

SBW Hervalidatie piping

E. Evaluatie 0,3d rekenregel

dr. ir. André Koelewijn




Titel
 SBW Hervalidatie piping
 E. Evaluatie 0,3d rekenregel

| | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| Opdrachtgever | Project | Kenmerk | Pagina's |
| Rijkswaterstaat Waterdienst | 1001453-002 | 1001453-002-GEO-0001 | 12 |

Trefwoorden
 Piping, opbarstkanaal, Bligh, Sellmeijer, zandmeevoerende wellen, 0,3d-regel

Samenvatting
 De herkomst en onderbouwing van de zogenaamde '0,3d-regel' uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [TAW, 1999] is nader onderzocht in het kader van het SBW-project 'Hervalidatie piping'. Deze regel biedt bij toepassing van de methoden van Bligh en Sellmeijer een reductie van het verval over de waterkering bij het toetsen op het kritieke verval in geval van een verticaal opbarstkanaal (met een hoogte d), op basis van de extra weerstand door de gefluïdiseerde zandkorrels in het opbarstkanaal.

Uit het onderzoek kan worden geconcludeerd dat de onderbouwing voor de huidige rekenregel met een reductie van $0,3d$ voor een verticaal stroomkanaal (met d de hoogte van het kanaal) weliswaar betrekkelijk zwak blijkt te zijn, maar dat er onvoldoende redenen zijn om deze aan te passen. Aanbevolen wordt om meer praktijkgevallen van piping te verzamelen en aanvullend laboratoriumonderzoek uit te voeren.

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf | Review | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|------------|---------------------------|---|---------------------------------|---|-------------------|---|
| 03 | 2009-04-16 | dr. ir. A.R. Koelewijn |  | Prof. dr. ir. F.B.J. Barends |  | Ing. A.T. Aantjes |  |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Status
 definitief

Inhoud

| | |
|---------------------------------------|----------|
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 Kader | 1 |
| 1.2 Aanleiding | 1 |
| 1.3 Doel | 1 |
| 2 Analyse | 2 |
| 2.1 Huidige rekenregel en achtergrond | 2 |
| 2.2 Basis voor de rekenregel | 2 |
| 2.3 Nadere beschouwing | 4 |
| 2.3.1 Sellmeijer, 1981 | 4 |
| 2.3.2 Van Loon | 5 |
| 2.3.3 Vardoulakis | 6 |
| 2.3.4 Amerikaanse ervaringen | 6 |
| 3 Conclusies en aanbevelingen | 8 |
| 4 Literatuur | 1 |

1 Inleiding

1.1 Kader

Het onderzoek dat in deze rapportage beschreven is, maakt onderdeel uit van het programma 'Sterkte & Belastingen Waterkeringen' (SBW) van Rijkswaterstaat. Eén van de project binnen het SBW-programma betreft 'Piping'. Eén van de drie sporen binnen het SBW project Piping betreft 'Hervalidatie piping'. Daarbinnen worden acht onderdelen onderscheiden, waarvan "Evaluatie van de 0,3d-rekenregel in het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen" [TAW, 1999] deel uitmaakt.

1.2 Aanleiding

In de huidige ontwerp- en toetspraktijk van waterkeringen wordt bij pipinganalyses een toelaatbare waterkerende hoogte bepaald. Hieraan wordt de waterkerende hoogte van het ontwerp of de daadwerkelijk aanwezige waterkerende hoogte getoetst.

In situaties met een afdekkende laag (van bijvoorbeeld klei en/of veen) op de pipinggevoelige zand- of grindlaag, waarbij na opbarsten van de afdekkende laag een kwelweg ontstaat met een verticale component ter grootte van de dikte van de afdekkende laag d , wordt voor de bepaling van de waterkerende hoogte van het ontwerp of de toetsing bij gebruik van de rekenregel van Bligh of van Sellmeijer het verval over de waterkering gereduceerd met een factor $0,3d$. Deze reductie staat ook wel bekend als de "0,3d-regel".

Er zijn twijfels gerezen over de onderbouwing en de validatie van deze regel. Inmiddels zijn in de Nederlandse en internationale literatuur suggesties voor modelverbetering beschreven.

1.3 Doel

Het doel van dit onderzoek is het zonodig verbeteren van de 0,3d-regel op basis van gegevens en analyses die beschikbaar zijn in de literatuur.

2 Analyse

2.1 Huidige rekenregel en achtergrond

In §4.2.2 van het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [TAW, 1999], dat over de empirische rekenregel van Bligh gaat, is de 0,3d-regel als volgt terug te vinden:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \Delta H_c = \frac{L}{C_{creep}} \quad (1)$$

Hierin is ΔH het verval over de kering, d de verticale afstand tussen de bovenkant van de zandlaag en het maaiveld of de slootbodem, ΔH_c het kritisch verval volgens het model, L de kwelweglengte en C_{creep} een constante die volgens Bligh samenhangt met de korreldiameter. Voor de herkomst wordt verwezen naar [Sellmeijer, 1981].

In §4.2.4, over het rekenmodel van Sellmeijer, komt de 0,3d-regel als volgt terug:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c \quad (2)$$

Hierin is γ een veiligheidsfactor, waarvoor een waarde gekozen is van 1,20.

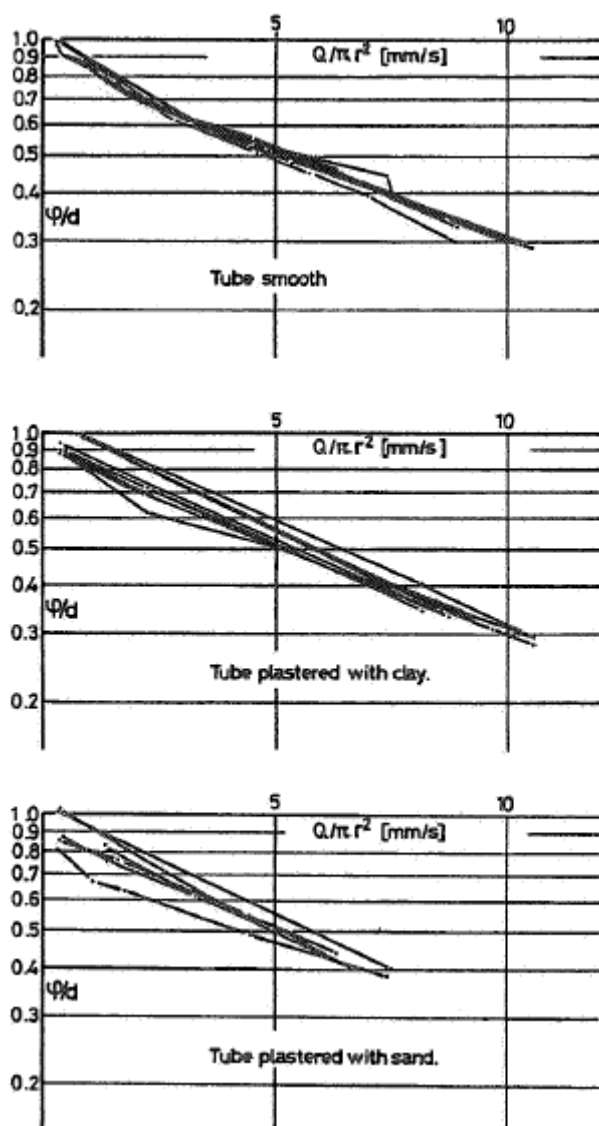
2.2 Basis voor de rekenregel

De basis voor de rekenregel wordt gevormd door de notie dat het gefluïdiseerde zand in een opbarstkanaal voor extra weerstand zorgt. De vraag is op hoeveel weerstand mag worden gerekend. In [TAW, 1999] is daarvoor 0,3d aangehouden, gebaseerd op [Sellmeijer, 1981].

In [Sellmeijer, 1981] worden diverse proeven beschreven waarbij zand tot fluïdisatie is gebracht. Voor een deel zijn dit proeven waarbij gebruik is gemaakt van alleen een verticale perspex buis, met op diverse hoogten een meting van de stijghoogte. Deze proeven zijn in meer detail beschreven in [Yap, 1981].

Het gaat hier om in totaal 35 proeven in verticale perspex kolommen (buizen), van 4 danwel 10 cm doorsnede. De wandbekleding bestond uit zand, klei of niets (glad). Een laag zand werd tot fluïdisatie gebracht, hetgeen telkens initieel een weerstand opleverde tot een verhang boven 0,8. Dit is op zich een logische waarde voor drijfzand, bij een porositeit van ten hoogste 32%.

Het verhang nam in de proeven vervolgens snel af, tot doorgaans 0,29 tot 0,35 aan het einde van de proef, met uitzondering van de proeven met een zandbekleding en enkele andere proeven, die stopten bij een geringere afname van het verval, tot 0,4 à 0,5 – overigens bij een geringer debiet. De samenvattende figuren zijn gereproduceerd in Figuur 1. Bij deze proeven werd een duidelijk verband gevonden tussen het specifiek debiet en het verhang. Deze relatie bevat een tweetal schaalparameters, die afhankelijk worden geacht van het beproefde zand.



Figuur 1. Verband tussen specifiek debiet en drukgradient tijdens fluïdisatie [Sellmeijer, 1981].

Een lager verhang dan 0,3 (afgerond) is niet gevonden in deze proeven, maar dat is in de eerste plaats toe te schrijven aan het feit dat de proeven toen gewoonweg beëindigd werden [Sellmeijer, 2008]. Bij het afleiden van de rekenregel is dit destijds anders geïnterpreteerd – er is toen namelijk van uitgegaan dat het proces van zandtransport gestopt was voordat de proeven beëindigd werden [Weijers, 2009].

Een groter debiet leidt volgens het gevonden verband tot een lagere weerstand. Dit neemt asymptotisch af tot 0. Dit is goed verklaarbaar: het betekent namelijk dat de buis steeds meer schoongespoeld raakt, dus dat er steeds minder zand in aanwezig is. Het consequent doortrekken van deze redenering leidt er toe, dat de invloed van een opbarstkanaal nihil zou moeten worden geacht, hetgeen een fors verschil maakt met de thans gangbare praktijk.

In [Sellmeijer, 1981] zijn nog andere proeven gerapporteerd, namelijk twee-dimensionale modelproeven met stroming naar een spleet en drie-dimensionale modelproeven met stroming naar een gat. Van vier proeven met stroming naar een gat zijn resultaten gerapporteerd. Dit betreft proeven met zowel horizontale stroming over een afstand van 2,40m (proeven 1 en 2) of 4,50m (proeven 3 en 4), als verticale fluïdisatiestroming met een

gatdiameter van 0,04m (proeven 1 en 3) of 0,10m (proeven 2 en 4) over een hoogte van 0,12m.

Eerst wordt het stadium van zandmeevoerende wellen ('boiling sand') bereikt waarbij het gat nog wel uit schoon water bestaat, daarna wordt doorgegaan totdat het gat (vergelijkbaar met een opbarstkanaal) geheel gevuld is met gefluïdiseerd zand ('piping').

De laatste fase is bij de proeven met een gatdiameter van 0,10m niet bereikt: aan de bovenstroomse zijde stroomde schoon water af terwijl aan de benedenstroomse zijde zand ophoopte.

Tabel 1 geeft alle in [Sellmeijer, 1981] vermelde meetwaarden weer.

Tabel 1. Voorspelde en gemeten verval in mm zoals vermeld in [Sellmeijer, 1981].

| Proef | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----|-----|-----|------|
| gemeten verval bij erosie | 300 | 375 | 595 | 740 |
| voorspelde verval bij volledige fluïdisatie | 454 | 548 | 910 | 1093 |
| gemeten verval bij volledige fluïdisatie | 470 | - | 860 | - |

Het gemeten verval bij volledige fluïdisatie komt goed overeen met het voorspelde verval. In het artikel wordt aangegeven dat het gemeten specifiek debiet aanzienlijk hoger is dan voorspeld.

2.3 Nadere beschouwing

Om tot een betere onderbouwing danwel bijstelling van de 0,3d-regel te komen, zal eerst het beschikbare materiaal nader worden beschouwd.

2.3.1 Sellmeijer, 1981

Het spreekt vanzelf dat uitsluitend de weerstand in het opbarstkanaal dient te worden meegenomen, het gedeelte van het pipingkanaal dat zich in het zand bevindt moet niet van invloed zijn en is al opgenomen in het model – in de formules (1) en (2) in de term ΔH_c . Verder is het logisch te veronderstellen dat een langer opbarstkanaal tot een grotere weerstand leidt (een kanaaltje van 2 meter zou logischerwijze meer invloed moeten hebben dan een kanaaltje van 10 centimeter), al is het veiligheidshalve verstandig om alleen de verticale component van een opbarstkanaal in rekening te brengen.

Uit de eerdere proeven in [Sellmeijer, 1981] blijkt duidelijk dat eventuele wandwrijving er praktisch niet toe doet. Een benadering waarbij de wandwrijving expliciet of impliciet van invloed is, leidt daarom niet tot een oplossing. Bovendien kan hierbij extra erosie ontstaan, waardoor het gat groter wordt en het specifiek debiet zal afnemen. Ook een benadering waarbij het debiet een rol speelt, zoals meermalen voorgesteld door Sellmeijer [Sellmeijer, 1981; Van Loon, 2000; Sellmeijer, 2008] is daardoor lastig te verwezenlijken. Een dergelijke benadering zal immers al snel een component bevatten die verband houdt met de wandwrijving.

Een alternatieve interpretatie van [Sellmeijer, 1981] waarmee mogelijk een ondergrens van de optredende extra weerstand in het opbarstkanaal kan worden verkregen gaat uit van het uiteindelijke verhang in de laatste proeven. In de gepresenteerde proeven bedraagt dit 0,1865 resp. 0,1861. Dit is berekend door het gemeten verval te delen door de totale afstand waarover deze gefluïdiseerde toestand optreedt ($470/(2400+120)$ resp. $860/(4500+120)$). Dat deze waarden vrijwel hetzelfde zijn, kan natuurlijk worden toegeschreven aan toeval, echter, in beide gevallen gaat het om hetzelfde zand dat zich over de volle lengte in gefluïdiseerde

toestand bevindt. Het is daarom logischer om te stellen dat het proefresultaat goed reproduceerbaar is.

Het is de vraag hoeveel invloed het type zand heeft. Uiteindelijk zijn er slechts twee proefresultaten uit [Sellmeijer, 1981] beschikbaar, en die zijn uitgevoerd op hetzelfde zand en bij eenzelfde hoogte en diameter van het opbarstkanaal. Het is riskant om een regel die zo'n verstrekkende invloed kan hebben, te baseren op slechts een tweetal proeven.

Dat de beide andere proeven (met een groter gat, van 0,10m) destijds zijn mislukt, kan worden uitgelegd als een poging om in een laboratoriumopstelling het fenomeen piping op te laten treden in een onnatuurlijk groot opbarstkanaal – met als gevolg dat er een kleiner kanaal ontstond waar al snel schoon water doorheen stroomde. In de praktijk zal een opbarstkanaal moeten ontstaan waar eerst nog geen gat is, de afmetingen van het gat dat wél ontstaat, zullen daarom klein genoeg zijn om bij voldoende verval piping te doen ontstaan. Hierdoor hoeft niet gerekend te worden op een situatie zoals bij proeven 2 en 4 uit [Sellmeijer, 1981].

Bij de proeven beschreven in [Yap, 1981] werd telkens een duidelijk verband gevonden tussen het specifiek debiet en het verhang. Het is opvallend dat bij proeven die daar qua opzet niet eens zoveel van afweken het gevonden debiet significant anders (in dit geval: groter) was. Dit maakt het des te moeilijker om een algemene regel op basis van het debiet te formuleren en geeft des te meer reden om de nodige voorzichtigheid te hanteren. Eén van de verschillen tussen deze laboratoriumopstelling en de werkelijkheid is bijvoorbeeld dat de doorsnede van het opbarstkanaal groeit van niets tot steeds meer onder invloed van erosie, hetgeen duidelijk anders is dan de vaste diameter van de ronde, niet-erodeerbare buizen in het laboratorium. Bij een geringere omvang is een geringere kwelstroom voldoende om tot fluïdisatie te komen.

Op basis van de beide geslaagde proeven uit [Sellmeijer, 1981] kan worden geconcludeerd dat voor die specifieke omstandigheden bij een vertikaal opbarstkanaal tenminste een extra weerstand optreedt van 0,186d.

2.3.2 Van Loon

In [Van Loon, 2000] wordt op basis van de algemene formule en de fitfactoren voor strandzand gegeven in [Sellmeijer, 1981], samen met andere elementen, een verbeterd rekenrecept afgeleid voor de formule van Sellmeijer, inclusief een component voor de fluïdisatieweerstand in een opbarstkanaal. Dit is toegepast en uitgewerkt voor de situatie bij de Waalbandijk bij Opijnen.

Er wordt een drietal alternatieven gepresenteerd, waarbij de fluïdisatieweerstandscomponent varieert van (afgerond) 0,00m tot 0,03m bij een dikte van de afdeklaag van 1 meter. Dit is aanzienlijk minder dan de 30 cm die toepassing van 0,3d-regel oplevert.

Het is echter de vraag hoe reëel de gehanteerde parameters zijn – de focus van het onderzoek van Van Loon lag ook niet bij dit aspect. Eén bezwaar is dat de fitfactoren die afgeleid zijn voor strandzand, zijn toegepast op het bij Opijnen afgezette rivierzand. Er zou op z'n minst een beperkte reeks nieuwe proeven op andere zanden uitgevoerd moeten worden om te bepalen of deze fitfactoren inderdaad afhankelijk zijn van het type zand. Als dat het geval is, dan zullen deze voor elk in de praktijk voorkomend type zand apart moeten worden bepaald, hetgeen een omvangrijke klus betekent.

Een ander bezwaar tegen het rekenrecept van Van Loon is dat dit gebaseerd is op het specifieke debiet. Zoals hiervoor aangegeven weken de beide proeven (1 en 3) in [Sellmeijer, 1981] op dit punt al significant af van de bevindingen in [Yap,1981]. Verder vergt deze methode ook verschillende aannamen, zoals bijvoorbeeld de effectieve breedte van het dijkvak waarvandaan de stroming naar het gat plaatsvindt. Deze parameter is voor praktijksituaties vooraf moeilijk te bepalen. Voor een toetsing (vooraf) moet deze aanpak daarom minder geschikt worden geacht.

2.3.3 Vardoulakis

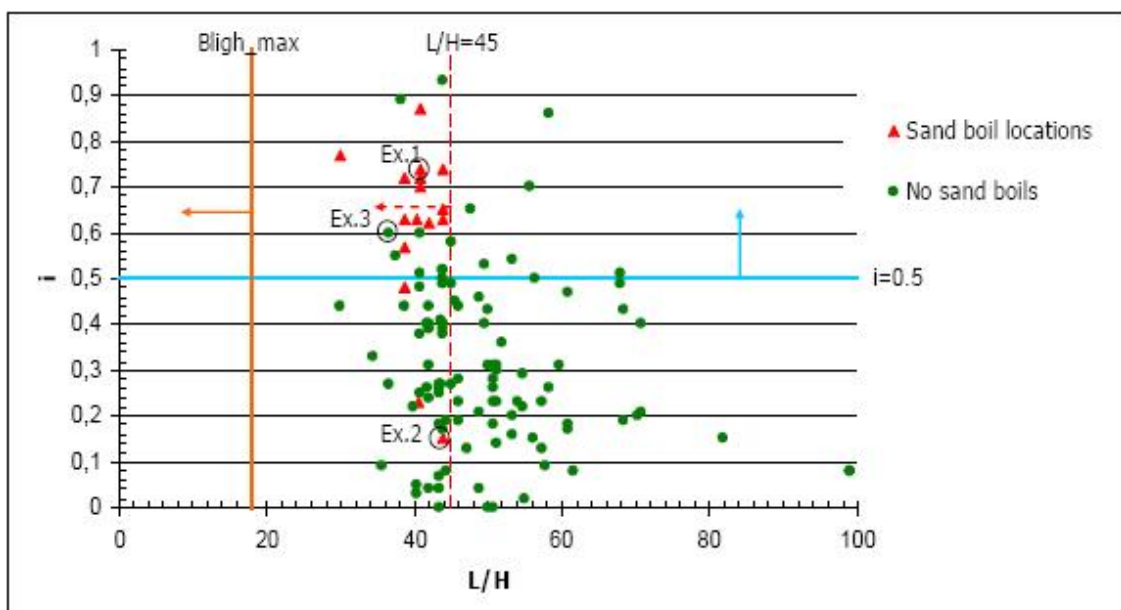
In [Vardoulakis, 1996] en [Vardoulakis, 2004] worden handreikingen gegeven waarmee een methode kan worden afgeleid voor de bepaling van de fluïdisatieweerstand in een pipe. Ook hier geldt echter dat parameters vereist zijn die in praktijk vooraf niet goed te bepalen zijn. Het is daarom zeer de vraag of dit spoor tot zinvolle en tegelijkertijd veilige uitkomsten leidt.

2.3.4 Amerikaanse ervaringen

In de Amerikaanse ontwerp - en toetsingspraktijk voor piping wordt veel gebruik gemaakt van de optredende verhangen.

Een uitgebreide beschrijving van de Amerikaanse voorschriften en de vooral empirische achtergrond daarvan is te vinden in [Ammerlaan, 2007]. De schadegevallen en andere observaties langs de Mississippi tijdens de hoogwaters van 1937, 1945 en 1950, beschreven in [Mansur, 1956] vormen hier de belangrijkste basis voor. Een aanvulling hierop is het verslag van het historische hoogwater van 1993 langs dezelfde rivier, beschreven in [Mansur, 2000].

De kern van de Amerikaanse voorschriften voor piping wordt gevormd door de regel dat het verhang niet meer mag bedragen dan de kritisch geachte waarde van 0,5. Vrijwel alle in [Mansur, 1956] gerapporteerde gevallen van zandmeevoerende wellen werden gevonden bij een verhang dat daarboven lag, zie Figuur 2. Hierin geven de driehoeken zandmeevoerende wellen weer, bij een zeker verhang i op de verticale as en een zekere verhouding L/H op de horizontale as.



Figuur 2. Verband tussen verhang en verhouding L/H voor diverse locaties langs de Mississippi rivier (figuur 7.7 uit [Ammerlaan, 2007]).

De laagste waarde voor het verhang waarbij zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd bedraagt 0,15. Dit is opgetreden in het district Lower Francis, waarbij 'tallose zandmeevoerende wellen optraden, bij enkele van deze wellen was sprake van een zandproductie van ongeveer 0,75 m³'. Ook werd de teen van de berm instabiel. Een dijkdoorbraak is echter niet voorgekomen, mogelijk vanwege tijdig genomen maatregelen zoals opkisten.

Daarnaast valt een waarde van 0,22 op. Deze is opgetreden bij Caruthersville. Daar was sprake van 'tallose kleine wellen', maar trad verder geen schade op.

Een waarde van 0,48 is opgetreden bij Gammon. Hier was sprake van een veertigtal kleine tot middelgrote wellen, in diameter variërend van zo'n 7 tot 30 cm.

Alle andere gevallen zijn opgetreden bij een verhang groter dan 0,5.

In [Mansur, 1956] komt naar voren dat bij de hoogwaters die in detail onderzocht zijn er weliswaar diverse zorgwekkende locaties ten aanzien van piping waren, maar dat er geen dijkdoorbraken zijn opgetreden ten gevolge van dit mechanisme. Er wordt echter ook opgemerkt dat in de periode van 1890 tot 1927 in totaal ongeveer 60 doorbraken zijn opgetreden langs de Mississippi, waarvan er 6 expliciet zijn toegeschreven aan zandmeevoerende wellen. Verder zijn er in die periode nog een aantal doorbraken met onbekende oorzaak geweest, die mogelijk ook verband hielden met piping. Tenslotte wordt genoemd dat in 1929 bij een zandmeevoerende wel op een gegeven moment een kruinzakking van ongeveer een meter ("several feet") optrad, waarna de stroming stopte. Omdat er sprake was van voldoende overhoogte trad geen overstroming van de dijk op, zodat ook hier geen doorbraak ontstond. Nadere details over deze situaties ontbreken echter.

In [Mansur, 2000] worden kleine, vrij onbetekenende zandmeevoerende wellen gerapporteerd bij $i=0,23$ en zelfs $i=0,12$. Meer significante gevallen van piping deden zich in 1993 voor bij verhangen van 0,32 tot 0,84. Ook wordt in deze publicatie melding gemaakt van een dijkdoorbraak ten gevolge van piping, in het Kaskaskia district. Over dit voorval worden echter weer geen nadere details gegeven.

Andere, relevante referenties waaraan de afgeleide regel gevalideerd zou kunnen worden zijn niet bekend, evenmin als rekenmodellen waarin de uitkomst niet al van tevoren ingevoerd hoeft te worden.

3 Conclusies en aanbevelingen

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat de onderbouwing voor de huidige rekenregel met een toeslag van $0,3d$ voor een vertikaal stroomkanaal (met d de hoogte van het kanaal) weliswaar betrekkelijk zwak blijkt te zijn, maar dat er onvoldoende redenen zijn om deze aan te passen.

Strikt theoretisch genomen kan zandtransport blijven optreden totdat er praktisch geen sprake meer is van een toename van het verhang. Dit is het ene uiterste. Het andere uiterste ligt boven een waarde van $0,5d$, hetgeen na uitgebreide analyses langs de Mississippi als grens voor het nemen van maatregelen is gekozen in de Verenigde Staten.

Daartussenin liggen waarden van $0,15d$ voor een situatie waarbij forse wellen optraden en verzwakking van een bermteent, maar waar verder niets ernstigs gebeurde en $0,186d$ voor twee laboratoriumproeven waarbij fluïdisatie optrad, en daarnaast verscheidene praktijksituaties met $0,12d$, $0,22d$, $0,23d$ en $0,48d$ waarbij weliswaar wat zandtransport optrad, maar er verder weinig aan de hand leek te zijn. Ook worden vele situaties aangegeven met $0,3d$ tot $0,5d$ waarin geen zandtransport optrad, maar wel flink wat kwel. Aan de andere kant zijn er meerdere gevallen waarbij piping tot een dijkdoorbraak heeft geleid, waarvoor nadere gegevens ontbreken.

Vandaar de aanbeveling om de huidige rekenregel vooralsnog te handhaven. Voor een aanpassing is onvoldoende grond, mede gelet op de forse maatschappelijke en economische impact die dit zou kunnen betekenen. Hierom wordt echter ook aanbevolen om praktijkcases te verzamelen en te toetsen met de vraag of, en in hoeverre, de rekenregel aangepast zou moeten worden. Aanvullende laboratoriumproeven kunnen hier eveneens een rol in spelen.

In het kader van een meer geavanceerde toetsing op piping is het mogelijk om de fluïdisati weerstand te bepalen met behulp van een eindige-elementenberekening met bijvoorbeeld MSeep. Hierbij moeten echter wel aannamen worden gedaan, in elk geval ten aanzien van de doorsnede van het opbarstkanaal. Hiervoor lijkt het vooralsnog lastig om algemeen geldige suggesties te geven. Ook hierbij kunnen een verzameling van praktijkcases en gegevens uit laboratoriumproeven behulpzaam zijn.

4 Literatuur

- [Ammerlaan, 2007] P.R.M. Ammerlaan, 'Levees and levee evaluation – the Dutch and US practice compared', MSc thesis, Delft University of Technology, Department of Hydraulic Engineering, Delft, August 2007.
- [Van Loon, 2000] Laura van Loon, 'Piping – Evaluatie van de formules van Sellmeijer', MSc thesis, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, maart 2000.
- [Mansur, 1956] C.I. Mansur, R.I. Kaufman, J.R. Schultz, W.J. Turnbull, 'Investigation of underseepage and its control – lower Mississippi River levees', Technical Memorandum no. 3-424, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, October 1956.
- [Mansur, 2000] Charles I. Mansur, George Postol, J. Ronald Salley, 'Performance of relief well systems along Mississippi river levees', ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(8):727-738, August 2000.
- [Sellmeijer, 1981] J.B. Sellmeijer, 'Piping due to flow towards ditches and holes', Proc. Euromech 143, Delft, 2-4 September 1981.
- [Sellmeijer, 2008] J.B. Sellmeijer, 'Persoonlijke mededeling', december 2008.
- [TAW, 1999] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 'Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen', Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, maart 1999.
- [Vardoulakis, 1996] I. Vardoulakis, M. Stavropoulou, P. Papanastasiou, 'Hydro-Mechanical Aspects of the Sand Production Problem', Transport in Porous Media, 22:225-244.
- [Vardoulakis, 2004] I. Vardoulakis, 'Fluidisation in artesian flow conditions: hydromechanically unstable granular media', Géotechnique, 54(3):165-177.
- [Weijers, 2009] J.B. Weijers, 'Persoonlijke mededeling', januari 2009.
- [Yap 1981] H. Yap, 'Fluïdisatieproeven op strandzand', Laboratorium voor Grondmechanica Delft, rapportage CO-220884, Delft, december 1981.