

BIJLAGE C: OVERZICHT VAN MODELLEN EN CRITERIA

C.1 Overzicht ontwerppraktijk onderloopsheid

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de nationale en internationale praktijk voor het ontwerpen op het mechanisme onderloopsheid. In de tabel is aangegeven of het lokale of globale toetsregels betreft. Met lokale toetsregels richten zich op een bepaalde knoop uit het faalpad onderloopsheid terwijl globale toetsregels het gehele faalpad beschrijven.

Richtlijn	Toetsregels	Toelichting en veiligheidsraamwerk	Toepassingsgebied
NL Kunstwerken: WOWK2018, Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen	Globaal: Lane, Sellmeijer *	Lane: zie ASCE [1] Sellmeijer: ingebed in veiligheidsraamwerk WBI2017 en OI2014	Heeft beperkingen (locatie scherm en horizontaal deel kwelweg)
	Lokaal: Hydraulic heave criterium: gradiënt bij WBN $i < i_{toel}$	Toelaatbare gradiënt $i_{toel} = 0,5$. Deze waarde wordt gezien als veilige waarde met verborgen veiligheid ten opzichte van de kritieke gradiënt voor drijfzand in een cylinder proef (ic). Het criterium $i_{toel} = 0,5$ komt bij vrije uitstroom overeen met een overall $SF=i_c/i_{toel} = 1,7$ à $2,4^{***}$	Constructie/kunstwerk met brede uitstroming
Ontwerp van schutsluizen Bouwdienst RWS [2]	Globaal: Lane, Sellmeijer*	Zie NL Kunstwerken en WOWK2018	Zie NL Kunstwerken en WOWK2018
	Lokaal: Hydraulic heave criterium: gradiënt bij WBN $< i_{toel}$	Zie NL Kunstwerken en WOWK2018 M.u.v. nuancering: Toelaatbare gradiënt $i_{toel} = 0,5$ bij homogene zandgrond $i_{toel} = 0,3$ bij inhomogeniteiten	Zie NL Kunstwerken en WOWK2018
Eurocode 7 (Concept sept. 2022)	Lokaal: Hydraulic heave criterium o.b.v. effectief korrelgewicht	Criterium hydraulic heave inclusief bovenbelasting bij situatie met filter in veiligheidsformat van EC7	Constructie/kunstwerk met brede uitstroming, al dan niet met filter
	en/of gradiënt $i < i_{c,d}$	Voor ontwerpwaarde van kritieke gradiënt $i_{c,d}$ wordt verwezen naar paragraaf Interne Erosie uit [3]	

International Levee Handbook (2013) [3]	Lokaal: Hydraulic heave criterium o.b.v. effectief korrelgewicht en opdrijf criterium	ILH is overkoepeld over nationale richtlijnen, geen specifiek veiligheidsformat	Dijken en kunstwerk met brede vrije uitstroom
	Globaal: Lane, Sellmeijer*, Hoffmans*, Schmertmann*	Zie Lane [1]	Kunstwerken en Dijken met deklaag
USACE, Mansur (1956) [4]	Lokaal/globaal: Controle op gradiënt. Pipingtoets is gericht voorkomen van sand boils (initiërend proces).	Gebaseerd op waarnemingen en reactief (Observational method design) Sand boils: Criterium $i_{optr} \leq 0,5$ (Normveiligheid: 1:100 p.j.)	Dijken met deklaag (blanket)
ASCE, Lane (1935) [1]	Globaal: Lane	Empirie: Praktijk cases falen en niet-falen Omgerekend: $i_{c,d}=0.14$ à 0.2 voor div. zanden	Dammen van metselwerk of beton (H = 2 à 12m, soms veel hoger) al dan niet met vrije uitstroom
DWA-M-501 pakket (Duitsland)	Globaal: Chugaev**	Partiële factoren bovenop kritieke gradiënt: $i_{c,d}=0.12$ à 0.33 afhankelijk van grondsoort	Primair gericht op dijken met deklaag. Mogelijk ook voor dijken met scherm (met Davidenkoff).

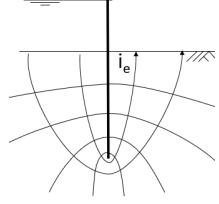
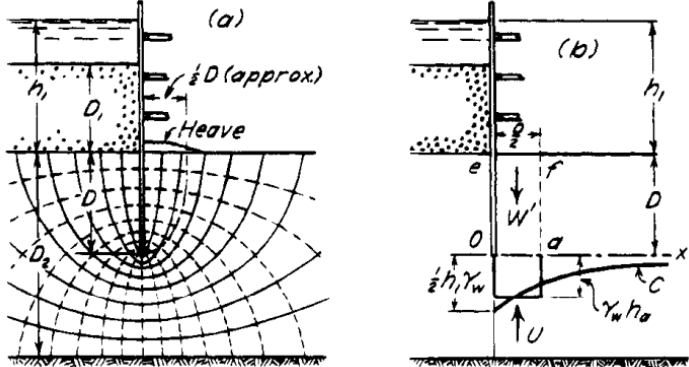
*) Niet toepasbaar op interne erosie langs verticale kwelwegen, wel op horizontale kwelweg tussen wel en scherm

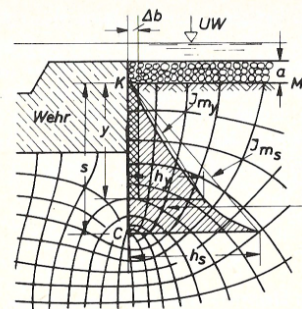
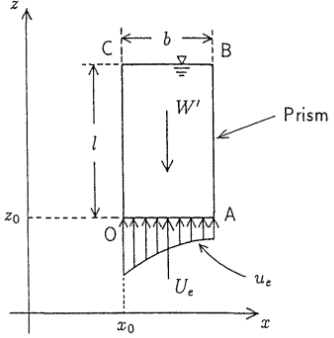
**) Chugaev in combinatie met fragmenten methode (Davidenkoff) ook toepasbaar op situatie met verticale kwelweg

***) Door Calle en Sellmeijer is een probabilistische analyse uitgevoerd gericht op heaveschermen bij kunstwerken. Het ging daarbij om situaties met een vrije uitstroom. Deze analyse heeft aangetoond dat de destijds gangbare overall veiligheidsfactor van 2 voldoende veilig was in de onderzochte situaties en bij de destijds gangbare vereiste betrouwbaarheidsindices voor piping bij dijken in het boven- en benedenrivierengebied.

C.2 Overzicht rekenmodellen hydraulische grondbreuk

De toets op hydraulic heave kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd. Hieronder een korte beschrijving van verschillende methoden.

Methode	Principe	Criterium
Harza (1935)	Uittrede gradiënt aan maaiveld (i_e) achter een scherm moet kleiner zijn dan kritieke gradiënt (i_c).	$SF_{Harza} = \frac{i_c}{i_e} \quad (C-1)$ <p>Waarin: i_c: (theoretische) kritieke gradiënt, zie formules 4-1 t/m 4-3.</p> 
Terzaghi & Peck (1948) Invalid source specified.	Verticaal krachtenevenwicht rond een denkbeeldig rechthoekig blok benedenstrooms van het scherm. De hoogte van het blok is gelijk aan de schermhoogte en een breedte is gelijk aan de helft van de hoogte. Voor een filter	<p>Zonder filter aan benedenstroomse zijde:</p> $SF_{Terzaghi} = \frac{W'}{U} = \frac{D\gamma'}{h_a\gamma_w} \quad (C-2)$ <p>Met ballast door filter:</p> $SF_{Terzaghi,filter} = \frac{W'+P'}{U} = \frac{D\gamma'+P'}{h_a\gamma_w} \quad (C-3)$ <p>Waarin: W': effectieve gewicht van denkbeeldig blok zand P': effectieve gewicht van filter bovenop blok U: Resulterende kracht verticale waterdruk a.g.v. opwaartse stroming (dus opwaartse waterkracht minus hydrostatisch kracht)</p> 

<p>Baumgart – Davidenkoff (1970) Invalid source specified.</p> <p>(Hieronder “gemiddelde gradiëntenmethode” genoemd)</p>	<p>Verticaal drukevenwicht langs de verticale stroomlijn direct achter het scherm, of een blokje ter hoogte van het scherm met zeer kleine breedte (Δb)</p>	$SF_{BD} = \frac{i_c}{\frac{h_s}{s}} = \frac{i_c}{i_{gem}} \quad (C-4)$ <p> <i>Waarin:</i> <i>i_c: Theoretische kritieke gradiënt</i> <i>s: diepte waar bij gradiënt over diepte z achter het scherm het grootst is. Bij vrije uitstroom is dit vrijwel gelijk aan de inbeddingsdiepte s van het scherm.</i> <i>h_s: waterdrukverschil over diepte s</i> <i>i_{gem}: gemiddelde gradiënt over hoogte scherm s (tussen uitstroompunt en onderkant)</i> </p>	 <p>The diagram shows a weir with a crest width Δb and a water head UW. The water surface is at height a from the crest. The flow is shown with streamlines and velocity profiles J_{m_y} and J_{m_s}. The depth of the flow is s, and the height of the water above the crest is h. The distance from the crest to the point of maximum velocity gradient is s. The diagram is labeled 'Standrohrspiegelverluster Längs der Strecke C - K'.</p>
<p>Tanaka – Verruijt (1999) Invalid source specified.</p>	<p>Verticaal krachtevenwicht rond een denkbeeldig rechthoekig blok benedenstrooms van het scherm zoals bij Terzaghi maar dan zonder vaste hoogte-breedte verhouding</p>	$SF_{TV} = \frac{W'}{U_e} \quad (C-5)$ <p> <i>Waarin:</i> <i>W': effectieve gewicht van denkbeeldig blok</i> <i>U_e: Resulterende kracht verticale waterdruk a.g.v. opwaartse stroming (dus opwaartse waterkracht minus hydrostatische kracht)</i> </p>	 <p>The diagram shows a rectangular block of width b and height l in a flow field. The block is labeled 'Prism'. The top corners are C and B, and the bottom corners are O and A. The vertical axis is z and the horizontal axis is x. The origin O is at the bottom-left corner. The vertical distance from the origin to the top of the block is l. The horizontal distance from the origin to the right side of the block is x_0. The vertical distance from the origin to the top of the block is z_0. The weight of the block is W'. The resulting vertical water pressure force is U_e. The velocity profile u_e is shown at the bottom of the block.</p>

	<p>Idem, maar dan met wrijvingskracht aan zijkanten van blok</p>	$SF_{TV,wrijving} = \frac{W' + F_R + F_L}{U_e}$ <p>(C-6)</p> <p>Waarin: <i>W'</i>: effectieve gewicht van denkbeeldig blok <i>F_L</i>: Wrijvingskracht tussen wand en blok <i>F_R</i>: Wrijvingskracht tussen omliggende grond (resterende passieve wig) en blok <i>U_e</i>: Resulterende kracht verticale waterdruk a.g.v. opwaartse stroming (dus opwaartse waterkracht minus hydrostatische kracht)</p>	
<p>Evenwicht-beschouwing (analoog Eurocode - concept 2022)</p>	<p>Beschouwing evenwicht neerwaartse effectieve spanning (σ'_v) en resulterende opwaartse waterdruk (Δu_d) op het niveau van de</p>		

	<p>teen van het scherm (z_s)</p>	<p>Eurocode (Concept 2022) [5] met partiële veiligheidsfactoren:</p> $\Delta u_d \leq \gamma_{HYD} (\gamma_{rep} - \gamma_{w,rep}) s + \gamma_{pv} p'_{v,rep} \quad (C-7)$ <p><i>Waarin:</i> Δu_d is the design excess groundwater pressure = $u_d - u_0$; u_d is the design groundwater pressure in the presence of flow; u_0 is the groundwater pressure in the absence of flow (hydrostatic); $\gamma_{w,rep}$ is the representative weight density of the groundwater; s is the vertical distance of the point in the ground below the ground surface (not including any overlying fill); γ_{rep} is the representative weight density of the ground; $p'_{v,rep}$ is the representative value of any effective overburden pressure at the ground surface; γ_{HYD} is a partial factor for hydraulic heave; γ_{pv} is a partial factor on the effective overburden pressure.</p>	<p>Met één overall veiligheidsfactor:</p> $SF_{VEM} = \frac{\sigma_v - u_0}{u_d - u_0} = \frac{s \cdot \gamma' + p'_v}{\Delta u_d} \quad (C-8)$ <p><i>Waarin:</i> σ_v: totaal gewicht onderzijde van beschouwde prisma u_d: waterdruk aan onderzijde van prisma bij aanwezigheid van stroming u_0: waterdruk aan onderzijde van prisma bij afwezigheid van stroming en freatische waterstand achter scherm (hydrostatisch waterdrukverloop) Δu_d: verschil tussen waterdruk bij grondwaterstroming en hystatische waterdruk aan onderzijde van prisma ($\Delta u = u_d - u_0$) γ': effectief gewicht van grond s: inbeddingsdiepte van scherm in watervoerende zandlaag p'_v: effectief gewicht van filter bovenop zandlaag</p>
--	---	--	--

C.3 Achtergronden bij de methode van Lane

In 1935 stelde Lane voor de American Society of Civil Engineers een eenvoudig criterium op voor onderloopsheid onder dammen. De regel was gebaseerd op een inventarisatie van bijna driehonderd dammen en keringen over de hele wereld. De regel van Lane was een verder aanscherping van de regel van Bligh die tot die tijd in de Verenigde Staten werd toegepast. Lane constateerde dat de verticale kwelweglengte veel sterker bijdroeg aan de weerstand tegen onderloopsheid dan de horizontale kwelweglengte. Sinds de toepassing van de methode van Lane is het aantal faalgevallen door onderloopsheid onder dammen en waterkerende constructies drastisch afgenomen.

De inventarisatie van Lane had betrekking op dammen en waterkerende constructies. Het waren gemetselde constructies, waarbij er naast een horizontale kwelweg ook een aanzienlijk verticale kwelweg aanwezig was. Een deel van de onderzochte cases betrof bezwijkgevallen die aan onderloopsheid kunnen worden toegeschreven. In zijn publicatie is per case een beschrijving gegeven van de ondergrond, de verticale en horizontale kwelweglengte en of de dam al dan niet was bezweken door onderloopsheid. De verticale kwelweg was gedefinieerd als een kwelweg steiler dan 1:1 en een horizontale kwelweg als een kwelweg flauwer dan 1:1. De meeste van de geïnventariseerde dammen zijn niet bezweken. In zijn publicatie beschrijft Lane van enkele cases ook het faalgedrag. Soms wordt dit beschreven als “piping along the line of creep” en in andere gevallen komt het beschreven faalgedrag eerder overeen met hydraulische heave en in sommige gevallen gaat het om opbarsten van een deklaag (“blow out through an impervious layer”).

Lane kwam tot het volgende criterium:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{\left(\frac{1}{3}L_h + L_v\right)}{C_{w,creep}} \quad (-10)$$

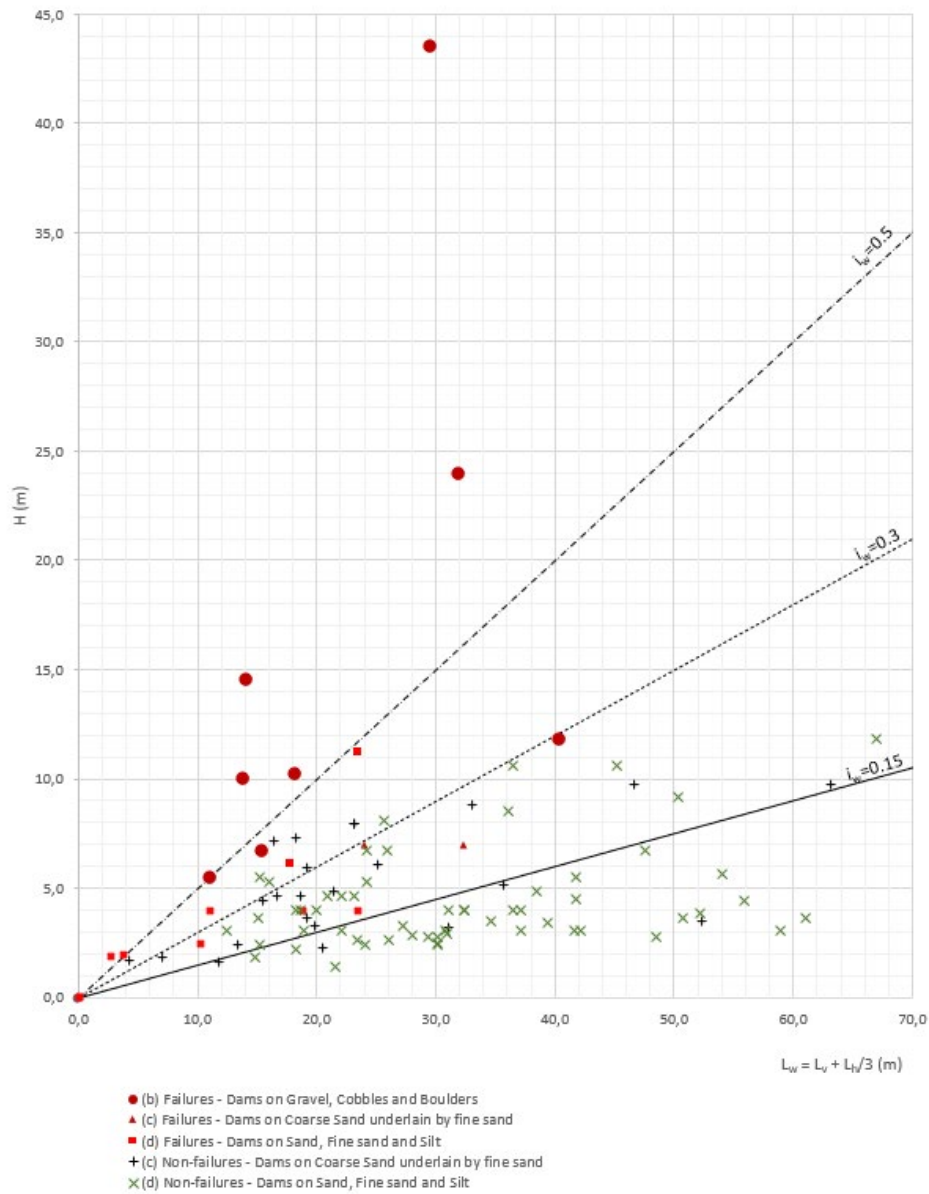
Gebruikte parameters in de vergelijking:

L_h	horizontale kwelweglengte (waar line of creep flauwer dan 1:1 loopt)	[m]
L_v	verticale kwelweglengte (waar line of creep steiler dan 1:1 loopt). Bij een verticale kwelweg langs een in zand ingebed scherm is het deel van L_v in het zand gelijk aan twee keer de inbeddingslengte van het scherm in het zand	[m]
$C_{w,creep}$	gewogen creep-factor, een weerstandsfactor die afhankelijk is van het materiaal waardoor piping kan optredende	[-]

De materiaalafhankelijke weerstandsfactor $C_{w,creep}$ is gebaseerd op een bovengrens. Het is niet gebruikelijk om bij het toepassen van de regel van Lane een additionele veiligheidsfactor toe te passen. Tabel 5.1 toont de door Lane aangegeven waarden voor verschillende typen materiaal in de grondlaag.

toont een grafiek met alle onderzochte cases van Lane met een zandige, siltige en grindige ondergrond. In de grafiek is het gekeerde verval uitgezet tegen de gewogen kwelweglengte uitgezet en is de ratio $i_w=1/C_{w,creep}$ voor enkele gevallen aangegeven.

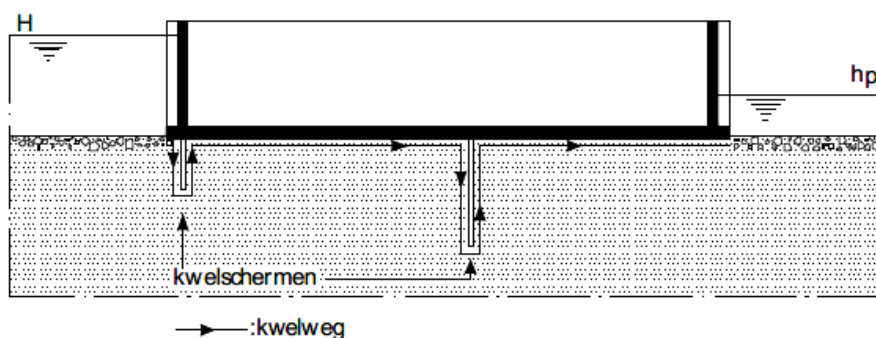
Dataset levees (Lane, 1935) inclusive failures due to piping
 Water retaining height levee (H) vs. Weighted seepage length ($L_w=L_v+L_h/3$)
 rough estimation of vertical gwf gradient: $i_w=H/L_w$



Figuur -1: Gewogen kwelweglengte versus verval over de kering Lane (1935). Ieder punt is een onderzochte casus (rode dichtepunten zijn faalgevallen)

Tabel -1 Creep-factoren voor de regels van Lane

Grondsoort	Mediane korreldiameter [μm] ¹⁾	$C_{w,creep}$ (Lane) met $\gamma = 1,0$
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand	105 – 150	
Zeer fijn zand (mica)		7
Matig fijn zand (kwarts)	150 – 210	7
Matig grof zand	210 – 300	6
Zeer/uiterst grof zand	300 – 2000	5
Fijn grind	2000 – 5600	4
Matig grof grind	5600 – 16000	3,5
Zeer grof grind	> 16000	3



Figuur -2 Kwellweg bij waterkerende kunstwerk met kwelschermen [6]

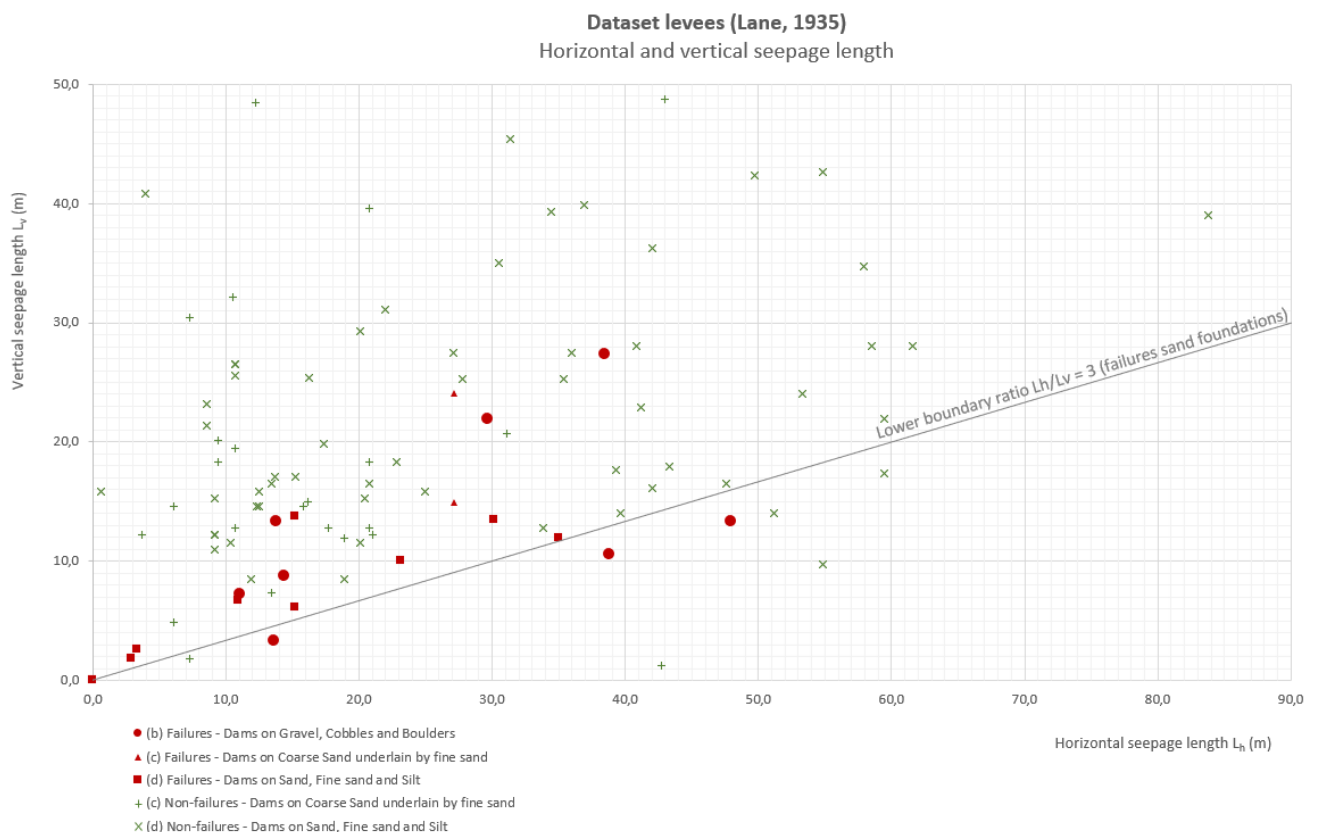
Voor het toepassen van het globale criterium van Lane zijn alleen direct meetbare dimensies van de waterkering en grondkarakteristieken nodig. Er is geen grondwaterstromingsanalyse nodig. De regel van Lane kan gezien worden als een bovengrens voor het dimensioneren van heaveschermen. De regel kan worden toegepast voor situaties met een vrije en een geconcentreerde uitstroom via een wel in een deklaag. Een deel van de onderzochte cases betrof ook zogenaamde "blow out" situaties. Er wordt benadrukt dat de regel ook toepassingsvoorwaarden heeft. Deze zijn hieronder weergegeven.

Toepassingsvoorwaarden uit publicatie van Lane:

- De horizontale kwelweglengte mag alleen in rekening worden gebracht als er geen ruimte kan ontstaan tussen de onderkant van de constructie/dijk en de ondergrond. Er kan een ruimte ontstaan bij een constructie op palen en zettingen van de ondergrond. Het deel van de horizontale kwelweglengte onder een constructie op palen dient derhalve gelijk aan nul te worden gesteld;
- Als de afstand tussen de onderzijde van twee kwelschermen kleiner is dan de helft van de gewogen kwelweglengte tussen beide punten, dan is stroming door de grond onder het kunstwerk maatgevend en niet de kwelweg langs de constructie. Om de gewogen kwelweglengte te bepalen, moet de kortste afstand ("short path") verdubbeld worden. Als een gewogen kwelweg een "short path" bevat, dan moet $C_{w,creep}$ volgens Lane worden verminderd met een factor van 1,25.
- In de situaties met meerdere kwelschermen, waarbij het scherm bij het uittreepunt relatief kort is ten opzichte van de andere schermen, is een beoordeling van hydraulische heave van het benedenstroomse scherm aan te bevelen of dient dit scherm niet in de methode van Lane te worden beschouwd.

Aanbevolen aanvullende toepassingsvoorwaarden voor toepassing bij dijken:

- Wanneer de verhouding tussen horizontale kwelweglengte en verticale kwelweglengte (L_h/L_v) vergelijkbaar of lager dan de L_h/L_v verhouding van de door Lane onderzochte faalgevallen. In zijn de horizontale en verticale kwelweglengtes van de onderzochte cases met een zandige ondergrond in één grafiek weergegeven. Uit de figuur blijkt dat de ratio tussen horizontale en verticale kwelweglengte (L_h/L_v) niet groter was dan 3 voor de gefaalde dammen met een zandige ondergrond. Het criterium van Lane is dus niet afgeleid voor dammen met een hoger aandeel horizontale kwelweglengte. In gevallen waarbij de verhouding L_h/L_v groter is dan 3 wordt in ieder geval geadviseerd om ook andere analyses toe te passen om de veiligheid ten aanzien van onderloopsheid te toetsen.
- Voor de afstand tussen de tussen zandmeevoerende wel en het scherm dient rekening te worden gehouden met pijpvorming. In dat geval wordt geadviseerd om geen horizontale kwelweg tussen wel en scherm mee te nemen bij het toepassen van de regel van Lane.
- Een scherm aan de benedenstrooms zijde van de dijk, bijvoorbeeld onder de binnenberm, is effectiever dan een scherm aan de bovenstroomse zijde van de dijk. Kwelschermen aan de bovenstroomse zijde van de dijk vergroten alleen de stromingsweerstand en voor een effectieve werking zijn vaak lange kwelschermen nodig, soms zelfs scherm die de watervoerende zandlaag afsluiten. Daarnaast zorgt de pijpvorming tot aan het bovenstroomse scherm voor grotere gradiënt over het scherm en is er alsnog onder de dijk een erosiepijp aanwezig. Deze pijp zal bij toenemende debieten in diepte kunnen groeien en zich eventueel verder vertakken. Deze effecten worden niet in het criterium van Lane meegenomen en zijn een essentieel onderdeel van een ontwerp. Het is daarom voor bovenstrooms gepositioneerde schermen af te raden om de regel van Lane te gebruiken.



Figuur -3: Combinaties van verticale en horizontale kwelweglengten uit onderzochte praktijksituaties door Lane (1935). Ieder punt is een onderzochte casus (rode dichtepunten zijn faalgevallen)

Referenties bij bijlage C:

- [1] Lane en ACSE, „Security from under-seepage masonry dams on earth foundations,” 1935.
- [2] RWS Bouwdienst, Ontwerpen van schutsluizen, Rijkswaterstaat, 2000.
- [3] C. C731, The International Levee Handbook, London, 2013.
- [4] Mansur, „Investigation of underseepage and its control - Lower Mississippi River Levees, Technical Memorandum No. 3-424,” Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, 1959.
- [5] CEN, „Concept Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp - Deel 1: algemene regels. NEN-EN 1997-1,” CEN, 11-2022 (concept).
- [6] Deltares, „Onderzoeksrapportage Zandmeevoerende Wellen, 1202123-003,” 2012.