rapport	36
2.2.3	Conclusies	37
2.3	WTI/WBI 2017 rapporten	37
2.3.1	WTI 2017 Piping: Probabilistic piping model in WTI 2017. Uplift, Heave and Piping	37
2.3.2	WTI 2017 Piping: Safety Assessment for Piping in WTI 2017 Report progression	37
2.3.3	WTI 2017 Piping: Modeling Groundwater Flow and Piping under Dikes and Dams. Model Validation and Verification.	38
2.3.4	WTI 2017 Piping: KPP 2013 Cluster 3; Toetsregels piping. Onderzoek invloed tijdsafhankelijkheid	38
2.3.5	WTI 2017 Piping: Self Potential monitoring van piping	39
2.3.6	WTI 2017 Piping: Research and Development of Flood Defense Assessment Tools for Piping in WTI 2017 - Report 12. Heterogeneity	39
2.3.7	WTI 2017 Piping: Calibration of the L/H ratio on behalf of a level 1 assessment rule ('eenvoudig') for Piping WTI 2017	40
2.3.8	WTI 2017 Piping: Beschrijving mechanismemodel voor uplift, heave en piping voor toetslaag 2a	41
2.3.9	WTI 2017 Piping: Bepaling invoerparameters in het toetsspoor piping in WTI2017 - Keuze invoerparameter k voor toetslaag 2a v2	41
2.3.10	WTI 2017 Piping: Bepaling invoerparameters in het toetsspoor piping in WTI2017 - Keuze invoerparameter d70 voor toetslaag 2a	42
2.3.11	WTI 2017 Piping: Schematiseringshandleiding faalmechanismen WTI 2017 Piping versie 1 (concept)	42
2.3.12	WTI 2017 Piping: Flood Defense Assessment Tools for Piping in WTI 2017 - Report 9b. Groundwater Flow Simulator DGFlow 3D Validation piping module 43	

2.3.13	WTI 2017 Piping: Field test measurement Self potential for piping localization: Modelling and testing (interim report, draft)	43
2.3.14	WTI 2017 Piping: Calibration of the L-H ratio on behalf of a level 1 assessment rule for Piping	44
2.3.15	WTI 2017 Piping: Use of the L/H ratio rule	44
2.3.16	WTI 2017 Piping: Toetsregel Piping. Piping and transient groundwater flow (report including case studies)	45
2.3.17	WTI 2017 Piping: Fenomenologische beschrijving faalmechanisme piping	45
2.3.18	WTI 2017 Piping: Schematiseringshandleiding WTI 2017. Faalmechanisme Piping bij dijken	46
2.3.19	WTI 2017 Piping: WTI Verschilanalyse Piping	46
2.3.20	WTI 2017 Piping: Toetsregel Piping. Piping and transient groundwater flow (report including primary erosion)	47
2.3.21	WTI 2017 Piping: Monitoring Piping met Spontane Potentiaal methode. Test locatie Herxen	48
2.3.22	WTI 2017 Piping: Fenomenologische beschrijving	48
2.3.23	WTI 2017 Piping: Memo Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte	49
2.3.24	WTI 2017 Piping: Critical vertical gradients in piping. A preliminary sensitivity study concerning the 0.3-D rule	50
2.3.25	WTI 2017 Piping: Update verschilanalyse piping – invloed aangepaste standaardafwijking ter bepaling karakteristieke waarde doorlatendheid en d_{70}	50
2.3.26	WTI 2017 Piping: Effect of time-dependence on piping safety assessment (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)	51
2.3.27	WTI 2017 Piping: Bijlage 2: Toelichting snelheid pipe ontwikkeling. (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)	51
2.3.28	WTI 2017 Piping: Plan van aanpak voor bepaling van representatieve doorlatendheid voor WTI piping kernel	52
2.3.29	WTI 2017 Piping: Sub-bijlage 5A: Optreden van piping in getijdenafzettingen (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)	53
2.3.30	WTI 2017 Piping: Sub-bijlage 5B: Spreiding k_h -waarden voor stochastische analyse faalkans piping (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)	53
2.3.31	WTI 2017 Piping: Sub-bijlage 5C: benadering van de spreiding van de d_{70} van zandpakketten voor piping evaluatie (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)	54
2.3.32	WTI 2017 Piping: Handelingsperspectief toetsschema piping	54
3	Aan piping gerelateerde toeleverende rapporten uit andere WTI clusters	57
3.1	Rapporten uit cluster onzekerheden	57
3.1.1	WTI 2017 Cluster C, piping failure mechanism. Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping	57
3.1.2	Memorandum Kalibratie Piping- WBI2017. Effect van verschillende normen	57
3.2	Rapporten uit cluster datamanagement	58
4	WBI Bouwstenen waarin de kennis m.b.t. piping is beland	59
4.1	Afleiding van beslisregels	67
4.2	Wat is er anders in WBI t.o.v. ORZW	68
5	Referentielijst	69

1 Inleiding

Het voorliggende rapport heeft tot doel de lezer een inzicht te geven in huidige kennis op het gebied van piping, en het onderzoek dat daaraan ten grondslag ligt.

In dit hoofdstuk worden de aanleiding tot het nader onderzoeken van het pipingfenomeen, tot het wijzigen van de rekenregel behandeld. De gemaakte keuzes zijn samengevat, evenals de uitgangspunten voor de beoordeling in het WBI. De leeswijzer in par 1.5 geeft de lezer een snel inzicht in de opbouw van het rapport.

Met betrekking tot gehanteerde terminologie zijn er in de loop der tijd enige wijzigingen opgetreden waar de lezer zich van bewust dient te zijn bij het lezen van dit rapport en de achterliggende rapportages. Zo hanteren de rapportages de term Wettelijk ToetsInstrumentarium (WTI), in plaats van het huidige Wettelijke BeoordelingsInstrumentarium (WBI), en werd gesproken van Ringtoets, in plaats van het huidige RisKeer.

1.1 Aanleiding voor het SBW Piping onderzoek

Het doel van het Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) onderzoek was: hervalidering van piping toetsregels, het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsregels, het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsregels en deze onzekerheden zo mogelijk te verkleinen of elimineren (ORZW, 2012)

De aanleiding voor het SBW onderzoek was dat:

- uit het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK-I en VNK-II) gebleken is dat piping in alle onderzochte dijkringen een relatief belangrijke bijdrage levert aan de overstromingskans;
- dat de resultaten van VNK-I niet aansluiten bij de verwachting van de beheerders;
- dat voor veel situaties onvoldoende vertrouwen is in de uitkomsten van pipingberekeningen;
- dat zowel de rekenregel van Bligh als de maximale begrenzing aan het kritieke verhang voor piping van 1/18 (tevens gebaseerd op Bligh), die in het VTV2006 in de eenvoudige toetsing is voorgeschreven, niet altijd conservatiever blijkt ten opzichte van de meer gedetailleerde regel van Sellmeijer. De in Nederland toegepaste rekenregels ter beoordeling van de veiligheid tegen piping zijn minder streng vergeleken met andere landen, zoals de Verenigde Staten.

Bovendien was de vraag

- of het pipingmechanisme correct gemodelleerd is en
- of het probleem correct geschematiseerd is.

Daarom zijn binnen het SBW onderzoeksproject SBW Piping de onzekerheden binnen de bestaande toetsingsregel in kaart gebracht en is de kwaliteit van het rekenmodel verbeterd.

1.2 Aanleiding voor het aanpassen van de pipingregel van Sellmeijer

De ENW pipingcommissie heeft in haar rapport "Piping - Realiteit of rekenfout?" (ENW, 2010) o.a. er naar gekeken in hoeverre door het faalmechanisme piping sprake is van een

daadwerkelijk tekort in de veiligheid van de waterkeringen in het rivierengebied. Ook heeft de commissie beschreven hoe met de pipingproblematiek binnen de normeringsdiscussie en in de ontwikkeling van het toets- en ontwerpinstrumentarium rekening moet worden gehouden.

De ENW piping commissie geeft o.a. de volgende conclusies en aanbevelingen:

- Piping is een realiteit en kan tot een dijkdoorbraak leiden. Zowel historische gevallen in Nederland, recente doorbraken in het buitenland, als wetenschappelijk onderzoek tonen dit aan.
- Het zogenaamde lengte-effect is een fysieke realiteit. Het lengte-effect is van invloed op die faalmechanismen, waarbij de sterkte wordt bepaald door grondeigenschappen die variëren over de lengte van de kering. De kans dat piping optreedt op ringniveau wordt door het lengte-effect 5 tot 10 keer hoger dan de kans op piping van een dijkvak.
- De in Nederland gebruikte rekenmodellen en rekenregels voor piping zijn in vergelijking met het buitenland soepel te noemen. De ontwerp- en toetsregels zijn in veel landen erop gericht om zandmeevoerende wellen te voorkomen, terwijl deze in Nederland impliciet worden toegestaan. De in Nederland gebruikte regels zijn erop gericht om doorgaande erosiekanalen onder de dijk te voorkomen. Dit is echter een veel minder streng criterium.
- Het is normaliter gebruikelijk dat een eenvoudige toetsregel strenger is dan een meer geavanceerde. Dit blijkt in het VTV2006 niet het geval te zijn. De dijkvakken met de hoogste kansen op piping uit de systeemtoets VNK zouden worden afgekeurd indien met de rekenregel van Sellmeijer volgens Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen (TAW, 1999) wordt gerekend in plaats van de eenvoudiger rekenregel van Bligh.
- Het instrumentarium van VNK en toekomstige toetsing moeten op elkaar worden afgestemd. Beiden moeten op dezelfde principes berusten en in die zin consistent zijn. Na een besluit over een aanvaardbaar veiligheidsniveau kunnen eisen voor de toetsing met het VNK instrumentarium worden afgeleid en gekalibreerd.

1.3 Afwegingen en gemaakte keuzes

- Met de empirische rekenregel van Bligh ontworpen dijken voldoen niet altijd aan de nieuwe toetsregel van Sellmeijer. De benodigde kwelweglengte neemt toe als bij voorgaande toets- en ontwerpberoeeningen de bovengrens van $18 \cdot \Delta H$ voor het toepassingsgebied van de regel van Sellmeijer is toegepast.
- De empirische rekenregel van Bligh houdt geen rekening met de schaalafhankelijkheid van de minimaal benodigde kwelweglengten. De regel van Bligh komt daarom te vervallen.
- Ook wordt niet meer een minimaal benodigde kwelweglengte van $L_{\min} = 10 \Delta H$ aangehouden, als met de formule van Sellmeijer een kleinere waarde wordt gevonden. Deze ondergrens was ooit bij het toepassen van de regel van Sellmeijer uit voorzichtigheid bedacht, maar het is inmiddels experimenteel aangetoond en met voorspellingen bevestigd dat er ook waardes $L/\Delta H < 10$ kunnen voorkomen.
- Indien in eerdere analyses gebruik is gemaakt van de regel van Bligh, zijn in de volgende beoordelingsronde aanvullende gegevens over korreldiameter d_{70} en doorlatendheid van de watervoerende laag nodig.
- De eenvoudige toets in de vorm van een controle of de waterkering is ontworpen conform de vigerende normen betreft daarom ook alleen mogelijke toekomstige ontwerpen op basis van de nieuwe rekenregel.

- Naar aanleiding van het advies van de ENW commissie Piping is voor de bepaling van de veiligheidsfactor een nieuwe veiligheidsfilosofie ontwikkeld die rekening houdt met zowel het zogenaamde lengte-effect als met de gebiedsnorm.

1.4 Uitgangspunten voor het WBI

De rapportage Uitgangspunten voor het WTI (2012) en Basisuitgangspunten WTI 2017 (2012) definiëren de uitgangspunten die zijn gehanteerd voor het leveren van het wettelijk beoordelingsinstrumentarium WBI voor het uitvoeren van de volgende beoordelingsronde. Er wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende uitgangspunten:

- Algemene uitgangspunten
- Uitgangspunten voor het beoordelingsproces
- Uitgangspunten voor de invulling van het technisch oordeel
- Basisuitgangspunten watersystemen en faalmechanismen.
- Uitgangspunten per watersysteem en faalmechanisme.
- Uitgangspunten voor softwareontwikkeling.

De eerste drie worden in Uitgangspunten voor het WTI behandeld, de tweede drie worden in Basisuitgangspunten behandeld. Voor de uitgangspunten en toelichting hierop wordt de lezer naar de documenten zelf verwezen.

De uitgangspunten betreffen randvoorwaarden, aannamen en belangrijke keuzen die samen het kader vormen voor de ontwikkeling van het beoordelingsinstrumentarium.

1.5 Leeswijzer

De lezer die snel een inzicht wil krijgen in het onderzoek dat ten grondslag ligt aan de behandeling van een bepaald onderwerp binnen het WBI 2017 kan hiervoor Tabel 4.1 raadplegen. Hierin wordt per onderwerp aangegeven welke rapportages uit hoofdstukken 2 en 0 daarop betrekking hebben, en in welke WBI bouwstenen dit onderwerp aan bod komt.

In hoofdstuk 0 worden de bestaande SBW en WTI/WBI rapportages uit het cluster Piping per stuk behandeld. De aanleiding voor het SBW onderzoek wordt geschetst in par 1.1. De SBW rapportages worden in par. 2.1 besproken. Par. 2.3 behandelt het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (ORZW) waarin veel kennis van het SBW onderzoek geland is. Het vervolgonderzoek in het WTI/WBI 2017 cluster Piping wordt in par. 2.3 besproken. Bijdragen van andere WTI/WBI clusters, onzekerheden en datamanagement, aan het pipingonderzoek worden in hoofdstuk 0 besproken.

Hoofdstuk 4 bevat naast de leeswijzer een toelichting op de vier beslisregels die zijn afgeleid voor het WBI in het kader van scherper toetsen op piping, par. 4.1. Tot slot zijn in par 4.1 de voornaamste verschillen tussen de WBI beoordeling op piping (semi-probabilistisch) en de toetsing volgens ORZW uitgelicht.

2 Overzicht van bestaande kennis

Dit hoofdstuk biedt een overzicht van de kennis die beschikbaar is gekomen in onderzoeksrapporten en notities m.b.t. het faalmechanisme piping binnen SBW/WBI2017 cluster piping. Eerst wordt de aanleiding van het SBW onderzoek toegelicht in par 1.1. Vervolgens worden de SBW rapportages in chronologische volgorde behandeld in par 2.1. Deze hebben als input gediend voor het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (ORZW) dat apart behandeld wordt in par 2.2. Vervolgens wordt het daarop volgende WTI (nu WBI) onderzoek behandeld in par 2.3.

In het voorliggende hoofdstuk wordt ieder document in een eigen paragraaf behandeld, waarbij de doelstelling, een beknopte samenvatting en de voornaamste conclusies worden gepresenteerd. Dit dient de lezer een eerste indruk te geven van de inhoud van de documenten, zodat hij kan beslissen het document al dan niet geheel te lezen indien hij de conclusies van het onderzoek wil gebruiken. Voor ieder rapport wordt aangegeven op welke onderwerpen het voornamelijk betrekking heeft.

In onderstaande lijst zijn de onderwerpen genummerd, dit zijn de onderwerp nummers waarnaar verwezen wordt. Bij rapporten die betrekking hebben op alle sub-onderwerpen van een hoofdonderwerp wordt alleen het hoofdonderwerp nummer genoemd.

- 1 Validatie en aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (algemeen, c.q. alle onderstaande onderwerpen)
 - a) Invloed van korrelgrootteverdeling en van d_{70}
 - b) Invloed van relatieve dichtheid
 - c) Invloed van schaal
 - d) Verloop van waterspanningen
- 2 Beschrijving mechanismen en processen (algemeen, c.q. alle onderstaande onderwerpen)
 - a) Uplift en/of heave
 - b) Welvorming
 - c) Terugschrijdende erosie
 - d) Ruimen en bezwijken
 - e) Invloed van uittredepunt (sloot, oppervlakte, gat)
 - f) Verloop van waterspanningen
 - g) Interne erosie (algemeen)
- 3 Toetsing (algemeen)
 - a) Kalibratie
- 4 Tijdsafhankelijkheid
 - a) Waterstandsverlopen (duur van hoogwater belasting)
 - b) Freatische c.q. elastische berging
 - c) Snelheid pipe ontwikkeling
 - d) Rol van cohesieve laag bij het in stand houden van pipingkanalen
- 5 Voorland meenemen (intrede- weerstand & kwelweglengte)
- 6 Veldobservaties (incl. full-scale proeven) en veldmetingen

- a) Monitoren pipingprocessen
 - b) Indicaties pipingprocessen in cases c.q. veldschaal proeven
 - c) Waterspanningsmeting
- 7 Effect van macro-heterogeniteit
- a) meerlagen, horizontale gelaagdheid
 - b) meerlagen verticale gelaagdheid
- 8 Piping en Heave bij kunstwerken (incl. achter- en onderloopsheid)
- 9 Eindige elementen berekeningen voor grondwaterstroming en piping
- 10 Schematisering
- a) Bodemopbouw
 - b) Doorlatendheid
 - c) Korrelgrootte

Noodzakelijkerwijs kan in dit rapport alleen ingegaan worden op hoofdlijnen van de onderliggende documenten, waardoor het mogelijk is dat niet aan alle onderwerpen die in de originele rapporten behandeld worden volledig recht gedaan wordt in de samenvattingen.

2.1 SBW rapporten

2.1.1 SBW Piping - Hervalidatie piping. Identificatie en plan van aanpak witte vlekken

Deltares rapport nr. 427070-0024; 2007

Betrekking op onderwerpen: 1, 2,4 a-e, 5, 6a 6b, 7a, 7b

2.1.1.1 Doel van het rapport

Het doel van dit rapport is om de bestaande kennis in kaart te brengen en om witte vlekken aan te geven, om zo tot een plan van aanpak te komen voor het onderzoek in het SBW project Hervalidatie piping.

2.1.1.2 Beschrijving van het rapport

Dit rapport is gebaseerd op de bevindingen van de rapporten beschreven in paragrafen 2.1.2 t/m 2.1.6. De resultaten van bestaande onderzoeken worden geïnventariseerd en geanalyseerd aan de hand van een matrix met daarin de onderwerpen (parameters en processen) die voor piping van invloed zijn.

Het rapport bevat een beschrijving van het piping proces waar de adviespraktijk op gebaseerd is en de witte vlekken hierin. Casestudies uit het binnen- en buitenland worden beschreven, evenals het reeds uitgevoerde laboratoriumonderzoek in Nederland. De resultaten van dit onderzoek, de als dominant bevonden parameters en het op dat moment inzicht in de modellen worden beschouwd en aan de hand hiervan wordt een overzicht van de bestaande witte vlekken wordt gegeven. Tot slot wordt een plan van aanpak voor het nieuw uit te voeren onderzoek beschreven.

2.1.1.3 Conclusies

Dit rapport biedt een overzicht van de op dit tijdstip bekende witte vlekken en een plan van aanpak om tot een beter inzicht in het piping mechanisme te komen en om een hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer uit te voeren.

2.1.2 SBW Piping - Hervalidatie piping. Inventarisatie gegevens zandmeevoerende wellen in de praktijk.

Deltares rapport nr. 427070-0034; 2007

Onderwerpen: 6b

2.1.2.1 Doel van het rapport

Dit rapport bevat een inventarisatie van de ervaringen met zandmeevoerende wellen bij waterkeringen in Nederland, op basis van het archief van GeoDelft (Deltares).

2.1.2.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport beschrijft situaties waarin een dijk is bezweken, situaties waarin een dijk dankzij mitigerende maatregelen niet is bezweken, situaties waarin wel wellen zijn waargenomen maar waar geen bezwijken of bijna bezwijken optrad, en gevallen waar tegen verwachtingen in geen zandmeevoerende wellen optraden.

2.1.2.3 Conclusies

Er zijn een groot aantal pipinggevallen in het binnen- en buitenland bekend. Meestal zijn deze slechts oppervlakkig geanalyseerd. Internationale ervaringen leren dat in Nederland gehanteerde rekenregels niet altijd veilig genoeg zijn.

2.1.3 SBW Piping - Hervalidatie piping. Invloed van heterogeniteit op het pipingproces

Deltares rapport nr. 427070-0035; 2007

Onderwerpen: 7a

2.1.3.1 Doel van het rapport

De invloed van horizontale macro-heterogeniteit op het pipingproces analyseren aan de hand van laboratoriumexperimenten.

2.1.3.2 Beschrijving van het rapport

Dit rapport beschrijft laboratorium pipingproeven waarbij lagen grover en fijner zand haaks op het pad van de pipe lopen (horizontale macro-heterogeniteit). De experimentele opbouw wordt beschreven en de metingen en observaties worden gepresenteerd.

2.1.3.3 Conclusies

Gemiddeld genomen leveren de heterogene zanden een sterker pakket (hoger kritiek verval) dan de homogene zanden op. De afzonderlijke deelvervalen zijn redelijk te voorspellen met de rekenregel van Sellmeijer, het totale verval dat het pakket kan weerstaan is afhankelijk van de korrelgroottes van beide zanden en van de totale doorlatendheid van het pakket. De totale doorlatendheid wordt bepaald door de mate van geulvorming in de eerste zandlaag. De ontwikkeling van de geul bepaald het kritieke verval en aanbevolen wordt om hier meer onderzoek naar te doen. De proeven uit dit rapport worden tevens in het hoofdrapport behandeld (par 2.1.1 van dit rapport).

2.1.4 SBW Piping - Hervalidatie piping. Inventarisatie COW proeven

Deltares rapport nr. 427070-0036; 2007

Onderwerpen: 1 a - c

2.1.4.1 *Doel van het rapport*

Een overzicht bieden van het Nederlandse laboratoriumonderzoek in het kader van het Centrum Onderzoek Waterkeringen (COW) in de jaren 1974-1982.

2.1.4.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport bevat een beschrijving van de uitgevoerde proeven en de resultaten: het kritisch verval, de observaties en de betrouwbaarheid van de resultaten.

2.1.4.3 *Conclusies*

In dit rapport worden proeven beschreven, er worden in dit rapport echter geen conclusies getrokken. De proeven uit dit rapport worden in het hoofdrapport behandeld (par 2.1.1 van dit rapport).

2.1.5 **SBW Piping - Hervalidatie piping. Inventarisatie buitenlandse kennis**

Deltares rapport nr. 427070-0037; 2007

Onderwerpen: 2a, 2b, 2c, 2g

2.1.5.1 *Doel van het rapport*

Een overzicht bieden van buitenlandse kennis op het gebied van erosieverschijnselen die zich in en onder een dijklichaam kunnen afspeelen.

2.1.5.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport beschrijft beschikbare buitenlandse bronnen van kennis (uit 13 landen) over interne erosie met nadruk op het pipingproces zoals dat in de Nederlandse praktijk wordt beschouwd. Twee buitenlandse richtlijnen met betrekking op interne erosie zijn genoemd al was hier niet expliciet naar gezocht. Onderzoek dat op het moment van het schrijven van het rapport gaande was wordt ook benoemd.

2.1.5.3 *Conclusies*

In dit rapport wordt buitenlandse kennis beschreven, conclusies op basis hiervan worden in het hoofdrapport behandeld (par. 2.1.1 van dit rapport).

2.1.6 **SBW Piping - Hervalidatie piping. Hondsbroeksche Pleij**

Deltares rapport nr. 427070-0039; 2007

Onderwerpen: 6b, 9

2.1.6.1 *Doel van het rapport*

Te bepalen of de in 1995 geobserveerde zandmeevoerende wellen bij de Pleijdijk in de Hondsbroeksche Pleij bij Westervoort een manifestatie van piping waren.

2.1.6.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt met behulp van berekeningen met het eindige elementen grondwaterstromingsprogramma MSeep en de beschikbare data (ondergrond en waterstanden) berekend of het kritieke verval tijdens het hoogwater in 1995 overschreden werd.

2.1.6.3 *Conclusies*

Grote zandmeevoerende wellen die op 1 februari 1995 op een afstand van 50 m van de Pleijdijk in een sloot zijn aangetroffen, waren zeer waarschijnlijk een directe manifestatie van piping.

2.1.7 SBW Piping - Hervalidatie piping. A. Vooronderzoek kleine schaal laboratoriumproeven (A1. Literatuurstudie)

Deltares rapport nr. 433380-0011; 2008

Onderwerpen: 1 a - c

2.1.7.1 Doel van het rapport

In dit rapport wordt de onderzoekopstelling voor de kleine schaal laboratoriumproeven bepaald.

2.1.7.2 Beschrijving van het rapport

Dit rapport bevat de resultaten van bureaustudies voor kleine laboratoriumproeven. Er wordt ingegaan op de pipingprocessen en op de rol van riviermorfologie. De modelopstelling die in 2007 is gebruikt voor het uitvoeren van kijkproeven wordt geanalyseerd, en er worden verbeteringen voorgesteld voor het uit te voeren SBW onderzoek. Tevens worden korte studies gerapporteerd waarin onderzocht is of de geobserveerde processen ook representatieve pipingprocessen zijn. De bevindingen uit dit rapport zijn toegepast in de kleine schaal laboratorium proeven waarvan de rapportages behandeld zijn in par 2.1.8 en 2.1.9.

2.1.7.3 Conclusies

Zandtransport door pipingkanaaltjes is wezenlijk anders dan zandtransport in rivieren. Piping kan bestudeerd worden aan de hand van kleine schaal proeven. Het potentiaalverloop onder de perspexplaat kan worden vergeleken met het potentiaalverloop onder een dijk en dat het verhang groot genoeg is om korrels in beweging te laten komen. Het schaaleffect, dat in de rekenregel van Sellmeijer is meegenomen, kan niet met de kleine schaalproeven worden gevalideerd. Hiervoor zijn ook grotere schaalproeven nodig.

2.1.8 SBW Piping - Hervalidatie piping. A2. Kleinschalige laboratoriumproeven - Factual Reports 1-3

Deltares rapport nrs. (een rapport heeft geen nr.), 433380-0013 en 433380-0014; 2008

Onderwerpen: 1b, 1a en 1d respectievelijk

2.1.8.1 Doel van het rapport

De kleinschalige laboratoriumproeven zijn uitgevoerd om inzicht te krijgen in de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden, en om handvaten voor vervolgonderzoek te bieden.

2.1.8.2 Beschrijving van het rapport

Deze rapporten zijn factual reports van drie proevenseries. In de proevenseries worden respectievelijk de invloed van relatieve dichtheid, de invloed van andere zandkarakteristieken (korrelgrootte, korrelvorm, uniformiteit) en het verloop van de waterspanningen ten gevolge van kanaalvorming onderzocht.

2.1.8.3 Conclusies

De resultaten zijn geanalyseerd in het rapport dat in par. 2.1.9 behandeld wordt.

2.1.9 SBW Piping - Hervalidatie piping. B3. Analyse kleinschalige laboratoriumproeven

Deltares rapport nr. 1001449-008-GEO-0001; 2008

Onderwerpen: 1b, 1a, 1d, 2c en 2f.

2.1.9.1 Doel van het rapport

Inzicht bieden in de processen van kanaalvorming die tot bezwijken leiden, en handvaten bieden voor nadere invulling SBW onderzoek.

2.1.9.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport worden de processen die in de kleine schaal laboratoriumproeven zijn waargenomen/gemeten kwalitatief en kwantitatief geanalyseerd. De relatie tussen de processen en de zandeigenschappen wordt beschouwd. Aan de hand hiervan worden conclusies getrokken met betrekking op de maatgevende pipingprocessen en de relevante zandeigenschappen en worden aanbevelingen gedaan voor een hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer.

2.1.9.3 Conclusies

Piping is niet eenvoudig te beschrijven, er zijn meerdere processen waargenomen die zich niet met een model zullen laten beschrijven. Uit proeven volgt een sterke relatie tussen de pakkingsdichtheid en het piping proces. Bij een losse pakking treedt piping van de bovenstroomse zijde op. Metingen van waterspanningen geeft inzicht in het pipingproces onder een kleilaag. Aanbevelingen worden gedaan voor de hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer.

2.1.10 SBW Piping - Hervalidatie piping. Centrifugeproeven deel 1 - Factual Reports kleine centrifuge proeven en delen 2.1, 2.2 en 2.3 Factual reports grote centrifuge proeven

Deltares rapport nrs. 1001450-000-GEO-0001 en 1001450-004-GEO-0001 t/m 1001450-004-GEO-0003; 2008

Onderwerpen: 2d en 4d

2.1.10.1 Doel van het rapport

Inzicht bieden in hoe kleine kanaaltjes kunnen leiden tot het bezwijken van de dijk, door de sterkte eigenschappen van klei correct te modelleren in de centrifuge proeven.

2.1.10.2 Beschrijving van het rapport

Deel 1 bevat de factual reports van de vier kleine schaal centrifuge proeven die zijn uitgevoerd om de grote schaal centrifuge proeven te ontwerpen. Delen 2.1 t/m 2.3 bevatten de factual reports voor de drie grote schaal centrifuge proeven. Ieder factual report bevat een beschrijving van de proefopstelling, de uitvoering van de proef, de resultaten en conclusies en aanbevelingen.

2.1.10.3 Conclusies

Resultaten uit deze rapporten zijn geanalyseerd in het rapport dat behandeld wordt in par 2.1.11.

2.1.11 SBW Piping - Hervalidatie piping. A4. Analyse Centrifugeproeven

Deltares rapport nr. 1001450-004-GEO-0005; 2008

Onderwerpen: 2d en 4d

2.1.11.1 Doel van het rapport

De voorbereidende kleine schaal centrifugeproeven zijn uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in het verscalen van het pipingproces in de geocentrifuge. De grote schaal proeven zijn uitgevoerd om inzicht te krijgen in het bezwijkgedrag van dijken onder invloed van piping.

2.1.11.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden de proefopstelling en de proeven beschreven. De waargenomen processen worden beschreven en de metingen worden geanalyseerd.

2.1.11.3 *Conclusies*

De conclusies die op basis hiervan getrokken worden zijn:

- dat er in de proeven significante reststerkte wordt waargenomen doordat inzakken van de dijk lijkt te leiden tot het dichtdrukken van de piping kanaaltjes, de vraag wordt opgeworpen in hoeverre dit in de praktijk ook zal gebeuren aangezien de kanaaltjes in de proevenserie relatief groot zijn. Aanbevolen wordt om op basis van Plaxis berekeningen vast te stellen in hoeverre dit plaatsvindt voor full-scale proeven en in de praktijk;
- het falen van de waterkering werd bepaald door verlies van sterkte in het zand, door toename in de waterspanningen bij een vrijwel gelijke gronddruk;
- monitoren van kanaaltjes was mogelijk met behulp van waterspanningsmeters op kleine afstand van de pipe.

2.1.12 **SBW Piping - Hervalidatie piping. A5. Ontwerp medium-scale proef**

Deltares rapport nr. 1001449-004-GEO-0003; 2008

Onderwerpen: 1c

2.1.12.1 *Doel van het rapport*

Het ontwerpen van een medium-scale laboratorium proef waarin het schaaleffect (van kleine schaal laboratorium proeven naar een full-scale experiment) goed bestudeerd kan worden.

2.1.12.2 *Beschrijving van het rapport*

De keuze van de (afmetingen van de) proefopstelling, de preparatie van het zandbed, het aanbrengen van het verval, en de uit te voeren monitoring worden behandeld. Ook wordt een proevenprogramma voorgesteld.

2.1.12.3 *Conclusies*

De medium-scale proeven kunnen het beste worden uitgevoerd met een nieuw te bouwen opstelling, niet met de huidige grote model bak of de brutusbak.

2.1.13 **SBW Piping - Hervalidatie piping. B1. Bureaustudie zandeigenschappen (factual report) (Zandsoorten gebruikt in kleinschalige labproeven)**

Deltares rapport nr. 433380-0012; 2008

Onderwerpen: 1a

2.1.13.1 *Doel van het rapport*

Omschrijven hoe de 11 zandsoorten die in de kleine schaal laboratorium proeven worden toegepast zijn bemonsterd en hoe zandkarakteristieken zijn bepaald.

2.1.13.2 *Beschrijving van het rapport*

Dit is een factual report.

2.1.13.3 *Conclusies*

Er zijn geen conclusies.

2.1.14 SBW Piping - Hervalidatie piping. B4. Methode voor bepaling zandeigenschappen voor piping

Deltares rapport nr. 1001449-027-GEO-0002; 2008

Onderwerpen:10

2.1.14.1 Doel van het rapport

Bepalen van het grond- en laboratoriumonderzoek dat nodig is om de zandeigenschappen die relevant zijn voor piping (met name korrelgrootte en doorlatendheid) vast te stellen.

2.1.14.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport geeft aan dat een voldoende groot gebied onderzocht dient te worden aangezien de waterspanningen door de doorlatendheid van het zand in de ruimere omgeving van de dijk beïnvloed wordt. De afmetingen en variatie binnen verschillende typen zandvoorkomens in Nederland worden kort behandeld en aan de hand hiervan wordt een strategie voorgesteld om in stappen te komen tot een schematisatie van de bodemopbouw en grondeigenschappen.

2.1.14.3 Conclusies

De strategie om te volgen om tot een schematisatie van de bodemopbouw en grondeigenschappen te komen bestaat uit het verkrijgen van een globaal overzicht van de situatie, het begrenzen van het gebied waar piping kan spelen, het opstellen van ondergrondschematisaties voor die zone, en schattingen maken van doorlatendheid, korrelgrootteverdeling en relatieve dichtheid voor die zone.

2.1.15 SBW Piping - Hervalidatie piping. C1. Bureaustudie schematisatie doorlatendheid voor pipinganalyse

Deltares rapport nr. 1001453-001-GEO-0002; 2008

Onderwerpen: 9 en 10a en 10b

2.1.15.1 Doel van het rapport

Aan de hand van numerieke analyses met het eindige elementen grondwaterstromingsprogramma MSeep inzicht krijgen in de relatie tussen doorlatendheid en de regel van Sellmeijer.

2.1.15.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport gaat in op het rekenmodel van Sellmeijer en de analytische rekenregel van Sellmeijer die is afgeleid voor een homogeen zandpakket met een uniforme doorlatendheid. Het met beide methoden berekende kritiek verval wordt vergeleken voor verschillende doorlatendheden en afmetingen van het watervoerend pakket voor een systeem bestaande uit één watervoerende zandlaag. Vervolgens wordt met MSeep ook voor een twee-lagen systeem het kritieke verval bepaald.

2.1.15.3 Conclusies

Voor een meerlagen systeem zal de equivalente doorlatendheid moeten worden bepaald als met de rekenregel van Sellmeijer wordt gewerkt.

2.1.16 SBW Piping - Hervalidatie piping. C2. Schematisatiehandreiking watervoerende zandlaag

Deltares rapport nr. 1001453-001-GEO-0006; 2008

Onderwerpen: 9 en 10

2.1.16.1 Doel van het rapport

De schematisatie van de doorlatendheid van de ondergrond bepalen om de rekenregel van Sellmeijer te kunnen toepassen.

2.1.16.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport geeft aan hoe de ondergrond geschematiseerd is in de bestaande rekenregel van Sellmeijer en in MSeep. Vervolgens wordt ingegaan op de benodigde stappen om doorlatendheid van de watervoerende zandlaag te bepalen, en worden voor en nadelen van verschillende laboratoriummethoden, in situ metingen, en indirecte methoden van doorlatendheidsbepaling afgewogen. Procedures voor het schematiseren van de doorlatendheid voor pipinganalyses op grondlaagschaal, binnen REGIS II en binnen VNK worden behandeld.

2.1.16.3 Conclusies

Aanbevolen wordt om voor de doorlatendheid in de piping analyse gebruik te maken van de VNK database voor de diepere lagen (>5 – 10 m) en voor ondiepere lagen lokaal onderzoek uit te voeren.

2.1.17 SBW Piping - Hervalidatie piping. C3 Modelling van het pipingproces in MSeep

Deltares rapport nr. 1001453-001-GEO-0004; 2008
Onderwerpen: 9

2.1.17.1 Doel van het rapport

Beschrijven van de achtergronden het eindige elementen grondwater-stromingsprogramma MSeep en hoe de nieuwe inzichten rondom piping in MSeep zijn verwerkt.

2.1.17.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport beschrijft de ontwikkeling van het model van Sellmeijer, en de aanpassingen die in het kader van SBW Hervalidatie Piping aan het model zijn uitgevoerd. De implementatie van het model van Sellmeijer in MSeep wordt beschreven.

2.1.17.3 Conclusies

Aanbevelingen worden gedaan voor verbetering van het rekenhart van MSeep.

2.1.18 SBW Piping - Hervalidatie piping. E. Evaluatie 0,3d rekenregel

Deltares rapport nr. 1001453-002-GEO-0002; 2008
Onderwerpen: 1d

2.1.18.1 Doel van het rapport

Analyse van de noodzaak tot verbetering van de 0,3d regel, die een reductie op het verval over de waterkering voor situaties met een afdekkende laag biedt.

2.1.18.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport wordt een onderbouwing voor de 0,3d regel behandeld. Proeven van Sellmeijer, en ervaring en metingen uit Nederlandse en buitenlandse bronnen met betrekking op het optredende verhang worden besproken.

2.1.18.3 *Conclusies*

Er wordt geconcludeerd dat de onderbouwing voor de 0,3d regeling betrekkelijk zwak is. Echter, aangezien het op dat moment lastig blijkt om algemeen geldende suggesties voor verbetering voor te stellen wordt dit niet gedaan.

2.1.19 **SBW Piping - Hervalidatie piping. G. Opstellen 5 praktijkcases. G1. Verzamelen gegevens**

Deltares rapport nr. 1001453-004-GEO-0003; 2008

Onderwerpen: 1 en 6a t/m 6c

2.1.19.1 *Doel van het rapport*

Inventariseren van 5 beschikbare cases om te bepalen of de originele (met 4-krachten evenwicht) of de aangepaste rekenregel (met 2-krachten evenwicht) van Sellmeijer daarop van toepassing is.

2.1.19.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport maakt onderdeel uit van studie G waarin de originele en de verder ontwikkelde rekenregels van Sellmeijer worden toegepast op 5 cases. Op dit rapport volgen twee verdere rapporten, besproken in par 2.1.20 en 2.1.21. In rapport G1 worden drie cases in Nederland, een case in de VS, en een case in Hongarije waarin zandmeevoerende wellen zijn opgetreden beschreven. De cases in de VS en in Hongarije zijn door Fugro gerapporteerd, deze rapportage is in een bijlage aan het rapport toegevoegd. Voor deze cases zijn de verzamelde gegevens beschreven en er zijn piping berekeningen gedaan. Aan de hand hiervan worden aanbevelingen gedaan voor het vervolgonderzoek.

2.1.19.3 *Conclusies*

Op basis van de berekeningen is het ontstaan van zandmeevoerende wellen niet in alle gevallen te verklaren. De aangetroffene heterogeniteit van de ondergrond is met het klassieke Sellmeijer model niet goed te schematiseren. De benodigde kwelweglengte voor de cases in de VS aan de Mississippi wordt als zeer groot bevonden.

2.1.20 **SBW Piping - Hervalidatie piping. G. Opstellen 5 praktijkcases. G2. Berekeningsresultaten inventarisaties G1**

Deltares rapport nr. 1001453-006-GEO-0004; 2008

Onderwerpen: 1 en 6a t/m 6c

2.1.20.1 *Doel van het rapport*

Een vergelijking maken tussen originele Sellmeijer methode (met 4-krachten evenwicht), de rekenregel van Bligh, en de doorontwikkelde Sellmeijer methode voor de veldcases besproken in par 2.1.19.

2.1.20.2 *Beschrijving van het rapport*

In dit rapport worden aanpassingen en aanvullingen op de analyse in rapport G1 (par. 2.1.19) behandeld. Tevens zijn de resultaten van twee IJkdijk proeven geanalyseerd. De uitgangspunten en 4 rekenmodellen (Bligh, originele Sellmeijer methode (met 4-krachten evenwicht), een aangepaste rekenregel van Sellmeijer (met 2-krachten evenwicht alleen) en een aangepaste rekenregel van Sellmeijer (met 2-krachten evenwicht en d_{70} effect)) worden gepresenteerd. De resultaten van de berekeningen met de 4 modellen voor de 5 cases plus

de 2 IJkdijk proeven worden gepresenteerd en aanbevelingen worden gedaan voor rapport G3 (par. 2.1.20).

2.1.20.3 *Conclusies*

Met het 2-krachtenmodel worden langere piping lengtes berekend dan met het vier-krachtenmodel. Maar afhankelijk van de toegepaste parameters kunnen de resultaten behoorlijk uit elkaar lopen.

2.1.21 **SBW Piping - Hervalidatie piping. G. Opstellen 5 praktijkcases. G3. Beoordeling en analyse methodiek**

Deltares rapport nr. 1001453-007-GEO-0005; 2008

Onderwerpen: 1, 6a t/m 6c

2.1.21.1 *Doel van het rapport*

Evalueren in hoeverre de toenmaals gebruikte methoden van Bligh en de originele methode van Sellmeijer, en de doorontwikkelde methode van Sellmeijer, aansluiten bij de ervaring uit de praktijk voor drie Nederlandse cases waar zandmeevoerende wellen optraden en voor drie IJkdijk proeven.

2.1.21.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden in aanvulling op de eerder uitgevoerde berekeningen op rapporten G1 en G2. (2.1.19 2.1.20) berekeningen gemaakt met nieuwe uitgangspunten. De uitgangspunten, en afwijking hiervan met rapport G2., en de gehanteerde rekenregels worden gepresenteerd, berekeningen en resultaten voor de drie Nederlandse cases en 3 IJkdijk proeven worden geanalyseerd. Conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek worden gegeven.

2.1.21.3 *Conclusies*

De invloed van de doorlatendheid en de korreldiameter kan erg groot zijn en leiden tot grote spreiding in de benodigde kwelweglengtes. Met de methode van Bligh en met de originele methode van Sellmeijer worden kwelweglengtes berekend die korter zijn dan de aanwezige kwelweg, waardoor het optreden van zandmeevoerende wellen niet te verklaren is. Over het algemeen wordt met de aangepaste rekenregel een langere kwelweg berekend, echter in sommige gevallen is deze dusdanig lang dat de vraag bestaat in hoeverre dit realistisch is. De aangepaste rekenregel sluit redelijk goed aan bij de IJkdijk proeven maar behoeft verdere uitwerking/analyse.

2.1.22 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP1. Ontwikkelen nieuwe rekenregel HP1.1. Kleine schaalproeven: Relatieve dichtheid (factual reports)**

Deltares rapport nr. 1200187-015-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 1b

2.1.22.1 *Doel van het rapport*

Rapportage van (aanvullende) kleine schaal laboratoriumproeven met variaties in relatieve dichtheid.

2.1.22.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport bevat de feitenrapportagen van de uitgevoerde proeven met de gemeten data van een serie kleine schaal laboratoriumproeven waarmee het effect van relatieve dichtheid op het kritische verval kan worden geanalyseerd.

2.1.22.3 *Conclusies*

De analyse wordt in HP1.2 gerapporteerd (besproken in par. 2.1.23).

2.1.23 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP1. Ontwikkelen nieuwe rekenregel HP1.2 Uitbreiding en aanpassing van de pipingregel**

Deltares rapport nr. 1200187-015-GEO-0004; 2009

Onderwerpen: 1

2.1.23.1 *Doel van het rapport*

Onderzoeken van de invloed van zandparameters door middel van multivariate analyse op de resultaten van small- en medium-scale laboratoriumproeven en afleiden van een aangepaste rekenregel.

2.1.23.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport geeft een overzicht van de laboratoriumproeven die gebruikt zijn in de analyse. De uitbreiding en aanpassing van de bestaande rekenregel wordt gepresenteerd, en de kwaliteit van de aangepaste rekenregel wordt geanalyseerd. De multivariate analyse zelf is in een bijlage opgenomen. In een andere bijlage zijn zes aanvullende experimenten, die niet in eerdere feitenrapportages gerapporteerd zijn, geanalyseerd.

2.1.23.3 *Conclusies*

De aanpassing van de bestaande rekenregel is het resultaat van de analyse, voor toepassing van de rekenregel in de praktijk zijn full-scale proeven vereist.

2.1.24 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP2.1. Medium-schaalproeven (factual reports)**

Deltares rapport nr. 1200648-004-GEO-0002; 2009

Onderwerpen: 1a, 1b en 1c

2.1.24.1 *Doel van het rapport*

Rapportage van 8 medium-schaal laboratoriumproeven om de invloed schaaffecten, van korrelgrootte, en van relatieve dichtheid op het piping proces te valideren, en om monitoringsapparatuur te testen.

2.1.24.2 *Beschrijving van het rapport*

Dit rapport bevat de feitenrapportagen van de uitgevoerde proeven met de gemeten data van de uitgevoerde proeven.

2.1.24.3 *Conclusies*

De resultaten worden geanalyseerd in HP2.2 (par. 2.1.25).

2.1.25 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP2.2 Medium-schaalproeven (analyserapport)**

Deltares rapport nr. 1200648-004-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 1a, 1b en 1c

2.1.25.1 *Doel van het rapport*

Analyse van medium-schaalproeven om invloed van schaaleffecten, van korrelgrootte, en van relatieve dichtheid op het piping proces te valideren, en om monitoringsapparatuur te testen.

2.1.25.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport beschrijft de opstelling en uitvoering van de medium-schaalproeven. De waarnemingen tijdens de proeven wordt behandeld, en de schaaleffecten en invloeden van zandkarakteristieken worden besproken. Ook de resultaten van de monitoring worden behandeld. Naar aanleiding daarvan worden conclusies getrokken en aanbevelingen uiteengezet.

2.1.25.3 *Conclusies*

Het schaaleffect zoals verwerkt in de regel van Sellmeijer voldoet voor de kleine- en medium-schaal proeven. De invloed van relatieve dichtheid is nog onduidelijk. Proeven met (grofkorreliger) Itterbeck zand voldoen minder goed aan de regel van Sellmeijer dan proeven op (fijner) Baskarp zand.

2.1.26 **SBW Piping- Hervalidatie piping HP3. gedrag van klei**

Deltares rapport nr. 1200187-007-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 4d

2.1.26.1 *Doel van het rapport*

Nagaan of met behulp van berekeningen kan worden aangetoond dat erosiekanaaltjes die tijdens het piping proces onder dijken zijn ontstaan door het dijklichaam in de loop der tijd worden dichtgedrukt.

2.1.26.2 *Beschrijving van het rapport*

In dit rapport wordt een kwalitatieve analyse uitgevoerd van de mogelijkheid dat piping kanaaltjes onder de waterkering worden dichtgedrukt door de bovenliggende kleilaag. Hiervoor worden eindige elementen berekeningen en analytische berekeningen geanalyseerd.

Met de analytische berekeningen is de doorbuiging van een kleilaag bij een lokaal gereduceerde ondersteuning berekend. Uit de analytische berekeningen wordt geconcludeerd dat een enkel kanaaltje met een breedte van millimeters tot een centimeter en een diepte van millimeters open blijft staan. Bij een vertakking van veel kanaaltjes naast elkaar worden die dichtgedrukt als de ondersteuning van de kleilaag tot 50% of meer is gereduceerd. Hieruit volgt dat het dichtdrukken van de kanaaltjes pas in een later stadium, bij het ontstaan van waaiers van kanaaltjes verwacht kan worden.

De eindige elementen berekeningen zijn gebruikt om de vervormingen rondom een enkel gat te berekenen. Voor de eindige elementen berekeningen is de stabiliteit van een relatief breed gat (16 cm c.q. 30 cm) geanalyseerd. Dit kan beschouwd worden als een situatie in de eindfase van het pipingproces als de pipe al kortsluiting heeft gemaakt met het buitenwater. Het gat van 30 cm werd dichtgedrukt terwijl dat van 16 cm open blijft. De berekende vervorming hangt sterk af van de gehanteerde gatbreedte en het model waarmee het gedrag van de klei is gemodelleerd. Consolidatie rond het gat verloopt snel, de consolidatieperiode is afhankelijk van het formaat van het gat in de orde van dagen tot 1 a 2 maanden.

2.1.26.3 *Conclusies*

Het beeld dat uit beide analyses ontstaat, is dat de relatief kleine erosiekanaaltjes die bij het begin van het pipingproces zich ontwikkelen open blijven staan. Bij de eindfase van piping

ontstaan grotere gaten. Deze zullen met name bij de wellen te vinden zijn. Afhankelijk van de geometrie en de grondeigenschappen zullen deze gaten in de periode kort na het optreden van piping wel of niet worden dichtgedrukt. Hieruit volgt de verwachting dat tijdens het optreden piping het dichtdrukken van de kanaaltjes door het dijklichaam niet optreedt en daarmee het proces ook niet beïnvloed.

2.1.27 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP4. 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen onder een dijk ter bepaling piping gevoeligheid

Deltares rapport nr. 1200187-009-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 7 en 9

2.1.27.1 Doel van het rapport

Met behulp van 2D en 3D eindige elementen grondwaterstromingsberekeningen inzicht krijgen in het effect van een complexere bodemopbouw met natuurlijke variabiliteit op de grondwaterstroming en op de piping gevoeligheid van een dijk, en om op basis hiervan beter te kunnen voorspellen wat er waar en wanneer zal gebeuren tijdens full-scale validatieproeven in de IJkdijkfaciliteit.

2.1.27.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport worden met het pakket ABAQUS 2D en 3D berekeningen uitgevoerd waarin de piping gevoeligheid wordt geanalyseerd aan de hand van het verticale verhang bij het uittredepunt. Dit wordt gedaan voor variaties van de bodemopbouw. Ook wordt de piping gevoeligheid van schaalproeven en deltagootproeven berekend en vergeleken.

2.1.27.3 Conclusies

Een eenvoudige geometrie van de grondopbouw is voldoende voor de full-scale proef, omdat het verhang dat bij een wat ingewikkelder geometrie optreedt numeriek kan worden berekend.

2.1.28 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.1. Draaiboek IJkdijk full-scale piping proef

Deltares rapport nr. 1200690-000-GEO-0004; 2009

Onderwerpen: 6

2.1.28.1 Doel van het rapport

Een draaiboek op te stellen dat als handleiding kan dienen tijdens de bouw en uitvoering van de full-scale pipingproeven.

2.1.28.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport beschrijft de bouw van de piping proef, bestaand uit de beschrijving van het proefterrein en een fasering en planning, en behandelt het aanbrengen van de instrumentatie. Ook overige praktische zaken zoals vergunningen, waarnemingen tijdens de bouw, en het beoordelen van de eindsituatie na de bouw worden behandeld. Vervolgens wordt de uitvoering van de proef behandeld, hierin worden de uitvoering van de proef, dataverwerking, en scenario's van ongewenste gebeurtenissen doorgenomen. De veiligheid, risico's, en beschermingsmiddelen en bouwplaatsvoorzieningen worden uiteengezet.

In de bijlage zijn tekeningen van de proeven opgenomen, evenals een overzicht van de uit te voeren metingen.

2.1.28.3 *Conclusies*

Dit is een draaiboek, er zijn geen conclusies.

2.1.29 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.2a. Medium-scale proeven voor IJkdijk (factual report)

Deltares rapport nr. 1201205-005-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 1

2.1.29.1 *Doel van het rapport*

Rapporteren van de medium-schaal proeven die uit zijn gevoerd met hetzelfde zand dat gebruikt wordt voor de full-scale piping proeven op de IJkdijk locatie.

2.1.29.2 *Beschrijving van het rapport*

Dit betreft het factual report waarin de opzet, uitvoering van de proef en resultaten worden beschreven. De analyse wordt in par 2.1.30 behandeld.

2.1.29.3 *Conclusies*

De proeven zijn een succes aangezien terugschrijdende erosie wordt waargenomen.

2.1.30 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.2 Medium-scale proeven voor IJkdijk (analyserapport)

Deltares rapport nr. 1201205-005-GEO-0002; 2009

Onderwerpen: 1

2.1.30.1 *Doel van het rapport*

Aan de hand van medium-scale proeven op het zand van de IJkdijk proeven vaststellen of het kritieke verhang voor piping tijdens de full-scale piping proef kan worden gerealiseerd.

2.1.30.2 *Beschrijving van het rapport*

De opstelling van de medium-scale proeven en de uitvoering hiervan wordt beschreven. Vervolgens worden de waargenomen processen beschreven en vergeleken met predicties op basis van de regel van Sellmeijer zoals die is opgenomen in het Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen (TRZW) (TAW,1999), de rekenregel op basis van het tweekrachten evenwicht, en de aangepaste rekenregel waarin het effect van korrelgrootte en relatieve dichtheid geschaald zijn. Deze regels worden vervolgens gehanteerd om het kritieke verval voor de full-scale piping proeven te bepalen en zo uitspraak te doen over de haalbaarheid van de full-scale proeven.

2.1.30.3 *Conclusies*

Er zijn geen aanwijzingen dat er bij de full-scale proeven hogere kritieke vervallen op zullen treden dan bij het ontwerp van de proef zijn berekend.

2.1.31 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.3 Predictie full-scale proef

Deltares rapport nr. 1200690-005-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 4d, 6, 9

2.1.31.1 Doel van het rapport

Predictie maken ten behoeve van het ontwerp van de full-scale piping proeven op de IJkdijk locatie, en ten behoeve van de validatie van de rekenregels aan de hand van deze proeven.

2.1.31.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport wordt de opzet van het experiment besproken. Er worden predicties gemaakt van het kritieke verval aan de hand van verschillende piping modellen. Onzeker hierin is de doorlatendheid die het zandpakket in de proeven gaat hebben. Ook wordt de kritieke pipelengte bepaald en worden hypothesen opgesteld voor het verloop van de proeven. Door middel van grondwaterstromingsberekeningen zijn verwachte waterspanningen en debieten voor de initiële situatie en voor de situatie tijdens kanaalvorming bepaald. Deze zijn bedoeld als stuurmiddel tijdens de proeven. Ook worden met behulp van eindige elementen berekeningen predicties gemaakt van de mogelijke deformatie van de klei tijdens progressieve erosie.

2.1.31.3 Conclusies

Het is de verwachting dat bij kleine kanalen < 30 cm breedte geen deformatie van de klei optreedt. Bij bredere kanalen bij progressieve erosie zou dit wel op kunnen treden.

2.1.32 SBW Piping - Hervalidatie Piping. HP5.4. Inrichting en aanleg full-scale experiment

Deltares rapport nr. 1200690-00-GEO-0021; 2009

Onderwerpen: 6

2.1.32.1 Doel van het rapport

Behandeling van de inrichting en aanleg van de bouw van het full-scale piping experiment.

2.1.32.2 Beschrijving van het rapport

Dit rapport behandelt bouw en inrichting van het werkterrein voor de full-scale proeven. Ook worden wijzigingen aangegeven die zijn gemaakt in plannen t.o.v. het draaiboek (dat behandeld is in par. 2.1.28).

2.1.32.3 Conclusies

Dit betreft een plan voor de uitvoering van de proef, er zijn geen conclusies

2.1.33 SBW Piping – Hervalidatie Piping HP 5.4b Full scale proeven (factual report proef 1 t/m factual report proef 4)

Deltares rapport nrs. 1200690-000 (proef 1), 1200690-005 (proef 2), 1200690-005 (proef 3); 2009

Onderwerpen: 1, 2, 4c, 6

2.1.33.1 Doel van het rapport

De full-scale proeven beschrijven; deze proeven zijn gedaan om gegevens te verkrijgen ter validatie van de verbeterde rekenregel en om te zien in hoeverre monitoring inzicht kan geven in het piping proces.

2.1.33.2 Beschrijving van het rapport

Het betreft 3 factual reports. In ieder rapport wordt een uitgebreide beschrijving van de proefopstelling en de geïnstalleerde meetinstrumentatie gegeven. De uitvoering van de proef wordt beschreven. Vervolgens worden het logboek met observaties tijdens de proeven, de

metingen (waterspanningen, deformaties en overige) gegeven, en wordt een algemene beschrijving van het proces gegeven. Conclusies bevatten een overzicht van het verloop van de proeven en een beschouwing van de proef. In de bijlagen zijn de monitoringstekeningen, waterspanningsmetingen, laboratorium testen en een fotorapportage van de proef opgenomen.

2.1.33.3 *Conclusies*

Resultaten worden geanalyseerd in het rapport dat wordt besproken in par 2.1.34.

2.1.34 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.5a Analyse en validatie full-scale proeven**

Deltares rapport nr. 1200690-006; 2009

Onderwerpen: 1, 2, 4c, 4d, 6

2.1.34.1 *Doel van het rapport*

Analyse van de full-scale proeven (gerapporteerd in de factual reports in par. 2.1.33) en validatie van het (aangepaste) rekenmodel zijn de hoofddoelstelling. De secundaire doelstelling is validatie van de theorie en procesbeschrijving vanaf het ontstaan van zandmeevoerende wellen tot het daadwerkelijke falen van de dijk.

2.1.34.2 *Beschrijving van het rapport*

In dit rapport worden de full-scale proeven beschreven en de waargenomen processen worden behandeld. De observaties worden geanalyseerd om vast te stellen of de proeven bruikbaar zijn voor de validatie. Observaties en metingen, ondermeer metingen van debiet, waterspanning en doorlatendheid, worden geanalyseerd voor de optredende processen. De waargenomen processen en de metingen worden vervolgens vergeleken met de waargenomen processen uit kleine-schaal-, medium-schaal, centrifuge- en Deltagootproeven, en met praktijkgevallen ter validatie van de theorie- en procesbeschrijving. Hierbij worden alle proevenseries kort beschreven. Vervolgens wordt voor de validatie van het (aangepaste) model van Sellmeijer uiteengezet welke aannamen hieraan ten grondslag liggen. Op basis van deze aannamen worden hypothesen geformuleerd en getoetst met behulp van de metingen en waarnemingen uit de proeven. Tot slot wordt reststerkte beschouwd en worden conclusies en aanbevelingen geformuleerd.

2.1.34.3 *Conclusies*

Tijdens de full-scale proeven worden vier fasen onderscheiden die ook waargenomen zijn bij kleinschalige en medium-schaalproeven: erosie en welvorming, terugschrijdende erosie, ruimen van pipes, dijkdoorbraak. Geconcludeerd wordt dat de piping een mechanisme is dat tot bezwijken van waterkeringen leidt. Over het doorbraakproces is verder weinig bekend. De full-scale proeven zijn niet ontworpen voor analyse van het doorbraakproces.

De voor korrelgrootte aangepaste rekenregel wordt aanbevolen. Deze is alleen geldig voor zanden met een relatieve dichtheid groter dan 50% en voor een homogeen grondpakket. In de heterogene werkelijkheid zal lokaal uittreden van wellen plaatsvinden terwijl in het model wordt uitgegaan van uittreden over de volle breedte. De vraag wat dit voor de rekenregel betekent moet nog worden beantwoord.

Aanbevolen wordt om: het reststerkte proces te onderzoeken; de verminderde invloed van korrelgrootte in het model fysisch te onderbouwen; de invloed van tijd op het proces te onderzoeken; en om een toetsmethodiek voor het toetsen van waterkeringen op te zetten.

2.1.35 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP5.5b Samenvatting resultaten theoretisch onderzoek SBW Piping voor WTI (Notitie aangepaste piping rekenregel voor WTI)

Deltares rapportnr. 1200187-001-GEO-0002; 2009

Onderwerpen: 1, 2, 4c, 4d, 6, 7,9

2.1.35.1 Doel van het rapport

Een samenvatting geven van de belangrijkste resultaten van het onderzoeksproject SBW Hervalidatie Piping.

2.1.35.2 Beschrijving van het rapport

De notitie beschrijft de onderzoeksstrategie die gehanteerd is, waarbij in een theoretisch spoor kennis is ontwikkeld om de procesbeschrijving te verbeteren en het rekenmodel van Sellmeijer te valideren, en in een praktisch spoor zijn handvatten ontwikkeld voor toepassing van de aangepaste toetsmethodiek.

De hoofdconclusies met betrekking op het proces, op het model, en op de validatie van de rekenregel worden beschreven en aanbevelingen worden gedaan voor de stappen die nodig zijn om te komen tot een nieuwe geaccepteerde toetsing.

2.1.35.3 Conclusies

Met betrekking op proces wordt geconcludeerd dat:

- Kleine kanaaltjes ontstaan al voordat continu zandtransport (zandmeevoerende wellen) wordt waargenomen bij terugschrijdende erosie.
- Nadat continu zandtransport wordt waargenomen stopt het proces niet meer.
- Het gedrag van klei heeft een verwaarloosbare invloed op het proces van terugschrijdende erosie.
- Piping is een mechanisme dat tot bezwijken van waterkeringen leidt.

Met betrekking op het model wordt het aangepaste rekenmodel met factoren voor de invloed van d_{70} en relatieve dichtheid gepresenteerd.

Met betrekking op de validatie van de rekenregel worden de aannamen die aan het model ten grondslag liggen beoordeeld:

- De invloed van korrelgrootte op het kritiek verval is aangepast.
- De invloed van relatieve dichtheid lijkt onvoldoende onderbouwd.
- Het lengteschaaleffect is goed verwerkt.
- Het spleetmodel is niet weerlegd maar ook niet bevestigd.
- Het ontstaan van een evenwichtssituatie is niet weerlegd maar ook niet bevestigd.
- Kleine schaalproeven lijken geschikt om de invloed van diverse parameters te onderzoeken.

2.1.36 SBW Piping - Hervalidatie piping. HP6. Internationale audit

Deltares rapport nr. 1200187-008-GEO-0001; 2009

Onderwerpen: 1, 7

2.1.36.1 Doel van het rapport

Beschrijving van bevindingen van bezoek aan bijeenkomst van de European Working Group on Internal Erosion. Doel van het bezoek is het delen van kennis.

2.1.36.2 Beschrijving van het rapport

Tijdens de conferentie zijn de bevindingen van de Nederlandse kleine schaalproeven gepresenteerd en is een impressie van de centrifugeproeven gegeven. De reactie van de

conferentie deelnemers hierop is beschreven. Vervolgens is een overzicht gegeven van de buitenlandse presentaties die relevant zijn voor het SBW.

2.1.36.3 *Conclusies*

Het Nederlandse onderzoek op de kleine-schaalproeven is goed ontvangen. Invloeden van tijd en heterogeniteit op het pipingproces worden als belangrijk ervaren. Er zijn suggesties gedaan om ook effecten van andere parameters zoals schuifsterkte en porositeit te modelleren.

2.1.37 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP8a Veiligheidsconcept Piping Grondslagen, methodes en stappen voor het afleiden van een aangepaste toetsregel voor het mechanisme piping**

Deltares rapport nr. 1202123-002-GEO-0003; 2009

Onderwerpen: 1, 2, 3, 10

2.1.37.1 *Doel van het rapport*

Nieuwe inzichten in het mechanisme piping uit het SBW Hervalidatie piping worden in de toetsregels voor piping voor het nieuwe toetsinstrumentarium verwerkt. Dit rapport beschrijft het voorgestelde veiligheidsconcept voor het toetsen op piping in het nieuwe toetsinstrumentarium.

2.1.37.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport beschrijft het voorgestelde veiligheidsconcept voor het toetsen op piping, de toepassing van de veiligheidsfilosofie, de toetsregel zelf en nodige stappen voor de kwantitatieve uitwerking (kalibratie) worden toegelicht, inclusief toepassing van de schematiseringstheorie. De kwantitatieve invulling hiervan wordt beschreven in het rapport dat wordt behandeld in par. 2.1.38. De gevolgen voor de praktijk worden ook besproken.

2.1.37.3 *Conclusies*

Uitgangspunt voor de toetsing op opbarsten en piping is een semi-probabilistische methode. Aangezien de situatie alleen onveilig is als zowel opbarsten/heave als piping optreden, moeten de toetsregels voor beide mechanismen worden gekalibreerd. Het veiligheidsniveau is in dit document gedefinieerd als een aanvaardbare kans op overstroming en sluit meteen aan bij ontwikkelingen voor toekomstige eisen aan de waterveiligheid. Er wordt rekening gehouden met het lengte-effect bij het bepalen van de veiligheidseisen per doorsnede. Ten aanzien van de praktijk zal de voorgestelde toetsregel waarschijnlijk leiden tot strengere eisen.

2.1.38 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP8b Kalibratie van de veiligheidsfactoren**

Deltares rapport nr. 1202123-002-GEO-0005; 2009

Onderwerpen: 1, 3a

2.1.38.1 *Doel van het rapport*

Dit rapport presenteert de kwantitatieve uitwerking van de veiligheidsfactoren voor opbarsten en piping voor de reken en toetsregels zoals die zijn beschreven in rapport HP8a (par. 2.1.37).

2.1.38.2 *Beschrijving van het rapport*

In dit rapport worden de toetsregels piping en opbarsten gepresenteerd. Er wordt ingegaan op de toelaatbare faalkans voor een dijkkring en de omrekeningen hiervan naar een faalkans voor dwarsdoorsneden door het lengte effect mee te nemen.

Met behulp van kalibratie analyse wordt de vereiste betrouwbaarheid vertaald naar veiligheidsfactoren. Hiervoor worden twee verschillende methoden gepresenteerd, op basis van een semi probabilistische kalibratie analyse en op basis van een probabilistische kalibratie analyse. Ook wordt een volledig probabilistische methode, waarbij gebruik gemaakt wordt van de FORM methode (First Order Reliability Method) om de benodigde kwelweg te bepalen besproken.

De benodigde kwelweglengte wordt vergeleken voor de oude Sellmeijer toetsregel, de nieuwe Sellmeijer toetsregel met veiligheidsfactoren, en de nieuwe Sellmeijer toetsregel met de probabilistische methode.

2.1.38.3 *Conclusies*

De nieuwe toetsregel op basis van de veiligheidsfactor leidt gemiddeld tot verdubbeling van de vereiste kwelweglengte ten opzichte van de oude toetsregel. Toepassing van de probabilistische toetsregel verkleint de benodigde kwelweg weliswaar, maar dit leidt alsnog gemiddeld tot 1,5 keer langere vereiste kwelweglengten. Voor het mechanisme opbarsten levert de probabilistische methode relatief weinig winst op, maar voor het mechanisme piping wordt aanbevolen zowel de semi probabilistische als de probabilistische methode beschikbaar te stellen.

2.1.39 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP.9. Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen**

Herziene versie 2011

Deltares rapport nr. 1202123-003

Onderwerpen: allen.

Dit rapport is een vroege versie van het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen, de inhoud wordt behandeld in par. 2.2.

2.1.40 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP11a. Medium-schaalproeven t.b.v. afbakening rekenregel**

Deltares rapport nr. 1200187-017; 2010

Onderwerpen: 1a

2.1.40.1 *Doel van het rapport*

Beschrijven van medium-scale validatieproeven ten behoeve van het afbakenen van de aangepaste rekenregel t.a.v. de korrelgrootte.

2.1.40.2 *Beschrijving van het rapport*

Het betreft factual reports van de vier proeven met een kwelweglengte van ca. 1,5 m waarin twee zandsorten zijn beproefd.

2.1.40.3 *Conclusies*

Alle proeven zijn succesvol uitgevoerd, er is terugschrijdende erosie waargenomen. De proeven kunnen worden gebruikt voor analyse van de invloed van korrelgrootte in de aangepaste rekenregel van Sellmeijer.

2.1.41 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP11b. Medium-schaalproeven t.b.v. afbakening rekenregel**

Deltares rapport nr. 1202123-005-GEO-0001; 2010

Onderwerpen: 1a

2.1.41.1 *Doel van het rapport*

Vaststellen of de aangepaste rekenregel geldig is tot een d_{70} van ca. 500 μm .

2.1.41.2 *Beschrijving van het rapport*

De resultaten van de proeven beschreven in de feitenrapportages (par. 2.1.40) worden geanalyseerd. De proeven en opgetreden processen worden kort beschreven en de kritieke vervallen in de proeven worden vergeleken met berekende kritieke vervallen. Ook worden vergelijkingen gemaakt met eerder uitgevoerde medium-schaalproeven.

2.1.41.3 *Conclusies*

In drie van de vier proeven is stagnatie van zandtransport opgetreden, dat in eerdere proeven niet is waargenomen. Mogelijk is dit veroorzaakt door grotere spreiding in de korrelgrootte van grover zand. Het gemeten kritieke verval is hoger dan de predicties met de aangepaste regel van Sellmeijer. Mogelijk is de invloed van d_{70} in de aangepaste regel iets te klein, echter de aangepaste regel wordt gezien als een veilige benadering voor het schatten van het kritiek verval. Daarom wordt het geldigheidsgebied van de aangepaste rekenregel uitgebreid van een d_{70} van 150 μm tot 500 μm .

2.1.42 **SBW Piping - Hervalidatie piping. HP12. Afbakening relevantie displacement piping bij losse pakking**

Deltares rapport nr. 1202123-007-GEO-0002; 2010

Onderwerpen: 1b

2.1.42.1 *Doel van het rapport*

Onderzoeken of displacement piping (voortschrijdende in plaats van terugschrijdende erosie) ook optreedt wanneer belasting aangebracht wordt op het losgepakte zand, en dus of het model van Sellmeijer ook van toepassing is op zanden met lage relatieve dichtheden.

2.1.42.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden kleine schaal experimenten beschreven waarin druk is aangebracht op een losgepakt zandpakket. Het rapport bevat de beschrijving en factual reports van de proeven. De waargenomen processen worden beschreven en er wordt ingegaan op het geldigheidsgebied van het model en de aangepaste rekenregel van Sellmeijer.

2.1.42.3 *Conclusies*

Terugschrijdende erosie treedt ook bij lage relatieve dichtheden op dus het model van Sellmeijer is geldig voor relatieve dichtheden van 25% - 100% (er zijn geen proeven uitgevoerd bij lagere dichtheden). Echter de aangepaste rekenregel bevat een empirische factor die is bepaald op basis van proeven op zand met een pakking groter dan 50%, daarom is de rekenregel geldig voor relatieve dichtheden van 50% - 100%. De gevonden kritieke gevallen lijken de eerder gevonden geringe invloed van relatieve dichtheid op het kritiek verval echter niet te ontcrachten.

2.1.43 **SBW Piping Kunstwerken. KW1. Inventarisatie piping bij waterkerende kunstwerken.**

Deltares rapport nr. (geen Deltares nr.), deze rapportage van Royal Haskoning. RH nr. 9T5602A0/R002/901961/1; 2010

Onderwerpen: 8

2.1.43.1 Doel van het rapport

Inventariseren waar de knelpunten zitten bij het toetsen van waterkerende kunstwerken op achterloopsheid en piping.

2.1.43.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport wordt een telefonische inventarisatie beschreven waarin het probleem omtrent piping bij verschillende waterschappen is vastgesteld. Met een waterschap is een verdieping uitgevoerd.

2.1.43.3 Conclusies

Er is van 15 waterschappen informatie verzameld over 1400 waterkerende kunstwerken. Daarvan heeft 38% de score geen oordeel gekregen, geschat wordt dat ongeveer 10-25% van de kunstwerken met de score geen oordeel deze score hebben vanwege piping. Aanbevolen wordt om een meetprogramma met peilbuizen op te zetten om kunstwerken te kunnen goedkeuren.

2.1.44 SBW Piping Kunstwerken. KW2 Beschouwing grondwaterstroming rond kunstwerken in relatie tot verlies aan waterkerende of waterscheidende functies

Deltares rapport nr. geen Deltares nr., rapportage van Royal Haskoning 9T5602.A0.11f/R00003/500517/Rott; 2010

Onderwerpen: 8

2.1.44.1 Doel van het rapport

Oorspronkelijk doel was om te beschouwen hoe een goed beeld van de grondwaterstroming bij kunstwerken te verkrijgen is met de juiste (simulatie-)programma's en (reken)methoden. Dit bleek niet mogelijk daarom geeft het rapport een aanbeveling voor een stappenplan ter beoordeling van het gevaar van functieverlies door de invloed van grondwaterstroming rond kunstwerken.

2.1.44.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport wordt ingegaan op de problematiek van de grondwaterstroming bij kunstwerken. Een stappenschema wordt voorgesteld om na te gaan of het kunstwerk beoordeeld kan worden of dat er nader onderzoek nodig is.

2.1.44.3 Conclusies

Aanbevolen wordt om een werkwijze vast te stellen voor de beoordeling van kunstwerken in waterkeringen, die gebruik maakt van kennis, ervaring, en waarneming van de betrokken beheerders.

2.1.45 SBW Piping Kunstwerken. KW3. Piping in cohesief materiaal literatuurstudie

Deltares rapport nr. geen Deltares nr., rapportage van Royal Haskoning 9T5602.B0/R002/903137/Amst; 2010

Onderwerpen: 2g, 8

2.1.45.1 Doel van het rapport

Een overzicht geven van internationale kennis van piping in cohesief materiaal.

2.1.45.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt gebruik gemaakt van 25 geselecteerde publicaties met betrekking op interne erosie in cohesief materiaal. Op basis hiervan zijn factoren die invloed hebben op interne erosie van dijklichamen van klei beschreven.

2.1.45.3 *Conclusies*

De gevoeligheid voor erosie wordt beïnvloed door de mate van verdichting en het vochtgehalte en het gehalte aan kleidelen in het cohesieve materiaal. Dispersieve grond is gevoelig voor erosie. Mogelijk geeft de plasticiteitsindex een indicatie voor de weerstand tegen erosie. Er is geen universele gestandaardiseerde methode om de erodeerbaarheid van grond te bepalen.

2.1.46 SBW Piping Kunstwerken. KW4a. Factual Reports Laboratorium experimenten Fase 1

Deltares rapport nr. 1001452-017-GEO-0001; 2010

Onderwerpen: 8

2.1.46.1 *Doel van het rapport*

Het verder uitbreiden en testen van de binnen SBW Piping Hervalidatie ontwikkelde experimentele methode ter bestudering van piping op kleine schaal voor een situatie met kwelscherm.

2.1.46.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport bevat het factual report van 5 proeven. Het kwelscherm wordt gesimuleerd door een balk haaks op de stroming te plaatsen. Voorlopige kwalitatieve conclusies worden getrokken met betrekking op de waargenomen processen. Een plan van aanpak wordt geschetst voor een tweede reeks proeven in Fase 2 (par. 2.1.47).

2.1.46.3 *Conclusies*

Voorlopige conclusie is dat een balk van relatief geringe hoogte in de proeven het piping proces al sterk beïnvloedt, terwijl de grondwaterstroming nauwelijks door de balk beïnvloedt lijkt te worden.

2.1.47 SBW Piping Kunstwerken. KW4b. Factual Reports Laboratorium experimenten Fase 2

Deltares rapport nr.: 1001452-020-GEO-0001; 2010

Onderwerpen: 8

2.1.47.1 *Doel van het rapport*

Het verder uitbreiden en testen van de binnen SBW Piping Hervalidatie ontwikkelde experimentele methode ter bestudering van piping op kleine schaal voor een situatie met kwelscherm.

2.1.47.2 *Beschrijving van het rapport*

In dit rapport worden aanpassing in de proeven ten opzichten van de in fase 1 uitgevoerde proeven beschreven (par 2.1.46). Proeven zijn gedaan met een dieper kwelscherm (grotere balk) en met een kwelscherm met een opening. Ook zijn proeven met waterspanningsmeters uitgevoerd. Het rapport bevat feitenrapportages van de proeven, en kwalitatieve conclusies in aanvulling op die in het rapport van fase 1 worden getrokken.

2.1.47.3 *Conclusies*

Bij proeven zonder opening treedt fluidisatie en heave op benedenstrooms van het kwelscherm. Bij proeven met een opening ontwikkelt het kanaal zich altijd naar de opening in het scherm, en treden heave en fluidisatie onder het kwelscherm niet op. Waterspanningsmeters kunnen gebruikt worden om effecten in de omgeving van de erosiekanalen waar te nemen.

2.1.48 **SBW Piping Kunstwerken. KW5. Simulatie grondwaterstroming sluis Hasselt.**

Deltares rapport nr. 1001452-015-GEO-0001; 2010

Onderwerpen: 6c, 8, 9,

2.1.48.1 *Doel van het rapport*

Opzetten van een gekalibreerd grondwatermodel van de schutsluis in Hasselt om inzicht te krijgen in hoeverre bij beperkte kennis van de onderbouw bij de sluis op basis van metingen en modelering toch uitspraak gedaan kan worden over de veiligheid tegen onder- en achterloopsheid bij maatgevende omstandigheden.

2.1.48.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt een 3D eindige elementen grondwatermodel opgezet in MODFLOW. Het rapport gaat in op het verzamelen van de data, de setup van het model, de kalibratie van het model en gevoeligheidsanalyse van de stijghoogte aan de hand van metingen in de periode januari 2009. Voorzien was om de validatie van het model uit te voeren aan de hand van metingen in februari en maart 2009, echter aangezien gedurende die meetcampagne geen verval over de sluis is opgetreden was het niet mogelijk de validatie uit te voeren.

2.1.48.3 *Conclusies*

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de stijghoogte het meest gevoelig is voor de bodemweerstand buitenwaarts die de mate van infiltratie van het buitenwater in het eerste watervoerende pakket bepaald. De verticale doorlatendheid van de toplaag en de intredeweerstand van de kades hebben eveneens relatief veel invloed op de stijghoogte en zijn moeilijk te bepalen door middel van metingen. Aangezien tijdens de meetcampagne geen verval over de sluis is opgetreden kon geen validatie van het model worden uitgevoerd. In vervolgonderzoek (besproken in par 2.1.50) zal dit model gebruikt worden voor analyses in MODFLOW om de gevoeligheid van de lokale verticale gradiënt te kwantificeren, met tot doel om nieuwe criteria op te stellen aan de hand waarvan onder- of achterloopsheid al dan niet uitgesloten kan worden.

2.1.49 **SBW Piping Kunstwerken. KW6. Aanbevelingen toetsmethode onder- en achterloopsheid bij (historische) kunstwerken.**

Deltares rapport nr. 1200675-006-GEO-0001; 2010

Onderwerpen: 8

2.1.49.1 *Doel van het rapport*

Het project SBW Piping Kunstwerken is uitgevoerd met het doel een nieuwe gedetailleerde toetsmethode voor piping en heave voor kunstwerken te ontwikkelen, waarmee het aantal kunstwerken waarvoor geen oordeel kan worden gegeven kan worden teruggedrongen. In dit rapport zijn de onderzoekresultaten uit verschillende onderdelen van SBW Piping Kunstwerken verwerkt.

2.1.49.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt een kwalitatieve beschrijving van de processen die optreden bij heave en piping bij waterkerende kunstwerken. De beschikbare rekenregels om deze mechanismen te toetsen, en hun beperkingen, worden besproken. De oorzaken voor ontbrekende toetsoordelen, en de opzet van de toenmalige toetsing, wordt geschetst. Vervolgens wordt een inventarisatie gemaakt van methoden en hulpmiddelen voor het analyseren van de grondwaterstroming en de maatgevende kwelwegen. Deze methoden worden beoordeeld en een methode wordt voorgesteld om een afweging te maken tussen de keuze voor vervolgonderzoek of een versterking. Er wordt een voorstel gedaan om de haalbaarheid van beheersmaatregelen bij een hoogwatersituatie te toetsen, evenals voorstellen om de toetsing in het VTV en het TR Zandmeevoerende wellen aan te passen. Afsluitend zijn er aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

2.1.49.3 *Conclusies*

Wat betreft de bestaande rekenregels en modellen worden geen aanpassingen voorgesteld. Indien er twijfel bestaat over de toestand van kwelschermen blijkt het lastig om hier op basis van metingen zekerheid over te verkrijgen. Een klein gat in een kwelscherm heeft een relatief hoge kans van voorkomen ten opzichte van een groot gat maar heeft een klein invloedsgebied; aangezien er geen methode beschikbaar is om het optreden van piping bij geconcentreerde stroming bij een gat te beoordelen is het moeilijk om te bepalen of er sprake kan zijn van een probleem. Daarom wordt aangegeven dat een toetsing op de haalbaarheid van beheersmaatregelen bij een hoogwatersituatie mogelijk wel tot een voldoende betrouwbaar toetsoordeel kan leiden.

Voor situaties waar ondanks ontbrekende gegevens met betrekking op de onderbouw van het kunstwerk wel gebruik gemaakt wordt van bestaande rekenregels wordt een stappenplan aangegeven waarmee op basis van een combinatie van stijghoogtemetingen en modellering van het (verwachte) verhang over het kunstwerk een uitspraak kan worden gedaan over de veiligheid tegen piping en heave tijdens maatgevende omstandigheden.

Voor vervolgonderzoek worden aanbevelingen gedaan met betrekking op het beter benutten van verschillende meetmethoden en het reduceren van onzekerheden van parameters die het optredende en kritieke uittredeverhang sterk beïnvloeden.

2.1.50 **SBW Piping Kunstwerken. KW8. Rapport Gevoeligheidsanalyse grondwaterstroming**

Deltares rapport nr. 1200675-001-GEO-0002; 2010

Onderwerpen: 6c, 8, 9

2.1.50.1 *Doel van het rapport*

Om vast te stellen welke invloed de staat van het kunstwerk, met name de toestand en de dimensies van de kwelschermen, heeft op het mechanisme piping. Aan de hand hiervan een hulpmiddel opstellen om piping te kunnen toetsen onafhankelijk van de staat van het kunstwerk.

2.1.50.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt gebruik gemaakt van het 3D grondwaterstromingsmodel dat is opgezet voor de sluis Hasselt met enkele aanpassingen (par 2.1.48). Hiermee wordt het effect van de staat van het kunstwerk op de grondwaterstroming en op het verticale uittredeverhang geanalyseerd. Het onderzoek is op hoofdlijnen uitgevoerd, niet alle parameters of combinaties van parameters zijn onderzocht, echter voldoende om aan te geven in hoeverre vervolgonderzoek zinvol is.

2.1.50.3 *Conclusies*

De voornaamste conclusie is dat de staat van het kunstwerk een grote invloed heeft op het uittredeverhang (aanwezigheid van een gat). Uit simulaties blijkt dat het moeilijk is de aanwezigheid van een gat te detecteren, zelfs bij een verval dat volgens de methode van Lane kritisch is. Dus indien de staat van het kunstwerk onduidelijk is kan er geen oordeel worden gegeven voor de toets op piping.

Het wordt niet zinvol geacht om verder onderzoek te doen naar de invloed van de staat van een kunstwerk op piping. Het opstellen van een calamiteitenprotocol tijdens hoogwater en een herstelmethode wordt wel aanbevolen.

2.1.51 **SBW Piping Kunstwerken. KW9. Analyse kleine schaal proeven**

Deltares rapport nr. 1200675-002-GEO-0001; 2010

Onderwerpen: 8, 9

2.1.51.1 *Doel van het rapport*

Onderzoeken hoe het proces van ontgronding en stabiliteitsverlies in zijn werk gaat bij grondwaterstroming onder, langs of door een kwelscherm, met name in een zandondergrond.

2.1.51.2 *Beschrijving van het rapport*

Er wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde 11 proeven die beschreven zijn in de rapporten in par 2.1.46 en 2.1.47 en de waarnemingen hierin. Resultaten worden nagerekend met het eindige elementen grondwaterstromingsmodel MSeep waarin het heave criterium is geïmplementeerd, en getoetst aan het kritieke verval volgens de methode van Lane en vergeleken met proeven uit de literatuur.

2.1.51.3 *Conclusies*

Vergelijking van proeven uit de literatuur en de Deltares proeven suggereert dat er een schaaffect is waardoor op kleinere schaal de invloed van een kwelscherm op het kritieke verhang minder groot is dan op grotere schaal. Echter de randvoorwaarden van de proeven verschillen waardoor het onduidelijk is in hoeverre dit alleen aan schaaffecten te wijten is.

Het opstromen van zand lijkt kritiek voor het ontstaan van kanaaltjes stroomopwaarts van het kwelscherm. Lokaal verweken van zand treedt op en is belangrijk voor stabiliteit van het zandbed.

2.1.52 **SBW Piping. 2A. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregel, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit. Plan van aanpak**

Deltares rapport nr. 1204201-001; 2011

Onderwerpen: 1 (en specifiek 1a), 4 (en specifiek 4c), 7,

2.1.52.1 *Doel van het rapport*

Het beschrijven van de deelonderzoeken die nodig zijn voor een fysische onderbouwing van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer, en een beschrijving voor onderzoek naar tijdsafhankelijkheid.

2.1.52.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport behandelt de fysische onderbouwing van de sterktefactor in het aangepaste model van Sellmeijer en bespreekt het effect van een grotere korreldiameter. Vervolgens worden tijdsafhankelijkheid en de snelheid van het pipingproces, evenals het effect van

verschillende typen van heterogeniteit behandeld. Aan de hand hiervan wordt voor elk van de drie ieder onderwerp een plan van aanpak voor vervolgonderzoek beschreven.

2.1.52.3 *Conclusies*

Er komt een onderzoek naar de onderbouwing van de aangepaste rekenregel, naar het effect van tijdsafhankelijkheid en naar het effect van heterogeniteit. Naar aanleiding van dit plan van aanpak zullen twee rapporten (één voor de eerste twee aspecten, en één over het derde aspect deze worden besproken in par 2.1.53 en 2.1.54) opgeleverd worden en de rapporten worden besproken in een workshop met externe experts.

Het onderzoek naar de onderbouwing van de rekenregel zal onderzoek bevatten naar mogelijke oorzaken van de afwijking tussen model en experimenten. Het onderzoek over tijdsafhankelijkheid gaat in op het nut en de haalbaarheid van de voorspelling van de tijd tot bezwijken, op basis waarvan besloten kan worden of het nuttig is verder te gaan met de ontwikkeling van een tijdsafhankelijk model. Het onderzoek over heterogeniteit beschouwt macro-heterogeniteit in horizontale richting en micro-heterogeniteit. Macro-heterogeniteit in de verticale richting wordt in een apart onderzoeksrapport beschouwd.

2.1.53 **SBW Piping. 2B. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregel, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit. Eindrapport**

Deltares rapport nr. 1204201-002-GEO-0001; 2011

Onderwerpen: 1, 3, 4, 7, 9,10

2.1.53.1 *Doel van het rapport*

Onderzoek beschrijven ten aanzien van de fysische onderbouwing van de rekenregel van Sellmeijer, van de invloed van tijdsafhankelijkheid op het toetsoordeel, en van de invloed van heterogeniteit

2.1.53.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden de uitkomsten van deelonderzoeken beschreven die zijn uitgevoerd om:

- een fysische onderbouwing van de sterktefactor in de aangepaste rekenregel van Sellmeijer te geven:
 - verschillen tussen proeven, rekenmodel en praktijk worden geanalyseerd.
 - de aangepaste rekenregel wordt vergeleken met bestaande experimentele gegevens.
 - een aanzet voor de verbetering van het model wordt gegeven.
- vast te stellen of het meenemen van tijdsafhankelijk gedrag tot een gunstiger toetscriterium kan leiden voor het bestuderen van cumulatieve schade:
 - het blijven bestaan van wellen tussen hoogwaters wordt gekeken naar ervaring uit de praktijk. Ook worden mogelijkheden voor het volgen van de ontwikkeling van een pipingkanaal onder de kleilaag in het veld beschouwd.
 - het voorspellen van de snelheid van ontwikkeling van pipes wordt behandeld.
 - het effect van instationair rekenen, met elastische berging wordt beschouwd.
- de relevantie van heterogeniteit voor piping te beoordelen.
 - macro-heterogeniteit in verticale richting, horizontale richting en micro heterogeniteit worden besproken.
 - een case wordt behandeld

Voor het derde punt zijn zowel bureaustudie als experimenten uitgevoerd die ook behandeld worden in de rapporten in par. 2.1.54 en 2.1.55.

2.1.53.3 *Conclusies*

Met betrekking op de fysische onderbouwing van de rekenregel:

- Het pipingproces (het ontstaan en terugschrijven van de pipe) bestaat uit twee fasen; initiatie en progressie van de pipe. Afhankelijk van de geometrie en de kwelweglengte is één van deze twee fasen maatgevend voor doorgroeien van de pipe.
- Het model van Sellmeijer is gebaseerd op progressie, maar is gefit met proeven waarin initiatie maatgevend was.
- De lokale gradiënt nabij het uittreepunt lijkt maatgevend te zijn voor initiatie van de pipe.
- Er zijn onvoldoende proeven waarin progressie maatgevend is om te bepalen of het model van Sellmeijer toepasbaar is voor dit proces.

Met betrekking op tijdsafhankelijkheid blijkt dat kanalen na vorming minimaal enkele maanden intact kunnen blijven. De duur van het erosieproces kan alleen worden benut wanneer de staat van de dijk gemonitord kan worden. Door de invloed van berging bij een hoogwatergolf met een beperkte tijdsduur wordt de opbouw van de waterdrukken in de ondergrond beperkt.

Met betrekking op heterogeniteit geldt dat dit invloed heeft op de grondwaterstroming en daarmee op het kritiek verval. De aanwezigheid van klei- of grindlenzen in het watervoerend pakket heeft over het algemeen een verlagend effect op het kritieke verval. Alleen kleilenzen direct onder een dijklichaam verhogen het kritieke verval.

2.1.54 **SBW Piping. 3A Onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting.**

Deltares rapport nr. 1204201-003-GEO-0001; 2011

Onderwerpen: 7b, 9

2.1.54.1 *Doel van het rapport*

Een plan van aanpak opstellen om de uitkomsten van de predictie van MSeep voor piping in meerlagensystemen te valideren met uitkomsten van laboratorium proeven en praktijkgevallen.

2.1.54.2 *Beschrijving van het rapport*

Data uit de literatuur van proeven met meerlagen systemen wordt beschreven en geanalyseerd. Aan de hand hiervan zijn kennisleemten geïdentificeerd en wordt een plan van aanpak opgesteld voor experimenteel onderzoek (het rapport dat daaruit volgt wordt behandeld in par. 2.1.55).

2.1.54.3 *Conclusies*

In proeven en predictie is het kritiek verval kleiner in de situatie waar een grove laag aanwezig is onder een fijne zandlaag dan wanneer dit niet het geval is. De beschikbare experimenten zijn onvoldoende voor de validatie van het rekenmodel voor meerlaagse zandpakketten. Voor de validatie zijn nodig:

- Validatie met nauwkeurig bepaalde invoerparameters;
- Validatie met zand met eigenschappen die binnen het toepassingsgebied van de rekenregel vallen;
- Validatie met zanden met een doorlatendheidscontrast voorkomend in Nederlandse gebieden met een variërende dikte van de toplaag;
- Analyse van de invloed van een verticaal gedeelte of een puntvormig uittredepunt.

2.1.55 **SBW Piping. 3B Onderzoeksrapport macro-heterogeniteit in verticale richting**

Deltares rapport nr. 1204201-003-GEO-0002; 2011

Onderwerpen: 2e, 7b, 9

2.1.55.1 *Doel van het rapport*

De berekening van het kritiek verval voor een meerlagen (twee of meer gestapelde horizontale lagen) zandpakket te valideren met experimenteel werk zodat dit in de toetsmethodiek opgenomen kan worden.

2.1.55.2 *Beschrijving van het rapport*

De opzet en het programma van het experimentele werk worden beschreven. Er zijn proeven gedaan met verschillende uitstroom configuraties, een helling- en een gat- configuratie, en er zijn twee soorten zand gebruikt voor de bovenste laag fijn zand. De resultaten van de experimenten worden behandeld. Terugschrijdende erosie en het verbreden van de pipe zijn waargenomen. In enkele proeven is waargenomen dat de gehele toplaag fluïdiseert, deep seated piping genoemd. De resultaten van deze proeven en van literatuurproeven worden vergeleken met predicties uit MSeep. De consequenties van de bevindingen voor de toetspraktijk worden beschreven. Er wordt een gemiddelde doorlatendheid beschreven die in de rekenregel toegepast kan worden voor beperkte doorlatendheidscontrasten in situaties waar de grondwaterstroming gedomineerd is door de horizontale component van de stroming.

2.1.55.3 *Conclusies*

Piping in meerlaagse zandpakketten kan voor proeven met een helling-configuratie goed voorspeld worden, maar dit is niet het geval voor de gat configuratie. Daarvoor is het gemeten kritieke verval significant lager dan het berekende kritieke verval.

Mits het homogene geval goed kan worden voorspeld met MSeep kan dit ook voor het meerlagen geval.

De rekenregel kan worden toegepast met een aangepaste gemiddelde doorlatendheid mits voldaan wordt aan bepaalde voorwaarden met betrekking op de lengte/dikte verhouding van het watervoerend pakket en verhouding in de doorlatendheid van de verschillende lagen.

2.1.56 **SBW Piping Kunstwerken. 4. Bureaustudie inventarisatie problemen en oplossingen piping bij historische kunstwerken.**

Deltares rapport nr. 1204201-004-GEO-0001; 2011

Onderwerpen: 8

2.1.56.1 *Doel van het rapport*

Bestaande methoden voor de (gedetailleerde) toetsing van kunstwerken op onder- en achterloopsheid analyseren en toepassen op resultaten van in de literatuur beschreven experimenten en praktijkgevallen.

2.1.56.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt een overzicht gegeven van rekenmethoden op het gebied van achter- en onderloopsheid. Deze worden toegepast op proevenseries uit de literatuur te voorspellen en de resultaten worden vergeleken. Ook worden enkele praktijdsituaties geanalyseerd. Aan de hand van de procesgang voor het toetsen van kunstwerken op onder- en achterloopsheid worden aanbevelingen gegeven voor het verbeteren en inzichtelijker maken van dit toetsproces.

2.1.56.3 *Conclusies*

Voor achterloopsheid is geen andere toetsmethode dan Lane beschikbaar. Voor onderloopsheid zijn er wel gedetailleerde toetsmethoden (Fragmentenmethode of numerieke

berekeningen), maar deze vergen wel een goede kennis van de laagopbouw en de positie en kwaliteit van de kwelchermen. Er is een behoorlijke winst te halen door gebruik te maken van deze methoden. In veel gevallen (maar niet in alle) is Lane behoorlijk conservatief.

2.1.57 SBW Piping 5A: Model development for initiation of piping

Deltares rapport nr. 1206013-001-GEO-0003; 2012

Onderwerpen: 2a, 2e, 9

2.1.57.1 Doel van het rapport

Een criterium formuleren voor de initiatie van piping, dat kan dienen om rekenregels voor initiatie op te stellen.

2.1.57.2 Beschrijving van het rapport

Voor de initiatie van piping, het begin van erosie in een intact zandpakket, wordt uitgegaan van de evenwichtssituatie voor het optreden van heave (heave criterium volgens Terzaghi). Voor verschillende geometrieën van het uittredepunt worden analytische oplossingen voor het uittredeverhang beschouwd. In combinatie met numerieke berekeningen en experimentele data wordt beschouwd hoe groot de groep korrels is waarin de heave gradiënt kritiek is bij de initiatie van piping. Er wordt ingegaan op het verkrijgen van het verhang bij het uittredepunt in numerieke berekeningen, aangezien dit afhankelijk is van de afmetingen van de mesh.

2.1.57.3 Conclusies

Voor uittredepunten die overeenkomen met een oppervlakte (horizontale uitstroom in een vlak) of een helling treedt initiatie op wanneer het heave criterium in een groep korrels met een afmeting van ca. 20 – 60 keer de d_{50} wordt overschreden; bij een helling als uittredepunt is de hoek van inwendige wrijving gebruikt om het heave criterium te bepalen. Voor uittredepunten die overeenkomen met een gat kon dit niet bepaald worden met de beschikbare data.

Het verhang bij het uittredepunt is bepaald door combinatie van numerieke berekeningen en analytische oplossingen. Deze methode vereist dat een voldoende verfijnde mesh gehanteerd wordt (bij een oppervlakte uitstroom een mesh <1 m bij een kwelweglengte van 50 m).

2.1.58 SBW Piping 5B: Progression of piping

Deltares rapport nr. 1206013-001-GEO-0009; 2012

Onderwerpen: 1, 2c, 2e

2.1.58.1 Doel van het rapport

Het model voor de progressie van piping verbeteren, door het effect van de uitstroom configuratie te analyseren; het Sellmeijer model valideren aan de hand van experimenten waarin progressie (en niet initiatie) maatgevend is.

2.1.58.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport wordt de invloed van geometrie, intrede- en uittredepunt, op het kritieke verval voor initiatie en voor progressie vergeleken. Vervolgens wordt de beschrijving van het erosie mechanisme in de pipe besproken, en de aannamen hierin. Deze aannamen worden aan de hand van proeven geanalyseerd. Aan de hand van proeven worden vervolgens het model van Sellmeijer en het model van Hoffmans met elkaar vergeleken.

2.1.58.3 *Conclusies*

Het Sellmeijer model beschrijft de invloed van de pipe op de grondwaterstroming wel goed, maar de gradiënt in de pipe zelf en de hoogte van de pipe niet. Door de bestaande onzekerheden met betrekking op het erosie mechanisme is verder onderzoek nodig voordat een verbetering van het Sellmeijer model toegepast kan worden.

2.1.59 **SBW Piping. 6A. Evaluatie monitoringstechnieken**

Deltares rapport nr. 1206013-GEO-0003; 2012

Onderwerpen: 6a

2.1.59.1 *Doel van het rapport*

Mogelijke meettechnieken om het pipingproces te monitoren aangeven.

2.1.59.2 *Beschrijving van het rapport*

Deze memo beschrijft potentiële methoden om de vorming van pipes in de tijd te monitoren. Er wordt ook ingegaan op de locatie van de monitoring.

2.1.59.3 *Conclusies*

Een goed inzicht in de ondergrond en (een combinatie van) meet technieken geeft de beste mogelijkheden om monitoring van de ontwikkeling van de pipingzone succesvol te laten zijn. Echter het onderzoek dat wordt uitgevoerd zit op de grens van wat mogelijk is, aangezien de vorming van pipingkanalen op mm schaal is.

2.1.60 **SBW Piping. 6B. Modelling transient groundwater flow and piping under dikes and dams**

Deltares rapport nr. 1206013-000-GEO-0004; 2012

Onderwerpen: 4a, 4b, 9,

2.1.60.1 *Doel van het rapport*

Beschrijven van een eindige elementen grondwaterstromingsmodel, DGFlow, waarmee piping kan worden gemodelleerd voor niet-stationaire stroming gebruikmakend van de Richards vergelijking.

2.1.60.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden de vergelijkingen voor stroming en pipevorming en de implementatie hiervan in MSeep en in DGFlow gegeven. Vervolgens worden enkele numerieke berekeningen uitgevoerd met beide modellen met stationaire stroming ter verificatie van DGFlow. Tot slot worden berekeningen met niet-stationaire stroming in DGFlow gepresenteerd.

2.1.60.3 *Conclusies*

De afwijking van evenwichtsvoorwaarde voor piping in MSeep berekeningen is gemiddeld 12%, in DGFlow is dit slechts 2%. Bij niet-stationaire berekeningen nemen de waterspanningen in de aquifer langzamer toe, waardoor de vorming van pipingkanalen ook langzamer is. Het algoritme in DGFlow moet nog geoptimaliseerd worden met betrekking op robuustheid, snelheid en nauwkeurigheid. In een volledig niet-stationaire benadering zou ook de erosiesnelheid en de snelheid waarmee korrels worden getransporteerd in het pipingkanaal meegenomen moeten worden.

2.1.61 SBW Piping. 6C. Invloed van demping van de belasting bij piping

Deltares rapport nr. 1206013-002-GEO-0001; 2012

Onderwerpen: 2, 6c, 9

2.1.61.1 Doel van het rapport

Komen tot een gestandaardiseerde methode om de duur van de toetswaterstand mee te nemen bij de bepaling van het toegestane verval over de waterkering.

2.1.61.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport wordt de probleemdefinitie geschetst en wordt aangegeven hoe in enkele gevallen al rekening gehouden is met een hoogwaterbelasting van beperkte duur bij in de toetsing van piping. Vervolgens worden de vormen van berging beschreven, en de bepaling van demping aan de hand van TR Waterspanningen bij dijken (TAW, 2004) gebruikmakend van een lekfactor voor stationaire en niet stationaire stroming. Voor de toepassing van niet stationaire grondwaterstroming wordt ingegaan op de bepaling van de lekfactor aan de hand van stijghoogte metingen in praktijk cases, en de extrapolatie hiervan naar de stijghoogte bij maatgevend hoogwater (MHW). Cases worden in de bijlagen uitgewerkt.

2.1.61.3 Conclusies

De mate van demping is afhankelijk van de elastische berging (consolidatie) van de deklaag. Bij een lagere consolidatiecoëfficiënt is de demping groter. De mate van demping is afhankelijk van de duur van de belasting en de afstand tot het intredepunt. De geohydrologische omstandigheden tijdens MHW moeten min of meer gelijk zijn aan de omstandigheden tijdens de meting. De methode blijkt beperkt toepasbaar op basis van praktijk cases, en er moet tijdens de metingen een voldoende groot verhang over de dijk aanwezig zijn om de lekfactoren te kunnen kalibreren. Eindige elementen grondwaterstromingsprogramma's kunnen beter gebruikt worden om potentiaalgradiënten te bepalen en om bodem parameters te kalibreren, om zo voor zowel stationaire als voor niet stationaire stroming de potentiaal in de watervoerende zandlaag onder en achter de dijk te bepalen.

2.2 Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, 2012

Onderwerpen: allen.

2.2.1 Doel van het rapport

Doel van het ORZW is een samenhangende beschrijving van de state-of-the-art kennis te geven van alle aspecten die samenhangen met het verschijnsel zandmeevoerende wellen bij waterkeringen en die van belang zijn voor toetsing, ontwerp en beheer van waterkeringen. Dit rapport is relevant voor ontwerpers en beheerders van (primaire) waterkeringen en hun technische adviseurs.

2.2.2 Beschrijving van het rapport

In dit rapport zijn de kennis en nieuwe inzichten, die in het kader van het onderzoeksprogramma Sterke & Belastingen Waterkeringen (SBW) op het gebied van piping zijn opgedaan, verwerkt.

Er wordt ingegaan op bestaande (pre-SBW) piping kennis, en op schadebeelden die in de praktijk kunnen worden waargenomen. De mechanismen (opbarsten, heave, piping en achterloopsheid) worden beschreven evenals diverse modellen en rekenregels voor deze mechanismen. De toetsing van opbarsten, heave en piping in het kader van de Voorschriften toetsen op Veiligheid (VTV 2006) worden behandeld, evenals preventieve maatregelen tegen

pipings. Schematisering van de ondergrond voor piping, en parameterbepaling worden toegelicht en er wordt ingegaan op veiligheidsfilosofie (voor VTV 2006). Ook bevat het rapport 3 rekenvoorbeelden.

2.2.3 Conclusies

Het onderzoeksrapport is nog niet geschikt om als Technisch Rapport te worden gebruikt. De toepassing van de verbeterde rekenregel vraagt nog om nadere uitwerking¹. Aan het rapport is daarom een notitie toegevoegd die aandachtspunten voor het gebruik van het ORZW geeft en die later is doorontwikkeld tot een de werkwijzer Piping bij Dijken (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2015).

2.3 WTI/WBI 2017 rapporten

2.3.1 WTI 2017 Piping: Probabilistic piping model in WTI 2017. Uplift, Heave and Piping

Deltares rapport nr. 1207805-008-ZWS-0004; 2013

Onderwerpen: 3

2.3.1.1 Doel van het rapport

Identificeren van robuustheidsproblemen in probabilistische analyses voor het faalmechanisme piping (op doorsnedeniveau) zoals beoogd in WTI-2017. Aandragen van informatie voor een beslissing om al dan niet het mechanisme heave onderdeel te maken van de toetsing van het faalmechanisme piping in WTI-2017

2.3.1.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport worden de mechanismen uplift, heave, en piping gepresenteerd. Het bepalen van de faalkans voor de verschillende mechanismen, voor verschillende scenario's van ondergrondopbouw, wordt kort behandeld. FORM analyses en Monte Carlo simulaties voor de drie faalmechanismen apart, en voor een parallel systeem, worden geanalyseerd. Het effect van heave op de faalkans van piping wordt geanalyseerd. Aanbevelingen worden gedaan voor vervolgstappen in het kader van de ontwikkeling van WTI-2017.

2.3.1.3 Conclusies

FORM in combinatie met first-order system reliability technieken is een efficiënte en daardoor aantrekkelijke default methode voor probabilistische piping analyses op doorsnedeniveau. Behalve voor risicovrije aanpassingen zou zo dicht mogelijk bij de in VNK2 bewezen technologie moeten worden gebleven.

Aanbevolen wordt om heave onderdeel van de piping toets te maken bij voorkeur op het niveau van de gedetailleerde toets, maar zeker voor de toets op maat.

2.3.2 WTI 2017 Piping: Safety Assessment for Piping in WTI 2017 Report progression

Deltares rapport nr. 1207809-004-GEO-0003; 2013

Onderwerpen: 1a, 1c, 1d

2.3.2.1 Doel van het rapport

Het effect van schaal op pipe progressie beoordelen, en daarmee om progressie goed te modelleren

¹ Uit MEMO Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen, in Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.

2.3.2.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden medium-schaal proeven beschreven die gebruikt zijn om de stroming in de pipe en de afmetingen van de pipe te bestuderen. Het effect van schaalgrootte is bestudeerd aan de hand van bestaande kleine- en medium- schaal proeven en vergeleken met het Sellmeijer model voor twee typen zand (Itterbeck en Baskarp). De stroming in de pipe wordt geanalyseerd met behulp van numerieke simulaties en experimentele data.

2.3.2.3 *Conclusies*

De breedte van de pipe was groter voor het grovere (Itterbeck) zand. Het effect van schaal op het kritieke verval is niet hetzelfde voor het fijnere en het grovere zand. Het lijkt dat de het model van Sellmeijer goed toepasbaar is voor het fijnere (Baskarp) zand. De pipe in het grovere zand heeft een grotere invloed op de grondwaterstroming dan de pipe in het fijnere zand, wat niet voorspeld wordt in het Sellmeijer model. Aanbevelingen worden gedaan voor vervolgonderzoek.

2.3.3 **WTI 2017 Piping: Modeling Groundwater Flow and Piping under Dikes and Dams. Model Validation and Verification.**

Deltares rapport nr. 1207809-005-GEO-0001; 2013

Onderwerpen: 4a, 4b, 7b, 9

2.3.3.1 *Doel van het rapport*

Beschrijven van een eindige elementen grondwaterstromingsmodel, DGFlow, waarmee piping kan worden gemodelleerd voor niet-stationaire stroming gebruikmakend van de Richards vergelijking.

2.3.3.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden de vergelijkingen voor stroming en pipevorming en de implementatie hiervan in DGFlow gegeven. Vervolgens worden enkele numerieke berekeningen uitgevoerd voor zowel stationaire als niet-stationaire stroming voor verschillende typen ondergrond (homogeen en tweelagen, zand en gravel en zand en gravel). De resultaten worden ter verificatie vergeleken met MSeep resultaten. Het model wordt gevalideerd met experimentele resultaten.

2.3.3.3 *Conclusies*

Voor stationaire stroming komen resultaten van DGFlow goed overeen met MSeep resultaten. Voor een homogene ondergrond komen deze overeen met de resultaten van de rekenregel van Sellmeijer. Voor twee-lagen systemen kan het kritieke verval in de numerieke modellen vijf keer zo hoog zijn als het kritieke verval volgens de rekenregel, dit effect hangt af van het doorlatendheidscontrast. Bij niet-stationaire berekeningen nemen de waterspanningen in het aquifer langzamer toe, waardoor de vorming van pipingkanalen ook langzamer is. In de validatie zijn op basis van de proeven de parameters teruggerekend waarmee het kritieke verval kon worden berekend.

2.3.4 **WTI 2017 Piping: KPP 2013 Cluster 3; Toetsregels piping. Onderzoek invloed tijdsafhankelijkheid**

Deltares rapport nr. 1207809-006-GEO-0001; 2013

Onderwerpen: 4a, 4b, 6c, 9,

2.3.4.1 *Doel van het rapport*

Toepassing van het eindige elementen grondwaterstromingsmodel DGFlow voor twee cases om inzicht te krijgen in het effect van tijdsafhankelijkheid.

2.3.4.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt het model DGFlow gepresenteerd en toegepast voor het berekenen van niet stationaire stroming in twee cases, bij Vianen en bij Capelle aan den IJssel.

2.3.4.3 *Conclusies*

De waterspanning bij het uittredepunt is beduidend lager naarmate de samendrukbaarheid van het watervoerend pakket groter is, hierdoor geven niet stationaire berekeningen een minder conservatief resultaat dan stationaire berekeningen. Het proces van terugschrijdende erosie is korter bij de niet stationaire berekening dan bij de stationaire berekening.

2.3.5 **WTI 2017 Piping: Self Potential monitoring van piping**

Deltares rapport nr. 1207809-007-GEO-0002; 2013

Onderwerpen: 6a

2.3.5.1 *Doel van het rapport*

Onderzoeken of de Self Potential (SP) methode geschikt is om de ontwikkeling van piping te monitoren en het ingaan op mogelijke complicaties en oplossingen daarvoor.

2.3.5.2 *Beschrijving van het rapport*

De SP methode wordt in detail beschreven. Hierbij wordt het effect van piping op het potentiaalveld aan de oppervlakte uitgelegd en vervolgens wordt ingegaan op de meting van het natuurlijk potentiaal veld. De benodigde instrumentatie en interpretatie van de SP metingen wordt behandeld en een voorbeeld van toepassing (in Frankrijk) wordt besproken. Vervolgens worden experimenten besproken waarin gekeken wordt naar de gevoeligheid van elektroden en de mogelijkheid om met behulp van deze methode het potentiaalverschil te meten tussen twee punten in een grote zandbak terwijl water aan de zijkant werd geïnjecteerd.

2.3.5.3 *Conclusies*

De experimenten met een proefopstelling wijzen uit dat er een sterke relatie bestaat tussen het elektrisch potentiaalveld aan het oppervlak en veranderingen in de waterdruk gradiënt in de opstelling. Daardoor wordt de methode geschikt geacht voor het monitoren van piping. De toepassing wordt echter gecompliceerd door storende factoren, zoals het effect van temperatuurverschillen tussen de elektrodes en diffusie in of uit de elektrodes. Aanbevelingen worden gedaan om deze effecten te kunnen minimaliseren.

2.3.6 **WTI 2017 Piping: Research and Development of Flood Defense Assessment Tools for Piping in WTI 2017 - Report 12. Heterogeneity**

Deltares rapport nr. 1207809-008-GEO-0003; 2013

Onderwerpen: 1a, 2c, 7 (en specifiek 7a), 10c

2.3.6.1 *Doel van het rapport*

Inzicht bieden in het effect van heterogeniteit op het pipingproces (en op het kritiek verval) om dit proces beter te kunnen modeleren.

2.3.6.2 Beschrijving van het rapport

In dit rapport worden de volgende onderwerpen beschouwd:

- 1 Het effect van een inhomogene deklaag, door middel van kleine schaal piping experimenten.
- 2 Het effect van fines c.q. van de korrelverdeling, van de zandlaag, door middel van kleine schaal piping experimenten.
- 3 Resultaten van bestaande experimenten waarin horizontale macro-heterogeniteit aangebracht is.
- 4 Variatie van d_{70} in het veld, op basis van een dataset boringen.

Met betrekking op punt 1 wordt gekeken naar de situatie waarbij de deklaag lokaal dieper in het watervoerend pakket steekt, en naar het effect van een geheel hellende deklaag. De observaties worden besproken en vergeleken met berekeningen in MSeep en met de (aangepaste) rekenregel van Sellmeijer.

Met betrekking op punt 2 zijn kleine-schaal proeven beschreven en de resultaten worden besproken en vergeleken met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer. In deze proeven is gebruik gemaakt van fines die bestaan uit kleine kwartskorrels (geen kleimineralen).

Horizontale macro-heterogeniteit (punt 3) wordt behandeld aan de hand van bestaande proeven uit het SBW onderzoek (par 2.1.3).

De variatie van de d_{70} (punt 4) is bepaald voor een 75 bij 75 m proefveld aan de hand van 264 monsters.

2.3.6.3 Conclusies

- 1 Heterogeniteit waarbij de deklaag lokaal in het (horizontale zandpakket steekt) en waar het zandpakket omhoog helt leiden over het algemeen tot een hoger kritiek verval; een lager kritiek verval treedt op wanneer het zandpakket naar beneden helt. De combinatie van een hellend zandpakket en lokale deklaag variaties is niet onderzocht. Het aangepaste Sellmeijer model kon de kritieke vervallen redelijk beschrijven.
- 2 In de proeven met meer fines werden lagere kritieke vervallen gevonden dan met de aangepaste Sellmeijer regel en het effect van de korrelgrootteverdeling moet beter meegenomen worden in het Sellmeijer model.
- 3 Een pipe die zich in een fijner zandpakket ontwikkelt stopt bij een grovere zandlaag. Daar wordt de pipe breder en dieper. Dit geeft aan dat zowel primaire erosie aan de kop van de pipe, als secundaire erosie van de bodem en zijanten van de pipe meegenomen moeten worden.
- 4 Een hoge variabiliteit in de d_{70} is aangetroffen op een beperkt oppervlak. Verwacht wordt dat dit niet uitzonderlijk is voor de Nederlandse praktijk.

Heterogeniteit wordt van groot belang geacht voor de initiatie en progressie van pipes en dient nader onderzocht te worden.

2.3.7 WTI 2017 Piping: Calibration of the L/H ratio on behalf of a level 1 assessment rule ('eenvoudig') for Piping WTI 2017

Deltares rapport nr. 1209435-002-GEO-0001; 2014

Onderwerpen: 3, 3a

2.3.7.1 Doel van het rapport

Een relatie te vinden tussen de betrouwbaarheidsindex (β) op doorsnede- en scenario-niveau en de L/H ratio voor de eenvoudige toets op piping.

2.3.7.2 *Beschrijving van het rapport*

De kalibratie procedure en aannamen hierin, evenals de cases waarvoor de kalibratie is uitgevoerd worden beschreven. De kalibratie is uitgevoerd met Hydra-Ring. De vereiste β op doorsnedeniveau wordt tussen 3,2 en 5,5 aangenomen (op basis van de norm en lengte effect dit is de relevante interval). Voor de kalibratie zijn probabilistische berekeningen met het aangepaste Sellmeijer model gebruikt om de β bij bepaalde L/H ratio's te bepalen. De probabilistische analyses worden voor zowel piping alleen als voor piping in combinatie met uplift en heave uitgevoerd. De kalibratie wordt uitgevoerd voor een representatieve set van 12 trajecten (268 test cases, i.e. scenario's) uit de VNK2 data.

2.3.7.3 *Conclusies*

Aanbevelingen worden gedaan voor de vereiste L/H ratio als functie van β . Aanbevolen wordt om deze analyse ook voor andere dijktrajecten uit te voeren.

2.3.8 **WTI 2017 Piping: Beschrijving mechanismemodel voor uplift, heave en piping voor toetslaag 2a**

Deltares rapport nr. 1209435-003-GEO-0001; 2014

Onderwerpen: 2 (specifiek 2a en 2c), 3

2.3.8.1 *Doel van het rapport*

Het doel van deze notitie is om de rol van heave in het beoogde toetsspoor piping uiteen te zetten en een inschatting van de impact van het introduceren van heave te geven.

2.3.8.2 *Beschrijving van het rapport*

Deze notitie bevat een beknopte beschrijving van het faalmechanisme geeft de berekeningsmodellen kort weer. Een korte samenvatting van een studie naar de gevolgen van het meenemen van heave voor de berekende veiligheid wordt gepresenteerd.

2.3.8.3 *Conclusies*

Het voordeel van het meenemen van heave weegt op tegen de additionele inspanning, aangezien hiermee het effect van de strengere nieuwe pipingregel deels kan worden afgevangen.

2.3.9 **WTI 2017 Piping: Bepaling invoerparameters in het toetsspoor piping in WTI2017 - Keuze invoerparameter k voor toetslaag 2a v2**

Deltares rapport nr. 1209435-004-GEO-0003; 2014

Onderwerpen: 2 (met name 2f), 3, 10a, 10b

2.3.9.1 *Doel van het rapport*

Beschrijven van de methode waarmee de parameterwaarde voor doorlatendheid, k, is vastgesteld, gebruik van k in het berekeningsmodel voor toetslaag 2a toelichten.

2.3.9.2 *Beschrijving van het rapport*

Het conceptuele model voor piping wordt beschreven en de rekenregel hiervoor wordt gepresenteerd. Vervolgens wordt ingegaan op de ruimtelijke variatie in de eigenschappen van watervoerende pakketten, en op de schematisatie van de ondergrond in het WTI-SOS. Vervolgens wordt de bepaling van de equivalente doorlatendheid die de invloed van heterogeniteit in het zandpakket onder en bij de gehele dijk verdisconteerd toegelicht, met meer detail in de bijlage. Aanbevelingen worden gedaan over hoe de gebruiker vast kan

stellen welke WIT-SOS lagen aanwezig zijn op een locatie en wat de bijbehorende parameterwaarden zijn.

2.3.9.3 *Conclusies*

In deze notitie wordt beschreven op welke wijze de doorlatendheid voor toetslaag 2a door de gebruiker bepaald kan worden.

2.3.10 **WTI 2017 Piping: Bepaling invoerparameters in het toetsspoor piping in WTI2017 - Keuze invoerparameter d70 voor toetslaag 2a**

Deltares rapport nr. 1209435-004-GEO-0004; 2014

Onderwerpen: 1a, 2, 3, 10a, 10c

2.3.10.1 *Doel van het rapport*

Beschrijven wijze van vaststellen van de parameterwaarde voor de d_{70} voor toepassing in toetslaag 2a.

2.3.10.2 *Beschrijving van het rapport*

Het conceptuele model voor piping wordt beschreven en de rekenregel hiervoor wordt gepresenteerd. Vervolgens wordt ingegaan op de ruimtelijke variatie in de eigenschappen van watervoerende pakketten, en op de schematisatie van de ondergrond in het WTI-SOS. Vervolgens wordt de bepaling van de equivalente d_{70} die geldt voor het bovenste deel van een watervoerend pakket toegelicht. Aanbevelingen worden gedaan over hoe de gebruiker vast kan stellen welke WIT-SOS lagen aanwezig zijn op een locatie en wat de bijbehorende parameterwaarden zijn.

2.3.10.3 *Conclusies*

In deze notitie wordt beschreven op welke wijze de d_{70} voor toetslaag 2a door de gebruiker bepaald kan worden.

2.3.11 **WTI 2017 Piping: Schematiseringshandleiding faalmechanismen WTI 2017 Piping versie 1 (concept)**

Deltares rapport nr. 1209432-006-GEO-0005; 2014

Onderwerpen: met name 3, 10 (echter alle onderwerpen komen aan bod in deze of toekomstige versies van de schematiseringshandleiding).

2.3.11.1 *Doel van het rapport*

Deze concept versie van schematiseringshandleiding is opgesteld als hulpmiddel bij het schematiseren van een dijkvak voor het faalmechanisme piping voor de toetsing van primaire waterkeringen in Ringtoets (nieuwe naam RisKeer) (voor toetslagen 1, 2a en 2b).

2.3.11.2 *Beschrijving van het rapport*

In de schematiseringshandleiding worden de faalmechanismen opbarsten, heave en piping beschreven en de berekeningsmodellen worden gepresenteerd. Vervolgens worden de belastingen behandeld en wordt een stappenplan voor de toetsing gepresenteerd. De indeling van dijkvakken en vervolgens de schematisering per dijkvak worden behandeld, inclusief het gebruik van het WTI-SOS voor de schematisering van de ondergrond. Vervolgens worden de parameters die in de toetsing gebruikt worden, en de bepaling hiervan toegelicht.

2.3.11.3 *Conclusies*

Het betreft een schematiseringshandleiding, er zijn geen conclusies. Dit is een concept versie en aangegeven wordt dat delen nog later ingevuld moeten worden, een update wordt behandeld in par 2.3.18.

2.3.12 **WTI 2017 Piping: Flood Defense Assessment Tools for Piping in WTI 2017 - Report 9b. Groundwater Flow Simulator DGFlow 3D Validation piping module**

Deltares rapport nr. 1209435-006-GEO-0001; 2014

Onderwerpen: 1, 9

2.3.12.1 *Doel van het rapport*

Het 3D eindige elementen grondwaterstromingsprogramma DGFlow presenteren om daarmee piping beter te kunnen modeleren dan met de rekenregel van Sellmeijer of met 2D eindige elementen grondwaterstromingsberekeningen (zoals in het 2D DGFlow model in par 2.1.60 en 2.3.3).

2.3.12.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden de vergelijkingen voor stroming en pipevorming en heave en de implementatie hiervan in DGFlow gegeven. Vervolgens worden de proeven (uit het SBW onderzoek) beschreven die gebruikt zijn ter verificatie van het model. De experimentele resultaten worden vergeleken met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer die een overschatting met een factor van ca. 2 voor deze proeven met een 3D gat (en geen 2D oppervlak of helling) als uittredepunt. Ter validatie worden (in de 3D simulator) 2D simulaties gepresenteerd die goed overeenkomen met de rekenregel. Ter verificatie worden de 3D simulaties gepresenteerd waarin de experimenten worden gemodelleerd en de effecten van parameters worden beschouwd.

2.3.12.3 *Conclusies*

Simulaties voor een 2D situatie komen overeen met de rekenregel van Sellmeijer. Met een 3D configuratie neemt het kritieke verval af, maar de uitkomsten van de simulatie zijn een factor 1.5 lager dan de experimenteel gemeten waarden. Met een grotere beddingshoek zou wel een betere overeenstemming tussen het model en de experimenten verkregen worden, echter ook primaire erosie aan de kop van de pipe, die niet in het model is meegenomen, zou de oorzaak van de verschillen kunnen zijn. Het kritieke verval is gevoelig voor de korrelgrootte, en mogelijk zou DGFlow 3D toegepast kunnen worden in onderzoek naar hoe om te gaan met natuurlijke variatie in de korrelgrootte.

2.3.13 **WTI 2017 Piping: Field test measurement Self potential for piping localization: Modelling and testing (interim report, draft)**

Deltares rapport nr. 1209435-007-GEO-0002; 2014

Onderwerpen: 6a, 6b

2.3.13.1 *Doel van het rapport*

Het modelleren van self potential (SP) metingen om inzicht te krijgen in het monitoren van het pipingproces met behulp van SP metingen.

2.3.13.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt de fysica van SP metingen kort toegelicht en wordt ingegaan op mogelijke bronnen van ruis. Vervolgens wordt de toepassing van SP bij dijken besproken en

wordt uiteengezet hoe SP data gemodelleerd wordt. Met behulp van een model worden SP metingen gesimuleerd die verwacht worden op te treden tijdens het pipingproces. Vervolgens wordt de SP opzet voor 3 veldproeven beschreven, waar bij een toekomstig hoogwater metingen gedaan worden.

2.3.13.3 *Conclusies*

Dit is een draft rapport waar nog geen conclusies getrokken worden.

2.3.14 **WTI 2017 Piping: Calibration of the L-H ratio on behalf of a level 1 assessment rule for Piping**

Deltares rapport nr. 1220084-001-GEO-0001; 2015

Onderwerpen: 3b

2.3.14.1 *Doel van het rapport*

Een robuustere relatie te vinden tussen de betrouwbaarheidsindex (β) op doorsnede- en scenario- niveau en de L/H ratio voor de eenvoudige toets op piping dan in par 2.3.7, door beschouwing van een grotere dataset.

2.3.14.2 *Beschrijving van het rapport*

In deze notitie wordt alleen piping (niet in combinatie met uplift en heave) beschouwd. De kalibratie wordt uitgevoerd met de nieuwe probabilistische kernel in Hydra-Ring waarbij de betrouwbaarheidsindex voor iedere doorsnede en ondergrondscenario bepaald wordt.

2.3.14.3 *Conclusies*

Aanbevelingen worden gedaan voor de vereiste L/H ratio als functie van de vereiste betrouwbaarheidsindex β . Deze waarden zijn hoger dan de meeste huidige L/H ratio's in het veld, wat inhoudt dat momenteel voor het grootste deel van de gebruikte cases niet voldaan wordt aan de veiligheidseis voor piping. Mogelijk kan onderscheidt gemaakt worden tussen een L/G ratio voor situaties met en zonder deklaag waardoor scherper getoetst kan worden.

2.3.15 **WTI 2017 Piping: Use of the L/H ratio rule**

Deltares rapport nr. 1220084-001-GEO-0002; 2015

Onderwerpen: 3

2.3.15.1 *Doel van het rapport*

Toepassing van de L/H ratio beschrijven.

2.3.15.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt aangegeven hoe voor een dwarsprofiel de L/H regel wordt toegepast. Het gaat hierbij om het vaststellen van de aanwezige kwelweglengte L en het verval H, het bepalen van de vereiste betrouwbaarheidsindex voor de doorsnede (rekening houdend met het lengte-effect) aan de hand van de norm, en het vertalen van de vereiste β naar de vereiste L/H ratio.

2.3.15.3 *Conclusies*

Dit is een handleiding, er zijn geen conclusies.

2.3.16 WTI 2017 Piping: Toetsregel Piping. Piping and transient groundwater flow (report including case studies)

Deltares rapport nr. 1220084-005-GEO-0001; 2015

Onderwerpen: 4a, 4b, 4c, 5, 6c, 7b, 9

2.3.16.1 Doel van het rapport

Presenteren van resultaten van DGFlow waarin het effect van niet stationaire stroming wordt meegenomen in enkele numerieke simulaties, en vervolgens de toepassing van dit model voor twee cases.

2.3.16.2 Beschrijving van het rapport

In dit rapport is het rapport in par. 2.3.3, uitgebreid met case studies. In het voorgaande rapport zijn al simulaties gepresenteerd waarin effecten van freatische berging en elastische berging op de ontwikkeling van de grondwaterdrukken geanalyseerd worden. In het huidige rapport worden eerst een schematisatie van een rivierdijk en van een zeedijk beschouwd om realistischer aan te geven wat het effect van niet stationaire stroming is. Vervolgens worden twee cases, bij Brielle en bij Ameland gepresenteerd. Voor de cases wordt een model opgezet en zijn de geohydrologische parameters bepaald door middel van inverse analyse aan de hand van metingen. Vervolgens wordt het piping proces bij een hoogwatersituatie gesimuleerd. Hierbij kan piping alleen optreden indien ook heave optreedt.

2.3.16.3 Conclusies

Door elastische berging neemt de snelheid waarmee de grondwaterdrukken toenemen af, wat het ontstaan van een pipe remt. Echter wanneer een pipe gevormd wordt is de afname van de waterspanning door de aanwezigheid van de pipe ook verminderd, (de pipe heeft minder effect op de grondwaterspanningen) wat ongunstig kan zijn voor de snelheid waarmee terugschrijdende erosie optreedt. Momenteel is de snelheid waarmee pipegroei gesimuleerd wordt nog niet afhankelijk van de transportsnelheid waarmee korrels in de pipe afgevoerd kunnen worden. Deze toevoeging zou nodig zijn om een realistischere schatting voor de groeisnelheid van de pipe te verkrijgen.

De niet stationaire simulaties voor de cases konden de data goed reproduceren. Het effect van berging bleek echter klein te zijn voor deze gevallen. Uit de kalibratie met metingen bleek echter dat de intredeweerstand relatief hoog is in deze gevallen, waardoor een hoger kritiek verval gekeerd kon worden.

2.3.17 WTI 2017 Piping: Fenomenologische beschrijving faalmechanisme piping

Deltares rapport nr. 1220084-002-GEO-0001; 2015

Onderwerpen: 1, 2, 3, 4, 6b, 7

2.3.17.1 Doel van het rapport

Het beschrijven van het faalmechanisme piping op het niveau van de primaire deelmechanismen opbarsten, heave, en terugschrijdende erosie en het omschrijven van de toetsing hiervan.

2.3.17.2 Beschrijving van het rapport

Het rapport geeft een beschrijving van de binnen het faalmechanisme piping vallende processen en hun visuele kenmerken, opeenvolgend optredend bij een toenemende belasting. Aangegeven wordt welke mechanismen binnen Ringtoets (nieuwe naam RisKeer) getoetst dienen te worden en hoe deze samenhangen in een gebeurtenissenboom. Dit

document is als hoofdstuk verwerkt in de WTI bouwsteen 'Fenomenologische beschrijving faalmechanismen' en wordt in par 2.3.22 in meer detail toegelicht.

2.3.17.3 *Conclusies*

Er zijn geen conclusies dit betreft een achtergrondrapport dat de toetsers bij het uitvoeren van de gedetailleerde toets op piping dient te ondersteunen.

2.3.18 **WTI 2017 Piping: Schematiseringshandleiding WTI 2017. Faalmechanisme Piping bij dijken**

Deltares rapport nr. 1220084-006-GEO-0001; 2015

Onderwerpen: met name 3, 10 (echter alle onderwerpen komen aan bod in deze of toekomstige versies van de schematiseringshandleiding).

2.3.18.1 *Doel van het rapport*

Deze concept versie van schematiseringshandleiding is opgesteld als hulpmiddel bij het schematiseren van een dijkvak voor het faalmechanisme piping voor de toetsing van primaire waterkeringen in Ringtoets (nieuwe naam RisKeer) (voor toetslagen 1, 2a en 2b).

2.3.18.2 *Beschrijving van het rapport*

Dit is een update van de schematiseringshandleiding besproken in par. 2.3.11. Naast de verdere uitwerking van de reeds bestaande inhoud zijn in deze versie een case uitgewerkt en zijn bijlagen toegevoegd met: aanvullende informatie met betrekking op de faalmechanismen en de rekenregels; de vereiste benodigde betrouwbaarheid per doorsnede; voorbeelden van de equivalente doorlatendheid en d_{70} voor verschillende WTI-SOS zand en grindeenheden (met betrekking op het segment dat in de case getoetst wordt); toelichting op de bepaling van de equivalente doorlatendheid voor het WTI-SOS en het gebruik hiervan in de toetsing,

2.3.18.3 *Conclusies*

Het betreft een schematiseringshandleiding, er zijn geen conclusies. Dit is een concept versie en aangegeven wordt dat delen nog ingevuld moeten worden.

2.3.19 **WTI 2017 Piping: WTI Verschilanalyse Piping**

Deltares rapport nr. 1220078-002-GEO-0002; 2015

Onderwerpen: 1, 2, 3, 10

2.3.19.1 *Doel van het rapport*

Antwoord te geven op de vraag: leiden de wijzigingen van de voorschriften voor piping in het WTI 2017 tot significant andere uitkomsten van analyses (gegeven de nieuwe normen)? Het gaat hierbij dus om de verschillen in de Sellmeijer-formulering, de nieuwe veiligheidsfactoren, de gewijzigde schematisering van de grondparameters (bepaling en onzekerheden), en het meenemen van het heave criterium. In het rapport wordt zowel gekeken naar de verschillen tussen concept WTI 2011 en WTI 2017 als naar het verschil tussen VTV/HR2006 en WTI 2017

2.3.19.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden verschillende representatieve doorsneden geanalyseerd. Hierbij wordt op niveau 2a (per vak en mechanisme semi-probabilistisch) gerekend.

Eerst worden de wijzigingen tussen VTV/HR2006 en WTI 2011 en 2017 toegelicht. Het gaat hierbij om:

- de aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer (het effect van de d_{70} , de beddinghoek, het 2-krachten in plaats van 4-krachten model);
- aanpassing in de sterktefactor (de afhankelijkheid van het vereiste betrouwbaarheidsniveau, en het meenemen van het lengte effect);
- het gebruik van de stochastische ondergrondschematisering waarmee de schematiseringsfactor komt te vervallen
- de bepaling van de (equivalente) d_{70} en de (equivalente) doorlatendheid;
- het meenemen van het deelmechanisme heave;
- het meenemen van de duur van de hoogwater belasting in de eenvoudige toets;
- het meenemen van het voorland bij bepaling van het intredepunt;
- het optreden van piping in getijdeafzettingen.

De uitgangspunten voor de berekeningen worden toegelicht, deze zijn uitgevoerd op scenario niveau, op dijkvak niveau met grootste kans van voorkomen (waarbij het scenario met de grootste kans van voorkomen voor de analyses conform de voorschriften van 2006 en 2011 als representatief is gekozen voor het hele dijkvak) en op dijkvakniveau met het meest conservatieve scenario voor de toetsingen cf. voorschriften 2006 en 2011. Voor de toetsing cf. voorschriften 2017 worden alle scenario's met kansen van voorkomen meegenomen. Analyses zijn uitgevoerd voor alle dijkvakken uit de beschikbare VNK database die geschikt zijn voor de toets op piping. Het betreft 673 dijkvakken met 3220 scenario's.

De resultaten worden gepresenteerd.

2.3.19.3 *Conclusies*

De conclusies die worden getrokken zijn:

- Op scenario niveau leidt de revisie van de Sellmeijer formule tot 14% meer lengte afgekeurd ten opzichte van de situatie met de originele formule, daarnaast leiden de aanpassingen in de sterktefactoren tot 10% meer afkeuringen in WTI2017 dan in VTV 2006.
- De mate van het aanwezige tekort aan weerstand zal ook om andersoortige maatregelen vragen dan de traditionelere maatregelen.
- Het effect van het meenemen van het heave-criterium is verwaarloosbaar klein.
- Op het niveau per dijkvak zijn de resultaten vergelijkbaar met die voor het scenario niveau voor de benadering met de grootste kans van voorkomen.
- Op het niveau per dijkvak voor het conservatieve scenario is het verschil minder groot doordat bij de WTI 2017 ook gunstigere scenario's gunstiger meewegen.
- De sterkste afwijkingen van de gestelde normen worden in het bovenrivierengebied gevonden.

Deze analyse is gedateerd op 15 november 2015, aanbevolen wordt om een update van de analyse te maken waarin de meest recente aanpak gehanteerd wordt.

2.3.20 **WTI 2017 Piping: Toetsregel Piping. Piping and transient groundwater flow (report including primary erosion)**

Deltares rapport nr. 1220084-004-GEO-0002; 2015

Onderwerpen: 4a, 4b, 4c, 5, 6c, 7b, 9

2.3.20.1 *Doel van het rapport*

Presenteren van het 3D eindige elementen grondwaterstromingsmodel DGFlow waarmee nu primaire erosie aan de pipe tip gemodelleerd kan worden en waarin de breedte van de pipe afhankelijk is van de diepte van de pipe.

2.3.20.2 *Beschrijving van het rapport*

Dit rapport is een uitbreiding op de rapporten in par 2.3.3 en 2.3.16. In deze versie wordt een criterium voor primaire erosie aan de kop van de pipe wordt voorgesteld, en het model is uitgebreid met een criterium voor de breedte/hoogte verhouding van het piping kanaal. Verificatietesten worden uitgevoerd ter vergelijking met de rekenregel van Sellmeijer en validatietesten worden uitgevoerd waarin verschillende proeven zijn nagerekend.

2.3.20.3 *Conclusies*

De verificatietesten tonen een goede overeenkomst tussen het model en de rekenregel van Sellmeijer. De validatietesten onderschatten het kritiek verval gemiddeld met een factor 1,5. Door het effect van primaire erosie aan de kop van de pipe mee te nemen zal het kritieke verval toenemen.

2.3.21 **WTI 2017 Piping: Monitoring Piping met Spontane Potentiaal methode. Test locatie Herxen**

Deltares rapport nr. 1220084-007-GEO-0001; 2015

Onderwerpen: 6

2.3.21.1 *Doel van het rapport*

Beschrijven van het monitoringssysteem gebaseerd op de spontane potentiaal (SP) methode bij de locatie Herxen.

2.3.21.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt toegelicht hoe SP metingen vanaf het maaiveld gebruikt kunnen worden om de lengteverandering van pipingkanaaltjes te monitoren. Vervolgens wordt het monitoringssysteem dat opgezet is bij de locatie Herxen beschreven. Hier is een grid van 25 elektroden geplaatst op het maaiveld naast een zandmeevoerende wel. Momenteel worden metingen gedaan, en het systeem blijft meerdere hoogwaterperioden aanwezig om data voor, tijdens en na het groeien (en eventuele krimpen) van piping kanaaltjes geanalyseerd kan worden.

2.3.21.3 *Conclusies*

Er zijn nog geen conclusies. Dit rapport beschrijft het aangebrachte monitoringssysteem.

2.3.22 **WTI 2017 Piping: Fenomenologische beschrijving**

Deltares rapport nr. 1220078-000-GEO-010; 2015

Onderwerpen: 1, 2, 3, 4, 6b, 7

2.3.22.1 *Doel van het rapport*

Dit rapport dient als achtergronddocument bij het WTI 2017 en beschrijft het faaltraject van initiatie tot falen van de waterkering per faalmechanisme.

2.3.22.2 *Beschrijving van het rapport*

De eerste versie van de fenomenologische beschrijving van het faalmechanisme piping voor dit rapport is summier behandeld in par. 2.3.17, in de voorliggende paragraaf wordt het document in meer detail behandeld.

In de fenomenologische beschrijving wordt het mechanisme piping en de processen die zich daarbij voordoen in eerste instantie globaal beschreven. Het verschil tussen piping zoals dat bij Nederlandse waterkeringen een rol speelt en andere vormen van interne erosie wordt

toegelicht. Situaties waarin piping een rol speelt worden aangegeven (aanwezigheid van een cohesieve deklaag, of een kleidijk op een zandlaag). De processen van opbarsten, welvorming en pipe-vorming, vergroting van het pipingkanaal en bezwijken worden toegelicht. Vervolgens wordt het (norm)faaltraject met toenemende belasting en afnemende sterkte in detail beschreven.

Het stationaire dan wel niet stationaire karakter van de hydraulische belastingen wordt voor verschillende dijken (zeedijken, rivierdijken) behandeld. Ook het effect van freatische berging, dat kan leiden tot een afname van de belasting wordt besproken.

Vervolgens worden de sterkte componenten behandeld. Het gaat hierbij primair om het gewicht van de deklaag bij opbarsten, de korrelgrootte van de pipinggevoelige zandlaag onder de deklaag, en de breedte van de dijk. De toename van de weerstand die kan optreden indien zich grovere zandbanen op het pad van een pipe bevinden wordt genoemd. Als secundaire sterktecomponenten worden intredeweerstand, berging van water in onverzadigde zones van de dijk, en lekkage door de deklaag genoemd.

De tijdsduur die benodigd is om een pipe te vormen speelt een rol, daardoor kan onder bepaalde voorwaarden worden aangenomen dat piping niet leidt tot falen van de dijk bij dijken die blootgesteld worden aan kortdurende belasting waar eerder nog geen piping is opgetreden.

De processen, kwel, opbarsten van de deklaag, heave, het ontstaan van pipes, het teruggroeien van de pipe tot het intredepunt, het ruimen, en bezwijken worden in detail behandeld; en observaties in het veld bij de verschillende processen worden benoemd. De faaldefinitie voor de gedetailleerde toets, het verval waarboven pipe-vorming niet stopt bij gelijkblijvende belasting wordt genoemd (evenals mogelijke oorzaken waardoor de pipe toch niet door zou groeien zoals heterogeniteit in de ondergrond). Aangegeven wordt dat de toetsing opbarsten, heave en terugschrijdende erosie betreft en dat reststerkte mogelijk aanwezig is na het overschrijden van het kritiek verval.

Een faalboom voor de deelmechanismen en een beknopte modelbeschrijving van de mechanismen wordt gegeven voor de gedetailleerde toets, toetslagen 2a en 2b.

2.3.22.3 *Conclusies*

Er zijn geen conclusies dit betreft een achtergrondrapport dat de toetser bij het uitvoeren van de gedetailleerde toets op piping dient te ondersteunen.

2.3.23 **WTI 2017 Piping: Memo Vergelijking methoden bepaling tijdsafhankelijkheid stijghoogte**

Deltares rapport nr. 1230086-003-GEO-0007; 2015

Onderwerpen: 2a, 2c, 2f, 4a, 6c

2.3.23.1 *Doel van het rapport*

Deze memo beschouwd twee methoden waarmee rekening gehouden kan worden met het tijdsafhankelijke gedrag van het grondwater ten opzichte van het oppervlaktewater dat een rol speelt bij een relatief kortdurende hoogwatertoestand.

2.3.23.2 *Beschrijving van het rapport*

In de memo worden een methode die ontwikkeld is in het SBW onderzoek (par 2.1.61) en een methode die ontwikkeld is door het waterschap Scheldestromen vergeleken. Beide methoden worden nader toegelicht. De toepasbaarheid en toepassingsgebieden worden vergeleken.

2.3.23.3 *Conclusies*

Beide methoden kunnen alleen worden toegepast bij een voldoende groot verschil tussen buitenwaterstand en grondwaterstijghoogte, echter het is onduidelijk wat voldoende groot precies is. Veranderingen in het voorland die samenhangen met intredepunt en intredeweerstand die gepaard gaan met hoogwater (zoals erosie) worden met deze methoden niet in rekening gebracht, hetzelfde geldt voor veranderingen in het polderpeil. Er wordt daarom geen conclusie getrokken ten aanzien van de best toepasbare methode.

2.3.24 **WTI 2017 Piping: Critical vertical gradients in piping. A preliminary sensitivity study concerning the 0.3-D rule**

Deltares rapport nr. 122088-003-VEB-0001; 2015

Onderwerpen: 1d, 2f, 3

2.3.24.1 *Doel van het rapport*

Het drukverlies in een verticale pipe afschatten waarmee de 0.3D rekenregel gevalideerd kan worden.

2.3.24.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport worden bestaande modellen om het verval in het verticale deel van een pipe te bepalen kort besproken. Deze geven verschillende waarden. Daarom wordt een nieuwe methode beschreven om het verval te bepalen aan de hand van de valsnelheid van korrels in de pipe, en de grondwaterstroming bij het uittredepunt. Hiermee wordt een gevoeligheidsanalyse gedaan naar het effect van parameters op het verval in de pipe en kleine schaal experimenten worden gemodelleerd. Het verval in de pipe hangt af van de hoeveelheid (concentratie) zandkorrels in de pipe. Dus naarmate er meer zandtransport optreedt, zal het verval groter worden.

2.3.24.3 *Conclusies*

Het verval in het verticale deel van de pipe hangt af van verschillende parameters.

Het model op basis van de instroom van water en de valsnelheid van korrels in de pipe geeft aan dat de lengte van de pipe, de diameter daarvan, de lengte waarover zand geërodeerd wordt, de doorlatendheid, en de valsnelheid allemaal effect hebben op het verval in de pipe.

Dit model dient nog te worden uitgebreid om het effect van het horizontale deel van de pipe op de grondwaterstroming te beschouwen.

Doordat er nog te veel onzekerheid bestaat is deze studie nog onvoldoende aanleiding om de 0,3 D regel aan te passen, het is aan de hand van deze studie niet mogelijk om aan te geven of de 0,3 D regel conservatief is of niet.

2.3.25 **WTI 2017 Piping: Update verschilanalyse piping – invloed aangepaste standaardafwijking ter bepaling karakteristieke waarde doorlatendheid en d_{70}**

Deltares rapport nr. 1230086-005-GEO-0002; 2016

Onderwerpen: 3, 10b, 10c

2.3.25.1 *Doel van het rapport*

Deze memo brengt de impact van de nieuw vastgestelde aanpak voor de bepaling van de karakteristieke waarden van de doorlatendheid en de d_{70} in kaart (ter vergelijking met de analyse in par 2.3.19).

2.3.25.2 *Beschrijving van het rapport*

In de eerdere verschilanalyse (behandeld in par 2.3.19) was uitgegaan van de karakteristieke waarde van de doorlatendheid en de d_{70} op basis van de gemiddelden en standaarddeviaties uit de VNK-database. In deze memo wordt de nieuwe methode gehanteerd. (opgemerkt wordt dat de resultaten van een nieuwe kalibratie in 2016 niet meegenomen zijn). De analyses zijn uitgevoerd voor zowel de ondergrens als voor de signaleringswaarde en zijn op scenario niveau en per dijkvak gemaakt.

In de nieuwe WTI 2017 methode is de variatiecoëfficiënt voor de d_{70} 12% en voor de doorlatendheid 50% (in de eerdere verschilanalyse waren de variatiecoëfficiënten uit de VNK database aangehouden). De berekeningen zijn gemaakt voor dezelfde dijkvakken en scenario's als in de eerdere verschilanalyse en de resultaten worden geanalyseerd.

2.3.25.3 *Conclusies*

De invloed van de aangepaste aanpak ter bepaling van de karakteristieke waarden van de doorlatendheid en de d_{70} wordt gering bevonden ten opzichte van de in 2015 gemaakte verschilanalyse (een afname van de afgekeurde lengte van 2 tot 4%). Daarmee blijven de conclusies uit de eerdere verschilanalyse van kracht.

- 2.3.26 **WTI 2017 Piping: Effect of time-dependence on piping safety assessment** (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)
Deltares rapport nr. 1220077-005-HYE-0006; 2016
Onderwerpen: 3, 4

2.3.26.1 *Doel van het rapport*

Nagaan wat het effect is van de tijdsafhankelijke pipingregel voor gebieden waar de belasting een beperkte tijdsduur heeft.

2.3.26.2 *Beschrijving van het rapport*

In het rapport wordt voor de dijken langs de Waddenzee (oost en west), langs de Westerschelde, en voor dijkvak 28-1 langs de Oosterschelde de beoordeling op lagen 1 en 2a gedaan, evenals met de tijdsafhankelijke piping regel. Voor die laatste regel wordt in deze memo gekeken of de aanwezige kwelweg voor de dijken in de bovengenoemde gebieden groter is dan 50 m. Indien dat het geval is worden deze goedgekeurd. In de semi-probabilistische beoordeling (2a) worden uplift, heave en piping beoordeeld. Resultaten van de verschillende beoordelingen worden vergeleken.

2.3.26.3 *Conclusies*

Met de tijdsafhankelijke pipingregel worden beduidend meer gevallen goedgekeurd dan met de beoordeling in laag 1. Langs de Waddenzee worden met de tijdsafhankelijke regel ook beduidend meer gevallen goedgekeurd dan met de semi-probabilistische beoordeling. Voor de Westerschelde is het verschil kleiner.

- 2.3.27 **WTI 2017 Piping: Bijlage 2: Toelichting snelheid pipe ontwikkeling.** (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)
Deltares rapport nr. 1220077-005-HYE-0004; 2016
Onderwerpen: 2c, 3, 4c, 6,

2.3.27.1 *Doel van het rapport*

Een toelichting bieden op de gekozen bovengrenswaarde voor de snelheid van de pipegroei van 2 mm/s.

2.3.27.2 *Beschrijving van het rapport*

Observaties uit de full-scale proeven (par. 2.1.33 en 2.1.34) liggen ten grondslag aan de beschrijving van het bezwijken van een dijk ten gevolge van piping. Na kwel treedt terugschrijdende erosie op, wanneer de pipe kortsluiting maakt met het buitenwater treedt het ruimen op en uiteindelijk bezwijken. Het proces van terugschrijdende erosie is gekozen als basis voor de tijdsafhankelijkheid regel, dit wordt als veilig beschouwd aangezien vervolgens het ruimproces ook nog plaats moet vinden.

Op basis van het rapport in par 2.1.53 (dat ondermeer de resultaten m.b.t. de snelheid van pipegroei in de SBW kleine-, medium- en grote- schaalproeven bevat) en aanvullend gebruikmakend van kleine schaal kolomproeven uit de V.S., en proeven van de Universiteit van Gent wordt het effect van verschillende parameters op de pipegroeisnelheid geanalyseerd. Die laatste proeven zijn uitgevoerd om de pipegroeisnelheid bij een verval dat hoger is dan het kritieke verval te analyseren. Daarin wordt als hoogste pipegroeisnelheid 1,1 mm/s gevonden. Waardoor een snelheid van 2mm/s ook voor boven-kritische situaties conservatief lijkt. 4 cases van door piping bezweken dijken worden beschouwd. Deze spreken een maximale groeisnelheid van 2 mm/s niet tegen.

2.3.27.3 *Conclusies*

Een nieuwe vuistregel op basis van een maximale pipegroeisnelheid voor het terugschrijdende erosieproces van 2 mm/s wordt voorgesteld. Deze snelheid wordt als conservatief beschouwd en niet weersproken door beschikbare cases van bezwijken.

2.3.28 WTI 2017 Piping: Plan van aanpak voor bepaling van representatieve doorlatendheid voor WTI piping kernel

Deltares rapport nr. 1220077-005-HYE-0001; 2016

Onderwerpen: 3, 7b

2.3.28.1 *Doel van het rapport*

Een plan van aanpak om voor het WTI 2017 Piping model een representatieve doorlatendheid te kunnen bepalen bij meerlagen systemen.

2.3.28.2 *Beschrijving van het rapport*

De piping kernel die ontwikkeld is voor WTI 2017 is gebaseerd op 1 doorlatende laag. In VNK2 is echter een ondergrondmodel met 2 lagen ontwikkeld. Om rekening te houden met heterogeniteit in de vorm van meerdere lagen is daarom besloten om met het VNK2 model het kritisch verval te berekenen en om via inverse berekening van de WTI formules de representatieve doorlatendheid te berekenen. Dit rapport presenteert de uitgangspunten, voorgenomen ontwikkeling, deliverables begroting, planning, risico's en beheersmaatregelen voor de ontwikkeling van de kernel. In een bijlage wordt het terug rekenen van de doorlatendheid toegelicht.

2.3.28.3 *Conclusies*

Het betreft een plan van aanpak, er zijn geen conclusies.

- 2.3.29 **WTI 2017 Piping: Sub-bijlage 5A: Optreden van piping in getijdenafzettingen** (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)
Deltares rapport nr. 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A; 2016
Onderwerpen: 1a, 2, 3, 6, 7, 10
- 2.3.29.1 *Doel van het rapport*
De mogelijkheid van piping in getijdeafzettingen analyseren, en vaststellen welke WTI-SOS getijdeneenheden benoemd kunnen worden voor die geldt dat het optreden van piping onwaarschijnlijk is.
- 2.3.29.2 *Beschrijving van het rapport*
De opbouw van getijdeafzettingen met vele kleine kleilaagjes wordt beschreven. Observaties in COW proeven (par 2.1.4) en grote schaal proeven (par. 2.1.33 en 2.1.34) die aantonen dat de groei van pipingtunneltjes gehinderd wordt door obstakels in het pad van de pipe worden aangehaald om te onderbouwen dat het onwaarschijnlijk is dat een pipe zich in bepaalde getijdeafzettingen ontwikkeld. Waarnemingen van piping in gebieden met getijdeafzettingen worden besproken.
Vervolgens worden de WTI-SOS eenheden die dusdanige concentraties aan kleilagen bevatten dat piping in deze afzettingen onwaarschijnlijk is toegelicht, tevens wordt aangegeven in welke WTI-SOS eenheden die getijdenafzettingen beschrijven piping wel op kan treden.
- 2.3.29.3 *Conclusies*
In vier WTI-SOS eenheden wordt piping onwaarschijnlijk geacht. Aanbevolen wordt om in verder onderzoek naar de invloed van heterogeniteit van de ondergrond op de kans op piping te verifiëren of dit terecht is.
- 2.3.30 **WTI 2017 Piping: Sub-bijlage 5B: Spreiding k_h -waarden voor stochastische analyse faalkans piping** (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)
Deltares rapport nr. 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5B; 2016
Onderwerpen: 3, 10a, 10b
- 2.3.30.1 *Doel van het rapport*
Een indicatie voor de spreiding (variatie) van de geschatte waarde van de doorlatendheid van zandpakketten in Nederland afleiden, aan de hand van analyse van zandpakketten in een enkel gebied in Nederland dat een grote variatie in doorlatendheid van zandpakketten kent.
- 2.3.30.2 *Beschrijving van het rapport*
De indicatie voor de spreiding is afgeleid uit random realisaties van de relatieve dikte van lagen in zandpakketten met elk random realisaties van doorlatendheid. Met deze realisaties worden equivalente horizontale doorlatendheden gegenereerd voor het pakket. De random realisaties van de doorlatendheid, k , zijn gebaseerd op schattingen van doorlatendheid van 25 zandpakketten die voor een gebied bij Gameren (dijkkring 38) zijn onderscheiden in VNK2.
- 2.3.30.3 *Conclusies*
De berekende variatiecoëfficiënt bedraagt ongeveer 40 % voor een normale verdeling van de berekende horizontale doorlatendheden, daarom wordt een waarde van 50 % als een ruime benadering voor de variatiecoëfficiënt voor de doorlatendheid van zandpakketten in Nederland gezien. Opgemerkt wordt dat de hier gehanteerde benadering een eerste globale schatting van de spreiding in doorlatendheid betreft voor zandpakketten in Nederland. Er zijn momenteel onvoldoende representatieve bepalingen van doorlatendheid beschikbaar en de

gehanteerde methodiek is niet met de benodigde zekerheid geverifieerd. Deze wordt gezien als onvoldoende om met de voor het toetsen geleverde zekerheid over dimensioneren of het missen van mogelijk ongunstige invloeden van heterogeniteit uit te sluiten. Nader onderzoek wordt aanbevolen.

2.3.31 **WTI 2017 Piping: Sub-bijlage 5C: benadering van de spreiding van de d70 van zandpakketten voor piping evaluatie** (bijlage van Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken)

Deltares rapport nr. 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5c; 2016

Onderwerpen: 3, 10c

2.3.31.1 *Doel van het rapport*

De spreiding van de d70 waarde van WTI-SOS eenheden voor piping te bepalen.

2.3.31.2 *Beschrijving van het rapport*

Er wordt beschreven hoe de korrelgrootte in verschillende typen zandafzettingen varieert en in hoeverre het voor verschillende typen afzettingen relevant is om WTI-SOS eenheden op regionale schaal te beschouwen en wanneer het zin heeft om sub-eenheden te onderscheiden. Vervolgens wordt ingegaan op de afmetingen van de monsters die nodig zijn voor de bepaling van de d_{70} . Vervolgens wordt toegelicht hoe op basis van de korrelgrootteverdelingen de waarde van de equivalente d70 wordt vastgesteld. Dit is een benadering voor de korrelgroottemaat van zandpakketten die equivalent is aan de d70 die is gekozen op basis van experimenten op homogeen zand.

Op basis van beschikbare gegevens van monsters in rivierzandpakketten (38 boringen 353 monsters) is de variatie van de daaruit herleidbare WTI-SOS eenheden nagegaan. Hieruit komen variatiecoëfficiënten voor verschillende categorieën van Holocene en Pleistocene rivierzanden tussen de 3% en 11%. Voorgesteld wordt daarom om een variatiecoëfficiënt van 12% te hanteren. Aangezien variatiecoëfficiënten van WTI-SOS eenheden die windafzettingen, getijdenezandafzettingen, en kustzandafzettingen kleiner zullen zijn wordt voorgesteld om de 12% voor alle zandpakketten te hanteren.

2.3.31.3 *Conclusies*

Aangezien natuurlijke zandpakketten een grote ruimtelijke variatie hebben, waarvan het effect nog niet voldoende is geanalyseerd, wordt uitgegaan van een equivalente waarde voor de d70 om de korrelgrootte voor het gehele traject van een pipe te karakteriseren. Vanwege de invloed van zeer lokale factoren op de d70 van een monster wordt een voorlopige behoudend vastgestelde waarde van de te hanteren variatiecoëfficiënt voorgesteld, op basis van variatiecoëfficiënten voor rivierzandpakketten.

Er is echter momenteel onvoldoende experimenteel onderzoek beschikbaar om met voldoende zekerheid een methode voor het karakteriseren van natuurlijke zandpakketten voor piping vast te leggen. Nader onderzoek wordt aanbevolen.

2.3.32 **WTI 2017 Piping: Handelingsperspectief toetschema piping**

Deltares rapport nr. 1220077-005-HYE-0016; 2016

Onderwerpen: 3, 10

2.3.32.1 *Doel van het rapport*

Aangeven is hoe het toetschema doorlopen dient te worden en welke handelingsopties er zijn als een waterkering niet voldoet binnen een bepaalde toetslaag.

2.3.32.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport presenteert de toetslagen en de handelingsopties voor dijken zonder constructies. Voor de verschillende toetslagen wordt aangegeven welke handelingsopties kansrijk zijn, afhankelijk van de mate van het veiligheidstekort. De toets op maat wordt hierin niet beschouwd.

2.3.32.3 *Conclusies*

De meeste mogelijkheden tot optimaliseren liggen in toetslaag 2. Het wordt aanbevolen om het handelingsperspectief nog nauwer aan te laten sluiten op de genuanceerde onderverdeling in veiligheidsklassen zodra deze vastgesteld is.

3 Aan piping gerelateerde toeleverende rapporten uit andere WTI clusters

3.1 Rapporten uit cluster onzekerheden

3.1.1 WTI 2017 Cluster C, piping failure mechanism. Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping

Deltares rapport nr. 1220080-002-ZWS-0006; 2016

Onderwerpen: 3a

3.1.1.1 Doel van het rapport

Kalibratie van de veiligheidsfactoren voor de mechanismen opbarsten, heave en piping voor de semi-probabilistische beoordeling in WBI 2017.

3.1.1.2 Beschrijving van het rapport

In het rapport worden eerst de basis principes beschreven. De First Order Reliability Method (FORM) wordt toegelicht, evenals de verhouding tussen de probabilistische en semi-probabilistische beoordeling. Vervolgens worden de mechanismen beschreven, en hoe deze samenhangen in een faalboom.

De kalibratie procedure wordt beschreven vervolgens wordt de bepaling van de betrouwbaarheidseisen behandeld. Als test set voor de kalibratie wordt voor 1 case alle input van de VNK2 database gehanteerd, en voor 1 case de input van de VNK2 database maar met uitzondering van variatiecoëfficiënten van de doorlatendheid en de d_{70} gehanteerd, daarvoor worden de in het WBI gehanteerde waarden van 0,5 en 0,12 gehanteerd. De afleiding van de partiële factoren en de kalibratie hiervan wordt toegelicht voor beide cases, en de daaruit volgende relaties tussen partiële veiligheidsfactor en betrouwbaarheidsindex worden gepresenteerd. Deze relaties worden vergeleken met die in eerdere toetsronden en in het OI 2014 v3.

3.1.1.3 Conclusies

De relaties zijn apart voor verschillende normklassen afgeleid, wat leidt tot een minder conservatieve set partiële factoren. In tegenstelling tot de huidige partiële factoren zijn de nieuwe relaties ook afgeleid voor lage waarden van de partiële factor. Ten slotte dient de toelaatbare overstromingskans op doorsnedeniveau te worden bepaald op basis van de wettelijke norm, die voor het normtraject geldt, om dit te doen wordt voor een traject dat geheel pipinggevoelig zijn lengte-effectparameters: $b = 350\text{m}$ en $a = 1$ aanbevolen.

3.1.2 Memorandum Kalibratie Piping- WBI2017. Effect van verschillende normen

Deltares rapport nr. dit is een memorandum van HKV in opdracht van Deltares met nr. PR2835.10; 2016

Onderwerpen: 3a

3.1.2.1 Doel van het rapport

Het beschrijven van de nadere analyse die is uitgevoerd op resultaten van een eerdere kalibratie (par.3.1.1). In deze kalibratie is in plaats van een lineaire fit tussen de veiligheidsfactor en de betrouwbaarheidsindex een exponentiele fit toegepast, en er is een uitsplitsing gemaakt in normklassen.

3.1.2.2 *Beschrijving van het rapport*

Het rapport heeft als uitgangspunt dat de lezer kennis heeft van de eerdere kalibratiestudie (par.3.1.1). De (exponentiële) relatie tussen de veiligheidsfactor en de betrouwbaarheidsindex voor de verschillende normklassen worden gepresenteerd, en vergeleken met de relatie in OI2014 v3 waarbij één (lineaire) relatie voor alle normklassen wordt gehanteerd. Vervolgens worden de cases uit de eerdere kalibratie geanalyseerd.

3.1.2.3 *Conclusies*

In veel gevallen leidt het uitsplitsen van de kalibratieregels naar verschillende normklassen tot een verlaging van de toe te passen veiligheidsfactor; dit is gerechtvaardigd (niet uitsplitsen zou onnodig conservatief zijn). Echter dit moet wel goed uitgelegd worden aan beheerders en adviseurs die al gebruik maken van de bestaande niet normafhankelijke rekenregel uit Ontwerpinstrumentarium OI 2014.v3.

3.2 Rapporten uit cluster datamanagement

In het cluster datamanagement is een overzicht gemaakt van alle gehanteerde WBI parameters. Voorts is de eerste versie van de schematiseringshandleidingen opgesteld voor dit cluster (par. 2.3.11).

4 WBI Bouwstenen waarin de kennis m.b.t. piping is beland

Dit hoofdstuk heeft tot doel om inzichtelijk te maken hoe de kennis uit de SWB en WBI onderzoeken een plaats heeft gekregen in de WBI bouwstenen:

- Fenomenologische beschrijving (zie ook par 2.3.17 en par. 2.3.22)
- Schematiseringhandleiding (zie ook par. 2.3.11 en par. 2.3.18)
- Verschilanalyse (zie ook par. 2.3.19 en 2.3.25)
- Kernel voor faalmechanebibliotheek

Hiertoe is Tabel 4.1 opgesteld. Hierin wordt per onderwerp aangegeven welke SWB en WBI documenten met name betrekking op dat onderwerp hebben. Enkele documenten die een overzicht of analyse bieden van meerdere onderliggende documenten zijn uitgelicht. Daarnaast wordt aangegeven welke bouwstenen betrekking hebben op ieder van deze onderwerpen.

De geïnteresseerde lezer die meer wil weten over het onderzoek dat ten grondslag ligt aan de behandeling van een onderwerp in een WBI bouwsteen kan dus aan de hand van Tabel 4.1 inzicht krijgen in de onderzoeken die hieraan ten grondslag liggen.

Tabel 4.1 Overzicht van onderwerpen en de voornaamste rapporten waarin deze onderwerpen aan de orde komen.

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
1. Validatie en aanpassing van de rekenregel van Sellmeijer	Algemeen c.q. alle onderstaande onderwerpen	SBW Hervalidatie piping 427070-0024 427070-0036 433380-0011 1001453-004-GEO-0003 1001453-004-GEO-0004 1200187-015-GEO-0004 1201205-005-GEO-0001 1201205-005-GEO-0002 1200690-000 1200690-005 1200690-006 1200187-008-GEO-0001 1202123-002-GEO-0005 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-001 1204201-002-GEO-0001 1206013-001-GEO-0009 1209435-006-GEO-0001 1220084-002-GEO-0001	427070-0024 1001449-008-GEO-0001 1001453-007-GEO-0005 1200187-001-GEO-0002 1202123-002-GEO-0003 1202123-003* 1220078-002-GEO-0002 1220078-000-GEO-010	
	1a. Invloed van korrelgrootteverdeling en van d_{70}	SBW Hervalidatie piping 433380-0013 433380-0012 1200648-004-GEO-0002	1001449-008-GEO-0001	Fenomenologische beschrijving Schematiserings-

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
		1200648-004-GEO-0001 1200187-017 1202123-005-GEO-0001 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-001 1207809-004-GEO-0003 1207809-008-GEO-0003 1209435-004-GEO-0004 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A		handleiding Verschilanalyse Kernel voor faalmechanisme bibliotheek
	1b. Invloed van relatieve dichtheid	SBW Hervalidatie piping factual report zonder nr. behandeld in par. 3.1.8 1200187-015-GEO-0001 1200648-004-GEO-0002 1200648-004-GEO-0001 1202123-007-GEO-0002 SBW2 EN WTI 2017 PIPING	1001449-008-GEO-0001	
	1c. Invloed van schaal	SBW Hervalidatie piping 1001449-004-GEO-0003 1200648-004-GEO-0001 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1207809-004-GEO-0003		
	1d. Verloop van waterspanningen	SBW Hervalidatie piping 433380-0014 1001453-002-GEO-0002 1200648-004-GEO-0002 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1207809-004-GEO-0003 122088-003-VEB-0001	1001449-008-GEO-0001	Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding Verschilanalyse Kernel voor faalmechanisme bibliotheek
2. Beschrijving mechanismen en processen	Algemeen c.q. alle onderstaande onderwerpen	SBW Hervalidatie piping 427070-0024 1200690-000 1200690-005 1200690-006 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-001 1209435-003-GEO-0001 1209435-004-GEO-0003	427070-0024 1200187-001-GEO-0002 1202123-002-GEO-0003 1202123-003* 1220078-000-GEO-010	Fenomenologische beschrijving

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
		1209435-004-GEO-0004 1220084-002-GEO-0001 1220078-002-GEO-0002 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A		
2a.	Uplift en/of heave**	SBW Hervalidatie piping 427070-0037		Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-001-GEO-0003 1209435-003-GEO-0001 1230086-003-GEO-0007		Schematiserings-handleiding Verschilanalyse Kernel voor faalmechanisme-bibliotheek
2b.	Welvorming	SBW Hervalidatie piping 427070-0037		Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING		Schematiserings-handleiding
2c.	Terugschrijdende erosie	SBW Hervalidatie piping 427070-0037	1001449-008-GEO-0001	Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-001-GEO-0009 1207809-008-GEO-0003 1230086-003-GEO-0007 1209435-003-GEO-0001 1220077-005-HYE-0004		Schematiserings-handleiding Verschilanalyse Kernel voor faalmechanisme-bibliotheek
2d.	Ruimen en bezijken	SBW Hervalidatie piping 1001450-004-GEO-0001 t/m 1001450-004-GEO-0003	1001450-004-GEO-0005	Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING		
2e.	Invloed van uittredepunt (sloot, oppervlakte, gat)	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-003-GEO-0002 1206013-001-GEO-0003 1206013-001-GEO-0009		
2f.	Verloop van waterspanningen	SBW Hervalidatie piping	1001449-008-GEO-0001	Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1209435-004-GEO-0003		Schematiserings-

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
		122088-003-VEB-0001		handleiding Kernel voor faalmechanismebibliotheek
	2g. Interne erosie (algemeen)	SBW Hervalidatie piping 427070-0037 9T5602.B0/R002/903137/Amst		
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING		
3. Toetsing	Algemeen	SBW Hervalidatie piping SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-002-GEO-0001 1207805-008-ZWS-0004 1209435-002-GEO-0001 1209435-003-GEO-0001 1209435-004-GEO-0003 1209435-004-GEO-0004 1209432-006-GEO-0005 1220084-001-GEO-0002 1220084-002-GEO-0001 1220084-006-GEO-0001 1230086-005-GEO-0002 1220077-005-HYE-0006 1220077-005-HYE-0004 1220077-005-HYE-0001 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5B 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5C 1220077-005-HYE-0016 122088-003-VEB-0001	1202123-002-GEO-0003 1202123-003* 1220078-002-GEO-0002	Fenomenologische beschrijving Schematiseringshandleiding Verschilanalyse Kernel voor faalmechanismebibliotheek
	3a. Kalibratie	SBW Hervalidatie piping 1202123-002-GEO-0005 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1209435-002-GEO-0001 1220084-001-GEO-0001 PR2835.10**** 1220080-002-ZWS-0006****		Verschilanalyse
4. Tijdsafhankelijkheid	Algemeen c.q. alle onderstaande onderwerpen	SBW Hervalidatie piping 427070-0024 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-001 1204201-002-GEO-0001 1206013-002-GEO-0001 1220084-002-GEO-0001	427070-0024 1202123-003* 1220078-000-GEO-010	Fenomenologische beschrijving Schematiseringshandleiding

Onderwerp	Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
	1220077-005-HYE-0006		
4a. Waterstandsverlopen (duur van hoogwater belasting)	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische beschrijving
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-000-GEO-0004 1207809-005-GEO-0001 1230086-003-GEO-0007 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002		Schematiserings-handleiding
	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische beschrijving
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-000-GEO-0004 1207809-005-GEO-0001 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002		
4b. Freatische c.q. elastische berging	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische beschrijving
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-000-GEO-0004 1207809-005-GEO-0001 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002		
4c. Snelheid pipe ontwikkeling	SBW Hervalidatie piping 1200690-000 1200690-005 1200690-006	1200187-001-GEO-0002	Fenomenologische beschrijving
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-001 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002 1220077-005-HYE-0004		Schematiserings-handleiding***
4d. Rol van cohesieve laag bij het in stand houden van pipingkanalen	SBW Hervalidatie piping 1001450-004-GEO-0001 t/m 1001450-004-GEO-0003 1200187-007-GEO-0001 1200690-005-GEO-0001 1200690-006	1001450-004-GEO-0005 1200187-001-GEO-0002	Fenomenologische beschrijving
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING		Schematiserings-handleiding***
5. Voorland meenemen (intrede-weerstand & kwelweglengte)	SBW Hervalidatie piping 427070-0024	427070-0024 1202123-003*	Fenomenologische beschrijving
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002		Schematiserings-handleiding Verschilanalyse Kernel voor faalmechanisme-bibliotheek

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
6. Veldobservaties (incl. full-scale proeven) en veldmetingen	Algemeen c.q. alle onderstaande onderwerpen	SBW Hervalidatie piping 427070-0024 1001453-004-GEO-0003 1001453-006-GEO-0004 1200690-000-GEO-0004 1200690-005-GEO-0001 1200690-00-GEO-0021 1200690-000 1200690-005 1200690-006 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1220084-007-GEO-0001 1220077-005-HYE-0004 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A	427070-0024 1200187-001-GEO-0002 1202123-003*	Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding
	6a. Monitoren pipingprocessen	SBW Hervalidatie piping SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-GEO-0003 1207809-007-GEO-0002 1209435-007-GEO-0002		Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding
	6b. Indicaties pipingprocessen in cases c.q. veldschaal proeven	SBW Hervalidatie piping 427070-0034 427070-0039 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1209435-007-GEO-0002 1220084-002-GEO-0001 1220078-000-GEO-010	1220078-000-GEO-010	Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding
	6c. Waterspanningsmeting	SBW Hervalidatie piping 1001452-015-GEO-0001 1200675-001-GEO-0002 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1206013-002-GEO-0001 1207809-006-GEO-0001 1230086-003-GEO-0007 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002		Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding
7. Effect van macro-heterogeniteit	Algemeen c.q. alle onderstaande onderwerpen	SBW Hervalidatie piping 427070-0024 1200187-009-GEO-0001 1200187-008-GEO-0001 SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-001 1204201-002-GEO-0001 1207809-008-GEO-0003 1220084-002-GEO-0001 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A	427070-0024 1200187-001-GEO-0002 1202123-003* 1220078-000-GEO-010	Fenomenologische beschrijving
	7a.	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
	Meerlagen horizontaal	427070-0035		beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1207809-008-GEO-0003		
	7b. Meerlagen verticaal	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-003-GEO-0001 1204201-003-GEO-0002 1207809-005-GEO-0001 1220084-005-GEO-0001 1220084-004-GEO-0002 1220077-005-HYE-0001		
8. Piping en heave bij kunstwerken (incl. achter- en onderloopsheid)		SBW Piping kunstwerken RH 9T5602A0/R002/901961/1 RH 9T5602.A0.11f/R00003/500517/Rott 9T5602.B0/R002/903137/Amst 1001452-017-GEO-0001 1001452-020-GEO-0001 1001452-020-GEO-0001 1001452-015-GEO-0001 1200675-001-GEO-0002 1200675-002-GEO-0001 1204201-004-GEO-0001	1202123-003* 1200675-006-GEO-0001	
9. Eindige elementen berekeningen voor grondwaterstroming en piping		SBW Hervalidatie piping 427070-0039 1001453-001-GEO-0002 1001453-001-GEO-0006 1001453-001-GEO-0004 1200187-009-GEO-0001 1200690-005-GEO-0001 1001452-015-GEO-0001 1200675-001-GEO-0002 1200675-002-GEO-0001	1200187-001-GEO-0002 1202123-003* 1220084-004-GEO-0002	Fenomenologische beschrijving Schematiserings-handleiding
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-002-GEO-0001 1204201-003-GEO-0001 1204201-003-GEO-0002 1206013-001-GEO-0003-jvm 1206013-000-GEO-0004 1206013-002-GEO-0001 1207809-005-GEO-0001		

Onderwerp		Relevante rapporten SWB/WTI2017	Samenvattende rapporten SWB/WTI2017 (Deltares rapport nr.)	WBI Bouwsteen
		1209435-006-GEO-0001 1220084-005-GEO-0001		
10. Schematisering	10. Algemeen c.q. alle onderstaande onderwerpen	SBW Hervalidatie piping 1001449-027-GEO-0002 1001453-001-GEO-0006	1202123-002-GEO-0003 1202123-003* 1220078-002-GEO-0002	Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1204201-002-GEO-0001 1209432-006-GEO-0005 1220084-006-GEO-0001 1220078-002-GEO-0002 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5A 1220077-005-HYE-0016		Schematiserings-handleiding
				Verschilanalyse
				Kernel voor faalmechanismebibliotheek
	10a. Bodemopbouw	SBW Hervalidatie piping 1001453-001-GEO-0002		Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1209435-004-GEO-0003 1209435-004-GEO-0004 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5B		Schematiserings-handleiding
				Verschilanalyse
	10b. Doorlatendheid	SBW Hervalidatie piping 1001453-001-GEO-0002		Fenomenologische beschrijving
		SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1209435-004-GEO-0003 1230086-005-GEO-0002 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5B		Schematiserings-handleiding
				Verschilanalyse
10c. Korrelgrootte	SBW Hervalidatie piping		Fenomenologische beschrijving	
	SBW2 EN WTI 2017 PIPING 1207809-008-GEO-0003 1209435-004-GEO-0004 1230086-005-GEO-0002 1220084-009-GEO-0007 sub bijlage 5c		Schematiserings-handleiding	
			Verschilanalyse	

* Dit rapport is de versie van het Deltares rapport, die ten grondslag ligt aan het door het Ministerie van I&M uitgegeven Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen.

** Dit wordt ook bij de rapporten die betrekking hebben op kunstwerken geanalyseerd, deze rapportages staan bij onderwerp 8.

***Meegenomen in tijdsafhankelijke beslisregel.

**** Deze rapporten uit WBI 2017 Cluster C worden behandeld in par 3.1

4.1 Afleiding van beslisregels

In de Notitie scherper toetsen voor piping bij dijken worden vier beslisregels afgeleid, op basis van ondermeer de documenten besproken in par 2.3.27, 2.3.29, 2.3.30, en 2.3.31.

Het gaat hier om:

Tijdsafhankelijkheidsregel in de eenvoudige toets:

(op basis van onderbouwing in rapportage par 2.3.27)

Als aan alle onderstaande randvoorwaarden is voldaan:

- De keringbeheerder dient bij het toepassen van deze regel conform zijn informatieplicht voldoende betrouwbaar aan te tonen dat er in het verleden geen zandmeevoerende wellen zijn waargenomen. Indien er twijfel bestaat over in het verleden al gesignaleerde zandmeevoerende wellen, dan mag deze eenvoudige beslisregel niet worden toegepast.
- In de calamiteitenplannen voor de kering dient rekening te worden gehouden met maatregelen die moeten worden genomen wanneer twee hoogwatergolven achter elkaar optreden.
- Er is geen sprake van een aansluiting op een constructie of van een doorgaande leiding onder de kering.

Dan mag de faalkans verwaarloosbaar klein worden verondersteld, **indien de kwelweglengte groter is dan 50 m en rivierafvoeren geen rol spelen bij de bepaling van het verval**. Het toepassingsgebied voor de voorgestelde beslisregel is m.b.v. de gehanteerde groeisnelheid van de pipe breder dan alleen de kustgebieden. Deze eenvoudige regel is in ieder geval toepasbaar op de volgende gebieden:

1. Waddenzee
2. Noordzeekust
3. Oosterschelde
4. Westerschelde

Pipinggevoeligheid van getijdeafzettingen

(op basis van onderbouwing in rapportage par 2.3.29)

Piping wordt onwaarschijnlijk geacht voor 4 WTI-SOS eenheden. Deze kunnen daarom in de schematisatie als niet watervoerende laag worden gemodelleerd. Het gaat om:

- 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

Bepaling van de doorlatendheid van zandlagen en de spreiding ervan

(op basis van onderbouwing in rapportage par 2.3.30 en 2.3.28)

In de gedetailleerde toets worden de gemiddelde waarden die in VNK zijn gebruik overgenomen en voor de spreiding van de doorlatendheid wordt een COV van 50% gehanteerd. Voor de bepaling van de doorlatendheid in een tweelagen systeem wordt voorgesteld om het neuraal netwerk van VNK te gebruiken.

Bepaling van de spreiding van de korreldiameter d_{70}

(op basis van onderbouwing in rapportage par. 2.3.31)

Voor de invoerparameter d_{70} wordt een equivalente waarde (d_{70eq}) gehanteerd met een variatiecoëfficiënt die de ruimtelijke variatie in natuurlijke zandpakketen reflecteert. De spreiding van de modale waarde van de d_{70} is een goede benadering voor de spreiding van de equivalente d_{70} . Hiervoor wordt een COV van 12% gehanteerd.

4.2 Wat is er anders in WBI t.o.v. ORZW

In het WBI wordt in laag 2a de semi-probabilistische beoordeling uitgevoerd met de rekenregel van Sellmeijer zoals deze ook in het ORZW wordt gehanteerd. Het gaat hier om de beoordeling van grondrijken, en dus niet om piping bij kunstwerken of constructies.

In zowel het WBI als in het ORZW wordt onzekerheid in de bodemopbouw meegenomen door middel van ondergrondschematisaties. Met het ORZW en de bijbehorende Werkwijzer Piping (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014) stelt de gebruiker verschillende ondergrondschematisaties op en kent die een kans van voorkomen toe. Op basis hiervan wordt een schematiseringsfactor bepaald. In het WBI wordt rekening gehouden met ondergrondschematisaties met een bepaalde kans van voorkomen, op basis van het WBI-SOS, die de gebruiker aan de hand van grondonderzoek kan verfijnen. Door het expliciet meenemen van de scenario's vervalt de schematiseringsfactor in de WBI methode.

Waar de hydraulische belasting in het ORZW nog aan een overschrijdingskans was gekoppeld gaat het WBI uit van een overstromingskansbenadering. De waterstand met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm wordt gehanteerd voor de semi-probabilistische stabiliteitsanalyse. Het waterstandsverloop in de watervoerende zandlaag wordt voor het WBI bepaald in Ringtoets (nu RisKeer) met behulp van een leklengte en een dempingsfactor, voorheen diende de gebruiker dit zelf te bepalen.

Anders dan in het ORZW wordt in het WBI ook de beoordeling op het mechanisme heave meegenomen, indien heave niet optreedt, zal piping door terugschrijdende erosie ook niet optreden.

Daarnaast is voor het WBI een andere kalibratie van de veiligheidsfactoren uitgevoerd dan voor het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen, zie ook par. 3.1.2 en 3.1.1. Voor de drie mechanismen opbarsten, heave en piping zijn partiële factoren afgeleid die afhankelijk zijn van de vereiste betrouwbaarheidsindex, hetzij op doorsnede niveau, hetzij op dijktraject niveau. Zowel voor het ORZW als voor het WBI wordt het lengte-effect meegenomen voor het bepalen van de vereiste betrouwbaarheidsindex.

De bepaling van de waarden van de invoerparameters d_{70} en doorlatendheid verschillen ook tussen het WBI en het ORZW. In het WBI worden de waarden van de equivalente d_{70} en de equivalente doorlatendheid voor de desbetreffende WTI-SOS eenheden gehanteerd, zie ook par 2.3.9 en 2.3.10 voor toelichting over de bepaling van deze parameters.

Naast de semi-probabilistische analyse bevat het WBI ook de probabilistische analyse voor piping binnen de gedetailleerde beoordeling (laag 2b).

5 Referentielijst

Basisuitgangspunten WTI 2017, rapport nr. 1206004-002-GEO-0002, Deltares 2012.

Ontwerpinstrumentarium 2014, v3, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, juli 2015.

Piping realiteit of rekenfout?, ENW, 2010.

Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, TAW, 2004.

Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, TAW, 1999.

Uitgangspunten voor het WTI, rapport nr.1206004-002-GEO-0001-ydh Deltares. 2012.

Werkwijzer Piping bij Dijken v1.2, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, november 2014.