



departement
**Mobiliteit en
Openbare Werken**

Opstellen bresgroeiparameters Vlaamse rivierdijken

Deelopdracht 2 - STERKTE/ZWAKTE ANALYSE VAN BRESGROEIMODELLEN



706_08c

WL Rapporten



Opstellen bresgroeiparameters Vlaamse rivierdijken

Bestek nr. WL/09/39

Deelrapport 2 - Sterkte/zwakte analyse van bresgroeimodellen

Van Hoestenbergh, T.; Verdel, S.; Ysenboot, S.; Vanderkimpen, P.; Huygens, M.; Peeters, P.; Mostaert, F.

augustus 2010

WL2010R706_8c_2rev2_0

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Van Hoestenbergh, T.; Verdel, S.; Ysenboot, S.; Vanderkimpen, P.; Huygens, M.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2010). Opstellen bresgroeiparameters Vlaamse rivierdijken: Deelrapport 2 - Sterkte/zwakte analyse van bresgroeimodellen. Versie 2_0 WL Rapporten, 706_08c. Waterbouwkundig Laboratorium en Soresma: Antwerpen, België



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

Berchemlei 115
B-2140 Antwerpen
Tel. +32 (0)3 224 60 35
Fax +32 (0)3 224 60 36
E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.watlab.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaandelijke schriftelijke toestemming van de uitgever.



Documentidentificatie

Titel:	Opstellen bresgroeiparameters Vlaamse rivierdijken: Deelrapport 2 - Sterkte/zwakte analyse van bresgroeimodellen		
Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2010R706_8c_2rev2_0
Keywords (3-5):	Bresgroeimodellen dijktypes sterkte zwakte analyse		
Tekst (p.):	/	Tabellen (p.):	/
Bijlagen (p.):	2	Figuren (p.):	/
Vertrouwelijk:	☐ Ja	Uitzondering:	☐ Opdrachtgever
			☐ Intern
			☐ Vlaamse overheid
		Vrijgegeven vanaf	
	☒ Nee		☐ Online beschikbaar

Goedkeuring

Auteur Van Hoestenbergh, T. Verdel, S. Ysenboot, S.	Revisor Vanderkimpen, P. Huygens, M.	Projectleider Peeters, P.	Afdelingshoofd Mostaert, F.
--	--	------------------------------	--------------------------------

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur
1_0	10/03/2010	Conceptversie (1296873006v2)	TVH, SV, SYS
1_1	30/03/2010	Inhoudelijke revisie (1296873006v4)	SYS, MHS
1_2	09/06/2010	Revisie opdrachtgever (1296873006v5)	PPS
1_3	18/06/2010	Inhoudelijke revisie (126873007)	TVH, PPS
2_0	15/08/2010	Definitieve versie (1296873007v2)	TVH, SV, SYS, PVK, MHS, PPS

Abstract

Na eerst de dijken in Vlaanderen onder te verdelen in een aantal dijktypes, worden de mogelijke primaire faalmechanismen voor deze dijktypes kort besproken. De mechanismen 'overloop' en 'piping' worden besproken als initiële bezwijkmechanismen en bresgroeimechanismen. Voor deze mechanismen worden de verschillende stadia en het volledige faaltraject voorgesteld. Er volgt een bespreking van de belangrijkste bresgroeiprocessen aan de hand van stromings-, erosie- en momentenvergelijkingen. Per dijktipe wordt nagegaan welke processen relevant zijn, en dus idealiter worden beschreven door bresgroeimodellen. Tenslotte worden de modellen geëvalueerd op het beschrijven van de belangrijkste bresgroeiprocessen.

Inhoudstafel

Inhoudstafel.....	I
Lijst van de tabellen	IV
Lijst van de figuren	V
1 Inleiding.....	1
1.1 Objectief studie	1
1.2 Overzicht studie	1
1.3 Opbouw van het rapport	1
2 Vlaamse dijktypes	2
2.1 Inleiding en definities	2
2.2 Dijkkarakteristieken van belang voor bresgroei	2
2.2.1 Structuurkenmerken	3
2.2.2 Grondkarakteristieken	3
2.2.3 Vereenvoudiging.....	4
2.3 Beschikbare gegevens in Vlaanderen	5
2.3.1 Algemeen	5
2.3.2 Geometrische parameters	6
2.3.3 Kernmateriaal	7
2.3.4 Afdeklaag en bekleding (vegetatie)	7
2.3.5 Opbouw dijk.....	7
2.3.6 Aanwezigheid doorlatende laag onder dijk.....	7
2.3.7 Aanwezigheid voorland	8
2.3.8 Belasting.....	8
2.3.9 Samenvatting.....	9
2.4 Beschouwde dijktypes	10
2.4.1 Nut dijktypes	10
2.4.2 Invulling dijkkarakteristieken.....	10
2.4.3 Dijktypes	15
2.4.4 Vergelijking met Nederlandse dijktypes.....	16
3 Faalmechanismen en faaltrajecten	18
3.1 Algemeen.....	18

3.2	Piping	18
3.2.1	Algemene omschrijving	18
3.2.2	Fasen.....	18
3.2.3	Faaltraject.....	20
3.2.4	Bresinitiatie en bresgroeistadia per dijktipe	21
3.3	Overloop	21
3.3.1	Algemene omschrijving	21
3.3.2	Fasen.....	22
3.3.3	Faaltraject.....	25
3.3.4	Bresinitiatie en bresgroeistadia per dijktipe	26
3.4	Kruinhoogte.....	28
3.5	Macro-instabiliteit	28
3.6	Microstabiliteit	29
3.7	Zettingsvloeiing.....	29
3.8	Instabiliteit bij golf- en stromingsaanval	30
3.9	Effect van de verschillende mechanismen per dijktipe	31
4	Bresgroeiprocessen	32
4.1	Algemeen.....	32
4.2	Stromingsvergelijkingen.....	32
4.2.1	Stroming door bres	32
4.2.2	Debietscoëfficiënt voor overlaat	33
4.2.3	Berekening waterdieptes en snelheden doorheen de bres	34
4.2.4	Erosie - sedimenttransport	34
4.2.5	Overloop	34
4.2.6	Piping.....	35
4.3	Oppervlakte-erosie.....	36
4.3.1	Terugschrijdende erosie	37
4.3.2	Kruinverlaging.....	39
4.3.3	Klifforming.....	40
4.4	Klif-erosie	40
4.4.1	Kliferosie-processen	41
4.4.2	Beschrijving jet over klif	42
4.4.3	Erosie basis klif.....	43

4.4.4	Blokfaling door hellingsinstabiliteit.....	45
4.4.5	Afschuiven door hellingsinstabiliteit.....	47
4.4.6	Opwaartse voortschrijding klif.....	48
4.5	Afduwen top.....	49
4.6	Laterale erosie	50
4.6.1	Blokfaling door hellingsinstabiliteit.....	50
4.6.2	Afschuiving door hellingsinstabiliteit.....	53
4.7	Composietdijken	53
4.7.1	Zanddijk met kleikern.....	53
4.7.2	Zanddijk met kleibekleding	56
4.7.3	Besluit composietdijken	57
4.8	Erosie van de fundering	57
4.9	Piping-processen	59
4.9.1	Fasering bresgroei.....	59
4.9.2	Kanaalerosie.....	60
4.9.3	Terugschrijdende erosie	60
4.9.4	Instorten kruin.....	61
4.9.5	Overloop.....	62
4.10	Bresgroeiprocessen per dijktipe	62
5	Sterkte/zwakte analyse	64
5.1	Modelomschrijving	64
5.1.1	NWS BREACH	64
5.1.2	HR BREACH	69
5.1.3	SIMBA	73
5.1.4	BRES – P.J. Visser.....	75
5.1.5	BRES – Zhu.....	76
5.1.6	RUPRO - Cemagref.....	78
5.1.7	Verheij-Van der Knaap (SOBEK)	80
5.1.8	Dambreak module (MIKE11).....	81
5.2	Omschrijving deelprocessen: samenvatting	85
6	Besluit	88
7	Bijlage: lijst met symbolen.....	89
8	Referenties.....	91

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Karakteristieken belangrijk voor verschillende bresgroeifenomenen, met aanduiding van meest aangewezen methodes ter bepaling van gedetailleerde informatie	9
Tabel 2 - Grondkarakteristieken voor verschillende grondsoorten. De karakteristieken ' γ ', ' E ', ' c ' en ' ϕ ' staan voor respectievelijk dichtheid, elasticiteitsmodulus, cohesie en wrijvingshoek (IMDC et al, 2010)....	12
Tabel 3 - Te onderscheiden dijktypes zonder voorland en met voorland. C staat voor cohesief materiaal, NC staat voor niet-cohesief materiaal	16
Tabel 4 - Fasen bresinitiatie en bresgroeistadia per dijktype	26
Tabel 5 - Relevante risico's per dijktype	31
Tabel 6 - Te onderscheiden bresgroeiprocessen per dijktype	63
Tabel 7 - Te onderscheiden bresgroeiprocessen per model bij overloop	85
Tabel 8 - Te onderscheiden bresgroeiprocessen bij piping en hydrodynamische invloeden voor de verschillende bresgroeimodellen	87

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Geometrische elementen en ondergrond van een dijk (Calle, 2002)	3
Figuur 2 - Dijksecties van Vlaamse bevaarbare waterlopen bestaande uit een oeverwal of gronddijk zonder versterking (IMDC et al, 2010)	6
Figuur 3 - Ligging van de schorren langsheen Schelde, Rupel en Durme (IMDC et al., 2010)	8
Figuur 4 - Ruwe indeling van voorkomende bresgroeiprocessen volgens grondsoort (FLOODSITE).....	11
Figuur 5 - Verandering in klifmigratiesnelheid k_d met meerdere grootteordes in functie van het vochtgehalte 'w' voor een bodemtype met verschillende compactiegraden (Hanson en Hunt, 2007).....	13
Figuur 6 - Tabel van Eurocode 7 waarbij onder meer grondsoort en cohesie (c') wordt aangegeven.....	14
Figuur 7 - Geschematiseerde karakteristieke dwarsprofielen van Nederlandse dijken. Zwart is niet-cohesief materiaal (zand), gearceerd is cohesief materiaal (klei) (Calle, 2002)	17
Figuur 8 - Mechanisme piping, met (van linksboven naar rechtsonder) de deelprocessen opdrijven, opbarsten met welvorming, pipevorming, ruimingsfase en verzakking van de kruin (Calle, 2002).....	19
Figuur 9 - Gebeurtenissenboom met opeenvolging van de verschillende piping-mechanismen. De letters A tot en met D verwijzen naar pipingmechanismen zoals benoemd in § 3.2.2 , de letters E en F hebben betrekken op 'overloop'/'overslag'-mechanismen (Calle, 2002).....	20
Figuur 10 - Locatie en grootte van klif zijn afhankelijk van primaire faalmechanismen en van het dijkmateriaal (Knoeff en Verheij, 2003)	23
Figuur 11 - Interne erosie bij zanddijken met dunne afdeklaag (Knoeff en Verheij, 2003)	24
Figuur 12 - Restprofiel na ondiepe afschuiving (Knoeff en Verheij, 2003).....	24
Figuur 13 - Stroomdiagram voor het mechanisme 'overslag', eveneens geldig voor het mechanisme 'overloop' (Calle, 2002)	25
Figuur 14 - De vorm van de overlaat bij Type B (links) en type C dijken (rechts) (Visser, 1998).....	34
Figuur 15 - Taludversteiling zanddijk (Visser, 1998)	38
Figuur 16 - Versmalling kruin (Visser, 1998).....	39
Figuur 17 - Verlaging kruin (Visser, 1998)	40
Figuur 18 - Enkele en multiklif (Zhu, 2006)	40
Figuur 19 - Beschrijving van kliferosiemechanismen in fase III volgens het BRES-model voor kleidijken (Zhu, 2006).....	41
Figuur 20 - Versteiling talud door erosiekracht van de jet (Zhu, 2006)	43
Figuur 21 - Jet op een erodeerbare fundering (Zhu, 2006).....	44
Figuur 22 - Jet op niet erodeerbare fundering (Zhu, 2006)	45
Figuur 23 - Blokfaling bij kleidijken (Zhu, 2006)	46
Figuur 24 - Scheuren gevormd in IMPACT Test1-02 bij een homogene cohesieve (klei-)dijk (FLOODSITE)	47

Figuur 25 - Culman methode (Hanson, 2001).....	48
Figuur 26 - Krachten die van belang zijn bij 'sudden collapse' (Fread, 1988).....	49
Figuur 27 - Blokfaling bij kleidijken. Opeenvolging a), b) en c) (Zhu, 2006).....	51
Figuur 28 - Type A dijk (Zhu, 2006)	52
Figuur 29 - Bresverbreding bij type A kleidijken (Zhu, 2006)	52
Figuur 30 - Bresverbreding bij type B en C kleidijken, waarbij Ebo veel kleiner is dan Esl (Zhu, 2006) ..	53
Figuur 31 - Afduwing kleikern (Mohammed et al., 2002)	54
Figuur 32 - Bezwijken kleikern door buiging (Mohammed et al., 2002)	54
Figuur 33 - De testconfiguratie van de zanddijk met een centrale kleikern ('Central Clay Core') (Hunt et al., 2006)	55
Figuur 34 - Laterale groei voor een homogene kleidijk ('Clay Embankment') en een zanddijk met een centrale kleikern ('Central Clay Core') (Hunt et al., 2006).....	55
Figuur 35 - Verloop van het bresdebiet voor een homogene kleidijk ('Clay Embankment') en een zanddijk met een centrale kleikern ('Central Clay Core') (Hunt et al., 2006)	56
Figuur 36 - Restprofiel van zanddijk met kleibekleding bij de aanvang van de bresgroeifase ('Inclined Clay Core') (Hunt et al., 2006).....	57
Figuur 37 - Mechanismen voor de erosie van dijkfunderingen (Zhu, 2006).....	58
Figuur 38 - Typisch verloop van piping processen (Mohammed et al., 2002).	59
Figuur 39 - Verschillende piping deelprocessen (Mohammed et al., 2002).	60
Figuur 40 - Terugschrijdende erosie vanaf de stroomafwaartse kant van de pipe (FLOODSITE).....	61
Figuur 41 - Erosie van de pipe tot bijna de kruinhoogte is bereikt (FLOODSITE)	62
Figuur 42 - Schematische voorstelling dijklichaam NWS BREACH (FLOODSITE)	65
Figuur 43 - Bresverbreding in het model NWS BREACH (Fread,1988).....	67
Figuur 44 - Bresverbreding in HR BREACH. (A) stelt mogelijke originele secties voor, (B) mogelijke bresvorm na drie tijdstippen (Mohamed et al., 2002).....	70
Figuur 45 - Composietdijk in HR BREACH (Manual Infoworks 10.5.6.,Wallingford).....	71
Figuur 46 - In te geven eigenschappen in HR BREACH per dijklaag (Manual Infoworks 10.5.6.,Wallingford)	72

1 Inleiding

1.1 Objectief studie

Het Waterbouwkundig Laboratorium voert samen met de Afdeling Geotechniek onderzoek uit naar de bresgevoeligheid van Vlaamse dijken. Het onderzoek kan in 2 topics worden ingedeeld:

- welke dijksegmenten zijn bresgevoelig
- hoe snel en tot welke dimensies zal de bres groeien

Het project 'Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken' (IMDC et al., 2010) behandelde de bresgevoeligheid en werd in 2009 afgerond. Dit onderzoek heeft geleid tot een methode waarmee men de bresgevoeligheid van dijken in Vlaanderen globaal kan inschatten. De hier ontwikkelde studie nl. 'Opstellen bresgroeiparameters Vlaamse rivierdijken' vormt een vervolg op bovenstaand project en omvat een grondige analyse van het bresgroeiproces en het opstellen van fysisch of empirisch bepaalde parameters voor bresgroeimodellen voor rivierdijken van de Vlaamse bevaarbare waterwegen. De toetsing van de modellen en het bepalen van de parameters wordt daarbij maximaal georiënteerd naar een verdere inbouw in de overstromingsrisicoberekeningen van het Waterbouwkundig Laboratorium.

1.2 Overzicht studie

De studie wordt opgesplitst in 3 deelopdrachten. Voor de eerste deelopdracht zijn de meest relevante aspecten van bresgroei, dijkdoorbraken en modellen gedestilleerd uit de beschikbare literatuur. Deze 'state of the art' wat betreft bresgroei-onderzoek geldt als referentiekader voor het de volledige studie. Deelopdracht 2 moet leiden tot een overzicht van de verschillende types Vlaamse rivierdijken en bijhorende mogelijke faalmechanismen en ontwikkelingsstadia van de bresgroei. Per bresgroeimodel wordt nagegaan voor welke processen en bij welke faalmechanismen dit model van toepassing kan zijn en wat de mogelijke beperkingen van het model zijn. In deelopdracht 3 wordt beoordeeld welke modellen al dan niet geschikt zijn om een realistische inschatting te kunnen maken van de bresgroei bij verschillende types rivierdijken en faalmechanismen die langs de beschouwde Vlaamse rivierdijken optreden. Voor de verschillende bresgroeimodellen worden de bijhorende parameters bepaald die nodig zijn om de bresgroei te kunnen begroten en numeriek te simuleren.

1.3 Opbouw van het rapport

In Hoofdstuk 2 worden de dijken in Vlaanderen onderverdeeld in een aantal dijktypes, op basis van karakteristieken die belangrijk zijn voor bresgroei én die eenvoudig te bepalen of beschikbaar zijn. De mogelijke primaire faalmechanismen voor deze dijktypes worden kort besproken in Hoofdstuk 3. De mechanismen 'overloop' en 'piping' worden besproken als initiële bezwijkmechanismen en bresgroeimechanismen. Voor deze mechanismen worden de verschillende stadia en het volledige faaltraject voorgesteld.

In hoofdstuk 4 worden de belangrijkste bresgroeiprocessen fysisch in detail voorgesteld, aan de hand van stromings-, erosie- en momentenvergelijkingen. Per dijktype wordt nagegaan welke processen relevant zijn, en dus idealiter worden beschreven door bresgroeimodellen.

In hoofdstuk 5 tenslotte worden de modellen geëvalueerd op het beschrijven van de bresgroeiprocessen geïdentificeerd in hoofdstuk 4. Daarbij wordt rekening gehouden met de verschillende stadia die per dijktype voorkomen.

2 Vlaamse dijktypes

2.1 Inleiding en definities

Elke dijk heeft zijn eigen geschiedenis, waardoor alle mogelijke varianten van gronddijkstructuren zijn ontstaan. Een onderverdeling in Vlaamse dijktypes kan gebeuren volgens velerlei parameters, naargelang het te modelleren hydraulisch aspect bvb overstromingsgevoeligheid, bresinitiatie, bresgroei, enzovoort. In deze studie zijn het de parameters die van belang zijn voor het groeien van de bres die worden gebruikt ter onderscheid van de verschillende dijktypes.

Er worden in deze studie enkel rivierdijken beschouwd. De variatie in belasting is over het algemeen kleiner dan bij zeedijken, doordat de golfimpact meestal veel kleiner is. De duur van de belasting daarentegen is mogelijk langer bij rivierdijken dan bij zeedijken. Ook zijn de hydraulische krachten eerder parallel aan rivierdijken dan normaal op de dijk gericht zoals het geval is bij kustdijken.

Het belangrijkste onderscheid die vaak wordt gemaakt is de verdeling in zand- en kleidijken (Calle, 2002), waarbij het kernlichaam van de dijk uit zand respectievelijk klei bestaat. In deze studie zullen we naast dit onderscheid echter nog een aantal andere parameters gebruiken in het onderscheid van de Vlaamse dijktypes.

Het is belangrijk een duidelijk onderscheid te maken tussen bresgroei en bresinitiatie. In deze studie begint de fase van bresgroei van zodra de kruin dermate verlaagd is dat het beneden het waterpeil van de rivier of het reservoir zakt. Alle processen die daaraan voorafgaan, worden gerekend tot de bresinitiatie-fase. De bres kan (al dan niet tergelijktijd) groeien in verticale en laterale richting. De fase van verticale bresgroei wordt soms 'bresvorming' genoemd.

Piping vormt hierop een uitzondering, gezien het water niet over de kruin van de dijk loopt. Bresgroei begint bij piping van zodra een zandmeevoerende wel is ontstaan. Het reeds gevormde kanaal (of kanalen) erodeert verder tijdens de bresgroei. Eenmaal het piping-kanaal is ingestort en zo een kruinverlaging is veroorzaakt, wordt het vervolg van de bresgroei beschreven door overloop-processen.

Voor de definities van 'bres', 'bresgroei', 'reststerkte' enzovoort wordt verwezen naar deelopdracht 1 van deze studie (Van Hoestenbergh et al., 2010).

2.2 Dijkkarakteristieken van belang voor bresgroei

Verschillende factoren bepalen snelheid en grootte van bresinitiatie en bresgroei. Deze factoren kunnen grosso modo worden onderverdeeld in karakteristieken (geometrisch, grondmechanisch) van de dijk en hydraulische belastingskarakteristieken (waterpeil, stroming, golven). Welke karakteristieken meest bepalend zijn, hangt af van het faalmechanisme. Verschillende faalmechanismen kunnen een bres initiëren en uiteindelijk leiden tot het groeien van een bres (zie § 3).

Voor de groei van de bres ná initiatie, zijn er voornamelijk 2 faalmechanismen van belang: 'erosie van het landtalud door overloop' en 'piping'. De mate van voorkomen van erosie en van geomechanische processen (hellingsinstabiliteit, instorten kruin boven pipe) tijdens het optreden van deze faalmechanismen hangt af van het waterkerend vermogen van (het restprofiel van) de dijk. Dit waterkerend vermogen wordt gekarakteriseerd door de kruinhoogte en de stabiliteit van het grondlichaam. De stabiliteit wordt op zijn beurt bepaald door enerzijds structuurkenmerken van de dijk (geometrie, dijkopbouw) en anderszijds door grondkarakteristieken (dijk en ondergrond).

Structuurkenmerken en grondkarakteristieken zijn van belang voor zowel de dijk kern, de afdeklaag als de zone die beide dijksegmenten verbindt. De overstromingen in New Orleans van 2005 hebben de kwetsbaarheid van de overgangzone tussen kern en afdeklaag duidelijk aangetoond. De bekleding van de dijk beschermt het riviertalud voornamelijk tegen erosie t.g.v. golf of stromingsaanval. Daarnaast kan het ook de hoogte van de watertafel in de kern beperken indien de bekleding slecht doorlatend is.

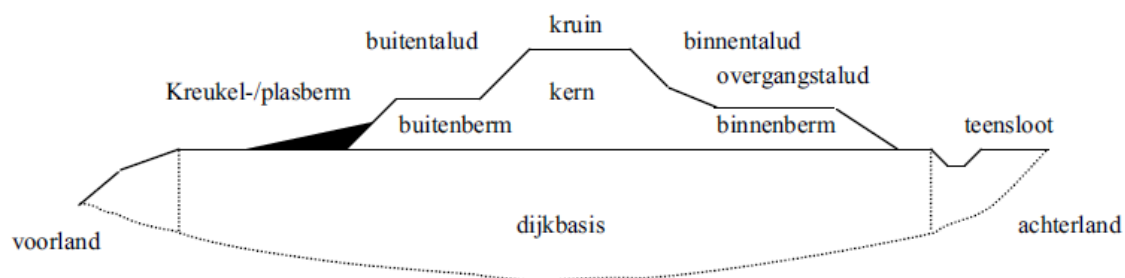
In wat volgt worden structuurkenmerken en grondkarakteristieken besproken met specifieke aandacht voor de groei van de bres ná initiatie.

2.2.1 Structuurkenmerken

Geometrie

De geometrie is eigenlijk een omschrijving van de vorm van een dijk. Dit bepaalt in grote mate welke mechanismen op kunnen treden. Een dijk bevat al dan niet de volgende elementen:

- Kruinhoogte, kruinbreedte. De kruinhoogte bepaalt de hoeveelheid water die over de dijk kan stromen bij hoog water. De breedte van de dijk bepaalt mee de snelheid van optreden van een primair faalmechanisme
- Land- en riviertalud. Bij steilere taluds treden faalmechanismen over het algemeen sneller op dan bij flauwere taluds.
- Voorland of binnen/buitenberm. Zowel aan de binnen- als rivierzijde worden soms bermen als versterkingsmaatregel aangelegd. Schorren vervullen dezelfde functie. Bermen vertragen bresgroei door het verlengen van de kwelweg voor piping, door het verminderen van de golfoploop en overslag en door het beperken van de verticale bresgroei
- Plasberm. Deze maatregel wordt toegepast als bescherming van de teenconstructie tegen golfaanval. De belangrijkste invloed op bresgroeiprocessen is het beperken van de verticale bresgroei
- Dijkkern. De invloed van de kern is zo belangrijk dat, in wat volgt, een onderscheid zal gemaakt worden tussen zand- en kleidijken.



Figuur 1 - Geometrische elementen en ondergrond van een dijk (Calle, 2002)

Dijkopbouw

Dijken kunnen bestaan uit een homogene structuur of uit een meerlagige structuur, waarbij vaak een klei- of (zand-)leemkern aanwezig is. Het effect van meerdere lagen op de sterkte van de dijkstructuur is niet éénduidig. Enerzijds zal bij een meerlagige dijk een opeenvolging van verschillende faalmechanismen nodig zijn vooraleer de dijk volledig zal falen (oppervlakte-erosie, kliferosie, hellingsinstabiliteit, ...). Anderzijds kunnen de aansluitzones tussen de verschillende lagen zwakke zones van de dijk vormen, bvb indien de lagen weinig gecompacteerd zijn (Morris et al, 2009). Preferentiële glijvlakken kunnen zich ontwikkelen ter hoogte van de overgangszones, bvb bij zandlichamen op kleilagen.

Daarnaast worden er vaak extra structurele maatregelen genomen ter bescherming van de dijk: damwanden, schanskorven, enz... Deze worden verder niet in de studie beschouwd.

2.2.2 Grondkarakteristieken

Dijklichaam

De eigenschappen van de grondlagen waaruit de dijk is opgebouwd bepalen mee het faalproces. De meest relevante parameters voor de verschillende grondlagen zijn de volgende:

- volumegewicht (ook als belasting te beschouwen)
- schuifweerstandkarakteristieken (inwendige wrijvingshoek, cohesie)
- vervormingsmoduli

- doorlatendheid

Deze parameters worden in hoofdzaak bepaald door de grondsoort, het watergehalte en de verdichtingsgraad van de grondlagen. Daarnaast zijn ook de kwaliteit van constructie en de onderhoudstoestand van het dijksegment bepalend.

De grondkarakteristieken hebben eveneens een grote invloed op tal van geohydrologische aspecten die mee de snelheid van bresinitiatie en bresgroei bepalen: waterspanningen, stijghoogte en grondwaterstromingen in en onder de dijk.

Van specifiek belang voor bresinitiatie en bresgroei zijn de karakteristieken van de afdeklaag en/of bekleding. Voor bresgroei is vooral de afdeklaag en/of bekleding van het landtalud belangrijk, aangezien de snelheid van de processen 'piping' en 'overloop' mede wordt bepaald door de erosiegevoeligheid van de afdeklaag en/of bekleding van het landtalud. Bij 'piping' kan een ondoorlatende afdeklaag de initiatie van piping vertragen of verhinderen.

Erodeerbaarheid

De erodeerbaarheid of erosiegevoeligheid van de verschillende grondlagen is een zeer belangrijke parameter voor bresgroeiprocessen en wordt bepaald door verschillende grondkarakteristieken zoals de verdichtingsgraad van de grond, de (kritische) schuifweerstand en de cohesie. Omdat de erosiegevoeligheid veel belangrijke parameters voor verschillende 'scour and erosion'-processen samenvat (rill- en gully-vorming, streambed en streambank erosie, dijkerosie), wordt reeds lange tijd gezocht naar eenvoudige (empirische) vergelijkingen die de erosiegevoeligheid weergeven in functie van een aantal eenvoudig meetbare parameters (bvb percentage klei, plasticiteitsindex, ...).

Door de talrijke onderzoeken met vaak tegenstrijdige resultaten is het duidelijk geworden dat erosie kan bestaan uit verschillende (interactieve) complexe processen en dat de erosiegevoeligheid van een bodem door veel parameters wordt bepaald. Specifiek voor bresgroeimodellering tracht men de laatste jaren in situ metingen van erosiesnelheden (voor het te verwachten bereik van schuifspanningen) te koppelen aan modelparameters ter simulatie van het eroderen van een dijk, en dit voor zoveel mogelijk dijktypes en grondcondities. Dit gebeurt vooral in de VS door de HERU-unit van de USDA. Door de talrijke metingen en observaties is daarbij duidelijk gebleken dat een model dat bresgroei simuleert parameters moet voorzien ter weergave van de grondgesteldheid (onder meer verdichtingsgraad, watergehalte), of dat meetbare parameters van erosiegevoeligheid moeten kunnen worden ingegeven. Voor meer details wordt verwezen naar deelopdracht 1 van deze studie (Van Hoestenbergh et al., 2010).

Ondergrond dijk

Ook de karakteristieken van de grondlagen onder de dijk bepalen mee het faalproces. De ondergrond onder de dijk kan verdeeld worden in voorland, dijkbasis en achterland (Figuur 1). Slappe lagen in de ondergrond kunnen bijvoorbeeld leiden tot macro-instabiliteit of grote zettingen en dus kruinverlagingen. De belangrijkste karakteristiek voor bresgroei is doorlatendheid, aangezien een doorlatende laag onder een ondoorlatend dijklichaam kan leiden tot piping. De erosiegevoeligheid van het voorland en de dijkbasis bepaalt ook op welke manier en met welke snelheid een dijk zal falen en de bres zal groeien. De grondopbouw van het achterland bepaalt op zijn beurt of opbarsting kan plaatsvinden.

2.2.3 Vereenvoudiging

Voor de geometrische parameters vermeld in §2.2.1 zijn er over het algemeen gedetailleerde gegevens beschikbaar. De meeste grondkarakteristieken en een aantal structuurkenmerken (bekleding) zijn echter minder in detail beschikbaar, waardoor het vaak niet mogelijk is om per dijksegment een waarde toe te kennen. Zo zijn slechts voor een beperkt aantal dijksegmenten de schuifweerstandswaarden en cohesiewaarden in detail gekend aan de hand van grondboringen of sonderingen.

Daarom worden in deze studie, om een onderverdeling in dijktypes voor bresgroei mogelijk te maken, een aantal (soms vereenvoudigde) dijkarakteristieken vooropgesteld die bestaan uit relevante structuurkenmerken en grondkarakteristieken én die in Vlaanderen over het algemeen gekend zijn. Met deze dijkarakteristieken worden verder de dijken in dijktypes onderverdeeld.

Voor het faalmechanisme 'erosie door overloop' zijn voornamelijk volgende (vereenvoudigde) sterkteparameters of dijkarakteristieken van belang:

- Kruinhoogte, kruinbreedte en helling landtalud
- Kernmateriaal (zand/leem/klei)
- Aanwezigheid afdekkende kleilaag
- Bekleding landtalud + erosiebestendigheid gras
- Opbouw dijk (homogeen, laagsgewijs)
- Aanwezigheid voorland (schor of berm)

Voor het faalmechanisme 'piping' zijn voornamelijk volgende (vereenvoudigde) sterkteparameters of dijkkarakteristieken van belang:

- Breedte dijkbasis
- Aanwezigheid doorlatende laag onder dijk (inclusief korrelgrootteverdeling doorlatende laag)
- Dikte afdekkende niet-doorlatende laag
- Aanwezigheid voorland (schor of berm)

Door de dijkkarakteristieken voor beide faalmechanismen samen te nemen, komen we aan volgende lijst van meest 'typerende' dijkkarakteristieken die de bresgroei bepalen:

- Geometrische parameters: kruinhoogte, kruinbreedte, breedte dijkbasis en helling landtalud
- Type kernmateriaal (zand/leem/klei)
- Type afdeklaag (afdekkende kleilaag)
- Bekleding (erosiebestendig gras)
- Opbouw dijk (homogeen, laagsgewijs)
- Aanwezigheid (grof) zand net onder dijk
- Aanwezigheid voorland, al dan niet beschermd
- Aanwezigheid afdekkende niet-doorlatende laag

Voor deze typerende dijkkarakteristieken wordt verder nagegaan welke er gegevens in Vlaanderen beschikbaar zijn.

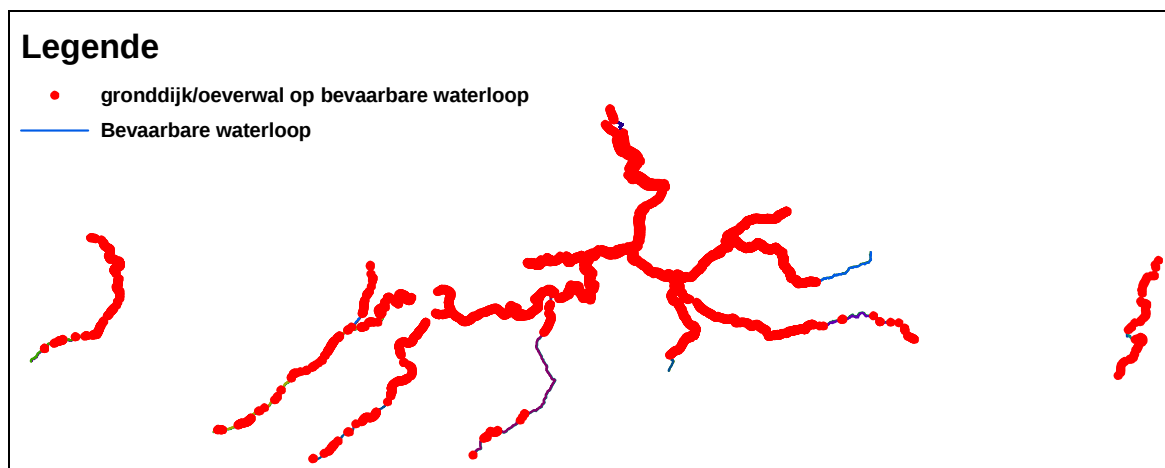
2.3 Beschikbare gegevens in Vlaanderen

De beschikbare informatie omtrent de dijkkarakteristieken van de Vlaamse bevaarbare waterlopen vermeld in § 2.2.3 zijn samengevat in de studie 'Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken' (IMDC et al., 2010).

De gedetailleerde kennis die beschikbaar is, is beperkt tot geometrische parameters, externe waterstanden en lokale sonderingen. Voor de andere 'typerende' dijkkarakteristieken (zoals beschreven in § 2.2.3) zijn de beschikbare gegevens meestal minder gedetailleerd. De gegevens worden in wat volgt samengevat per dijkkarakteristiek. Daarnaast wordt ook een aantal aspecten van belastingsparameters typerend voor de Vlaamse rivierdijken kort besproken.

2.3.1 Algemeen

In deze studie worden enkel de oeverwallen en gronddijken van bevaarbare waterlopen beschouwd. Bij een gronddijk ligt het maaiveld minstens 1.5 m lager dan de dijk kruin. Bij een oeverwal ligt het maaiveld lager dan de oeverkruin, maar het verschil is kleiner dan 1.5 m. Zowel de gronddijk als het oeverlichaam bestaan enkel uit grond (zand, leem of klei), zonder verstevigingsstructuren (damwand in staal of beton). De resulterende dijksecties waarvan de dijkkarakteristieken verder worden beschouwd, worden in Figuur 2 weergegeven.



Figuur 2 - Dijksecties van Vlaamse bevaarbare waterlopen bestaande uit een oeverwal of gronddijk zonder versterking (IMDC et al, 2010)

2.3.2 Geometrische parameters

De inventarisatie van de geometrische gegevens werd gebaseerd op hydraulische modellen en topografische opmetingen.

Kruinhoogte

De kruinhoogte van ongeveer $\frac{3}{4}$ van de beschouwde dijken van bevaarbare waterlopen (Figuur 2) is lager dan 2 m (ten opzichte van het maaiveld). Slechts 1% van de dijken heeft een dijkhoogte hoger dan 4 m. De resterende 25% van de beschouwde dijken heeft een dijkhoogte tussen 2 en 4 m ten opzichte van het omliggende maaiveld.

Kruinbreedte

De kruinbreedte is voor 70% van de beschouwde dijken tussen 5 en 10 m. Slechts 4% van de dijken heeft een kruin breder dan 15 m. De resterende 25% van de dijken hebben een kruinbreedte kleiner dan of gelijk aan 5 m.

Voor de meeste SIGMA-waterlopen werd met de effectieve kruinbreedte gerekend. Voor de niet-SIGMA dijken bestaat er niet zoiets als een standaard kruinbreedte. Er werd een standaardbreedte van 7 m aangenomen op het peil van de extreme condities (retourperiode 100 jaar). Ook op de Schelde afwaarts van Temse en op de Rupel is de standaardbreedte 7 m. Op de Schelde opwaarts van Temse en op de Zenne, Durme, de Netes en de Dijle is de standaardbreedte 5 m.

Helling landtalud

De helling van het landtalud varieert vrij gelijkmatig van 6/4 tot flauwer dan 20/4: hellingen van 8/4, 10/4, 12/4, 16/4 en 20/4 komen allen ongeveer even frequent voor bij de beschouwde dijktypes.

De standaardhelling aan landzijde is 16/4 voor alle sigmadijken. Langs de Durme wordt afgeweken naar 12/4 en zelfs naar 10/4, maar deze hellingen zijn anno 2010 nog in studiefase. Aan rivierzijde is de standaardhelling 12/4 voor alle sigmadijken. Voor de niet-SIGMA-waterlopen bestaat niet zoiets als een standaardhelling.

Breedte dijkbasis

De breedte van de dijk ter hoogte van de teen kan afgeleid worden op basis van de gegevens van de kruinhoogte, kruinbreedte, de taludhellingen en de maaiveldhoogte.

De meeste geometrische parameters van dijken vertonen een ruime spreiding in waarden. Wegens deze spreiding heeft het geen zin om deze parameters te gebruiken voor de onderverdeling van de dijken in dijktypes. Deze parameters kunnen dan ook als discrete parameter in het bresgroeimodel worden ingegeven.

2.3.3 Kernmateriaal

Het materiaaltype van de dijk kern is meestal niet gekend. Voor ongeveer 10% van de beschouwde dijksegmenten is het kernmateriaal met zekerheid gekend als zandig materiaal.

Voor de andere dijksegmenten is het type kernmateriaal eerder onzeker. SIGMA dijken bestaan over het algemeen uit zand (afgedekt met een kleilaag). Dat is echter de typesectie die in de praktijk niet steeds werd gevolgd. Bovendien zit in de zanddijk vaak nog een oude dijk kern van klei (de zogenaamde paterkesdijken) of leem. Dijken werden vroeger immers meestal opgebouwd uit het ter plaatse gevonden materiaal.

Het materiaal van de dijk kern wordt dus best geschat op basis van 'expert judgment' waarbij er rekening mee moet worden gehouden dat er een grote onzekerheid op bestaat.

2.3.4 Afdeklaag en bekleding (vegetatie)

Als vegetatie op het landtalud kan ervan uitgegaan worden dat er overal gras aanwezig is¹. Veiligheidshalve wordt de vegetatie aan landzijde in het algemeen als 'matig erosiebestendig' gras beschouwd.

De eigenschappen van de afdeklaag (dikte afdeklaag, grondsoort afdeklaag, ...) zijn over het algemeen niet gekend. Over het algemeen is er geen afdekkende laag vette grond aanwezig, behalve voor de SIGMA dijken waar de kleilaag meestal 60 cm tot 80 cm dik is. De laag van vette grond dient aan de rivierzijde voor de waterdichtheid van de dijk, maar aan landzijde voor bescherming tegen erosie. Voor niet-sigmadijken is de dikte van de afdekkende kleilaag op het maaiveld moeilijk in te schatten. Op basis van enkele aftastende berekeningen met behulp van de Sellmeyer formule leidde men in voorgaande studies (IMDC et al., 2010) af dat de invloed van de dikte van de afdekkende kleilaag (evenals de dikte van het zandpakket) relatief klein is voor het (primair) falen van de dijk van rivieren waar de effecten van tijcondities primeren. Voor het groeien van de bres, zowel voor piping-mechanismen als voor overloopprocessen, kan de dikte en karakteristieken van de afdekkende kleilaag echter zeer belangrijk zijn.

De dijken langs de Grensmaas zijn typisch opgebouwd uit een afdeklaag van leem (1 tot 6 m), waaronder een sterk doorlatende grindlaag van 6 tot 10 m aanwezig is (Blevoets, 1998).

2.3.5 Opbouw dijk

Om te beoordelen in hoeverre een dijk homogeen of laagsgewijs is opgebouwd, zal men zich in Vlaanderen overwegend moeten baseren op expert judgment. SIGMA dijken bestaan over het algemeen uit zand (afgedekt met een kleilaag), maar het is daarbij meestal niet geweten in hoeverre een oude kleikern aanwezig is. Nochtans is een dergelijke kleikern belangrijk in het proces van bresgroei. Veiligheidshalve dient men steeds de minst veilige situatie te beschouwen (bvb geen kleikern bij onzekerheid).

2.3.6 Aanwezigheid doorlatende laag onder dijk

Of er al dan niet een (dunne) zandlaag onder de dijk aanwezig is, is vaak niet bekend. Toch geeft de inventarisatie voor de Vlaamse winterdijken aan dat in 99% er zeker geen doorlatende laag onder de dijk aanwezig is. In 1% van de gevallen is er sprake van 'misschien wel' een doorlatende laag onder de dijk, met potentiële piping-mechanismen. Voor die gevallen moet op basis van de geologische karakteristieken van het gebied en op basis van expert judgment een oordeel geveld worden.

Uit de beschrijving van het substraat onder de winterdijken blijkt dat het vaakst Quartair aangetroffen wordt. Door de sterk veranderlijke ondergrond typisch aan Quartaire afzettingen, kunnen op enkele tientallen meters afstand volkomen andere formaties worden gevonden. Bij gebrek aan een specifiek onderzoek moet men terugvallen op de algemene beschrijving van de meest courant gevonden lagen

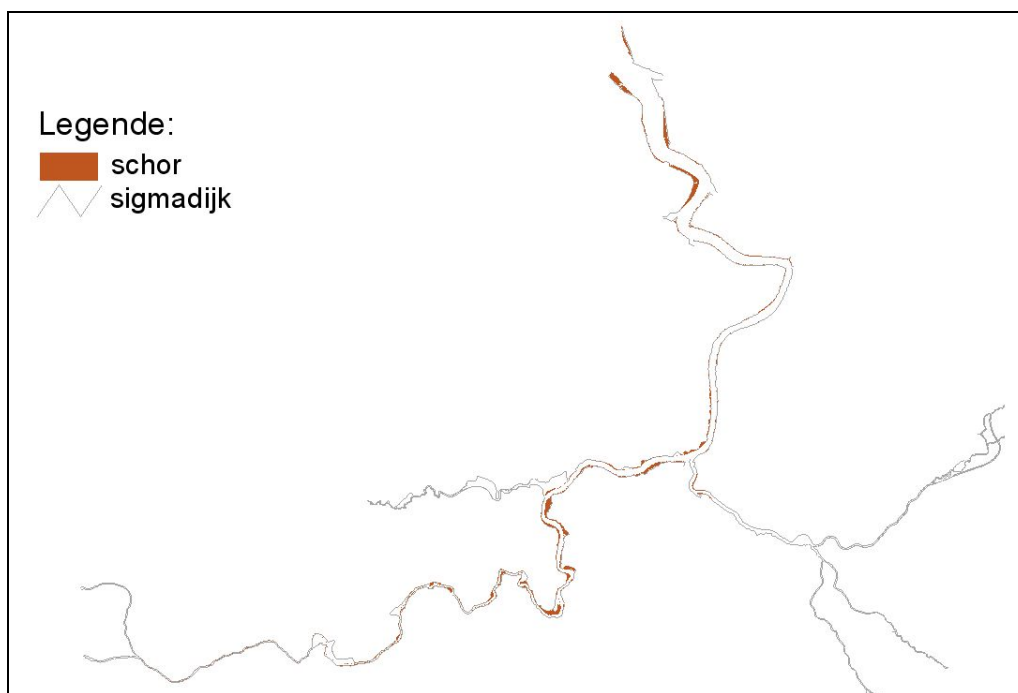
¹ Doorgroeitiegels zijn over het algemeen erosiebestendiger dan graszoden, maar vaak is niet geweten of er doorgroeitiegels of gras aanwezig is.

voor een bepaalde rivier. Zo is het belangrijk grind en grof zand als waterdoorlatende lagen onder dijken te identificeren, aangezien zij piping-mechanismen kunnen induceren (zie verder). Enkel ter hoogte van de Maas werden deze mechanismen tot dusver waargenomen.

2.3.7 Aanwezigheid voorland

Een voorland bestaat in Vlaanderen vooral uit schorrengebied, maar kan soms ook uit een oude kleidijk bestaan waarvan landinwaarts een nieuwe (hogere) dijk is opgetrokken (DDprocessen def). Het voorland kan de golven breken en de golfhoogte ter hoogte van de eigenlijke dijk verkleinen, wat een dijk minder bresgevoelig zal maken. Tijdens het bresgroeiproces is een voorland vooral belangrijk om de verticale groei van de bres te beperken.

De schorren in Vlaamse Bevaarbare waterlopen komen voornamelijk op de Zeeschelde voor (Figuur 3). In beperkte mate zijn er schorren op de Rupel aanwezig. Volgens de inventarisatie op Vlaamse rivieren zijn er ter hoogte van ongeveer 10% van de beschouwde dijksegmenten schorren aanwezig (IMDC et al., 2010).



Figuur 3 - Ligging van de schorren langsheen Schelde, Rupel en Durme (IMDC et al., 2010)

2.3.8 Belasting

Hieronder worden kort een aantal kenmerken weergegeven typisch voor de belasting op de beschouwde Vlaamse rivierdijken. Deze belasting is voornamelijk een hydraulische belasting, onder te verdelen in:

- Waterverschil over de dijk.
- Stromingen. Deze zijn meestal parallel aan de dijk.
- Golfoverslag. Voor de niet SIGMA waterlopen kan de golfoverslag verwaarloosd worden (. Voor SIGMA-waterlopen kan de golfoverslag wel significant zijn. De Schelde en de Rupel worden gekenmerkt door een belangrijke strijklengte, zodat windgolven niet verwaarloosbaar zijn. Aangenomen mag worden dat scheepvaartgolven minder belangrijk zijn als het waterpeil zo hoog staat dat golfoverslag dreigt, want de scheepvaart wordt dan praktisch altijd stilgelegd.
- Overloop. De stroomsnelheid van het overslaand water vormt de voornaamste belasting op het landtalud. Eenmaal bresvorming wordt daarbij verondersteld dat de belasting afkomstig van golfoverslag klein is in vergelijking met de belasting afkomstig van overloop.

Daarnaast beïnvloeden geohydrologische aspecten de mate van belasting, zoals grondwaterstromingen en poriëndruk .

Ook kan er belasting optreden ten gevolge van externe factoren, zoals bovenbelasting, bomen, dieren, vandalisme... Deze worden in deze studie verder niet in beschouwing genomen. Het is immers moeilijk de mate van beschadiging door dieren (konijnenpijpen, dassenburchten) vast te stellen.

2.3.9 Samenvatting

De meest relevante dijkkenmerken voor bresgroei zijn gegeven in § 2.2.3. Voor de meeste van deze kenmerken zijn er echter geen gedetailleerde gegevens beschikbaar. Wil men voor een bepaald dijksegment meer gedetailleerde gegevens hebben dan dat er momenteel beschikbaar zijn, dan wordt in Tabel 1 de meest aangewezen bepalingmethode aangegeven per dijkkenmerk.

Wil men voor een bepaald dijksegment zonder gedetailleerde gegevens toch bresgroei simuleren, dan moet men uit veiligheidsoverwegingen steeds uitgaan van de meest conservatieve situatie. Stel bijvoorbeeld dat het niet geweten is of een afdekkende kleilaag aanwezig is, dan moet men ervan uitgaan dat er voor dat dijksegment geen kleilaag aanwezig is.

Tabel 1 - Kenmerken belangrijk voor verschillende bresgroeifenomenen, met aanduiding van meest aangewezen methodes ter bepaling van gedetailleerde informatie

Dijkkenmerk	Overloop	Piping	Bepalingsmethodes
Geometrische parameters (kruinhoogte, kruinbreedte, breedte thv teen en helling landtalud)	x	x	Reeds gedetailleerd bepaald op basis van hydraulische modellen en topografische opmetingen
Type kernmateriaal (zand/(zand)leem/klei)	x		- expert judgment (waterbeheerders) - niet-destructief onderzoek - sonderingen/ boringen
Dikte afdeklaag en type bekleding (afdekkende kleilaag, gras)	x	x	
Opbouw dijk (homogeen, laagsgewijs)	x		
Aanwezigheid doorlatende laag onder ondoorlatende dijklagen		x	- expert judgment (waterbeheerders) - niet-destructief onderzoek - sonderingen/ boringen - geologische kaart
Aanwezigheid voorland (schor of berm)	x	x	- topokaarten - bathymetrische of terrestrische opmetingen

2.4 Beschouwde dijktypes

2.4.1 Nut dijktypes

Zoals aangetoond in voorgaande paragrafen, zijn de Vlaamse dijken qua opbouw sterk uiteenlopend. Voor overstromingsrisicomodelleringen is het nodig de bresgroei te kunnen simuleren voor die dijksegmenten, waarvan men heeft afgeleid dat ze bresgevoelig zijn. Tal van bresgroeimodellen kunnen echter toegepast worden. Uit wat volgt, zal blijken dat de meeste bresgroeimodellen niet alle bresgroeiprocessen even goed en realistisch in rekening brengen. Deze processen zijn immers sterk verscheiden, zoals zal blijken uit § 4. Er moet eerder per proces gezocht worden welk bresgroeimodel dat proces het best simuleert. Zo zal blijken uit § 5 dat sommige modellen beter de bresgroei bij cohesieve dijken simuleren, terwijl andere modellen beter de bresgroei bij niet-cohesieve dijken simuleren.

In al de verscheidenheid van de dijkkarakteristieken van de Vlaamse Dijken, kan een onderverdeling in dijktypes worden gemaakt. Deze onderverdeling in dijktypes dient te worden gemaakt op basis van de (verschillen in) processen die zich zullen voordoen bij de verschillende dijktypes. Het onderscheid in de dijktypes dient daarbij te worden gemaakt op basis van relatief eenvoudig vast te stellen dijkkarakteristieken. Een bresgevoelig dijksegment kan dan op basis van deze karakteristieken ingedeeld worden in een dijktype, waar op vervolgens het meest optimale bresgroeimodel voor dat dijktype kan worden toegepast.

2.4.2 Invulling dijkkarakteristieken

Geometrische parameters

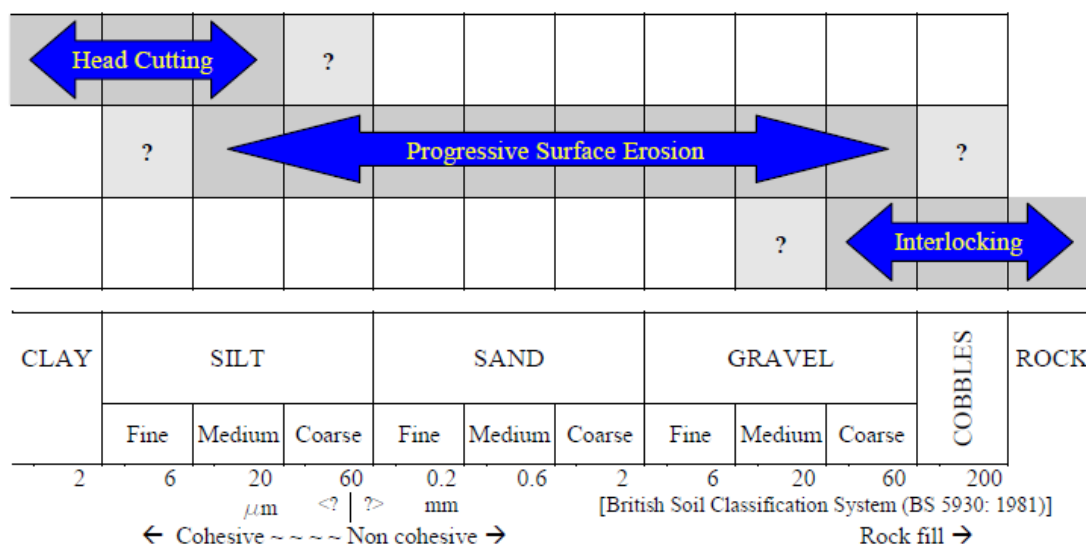
Deze karakteristieken worden niet gebruikt om onderscheid te maken in dijktypes. De parameters dienen rechtstreeks in de bresgroeimodellen te worden ingegeven.

Kernmateriaal

Grondsoort

Het belang van grondsoort en grondgesteldheid voor bresgroei is pas de laatste jaren duidelijk geworden, onder meer uit analyse van de IMPACT-dataset in kader van het FLOODSITE-project (Morris et al., 2009). De grondsoort en de grondgesteldheid zijn bepalend voor de bresgroeiprocessen die kunnen voorkomen. In Figuur 4 wordt het onderscheid in 2 cruciale processen bij bresgroei nl. kliferosie en oppervlakte-erosie gemaakt volgens de grondsoort. In werkelijkheid is het al dan niet voorkomen van deze processen ook gelinkt aan andere parameters die de grondgesteldheid weergeven zoals de cohesie, het watergehalte en verdichtingsgraad (Hanson en Temple, 2002). Het is daarbij echter niet voldoende duidelijk wat de invloed is van deze parameters op de erosieprocessen om al deze invloeden modelmatig in rekening te kunnen brengen. Zo leidde Hanson (Hanson et al., 1998) uit goottesten op verschillende bodemstalen af, dat een stijging in watergehalte tot een zekere grenswaarde een daling in erosiegevoeligheid teweegbracht. Eenmaal deze grenswaarde van watergehalte overschreden, steeg de erosiegevoeligheid sterk met stijgend watergehalte. De grenswaarde of het 'optimum watergehalte' verschilde daarbij per bodemstaal.

Om de bepalende karakteristieken op het voorkomen van erosieprocessen toch enigszins in rekening te kunnen brengen, wordt daarom in veel modellen met erosiecoëfficiënten gewerkt.



Figuur 4 - Ruwe indeling van voorkomende bresgroeiprocessen volgens grondsoort (FLOODSITE)

Voor het onderverdelen in dijktypes, kan men zich in eerste instantie baseren op de grondsoort waaruit de dijk is opgebouwd. Hierbij kunnen grosso modo vier types onderscheiden worden: klei, leem, zand en grind (of rotsvulling, zie Figuur 4). Enkele bedenkingen hierbij:

- Rotsvulling komt niet voor in Vlaamse dijken. Leem of zandleem wordt gebruikt als kernmateriaal bij dijken langs de Grensmaas (1 tot 6 m dik), op een sterk doorlatende grindlaag (dikte 6 tot 10 m).
- Op basis van het onderscheid in grondsoorten is het voor leemgronden niet duidelijk welke processen zich zullen voordoen (Figuur 4)
- Als al geweten is welke grondsoort voorkomt in een dijk, dan beperkt het zich meestal tot het onderscheid tussen klei, zand, of 'alle overige soorten' d.i. voornamelijk leem/zandleem. Langs de Grensmaas is (zand-)leem wel een veel voorkomende grondsoort.
- In extreme omstandigheden kunnen grondsoorten zich onverwacht gedragen. Zo bleek uit een IMPACT-test dat een sterk gecompacteerd zanddijk meer erosie- en doorbraakbestendig is dan een extreem natte kleidijk (Morris et al., 2009b). Indien er enkel een onderscheid gemaakt wordt volgens grondsoort, moet voor modelleringsdoeleinden erop gewaakt worden dat steeds de meest onveilige situatie in rekening wordt gebracht.

Cohesie

Aanvullend op het onderscheid in grondsoort, kan de cohesiesterkte van het dijkmateriaal gebruikt worden voor het bepalen van dijktypes. Het is immers één van de meest bepalende parameters voor het voorkomen van bresgroeiprocessen (Morris et al., 2009a), en de cohesie is sterk gecorreleerd met de verdichtingsgraad en watergehalte. De cohesie kan bepaald worden aan de hand van grondmechanisch onderzoek, en is gekend voor de grondlagen van de meeste SIGMA-dijken. De grote afhankelijkheid van de verzadigingsgraad maakt de cohesie wel een moeilijk te bepalen parameter, aangezien de verzadigingsgraad weer afhankelijk is van infiltratie van regen- en rivierwater (Knoeff en Verheij, 2003).

Bij niet-cohesief materiaal zijn voornamelijk de fysische eigenschappen van het sediment, waaruit de grond bestaat, belangrijk voor de bresgroeiprocessen (korrelgrootteverdeling, korrelvorm, dichtheid, enz). Erosie en sedimenttransport kan vrij accuraat beschreven en gemodelleerd worden voor dit type sediment. Bij cohesief materiaal zijn er naast de fysische eigenschappen ook belangrijke fysico-chemische eigenschappen, nl. de cohesie en de plasticiteit van het sediment. Deze eigenschappen zijn voornamelijk afkomstig van sediment met diameter < 5 µm. Het kleigehalte wordt dan ook vaak gebruikt

als indicator voor de erodeerbaarheid van cohesieve bodems. Hoe hoger het kleigehalte, hoe lager de bodemerodibiliteit wordt verondersteld (Zhu, 2006).

Gebruikt men de grootte van de cohesie als parameter ter onderscheiding van het kernmateriaal van dijklichamen, dan kunnen grosso modo de grondsoorten 'grind' en 'zand' samengenomen worden als niet-cohesieve gronden en 'klei' en 'leem' samengenomen worden als cohesieve gronden. In Tabel 2 worden een aantal belangrijke grondkarakteristieken (waaronder cohesie) voor verschillende grondsoorten weergegeven, zoals gehanteerd door de beheerders van de bevaarbare waterlopen (IMDC et al., 2010).

Tabel 2 - Grondkarakteristieken voor verschillende grondsoorten. De karakteristieken ' γ ', 'E', 'c' en ' ϕ ' staan voor respectievelijk densiteit, elasticiteitsmodulus, cohesie en wrijvingshoek (IMDC et al, 2010)

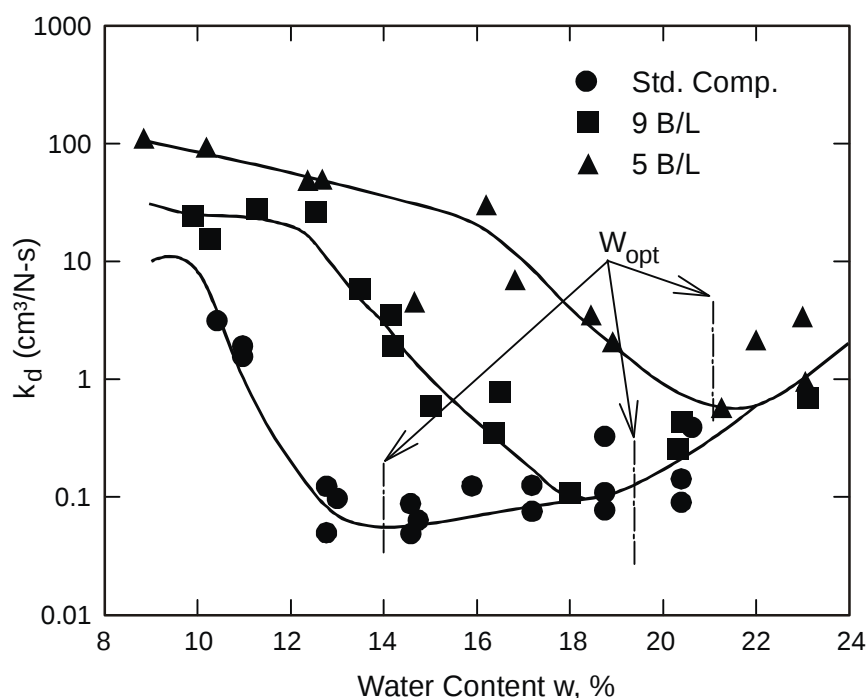
	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ (°)
Klei	18	18	3	5	25
(zand-)leem	18	18	5	3	27.5
Zand	17	20	25	0	30
Afdekkende laag*	20	20	15	5	30
Slappe laag	16	16	1	5	17.5

*Afdekkende laag = Wanneer het dijklichaam opgebouwd is uit zand, wordt een afdekkende laag bestaande uit vaste, zwak zandige leem beschouwd als afdekking van de dijk.

De cohesie (en andere karakteristieken) van een grond is echter niet alleen afhankelijk van de hoofdgrondsoort. In Figuur 6 wordt de tabel van de 'Eurocode 7' weergegeven, die de grondkarakteristieken verder onderverdeelt volgens bijmenging en verdichtingsgraad. Gronden samengesteld uit 'klei' zijn immers nooit 100% samengesteld uit kleimineralen (illiet, montmorilloniet, enz), maar steeds een mix van zand-, klei-, en leemfracties. Ook zand- en leemgronden zijn vaak bijgemengd met een andere soort. Uit Figuur 6 blijkt verder dat de cohesie voor leem- en kleigronden in belangrijke mate functie is van de verdichtingsgraad. De karakteristieken weergegeven in Tabel 2 komen meestal overeen met matig tot vrij vaste gronden van Figuur 6.

Alle grondsoorten die in Figuur 6 geen cohesie ('0 kPa') hebben, kunnen aanzien worden als niet-cohesieve gronden. Ook leemgronden (al dan niet met bijmenging van zand) die weinig gecompacteerd zijn, worden dan aanzien als niet-cohesieve gronden.

De cohesie van de meeste grondsoorten wordt ook beïnvloed door het watergehalte van de grond. Hanson en Hunt (2007) analyseerden de data van de IMPACT en USDA-dijkdoorbraaktesten, en kwamen tot de conclusie dat de erodibiliteit van dijklichamen met verschillende grootte-orde kan veranderen door een relatief klein verschil in vochtgehalte. De relatie is echter niet eenduidig, wat de simulatie van bresgroeiprocessen bemoeilijkt. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5, voor verschillende compactieniveaus van hetzelfde grondtype.



Figuur 5 - Verandering in klifmigratiesnelheid k_d met meerdere grootteordes in functie van het vochtgehalte 'w' voor een bodemtype met verschillende compactiegraden (Hanson en Hunt, 2007)

Dit bevestigt wat reeds vroeger in kader van onderzoek voor TAW (1996) werd vastgesteld voor kleigronden. De cohesie van een verzadigde kleigrond bleek toe te nemen naarmate het watergehalte afneemt. Vanaf een bepaalde grens gedraagt de klei zich meer als een plastische stof. Een verdere verdroging leidt dan weer tot afnemende plasticiteit en cohesie.

Belangrijk is dat zowel cohesie, het watergehalte als de verdichtingsgraad zeer belangrijke parameters zijn om de grondgesteldheid en bijgevolg de erodeerbaarheid van het dijkmateriaal te bepalen. Hoe meer waarden van deze parameters in bresgroeimodellen kunnen ingegeven worden, hoe beter het model de grondgesteldheid zal kunnen weergeven. In een aantal modellen (bvb SIMBA) kunnen in plaats van deze parameters rechtstreekse metingen van de erodeerbaarheid van de bodem worden ingegeven (zie § 5). De benodigde invoerparameters voor de modellen worden in deelstudie 3 beschreven.

Grondsoort	Bijmenging	q_c (MPa)	R_f (%)	Pakkingsdichtheid/ consistentie	$\gamma_{\text{oven P.O.}}$ (kN/m ³)	$\gamma_{\text{onder P.O.}}$ (kN/m ³)	φ' (°)	c' (kPa)	c_u (kPa)	E_s (kPa)
grind	-	10 - 20 > 20	< 1	matig dicht	18 19	20 21	35 40	0 0	- -	40 000 60 000
	leem- of kleihoudend	10 - 20 > 20	1 - 2	matig dicht	19 20	21 22	32 37	0 0	- -	25 000 45 000
zand	-	2 - 4 4 - 10 > 10	< 1	los matig dicht	16 17 18	18 19 20	27 30 35	0 0 0	- - -	8 000 16 000 20 000
	leem- of kleihoudend	2 - 4 4 - 10 > 10	1 - 2	los matig dicht	16 17 18	18 19 20	25 27 30	0 0 0	- - -	5 000 10 000 15 000
leem	-	0,4 - 1 1 - 2 2 - 4 > 4	2 - 4	weinig vast matig vast vrij vast vast	17 18 19 20	17 18 19 20	22 22 22 22	0 2 4 8	10 25 50 100	1 000 2 000 4 000 7 000
	zandhoudend	0,4 - 1 1 - 2 2 - 4 > 4	1 - 3	weinig vast matig vast vrij vast vast	17 18 19 20	17 18 19 20	25 25 25 25	0 2 4 8	10 25 50 100	2 000 3 000 6 000 10 000
klei	-	0,4 - 1 1 - 2 2 - 4 > 4	3 - 6	weinig vast matig vast vrij vast vast	16 17 18 19	16 17 18 19	20 20 20 20	2 4 8 15	20 50 100 200	1 000 2 000 4 000 7 000
	zandhoudend	0,1 - 1 1 - 2 2 - 4 > 4	2 - 5	weinig vast matig vast vrij vast vast	16 17 18 19	16 17 18 19	22 22 22 22	2 4 8 15	20 50 100 200	2 000 3 000 6 000 10 000
veen	-	0,2 - 0,5 0,5 - 1 > 1	≥ 6	weinig vast matig vast vast	10 12 14	10 12 14	15 15 15	2 5 10	10 20 40	200 500 1 000

Figuur 6 - Tabel van Eurocode 7 waarbij onder meer grondsoort en cohesie (c') wordt aangegeven

Afdeklaag en bekleding

Enkel het landtalud is belangrijk voor bresgroeiprocessen (overloop en piping). Daar steeds gras (of doorgroei tegels met gras) aanwezig is op het landtalud (§ 2.3.4), hoeft men hierin verder geen onderscheid te maken.

Wat de afdeklaag betreft, wordt meestal vette grond of klei gebruikt. De afdeklaag van de dijken langs de Grensmaas bestaat uit leem. Voor het onderscheid in dijktypes, is hetzelfde onderscheid aangewezen als voor het kernmateriaal nl. cohesief/niet-cohesieve grond als afdeklaag.

Opbouw dijk

De gelaagdheid van een dijk is belangrijk voor bresgroeiprocessen. Naast het onderscheid in afdeklaag en kernmateriaal, zijn vaak nog meerdere lagen aanwezig in het kernmateriaal, bvb een oude kleikern of zogenaamde paterkesdijk. Aangezien het echter meestal niet geweten is of er dergelijke lagen of kernen aanwezig zijn, is het ook niet aangewezen deze gelaagdheid in rekening te brengen bij het opdelen in dijktypes.

Het niet in rekening brengen van dergelijke lagen stelt geen probleem naar veiligheid bij overstromingsmodellering, aangezien dergelijke lagen meestal bestaan uit meer erosiebestendige materialen. De reële toestand is dan veiliger dan degene die gesimuleerd wordt.

Aanwezigheid voorland

Door de grote invloed op verticale bresgroei en piping, is het belangrijk de aanwezigheid van een (beschermd) voorland in rekening te brengen. De schorregebieden voor Vlaamse bevaarbare waterlopen zijn gekend en kunnen in rekening worden gebracht bij de bresgroeimodellering. Bij de indeling in dijktypes wordt het dijktype mét en zonder voorland beschouwd, waarbij het voorland vooral uit schorren zal bestaan.

Aanwezigheid doorlatende laag onder dijk

De aanwezigheid van grind en grof zand zijn bepalend voor het voorkomen van piping-mechanismen. Bij de indeling in dijktypes wordt als ondergrond doorlatende (grind en zand) en niet-doorlatende (leem en klei) gronden beschouwd.

In geval een (dunne) niet-doorlatende laag boven een doorlatende laag is gelegen, kan piping worden geïnitieerd door het opbarsten van de niet-doorlatende laag. Aangezien 'opbarsten' echter deel uitmaakt van bresinitiatie en niet van bresgroei, wordt er geen apart type 'ondoorlatende laag boven doorlatende laag' (bvb dunne kleilaag zand boven zandlaag) voorzien. Eenmaal de ondoorlatende laag is opgebarsten en de pipe is gevormd, speelt de ondoorlatende laag verder weinig rol in het bresgroeiproces.

2.4.3 Dijktypes

Uit wat voorafgaat, kunnen volgende karakteristieken gebruikt worden ter onderscheid van dijktypes:

- Cohesief/niet cohesief (C/NC) kernmateriaal
- Doorlatend/niet doorlatende (C/NC) ondergrond
- Cohesief/niet cohesieve (C/NC) afdeklaag
- Aanwezigheid voorland

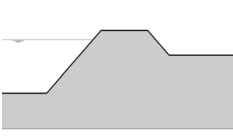
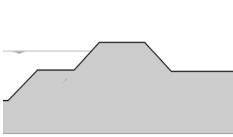
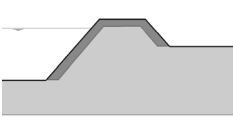
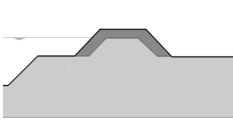
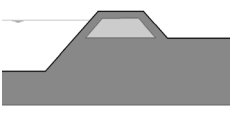
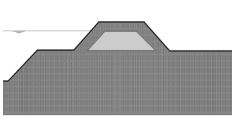
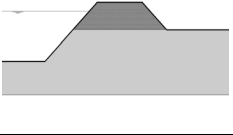
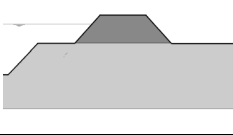
De relevante types voor Vlaamse bevaarbare waterlopen staan opgelijst in Tabel 3.

Volgende bedenkingen kunnen daarbij worden gemaakt:

- Indien de kern uit niet-cohesief materiaal bestaat en geen cohesieve afdeklaag aanwezig is, (type 1), speelt de ondergrond weinig rol. Het water neemt immers steeds de makkelijkste (d.i. kortste) weg, nl. door de dijk.
- Type 1 komt normaal gezien niet voor. Dit type benadert echter de situatie waarbij vermoed wordt dat de cohesieve afdeklaag een zeer geringe dikte heeft, of de situatie waarbij de kwaliteit van de afdeklaag slecht is, bvb vertonen van grote barsten of scheuren. Indien wel zekerheid is over enige dikte en kwaliteit van de afdeklaag, is dijktype 2 van toepassing
- Een kern uit cohesief materiaal met een afdeklaag uit niet-cohesief materiaal komt in Vlaanderen nauwelijks voor, en wordt dan ook niet als apart type beschouwd

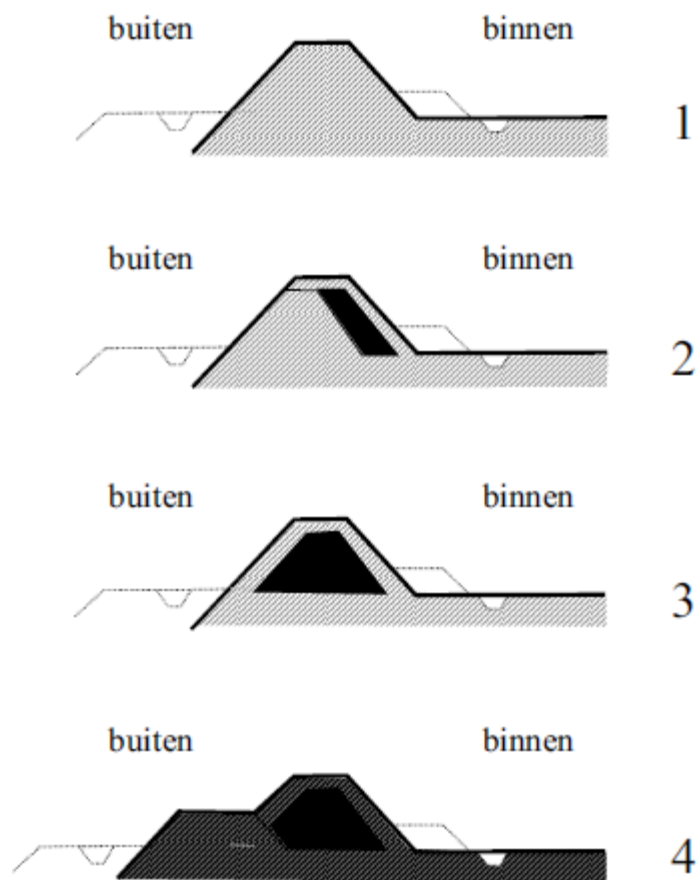
Met bovenstaande argumenten worden in totaal 5 dijktypes bekomen, die in Tabel 3 worden weergegeven. Deze types kunnen allen voorkomen met voorland, zoals aangeduid in Tabel 3 (2^{de} kolom). Het enige verschil met de dijktypes zonder voorland is dat er een voorland in hetzelfde materiaal als de ondergrond voorkomt.

Tabel 3 - Te onderscheiden dijktypes zonder voorland en met voorland. C staat voor cohesief materiaal, NC staat voor niet-cohesief materiaal

Dijktype zonder voorland	Dijktype met voorland	Kern-materiaal	Materiaal ondergrond	Afdeklaag	Dijktype nummer
		NC	C NC	NC	1
		NC	NC	C	2
		NC	C	C	3
		C	NC	C	4
		C	C	C	5

2.4.4 Vergelijking met Nederlandse dijktypes

Als we de Vlaamse dijktypes (Tabel 3) vergelijken met de archetypes die onderscheiden zijn in Nederland (Figuur 7), dan zijn een aantal gelijkenissen terug te vinden. Het Nederlands dijktype 1 komt overeen met het Vlaams dijktype 5. Nederlands dijktypes 2 en 3 komen grosso modo overeen met Vlaams dijktype 3. Nederlands dijktype 4, die praktisch niet voorkomt in Nederlands rivierengebied, komt overeen met Vlaams dijktype 3 mét voorland. Het voorland van het Nederlandse dijktype is meestal een oude dijk, terwijl in het Vlaamse type er zowel een schor als een oude dijk als voorland kan voorkomen.



Figuur 7 - Geschematiseerde karakteristieke dwarsprofielen van Nederlandse dijken. Zwart is niet-cohesief materiaal (zand), gearceerd is cohesief materiaal (klei) (Calle, 2002)

3 Faalmechanismen en faaltrajecten

3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de faalmechanismen die in Vlaanderen kunnen leiden tot bresinitiatie. Voor piping en overloop wordt daarenboven de opeenvolging van bresinitiatie naar bresgroei beschreven aan de hand van het optreden van primaire en vervolgmecanismen. De andere faalmechanismen zijn voornamelijk belangrijk voor bresinitiatie, waardoor enkel de primaire mechanismen worden beschreven. De analyse van het grondmechanisch falen van dijken en de erdoor geïnitieerde bresvorming is immers reeds gebeurd in de studie van IMDC et al. (2010).

In § 4 worden de verschillende processen, die voorkomen tijdens de verschillende fasen van piping en overloop, meer fysisch in detail beschreven.

In een samenvattende tabel (Tabel 5) wordt het al dan niet voorkomen van het faalmechanisme per dijktype geëvalueerd.

3.2 Piping

3.2.1 Algemene omschrijving

Het ontstaan van een zandmeevoerende wel of 'loopzand' bij uittredend water (heave) en vorming van ondergrondse kanaaltjes (piping) zijn verschijnselen die de stabiliteit van grondconstructies kunnen bedreigen. Heave is het mechanisme waarbij een verticaal verhang (bvb achter een kwelscherm) de effectieve spanningen in de grond zodanig laat afnemen dat de stabiliteit wordt bedreigd. In deze studie wordt verder enkel op de piping-mechanismen dieper ingegaan.

Het optillen van gronddeeltjes en terugschrijdende erosie kunnen worden teweeggebracht doordat bij groot verval over grondconstructies gronddeeltjes in watervoerende zandlagen door het kwelwater worden meegevoerd. Hierdoor kunnen doorgaande kanaaltjes onder of in de grondconstructie ontstaan die uiteindelijk kunnen leiden tot het falen van een dijk. Dit vindt plaats in minder doorlatende dijken met een onderlaag die meer doorlatend is dan het dijklichaam. Bij dijktype 4 van Tabel 3 is het risico op piping duidelijk. Maar ook bij dijktype 2 van Tabel 3 is er het risico op piping reël. Het water kan immers door het zandige dijklichaam stromen onder de ondoorlatende bekleding door. Het verschil met mechanismen zoals interne erosie of microstabiliteit (§ 3.6) is dat bij piping het water niet *door* de bekleding stroomt maar *onder* de bekleding. Bij micro-instabiliteit of interne erosie is er sprake van kwel *door* de dam. Bijna een kwart van het falen van dammen wordt toegeschreven aan piping en micro-instabiliteit samen (Calle, 2002).

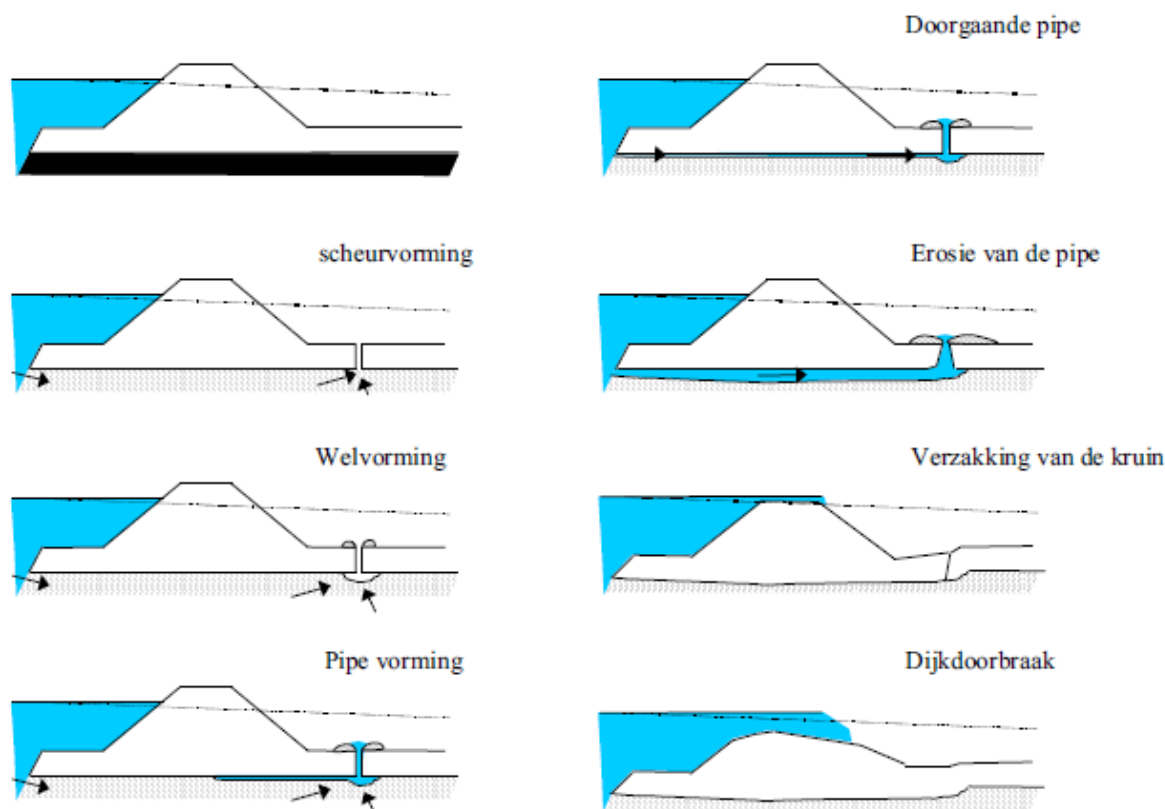
Opbarsten vindt plaats wanneer zich een doorlatende laag, die in verbinding staat met het reservoir aan de ene kant van de dijk, afgedekt wordt door een ondoorlatende laag aan de andere kant van de dijk. Wanneer de druk onder de kleilaag te groot is kan deze opbarsten waardoor er wel een doorlatende verbinding gevormd wordt tussen de buiten- en de binnenkant van de dijk.

3.2.2 Fasen

Volgende fasen kunnen bij piping worden onderscheiden, waarbij telkens verschillende mechanismen optreden (Calle, 2002):

- opdrijven en opbarsten afdekkende laag aan landzijde dijk, ontstaan van wellen (mechanisme A)
- eroderen van de zandlaag en vorming van pipe (mechanisme B)
- erosie tot doorgaande pipe is gevormd (mechanisme C)
- verdere erosie van de doorgaande pipe (mechanisme 'ruimen')
- verzakking van de kruin (mechanisme D)
- erosie restprofiel (mechanisme E, F)

Deze fasen en mechanismen worden in Figuur 8 en Figuur 9 schematisch weergegeven. De fase van opdrijven en welvorming komt niet altijd voor. Daarnaast kan piping ook ontstaan ten gevolge van zettingsverschillen.



Figuur 8 - Mechanisme piping, met (van linksboven naar rechtsonder) de deelprocessen opdrijven, opbarsten met welvorming, pipevorming, ruimingsfase en verzakking van de kruin (Calle, 2002)

Opdrijven en opbarsten afdekkende laag, ontstaan van wellen (mechanisme A)

De zandlaag staat in contact met een waterreservoir. Door (stijging van) de waterstand, kan een grote waterspanning ontstaan in de zandlaag onder het dijklichaam. Als de waterspanningen aan de landzijde van de dijk groter zijn dan het gewicht van de afdekkende laag, dan gaat de afdekkende laag opbarsten.

Door het opdrijven kunnen scheurtjes of gaten ontstaan in de afdekkende laag, waardoor water naar de oppervlakte kan stromen. Er ontstaat een wel.

Eroderen van de zandlaag en vorming van pipe (mechanisme B)

Door erosie van de wel ontstaat een kanaal tussen de zandlaag en het maaiveld. Door de uit de zandlaag optredende kwel worden zanddeeltjes vanuit deze laag naar de oppervlakte gebracht. Ofwel verhoogt de weerstand nu zodanig dat de stroomsnelheid dermate afneemt dat het kanaal niet verder erodeert (ontstaan van 'schone' wel, d.i. zonder meevoeren van zand). Een tweede mogelijkheid is dat een zandmeevoerende wel ontstaat, waarbij vele erosiekanalen onder de dijk kunnen ontstaan. De wel wordt groter en op termijn ontstaat één lang kanaal die in lengte blijft toenemen. Er ontstaat een pipe, die groeit van benedenstrooms naar bovenstrooms.

Ontstaan van doorgaande pipe (mechanisme C)

Eenmaal de pipe halverwege de wel en de rivierzijde is, is de groei niet meer te stoppen (Calle, 2002). Een open verbinding ontstaat tussen het buitenwater en de wel nl. een doorgaande pipe. Door verdere erosie van de pipe ontstaan holle ruimtes onder de dijk.

Eroderen van doorgaande pipe (mechanisme 'ruimen')

Door erosie van de pipe vergroot de doorgaande pipe van bovenstrooms naar benedenstrooms.

Verzakking van de kruin (mechanisme D)

Als de pipe zodanig is geërodeerd dat het resterende dijklichaam het gewicht van de kruin niet meer kan dragen, verzakt de kruin. De holle ruimtes storten niet ineens in, maar de dam schuift vanaf de teen in de richting van de kruin. De verzakking is meestal aanzienlijk, aangezien de dijk niet bij kleine holle ruimtes zal instorten.

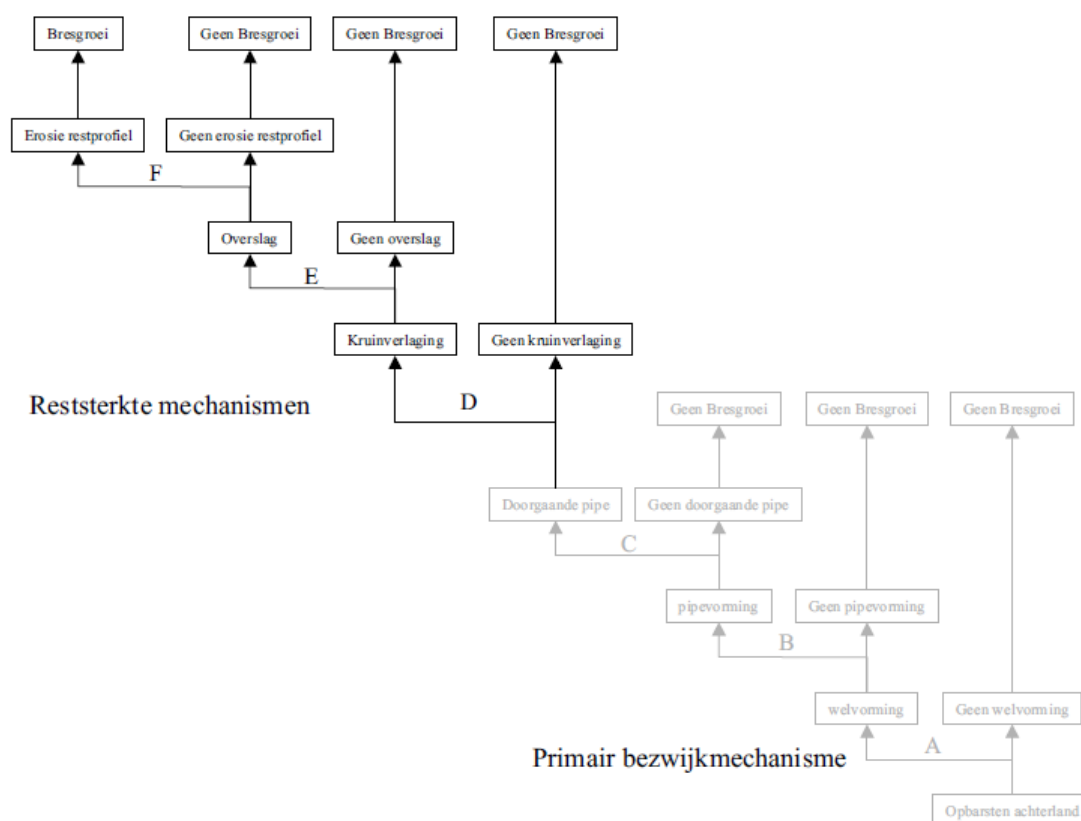
De pipingmechanismen stoppen hier, aangezien het contact onder de dijk met de buitenwaterstand weg is.

Erosie restprofiel (mechanisme E, F)

Is de waterstand na mechanisme D hoger dan de kruinhoogte, treedt bresgroei op zoals verder omschreven bij het faalmechanisme 'overloop'. Indien overloop optreedt, wordt verwacht dat de dijk snel zal falen. Het piping-proces en het instorten van de holle ruimtes heeft immers meestal de opbouw van de dijk aangetast.

3.2.3 Faaltraject

De opeenvolging van de verschillende mechanismen worden in de gebeurtenissenboom (Figuur 9) weergegeven. Er wordt verwezen naar de mechanismen A tot en met F, zoals benoemd in § 3.2.2. Het mechanisme 'ruimen' wordt niet expliciet vermeld, maar hoort bij 'mechanisme D' te staan. Mechanismen E en F hebben betrekking op 'overloop'-mechanismen.



Figuur 9 - Gebeurtenissenboom met opeenvolging van de verschillende piping-mechanismen. De letters A tot en met D verwijzen naar pipingmechanismen zoals benoemd in § 3.2.2, de letters E en F hebben betrekking op 'overloop'/'overslag'-mechanismen (Calle, 2002)

3.2.4 Bresinitiatie en bresgroeistadia per dijktipe

Piping komt enkel voor wanneer een (sterk) doorlatende grondlaag aanwezig is onder de dijk, meestal bestaande uit grof zand of grind. Piping komt niet voor als het dijklichaam even doorlatend is als de ondergrond, want dan is de preferentiële kwelweg door het dijklichaam (=microstabiliteit, zie § 3.6) en niet onder de dijk. Piping vormt dan ook enkel een risico voor de dijktipes 2 en 4. Voor deze types is het faaltraject of de opeenvolging van de verschillende stadia praktisch identiek.

In geval de doorlatende laag, die in verbinding staat met het reservoir aan de ene kant van de dijk, afgedekt wordt door een ondoorlatende laag aan de andere kant van de dijk, kan piping geïnitieerd worden nadat deze ondoorlatende laag is opgebarsten. Door het opbarsten wordt wel een doorlatende verbinding gevormd tussen de buiten- en de binnenkant van de dijk.

3.3 Overloop

3.3.1 Algemene omschrijving

Er is sprake van overloop als er regelmatig water stroomt over de dijk ten gevolge van een hogere buitenwaterstand dan de kruinhoogte. Bij golfoverslag stroomt water onregelmatig over de dijk door golven. Een aantal bresinitiatie-mechanismen die optreden bij overloop en overslag zijn zeer gelijkend. Zo is het voor infiltratie van water via de kruin of het landtalud (ondiepe afschuiving) niet belangrijk hoe regelmatig het water over de kruin loopt. Voor oppervlakte-erosie moet wel onderscheid worden gemaakt tussen overslag en overloop, aangezien er immers wel een verschil in debiet is tussen een grote hoeveelheid die eens in de 2 minuten over de dijk stroomt (golfoverslag) en een continu gering debiet dat over de kruin en het landtalud stroomt (overloop). Het overslagdebiet heeft immers een directe invloed op de erosiesnelheid.

Aangezien bij het groeien van de bres de erosie door overloop over het algemeen veel belangrijker wordt verondersteld dan de erosie door overslag, worden mechanismen specifiek voor overslag (bvb falen buitenbekleding) niet beschouwd in deze studie.

Bij het faalmechanisme 'overloop' spelen erosie- en stabiliteitsprocessen een belangrijke rol, met name oppervlakte- en kliferosie. Voor een gedetailleerde beschrijving van deze processen wordt verwezen naar § 4 en deelopdracht 1 (Van Hoestenbergh et al., 2010).

Oppervlakte-erosie is afhankelijk van een aantal parameters. Dit is met name het geval wanneer het gaat om cohesief materiaal. De volgende parameters worden onderscheiden:

- het zand, klei en leemgehalte
- taludhelling
- de aanwezigheid van andere elementen in de grond of poriënwater zoals Fe, Al,...
- het type mineraal
- het gehalte organische stof
- dichtheid van de grond
- gestructureerdheid van het grondmateriaal
- initiële watergehalte
- vegetatie
- hydraulische condities: overloopdebiet

Kliferosie is een speciale vorm van erosie door overloop (of overslag). Door de overslag vormt zich een trapvormig dijkprofiel die langzaam terugschrijdt door de dijk. De klif wordt gevormd aan het meest opwaartse punt van het landtalud.

Meest relevante parameters inzake stabiliteitsprocessen (niet voor grondwaterstroming) zijn:

- cohesie afdeklaag
- helling talud
- hoek van inwendige wrijving afdeklaag
- volumegewicht afdeklaag

3.3.2 Fasen

De opeenvolging van de verschillende stadia fasering voor overloop is een stuk complexer dan de fasering voor het piping-proces, aangezien er verschillende faaltrajecten kunnen voorkomen.

Twee primaire mechanismen worden onderscheiden bij overloop: oppervlakte-erosie en infiltratie met het ontstaan van scheuren. Infiltratie kan vervolgens leiden tot 3 mogelijke vervolgmecanismen: interne erosie, ondiepe afschuiving en diepe afschuiving.

Erosie landtalud (Primair mechanisme)

Bij oppervlakte-erosie van een met gras bekleed dijklichaam door overloop verwijdert het langsstromende water materiaal uit de zode en afdeklaag van de dijk. Het stromende water oefent een schuifkracht uit op het dijkoppervlak. Algemeen wordt verwacht dat oppervlakte-erosie niet snel zal optreden bij een grasdijk met steil talud. Falen door andere faalmechanismen zal in het algemeen sneller optreden (Calle, 2002).

Men kan bij oppervlakte-erosie onderscheid maken in 3 deelfases nl. erosie van de verschillende lagen van een dijk: graszode, afdeklaag en erosie van het kernlichaam. Bij de tweede en derde fase kunnen ook kliferosie-processen voorkomen.

Erosie graszode

In Vlaanderen is praktisch altijd een graszode aanwezig op het landtalud. De erosiesnelheid is vooral afhankelijk van de doorworteling en het lutumgehalte van de ondergrond.

Erosie door een graszode start ter hoogte van een zwak punt of discontinuïteit in het talud dat lokale turbulentie creëert. Eenmaal erosie op dit punt is gestart, zal erosie er verder gaan en andere zones in eerste instantie beschermd blijven. De erosiebestendigheid van het talud met graszode wordt dan ook bepaald door het zwakste punt van het talud.

Recente proeven met de golfoverslagsimulator hebben aangetoond dat een goed doorwortelde grasmatten op een kleibekleding golfoverslag tot 30 l/s.m zonder schade kan doorstaan. Kwaliteit of beheer van het gras hebben weinig invloed op de erosiegevoeligheid van de graszode (Mohammed et al., 2002).

Onderzoek naar de performantie van grasbekleding in kader van FLOODSITE heeft aangetoond dat degelijke grasbescherming niet enkel de bresgroei-initiatie vertraagt, maar ook de timing en processen van bresgroei significant kan beïnvloeden. Daarbij is gebleken dat het gebruik van de vaak gebruikte CIRIA-grasperformantie-grafieken een grote onzekerheid met zich meebrengt voor bresgroei (Morris et al., 2009a).

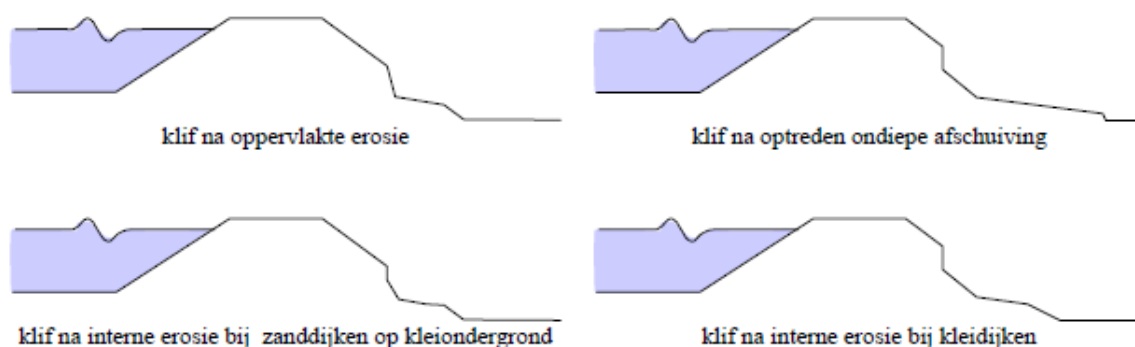
Erosie afdeklaag

Waar de grasbekleding verdwijnt is er sprake van de afdeklaag die bestaat uit een kaal talud, meestal een kleiige afdeklaag. De erosie van deze laag zonder vegetatie kan beschreven worden met schuifspanningsvergelijkingen (zie § 4). De ruwheid van het talud is kleiner, waardoor de stroomsnelheid en erosieve kracht van het water groter wordt. Een gat in de bekleding ontstaat op zwakke plekken. Het gat breidt zich in benedenstroomse richting uit en wordt steeds breder. Door turbulentie rondom het gat in de bekleding zal erosie rondom het gat optreden. Golfoverslagproeven hebben aangetoond dat een gat in de kleilaag die de onderliggende zandkern bereikt, snel erodeert bij overslagdebieten van 50 l/s.m (Mohammed et al., 2002).

Bij dikkere afdeklaagen in vette grond e.d. kunnen reeds kliferosie-processen voorkomen. Het water dat over deze klif naar beneden duikt, zorgt voor meerdere erosie- en instabiliteitsprocessen, waardoor de afdeklaag en onderliggend kernlichaam zal wegspoelen.

Terugschrijdende erosie van het kernlichaam

Terugschrijdende erosie gebeurt door een combinatie van oppervlakte-erosie, klif-erosie en instabiliteitsprocessen. Bij niet-cohesieve dijken treedt terugschrijdende erosie op door oppervlakte-erosieprocessen. Bij cohesieve dijken daarentegen zal, nadat de bekleding door een initiële mechanisme is verdwenen, een steil (bij kleidijken ongeveer verticaal) talud of klif zijn ontstaan. Locatie en grootte van de klif zijn afhankelijk van eerdere erosiefasen en van het dijkmateriaal (Figuur 10). De kliferosie-processen zorgen ervoor dat het restprofiel tegen de stromingsrichting in wegerodeert.



Figuur 10 - Locatie en grootte van klif zijn afhankelijk van primaire faalmechanismen en van het dijkmateriaal (Knoeff en Verheij, 2003)

In tegenstelling tot het eroderen van graszode en afdeklaag, maakt terugschrijdende erosie deel uit van de bresgroei-fase. De oppervlakte-erosie, klif-erosie en instabiliteitsprocessen worden uitvoerig beschreven in § 4.

Infiltratie en het ontstaan van scheuren (primaair mechanisme)

Wanneer water in de dijk infiltreert, nemen de korrelspanningen in de kruin af. Indien een ondoorlatende afdeklaag aanwezig is, kunnen na verloop van tijd de bovenlagen van een dijk verzadigen en kunnen scheuren ontstaan, meestal parallel met de kruin van de dijk (Calle, 2002).

Onderzoek naar het effect van scheuren in de bekleding op bresinitiatieprocessen (Morris et al., 2009a) heeft aangetoond dat scheuren de erodeerbaarheid van dijklichamen sterk kan verhogen. Enerszijds verhoogt de saturatie van het dijklichaam de erodeerbaarheid, anderszijds worden preferentiële routes in het dijklichaam gecreëerd waardoor interne erosie kan voorkomen.

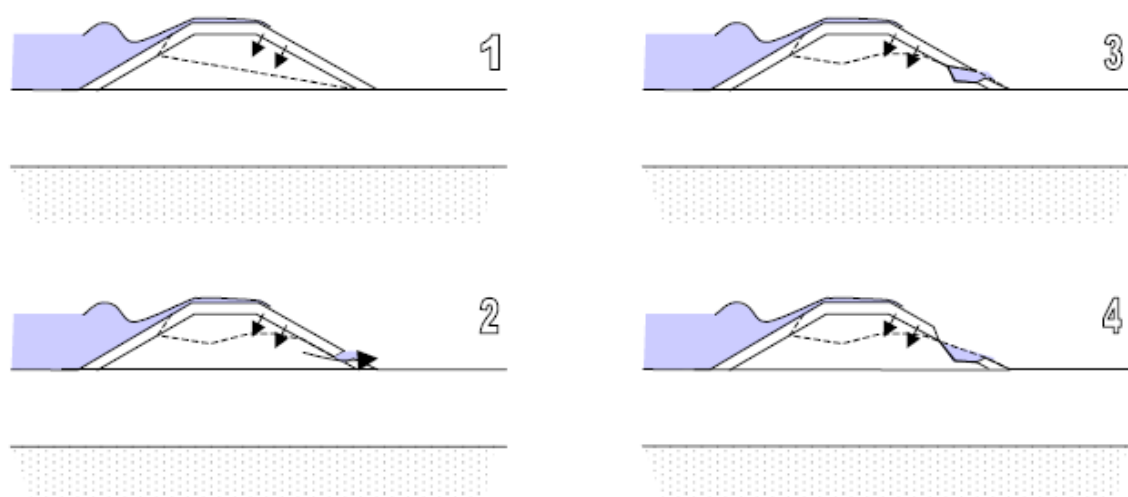
Scheuren gaan typisch tot 50-60 cm diepte in het dijklichaam. Deze zone tot 60 cm moet aanzien worden als een sterk erosiegevoelige zone.

Door de scheuren loopt het water gemakkelijker de dijk in, met als mogelijke vervolgmechanismen microstabiliteit/interne erosie of afschuiving.

Microstabiliteit/interne erosie (vervolgmechanisme na infiltratie)

Als de bekleding faalt en water in het dijklichaam terechtkomt en door het dijklichaam migreert, kan dit schade aan de taluds van de dijk veroorzaken. De schade kan zowel aan de kant van land- als riviortalud zijn. Men spreekt van microstabiliteit of interne erosie.

Het al dan niet optreden van dit vervolgmechanisme is sterk afhankelijk van de kwaliteit en dikte van de afdeklaag, maar ook van vegetatie op de kering of dierlijke activiteiten. Indien de bekleding onvoldoende sterk is of gaten bevat (dieren), zorgt de stijgende waterdruk door het instromende water (door de scheur in het landtalud) voor het opdrukken en openscheuren van de afdeklaag. Er ontstaat een wel nabij de teen van de dijk. Naarmate de wel door erosie groter wordt, komt er meer grond mee. Doordat steeds meer en steeds grotere interne kanalen worden gevormd, kan de afdeklaag afschuiven of instorten (Figuur 11).



Figuur 11 - Interne erosie bij zanddijken met dunne afdeklaag (Knoeff en Verheij, 2003)

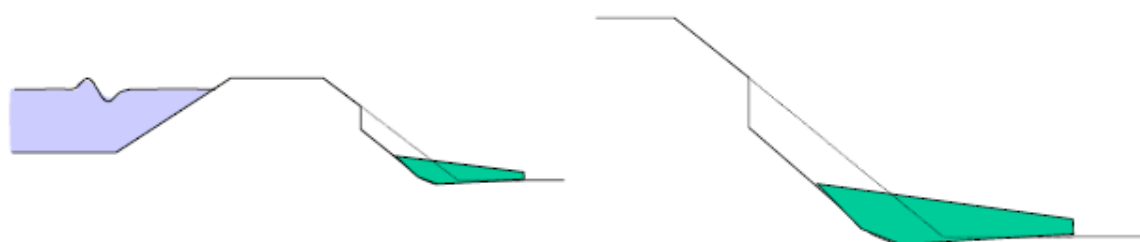
Bovenstaande beschrijving is voor een zanddijk met (dunne) afdeklaag. Voor een kleidijk, waarbij onder de gestructureerde afdeklaag een minder gestructureerde laag aanwezig is, is het proces van interne erosie zeer gelijkaardig. De wel ontstaat echter zonder opdrukken van de afdeklaag. Meegevoerde grond zorgt voor het vergroten van de wel en instorten van kanalen in de minder gestructureerde laag onder de bekleding.

Het resultaat van het vervolgmechanisme is dat de bekleding na verloop van tijd lokaal van de dijk is verdwenen.

Ondiepe afschuiving (vervolgmechanisme na infiltratie)

Indien de bekleding voldoende sterk of dik is om de waterdruk aanvankelijk te kunnen weerstaan, bouwen zich waterspanningen onder de bekleding op. Na verloop van tijd wordt de bekleding over een bepaalde lengte opgelicht en schuift af. De afschuiving is meestal schelpvorming en bevindt zich geheel in het landtalud van het dijklichaam (Figuur 12).

De bekleding is bij ondiepe afschuivingen vaak over veel grotere breedte verdwenen dan bij interne erosie, wat belangrijk is voor de verdere fasen van bresinitiatie en bresgroei.



Figuur 12 - Restprofiel na ondiepe afschuiving (Knoeff en Verheij, 2003)

Na een ondiepe afschuiving kan het landtalud verder verzadigen en kan er zich een dieper glijvlak ontwikkelen.

Diepe afschuiving (vervolgmechanisme na infiltratie)

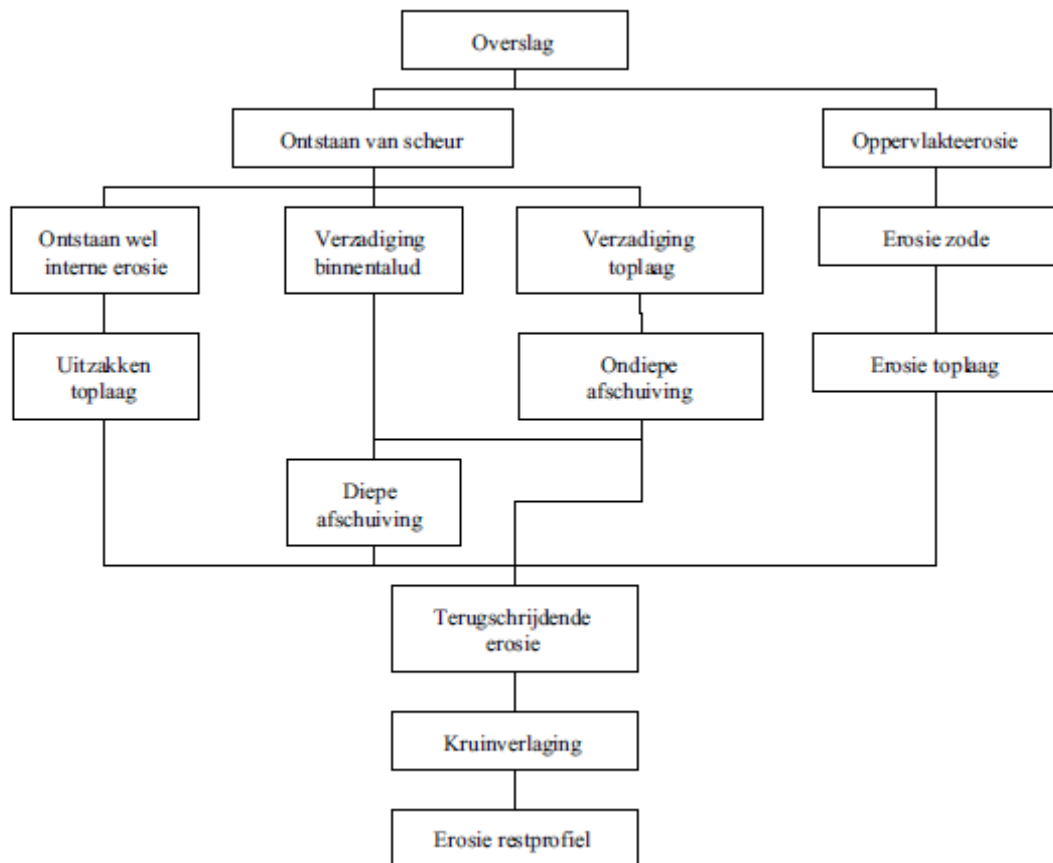
Als de afdeklaag voldoende sterk of dik is om de waterdruk te kunnen weerstaan, kunnen diepere glijcirkels worden gevormd.

Erosie restprofiel (vervolgmechanismen)

Het eroderen van het restprofiel zorgt voor het groeien van de bres. Terugschrijdende erosie door oppervlakte en klif-erosieprocessen zal het resterend profiel verder aantasten tot volledige dijkdoorbraak, zoals reeds beschreven bij § 'oppervlakterosie'. De verschillende processen die horen bij de erosie van het restprofiel worden beschreven in § 4.

3.3.3 Faaltraject

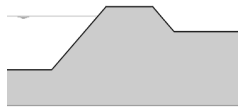
In Figuur 13 wordt het ganze faaltraject weergegeven in de vorm van een stroomdiagram. Dit stroomdiagram is opgemaakt voor overslag, maar geldt evengoed voor overloop.

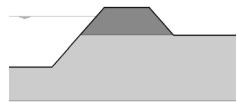


Figuur 13 - Stroomdiagram voor het mechanisme 'overslag', eveneens geldig voor het mechanisme 'overloop' (Calle, 2002)

3.3.4 Bresinitiatie en bresgroeistadia per dijktype

Tabel 4 - Fasen bresinitiatie en bresgroeistadia per dijktype

Dijktype		Fasen bresinitiatie	Fasen bresgroei (vanaf kruinverlaging)
	1	1a. Oppervlakte-erosie => erosie graszode, afdeklaag 1b. Als gebrekkige bekleding: infiltratie, leidend tot interne erosie 2. Terugschrijdende erosie leidend tot kruinverlaging. Terugschrijdende erosie voornamelijk via oppervlakte-erosie, maar ook beperkt via kliferosieprocessen	Terugschrijdende oppervlakte-erosie zorgt voor verdere kruinverlaging. In beperkte mate kliferosie mogelijk, afhankelijk van grondgesteldheid. Laterale bresgroei via oppervlakte-erosie en hellingsinstabiliteit.
	2	1a. Oppervlakte-erosie is beperkt 1b. Microstabiliteit/Interne erosie na infiltratie (als slechte bekleding) 1c. Afschuiving komt weinig voor, omdat waterspanning niet kan cumuleren door zandig kernmateriaal en ondergrond 2. Eenmaal afdeklaag weg: snelle terugschrijdende erosie via oppervlakte- en kliferosie	Terugschrijdende erosie en kruinverlaging via klif- en oppervlakte-erosieprocessen. Eenmaal afdeklaag verdwenen, zal oppervlakte-erosie domineren Laterale bresgroei via oppervlakte-erosie en hellingsinstabiliteit. Laterale groei even snel als bij dijktype 1, aangezien afdeklaag weinig rol speelt (§ 4.7.2)
	3	1a. Oppervlakte-erosies: beperkt 1b. Microstabiliteit/Interne erosie na infiltratie (als slechte bekleding) 1c. Afschuiving na infiltratie komt voor als afdeklaag ter hoogte van landtalud in goede staat is en voldoende dik. 1d. Risico op diepe afschuiving van groot deel van (verzadigde) zandige kern 2. Eenmaal afdeklaag weg: snelle terugschrijdende erosie via oppervlakte- en kliferosie tot op niveau ondergrond	Terugschrijdende erosie en kruinverlaging via klif- en oppervlakte-erosieprocessen. Eenmaal afdeklaag verdwenen, zal oppervlakte-erosie domineren tot cohesieve ondergrond is bereikt. Vanaf cohesieve ondergrond is bereikt, zal kliferosie domineren. Laterale bresgroei via oppervlakte-erosie en hellingsinstabiliteit. Laterale groei even snel als bij dijktype 1, aangezien afdeklaag weinig rol speelt (§ 4.7.2)

Dijktype		Fasen bresinitiatie	Fasen bresgroei (vanaf kruinverlaging)
	4	1a. Oppervlakte-erosies: zeer beperkt 1b. Interne erosie na infiltratie (als slecht gestructureerde kleilaag ondiep onder goed gestructureerde laag zit) 1c. Afschuiving na infiltratie komt voor als er een opeenvolging van goede klei- en slechte kleilagen in dijklichaam aanwezig is. 1d. Alleen bovenste laag is verzadigd, waardoor zelden een diepe afschuiving voorkomt. 2. Terugschrijdende erosie: langzaam, voornamelijk via kliferosie processen. Eenmaal niveau ondergrond is bereikt, versnelt de bresgroei aanzienlijk. Combinatie met pipingprocessen kan bresgroei aanzienlijk versnellen!	Terugschrijdende erosie en kruinverlaging voornamelijk via kliferosieprocessen. Vanaf niet-cohesieve ondergrond is bereikt, zal oppervlakte-erosie domineren. Laterale bresgroei via oppervlakte-erosie en hellingsinstabiliteit.
	5	1a., 1b, 1c, 1d: idem aan dijktype 4 2. Terugschrijdende erosie: langzaam, voornamelijk via kliferosie processen.	Terugschrijdende erosie en kruinverlaging voornamelijk via kliferosieprocessen. Laterale bresgroei via oppervlakte-erosie en hellingsinstabiliteit.

Het al dan niet voorkomen van een voorland maakt weinig verschil uit voor de overloop-mechanismen, behalve voor de diepte tot waar de bres zal groeien. In geval van een voorland zal de verticale bresgroei beperkt zijn tot op het niveau van de ondergrond (Visser, 1998).

Overloopprocessen komen voor als de buitenwaterstand hoger is dan de kruinhoogte. Water kan over de dijk lopen omdat de waterstand van de rivier hoger is dan de aanleghoogte van de dijk (§ 3.4). Anderszijds kan de kruinhoogte van de dijk via tal van initiële faalmechanismen en vervolgmecanismen onder het rivierpeil komen te liggen. De belangrijkste initiële faalmechanismen die kunnen leiden tot kruinverlaging en overloop worden weergegeven in § 3.5 tot § 3.8.

3.4 Kruinhoogte

De aanleghoogte van een dijk is de hoogte van de kruin onmiddellijk na de aanleg of de verbetering van de kering.

Voor de bepaling van de aanleghoogte van grondconstructies zijn niet alleen de mechanismen 'overloop' en 'golfoverslag' van belang, maar ook de zetting en de te verwachten vervormingen door kruip van de grond.

Zetting kan als een faalmechanisme van de waterkering worden beschouwd, als wordt bedacht dat bij een te grote zetting van de kruin in de loop van de tijd overlopen kan ontstaan of een grotere hoeveelheid overslag kan optreden dan waarop de sterkte van het landtalud is gedimensioneerd.

Ook in geval van zeespiegelstijgingen of andere invloeden die kunnen leiden tot rivierpeilstijgingen kan een te geringe kruinhoogte aanleiding zijn tot falen van de dijk.

Relevante parameters zijn:

- geometrie
- maatgevende waterstanden
- mogelijk nog te verwachten zettingen

3.5 Macro-instabiliteit

Met macro-(in)stabiliteit wordt het afschuiven van grote delen van een grondlichaam bedoeld. Dit evenwichtsverlies gebeurt door afschuiven langs rechte of gebogen glijvlakken, dan wel door het ontstaan van plastische zones, waarin door overbelasting geen krachterevenwicht meer aanwezig is. Voor de macrostabiliteit zijn verschillende belastingsgevallen te onderscheiden. Zo dient zowel de stabiliteit van het landtalud als van het riviortalud te worden beschouwd.

Bij het beschouwen van macrostabiliteit van het landtalud in de situatie van maatgevend hoogwater moet eveneens worden gecontroleerd of afdekkende veenlagen (of andere weinig doorlatende lagen) door hoge stijghoogtes in een onderliggende watervoerende zandlaag al dan niet worden opgedrukt. Hierbij dient onderscheid te worden gemaakt tussen:

- opdrijven: Bij opdrukken kan zich het geval voordoen dat het gehele afdekkende pakket gaat opdrijven
- opbarsten: Bij opdrukken kan zich ook het geval voordoen dat de laag ten gevolge van de overdruk lokaal bezwijkt (opbarsten)

De macrostabiliteit van het riviortalud komt alleen in het geding wanneer zich er een lage waterstand is. Het gewicht van het riviortalud kan er dan voor zorgen dat er instabiliteit ontstaat. Wanneer het talud verzadigd is door een eerdere hoogwaterstand of door neerslag zal het gewicht groter zijn en daardoor ook het risico op afschuiving van het grondpakket.

Relevante parameters zijn:

- geometrie
- samenstelling dijk en laagopbouw gronden in situ
- schuifweerstandskarakteristieken (gedraineerd en/of ongedraineerd) van dijkmateriaal en gronden onder de dijk
- volumegewicht van de diverse lagen en materialen
- maatgevend freatisch oppervlak en waterspanningsverloop in het dijklichaam en de onderliggende gronden

Voor de stabiliteitsbeoordeling staan twee verschillende wegen open:

- analytische glijvlakberekeningen
- eindige elementen-berekeningen

3.6 Microstabiliteit

Microstabiliteit betreft de stabiliteit van grondlagen van zeer beperkte dikte aan het oppervlak van het landtalud onder invloed van door het dijklichaam stromend grondwater. Bij microstabiliteit komt de bedreiging voor de stabiliteit van binnenuit: eventuele problemen worden veroorzaakt door een hoge freatische lijn in het grondlichaam. Het water stroomt ter hoogte van het riviertalud in het dijklichaam. Het water stroomt door de dijk en vervolgens door het landtalud terug buiten de dijk. Het mechanisme is van toepassing op dijken van doorlatend materiaal die al dan niet bekleed zijn. Piping daarentegen komt enkel voor bij dijken die een meer doorlatende laag onder een minder doorlatend dijklichaam hebben.

De mechanismen van micro-instabiliteit, welke kunnen optreden als gevolg van grondwaterstroming door grondconstructies zijn:

- Het afdrukken van de landtaludbekleding door waterdrukken in de kern van het grondlichaam; dit kan optreden als een minder doorlatende afdeklaag op een doorlatende kern ligt.
- Het afschuiven van de landtaludbekleding (of een combinatie van afschuiven en afdrukken van de landtaludbekleding) door waterdruk.
- Uitspoeling aan de teen van het landtalud. Dit betekent dat het water dat uit de dijk stroomt deeltjes meeneemt en weer afzet. De uitspoeling zal zich in theorie beperken tot het gebied waar niet aan het stabiliteitscriterium wordt voldaan.

In het kader van de microstabiliteit vormen de schuifweerstandskarakteristieken van de afdeklaag een relevante parameter. Bij taluds met een natuurlijke afwerking worden deze karakteristieken beïnvloed door de aanwezige vegetatie.

Een dijk faalt ten gevolge van uitspoeling wanneer de aantastingshoogte, d.w.z. de hoogte van de uitspoeling plus de hoogte van het materiaal dat van bovenaf bijzakt, de binnenkruinlijn raakt.

3.7 Zettingsvloeiing

Bij grondconstructies, met een al dan niet aanwezig voorland van beperkte breedte gelegen langs het onderwatertalud, dient rekening te worden gehouden met het optreden van instabiliteit van dit onderwatertalud. Deze instabiliteit zou van invloed kunnen zijn op de stabiliteit van de gehele grondconstructie en dus ook op het waterkerend vermogen.

Bij het mogelijk optreden van instabiliteit kan onderscheid worden gemaakt tussen instabiliteit door afschuiving en door zettingsvloeiing.

Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij een met water verzadigde massa zand zeer grote verplaatsingen ondergaat dan wel “vloeit” als gevolg van verweking. Verweking van zand in een talud wordt veroorzaakt door een ongunstige combinatie van losse pakking en taludgeometrie. Er is ook een aanleiding nodig: de verweking treedt op na een schuifspanningstoename waarbij door een herschikking van het korrelskelet (waardoor volumeverkleining) een zodanige verhoging van de waterspanning in de poriën ontstaat, dat de contactdruk tussen de korrels onderling belangrijk wordt verminderd en de zandmassa zich als een zware vloeistof gaat gedragen met gevolg dat een zettingsvloeiing optreedt. Aanleidingen kunnen zijn:

- versteiling onderwatertalud of verdieping van geul door erosie
- het aanbrengen van een ophoging of bovenbelasting
- trillingen
- golfbelasting
- snelle val van de waterstand in de rivier

3.8 Instabiliteit bij golf- en stromingsaanval

Een dijklichaam opgebouwd uit materialen die niet golf- of erosiebestendig zijn en waar geen dynamisch evenwicht mogelijk is, wordt beschermd tegen erosie. Dit gebeurt meestal door het aanbrengen van een bekleding direct op het dijklichaam. Elk type bekleding reageert op zijn eigen karakteristieke wijze op de hydraulische belastingen (waterstand, golf en stroming).

De weerstand van losgestorte materialen wordt bepaald door hun eigen gewicht, de vorm van de afzonderlijke stenen en de verdeling in grootte. Ook de taludhelling is van belang.

De weerstand van een asfaltbekleding wordt geleverd door de erosievastheid, eigen gewicht, buigstijfheid en mogelijke zuigende werking van een weinig permeabele onderlaag.

Een grasmat ontleent zijn erosievastheid voornamelijk aan de kwaliteit van het wortelstelsel.

Gezette bekledingen moeten het hebben van hun eigen gewicht en de onderlinge klemming of wrijvingskracht.

We onderscheiden drie soorten faalmechanismen van steenzettingen:

- Afdeklaaginstabiliteit
- Afschuiving
- Materiaaltransport

3.9 Effect van de verschillende mechanismen per dijktipe

Hieronder volgt een overzicht met de relevante risico's die de faalmechanismen vormen voor de eerder bepaalde dijktypen. Behalve voor overloop en piping zijn hier alleen de primaire faalmechanismen meegenomen en niet de mechanismen die een vervolg zijn van eerdere mechanismen.

Tabel 5 - Relevante risico's per dijktipe

	Macro-instabiliteit	Micro-instabiliteit	Overloop*	Piping	Zettings-vloeiing	Golf- en stromings-aanval**
	Verweking binnen- of riviertalud	Uitspoelen	Oppervlakte-erosie	Nee	Ja	Oppervlakte-erosie
	Verweking binnen- of riviertalud	Afdrukken/ Uitspoelen	- Klif- en oppervlakte-erosie - Interne erosie	Ja***	Nee	Oppervlakte-erosie
	Verweking binnen- of riviertalud	Afdrukken/ Uitspoelen	- Klif- en oppervlakte-erosie - Interne Erosie - Ondiepe afschuiving	Nee	Nee	Oppervlakte-erosie
	Verweking binnen- of riviertalud	Nee	- Kliferosie - Interne Erosie - Ondiepe afschuiving	Ja	Ja	Oppervlakte-erosie
	Verweking binnen- of riviertalud	Nee	- Kliferosie - Interne Erosie - Ondiepe afschuiving	Nee	Nee	Oppervlakte-erosie

* De laterale groei van de bres gebeurt vooral door oppervlakte-erosieprocessen in combinatie met hellingsinstabiliteit.

** Faalmechanismen bij golf- en stromingsaanval wanneer bekleding (stortsteen, asfalt, platen, ...) niet beschouwd worden, anders is faalmechanisme afhankelijk van type bekleding

***Piping komt voor bij een meer doorlatende laag onder een minder doorlatend dijklichaam

Voor de varianten van de dijktipes met voorland zijn de effecten van de verschillende mechanismen identiek.

4 Bresgroeiprocessen

4.1 Algemeen

In § 3 werd voor de mechanismen 'piping' en 'overloop' het faaltraject weergegeven, d.i. de opeenvolging van de verschillende mechanismen in de tijd. De verschillende processen die voorkomen tijdens de optredende stadia voor 'piping' en 'overloop', worden in dit hoofdstuk fysisch meer in detail omschreven, met nadruk op evenwichts- en momentenvergelijkingen.

De meest belangrijke processen tijdens overloop zijn klif- en oppervlakte-erosieprocessen. Daarnaast komen hellingsinstabiliteiten voor, piping-mechanismen, Bij de analyse van de IMPACT-testen voor het FLOODSITE-project (Morris en Hassan, 2009), werd vastgesteld dat deze processen vaak gelijktijdig voorkomen. Op een bepaald moment gaat één van de erosieprocessen domineren door het eroderen door de kruin.

Voor verschillende processen bestaan er meerdere manieren om deze fysisch te beschrijven. Vaak zijn de verschillende beschrijvingen even goed. In dit hoofdstuk wordt per proces een beschrijving gegeven aan de hand van de meest complete beschrijving die in de literatuur kon gevonden worden. Dit is niet noodzakelijkerwijs de beste beschrijving, andere beschrijvingen kunnen even goed zijn. Doordat de procesbeschrijvingen uit verschillende bronnen werden gehaald, kan de symboliek voor eenzelfde parameter verschillen. De verklaring voor de gebruikte symbolen staan vermeld in de bijlage (§ 7). Indien symbolen afwijken van de terminologie van de bijlage, worden ze in de tekst verklaard.

In § 5 worden de bresgroeimodellen geëvalueerd op basis van de volledigheid waarmee ze de processen beschrijven die in dit hoofdstuk worden gegeven. In een volgende deelopdracht wordt aan de hand van deze beschrijving van de processen, vergelijkende tests uit literatuur en toetsing van de modellen (op onder meer gebruiksmogelijkheden en toepassingsbereik) per model een sterkte/zwakte-matrix opgesteld.

In § 4.2 worden de stromingsvergelijkingen gegeven die kunnen voorkomen tijdens zowel 'overloop' als 'piping' mechanismen. In § 4.3 tot § 4.8 worden de processen die kunnen voorkomen tijdens 'overloop'-mechanismen gegeven. In § 4.9 worden de processen die kunnen voorkomen tijdens 'piping'-mechanismen gegeven. In § 4.10 wordt kort samengevat welke processen belangrijk zijn voor de Vlaamse dijktypes besproken in § 2.

4.2 Stromingsvergelijkingen

4.2.1 Stroming door bres

De meest aangewezen stromingsvergelijking voor vereenvoudigde modellen is deze van een volkomen overlaat. Voor het debiet door de bres kan de volgende formule van brede overlaat gebruikt worden (Zhu, 2006):

$$Q_{br} = C_d \sqrt{g} B \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} (H_w - Z_{br})^{3/2} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Waarbij²

C_d = debietscoëfficiënt, die de energieverliezen in rekening brengt (-)

H_w = waterhoogte rivier/reservoir (m)

Z_{br} = peil bresbodem (m)

IMPACT-veldtesten hebben uitgewezen dat er een snelle toename van stroom is vanaf het moment dat de bresgroei start, m.a.w. van zodra de kruin dermate verlaagd is dat het beneden het waterpeil van de rivier zakt. Voor een korte (doch essentiële) fase treedt 'convergerende' stroming op, waarbij de aankomende stroming convergeert naar één punt en praktisch verticaal door de bresopening naar afwaarts valt (Morris en Hassan, 2009). Alleen met 2D-modellen is het mogelijk dit type stroming in rekening te brengen. Ook andere stromingsprocessen, zoals vortex-gedrag kunnen enkel met 2D-modellering in rekening worden gebracht.

Indien 1D-modellering wordt gebruikt, zijn aanpassingen van de algemene stromingsvergelijkingen aangewezen om stromingsconvergentie en veranderende bresdimensies in rekening te brengen.

De analyse van de IMPACT-testen heeft tevens aangetoond dat trapezoïdale bresvorm praktisch niet voorkomt, maar dat bressen bijna altijd praktisch verticale wanden hebben.

Opstuwingsverschijnselen treden op zodra het polderpeil boven de bresbodem boven een bepaalde waarde stijgt, afhankelijk van de vorm van de overlaat. Eenmaal gestuwde afvoer optreedt, kan het debiet door de bres bepaald worden aan de hand van de volgende vergelijking (Zhu, 2006):

$$Q_{br} = C_d \sqrt{2g} B (H_w - H_p)^{1/2} (H_p - Z_{br}) \quad (\text{Vergelijking 2})$$

Waarbij

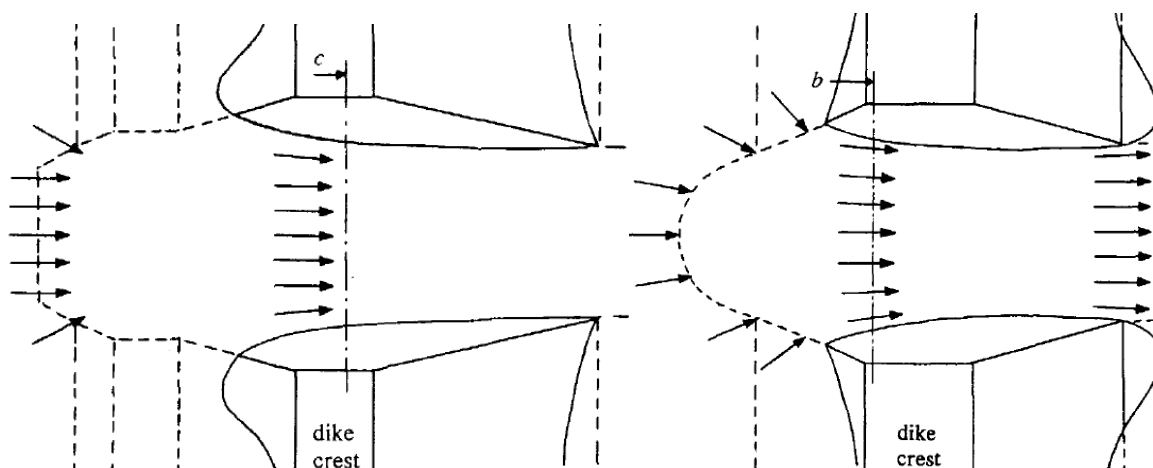
H_p = waterpeil in de polder voorstelt (m).

4.2.2 Debietscoëfficiënt voor overlaat

Onzekerheden over de grootte van de debietscoëfficiënt (C_d in vergelijkingen 1 en 2) zijn de oorzaak van mogelijke fouten in de debietsbepaling door de bres. De debietscoëfficiënt kan immers sterk variëren naargelang een scherpe (1 tot 1.5) of meer afgeronde overlaat (2 tot 2.5). Door het lineair verband tussen debietscoëfficiënt en debiet kan het debiet bij eenzelfde waterstand tot 30% verschillen bij een verkeerde inschatting van de energieverliezen (Morris et al., 2009).

Visser (1998) en Zhu (2006) geven waarden tussen 0.93 en 1 voor de debietscoëfficiënt bij bressen waar de bresdiepte niet verder erodeert dan het maaiveld van de polder (type A dijk) of waarbij de bresdiepte ongehinderd kan doorgroeien (type C dijk). Bij type B dijken is de verticale bresgroei verhinderd door een hoog of verstevigd voorland, waardoor de vorm van de overlaat eerder ellipsvormig is. Voor type B dijken is de waarde van de debietscoëfficiënt volgens Visser en Zhu $\pi/2$.

² Enkel de symbolen die niet worden weergegeven in de bijlage (§ 7), of die afwijken van de terminologie in de bijlage worden vermeld in de tekst.



Figuur 14 - De vorm van de overlaat bij Type B (links) en type C dijken (rechts) (Visser, 1998)

In het kader van het FLOODSITE-project werden de stromingsberekeningen van het HR BREACH-model zodanig aangepast dat de debietscoëfficiënt werd gevarieerd naargelang de vorm van de bres wijzigt door erosie. De variatie gebeurt door het gebruik van performantie curves, die de link leggen tussen bresgeometrie, waterhoogte en bresdebiet. Anno 2010 werd dit nog niet geïmplementeerd in IWRS.

In andere studies is empirisch het verband afgeleid tussen bresdebieten berekend met gedetailleerde diepte-geïntegreerde numerische 2D-berekeningen en de bresdebieten berekend met de overlaatvergelijking (vergelijking 1). Via regressie-analyses slaagde men erin de gemiddelde fout van de berekende debieten (ten opzichte van de debieten berekend met het precieze 2D-model) te reduceren van 125% voor een constante debietscoëfficiënt naar 25% voor variabele debietscoëfficiënten (Kamrath et al., 2006).

4.2.3 Berekening waterdieptes en snelheden doorheen de bres

Eenmaal de stroming door de bres is berekend (§ 4.2.1), kan de locatie van de kritische sectie worden gevonden door het vergelijken van de bodemhelling van de secties met de 'kritische bodemhelling'. Door de meeste modellen wordt ervan uitgegaan dat de overgang van subkritisch naar superkritisch plaatsvindt ter hoogte van de kruin. Opwaarts deze kritische sectie komt dan subkritische stroming voor, afwaarts de sectie superkritische stroming. Waterdieptes en snelheden worden dan gevonden door het oplossen van de niet-uniforme stromingsvergelijking (Chow, 1959).

Meer gedetailleerde modellen gebruiken de St Venant - 'shallow water equations'. Deze vergelijkingen veronderstellen een hydrostatische drukverdeling en een kleine breshelling.

4.2.4 Erosie - sedimenttransport

Onder meer uit analyse van de IMPACT-testen is gebleken dat er geen uniform of stationair sedimenttransport voorkomt. De sedimenttransport-processen kunnen bijgevolg niet beschreven worden met evenwichtsvergelijkingen van sedimenttransport. Dit werd reeds in detail toegelicht in deelopdracht 1 van deze studie (Van Hoestenbergh et al., 2010). Bodemerosievergelijkingen, die rekening houden met de bodemtoestand van het dijklichaam, zijn te verkiezen boven sedimenttransportvergelijkingen bij het beschrijven van het bresgroeiproces. De erodibiliteit van het dijklichaam moet bijgevolg rechtstreeks of onrechtstreeks (via parameters die de bodemtoestand beschrijven zoals cohesie, compactie, ...) een parameter zijn in bresgroeimodellen (Morris en Hassan, 2009).

4.2.5 Overloop

Langs het talud bereikt de stroming pas zijn maximale snelheid na het afleggen van een bepaalde afstand, afhankelijk van het debiet. Na het bereiken van deze afstand gelden de onderstaande formules voor éénparige stroming ('uniform flow').

De hydraulische straal R (R_n in geval van éénparige stroming) wordt voor een trapezoïdale sectie gegeven door:

$$R = A / (b + 2d / \sin \gamma) \quad (\text{Vergelijking 3})$$

De sectiegemiddelde stroomsnelheid U_n wordt gegeven door:

$$U_n = C \sqrt{R_n \sin \beta} \quad (\text{Vergelijking 4})$$

Waarbij de Chézy-coëfficiënt 'C' kan berekend worden met de Manning-vergelijking:

$$C = \frac{1}{n} R_n^{1/6} \quad (\text{Vergelijking 5})$$

De hoogte van éénparige beweging kan voor het landtalud (brede ondiepe stroming) benaderend worden beschreven door de volgende functie (Visser, 1989):

$$d_n = Q_{br} / (U_n B_n) \quad (\text{Vergelijking 6})$$

Waarbij

A = Oppervlakte van de sectie (m²)

b = breedte bresbodem (m)

β = helling van de energielijn (°)

B_n = breedte bres aan wateroppervlak (m)

d = waterdiepte in bres (m)

γ = hellingshoek (°)

Q_{br} = debiet door de bres (m³/s)

4.2.6 Piping

De modellen HR BREACH, NWS BREACH en MIKE11 gaan uit van de functie voor buisstroming ('orifice'), RUPRO berekent het debiet door de pipe met de Bernoulli-vergelijking. Bij RUPRO worden de verliezen lineair in rekening gebracht met de Strickler-coëfficiënt. De modellen HR BREACH, NWS BREACH en MIKE11 brengen de contractieverliezen en wrijvingsverliezen apart in rekening.

HR BREACH en RUPRO gaan uit van een cirkelvormig kanaal, terwijl NWS BREACH uitgaat van een rechthoekig kanaal. Het stromingstype in de pipe wordt bepaald door debiet, opwaartse waterstand en vorm van de pijp (gelijkaardig aan stroming door gesloten leidingen en rioleringen). De korrelgrootte, stroomsnelheid en werkoppervlak in de pijp bepalen de mate van erosie.

Voor de modellen HR BREACH, NWS BREACH en MIKE11 wordt het debiet door een gevormde cirkelvormige pijp gegeven door:

$$Q_b = A \sqrt{2g(H - H_p) / h_l} \quad (\text{Vergelijking 7})$$

Waarbij

$$h_L = \left(x + \frac{fL}{D} \right) \quad (\text{Vergelijking 8})$$

Waarbij:

- Q_b = Debiet door de 'pipe' (m³/s)
 A = oppervlakte van de buis (m²)
 g = zwaartekrachtsconstante (9,81 m/s²)
 H = waterniveau (m)
 h_l = head loss aan ingang en door buis (m)
 H_p = niveau van de buis (m)
 f = wrijvingscoëfficiënt van Darcy (-)
 L = lengte van de buis (m)
 D = diameter van de buis (m)
 x = term voor contractieverliezen (-)

De constante 'x' geldt als term voor contractieverliezen aan de in- en uitlaat en van de buis. De waarde van de verliesterm varieert naargelang het bresgroeimodel van '0.05' (HR BREACH) tot '1' (NWS BREACH) en '1.5' (MIKE11). De waarde '1.5' is wellicht de meest realistische waarde.

De wrijvingscoëfficiënt 'f' in (vergelijking 8) wordt in de meeste modellen afgeleid uit de Moody curves, die wrijvingsfactoren weergeeft in functie van het Reynolds-getal en de equivalente korreldiameter.

Een overgang vindt plaats van buisstroming naar stroming over een overlaat, op het moment dat de waterhoogte kleiner wordt dan een (modelspecifieke) kritische waterhoogte of als de kruin boven de pipe instort (§ 4.9.4).

4.3 Oppervlakte-erosie

Oppervlakte-erosie is meestal het belangrijkste proces gedurende de volledige bresinitiatie en bresgroei bij niet-cohesieve dijklichamen. Ook bij cohesieve dijken komt oppervlakte-erosie voor, maar overheersen meestal de kliferosieprocessen (zie § 4.3).

Oppervlakte-erosie is het verschijnsel waarbij materiaal door het langsstromende water wordt meegevoerd. Niet-cohesief materiaal, typisch zand, is over het algemeen gevoeliger voor erosie dan cohesief materiaal, typisch klei. Een aantal parameters bepalen de mate van erosie, namelijk:

- korrelgrootteverdeling
- type kleimineralen
- gehalte organische stof
- dichtheid en structuur van de bodem
- vochtgehalte
- vegetatie

Deze parameters bepalen grondkarakteristieken zoals schuifweerstand, cohesie, vervormingsmoduli, plasticiteit en doorlatendheid (zie § 2.2.2).

Oppervlakte-erosie wordt meestal beschreven door vergelijkingen die de hydraulische belasting afwegen tegen de erosiegevoeligheid van de bodem. De meeste vergelijkingen zijn gebaseerd op de kritische schuifspanning, dit is de spanning uitgeoefend door de stroming waarbij de erosie start. Veel inspanningen zijn gebeurd om de kritische schuifspanning te bepalen van verschillende bodemtypes en bodemcondities, maar de gevonden waarden van verschillende auteurs voor gelijkaardige bodemtypes

kunnen meerdere grootteordes verschillen. Er bestaan verschillende vergelijkingen die de kritische schuifspanning correleren met bodemparameters zoals dichtheid, cohesie en watergehalte. De meest gekende schuifspanningsvergelijking is de 'excess-schuifspanningsvergelijking' (Zhu, 2006):

$$E = M(\tau_b - \tau_c) \quad (\text{vergelijking 9})$$

Met:

- E = erosiesnelheid (m/s)
 M = bodemafhankelijke coëfficiënt die de erodeerbaarheid van de bodem beschrijft ($\text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)
 τ_b = bodemschuifspanning (N/m^2)
 τ_c = kritische bodemschuifspanning voor bodemerosie (N/m^2)

Deze vergelijking is vooral geschikt als de bodemeigenschappen uniform zijn in de diepte. De erosiecoëfficiënt M en de kritische bodemschuifspanning τ_c zijn bodemparameters, terwijl de bodemschuifspanning τ_b de hydraulische belasting voorstelt. De bodemschuifspanning is daarbij afhankelijk van de helling van de bodem, de ruwheid van het oppervlak, de stroomsnelheid en het debiet. De erosiecoëfficiënt M van de grond wordt vaak empirisch bepaald.

De bodemschuifspanning τ_b kan worden weergegeven door (Zhu, 2006):

$$\tau_b = \frac{1}{C^2} \rho g U^2 \quad (\text{Vergelijking 10})$$

Met:

- C = Chézy coëfficiënt ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
 U = stroomsnelheid (m/s)

In kader van de analyse van de IMPACT-testen voor het FLOODSITE-project (Morris en Hassan, 2009), werd een onderscheid naar oppervlakte-erosieprocessen gemaakt in 'sediment erosion' en 'mass erosion'. Sediment erosie bestaat daarbij uit partikels die door de stroming worden geërodeerd, terwijl mass erosie het eroderen van kleine blokjes/blokken grond moet omschrijven. Er is echter geen enkele fysische omschrijving beschikbaar van 'mass erosion', waardoor er in deze studie verder geen onderscheid zal gemaakt worden tussen beide erosie-types.

Oppervlakte-erosie induceert verschillende processen:

- terugschrijdende erosie met bijhorende kruinversmalling en kruinverlaging. Dit zijn processen die voornamelijk bij niet-cohesieve dijklichamen voorkomen. Beide processen kunnen gelijktijdig voorkomen, maar de grootste kruinverlaging komt in de regel voor nádat terugschrijdende erosie heeft plaatsgevonden
- de vorming van een klif, wat typisch voorkomt bij cohesieve dijklichamen

4.3.1 Terugschrijdende erosie

Deze fase hoort eerder bij bresinitiatie dan bij het groeien van de bres, maar wordt voor de volledigheid kort beschreven. Voor een gedetailleerde beschrijving (bvb 'het versteilen van het landtalud door oppervlakte-erosie') wordt verwezen naar deelopdracht 1 van deze studie.

Bij overloop van zowel cohesieve als niet-cohesieve dijken zal er op de kruin en op het landtalud oppervlakte-erosie plaatsvinden. Het water dat over de dijk stroomt versnelt naar beneden toe. Hoe sneller water stroomt, des te groter de transportcapaciteit. Dit betekent dat er onderaan het talud meer materiaal wordt meegenomen dan aan de bovenkant, met een versteiling tot gevolg (Figuur 15). Dit proces zal aanhouden tot een kritieke helling (β_1) wordt bekomen, afhankelijk van het soortelijk gewicht, de cohesie en de inwendige wrijvingshoek van het materiaal. Voor de versteiling wordt uitgegaan van de volgende formule (Visser, 1998):

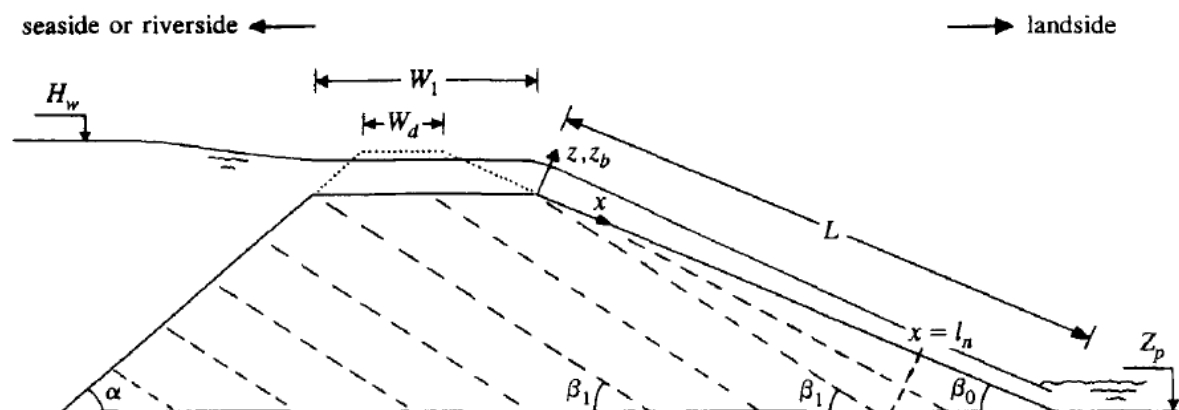
$$d\beta = \frac{\frac{\partial z_b}{\partial t} d_t}{x_E} = \frac{E}{x_E} dt \quad (\text{Vergelijking 11})$$

Waarbij:

β = hoek landtalud t.o.v. horizontale ($^\circ$)

z_b = hoogte maaiveld ter hoogte van landtalud (m)

x_E = punt langs talud waar éénparige stroming wordt bekomen ($=l_n$)



Figuur 15 - Taludversteiling zanddijk (Visser, 1998)

Zodra de kritieke helling bereikt is, zal de dijk langs de kruin, tegen stroomrichting in, gaan eroderen (terugschrijdend), bij een gelijkblijvende (kritieke) helling zoals te zien in Figuur 16. Tijdens dit stadium zal er tevens verticale oppervlakte-erosie blijven plaatsvinden.

De versmalling van het talud wordt weergegeven door (Visser, 1998):

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{B_w}{B_t} \frac{s_s(L_1)}{(1-p)l_a \sin \beta_1} \quad (\text{Vergelijking 12})$$

Waarbij:

W = kruinbreedte (m)

z_b = kruinhoogte (m)

L_1 = lengte landtalud (m)

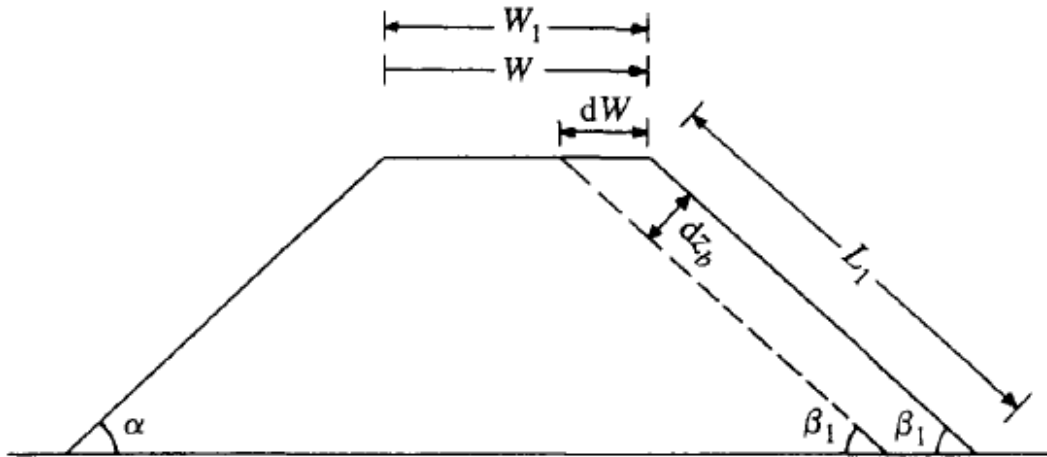
s_s = sedimenttransport-capaciteit (g/l)

B_w = parameter sedimenttransport (-)

B_t = parameter sedimenttransport (-)

l_a = afstand langs landtalud vanaf waar s_s is bereikt (m)

p = porositeit (-)



Figuur 16 - Versmalling kruin (Visser, 1998)

4.3.2 Kruinverlaging

Wanneer de terugschrijdende erosie het riviertalud bereikt zal de kruin verlagen (Figuur 17). Hierdoor zal de stroom door de bres snel dieper worden en de mate van erosie zal daardoor ook snel toenemen. Deze kruinverlaging zal aanhouden tot aan de maximale diepte, waarna alleen nog verbreding van de bres zal voorkomen. De afwaartse waterstand bepaalt de maximale breedte van de bres.

De kruinverlaging wordt beschreven door (Visser, 1998):

$$E_{bo} = \frac{dZ_{br}}{dt} = \frac{-B_w}{B_t} \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + B_1)} \frac{s_s(L_2)}{(1-p)l_a} \quad (\text{Vergelijking 13})$$

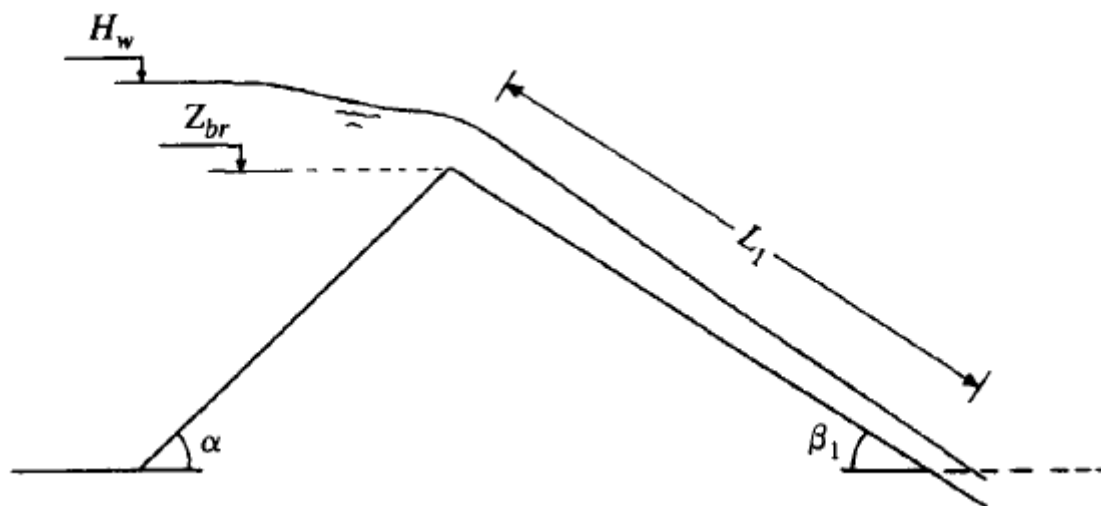
Waarbij

l_a = debietsafhankelijke afstand langs talud vanaf waar sedimenttransportcapaciteit is bereikt (m)

α = parameter sedimenttransport (-)

L_2 = afstand kruin tot teen langstalud (m)

Belangrijk is dat de kruinverlaging en de bijhorende debietsverhoging door de bres een toename van de sedimenttransportcapaciteit veroorzaken. Hierdoor stijgt ook l_a (d.i. debietsafhankelijke afstand langs talud vanaf waar sedimenttransportcapaciteit wordt bereikt), waardoor de rechterterm van bovenstaande vergelijking niet constant blijft tijdens kruinverlaging. Deze term moet dan ook door het model numeriek geïntegreerd worden tijdens de fase van kruinverlaging.



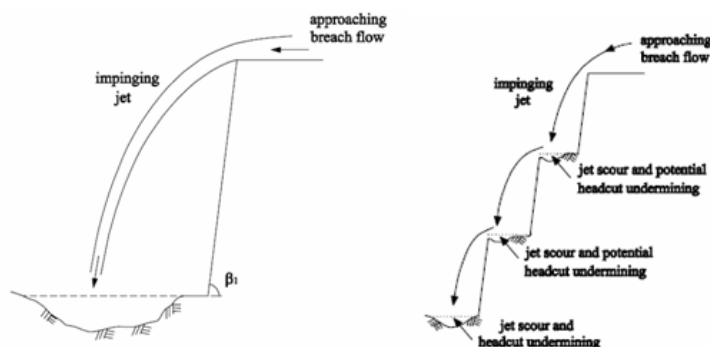
Figuur 17 - Verlaging kruin (Visser, 1998)

4.3.3 Klifvorming

Een klif is in wezen een extreme versteiling van het talud. Bij cohesieve dijken wordt door terugschrijdende oppervlakte-erosie een grotere kritieke helling β_1 bereikt dan bij niet-cohesieve dijken, aangezien de kritieke helling toeneemt naarmate de cohesie en de wrijvingshoek van het materiaal toenemen. Door deze steile kritieke helling treedt jetvorming op, wat typisch is voor cohesieve dijklichamen.

Behalve oppervlakte-erosie kan ook 'small headcut' erosie bijdragen aan de klifvorming. Dit zijn meerdere hele kleine kliffen over de lengte van het landtalud. Wiskundig is dit proces echter moeilijk te beschrijven omdat hier veel onzekerheden bij komen kijken en in bestaande modelleringen wordt het ook niet meegenomen.

Uiteindelijk zal zich een jet vormen doordat de snelheid over de kruin zodanig groot is dat de stroom loskomt. Deze jet stort naar beneden en zal onderaan de klif een kuil eroderen. Dit eroderen van de kuil wordt verder beschreven als een kliferosieproces. Het is echter ook mogelijk dat zich trapsgewijs meerdere, kleinere kliffen boven elkaar vormen (Figuur 20).



Figuur 18 - Enkele en multiklif (Zhu, 2006)

4.4 Klif-erosie

Kliferosieprocessen komen typisch voor bij cohesief materiaal. In de IMPACT-test waarbij een homogene kleidijk faalde als gevolg van overloop (test1-02) stelde men duidelijk vast dat tijdens de eerste fases van bresinitiatie oppervlakte-erosie voorkwam, maar dat eenmaal er zwakke plekken werden gevormd, praktisch uitsluitend kliferosieprocessen het bresvormings- en bresgroeiproces bepaalden. Terugschrijdende oppervlakte-erosie zorgt er immers voor dat een (zeer) steile hellingshoek

van het landtalud wordt bereikt bij cohesieve dijken, waardoor de stroom los komt van het talud en zich als over een klif naar beneden stort. Doch, kliferosie kan ook voorkomen bij niet-cohesief materiaal, zeker als dit materiaal zeer sterk gecompacteerd is en zo schijnbare cohesieve bodemkarakteristieken en erodeerbaarheid krijgt.

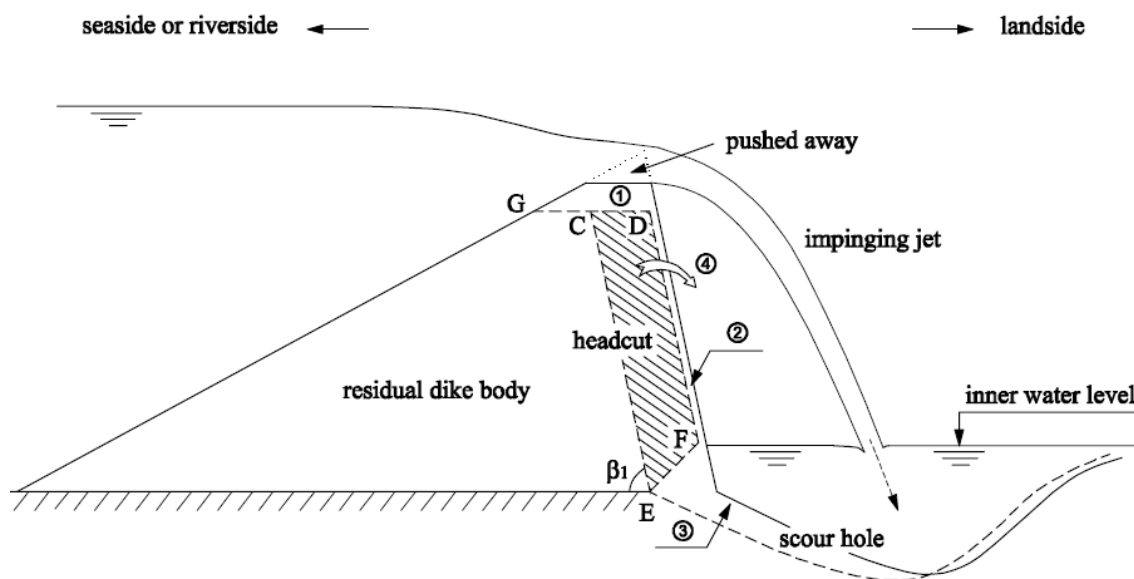
Kliferosie wordt meestal onderverdeeld in verschillende fasen (Temple et al., 2005), waarbij per fase verschillende (deel)processen kunnen voorkomen afhankelijk van de vooruitgang van de klif door de dijk. Daarom wordt eerst een overzicht van de verschillende processen van kliferosie gegeven. Daarna worden de verschillende deelprocessen meer gedetailleerd besproken.

4.4.1 Kliferosie-processen

In de fasen van bresinitiatie wordt door oppervlakte-erosie een klif gevormd (§ 4.3.3). Deze klif migreert naar opwaarts, totdat een verbinding wordt gemaakt met de rivier. Op dat moment begint de eigenlijke bresgroei. Het restprofiel heeft een driehoekige vorm (Figuur 19).

In de eerste fasen van bresgroei, waarbij verticale bresgroei primeert, komen 4 mogelijke deelprocessen voor.

- Oppervlakte-erosie langs het bovenste klifoppervlak, voorgesteld door (1) in Figuur 19. Deze vorm van erosie kan door net dezelfde vergelijkingen beschreven worden als gegeven in § 4.3.
- Erosie langs het klifhelling-oppervlak, voorgesteld door (2) in Figuur 19. Aangezien dit proces niet éénduidig te beschrijven valt en meestal minder belangrijk is, wordt dit in deze studie niet verder besproken
- Uitschuring van de basis van de klif door de jet-stroom, voorgesteld door (3) in Figuur 19. Dit wordt besproken in § 4.4.3.
- Migratie van klif (roteert rond punt E) door hellingsinstabiliteiten, voorgesteld door (4) in Figuur 19. Dit wordt besproken in § 4.4.4. Daarnaast kan hellingsinstabiliteit ook afschuiven van de klif induceren, wat wordt besproken in § 4.4.5.



Figuur 19 - Beschrijving van kliferosiemechanismen in fase III volgens het BRES-model voor kleidijken (Zhu, 2006)

Het aandeel van elk van deze deelprocessen in het kliferosieproces varieert volgens debiet en bodemtypes. De top van het driehoekig restprofiel (Figuur 19) kan zeer snel zal eroderen waardoor de bres snel kan groeien. Op een gegeven moment kan de kruin te smal worden en kan deze de krachten van het water niet meer weerstaan waardoor de top van het restprofiel in een keer kan wegspoelen. Hierdoor kan het bresdebiet ineens sterk vergroten en daarmee ook de bijhorende erosieprocessen. Dit 'afduwen van de top' kan een snelle toename in bresdimensies en bresdebiet veroorzaken, wat meer in

detail wordt besproken in § 4.5. Naargelang de hoogte van de kruin afneemt, neemt de rol van de hellingsinstabiliteitsprocessen (4) af en neemt de rol van schuifspanningsprocessen toe.

Naast verticale bresgroei groeit de bres ook lateraal. Bij laterale bresgroei komen de processen 'oppervlakte-erosie' en 'hellingsinstabiliteiten' voor. Laterale bresgroei wordt beschreven in § 4.6.

4.4.2 Beschrijving jet over klif

De jet over de klif kan beschreven worden door verschillende parameters zoals snelheid en straaldikte (Figuur 20). Deze parameters zijn nodig om de erosiekracht van de jet (§ 4.4.3) te beschrijven.

De jet zal door zijn snelheid een baan beschrijven, welke wordt weergegeven door (Zhu, 2006):

$$x'^2 = \frac{2U_b^2}{g} y' \quad (\text{Vergelijking 14})$$

Waarbij

x' , y' = horizontale respectievelijk verticale positie tov bovenkant klif (m)

De snelheid van de jet, wanneer deze 'loslaat', wordt bepaald door het debiet gedeeld door de oppervlakte van de bres:

$$U_b = \frac{Q_{br}}{Bd_b} \quad (\text{Vergelijking 15})$$

Voor de diepte d_b geldt hier:

$$d_b = \frac{Q_{br}^2 B_w}{gB^3} \quad (\text{Vergelijking 16})$$

Waarbij

Q_{br} = bresdebiet (m^3/s)

B_w = Bresbreedte ter hoogte van wateroppervlak (m)

B = Gemiddelde bresbreedte over waterkolom (m)

Bij 'landing' van de jet gaan de onderstaande relaties op:

$$U_0 = \sqrt{U_b^2 + 2g(H_b + d_b/2 - h_p)} \quad (\text{Vergelijking 17})$$

Waarbij

U_0 = stroomsnelheid jet (m/s)

U_b = stroomsnelheid op klif (m/s)

h_p = waterdiepte (m)

H_b = klifhoogte (m)

d_b = waterdiepte ter hoogte van de klif (m)

De dikte van de jet (T) is (Zhu, 2006):

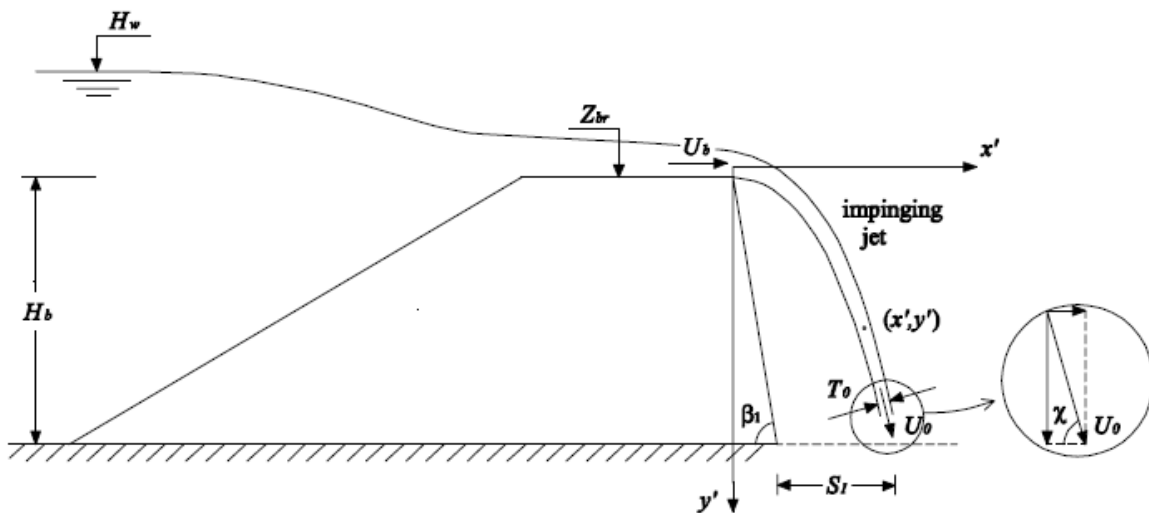
$$T_0 = \frac{Q_{br}}{U_0 B} \quad (\text{Vergelijking 18})$$

De hoek (χ) waaronder de jet de fundering raakt is:

$$\tan \chi = \frac{\sqrt{2g(H_b + d_b/2 - h_p)}}{U_b} \quad (\text{Vergelijking 19})$$

En dat doet deze op een afstand van:

$$S_1 = U_b \sqrt{2(H_b + d_b/2)/g} - H_b / \tan \beta_1 \quad (\text{Vergelijking 20})$$



Figuur 20 - Versteiling talud door erosiekracht van de jet (Zhu, 2006)

4.4.3 Erosie basis klif

Een helling wordt instabiel wanneer de klif ondermijnd wordt door de krachtwerking van de jet ('jet scour'). Door de turbulentie onderaan de klif zal er veel materiaal worden meegenomen, met een uitholling aan de voet van de klif tot gevolg. Wanneer de fundering ook erodeerbaar is, zal er tevens een kuil ontstaan aan de voet van de klif.

In Figuur 21 is een jet te zien op een erodeerbare fundering. Te zien is dat zich een kuil vormt, die zich zowel verticaal als horizontaal uitbreidt. Door deze horizontale uitbreiding zal er op een gegeven moment materiaal aan de voet van de klif gaan wegspoelen. De maximum schuifspanningen op de fundering ten gevolge van de jet worden door Stein berekend als volgt, waarbij J_p de afstand weergeeft waar de snelheid U_0 van de stroming gelijk blijft :

$$\tau_j = C_f \rho U_0^2 \quad J \leq J_p \quad (\text{Vergelijking 21})$$

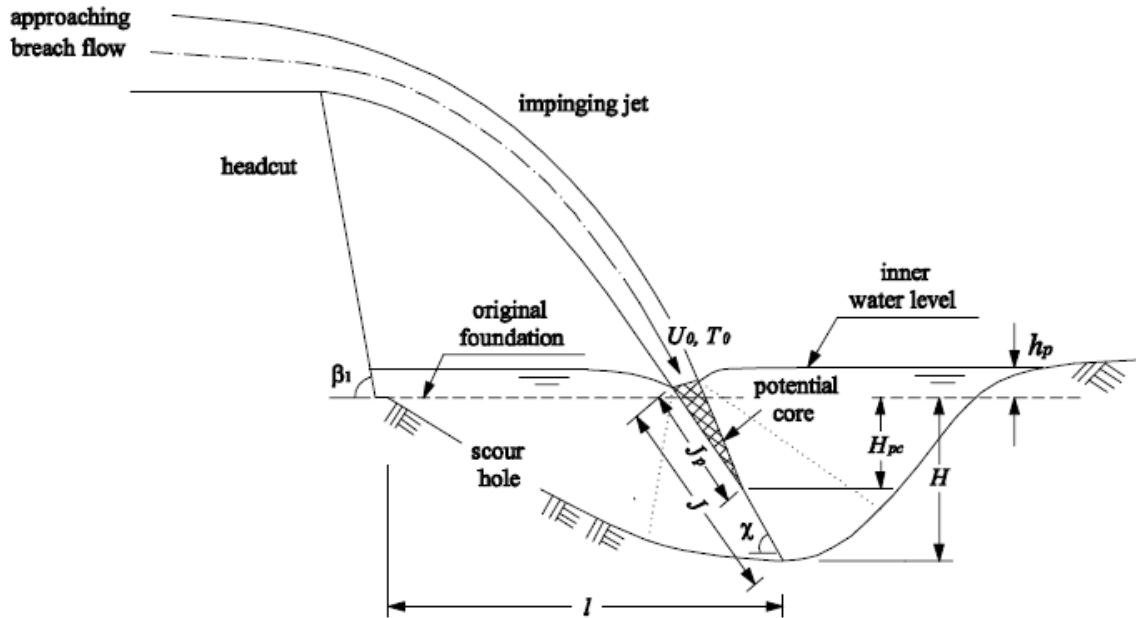
Waarbij

U_0 = stroomsnelheid jet (m/s)

C_f = wrijvingscoëfficiënt (-)

Voorbij J_p neemt de stroomsnelheid U_0 geleidelijk af door diffusie. De schuifspanning neemt dan af volgens:

$$\tau_j = C_d^2 C_f \rho U_0^2 \frac{T_0}{J} \quad J > J_p \quad (\text{Vergelijking 22})$$



Figuur 21 - Jet op een erodeerbare fundering (Zhu, 2006)

De verandering in uitschuringsdiepte kan gegeven worden in de vorm van (vergelijking 9), waarbij de schuifspanning wordt gegeven door τ_j .

In Figuur 22 is een jet te zien op een niet erodeerbare fundering. In deze situatie zal de straal splitsen in twee takken, waarvan er één wegspoelt en de ander in de richting van de klif stroomt. Hierbij zal deze noemenswaardige krachten op de grondconstructie uitoefenen.

De schuifspanning onderaan de wand van de klif τ_b kan worden berekend met de formule van Robinson (1992):

$$\pi_1 = 0.025 \pi_2^{-1.295} \pi_3^{0.026} \pi_4^{0.221} \pi_5^{-1.062} \quad (\text{Vergelijking 23})$$

Met:

$$\pi_1 = \tau_b / (\rho g d_b) \quad (\text{Vergelijking 24})$$

$$\pi_2 = q^2 / (g d_b^3) \quad (\text{Vergelijking 25})$$

$$\pi_3 = H_b / d_b \quad (\text{Vergelijking 26})$$

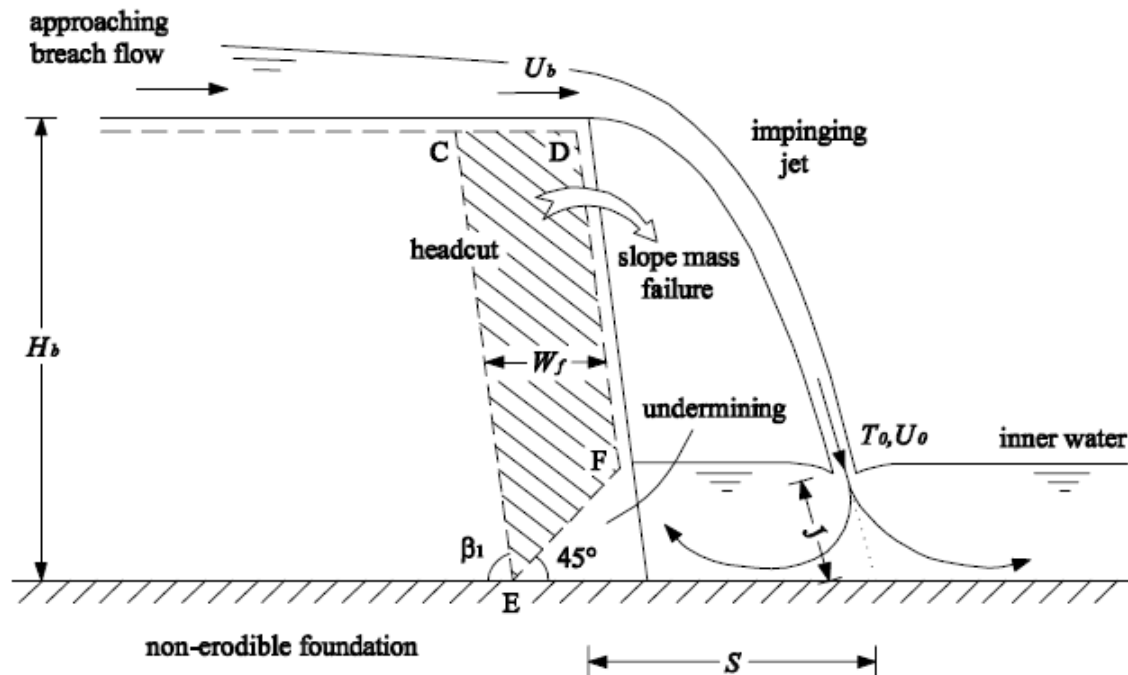
$$\pi_4 = H_p / d_b \quad (\text{Vergelijking 27})$$

$$\pi_5 = X_p / d_b \quad (\text{Vergelijking 28})$$

Hierin geldt voor X_p

$$X_p = S - 0.154 \cdot J \cdot \cot(\chi) - T_0 / 2 \quad (\text{Vergelijking 29})$$

Eenmaal τ_b berekend, kan de erosie (net als bij een erodeerbare ondergrond) door de jetwerking ook hier voorgesteld worden door een vergelijking van de vorm (vergelijking 9).



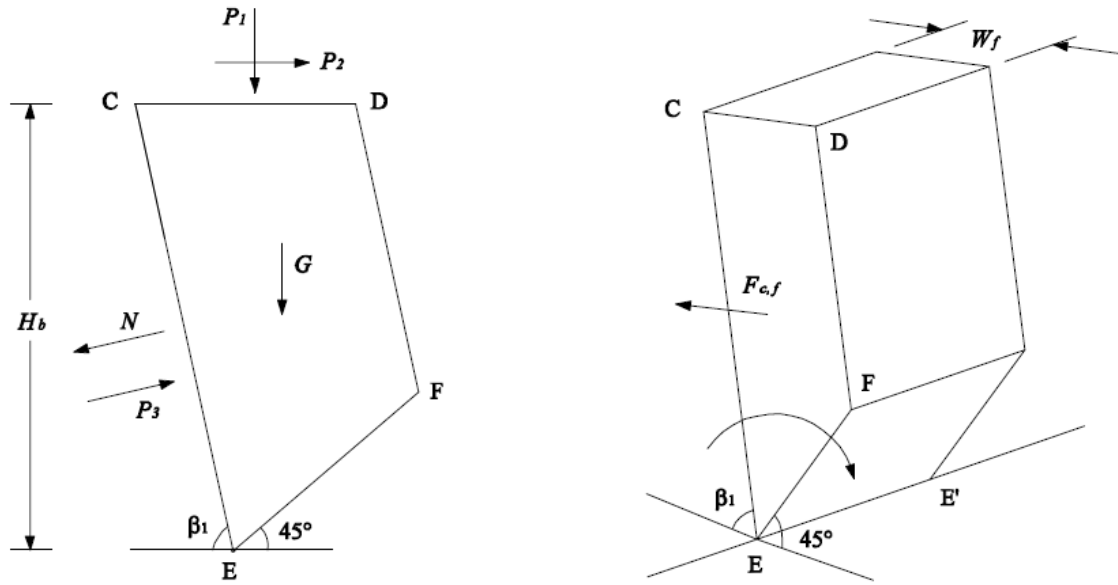
Figuur 22 - Jet op niet erodeerbare fundering (Zhu, 2006)

4.4.4 Blokfaling door hellingsinstabiliteit

Door uitschuring van de klifbasis kan instabiliteit van de klif optreden onder invloed van zwaartekracht en waterdrukken, de zogenaamde 'blokfaling' (soil mass failure).

Zhu veronderstelt dat de uitholling van de voet van de klif geschiedt onder een hoek van 45° ten opzichte van de bodem (Figuur 22). In tegenstelling tot voorgaande fasen, wordt verondersteld dat het blok volledig onder de freatische lijn ligt.

Wanneer de uitholling voldoende groot is, zal er een moment ontstaan rond het diepste punt van de uitholling (punt E in Figuur 23). In dit stadium wordt het moment nog tegengewerkt door de treksterkte afkomstig van de cohesieve krachten in de klei. Maar aangezien de treksterkte van klei beperkt is zal er op een gegeven moment geen momentenevenwicht meer zijn in deze constructie en zal er ineens een groot stuk van de constructie afbreken. Dit wordt blokfaling of 'slope mass failure' genoemd. Door het overschrijden van de treksterkte zal het blok in eerste instantie in horizontale richting van de dijk afgeduwd worden, en vervolgens door het eigengewicht roteren en in de bres vallen.



Figuur 23 - Blokfaling bij kleidijken (Zhu, 2006)

G_2 is het gewicht van het (verzadigde) blok. P_1 , P_2 en P_3 (krachten t.g.v. het water) kunnen worden berekend met

$$P_1 = \rho g d_b W_f b \quad (\text{Vergelijking 30})$$

$$P_2 = \tau_b W_f b \quad (\text{Vergelijking 31})$$

$$P_3 = \frac{1}{2} \rho g b \left(\frac{H_b}{\sin \beta_1} \right)^2 \quad (\text{Vergelijking 32})$$

Waarbij

W_f = breedte blok (m)

τ_b = schuifweerstand op de top van het te falen blok (N/m²)

De reactiekrachten t.g.v. eigen gewicht en cohesie/wrijving kunnen respectievelijk worden berekend met

$$N = \frac{H_b}{\sin \beta_1} \cdot b \cdot \tau_t \quad (\text{Vergelijking 33})$$

$$F_{o,f} = A' \tau_s = \tau_s \left(\frac{H_b}{\sin \beta_1} - \frac{\sqrt{2W_f}}{4 \sin(135^\circ - \beta_1)} \right) W_f \sin \beta \quad (\text{Vergelijking 34})$$

Waarbij

τ_t = treksterkte bodem (N/m²)

τ_s = schuifweerstand bodem (N/m²)

Op het moment juist voordat de dijk faalt zal het volgende momentenevenwicht rond punt E in Figuur 23 van kracht zijn.

$$f(W_f) = P_1 d_{p1} + P_2 d_{p2} + P_3 d_{p3} - 2F_{c,f} d_{c,f} + G d_G - N d_N = 0 \quad (\text{Vergelijking 35})$$

Hierbij stelt d_G de krachtenarm van G tot punt E voor, i.e. de loodrechte afstand van het punt E tot de werklijn van G. Concreet wil dat zeggen dat wanneer in bovenstaande vergelijking een positief moment ontstaat, blokfaling plaats zal vinden. Deze beschrijving is enkel geldig voor blokfaling bij kliferosie, en niet voor laterale groei (bresverbreding).

Blokfaling is een proces dat typisch voorkomt bij bresgroei bij kleidijken, waar treksterkte het blok relatief lang kan vasthouden. De treksterkte is afkomstig van cohesieve krachten in de grond.

In kader van de analyse van de IMPACT-testen voor het FLOODSITE-project, werd duidelijk vastgesteld dat na hellingsinstabiliteit het blok meteen werd meegespoeld door de stroming. Er moet dus niet eerst erosie van dit blok of sedimenttransport plaatsvinden vooraleer erosie van de bres verdergaat.

Een ander aspect dat de IMPACT-testen aantoonde, is dat er een complexe interactie is tussen hellingsinstabiliteit en andere structurele processen die zich tegelijkertijd voordoen. Zo kan water infiltreren langs gevormde scheuren bij overschrijden van de treksterkte ('tension cracks'), en hellingsinstabiliteit doen versnellen. Een voorbeeld van dergelijke scheuren wordt weergegeven in Figuur 24. In de analyse van FLOODSITE van de IMPACT-testen wordt het voorkomen van scheuren als bepalende parameter vernoemd (naast de mate van erosie) in het voorkomen van hellingsinstabiliteit. Anno 2010 is het echter niet haalbaar deze interacties kwantitatief te beschrijven.



Figuur 24 - Scheuren gevormd in IMPACT Test1-02 bij een homogene cohesieve (klei-)dijk (FLOODSITE)

4.4.5 Afschuiven door hellingsinstabiliteit

De erosie van de basis van de klif, voorgesteld door E_v in Figuur 25, kan naast het proces 'blokfalen' ook het afschuiven van een deel van de klif veroorzaken. Hoeveel de basis moet eroderen vooraleer afschuiving plaatsvindt, kan afgeleid worden via grondmechanische analyse. De Culman methode (Hanson, 2001) vergelijkt de verschillende krachten die werken op het faalvlak (Figuur 25). Afschuiven

treedt op als de volgende momentenvergelijking opgaat (Hanson, 2001):

$$(W_s + W_w - T_v - CL \sin \theta) [\tan \theta - \phi] - T_h - CL \cos \theta = 0 \quad (\text{Vergelijking 36})$$

Waarbij:

W_s = gewicht van bodemblok (kg)

W_w = gewicht van het water boven te falen blok (kg)

T_v = verticale component van krachten van (terugstromend) water (N)

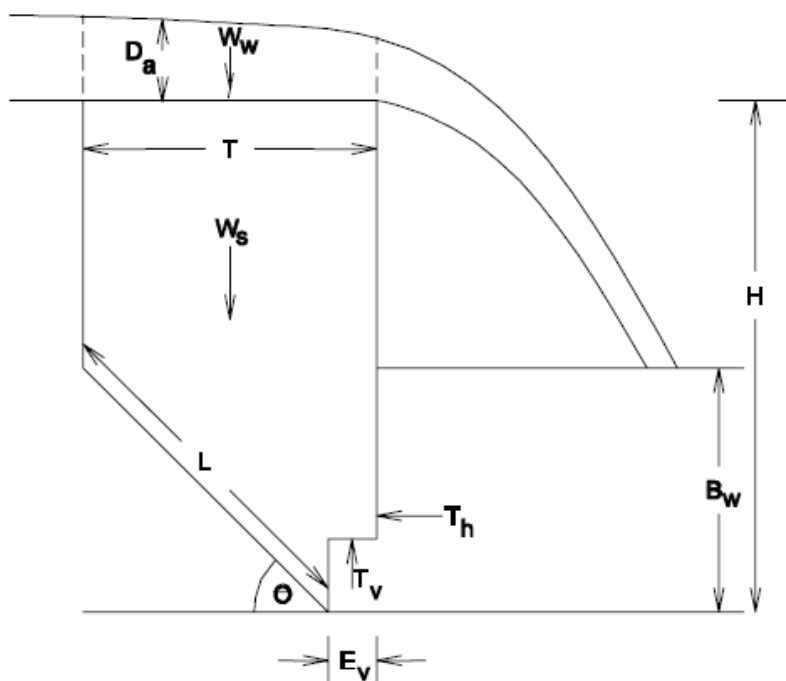
T_h = horizontale component van krachten van (terugstromend) water (N)

C = bodemcohesie (N/m²)

L = lengte faalvlak (m)

θ = hoek faalvlak met horizontale (°)

ϕ = hoek van inwendige wrijving (°)



Figuur 25 - Culman methode (Hanson, 2001)

Afschuiving treedt op als de schuifweerstand van de grond wordt overschreden door de externe schuifweerstand. Dit proces is typisch voor niet-cohesieve gronden, waar treksterkte (grotendeels) afwezig is.

4.4.6 Opwaartse voortschrijding klif

Door het optreden van hellingsinstabiliteit (blokfaling of afschuiving) zoals hierboven beschreven, gaat de klif over een afstand W_f naar bovenstrooms terugschrijven. Hierdoor komt de jet op een andere plaats terecht en start een nieuwe cyclus.

Belangrijk hierbij is dat de hellingsinstabiliteit de oorzaak is van het opwaarts voortschrijden van de klif. De frequentiegraad en de omvang van de hellingsinstabiliteit bepalen bijgevolg de bresgroeisnelheid.

Een groter debiet door de bres over de klif zorgt niet noodzakelijkerwijs voor een snellere opwaartse voortschrijding van de klif, aangezien een groter debiet immers de afstand vergroot tussen de plaats waar de jet terecht komt en de klif. De tijdsduur vooraleer hellinginstabiliteit optreedt, neemt toe naargelang de afstand tussen klif en plaats waar de jet neerkomt toeneemt.

4.5 Afduwen top

Het plots afduwen van de top (Eng: 'sudden collapse') vindt plaats wanneer de wrijvingskrachten die de kruin op zijn plaats houden, kleiner zijn dan de krachten t.g.v. het water. Het afgeduwde gedeelte is normalerwijze de bovenste wig van het opwaartse (verzadigde) deel van de kruin. De krachten die een rol spelen in dit proces zijn de hydrodynamische druk en de schuifkrachten door de stroming, als destabiliserende krachten, enerzijds en de wrijvingsweerstand (~ cohesie en inwendige wrijvingshoek) en het gewicht van het af te duwen gedeelte van de dijk, als stabiliserende krachten, anderszijds. Als de destabiliserende krachten groter worden dan de stabiliserende krachten, dan wordt het wigvormig gedeelte van de dijk naar benedenstrooms afgeduwd.

De top wordt afgeduwd vanaf het moment dat volgende vergelijking opgaat (Fread, 1988):

$$F_w > F_{sb} + F_{ss} + F_{cb} + F_{cs} \quad (\text{Vergelijking 37})$$

Waarbij

F_w = krachten van het water (druk, schuifspanning) (N)

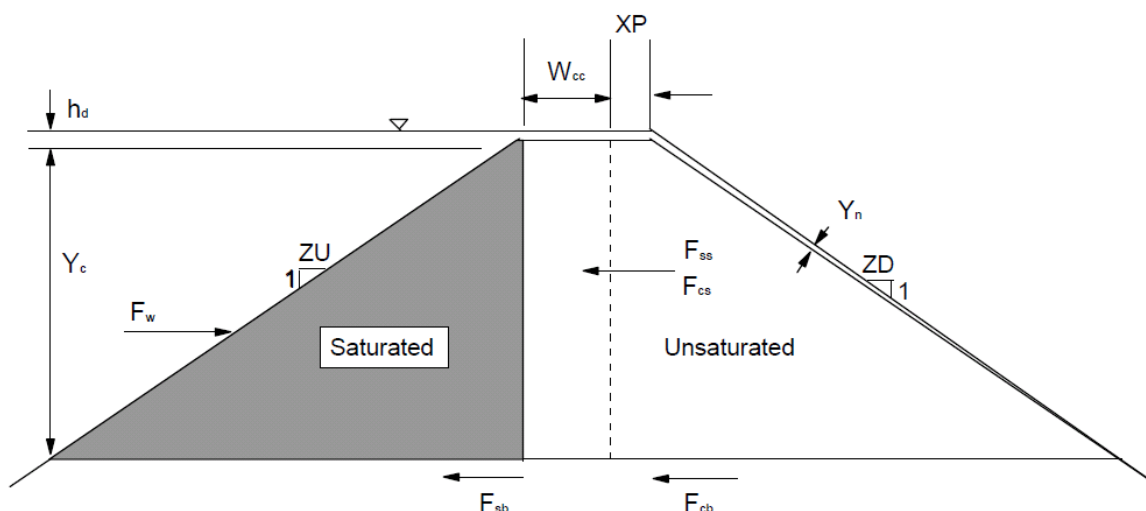
F_{sb} = schuifspanning langs de bodem van de wig (N)

F_{ss} = schuifspanning langs de zijanten van de wig (N)

F_{cb} = cohesieve krachten langs de bodem van de wig (N)

F_{cs} = cohesieve krachten langs de zijanten van de wig (N)

Deze krachten worden tevens weergegeven in Figuur 26.



Figuur 26 - Krachten die van belang zijn bij 'sudden collapse' (Fread, 1988)

Het afduwen van de top zal eerder voorkomen bij cohesieve dijken dan bij niet-cohesieve dijken, aangezien de cohesieve krachten het wigvormig gedeelte langer kunnen samenhouden. Bij niet-cohesieve dijken zal de wig reeds door oppervlakte-erosie weggeërodeerd zijn.

4.6 Laterale erosie

4.6.1 Blokfaling door hellingsinstabiliteit

De manier waarop de bres lateraal groeit, hangt af van de mate waarin verticale erosie mogelijk is. Is er sterke oppervlakte-erosie in verticale richting (E_{bo} in Figuur 27), dan bepaalt de mate van E_{bo} de laterale erosie. Immers, telkens de kritische hoek β_1 wordt bereikt, verbreedt de bres door hellingsinstabiliteit/blokfaling.

De verbreding van de bres is echter niet gelijkmatig. Aangenomen wordt dat de mate van erosie toeneemt, naarmate de snelheid van de stroming groter is (Zhu, 2006). In een bres stroomt het water sneller aan de bodem dan aan de oppervlakte, wat betekent dat de erosie aan de bodem en aan de onderkant van de wanden groter zal zijn dan de erosie aan de oppervlakte. Aan de bodem wordt de bres dus dieper en breder en aan de oppervlakte zal de breedte nagenoeg gelijk blijven.

Hierdoor worden de wanden steeds steiler en op een gegeven moment zal een kritieke helling bereikt worden. Bij deze helling ontstaat er hellingsinstabiliteit en zal de wand instorten. Bij dit type van blokfaling kan, net als bij kliferosie, een gans blok van het dijklichaam langs een zijde van de bres ineens loskomen. Dit komt typisch voor bij cohesieve dijken. Echter door zuiging in het materiaal kunnen ook de wanden van niet-cohesieve dijken soms verticaal en zelfs ondergraven worden, waardoor het materiaal cohesieve eigenschappen lijkt te hebben.

De kritische hoek wordt dezelfde verondersteld als deze voor het opwaarts voortschrijden van de klif. Dit proces treedt pas op eenmaal een kritische diepte wordt bereikt, gegeven door (zie Figuur 27, c):

$$\Delta Z'_{br} = \frac{h \sin(\beta_1 - \gamma)}{\sin \gamma \cos \beta_1} \quad (\text{Vergelijking 38})$$

Waarbij

β_1 = hoek inwendige wrijving (°)

γ = hoek brestalud met horizontale (°)

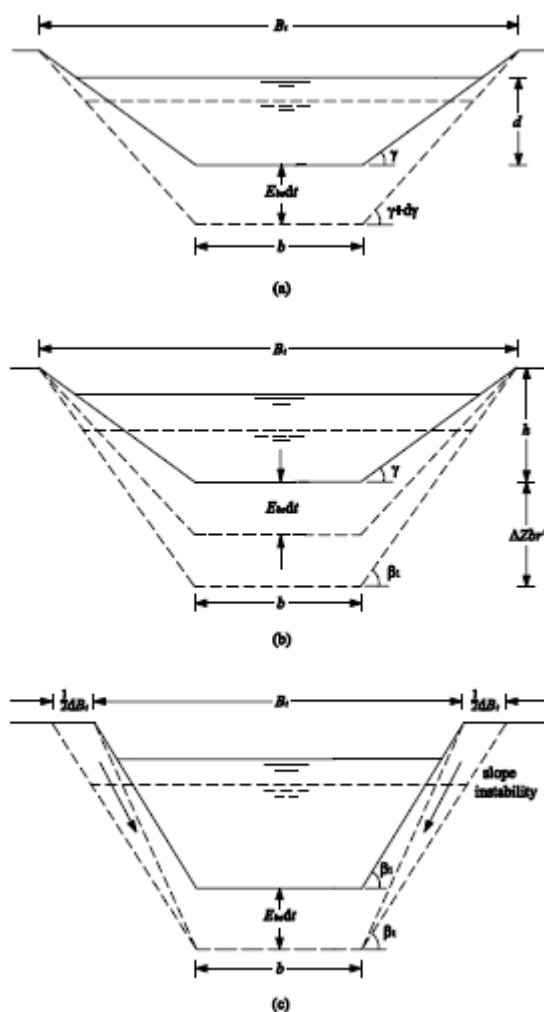
Belangrijk is dat blokfaling in dit proces niet als oorzaak wordt gezien van bresverbreding, maar wel als gevolg van de verticale erosie (in tegenstelling met het opwaarts voortschrijden van de klif). De hellingsinstabiliteit hoeft bijgevolg niet kwantitatief te worden besproken voor het beschrijven van de laterale erosie. De oorzaak van de bresverbreding is de (oppervlakte-)erosie van de bodem E_{bo} , die kan bepaald worden aan de hand van (vergelijking 9).

De (in werkelijkheid discrete) bresverbreding kan dan voorgesteld worden door een continue curve in het model door:

$$\frac{dB_t}{dt} = \frac{2E_{bo}}{\tan \beta_1} \quad (\text{vergelijking 39})$$

Waarbij

E_{bo} = Erosie bodem (m^3/s)



Figuur 27 - Blokfaling bij kleidijken. Opeenvolging a), b) en c) (Zhu, 2006)

Eenmaal het dijklichaam verticaal is weggeërodeerd ter hoogte van de bres, zal de laterale groei van de bres domineren. Bij een zandfundering is er veel kans dat de erosie nog zal doorgaan tot onder het niveau van het achterland, bij een kleifundering is dit niet waarschijnlijk. Het dominante proces is dan laterale oppervlakte-erosie aan de onderkant van het zijtalud, wat zal leiden tot uitholling van de onderkant, ondermijning van de wand en laterale blokfaling. Het ingestorte materiaal zal wegspoelen waarna voornoemd proces zich zal herhalen.

De zijdelingse blokfaling wordt in deze fase veroorzaakt door erosie in laterale richting (=langs de zijwanden van de bres) in plaats van erosie in verticale richting.

Hierin is E_{sl} de mate van erosie aan de zijwanden van de bres. Deze kan terug voorgesteld worden door:

$$E_{sl} = M(\tau_b - \tau_c) \quad (\text{Vergelijking 40})$$

Ook in deze fase is blokfaling terug niet bepalend voor de snelheid van laterale bresgroei, aangezien de blokfaling moet gezien worden als een gevolg van de erosie aan de zijwanden van de bres.

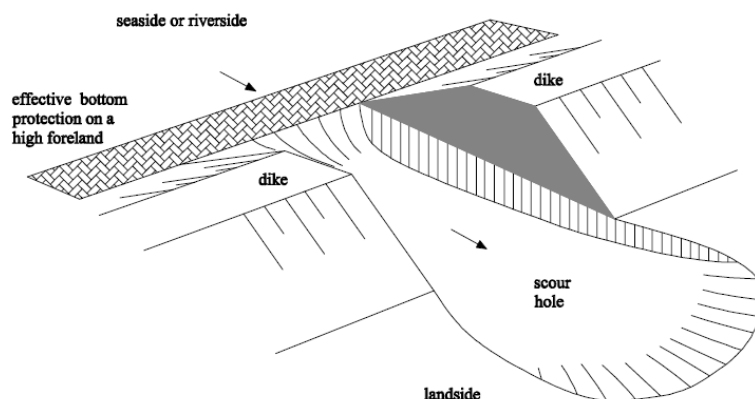
Visser (1998) en Zhu (2006) maken voor laterale bresgroei een onderscheid in 3 types dijken naargelang de erosiegevoeligheid van de ondergrond, teenbescherming of aanwezigheid van een voorland.

Type A dijken worden gekenmerkt door een niet-erodeerbare fundering, een stevige teenbescherming

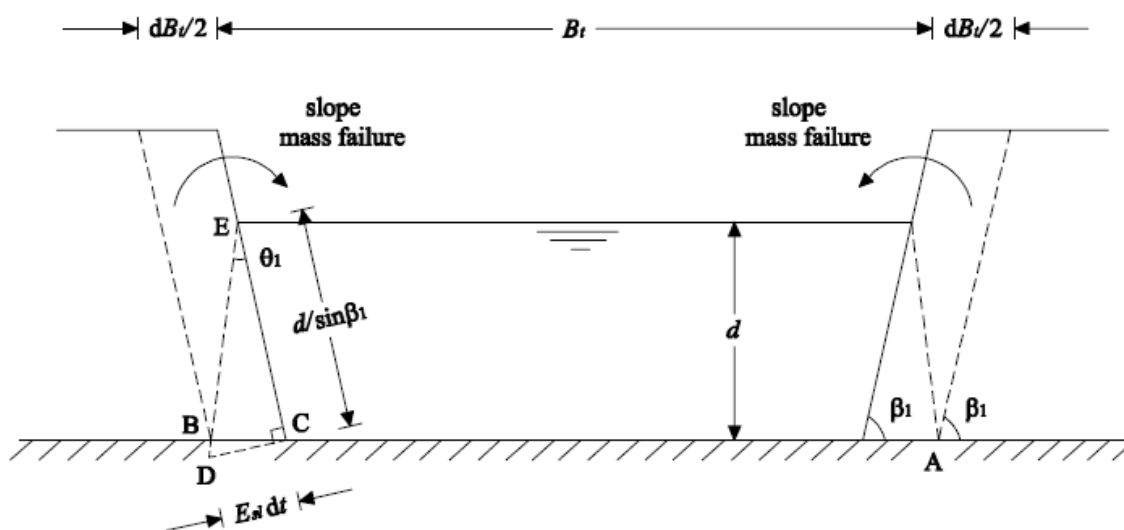
op het riviervallied, een niet-erodeerbaar en relatief hoog voorland of een bodembescherming op het voorland (Figuur 28). De mate van erosie aan de zijwanden van de bres E_{sl} is voor dit type dijken de enige bepalende factor voor laterale bresgroei (Figuur 29). Type B en type C dijken hebben een erodeerbare fundering, waardoor ook verticale erosie (E_{bo}) voorkomt. E_{bo} is meestal veel kleiner dan E_{sl} , waardoor E_{sl} ook voor dit type dijken meest bepalend is voor de finale dimensies van de bres. Daarom kan de discrete bresverbreding zowel voor type A, type B als type C dijken vereenvoudigd voorgesteld worden door een variatie van (vergelijking 40) namelijk:

$$\frac{dB_t}{dt} = \frac{2E_{sl}}{\sin \beta_1} \quad (\text{Vergelijking 41})$$

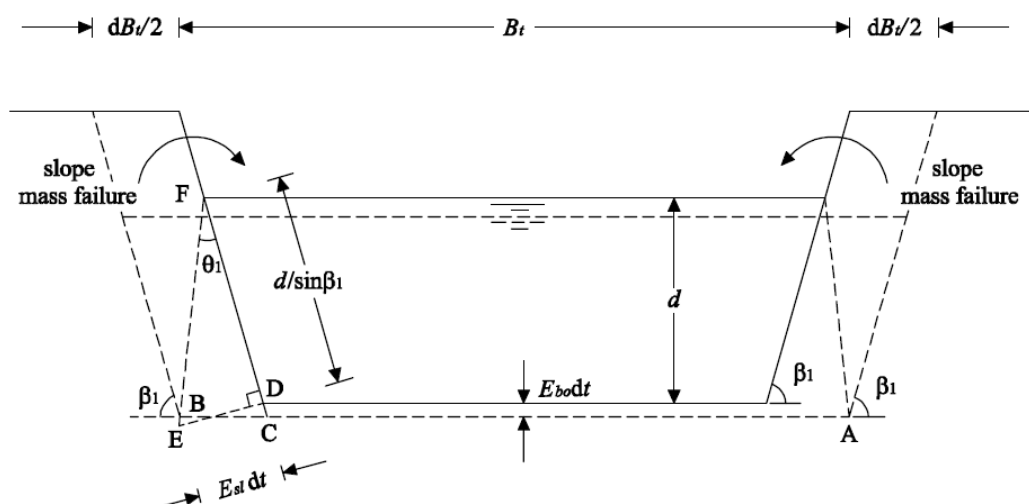
De onderverdeling in types A, B en C bepaalt eveneens de waarde van de debietscoëfficiënten voor de debietformule door de bres (§ 4.2).



Figuur 28 - Type A dijk (Zhu, 2006)



Figuur 29 - Bresverbreding bij type A kleidijken (Zhu, 2006)



Figuur 30 - Bresverbreding bij type B en C kleidijken, waarbij E_b veel kleiner is dan E_s (Zhu, 2006)

4.6.2 Afschuiving door hellingsinstabiliteit

Blokfaling zoals voorgesteld in § 4.6.1 is het proces dat typisch bij cohesieve dijken de bres in de breedte doet groeien (§ 4.6.1). De bres kan echter ook lateraal groeien door het afschuiven van wandmateriaal als de schuifweerstand overschreden wordt. Het ganse blok schuift dan verticaal af onder eigengewicht. Dezelfde krachten treden op als degene vermeld in § 4.4.5. Afschuiving is dan ook typisch voor cohesieloze gronden.

In theorie creert dit proces minder steile wanden dan het geval is bij hellingsinstabiliteit door blokfaling. Toch werden praktisch verticale wanden vastgesteld zowel tijdens labo-testen als tijdens de IMPACT-testen (Mohamed, 2002). Deze verticale wanden bij cohesieloze gronden zijn vaak eerder een gevolg van blokfaling vanwege dichte compactie van niet-cohesieve gronden dan van afschuiving.

Uiteindelijk speelt het weinig rol of de wanden instorten door blokfaling of afschuiven, aangezien dit niet de groei van de bres bepaalt.

4.7 Composietdijken

4.7.1 Zanddijk met kleikern

Verticale bresgroei

De dijkbreuken in 2005 in New Orleans ten gevolge van de storm 'Katrina' hebben een aantal gebreken en gevoelheden van composiet-dijken ter hoogte van overgangen duidelijk aangetoond. De overgang van de zandige toplaag naar de kleikern bepaalt vaak de locatie van falen van de dijk (Seed et al., 2006). Een aantal processen komen typisch voor bij composietdijken. Toch worden deze processen hier slechts zeer summier besproken om volgende redenen:

- Deze processen zijn bijzonder moeilijk te voorspellen en te vertalen naar fysische vergelijkingen. Anno 2010 staat onderzoek naar bresgroeiprocessen in composietdijken nog in zijn kinderschoenen (Morris et al., 2009a)
- In Vlaanderen is het meestal niet gekend waar precies de kleikernen in de dijken aanwezig zijn, hoe groot deze zijn en welke eigenschappen ze bezitten.

In het geval van een dijk met een kleikern en een bekleding van zand zal t.g.v. de oppervlakte-erosie de bekleding aan het landtalud eroderen zoals eerder beschreven (§ 4.3). Wanneer de kern bloot komt te liggen houdt deze vorm van erosie op en begint kliferosie. Nu is het mogelijk dat het materiaal van de kern niet voldoende sterk is om de waterdruk vanaf de buitenkant te weerstaan. Vanaf hier zijn drie

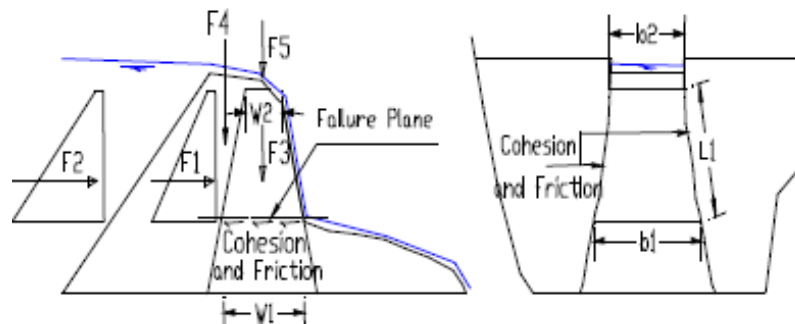
verschillende mechanismen mogelijk:

- Afschuiving van de complete kern
- Omvallen van de hele kern
- Uitbuigen/barsten van de kern

Het is afhankelijk van de geometrie en de materiaaleigenschappen van de kern en de afmetingen van de bres welke van deze mechanismen zullen plaatsvinden.

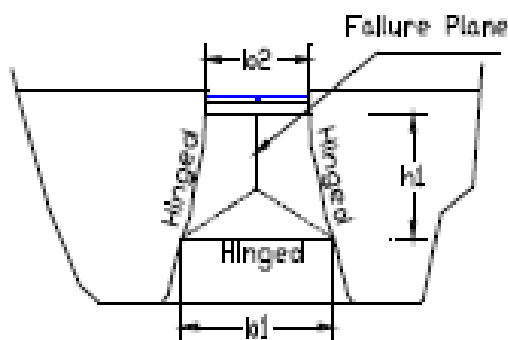
Wanneer de kracht op de kern groter is dan de maximaal opneembare wrijvings- en cohesiekrachten in de klei kan er geen horizontaal krachterevenwicht meer bestaan in de constructie en zal de kern ineens bezwijken. Het hele blok zal dan ineens weggeduwd worden en de bres zal in grote mate toenemen (Figuur 31).

Het kantelen van de kern gaat ongeveer volgens hetzelfde systeem als het afschuiven. Echter is er bij dit mechanisme op een gegeven moment geen momentenevenwicht meer mogelijk. Hierbij zal de hele kern in feite omvallen en meegenomen worden door de stroming.



Figuur 31 - Afdwinging kleikern (Mohammed et al., 2002)

Ook is het mogelijk dat de kern bezwijkt door buiging t.g.v. de waterdruk op het riviertalud. De kleikern kan hierbij geschematiseerd worden als opgelegd langs drie zijden t.o.v. de kleikern buiten de breszone (m.n. de zijanten en de vrijliggende onderkant) of als opgelegd langs twee zijden (m.n. enkel de zijanten, de oplegging aan de onderkant wordt verwaarloosd). Deze laatste schematisatie is verantwoord, aangezien de diepte van de bres wellicht groter zal zijn dan de breedte van de bres op het moment van het bezwijken van de dijk. Op de kleikern werkt een niet-uniform verdeelde belasting over het oppervlak. Als het buigend moment in de kern te groot wordt zullen er barsten ontstaan en zal de kern op deze manier bezwijken (Figuur 32).

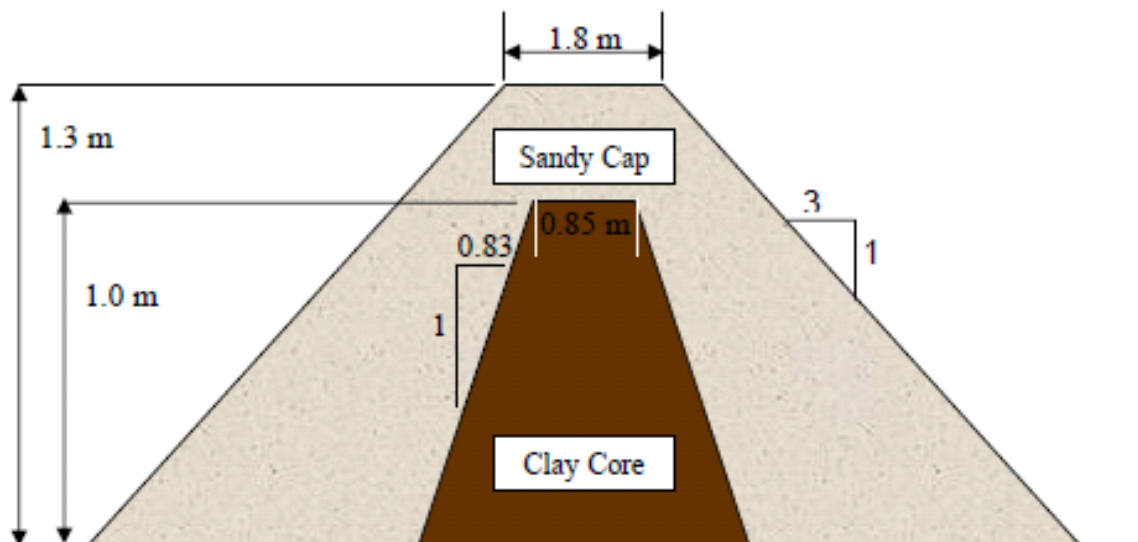


Figuur 32 - Bezwijken kleikern door buiging (Mohammed et al., 2002)

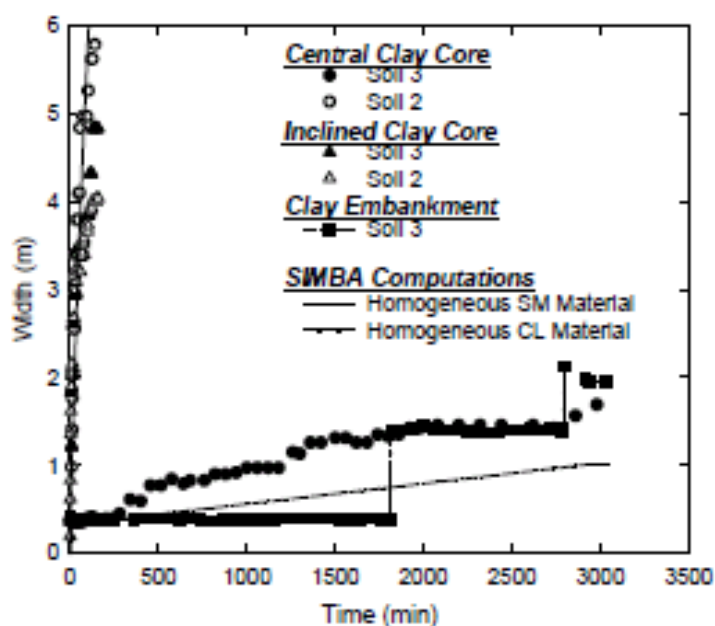
Laterale bresgroei

Bij recente bresgroeitests door de USDA (Hunt et al., 2006) werd de invloed van een kleikern in een zanddijk op de laterale groei van een bres nagegaan. De vergelijking werd gemaakt tussen een homogene kleidijk ('clay embankment'), een zanddijk met kleikern ('Central Clay Core') en een zanddijk

met kleibekleding ('Inclined Clay Core'). De testconfiguratie van de zanddijk met kleikern wordt gegeven in Figuur 33. Wat betreft de laterale groei, blijkt de zanddijk met kleibekleding vergelijkbaar met een homogeen zanddijk (§ 4.7.2). De laterale groei voor de verschillende types wordt gegeven in Figuur 34. De aanwezigheid van de kleikern bleek een zeer significante invloed te hebben op de bresgroeisnelheid. De laterale groei van de bres gaat veel trager als gevolg van de kleikern, de groei is vergelijkbaar met de laterale groei door een homogeen kleidijk.



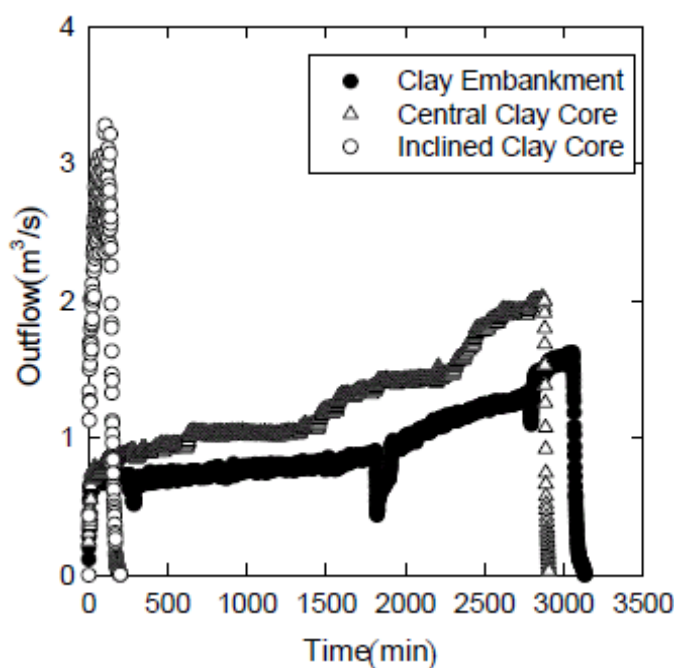
Figuur 33 - De testconfiguratie van de zanddijk met een centrale kleikern ('Central Clay Core') (Hunt et al., 2006)



Figuur 34 - Laterale groei voor een homogeen kleidijk ('Clay Embankment') en een zanddijk met een centrale kleikern ('Central Clay Core') (Hunt et al., 2006)

Voor de kleikern en de homogeen kleidijk werd identiek hetzelfde materiaal gebruikt, inclusief watergehalte en compactiegraad. Voor de zanddijk met kleikern werd het zandig materiaal snel weggeërodeerd, en bepaalde de kleikern vervolgens volledig de laterale groei. Aangezien het zandige materiaal boven de kleikern snel werd weggeërodeerd, is het bresdebiet voor de zanddijk met kleikern systematisch groter dan het bresdebiet voor de homogeen kleidijk (Figuur 35). Maar doordat de laterale

groei beperkt blijft, is het verschil in piekdebiet met een homogene zanddijk ('inclined clay core') groot.



Figuur 35 - Verloop van het bresdebiet voor een homogene kleidijk ('Clay Embankment') en een zanddijk met een centrale kleikern ('Central Clay Core') (Hunt et al., 2006)

4.7.2 Zanddijk met kleibekleding

Verticale bresgroei

Tijdens het initiëren van de bres zal de kleibekleding van de kruin en het landtalud grotendeels weggeërodeerd zijn. Bij de aanvang van de bresgroeifase levert dan enkel de kleibekleding van het riviortalud bijkomende reststerkte in vergelijking met een homogene zanddijk.

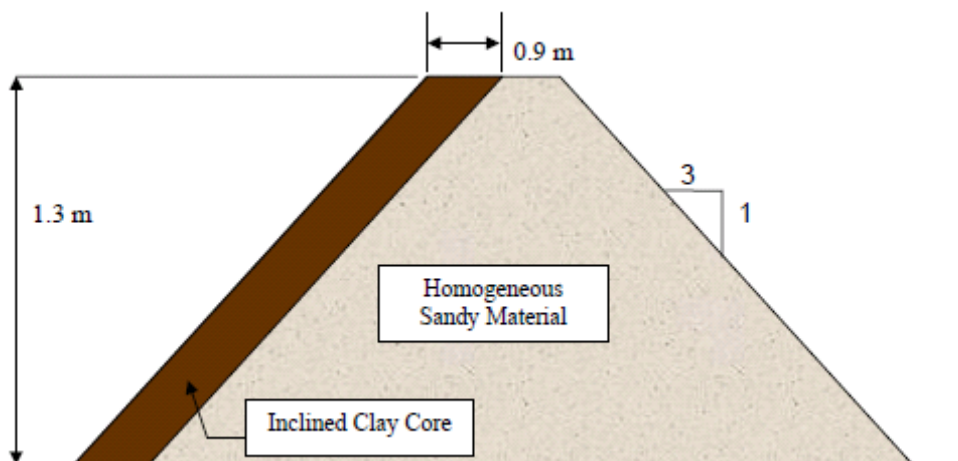
In het BRES-model van Visser (§ 5.1.4) wordt verondersteld dat eenmaal de zandkern is blootgelegd, de overgebleven kleilagen zodanig weinig reststerkte zullen leveren dat het restprofiel bij aanvang van het groeien van de bres dezelfde reststerkte heeft als een homogene zanddijk.

Het is niet duidelijk wat de reststerkte is van de kleibekleding op het riviortalud voor verticale bresgroei. Waarschijnlijk zal de kleibekleding de verticale erosiesnelheid vertragen in vergelijking met een homogene zanddijk, door verhoogde resistentie tegen oppervlakte-erosie. Anderszijds kan de kleibekleding kliferosieprocessen initiëren ter hoogte van het landtalud, die de verticale bresgroei zullen versnellen. Er zijn echter geen testen gekend die hierin meer duidelijk kunnen brengen.

Veiligheidshalve moet men uitgaan van eenzelfde verticale bresgroeisnelheid als een homogene zanddijk zonder kleibekleding.

Laterale bresgroei

In de USDA-tests naar de verschillen in laterale bresgroeisnelheden naargelang de samenstelling van dijken werd ook een zanddijk met kleibekleding getest. Er werd uitgegaan van het restprofiel bij aanvang van de bresgroeifase, m.a.w. enkel de kleibekleding van het riviortalud is intact (Figuur 36). De dikte van de kleilaag is 0.9 m, gelijkaardig aan de kleilaag bij Sigmadijken.



Figuur 36 - Restprofiel van zanddijk met kleibekleding bij de aanvang van de bresgroeifase ('Inclined Clay Core') (Hunt et al., 2006)

De laterale groei van de zanddijk met kleibekleding ('Inclined Clay Core') in vergelijking met een homogene kleidijk en een zanddijk met kleikern wordt weergegeven in Figuur 34, het bresdebiet wordt weergegeven in Figuur 35. Uit de testen blijkt dat de kleibekleding met dezelfde snelheid erodeert als het zandige materiaal. De snelheid van laterale groei bedraagt 2.6 m/h, in vergelijking met 0.04 m/h voor de homogene kleidijk en de kleikern. De snelheid van het eroderen van de afdekkende kleilaag is m.a.w. dezelfde als voor het zandig materiaal. De verklaring hiervoor is dat de sterkte van de kleilaag afhangt van steun van de onderliggende zandlaag. Eenmaal die zandlaag is weggeërodeerd, erodeert de kleibekleding ongeveer even snel als het zandig materiaal.

Wat betreft laterale bresgroei, gedraagt de zanddijk met kleibekleding zich bijgevolg als een homogene zanddijk.

4.7.3 Besluit composietdijken

Zanddijken met kleikernen kunnen onderhevig zijn aan andere verticale bresgroeiprocessen dan homogene zanddijken, zoals afschuiving, omvallen of barsten van de complete kern. Het onderzoek naar deze processen staat echter nog in zijn kinderschoenen. De invloed van de composietlagen op verticale en laterale bresgroeisnelheden is voornamelijk nog niet eenduidig.

Tests van Hunt en Hanson (Hunt et al., 2006) wijzen op de grote invloed die erosie-resistente kernen kunnen hebben op de laterale groei van dijken. Aangezien de fase van laterale groei de belangrijkste bresgroeifase is voor (veranderingen in) bresdebieten en bijgevolg overstromingsvoorspellingen, is het van zeer groot belang gedetailleerde kennis te hebben over de locatie en de eigenschappen van deze kleikernen. Deze kennis ontbreekt momenteel grotendeels.

De verticale bresgroeisnelheid van zanddijken met kleibekleding is waarschijnlijk trager dan de snelheid voor een homogene zanddijk, maar er zijn geen testen die dit verschil kunnen aantonen, laat staan kwantificeren.

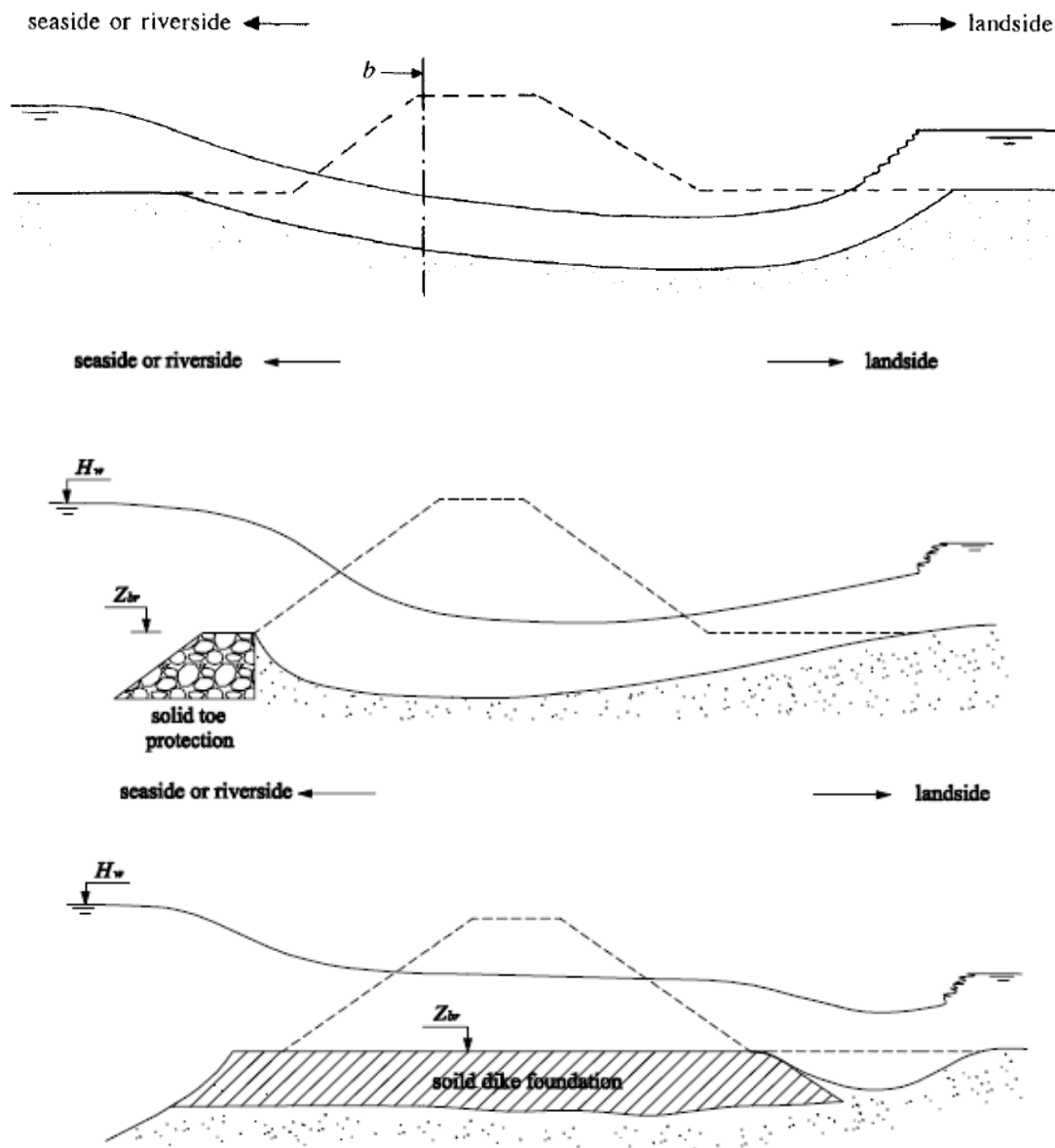
De tests van Hunt en Hanson (Hunt et al., 2006) tonen wel aan dat de kleibekleding op het riviertaalud weinig weerstand biedt voor de laterale groei van de bres. Zanddijken met kleibekleding kunnen als homogene zanddijken worden beschouwd wat betreft laterale bresgroei.

4.8 Erosie van de fundering

De erosie onder de teen is sterk afhankelijk van de erodeerbaarheid van de dijkfundering. Wanneer de bodem onder de dijk erodeerbaar is, zal er erosie plaatsvinden tot onder de teen t.g.v. de stromingssnelheid door de bres. Aan de binnenkant van de dijk zal een zogenaamd 'wiel' vormen. Dit is een verdieping aan de landzijde van de dijk t.g.v. de stroming door de bres.

Wanneer zich een slecht erodeerbare laag direct onder de dijk bevindt zal de erosie daar stoppen ter hoogte van de teen. Verderop kan zich eventueel alsnog een wiel vormen, mits de bodem dat toestaat.

Een eventuele teenbescherming of niet-erodeerbaar voorland zal het erosiegat beperken. In Figuur 37 zijn enkele situaties weergegeven.



Figuur 37 - Mechanismen voor de erosie van dijkfunderingen (Zhu, 2006)

Bij een zandfundering zal de stroming insnijden in de ondergrond vanaf de plaats waar de stroming genoeg snelheid heeft om materiaal mee te nemen. Dit zal op enige afstand voor de dijk zijn. Een eventuele stevige teenbescherming kan dit beperken.

Wanneer een dijk gebouwd is op een fundering van klei zal de stroming niet insnijden ter plaatse van de dijk. Als in het achterland wel zand aanwezig is, kan dit wel meegenomen worden door de stroming en kan er daar alsnog insnijding plaatsvinden.

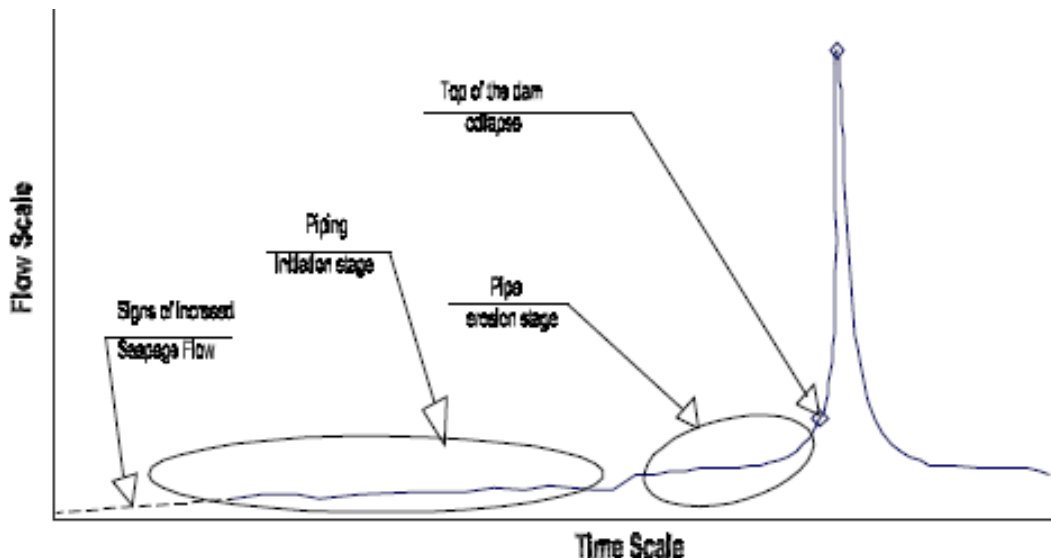
Het proces van erosiefundering kan wederom beschreven worden in termen van de algemene (vergelijking 9), waarbij $E = E_{bo}$.

4.9 Piping-processen

In § 3.2 worden de piping-processen beschreven vanaf bresinitiatie tot volledig falen van de dijk. Zoals vermeld in dit hoofdstuk, vindt piping plaats in ondoorlatende dijken met een doorlatende onderlaag. De kwel bij piping gaat niet *door* de bekleding maar *onder* de bekleding. Piping komt dan ook slechts voor bij de vermelde dijktypes 2 en 4 (Tabel 3).

In deze § worden enkel de fysische processen beschreven die voorkomen eenmaal de fase van bresgroei is gestart, dat wil zeggen dat een doorgaande pipe door de dijk is gevormd. Een typisch hydrogram van falen als gevolg van 'piping' wordt gegeven in Figuur 38.

De verschillende fasen van bresgroei door piping die gebeuren onder invloed van erosieprocessen en geofysische processen, worden verder beschreven.

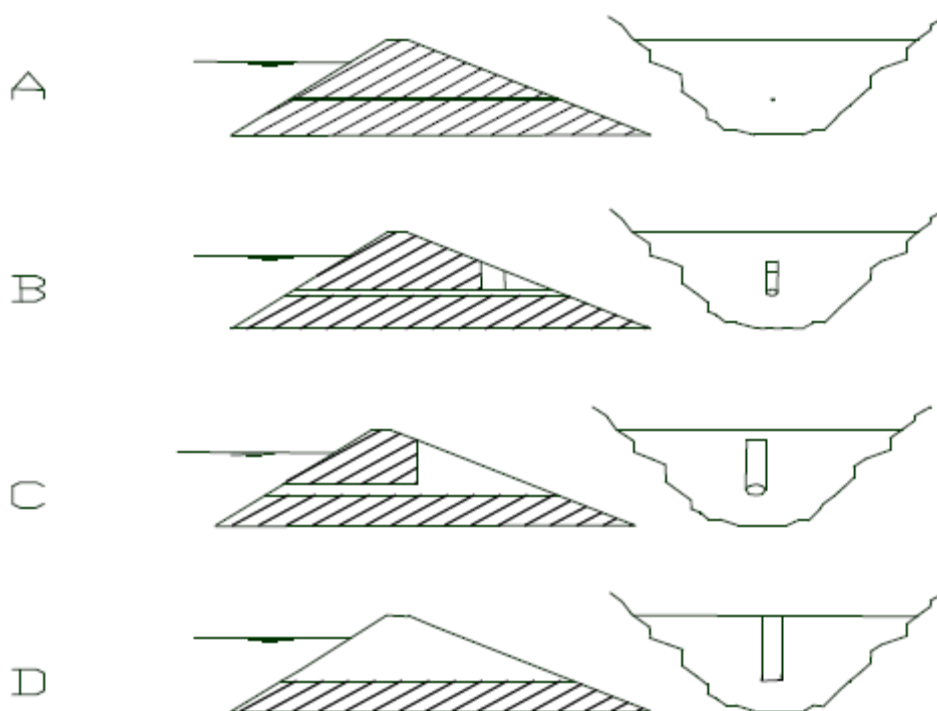


Figuur 38 - Typisch verloop van piping processen (Mohammed et al., 2002).

4.9.1 Fasering bresgroei

In § 3.2 werden reeds de verschillende fasen voorgesteld vanaf initiatie van piping. Het proces van erosie van de doorgaande pipe tot volledig falen kan echter ook nog eens opgedeeld worden in verschillende deelprocessen (letters verwijzen naar Figuur 39):

- Kanaalerosie (A)
- Terugschrijdende erosie boven pipe (B, C)
- Instorten kruin boven pipe (D)
- Overloop (processen zoals beschreven in § 4.3 tot § 4.7)



Figuur 39 - Verschillende piping deelprocessen (Mohammed et al., 2002).

4.9.2 Kanaalerosie

Eerst zal de stroming door de pijp het materiaal in de pijp eroderen. De stroming is te beschrijven door de vergelijking van buisstroming (§ 4.2.6). De korrelgrootte, de stroomsnelheid en de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de pijp bepalen de mate van erosie. De verbreding van de pijp wordt beschreven aan de hand van de procedure uitgewerkt door Fread. De verbreding wordt uniform verondersteld langsheen de volledige lengte van de pijp, en de erosie van bodem en top wordt even groot verondersteld. Het volume sediment dat wordt geërodeerd (V_s) kan worden berekend aan de hand van verschillende sedimenttransportformules, maar wordt door een aantal modellen (NWS BREACH, RUPRO) enkel berekend aan de hand van de formule van Meyer-Peter & Muller:

$$V_s = Q_s \Delta t \quad (\text{Vergelijking 42})$$

Waarbij:

Q_s = Sedimenttransport-debiet (kg/s)

Δt = tijdstap (s)

De analyse van de IMPACT-testen voor het FLOODSITE-project kon niet éénduidig vastleggen wat precies de erosievorm was, die optrad in het kanaal (kliferosie, oppervlakte-erosie of een combinatie van beiden). Daarom zal men zich voorlopig moeten beperken tot eenvoudige vergelijkingen gebaseerd op sedimenttransportformules zoals bovenstaande.

4.9.3 Terugschrijdende erosie

Terugschrijdende instorting van het landtalud boven de pijp vindt plaats doordat het gewicht van het materiaal boven de buis op een gegeven moment groter wordt dan de schuifweerstand van de bodem. Hierdoor zal er van stroomafwaarts naar stroomopwaarts steeds meer materiaal in de buis vallen en afgevoerd worden.

Dit proces was duidelijk waarneembaar tijdens het falen van de Teton Dam in 1976, en tijdens de IMPACT test3-03 (Figuur 40).



Figuur 40 - Terugschrijdende erosie vanaf de stroomafwaartse kant van de pipe (FLOODSITE)

De ratio tussen het gewicht van het materiaal boven de pijp en wrijvingskrachten van de grond wordt berekend. Eenmaal deze ratio groter is dan 1, valt materiaal in de pipe.

4.9.4 Instorten kruin

Door terugschrijdende erosie verkleint het kruinvolume boven de pipe. De drukkracht van het water kan op een bepaald moment groter worden dan de wrijvingskrachten die de kruin op zijn plaats houden. Op dat moment kan de kruin weggeduwd worden. Een gelijkaardig proces kan zich voordoen doordat de kruin onder eigengewicht gaat bezwijken, op het moment dat deze groter wordt dan de krachten die de kruin op zijn plaats houden.

Tijdens de IMPACT test3-03 die werd geanalyseerd in kader van het FLOODSITE-project (Morris en Hassan, 2009), bleef erosie verdergaan tot praktisch de kruinhoogte werd bereikt (Figuur 41). Uiteindelijk begaf de kruin het niet onder zijn eigen gewicht, maar door de drukkracht van het water tegen de resterende boog.



Figuur 41 - Erosie van de pipe tot bijna de kruinhoogte is bereikt (FLOODSITE)

4.9.5 Overloop

Eenmaal de kruin is ingestort, vindt erosie en faling plaats zoals reeds beschreven bij overloop (§ 4.2 tot § 4.7).

4.10 Bresgroeiprocessen per dijktipe

In de onderstaande tabellen is een overzicht te vinden van het effect van de verschillende mechanismen op de verschillende dijktypen bij overloop en piping. In deze tabellen is terug te vinden indien een mechanisme voorkomt en zo ja, hoe groot de effecten kunnen zijn voor bresgroei. De classificatie in de tabel is als volgt:

- 0 - mechanisme komt niet voor
- + - mechanisme kan voorkomen maar de effecten zijn niet groot
- ++ - de effecten van het mechanisme zijn redelijk groot
- +++ - de effecten van het mechanisme zijn erg belangrijk voor het faalproces

In de samenvattende Tabel 6 zijn bresinitiatieprocessen (zoals versteiling talud door oppervlakte-erosie) niet inbegrepen.

Voor de varianten van de dijktipes met voorland (Tabel 3) zijn de te onderscheiden bresgroeiprocessen per dijktipe identiek. Enkel voor de erosie van de fundering en voor de kans op piping zal dit voorland een rol spelen op de mate waarin deze processen voorkomen. Een voorland zal de kans op piping verkleinen door het verlengen van de kwelweg en zal de erosie van de fundering verminderen.

Tabel 6 - Te onderscheiden bresgroeiprocessen per dijktype

Dijktype	OVERLOOP							PIPING	
	Oppervlakte-erosie	Klif-erosie	Hellings-instabiliteit + voortschr. klif	Afduwen top	Verbreiding door blokfaling	Verbreiding door afschuiven	Erosie van de fundering	Erosie kanalen + terugschrijdende erosie	Instorten kruin
	+++	+	++	+	+	+++	+++	0	0
	++	++	++	++	++	++	+++	+++	+++
	++	++	++	++	++	++	0	0	0
	+	+++	+++	+++	+++	+	+++	+++	++
	+	+++	+++	+++	+++	+	0	0	0

5 Sterkte/zwakte analyse

In dit hoofdstuk worden de sterktes en zwaktes van de bresgroeimodellen besproken op basis van hun beschrijving van de processen, waarbij steeds de relatie gelegd wordt met de gedetailleerde beschrijvingen in § 4. Processen horend bij bresinitiatie worden niet in detail beschreven. Of er bvb al dan niet vegetatie op het landtalud in rekening kan worden gebracht, is in dit hoofdstuk niet aan de orde. Aangezien oppervlakte-erosieprocessen (die in dit hoofdstuk wel uitvoerig worden besproken) aan de basis liggen van bresinitiatie (onder meer terugschrijdende erosie), wordt bresinitiatie toch gedeeltelijk in rekening gebracht.

De modellen gekozen in deze studie, zijn NWS BREACH, HR BREACH (geïntegreerd in IWRS), SIMBA (WINDAM), BRES-VISSER, BRES-ZHU, RUPRO (CASTORDigue), Verheij-VanderKnaap (al dan niet geïntegreerd in SOBEK) en de 'Dambreak structure' (MIKE11). Deze modellen zijn gekozen omdat zij veelvuldig worden toegepast (NWS BREACH, HR BREACH, MIKE11), lovende kritieken krijgen in onderzoeksprojecten (BRES-VISSER, BRES-ZHU, HR BREACH), zeer goed scoren in vergelijkende tests (HR BREACH, RUPRO, SIMBA, SOBEK) of veelbelovend zijn voor toekomstige ontwikkelingen (HR BREACH, SIMBA).

De nadruk in deze studie ligt op modellen die gebaseerd zijn op de beschrijving van de fysische processen die voorkomen tijdens bresgroei. De analyses van de IMPACT-testen in kader van FLOODSITE toonden immers aan dat sterk vereenvoudigde vergelijkingen slechts toepasbaar zijn voor dijken waarvan men zeker is dat deze gelijkaardig zijn aan de dijken waarmee de vereenvoudigde vergelijkingen zijn opgesteld en gecalibreerd. Fysisch onderbouwde modellen zijn daarom in de regel te verkiezen boven sterk vereenvoudigde vergelijkingen (Morris et al., 2009b).

Naast de fysische modellen, worden tevens enkele minder gedetailleerde semi-fysische modellen besproken, die momenteel veelvuldig worden gebruikt ter simulatie van bresgroei. Deze modellen hebben immers verschillende voordelen t.o.v. de meer ingewikkelde modellen, waaronder het voordeel van de eenvoud. Door ook deze modellen in de analyse te betrekken, kan de vergelijking worden gemaakt tussen beide type modellen. Zowel de 'quick- en dirty' formule van Verheij-Van der Knaap (geïntegreerd in het hydrodynamische model 'SOBEK') als de 'MIKE11'-Dambreak structure worden besproken.

Enkel de bresmodules worden beschreven. De integratie van de bresmodule in hydrodynamische modellen werd reeds besproken in een vorige deelopdracht van deze studie (Van Hoestenbergh et al., 2010), en komt in de laatste deelopdracht van deze studie nog aan bod.

Eerst worden de verschillende bresgroeimodellen geanalyseerd in § 5.1. In § 5.2 wordt alle informatie samengebracht in Tabel 7 en Tabel 8.

5.1 Modelomschrijving

5.1.1 NWS BREACH

Overloop en oppervlakte-erosie

Er wordt verondersteld dat zich in eerste instantie een rechthoekig kanaaltje vormt in het landtalud van de dijk. Dit kanaaltje zal steeds dieper eroderen en door de kruin heensnijden. Pas als het kanaal in het landtalud zodanig diep is geërodeerd dat het riviertalud (Figuur 42, lijn B-B) is bereikt, zal er ook kruinverlaging plaatsvinden. De onderkant van het kanaal zal tot maximaal tot de voet van de dijk eroderen (H_L in Figuur 42).

Voor de bresgroeifase, eenmaal de kruin onder het niveau H_u is geërodeerd (Figuur 42), gaat NWS BREACH uit van een stroming over een drempel met brede kruin:

$$Q_b = 3B_0(H - H_c)^{1.5} + 2 \tan(\alpha)(H - H_c)^{2.5} \quad (\text{Vergelijking 43})$$

Met

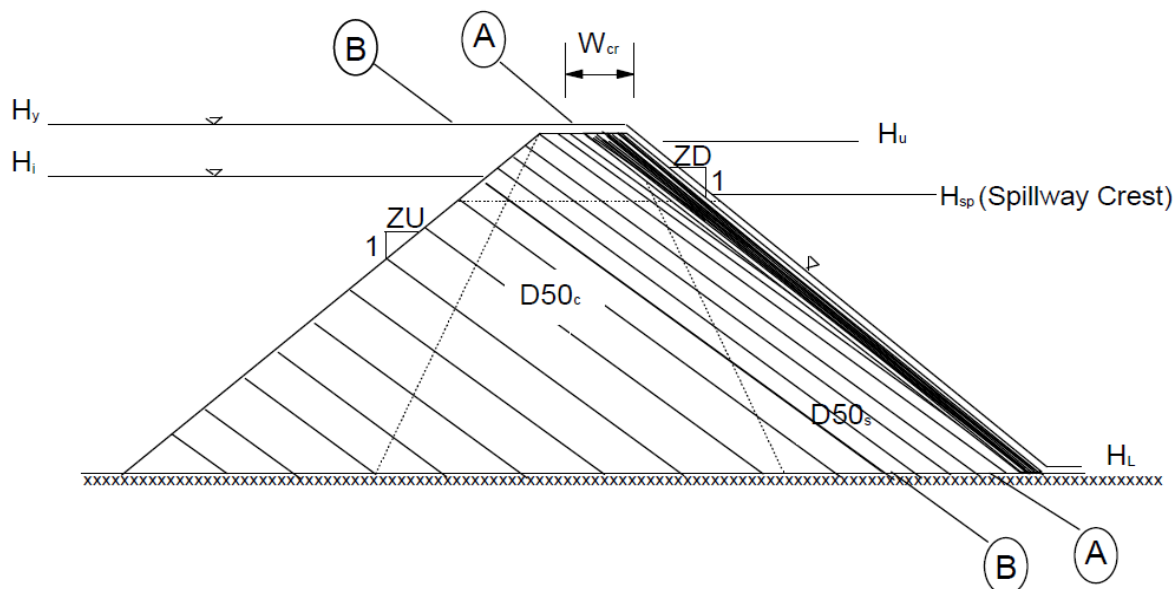
Q_b = debiet door de bres (m^3/s)

B_0 = initiele bresbreedte (m)

H = waterniveau (m)

H_c = hoogte van de kruin (m)

α = hoek zijwand bres met verticale ($^\circ$)



Figuur 42 - Schematische voorstelling dijklichaam NWS BREACH (FLOODSITE)

Een correctiefactor wordt toegepast eenmaal de overlaat verdrongen is:

$$Q_b = S_b Q_{b'} \quad (\text{Vergelijking 44})$$

Waarbij:

$$S_b = 1.0 - 2.78 \left(\frac{Y_t - H_c}{H - H_c} - 0.67 \right)^3 \quad (\text{Vergelijking 45})$$

Met

Y_t = waterstand stroomafwaarts bres (m)

De stroomcondities in de bres worden beschreven door een (quasi-stationaire) eenparige stroming. Argumenten hiervoor zijn de zeer korte afstand van de bres en de sterke helling afwaarts, waardoor verondersteld wordt dat er weinig variatie is in stroming doorheen de bres. De aanname van eenparige stroming doorheen de bres impliceert een unieke relatie tussen debiet en waterdiepte voor elke beschouwde diepte. Uit de berekening van het debiet Q_b kan men bijgevolg (met de klassieke Manning-formule) de waterhoogte in de bres afleiden.

Deze waterdiepte is één van de parameters nodig ter berekening van het sedimenttransport. Terugschrijdende erosie en de mate van verlaging van de kruin wordt immers afgeleid uit de hoeveelheid sediment die (in evenwicht) door de stroming kan getransporteerd worden. Dit sedimenttransport wordt berekend aan de hand van de formule van Meyer-Peter en Muller nl. (Fread, 1988):

$$Q_s = 3.64(D_{90}/D_{30})^{0.2} P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1.1} (DS - \Omega) \quad (\text{Vergelijking 46})$$

Waarbij de belangrijkste parameters de verschillende korrelgroottes D_x zijn, D de hydraulische diepte is, S de helling van het landtalud en Ω een afgeleide is van de kritische schuifspanning van het beschouwde dijkmateriaal.

Bij al deze stromingsvergelijkingen wordt verondersteld dat de helling van de bres dezelfde is als de helling van het landtalud.

Afduwen top

Het afduwen van de top ('sudden collapse') vindt plaats wanneer de krachten die de kruin op zijn plaats houden, kleiner zijn dan de krachten t.g.v. het water. De gebruikte krachtenstelsels zijn degene vermeld in § 4.5.

Bresverbreding

In eerste instantie zal het kanaal rechthoekig blijven, met een breedte die afhankelijk is van de diepte. Vanaf een kritieke diepte H_k' , welke afhankelijk is van de inwendige wrijving, cohesie en soortelijk gewicht van het materiaal, zullen de wanden instabiel worden en instorten. Een trapezevormig kanaal wordt zo gevormd. De erosie wordt gelijkmatig aangenomen langs de bodem en de wanden tenzij net instorting plaats heeft gevonden. Op dat moment zal alleen het in de bres gestorte sediment getransporteerd worden, vooraleer de bres verder kan eroderen. Hierna wordt het voorgaande proces herhaald totdat de voet van de dijk bereikt wordt (Figuur 43).

De kritieke diepte wordt als volgt bepaald, voor 3 opeenvolgende hellingsinstabiliteiten (Figuur 43):

$$H'_k = \frac{4C \cos \phi \sin \theta'_{k-1}}{\gamma [1 - \cos(\theta'_{k-1} - \phi)]} \dots k = 1, 2, 3 \quad (\text{Vergelijking 47})$$

Met

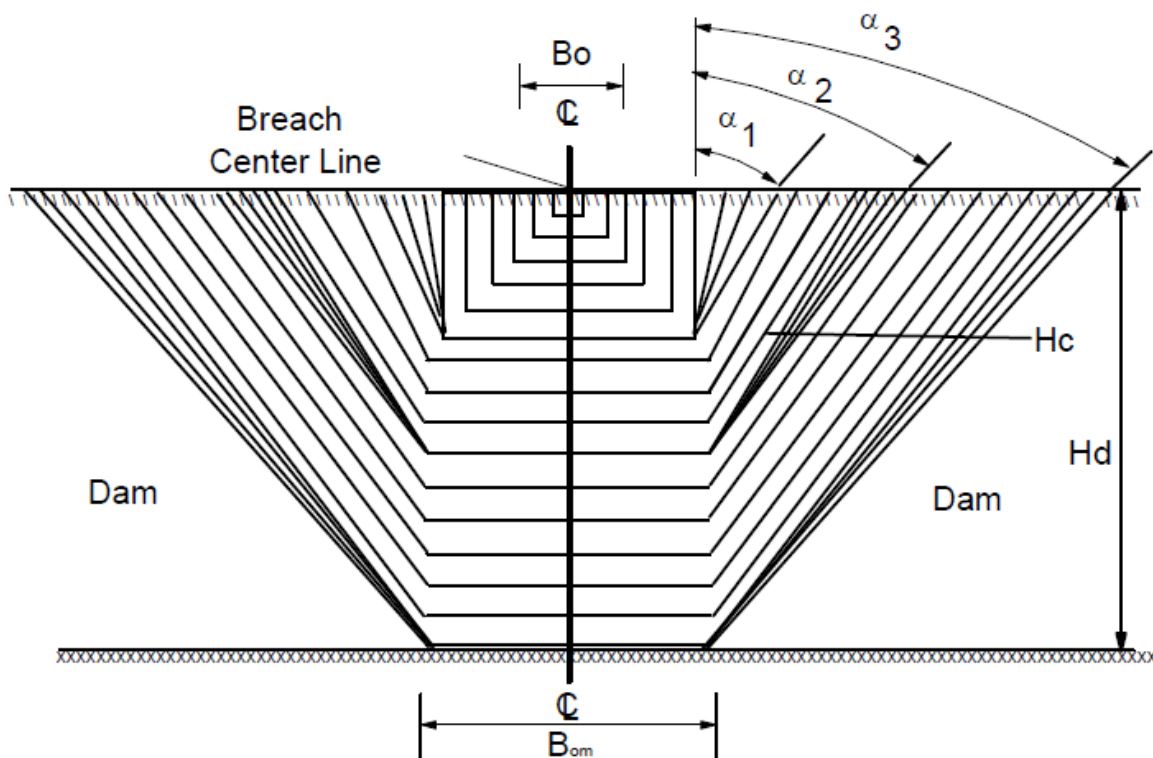
H'_k = kritieke bodemdiepte (m.b.t. de wandhelling) (m)

C = cohesie (N)

Φ = hoek van kritische helling (°)

Θ = hoek van breswand met verticale, af te leiden van hoek van kritische helling (°)

Dit proces van hellingsinstabiliteit bij het bereiken van opeenvolgende kritische dieptes zal doorgaan tot de voet van de dijk bereikt is, waarna de bres alleen nog in de breedte zal groeien. De maximale bresbreedte moet door de gebruiker worden aangegeven.



Figuur 43 - Bresverbreding in het model NWS BREACH (Fread, 1988)

Hierbij dient te worden opgemerkt dat bovenstaande (vergelijking 47) voor het bereiken van kritische diepte in tegenstelling is met de meeste formules terug te vinden in de literatuur voor de bepaling van de maximale hoogte van een verticaal talud zonder bovenbelasting, waar een factor '2' in de teller voorkomt (in plaats van '4').

Piping

Bij piping gaat het model uit van de vorming van een in eerste instantie rechthoekig kanaal. Het debiet wordt echter berekend met de functie voor buisstroming:

$$Q_b = A \left[2g(H - H_p) / (1 + fL/D) \right]^{0.5} \quad (\text{Vergelijking 48})$$

Met

Q_b = debiet door de 'pipe' (m^3/s)

A = oppervlakte van de buis (m^2)

g = zwaartekrachtsconstante ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H = waterniveau (m)

H_p = niveau van de buis (m)

f = wrijvingscoëfficiënt van Darcy (-)

L = lengte van de buis (m)

D = diameter van de buis (m)

f = de wrijvingsfactor (bepaald met 'Moody curves', afhankelijk van o.m. korreldiameter) (m)

De erosie is uniform verondersteld in horizontale en verticale richting. Het is niet duidelijk of dit ook geldt voor zijdelingse erosie in de pijp.

Een overgang vindt plaats van buisstroming naar stroming over een overlaat, op het moment dat de waterhoogte kleiner wordt dan een kritische hoogte bepaald door:

$$H < H_p + 2(H_{pu} - H_p) \quad (\text{Vergelijking 49})$$

Waarbij

H = totale waterhoogte (m)

H_{pu} = hoogte bovenkant pipe (m)

H_p = hoogte centrum pipe (m)

Op het moment van overgang van buisstroming naar stroming over een overlaat, wordt het overgebleven kruinmateriaal boven de pipe verondersteld in te storten en getransporteerd te worden, vooraleer verdere erosie van de bres verder kan gaan. Vervolgens erodeert het overgebleven dijklichaam via de reeds beschreven overloop-processen.

Composietdijken

NWS BREACH model kan niet enkel bresinitiatie en bresgroei voor homogene dijken maar ook voor composietdijken simuleren. Een afdekkende laag kan onderscheiden worden van de kern. In Figuur 42 worden deze zones voorgesteld door $D50_c$ en $D50_s$. Daarnaast kan een bekleding van het landtalud worden gesimuleerd, bestaande uit grasbekleding of materiaal met een grovere fractie dan de afdekkende laag. In tegenstelling tot de afdekkende laag is de bekleding niet relevant voor bresgroei.

Overige processen

Een aantal processen vermeld in hoofdstuk 4 worden niet of slechts gedeeltelijk beschreven:

Kliferosie

- Er wordt geen rekening gehouden met kliferosieprocessen voor cohesieve dijken. Volgens het model zal de bres gelijkmatig door de dijk heen 'snijden'.

Erosie van de fundering

- De maximale bresdiepte is de top van de fundering

Bresverbreding

- Het model veronderstelt een gelijkmatige erosie langs de bodem en de wanden.
- Voor de instorting wordt een grove schematisatie gebruikt

Piping

- Het model omschrijft een initieel rechthoekig kanaal

Verder is nog te vermelden dat NWS BREACH geen numerische berekeningen uitvoert, maar bresgroei simuleert aan de hand van een (iteratief) analytisch berekeningsproces.

5.1.2 HR BREACH

In dit hoofdstuk worden de processen beschreven zoals geïmplementeerd in Infoworks RS 10.5.6. Een aantal extra processen (e.g. variabele debietscoëfficiënten) zullen waarschijnlijk binnen afzienbare tijd geïmplementeerd worden in de volgende versies van Infoworks, maar voorlopig wordt dit hier niet in rekening gebracht tenzij vermeld.

In Infoworks RS 10.5.6 kan de gebruiker zelf de dimensies van een bestaande bres ingeven (zonder verdere bresgroei), of automatisch een bres laten initiëren en groeien op basis van het HR BREACH model. Hieronder wordt enkel de specificaties van de automatische bresgroei gegeven.

Overloop en oppervlakte-erosie

Het debiet door de bres wordt berekend aan de hand van de klassieke overlaatvergelijking, maar de debietscoëfficiënt C_d wordt niet automatisch gelijk gesteld aan 1 (Morris et al., 2009):

$$Q_b = C_d B_b H_b^{3/2} \quad (\text{Vergelijking 50})$$

Waarbij:

Q_b	=	debiet door de bres (m^3/s)
C_d	=	debietscoëfficiënt (-)
B_b	=	bresbreedte (m)
H_b	=	totale waterhoogte over de bres (m)

In kader van FLOODSITE wordt de implementatie van variabele debietscoëfficiënten tijdens de groei van de bres beschreven, om de wijziging van bresvorm gedurende het bresgroeiproces in rekening te brengen in de debietsberekening. Deze implementatie was tijdens de opmaak van dit rapport nog niet gebeurd.

De invloed van het afwaarts waterpeil in geval van gestuwde stroming wordt in rekening gebracht via een variant van (vergelijking 2).

De stroomprofielen opwaarts en afwaarts de kritische sectie worden berekend door een (aangepaste) niet-uniforme stroomvergelijking. Standaard wordt ervan uitgegaan dat de overgang van subkritisch naar superkritisch plaatsvindt ter hoogte van de kruin, maar in HR BREACH kan de locatie van de kritische sectie door de gebruiker zelf gekozen worden.

De oppervlakte-erosie wordt berekend aan de hand van sedimenttransportvergelijkingen (Meyer-Peter & Muller, Visser, ...) of erosievergelijkingen. De erosievergelijkingen die kunnen toegepast worden zijn de vergelijking van Chen (vergelijking 9) of de vergelijking van Hanson, die zeer gelijkaardig is aan de vergelijking van Chen, nl:

$$\varepsilon = k_d (\tau - \tau_c) \quad (\text{vergelijking 51})$$

Waarbij de factor k_d de erodeerbaarheidscoefficiënt wordt genoemd (N/m^2).

Kliferosie

HR BREACH voorziet de mogelijkheid om migratie van de klif naar opwaarts te simuleren, maar enkel voor homogene dijken. Klifmigratie wordt bepaald aan de hand van de energie-gebaseerde vergelijking zoals beschreven in SIMBA (Temple et al., 2005):

$$\frac{dX}{dT} = C(qH)^{1/3} \quad (\text{Vergelijking 52})$$

Waarbij

dX/dT = klifmigratiesnelheid (m/s)

C = klifmigratiecoëfficiënt ($1/s^{2/3}$)

q = eenheidsdebiet (m^2/s)

H = klif overstorthoogte (m)

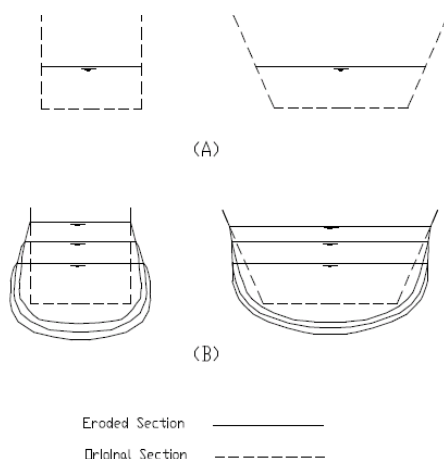
De klifmigratiecoëfficiënt 'C' dient te worden ingegeven per laag.

Wat betreft de initiële locatie waar kliferosie start kan gekozen worden tussen kruin en/of teen van de dijk.

Bresverbreding

De effectieve schuifspanningsverdeling over de bres wordt gebruikt om de bresverdieping én verbreding te berekenen. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de maximale laterale erosie gelijk is aan de verticale erosie, en dat deze maximale laterale erosie dicht bij de bodem optreedt (Figuur 44).

Er kan in HR BREACH voor de erosievergelijkingen een breedte/diepte ratio ingegeven worden, waarmee de grootte van zijdelingse erosie wordt afgeleid van de bodemerosie. Aanbevolen waarde is 0.75 (Chow, 1959), wat wil zeggen dat de grootte van de zijdelingse erosie 0.75x de waarde van bodemerosie is. Wil men de laterale erosie doen toenemen, moet deze waarde worden verhoogd (Manual Infoworks 10.5).



Figuur 44 - Bresverbreding in HR BREACH. (A) stelt mogelijke originele secties voor, (B) mogelijke bresvorm na drie tijdstippen (Mohamed et al., 2002)

Blokfaling

Het model neemt aan dat de bres aan de bodem en onderaan de zijkanten erodeert en dat de breedte van de bovenkant van de bres in eerste instantie constant blijft (Figuur 44). Als de wand van het kanaal voldoende ondermijnd is, zal de wand door instabiliteit bezwijken door omvallen (blokfaling) of afschuiven. Als dit gebeurd is, herhaalt zich het proces van ondermijning van de wand en het instorten ervan.

In het model gebeurt een sectie per sectie stabiliteitsanalyse, waarbij per tijdstap de stabiliserende en destabiliserende krachten worden afgewogen ten opzichte van elkaar. Stabiliserende krachten zijn waterdrukken in het breskanaal, wrijvingskrachten en cohesiekrachten. Destabiliserende krachten zijn zwaartekrachten en waterdrukken in het dijklichaam. Een actuele treksterkte wordt berekend in het faalvlak gegeven de hydrostatische druk en andere krachten. Als de actuele treksterkte groter is dan de toegelaten treksterkte, treedt blokfaling op (Mohammed, 2005).

Net als bij de beschrijving van Zhu (§ 4.4.4) is de laterale blokfaling slechts een gevolg van de laterale

erosie en uitholling, dus is het minder belangrijk hier dieper in te gaan op de kwantitatieve beschrijving van momentenvergelijkingen.

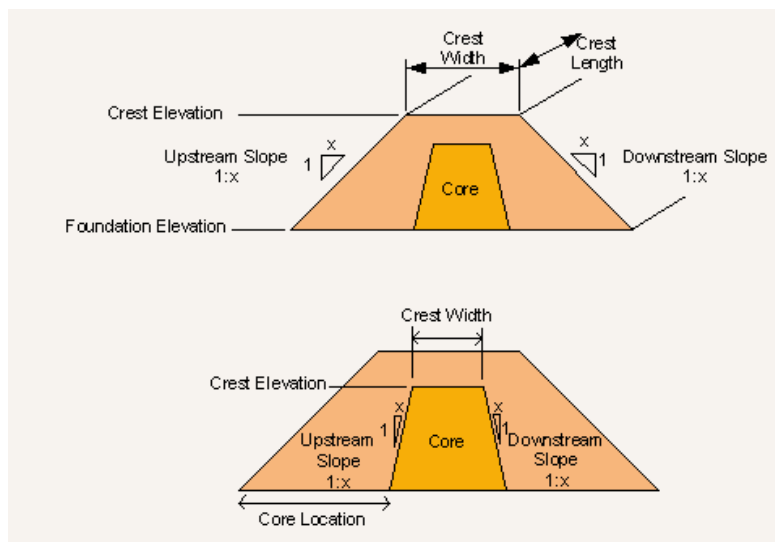
Afschuiving

Ook afschuiven ten gevolge van hellingsinstabiliteit kan word berekend door HR BREACH. Per tijdstip wordt terug een stabiliteitsanalyse uitgevoerd, maar is treksterkte grotendeels afwezig.

In HR BREACH kan men kiezen tussen stabiliteitsanalyse met blokfaling ('tension failure') en/of afschuiving ('shear failure'), naargelang de cohesiviteit van het dijklichaam.

Composietdijken

In HR BREACH kan men de eigenschappen ingeven van een 'BREACH outer layer' en een 'BREACH core layer', waarmee dijken met een cohesieve kern kunnen worden gemodelleerd, of zanddijken met een cohesieve afdekkende laag. In Figuur 45 worden de verschillende lagen schematisch weergegeven.



Figuur 45 - Composietdijk in HR BREACH (Manual Infoworks 10.5.6., Wallingford)

In Figuur 46 worden de in te geven eigenschappen per layer gegeven, waaronder de kritische schuifspanning, kritische hellingshoek, cohesie, treksterkte, erodeerbaarheidscoëfficiënt k_d en klifmigratiesnelheidscoëfficiënt 'C'. Voor gedetailleerde informatie over erodeerbaarheidscoëfficiënt k_d en klifmigratiesnelheidscoëfficiënt 'C' wordt verwezen naar deelopdracht 1 van deze studie.

☐ Dam with DS Face Protection		☐ Include Initial Notch	
Protection Type	Grass	#D	Cover Condition
			Poor Cover-CIRIA 116 Data
Reinforcement Type	Meshes	#D	Riprap D50 (mm)
			0.000
Friction Angle (degree)	0.000	#D	
Outer Layer Dam Geometry			
Outer Crest Elev (m AD)	0.000	#D	Foundation Elev (m AD)
			0.000
Outer DS Slope	0.000	#D	Outer US Slope
			0.000
Outer Layer Dam Properties			
Outer D50 size (mm)	0.000	#D	Outer Friction Angle (degree)
			0.000
Outer Cohesion	0.000	#D	Outer Porosity
			0.000
Outer Mannings	0.000	#D	Outer Tension Str
			0.000
Outer Erode Coeff	0.000	#D	Outer Plasticity Index
			0.000
Outer Layer Dam Additional Properties			
Outer D30 size (mm)	0.000	#D	Outer D90 size (mm)
			0.000
Outer c	0.540	#D	Outer b
			0.002
Outer csecs	0.000	#D	

Figuur 46 - In te geven eigenschappen in HR BREACH per dijklaag (Manual Infoworks 10.5.6., Wallingford)

Daarnaast is er ook de mogelijkheid om een aantal bekledingstypes in te geven, zoals gras of breuksteen.

In de literatuur wordt vermeld dat HR BREACH model voorziet in een aantal faalmechanismen voor een zanddijk met kleikern nl. afglijden, omvallen of bezwijken door buiging (en barsten) van de kern (zie § 4.7). In Infoworks 10.5.6 is over deze faalmechanismen echter geen informatie terug te vinden, waardoor vermoed wordt dat deze mechanismen niet (volledig) zijn geïmplementeerd in de software.

Piping

Alle piping-processen worden door HR BREACH beschreven zoals vermeld in § 4.9. De wrijvingsfactor 'f' zoals vermeld in (vergelijking 8) wordt berekend aan de hand van de mediaan korreldiameter.

Overige processen

Een aantal processen vermeld in hoofdstuk 4 worden niet of slechts gedeeltelijk beschreven:

Kliferosie

- Uit de beschikbare literatuur en de manual van Infoworks is het niet duidelijk in hoeverre erosie aan de basis van de klif en blokfaling in rekening wordt gebracht bij HR BREACH

Afduwen top

- niet beschreven

Erosie van de fundering

- De maximale bresdiepte is de top van de fundering

Onzekerheidsanalyse

- Om rekening te houden met de onzekerheid omtrent de materiaaleigenschappen is een probabilistische aanpak mogelijk aan de hand van een 'waarschijnlijkheidscoëfficiënt', dit is een factor waarmee onzekerheden in het materiaal aangeduid kunnen worden

5.1.3 SIMBA

- Het SIMBA-model werd reeds uitgebreid besproken in deelopdracht 1 van deze studie. Enkel de processen die optreden bij simulatiefases 3 en 4 van SIMBA zijn relevant voor bresgroei, en worden hier besproken.

Overloop – oppervlakte-erosie

SIMBA gebruikt vereenvoudigde stromingsvergelijkingen. Het bresdebiet wordt berekend met de klassieke overlaatvergelijking, waarbij de debietscoëfficiënt standaard gelijk verondersteld wordt aan 1 (gebruiker kan coëfficiënt wel zelf aanpassen). Opstuwingseffecten worden vereenvoudigd in rekening gebracht via een correctiefactor, als variant op (vergelijking 45). Voor de stroming op het landtalud wordt eenparige stroming verondersteld.

Het schuifspanningsconcept weergegeven in (vergelijking 9) wordt in SIMBA gebruikt ter beschrijving van de erosieprocessen van het landtalud of van de dijk kruin tijdens bresgroei.

Kliferosie

Erosie basis klif

De erosie van de basis van de klif wordt eveneens beschreven met het schuifspanningsconcept (vergelijking 9), waarbij de spanning het maximum is van:

- de maximale schuifspanning aanwezig op het landtalud (berekend met (vergelijking 9))
- de spanning veroorzaakt door de duikende jet met veronderstelling van laagwater, weergegeven door de relatie (Robinson, 1992) :

$$\tau = \gamma d_c 0.011 \left(\frac{H}{d_c} \right)^{0.582} \quad (\text{Vergelijking 53})$$

Met:

- τ = bodemschuifspanning (N/m²)
- γ = eenheidsgewicht van water (kg)
- d_c = kritische waterdiepte (m)
- H = klifhoogte (m)

Klifmigratie en afschuiven

Ook in SIMBA wordt het falen van de klif als oorzaak gezien van migratie van de klif. Voor het voortschrijden van de klif kan gekozen worden tussen 2 opties nl. een energiegebaseerd proces (uitgebreid besproken in deelopdracht 1) en een schuifspanningsproces. In de meest recente versie van het SIMBA-model wordt van het schuifspanningsproces uitgegaan (schriftelijke communicatie Hanson, 2010). De vergelijking die toegepast wordt in SIMBA om het migreren van de klif te beschrijven, is afgeleid door het combineren van de Culman-stabiliteitsanalyse van afschuiven (Figuur 25, § 4.4.5) met volgende eenvoudige aannames:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{T}{t_f} \quad (\text{Vergelijking 54})$$

$$t_f = \frac{E_v}{k_d (\tau_e - \tau_c)} \quad (\text{Vergelijking 55})$$

Waarbij

dX/dt = klifmigratiesnelheid (m/s)

T = migratie-afstand per kliffalen (m)

t_f = tijd tussen kliffalen, bepaald door E_v (s)

E_v = erosie op het verticale vlak van de klif (m^3/s) (Figuur 25)

Er wordt m.a.w. verondersteld dat de tijd tussen kliffalen kan bepaald worden op basis van de hoeveelheid (oppervlakte-)erosie op de verticale wand (E_v) nodig voor het induceren van hellingsinstabiliteit (via afschuiven).

De grootte van E_v kan analytisch afgeleid worden uit voorgaande vergelijkingen en de Culman-analyse. Mits bepaling van k_d en de schuifspanningen kan dan volgende vergelijking toegepast worden ter bepaling van klifmigratiesnelheid (Hanson, 2001):

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{H}{2E_v} \right) k_d (\tau_e - \tau_c) \quad (\text{Vergelijking 56})$$

Naargelang de klif migreert door de kruin, neemt de klifhoogte H toe en bijgevolg verhoogt ook de klifvoortschrijdingssnelheid.

Bresverbreding

Zolang de dijk nog verticaal erodeert, wordt de groei in breedte proportioneel verondersteld met de klifmigratiesnelheid. De ratio tussen klifmigratiesnelheid en laterale erosie is user-defined, maar Hanson (Hanson et al., 2005) geeft typisch een waarde van 1.0. Het model veronderstelt echter dat de laterale groei in deze fase beperkt blijft tot de breedte van de aanstroming.

Hunt (2009) geeft recenter een ratio van 0.7 tussen de effectieve schuifspanning op de breszijwanden en bresbodem.

Eenmaal de bres contact heeft gemaakt met het reservoir, geldt de beperking van laterale groei niet meer. De laterale groei wordt ook in deze fase proportioneel verondersteld met de klifmigratiesnelheid.

Eenmaal de klif verdrongen is, vermindert het belang van de kliferosie en wordt de laterale groei proportioneel verondersteld met de schuifspanning zoals berekend met (vergelijking 9). Dit geldt eveneens als enkel laterale erosie voorkomt.

Composietdijken

Composietdijken kunnen (voorlopig) niet worden gesimuleerd door SIMBA. Een bekleding met gras of steenbestorting kan wel worden voorzien, maar is niet relevant voor bresgroei.

Overige processen

Afduwen top

- niet voorzien

Erosie fundering

- De klifbasis kan niet dieper eroderen dan de dijkteen.
- Piping
- Is niet voorzien in model

5.1.4 BRES – P.J. Visser

Het BRES-model van Visser behandelt enkel overloop-processen voor homogene zanddijken. Fase I en II beschrijven de bresinitiatie, Fase III beschrijft de verticale bresgroei en Fase IV en V beschrijven de laterale bresgroei.

Overloop en oppervlakte-erosie

Het bresdebiet wordt gegeven door de algemene overlaatvergelijkingen weergegeven in § 4.2.1. Aan het opwaartse punt van het landtalud gaat het BRES-model uit van de overgang van subkritisch naar superkritische stroming, en komt de kritische waterdiepte voor. Afwaarts deze kritische sectie neemt de waterdiepte af volgens

$$d \approx d_n + (d_c - d_n)e^{-5x/l_n} \quad (\text{Vergelijking 57})$$

voor $0 \leq x < l_n$

Waarbij

d_c = kritische diepte op bovenkant landtalud (m)

De invloed van het afwaarts waterpeil in geval van gestuwde stroming wordt in rekening gebracht via een variant van (vergelijking 2).

Vanaf $x = l_n$ komt eenparige stroming voor. De overloop-processen op het landtalud steunen op een graduele toename van de snelheid tot éénparige stroming wordt bekomen, beschreven met vergelijkingen van § 4.2.5.

Oppervlakte-erosie wordt gekwantificeerd via de berekening van het sedimenttransport aan de hand van verschillende sedimenttransportformules. De berekende hoeveelheid sediment dat kan worden getransporteerd, wordt via de wet van behoud van massa omgerekend naar het geërodeerd volume van het dijklichaam en de vermindering in talud/kruinhoogte.

Oppervlakte-erosie veroorzaakt terugschrijdende erosie zoals beschreven in § 4.3.1. Indien de top van het landtalud door terugschrijdende erosie in contact komt met het riviertalud, treedt kruinverlaging op zoals beschreven in § 4.3.2. Door kruinverlaging zal het debiet door de bres sterk verhogen.

Bresverbreding

In fase III begint de bres ook lateraal te groeien. Het bresinitiatieproces in fases I en II heeft geresulteerd in breswand-hellingen gelijk aan de hoek van kritische helling (of interne wrijvingshoek). Tijdens fase III is de erosie van de bodem (E_{bo}) groter dan de erosie van de zijwanden (E_{sl}), doordat grotere stroomsnelheden voorkomen bij de bodem. De laterale groei van de bres wordt in deze fase dan ook bepaald door de erosiesnelheid van de bresbodem. De helling van de zijwanden blijft daarbij gelijk aan de kritische helling, door het vallen van materiaal bovenaan de zijwanden in de bres bij hellingsinstabiliteit (afschuiven/blokfalen). De erosiesnelheid van de bodem wordt gegeven door (vergelijking 13).

In fases IV en V wordt de laterale bresgroei gecontroleerd door de erosie onderaan de zijwanden E_{sl} . De mate van de erosie onderaan de zijwand, die de erosie van de volledige zijwand bepaalt, wordt bepaald door de overlaat opwaarts de bres. De vergelijking die de bresverbreding weergeeft in functie van de tijd is gebaseerd op (vergelijking 39), waarbij E_{sl} gekwantificeerd wordt in functie van zandtransport, transportcapaciteit en adaptatielengte van het sedimenttransport. Dit resulteert in volgende vergelijking voor de bresverbreding in functie van de tijd tijdens fases IV en V:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{dB_t}{dt} = 2 \frac{d}{h} \frac{S_s}{(1-p)l_a \tan \gamma_1} \quad (\text{Vergelijking 58})$$

Waarbij

d = waterhoogte in bres (m)

h = dijkhoogte (m)

S_s = zandtransport bij transportcapaciteit (m^3/s)

l_a = adaptatielengte sedimenttransport (m)

p = bed porositeit (-)

γ_1 = kritische hellingshoek ($^\circ$)

Bovenstaande (vergelijking 58) geldt voor de laterale bresgroei tijdens fase IV-V van zowel types A, B en C dijken (zoals verder onderscheiden).

Erosie van de fundering

De erosie van de fundering is voornamelijk van belang bij de laatste fases (IV-V), waarbij de bres reeds verticaal is weggeërodeerd. Een onderscheid wordt gemaakt in 3 types dijken naargelang de erosiegevoeligheid van de fundering. Type A dijken worden gekenmerkt door een niet-erodeerbare fundering of een teenbescherming die erosie van het riviertalud voorkomt. Bij dit type dijken is er weinig tot geen erosiefundering, enkel laterale groei voorgesteld door (vergelijking 58).

Type B en type C dijken hebben een erodeerbare fundering, waardoor ook verticale erosie (E_{bo}) voorkomt. Type B dijken hebben een relatief hoog voorland of een bodembescherming op het voorland, waardoor de verticale groei beperkt is. Er zullen echter hellingsinstabiliteiten optreden (afschuiven/blokfalen), maar het sediment dat van bovenop de taluds in de bres neerstort wordt verondersteld meteen te worden getransporteerd door de stroming. De verticale erosie wordt gegeven door

$$\frac{dZ_b}{dt} = -\frac{d}{h} \frac{S_s}{(1-p)l_a} \quad (\text{Vergelijking 59})$$

Bij type C dijken is de verticale groei onbeperkt. Deze verticale groei wordt eveneens weergegeven door (vergelijking 59). De uiteindelijke diepte van de bres wordt door het model niet berekend. Het is aan de gebruiker om deze finale diepte op te geven.

Overige processen

Kliferosie

- niet in rekening gebracht

Afduwen top

- niet in rekening gebracht

Piping

- niet voorzien

Bresvorm

- Steeds trapezoïdaal

5.1.5 BRES – Zhu

Het BRES-model van Zhu behandelt enkel overloop-processen voor homogene kleidijken. De modelopbouw is grotendeels analoog als het BRES-model van Visser: Zo wordt dezelfde fasering gebruikt: fase I en II voor de bresinitiatie, Fase III voor de verticale bresgroei en Fase IV en V voor de laterale bresgroei. Ook de onderverdeling in de verschillende types dijken voor laterale bresgroei is dezelfde. Fundamenteel verschillend is de manier waarop de erosieprocessen worden beschreven: oppervlakte-erosie (aan de hand van schuifspanningsvergelijkingen) en kliferosie.

Overloop en oppervlakte-erosie

Het bresdebiet wordt gegeven door de algemene overlaatvergelijkingen weergegeven in § 4.2.1. Waterdieptes en snelheden worden analoog aan het BRES-model van Visser berekend (§ 5.1.4).

De overloop-processen op het landtalud steunen op een graduele toename van de snelheid tot éénparige stroming wordt bekomen, beschreven met vergelijkingen van § 4.2.5.

Oppervlakte-erosie wordt beschreven door de algemene schuifspanningsvergelijking (vergelijking 9), met de schuifspanning gegeven door (vergelijking 10). Eenmaal de stroming eenparig is ($x > l_n$) geldt als schuifspanning op het landtalud (Zhu, 2006):

$$\tau_b = \rho g R \sin \beta \quad (\text{Vergelijking 60})$$

Tijdens de bresinitiatiefase versteilt het landtalud door oppervlakte-erosieprocessen dermate dat een jet wordt gevormd. Vanaf dan treden klif-erosieprocessen op.

Klif-erosie

De kliferosieprocessen worden door Zhu beschreven zoals weergegeven in § 4.4.1 tot § 4.4.4. Hierbij worden de meest relevante aspecten opgesomd.

Kliferosie wordt beschreven als een combinatie van verschillende deelprocessen, waarbij de belangrijkste de erosie van de klifbasis en de klifmigratie zijn. In geval van een erodeerbare fundering kan de erosiekuil zich zowel horizontaal als verticaal uitbreiden. De schuifspanning op de fundering door de jet wordt dan beschreven door de vergelijking van Stein (Figuur 21). In geval van een niet-erodeerbare fundering zal de jet enkel de onderkant van de klif uithollen. De schuifspanning onderaan de wand van de klif wordt berekend met de vergelijking van Robinson (Figuur 22). Met de schuifspanningen berekend aan de hand van de vergelijkingen van Stein of Robinson, kan de erosie berekend worden met (vergelijking 9).

Door uitschuring van de klifbasis, zal de helling instabiel worden. In het BRES-model van Zhu treedt enkel blokfaling op, aangezien dit de meest voorkomende vorm van hellingsinstabiliteit is bij cohesieve gronden. Bij blokfaling wordt het gewicht van het blok boven de uitgeholde klifbasis groter dan de treksterkte van de grond, waardoor het blok wordt afgeduwd en na rotatie in de bres terechtkomt³.

Door het optreden van blokfaling als gevolg van het eroderen van de klifbasis, gaat de klif naar opwaarts migreren. De grootte en frequentie van blokfaling bepaalt bijgevolg de klifmigratie en de verticale bresgroeisnelheid.

Tijdens de kliferosieprocessen treedt ook nog oppervlakte-erosie op, voornamelijk langs het bovenste klifoppervlak. Deze kunnen gekwantificeerd worden met (vergelijking 9). Naargelang de verticale bresgroei vordert, zal oppervlakte-erosie belangrijker worden en de kliferosieprocessen in belang afnemen.

Bresverbreding

Net als in het BRES-Visser model, heeft het bresinitiatieproces in fases I en II geresulteerd in breswandhellingen gelijk aan de hoek van kritische helling (of interne wrijvingshoek). Tijdens de verticale bresgroeifase (fase III) is de erosie van de bodem (E_{bo}) groter dan de erosie van de zijwanden (E_{si}) en dus bepalend voor de bresgroei. De helling van de zijwanden blijft gelijk aan de kritische helling, door het vallen van materiaal bovenaan de zijwanden in de bres bij hellingsinstabiliteit (afschuiven/blokfalen). Dit eroderen van de bodem en de resulterende hellingsinstabiliteit wordt geïllustreerd in Figuur 27, c.

³ Hierbij dient te worden opgemerkt dat de werking van de horizontale gronddruk als destabiliserende kracht op de grondmoot wordt genegeerd.

De bresverbreding volgt uit (vergelijking 39). De erosiesnelheid van de bodem ' E_{bo} ' wordt gegeven door (vergelijking 9).

Bij fases IV en V is er voornamelijk laterale groei van de bres. De laterale bresgroei wordt gecontroleerd door de erosie onderaan de zijwanden E_{sl} . De vergelijking die de bresverbreding weergeeft in functie van de tijd is (vergelijking 41), waarbij E_{sl} gekwantificeerd wordt door de schuifspanningsvergelijking (vergelijking 40). Dit is geldig voor de laterale bresgroei tijdens fase IV-V van zowel types A, B en C dijken (zoals verder onderscheiden).

Erosie van de fundering

Voor de laatste fases (IV-V), waarbij laterale bresgroei domineert, wordt hetzelfde onderscheid in de 3 dijktypes gemaakt als in het BRES-Visser model. Type A dijken hebben weinig tot geen erosiefundering.

Type B dijken hebben een erodeerbare fundering, maar door de aanwezigheid van een relatief hoog voorland is de verticale erosie (E_{bo}) beperkt.

Bij type C dijken is de verticale groei onbeperkt. Deze verticale groei wordt weergegeven door (vergelijking 9). De uiteindelijke diepte van de bres wordt door het model niet berekend. Het is aan de gebruiker om deze finale diepte op te geven.

Overige processen

Afduwen top

- Word niet in rekening gebracht, want hydrodynamische krachten (naast hydrostatische krachten) die het afduwen van de top veroorzaken zijn niet accuraat te simuleren.

Invloed afwaarts waterpeil

- Waterpeil binnenkant dijk medebepalend voor stroming over overlaat

Invloed opwaarts waterpeil

- Waterpeil buitenkant dijk medebepalend voor stroming over overlaat
- Piping
- Is niet voorzien in model

5.1.6 RUPRO - Cemagref

Het RUPRO-model van Cemagref (Paquier en Recking, 2004) behandelt overloop- en piping processen voor homogene dijken. De modelopbouw is zeer eenvoudig in vergelijking met andere besproken modellen (HR BREACH, BRES). Er wordt uitgegaan van een trapeziumvormige dijkvorm, waarin de bres wordt weergegeven door één dwarsdoorsnede met een volledig horizontale bresbodem.

Overloop en oppervlakte-erosie

Het bresdebiet of debiet door de 'pipe' wordt in tegenstelling tot de meeste andere modellen niet berekend met de klassieke overlaatvergelijking (en aanname van uniforme stroming), maar aan de hand van de Bernoulli-vergelijking. De Bernoulli-vergelijking laat toe om opstuwings door de afwaartse waterstand in rekening te brengen. Daarbij wordt rekening gehouden met een energieverlies aan de inlaat van de bres en een lineair energieverlies (=wrijvingsverlies) doorheen de bres. Dit lineair wrijvingsverlies wordt berekend aan de hand van de Strickler-coëfficiënt (hogere coëfficiënt = lagere wrijvingsverliezen). De Strickler-coëfficiënt wordt vaak bekomen aan de hand van calibratie tijdens de stromingsfase in het begin van het erosieproces (bvb tijdens IMPACT-testen). Het waterniveau in de pipe of breskanaal wordt berekend aan de hand van de kritische diepte die wordt verondersteld aan het stroomafwaartse einde van de bres.

Om rekening te houden met opstuwingsinvloeden, wordt het waterniveau in de bres gelijk verondersteld aan deze waterdiepte stroomafwaarts de bres als de waterdiepte stroomafwaarts de bres groter is dan de kritische diepte. Rekening houdend met steeds dezelfde vorm van dwarsdoorsnede in de bres en met een nulverhang, is de op te lossen vergelijking:

$$z = y + \frac{S}{21} \left(1 + \eta \frac{S^2}{S_e^2} + \frac{2gl}{K^2 R^{4/3}} \frac{S^2}{\bar{S}^2} \right) \quad (\text{Vergelijking 61})$$

Waarbij

- l = lengte pijp (m)
- z = opwaartse waterstand (m)
- S = afwaartse natte sectie (m)
- S_e = opwaartse natte sectie (m)
- $\bar{S}$ = gemiddelde natte sectie op- en afwaarts (m)
- R = gemiddelde hydraulische straal (m)

De verlaging van de kruin wordt afgeleid uit de hoeveelheid sediment die (in evenwicht) door de stroming kan getransporteerd worden. Dit sedimenttransport wordt berekend aan de hand van de formule van Meyer-Peter en Muller (zie § 5.1.1).

Bij al deze stromingsvergelijkingen wordt verondersteld dat de helling van de bres horizontaal blijft.

Een minimale overloop is nodig om het erosieproces te starten. De bres wordt rechthoekig verondersteld, waarbij kan gekozen worden verticale en laterale erosie afzonderlijk of gelijktijdig te laten doorgaan.

Zowel evolutie van waterniveau in de bres als bresevolucie worden numeriek berekend met de Runge-Kutta-methode.

Bresverbreding

Laterale erosie kan afzonderlijk of gelijktijdig met verticale erosie gebeuren. De ratio laterale/verticale erosiesnelheid dient door de gebruiker te worden opgegeven. Tijdens de IMPACT-proeven was de laterale erosiesnelheid begroot op 2x de verticale erosiesnelheid.

Piping

Het debiet door de pipe wordt analoog aan het debiet door de bres berekend met de Bernoulli-vergelijking. Het (lineair verondersteld) wrijvingsverlies wordt in rekening gebracht met de Strickler-coëfficiënt, die wordt berekend op basis van de korrelgrootteverdeling of aan de hand van calibratieberekeningen.

Initiëel wordt een smalle cirkelvormige 'pipe' verondersteld, met een minimale initiële diameter gelijk aan de mediaan diameter van het dijkmateriaal.

In een tweede fase wordt de erosie uniform verondersteld in horizontale en verticale richting, waardoor de cirkelvorm blijft bestaan. De derde en laatste fase begint als de pipe 2/3 van de dijkhoogte heeft bereikt. Op dat moment wordt de kruin verondersteld in te storten onder eigen gewicht, en geldt stroming door een open bres. Het overgebleven dijklichaam erodeert via de reeds beschreven overloop-processen.

Erosie van de fundering

Eenmaal de (voorgedefinieerde) bodem van de bres is bereikt, groeit de bres enkel nog lateraal.

Composietdijken

Bresgroei bij dijklichamen bestaande uit meerdere materialen wordt gesimuleerd door de parameters van het dijkmateriaal tijdens de run te veranderen.

Bij composietdijken met een zandige onderlaag kunnen pipe-erosie-effecten niet in rekening worden gebracht bij simulatie van overloop. Dit wordt gecompenseerd in RUPRO door de Strickler-coëfficiënt K te verlagen, waardoor de erosie en bijhorend het piekdebiet verhoogt.

Overige processen

Kliferosie

- Word niet in rekening gebracht

Afduwen top

- Word niet in rekening gebracht

Er kan nog opgemerkt worden dat de auteurs meegeven dat door de sterke vereenvoudiging van het model een extensieve calibratie/validatie van het model nodig is.

5.1.7 Verheij-Van der Knaap (SOBEK)

De vergelijking van Verheij-Van der Knaap geeft het verloop van bresdimensies weer in functie van de tijd. Het is een parametrisch model, dat de bresdimensies analytisch simuleert op basis van een sterk vereenvoudigde fysische vergelijking. De parameters van de vergelijking werden daarbij via regressie bekomen op basis van gegevens van laboratoriumexperimenten en historische dijkdoorbraken. De verschillende bresgroeiprocessen worden bijgevolg in rekening gebracht voor zover ze voorkwamen in de historische dijkdoorbraken.

Meer informatie omtrent de opbouw van het model wordt gegeven in Van Hoestenbergh et al., 2010.

Overloop en oppervlakte-erosie

De algemene overlaatvergelijking (vergelijking 1) werd gebruikt ter opstelling van de Verheij-Van der Knaap vergelijking. Zo wordt de invloed van de buiten- en binnenwaterstand expliciet in rekening gebracht in de bresgroeivergelijking geldig voor zand- en kleidijken:

$$B = 1.3 \frac{g^{0.5} H^{1.5}}{u_c} \log\left(1 + \frac{0.04g}{u_c} t\right) \quad (\text{vergelijking 62})$$

Waarbij:

B = Bresbreedte (m)

t = Tijd (s)

u_c = kritische stroomsnelheid, gerelateerd aan weerstand dijkmateriaal (m/s)

g = versnelling zwaartekracht (m/s^2)

H = waterstandsverschil over de bres ($h_{\text{buiten}} - h_{\text{binnen}}$) (m)

In de bresgroeivergelijking enkel geldig voor zand-dijken wordt de coëfficiënt 1.3 vervangen door 1.2, in de bresgroeivergelijking enkel geldig voor klei-dijken wordt de coëfficiënt 1.3 vervangen door 1.4.

De bresvorm is rechthoekig tijdens de volledige bresgroei.

Opstuwingsverschijnselen ten gevolge van verdrongen stroming worden in (vergelijking 62) slechts ten dele in rekening gebracht. Opstuwingsverschijnselen treden immers reeds op zodra het polderpeil boven de bresbodem 2/3 bedraagt van het rivierpeil of reservoirpeil boven de bresbodem. Dit wordt niet in rekening gebracht in (vergelijking 62).

Het debiet door de bres wordt niet gebruikt ter bepaling van de grootte van oppervlakte-erosie. Eenmaal de bresdimensies gekend, kan het bresdebiet worden berekend door SOBEK door middel van de vergelijkingen van vrije en verdrongen stroming. Vrije stroming wordt gesimuleerd aan de hand van (vergelijking 1). Verdrongen stroming wordt niet berekend met (vergelijking 2), maar wordt in rekening gebracht door een extra reductiecoëfficiënt, waarvan de waarde afhankelijk is van de verdrinkingsgraad en de overlaatvorm. De waarde voor de debietscoëfficiënt (C_d) dient door de gebruiker te worden ingegeven.

De vergelijking van Verheij-vanderKnaap deelt de bresgroei op in twee fasen: een eerste fase met enkel verticale groei en een tweede fase met enkel horizontale groei. De verticale bresverdieping door V-VDK gebeurt lineair met de tijd tussen initiële bresbodempeil en laagste bresbodempeil, en wordt volledig door de gebruiker bepaald. De verlaging van de kruin wordt bijgevolg niet afgeleid via erosie- of sedimenttransport-vergelijkingen.

Bresverbreding

De fase van bresverbreding gebeurt na de fase van bresverdieping. Uit (vergelijking 62) kan afgeleid worden dat de breedtegroei een functie is van de tijd, de waterstand en de eigenschappen van de dijk. De constanten (1.3 en 0.04) in (vergelijking 62) zijn empirisch afgeleid uit verschillende real case dijkdoorbraken.

De kritieke stroomsnelheid u_c , karakteristieke parameter voor de grondsterkte, dient te worden ingegeven door de gebruiker. Een tabel met waarden voor diverse grondsoorten wordt gegeven door Verheij, 2002. Ook kan de waarde u_c eenvoudig afgeleid worden uit gekende waarden van de kritieke schuifspanning (Van Hoestenbergh et al., 2010). Uit een beperkte gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de bresbreedtegroei gevoelig is voor de kritieke stroomsnelheid u_c (Verheij, 2003).

Door de logaritmische functie van (vergelijking 62), neemt de snelheid van laterale breedtegroei af in functie van de tijd.

Composietdijken

Bresgroei bij dijklichamen bestaande uit meerdere materialen kan grofweg gesimuleerd worden door de parameter ter karakterisatie van de grondsterkte ' u_c ' aan te passen naar een gemiddelde waarde voor de verschillende materialen. Onderzoek (Mohammed et al., 2001) heeft echter aangetoond dat dit kan leiden tot grote fouten.

Overige processen

Erosie van de fundering

- Eenmaal de (voorgedefinieerde) bodem van de bres is bereikt, groeit de bres enkel nog lateraal.

Piping

- Wordt niet in rekening gebracht, aangezien piping (voor zover gekend) niet voorkwam bij de bressen gebruikt ter calibratie van de bresgroeivergelijking.

Kliferosie

- Wordt slechts beperkt in rekening gebracht. De meeste data van bressen gebruikt ter calibratie van de bresgroeivergelijking zijn immers afkomstig van zanddijken.

Afduwen top

- Wordt niet in rekening gebracht

Invloed afwaarts waterpeil

- Door rekening te houden met het afwaarts waterpeil in vergelijking (62), wordt de invloed van het afwaarts peil en opstuwingeffecten enigszins in rekening gebracht

5.1.8 Dambreak module (MIKE11)

In de 'dam break module' van MIKE11 kan de verandering in geometrie van de bres en de naastgelegen dijk gedefinieerd worden door de gebruiker zelf, of 'erosion-based'. De erosie-gebaseerde berekeningswijze gebeurt op basis van de sediment-transportformule van Engelund-Hansen (en niet op basis van erosievergelijkingen, zoals de naam verkeerdelijk doet vermoeden).

Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen een 'erosion based BREACH development' of een 'piping failure'. Bij 'erosion based BREACH development' ontstaat een bres door erosie van de dijk kruin gepaard gaande met het overstromen van de dijk. Een bres die ontstaan is door het inzakken van de waterkering als gevolg van een holte die door erosie steeds groter wordt, wordt gemodelleerd als een

'piping failure'.

In MIKE11 kan als alternatief de berekeningsmethode van NWS DAMBRK (voorloper van NWS BREACH) gebruikt worden. Voornaamste verschil is dat eens dat het falen van de dijk is geïnitieerd, de gebruiker het verdere verloop van de bresgroei moet ingeven aan de hand van tijdreeksen. Omdat de NWS DAMBRK berekeningsmethode ondertussen is verouderd, wordt er niet dieper op ingegaan.

Meer informatie omtrent de opbouw van het model wordt gegeven in Van Hoestenbergh et al., 2010.

Overloop en oppervlakte-erosie

Een 'dambreak structure' in MIKE11 is een samengestelde structuur waarmee zowel het debiet over de kruin als het debiet door de bres wordt berekend. Voor de berekening van het bresdebiet en debiet over de kruin worden de standaard overlaatvergelijkingen gebruikt.

Als bresvorm wordt een trapezium voorgesteld, gedefinieerd door de hoogte van de bodem, de breedte van de bres en de helling van de zijwanden. De start van bresgroei kan ingegeven worden door de gebruiker, of gebeurt in functie van het waterpeil van het reservoir of de rivier. De verticale erosie wordt berekend aan de hand van de formule van Engelund-Hansen voor bodemmateriaal. De formule is gebaseerd op de energie die nodig is om sediment op te tillen tot boven de bodemvormen. Doordat de kritieke schuifspanning niet is inbegrepen in de vergelijking van Engelund-Hansen, is de vergelijking niet nauwkeurig rond initiatie van sedimenttransport. De formule is strikt genomen enkel geldig voor de beschrijving van zandtransport:

$$\Phi = 0.1 \cdot \frac{\Theta^{\frac{5}{3}}}{f} \quad (\text{Vergelijking 63})$$

Waarbij

Φ = sedimenttransportsnelheid (-)

Θ = sleepspanning (-)

f = wrijvingsfactor (-)

Daarbij worden de dimensieloze sedimenttransportsnelheid en sleepspanning berekend als volgt:

$$\Phi = \frac{q_t}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^3}} \quad (\text{Vergelijking 64})$$

$$\Theta = \frac{\frac{\tau}{\rho}}{(s-1) \cdot g \cdot d} \quad (\text{Vergelijking 65})$$

Waarbij

q_t = het totale sedimenttransport per eenheidsbreedte (m^2/s)

s = het specifiek soortelijk gewicht (-)

g = $9.81 m/s^2$

d = de gemiddelde korreldiameter (m)

ρ = densiteit van water ($1000 kg/m^3$)

τ = de sleepspanning (N/m^2)

De sleepspanning wordt berekend op basis van de dwarsgemiddelde snelheid in de bres en de korreldiameter. Het debiet en de watersnelheid worden berekend door MIKE11, waarin de dambreak-module is geïntegreerd. Het debiet door de bres wordt berekend aan de hand van de algemene vergelijkingen voor stroming doorheen een structuur:

$$Q(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (h_{opw} - Z(t))}{\frac{1 + \zeta}{A_x^2} - \frac{1}{A_{opw}^2}}} \quad (\text{Vergelijking 66})$$

Waarbij

$Q(t)$ = debiet doorheen de bres (m^3/s)

h_{opw} = waterpeil opwaarts de bres (m)

$Z(t)$ = niveau bresbodem (m) in functie van de tijd

ζ = ladingsverliescoëfficiënt (-)

A_x = dwarssectie in de structuur (m^2)

A_{opw} = dwarssectie opwaarts van de structuur (m^2)

De verliescoëfficiënten (bij instroom en uitstroom bres of pipe) dienen door de gebruiker te worden ingegeven.

Voor verdrongen stroming wordt ook de waterstand en dwarssectie afwaarts van de bres in rekening gebracht. De stroomprofielen in de bres worden beschreven door een niet-uniforme stroomvergelijking. Aan de hand van de energieniveaus op- en afwaarts de bres wordt nagegaan of de stroming kritisch of subkritisch is.

Het berekende sedimenttransport q_t haalt materiaal uit de dijk weg, zodat de drempel van de bres lager komt te liggen. Er wordt daarbij verondersteld dat de bres horizontaal blijft. De verandering in bresdrempelhoogte (dZ) per tijdseenheid (dt) wordt met behulp van volgende formule berekend:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{q_t}{L_b \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (\text{Vergelijking 67})$$

Hierin zijn:

L_b = lengte van de bres in de stromingsrichting. L_b is functie van de breshoogte en kan berekend worden op basis van de breedte van de dijk en de helling aan rivier- en landzijde (m)

ε = de porositeit v/h dijkmateriaal (q_t geeft enkel het transport van sediment) (-)

Met het ingeven van de gemiddelde korreldiameter, de porositeit en de kritische sleepspanning van het kernmateriaal van de dijk worden de grondkarakteristieken door de gebruiker ingegeven. Uit een gevoeligheidsanalyse in het kader van de actualisatie van het Sigmaplan (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2005) is gebleken dat de invloed van de materiaalkarakteristieken op de bresgroeimodelresultaten beperkt is in vergelijking met de invloed van meer conceptuele paramaters (SEI en

begingeometrie van bres). De initiële opening is daarbij steeds V-vormig.

Bresverbreding

De laterale erosie wordt sterk vereenvoudigd berekend met een 'Side Erosion' index (SEI) die in vaste (lineair) relatie staat met de dieptegroei. Er wordt daarbij verondersteld dat het sedimenttransport aan de randen van de bres evenredig is met dat van het centrale gedeelte van de bres.

Diepte- en breedtegroei treden bijgevolg gelijktijdig op.

Composietdijken

Bresgroei bij dijklichamen bestaande uit meerdere materialen kan grofweg gesimuleerd worden door de parameter ter karakterisatie van de grondsterkte aan te passen naar een gemiddelde waarde voor de verschillende materialen. Onderzoek (Morris et al., 2009a) heeft echter aangetoond dat dit kan leiden tot grote fouten.

Piping

Het debiet door de pipe wordt berekend aan de hand van (vergelijking 7), waarbij de term voor ladingsverliezen 1,5 wordt verondersteld. Bij de overgang van stroming over een overlaat naar buisstroming aan de instroom van de pipe, en vice versa aan de uitstroom, worden verliescoëfficiënten voorzien.

Piping wordt gesimuleerd door het ingeven van locatie en diameter van een initieel cirkelvormig gat in het dijklichaam door de gebruiker. De stroming door de pipe erodeert de pipe, wat wordt gesimuleerd door de vergelijking van Engelund-Hansen. De pipe wordt horizontaal verondersteld. Enkel de onderste helft van de buis wordt verondersteld te worden geërodeerd.

De collapse ratio is de kritische verhouding tussen de diameter van de pipe en de afstand van de pipe tot de top van het dijklichaam. Eenmaal deze ratio is overschreden, stort het dijklichaam boven de pipe in. Een 'volume loss ratio' geeft aan hoeveel van het sediment bij instorten meteen door de stroming wordt getransporteerd. Na het instorten, groeit de bres verder door overloop.

Uit de gevoeligheidsanalyse in kader van de actualisatie van het Sigmaplan (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2005) is gebleken dat de invloed van de beginafmetingen van de opening zeer groot kan zijn op de bresgroei.

Overige processen

Erosie van de fundering

- De bresontwikkeling kan gelimiteerd of ongelimiteerd gebeuren. In geval de ontwikkeling gelimiteerd gebeurt, dient de maximale bresdiepte en –breedte te worden opgegeven.

Kliferosie

- Wordt niet in rekening gebracht

Afduwen top

- Wordt niet in rekening gebracht

5.2 Omschrijving deelprocessen: samenvatting

Tabel 7 - Te onderscheiden bresgroeiprocessen per model bij overloop

MODEL	Oppervlakte-erosie*	OVERLOOP						
		Kliferosie			Afduwen top	Laterale erosie		Erosie van de fundering
		Erosie basis klif	Klifmigratie	Blokfaling/ afschuiven		Erosie	Blokfaling/ afschuiven	
NWS BREACH	-Erosie graszode dmv kritische snelheid (BI) -Geen versteiling talud (BI) -Eerst terugschrijdende erosie, dan kruinverlaging (BI) -Eenparige stroming in bres, dus veronderstelling weinig variatie in stroming -Verrtikale erosie bres dmv sedimenttransport in evenwicht (Meyer-Peter) -Helling bres=helling landtalud -Uniforme erosie over bodem en wanden	Niet in model			-Stabiliserende krachten: weerstand door cohesie, 'shear' en gewicht top -Destabiliserende krachten: hydrostatische druk, schuifkrachten door stroming -Afduwen top indien destabiliserend > stabiliserend	-Rechthoekig kanaal erodeert verticaal tot bereiken kritische diepte -bereiken kritische diepte: blokfaling	-Opeenvolgende blokfalingen bij het bereiken kritische dieptes door erosie -blokfaling = pauze in erosieproces bres -maximale bresbreedte user-defined	Dieptegroei begrensd tot voorgedefiniëerde diepte
HR- BREACH	-Erosie graszode dmv CIRIA-grafieken (BI) -Erosievergelijkingen (oa Hanson) of sedimenttransport-vergelijkingen -Versteiling van landtalud, terugschrijdende erosie en kruinverlaging op basis van erosie/sedtransport-vergelijkingen (BI) -Voor erosie aan de hand van schuifspannings-vergelijken: schuifspannings-verdeling per sectie wordt gebruikt om de erosie per sectie te berekenen.	Variante berekeningsmethode SIMBA	SIMBA-vergelijking (energie-gebaseerd)	sectie per sectie stabiliteits-analyse	Niet in model	Erosievergelijkingen: - Schuifspannings-verdeling over de bres wordt gebruikt om de verbreding te berekenen -erosie zijwanden = erosie bodem * ratio (ratio ≤ 1)	-Per tijdstap: stabiliteitsanalyse o. b. v. treksterkte bodem (cohesieve gronden) en o.b.v. schuifspanning (cohesieloze gronden) -Enkel gevolg van laterale erosie, niet bepalend voor laterale groei!	Dieptegroei begrensd tot voorgedefiniëerde diepte
SIMBA	-Erosie graszode: vereenvoudigd dmv 'vegetal cover factor' (BI) -versteiling talud, vorming klif: schuifspanningvgl (BI) -terugschrijdende erosie = klifmigratie (BI) -kruinverlaging: schuifspanning/kliferosie (BI)	Maximumwaarde van: -schuifspanning op basis van Robinson '92 -maximum schuifspanning landtalud	-Schuifspannings-analyse van afschuivingsproces -bepalen kd, schuifspanningen	Afschuivings-concept gebruikt ter bepaling van klifmigratie	Niet in model	-Zolang verticale bresgroei: bresverbreding ~ klif migratiesnelheid -Als klif verdronken of enkel laterale groei: bresverbreding ~ schuifspaning	Niet in model	Dieptegroei begrensd tot voorgedefiniëerde diepte
BRES- Visser	-Geen erosie graszode (BI) -Berekening erosievolumes aan de hand van sedimenttransportvergelijkingen en wet van massabehoud -Versteiling van binnen-talud, terug-schrijdende erosie en kruinverlaging mathematisch in detail weergegeven (BI)	Niet in model			Niet in model	Fase III: Erosie bodem bepaalt laterale groei Fase IV-V: Erosie onderaan zijwanden bepaalt laterale groei Hellingshoek zijwanden steeds kritische helling	Niet in model	Onderscheid types A tot C A: enkel laterale groei B en C: Erosie bresbodem op basis van sediment-transport

MODEL	OVERLOOP							
	Oppervlakte-erosie*	Kliferosie			Afduwen top	Laterale erosie		Erosie van de fundering
		Erosie basis klif	Klifmigratie	Blokfaling/ afschuiven		Erosie	Blokfaling/ afschuiven	
BRES-Zhu	-Geen erosie graszode (BI) -Oppervlakte-erosie wordt berekend met schuifspanningsvergelijkingen. Erodeerbaarheidscoëfficiënten in te geven. -Versteiling van binnen-talud, terugschrijdende erosie en kruin-verlaging leiden tot vorming van jet (= begin kliferosie) (BI) -Belang neemt toe naarmate verticale bresgroei vordert	-Erodeerbare ondergrond: ahv formule van Stein ('93) -Niet-erodeerbare ondergrond: ahv formule van Robinson ('92)	Blokfaling veroorzaakt opwaartse migratie van klif. Snelheid bepaald door grootte en frequentie blokfaling	Erosie klifbasis veroorzaakt blokfaling, leidend tot kritische helling	Niet in model	Idem model BRES-Visser	Niet (relevant) in model	Onderscheid types A tot C A: enkel laterale groei B,C Erosie bresbodem op basis schuifspanning
RUPRO	-Geen erosie graszode (BI) -Geen versteiling van binnen-talud en terugschrijdende erosie (BI) -Stroming ahv Bernouilli -Erosie ahv sedimenttransport in evenwicht (Meyer-Peter) -Steeds horizontale bres	Niet in model			Niet in model	-Uitgangspunt: uniforme erosie over bodem en wanden -Ratio laterale/verticale erosie is user-defined -IMPACT-testen: ratio = 2	Niet in model	Dieptegroei begrensd tot voorgedefiniëerde diepte
Verheij-Van der Knaap (SOBEK)	-Bresgroei verdeeld in 2 opeenvolgende fases: 1.Verticale erosie volledig user-defined (Geen BI) 2.Laterale erosie op basis van semi-fysische vergelijking waarvan parameters via regressie zijn bekomen. Gegevens van dijkdoorbraken voornamelijk afkomstig van real cases in Nederland - Kritische snelheid karakteriseert grondsterkte -Rechthoekige bresvorm -in SOBEK: Autonome bresvorming mogelijk, maar dan V-VDK niet bruikbaar (BI)	Beperkt in model, want gegevens van dijkdoorbraken waarop vergelijking is gebaseerd komen voornamelijk van zanddijken			Aanwezig in model voor zover proces is voorgekomen tijdens real cases	Laterale erosie op basis van semi-fysische vergelijking van Verheij-Van der Knaap	Aanwezig in model voor zover proces is voorgekomen tijdens real cases	Aanwezig in model voor zover proces is voorgekomen tijdens real cases
Dambreak module (MIKE11)	-Geen erosie graszode (BI) -Geen versteiling van binnen-talud en terugschrijdende erosie (BI) - verticale erosie wordt berekend aan de hand van de sedimenttransportvergelijking van Engelund-Hansen - Steeds horizontale bres - Korreldiameter, porositeit en kritische schuifspanning karakteriseren grondsterkte	Niet in model			Niet in model	-Uitgangspunt: Uniforme erosie over bodem en wanden -Ratio Laterale/verticale erosie is user-defined	Niet in model	Dieptegroei begrensd tot voorgedefiniëerde diepte

*: als proces belangrijk voor bresinitiatie, wordt dit aangeduid met 'BI'

~ = proportioneel met

Tabel 8 - Te onderscheiden bresgroeiprocessen bij piping en hydrodynamische invloeden voor de verschillende bresgroeimodellen

MODEL	PIPING		Stromingsvergelijkingen in bres: berekening debiet (Q), snelheid (v), waterdiepte (d)	Composietdijken
	Erosie kanalen + terugsch. erosie	Instorten kruin		
NWS BREACH	-Buisstroming -Erosie aan de hand van sedimenttransportvergelijking van Meyer-Peter en Muller -Uniforme erosie verticaal en horizontaal	-instorten kruin afhankelijk van verschil waterstand en pipe-hoogte -op moment van instorten kruin: overgang buisstroming naar stroming over overlaat	Q_bres uit overlaatvergelijking V_bres en d_bres d.m.v. Manning-vergelijking (veronderstelling eenparige stroming) Niveau reservoir wordt afgeleid uit Q_bres en instroom reservoir Opstuwing in rekening gebracht met vergelijking (44) en (45)	-Kern, afdekkende laag en bekleding (composietdijk) in rekening te brengen
HR-BREACH	-Buisstroming -Erosie aan de hand van verschillende sedimenttransportvergelijkingen -Uniforme erosie verticaal en horizontaal	Als gewicht materiaal boven pipe groter dan schuifweerstand bodem: kruin stort in	Q_bres uit overlaatvergelijking, variabele debietscoëfficiënt volgens bresvorm gepland maar anno 2010 nog niet geïmplementeerd V_bres en d_bres d.m.v. niet-uniforme stromingsvergelijking Opstuwing in rekening gebracht met variante van vergelijking (2)	-Bodemtoestand van kern en afdekkende laag kunnen gedetailleerd in rekening worden gebracht -ook bekleding: gras, breuksteen
SIMBA/WINDAMB	Niet in model	Niet in model	Q_bres uit overlaatvergelijking, debietscoëfficiënt ~1 V_bres en d_bres d.m.v. aanname uniforme stroming in bres Via routing door reservoir kan Q en d bepaald worden (WINDAMB) Opstuwing in rekening gebracht met vereenvoudigde vgl (44) en (45)	Enkel bekleding kan in rekening gebracht worden
BRES-Visser	Niet in model	Niet in model	Q_bres uit overlaatvergelijking, V_bres en d_bres d.m.v.: -aanname kritische diepte aan stroomopwaartse punt landtalud -superkritische stroming op het landtalud -graduele toename van stroomsnelheid tot punt uniforme stroming Opstuwing in rekening gebracht met variante van vergelijking (2)	Niet in rekening gebracht. Er wordt verondersteld dat de afdeklaag (bvb klei) dermate is beschadigd dat die geen bescherming meer biedt
BRES-Zhu	Niet in model	Niet in model	Idem BRES-Visser	Niet in rekening gebracht.
RUPRO	-Bernoulli -Erosie aan de hand van sedimenttransportvergelijking van Meyer-Peter en Muller -Uniforme erosie verticaal en horizontaal	-Instorten kruin vanaf pipe hoger dan 2/3 van dijkhoogte -Vanaf dan enkel overloop	-Aanname 1 dwarssectie en geen verhang in bres -Toepassen Bernoulli-vergelijking, met verlies thv inlaat/bres -Kritische waterhoogte verondersteld afwaarts de bres -Waterhoogte in bres = waterhoogte polder als deze groter wordt dan de kritische waterhoogte (opstuwing vereenvoudigd in rekening gebracht)	-Parameters dijkmateriaal veranderen tijdens run -pipe-erosie-effect bij composietdijken door verlagen Strickler-coefficient K
Verheij – Van der Knaap (SOBEK)	Niet in model	Niet in model	-Overlaatvergelijking geïntegreerd in Verheij-Van der Knaapvergelijking. Opstuwingsverschijnselen door verdrongen stroming worden slechts ten dele in rekening gebracht -Debiet door bres wordt berekend met algemene overlaatformule. Verdrongen stroming wordt vereenvoudigd door extra variabele reductiecoëfficiënt in rekening te brengen ('flow reduction curves') -Debietscoëfficiënt user-defined	Grofweg te simuleren door grondsterkte-parameter 'u _c ' aan te passen naar een gemiddelde waarde voor verschillende materialen
Dambreak module (MIKE11)	-Stroming aan de hand van algemene vergelijking door een structuur -Erosie met sedimenttransport-vergelijking van Engelund-Hansen -Uniforme erosie vert. en horiz. in pipe	-Instorten kruin vanaf ratio 'diameter pipe/pipe tot kruin' groter dan user-defined 'collapse ratio' - meestromen ingestort materiaal dr gebr. in te geven	-Q_bres wordt berekend ahv vergelijking door een structuur Opstuwing in rekening gebracht met variante van vergelijking (2) -V_Bres, d_bres uit niet-uniforme vergelijking -MIKE11 gaat na in hoeverre subkritische of kritische stroming in bres	Idem Verheij-Van der Knaap

6 Besluit

De nadruk in deze studie ligt op de mechanismen en processen die optreden éénmaal de bres groeit. Twee faalmechanismen zijn voornamelijk van belang: 'erosie door overloop' en 'piping'. De faaltrajecten en processen voor deze mechanismen worden uitvoerig besproken. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de mogelijke initiatiemechanismen. Verschillende initiatiemechanismen kunnen daarbij interfereren totdat overloop- of pipingprocessen de bres doen groeien.

De Vlaamse rivierdijken worden onderverdeeld in verschillende dijktypes door het vooropstellen van een aantal dijkkarakteristieken die belangrijk zijn voor bresinitiatie en bresgroei. Voor bresgroei zijn parameters die de grondgesteldheid omschrijven - zoals cohesiviteit, watergehalte en compactie - van groot belang. Zij bepalen immers de erodeerbaarheid van de verschillende grondlagen. Als meest bepalende factor is de cohesiviteit van de grondlagen gebruikt ter onderverdeling van de Vlaamse dijktypes.

De beschrijvingen van de bresgroeiprocessen door de verschillende modellen, vaak gebaseerd op labo- en veldtests, tonen het belang aan van de grondkarakteristieken. Zij bepalen immers in hoeverre oppervlakte- of kliferosieprocessen zich voord. Samen met hellingsinstabiliteiten zijn dit de overheersende processen bij bresgroei. Oppervlakte-erosieprocessen worden door de meeste modellen beschreven aan de hand van schuifspanningsvergelijkingen en sedimenttransportvergelijkingen. De beschrijving van de verschillende kliferosieprocessen is vaak complex, maar wel essentieel bij cohesieve dijklichamen. Zo is de beschrijving van hellingsinstabiliteiten belangrijk bij de migratie van de klif door de dijk. De beschrijving van hellingsinstabiliteiten wordt echter onbelangrijk geacht voor het beschrijven van het verbreden van de bres, aangezien laterale erosie wordt veroorzaakt door oppervlakte-erosieprocessen van bodem en zijwanden.

De kennis van bresgroeiprocessen bij composietdijken is anno 2010 nog beperkt. Wel hebben een aantal tests van de USDA aangetoond dat erosie-resistente kernen (e.g. kloosterdijken) de bresgroeisnelheden significant kunnen beïnvloeden. Vooral de duidelijke vertraging van de laterale groei in vergelijking met dijklichamen zonder erosie-resistente kern is daarbij van belang. Kleibekledingen op het riviortalud blijken weinig weerstand te bieden voor de laterale bresgroei. Eenmaal de kleibekleding op de kruin en het landtalud is weggeërodeerd, is de bresgroeisnelheid voor een restprofiel van een zanddijk met kleibekleding quasi even groot als voor een homogene zanddijk. Verdere tests ter bevestiging zijn aangewezen vooraleer dit te veralgemenen.

Ook de kennis over pipingprocessen zijn anno 2010 nog beperkt (in vergelijking met overloopprocessen). Zo is de erosievorm in de kanalen niet altijd duidelijk. Eenvoudige vergelijkingen gebaseerd op sedimenttransportformules zijn vooralsnog aangewezen.

De modellen NWS BREACH, HR BREACH (geïntegreerd in IWRS), SIMBA (WINDAM), BRES-VISSER, BRES-ZHU, RUPRO (CASTORDigue), Verheij-VanderKnaap (al dan niet geïntegreerd in SOBEK) en de 'Dambreak structure' (MIKE11) werden tenslotte geëvalueerd op de volledigheid en correctheid van het beschrijven van de verschillende bresgroeiprocessen. Uit de evaluatie blijkt dat de meeste modellen focussen op één of meerdere processen of faalmechanismen. Zo beschrijft SIMBA uitgebreid de kliferosieprocessen, behandelt BRES-VISSER voornamelijk de verschillende oppervlakte-erosieprocessen en geeft de vergelijking van Verheij-VanderKnaap enkel het verloop van de bresbreedte weer. Elk model heeft daarbij zijn beperkingen. De keuze van het meest optimale bresgroeimodel voor een bepaald dijktype en faalmechanisme wordt in de volgende deelopdracht van deze studie behandeld.

7 Bijlage: lijst met symbolen

A	Oppervakte van de dwarsdoorsnede van het water in de bres (m^2)
B	gemiddelde bresbreedte (m)
b	breedte van de bodem van de bres (m)
B_t	breedte van de complete bres (m)
B_w	breedte van de bres aan de watertafel (m)
C	Chezy-coëfficiënt ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
C_d	constante voor diffusie (-)
C_f	wrijvingscoëfficiënt (-)
d	diepte van de bres (m)
D	diameter van de pijp (m)
E	mate van erosie (m^3/s)
f	wrijvingscoëfficiënt welke een functie is van $D50$ (-)
Fr	Froude-getal (-)
g	zwaartekrachtversnelling ($9,81 \text{ m/s}^2$)
H	waterhoogte in de dam (m)
H_b	klifhoogte (m)
h_L	maat voor het energieverlies t.g.v. wrijving en samentrekking (m)
h_p	waterhoogte onder de klif (m)
H_p	niveau van de (center van de) pijp (m)
H_w	hoogte van de watertafel (m)
J	afstand van de landing van de jet tot aan de bodem van de kuil in de richting van de jet (m)
J_p	afstand vanaf de landing tot aan het punt dat de snelheid van de jet afneemt t.g.v. diffusie (m)
L	lengte van de pijp (m)
L_1	lengte van het talud (m)
l_a	aanpassingslengte van het sedimenttransport (m)
l_n	lengte over het talud waarover de stroming nog niet de maximale snelheid bereikt (m)
m	overlaatcoëfficiënt ($m=1$ bij een 'volkomen overlaat') (-)
M	coefficient voor de erodeerbaarheid van het materiaal (-)
n	ruwheidscoëfficiënt van Manning (-)
Q_{br}	debiet door de bres (m^3/s)
R	hydraulische straal (m)
S_s	evenwicht van het sedimenttransport ($\text{m}^3/$)
T	dikte van de jet bij 'landing' (m)
U	stroomsnelheid in de bres (m/s)
Z_{br}	hoogte van de overlaat (m)
α	helling van het riviertalud ($^\circ$)
β	helling van het talud ($^\circ$)
β_1	kritieke helling van het landtalud ($^\circ$)

γ	helling van de breswand (°)
ρ	dichtheid van het water (m^3/s)
τ_b	werkende schuifspanning op de bodem en de wanden van de bres (N/m^2)
τ_c	kritieke schuifspanning waarmee een korrel net meegenomen kan worden (N/m^2)

8 Referenties

Blevoets, B., 1998. Risico-analyse van dijken langs de Grensmaas. Tijdschrift water n°99, maart/april 1998.

Calle, E., 2002. Samenvatting dijkdoorbraakprocessen. Geodelft.

Chow, V.T., 1986. Open channel hydraulics. International edition Edn, McGraw Hill.

Fread, D.L., 1988. BREACH: An erosion model for earthen dam failures (Model description and user manual), NOAA, Silver Spring, Maryland, USA. Service, N. W.

Golfoverslagproeven Zeeuwse Zeedijken, Factual Report, 2008. Infram in opdracht van Projectbureau Zeeweringen.

Hanson, G, Robinson, K and Cook, K. 1998. Effects of compaction on embankment resistance to headcut migration. Proceedings of the 1998 Annual Conference Association of State Dam Safety Officials. Oct 11-14. Las Vegas, NV.

Hanson, G.J, Robinson, K. and Cook, K.2001. Prediction of headcut migration using a deterministic approach. Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers.

Hanson, G, Temple, D. 2002. Performance of bare-earth and vegetated steep channels under long-duration flows. Transactions of the ASAE, Vol 45(3), 695-701.

Hanson, G.J. and Cook, K.R.,2004. 'Apparatus, test procedures and analytical methods to measure soil erodibility in situ', Applied engineering in agriculture, Vol. 20 (No. 4), pp. pp. 455-462.

Hanson, G.J. and Hunt, S.L., 2007. 'Lessons learned using laboratory jet testing method to measure soil erodibility of compacted soils', Journal of applied engineering in agriculture (ASABE), Vol. 23 (No. 3), pp. pp. 305-312.

Hunt, S.L., Hanson, G.J., Temple, D.M. 2006. BREACH widening observations related to clay core earthen embankment tests. In: Dam Safety 2006. Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials Annual Conference, September 10-14, 2006, Boston, Massachusetts. 2006 CDROM.

IMDC ism. TDE ism. Jan Maertens (2010). Onderzoek naar de bresgevoeligheid van de Vlaamse winterdijken. Deelopdracht 5: Opstellen van een wetenschappelijk verantwoorde en praktisch haalbare methode. i.o.v. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.

Kamrath , P., Disse, M., Ha, M., 2006. Assessment of Discharge through a Dike BREACH and Simulation of Flood Wave Propagation. Natural hazards, 38A-2.

Knoeff J.G. and Verheij H.J. (Delft Cluster), 2003. Residual strength after initial failure by overflow/overloop (Delft Cluster).

Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Waterwegen en Zeekanaal NV, Afdeling Zeeschelde. 2005. Maatschappelijke Kosten-Baten analyse voor de actualisatie van het Sigmaplan. Gevoeligheidsanalyses op de optimale oplossing.

Mohamed, M.A.A., Samuels, P.G. and Morris, M.W., 2001. Uncertainties in Dam Failure Modelling with the US NWS BREACH Model. First International Conference on River Basin Management, Cardiff, UK2001. WIT Press, p. 408 pp.

Mohammed, M., Samuels, P., Morris, M. and Ghataora G.. Improving the Accuracy of Prediction of BREACH Formation through Embankment Dams and Flood Embankments. In River Flow 2002 (BOUSMAR and ZECH (eds)). Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2002.

Morris, M.W and Hassan, M.A.A.M. 2009. BREACH Initiation & Growth: Physical Processes. Analysis of IMPACT project BREACH field tests, FLOODSITE Report T06-08-11.

Morris, M.W., Hassan, M., Kortenhaus, A. and Visser, P.J., 2009. BREACHing processes, a state of the art review. FLOODSITE Report T06-06-03.

Morris, M.W., Kortenhaus, A. and Visser, P.J., 2009b. Modelling BREACH initiation and growth, FLOODSITE Report T06-08-02

P. Peeters, R. Van Looveren, L. Vincke, W. Vanneuvillie and J. Blanckaert, 2008. Analysis of dike BREACH sensitivity using a conceptual method followed by a comprehensive statistical approach to end up with failure probabilities. 4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability. Toronto, Ontario, Canada.

Paquier, A., Recking, A., 2004. Advances on BREACH models by Cemagref during IMPACT project. IMPACT, WP2.

R. B. Seed, R. G. Bea, R. I. Abdelmalak, A. G. Athanasopoulos, G. P. Boutwell, J. D. Bray, J.-L. Briaud, C. Cheung, D. Cobos-Roa, J. Cohen-Waeber, B. D. Collins, L. Ehrensing, D. Farber, M. Hanemann, L. F. Harder, K. S. Inkabi, A. M. Kammerer, D. Karadeniz, R.E. Kayen, R. E. S. Moss, J. Nicks, S. Nimmala, J. M. Pestana, J. Porter, K. Rhee, M. F. Riemer, K. Roberts, J. D. Rogers, R. Storesund, A. V. Govindasamy, X. Vera-Grunauer, J. E. Wartman, C. M. Watkins, E. Wenk Jr., and S. C. Yim, 2006. New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005. Independent Levee Hurricane Katrina Investigation Team.

Robinson, K.M., 1992. Predicting stress and pressure at an overfall. Transactions of the ASAE, 35(2), 561-569.

Stein, O.R., Julien, P.Y. and Alonso, C.V., 1993. Mechanics of jet scour downstream of a headcut. Journal of Hydraulic Research, 31(6), 723-737.

Technische adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1996. Technisch rapport klei voor dijken, Delft.

Temple, D.M., Hanson, G.J., Neilsen, M.L. and Cook, K.R. , 2005. 'Simplified BREACH analysis model for homogeneous embankments: Part 1, Background and model components', 25th Annual USSD Conference, Salt Lake City, Utah, USA, 6-10 June 2005, 2005.

Van Hoestenbergh, T.; Huygens, M.; Peeters, P.; Mostaert, F., 2010. Opstellen bresgroeiparameters Vlaamse rivierdijken, deelopdracht 1. Flanders Hydraulics Research Publications. Borgerhout. Belgium.

Visser, P.J., 1989. A model for BREACH growth in a dike burst. Proc. 21st. Int. Conf. Coastal Eng. Malaga Spain, 1988. pp; 1897-1910

Zhu, Y., 2006. BREACH growth in clay dikes, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. PhD.



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.watlab.be