

SBW Piping Kunstwerken

KW8 Rapport Gevoeligheidsanalyse grondwaterstroming kunstwerken

A.D. Hartman
ir.ing. V. Veenbergen

Titel

SBW Piping Kunstwerken

Project

1200675-001

Kenmerk

1200675-001-GEO-0002

Pagina's

34

Trefwoorden

Piping, schutsluis, kwelscherm, monitoring

Samenvatting

Het onderzoekproject SBW Piping Kunstwerken heeft als doel het ontwikkelen van een nieuw toetscriterium ter beoordeling van de veiligheid tegen piping bij waterkerende kunstwerken waarvan onvoldoende betrouwbare informatie over de constructie en conditie van de geotechnische en bouwkundige componenten onder en naast het kunstwerk aanwezig is. Hierbij gaat het meestal om historische kunstwerken. Er dient dus een antwoord te worden gegeven op de vraag: "Is het mogelijk een hulpmiddel bij het toetsen op piping onder historische kunstwerken te ontwikkelen, rekening houdend met de onzekerheid over de staat van het kunstwerk?"

De staat van een kunstwerk is moeilijk vast te stellen, in tegenstelling tot zogenaamde meetbare grootheden als de diepte van kwelschermen, stijghoogteverschil tussen het open water en het diepere zand (infiltratie c.q. kwel) of de dikte van het watervoerende pakket onder een kunstwerk. Meetbaar wil overigens niet zeggen dat er geen onzekerheid bestaat, maar in verhouding tot het vast stellen van de staat van het kunstwerk is dit relatief gemakkelijk te achterhalen. Getracht is vast te stellen in hoeverre er ranges van de meetbare grootheden bestaan, waarbij de staat van het kunstwerk geen invloed meer heeft op het (verloop van het) verhang.

Het uittredeverhang achter een kwelscherm is zowel voor de stijghoogte in het diepe zand, de diepte van een kwelscherm als de ligging van het diepe zandpakket sterk afhankelijk van de staat van een kunstwerk.

Onvolkomenheden in een kunstwerk, zoals gaten in kwelschermen, kwaliteit van het hout of lekke sluisbodems leiden tot een kortsluiting in de grondwaterstroming ten tijde van een verval over een kunstwerk. De invloed van deze onvolkomenheden zou derhalve gemonitord kunnen worden om toch de staat van een kunstwerk te kunnen achterhalen. Nadeel van deze pragmatische aanpak is dat gewacht moet worden totdat een representatief verval over het kunstwerk optreedt.

Uit de MODFLOW simulaties tijdens MHW blijkt duidelijk dat het moeilijk is om een onvolkomenheid, bijv. een realistisch gat in een kwelscherm te detecteren met behulp van peilbuizen of stroomsnelheidsmeters vanwege het kleine invloedsgebied. Hierdoor zou een zeer dicht net van sensoren nodig zijn om de aanwezigheid van een gat te bepalen.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat er geen oordeel over een kunstwerk betreffende de toetsing op piping gegeven kan worden als de staat van het betreffende kunstwerk niet duidelijk is. Aangezien monitoring ook geen soelaas lijkt te bieden om de staat van een kunstwerk vast te kunnen stellen, wordt in dit stadium geconcludeerd dat het niet mogelijk is een hulpmiddel bij het toetsen op piping onder historische kunstwerken te ontwikkelen als er onzekerheid over de staat van het kunstwerk bestaat.



Titel
SBW Piping Kunstwerken

Project
1200675-001

Kenmerk
1200675-001-GEO-0002

Pagina's
34

Referenties

- 1 Rapport "Aanbevelingen toetsmethode achter- en onderloopsheid bij (historische) kunstwerken", kenmerk 1200675-006-GEO-0001-v02, d.d. nov. 2009, Deltares
- 2 Rapport "SBW Piping kunstwerken, KW5 Simulatie grondwaterstroming sluis Hasselt", kenmerk 1001452-015-GEO-v03, d.d. oktober 2009, Deltares
- 3 Dictaat "Handboek Constructieve Waterbouw, Belasting materiaal en (hulp- of deel-) constructies, CT3330, januari 2002, TU Delft
- 4 Rapport "Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave Fase 5: eindrapportage", rapport 370250/54, Calle, E.O.F., Sellmeijer, J.B. (1998), Grondmechanica Delft..

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	12-11-2009	A.D. Hartman		dr. G.A. van den Ham		ing. A.T. Aantjes	
		ir.ing. V. Veenbergen					

Status
definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Leeswijzer	2
2	Beschrijving onderzoek	4
2.1	Voorafgaand onderzoek: opzet 3D-grondwatermodel	4
2.2	Situatie tijdens hoogwater 1998	5
2.3	Opzet vervolgonderzoek	8
2.3.1	Invloed meetbare grootheden in relatie tot staat kunstwerk	8
2.3.2	Monitoring staat kunstwerk	10
2.4	Grondwatermodel vervolgonderzoek	12
3	Resultaten vervolgonderzoek 2009	13
3.1	Grondwatermodel	13
3.1.1	Opzet van het model	13
3.1.2	Controle correctheid modellering	16
3.2	Resultaten analyse meetbare grootheden vs staat kunstwerk op verhang	17
3.2.1	Referentiesituatie	18
3.2.2	Stijghoogte diep zand	18
3.2.3	Invloed waterstand open water	19
3.2.4	Variatie kwelscherm lengte	19
3.2.5	Diepteligging 2 ^o watervoerend pakket	20
3.3	Monitoren invloed(sgebied) 3D gat	21
3.3.1	Algemeen	21
3.3.2	Resultaten invloedsgebied "standaard onvolkomenheden"	21
3.3.3	Interpretatie resultaten	22
4	Conclusies en aanbevelingen	29

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het onderzoek dat tot 2010 binnen SBW Piping Kunstwerken wordt uitgevoerd heeft als doel het ontwikkelen van een nieuw toetscriterium ter beoordeling van de veiligheid tegen piping bij waterkerende kunstwerken waarvan onvoldoende betrouwbare informatie over de constructie en conditie van de geotechnische en bouwkundige componenten onder en naast het kunstwerk aanwezig is. Hierbij gaat het meestal om historische kunstwerken.

Het huidige toetscriterium zoals omschreven in de VTV2006 vereist voldoende inzicht in aanwezigheid, omvang en conditie van de geotechnische en bouwkundige componenten onder en naast het kunstwerk. Dit betreft met name eventueel aanwezige kwelschermen. Omdat de gegevens daarvan vaak niet meer te achterhalen zijn, is dit met name voor historische kunstwerken problematisch. Hierdoor kan vaak geen definitief toetsoordeel (goedkeuren of afkeuren) worden gegeven. Echter ook over het proces van piping en grondwaterstromingspatronen die optreden bij lekkage door of langs kwelschermen is onvoldoende bekend. Uit bovenstaande volgt dat getwijfeld kan worden aan de geschiktheid en betrouwbaarheid van (voorgescreven) beoordelingscriteria en rekenmodellen. Dit betekent dat ook niet uitgesloten kan worden dat volgens de huidige toetsregels (historische) kunstwerken onterecht goed- of afgekeurd worden.

Eén van de doelen van het onderzoek binnen SBW Piping Kunstwerken is het ontwikkelen van een hulpmiddel voor toetsing op piping onder historische kunstwerken. Het resultaat moet antwoord bieden op de vraag: "Wat is te doen als voor het uitvoeren van de eenvoudige toetsing bepaalde essentiële informatie niet of met onvoldoende betrouwbaarheid beschikbaar is".

1.2 Probleemstelling

In het kader van de beantwoording van de vraag in hoeverre het mogelijk is om door middel van non-destructieve methoden inzicht te krijgen in het locale grondwaterstromingspatroon rondom een waterkerend (historisch) kunstwerk is eind 2008 / begin 2009 een veldproef uitgevoerd bij een kunstwerk in Hasselt (Overijssel). Het betreft hier een schutsluis op zand, waarbij tijdens hoog water de sluisdeuren dicht gaan en de sluis een onderdeel van de waterkering vormt die Hasselt moet beschermen. Door het uitvoeren van divers grondonderzoek en het plaatsen van peilbuizen is getracht een beeld te vormen van de werkelijke grondwaterstromen rondom de sluis tijdens hoog water. Met behulp van de metingen is vervolgens een 3D-grondwatermodel opgesteld. Op het moment dat het 3D-grondwatermodel voldoende nauwkeurig is en de situatie tijdens de veldproef goed kan benaderen, kan, in theorie, berekend worden wat de grondwaterstromingen zijn tijdens maatgevend hoog water MHW. Op basis van de aldus berekende resultaten kan in principe een nieuwe toets op piping bij de sluis uitgevoerd worden.

In de praktijk zal het echter ondoenlijk zijn voor elk historisch kunstwerk een uitgebreid 3D-grondwatermodel op te zetten. Het doel van het onderzoek is zoals vermeld het ontwikkelen van een hulpmiddel bij het toetsen op piping onder historische kunstwerken en daarbij kan een "simpel" 2D-grondwatermodel mogelijk een uitkomst bieden.

Op het moment dat met het 3D-model verschillende situaties betrouwbaar berekend kunnen worden, moet onderzocht worden of met een versimpelde modellering in het 2D-model een voldoende betrouwbare toetsing uitgevoerd kan worden. Een dergelijke analyse is in dit onderzoek echter niet uitgevoerd.

De probleemstelling waar in voorliggend rapport een antwoord op gegeven moet worden, luidt op grond van bovenstaande: "Is het mogelijk een hulpmiddel bij het toetsen op piping onder historische kunstwerken te ontwikkelen, rekening houdend met de onzekerheid over de staat van het kunstwerk (met name de toestand en dimensies van de kwelschermen)?"

1.3 Doelstelling

Het doel van het beschreven onderzoek in dit rapport is:

- vast te stellen wat de invloed is van de staat van het kunstwerk, met name de toestand en dimensies van de kwelschermen, op het mechanisme piping;
- opstellen van een hulpmiddel om op piping te kunnen toetsen onafhankelijk van de staat van het kunstwerk.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het onderzoek beschreven met uitleg van de gevolgde stappen, achterliggende gedachtes en motivaties. In hoofdstuk 3 worden vervolgens de resultaten van het onderzoek gepresenteerd. Hoofdstuk 4 gaat ten slotte in op de conclusies die getrokken kunnen worden naar aanleiding van de resultaten aangevuld met aanbevelingen voor eventueel vervolgonderzoek.

2 Beschrijving onderzoek

2.1 Voorafgaand onderzoek: opzet 3D-grondwatermodel schutsluis Hasselt

Ten behoeve van het SBW-onderzoek Piping bij Kunstwerken is een 3D-grondwatermodel opgezet van de schutsluis in Hasselt [2]. Hiervoor is het programma MODFLOW gebruikt. Op basis van dit model wordt uiteindelijk getracht een nieuwe rekenregel c.q. methode op te stellen voor het toetsen op piping bij (historische) kunstwerken. Veelal zijn bij deze kunstwerken niet alle benodigde gegevens voldoende bekend. De te ontwikkelen rekenregel moet een handvat bieden voor het omgaan met deze onzekerheid in de toetsing.

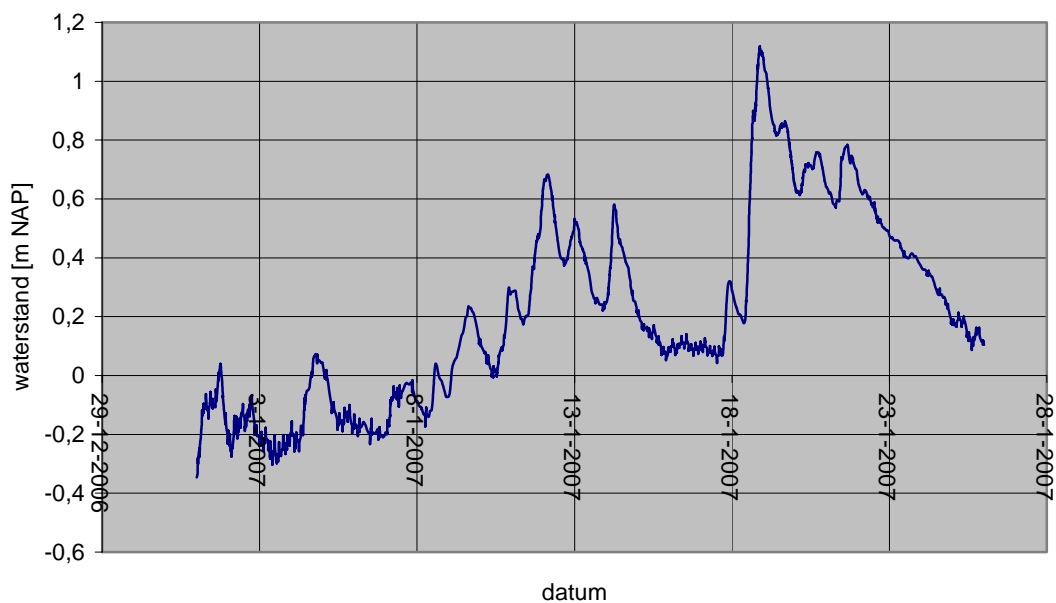
Om de situatie bij de schutsluis in Hasselt zo nauwkeurig en betrouwbaar mogelijk te kunnen modelleren en daarmee een goed inzicht te kunnen krijgen in het (tijdsafhankelijke) 3D-stromingspatroon naast en onder de sluis tijdens hoogwatercondities is eind 2008 / begin 2009 een veldexperiment uitgevoerd waarbij de (grond)waterstand rondom en in de sluis gedurende ca. 3 maanden is gemonitord. Een nadeel van een dergelijke aanpak is dat gewacht moet worden totdat hoogwater optreedt, om een beeld te kunnen krijgen van de grondwaterstroming bij een verval over de sluis. De sluis wordt namelijk gesloten bij een waterstand van NAP +0,2 m, zodat pas vanaf die waterstand een verval kan ontstaan. Het streefpeil aan polderzijde van de sluis is NAP-0,2 m.

De waterstand in het Zwarte Water is in 2009 niet hoger geweest dan ca. NAP +0,1 m. Dit betekent dat de sluis niet is gesloten en er geen verval over de sluis is ontstaan, zodat deze situatie ook niet gecontroleerd kan worden met het gekalibreerde grondwatermodel. Het gevolg is dat er onzekerheid bestaat of het model het stromingspatroon voldoende betrouwbaar berekent bij een verval over de sluis (bijv. door lengte kwelschermen, doorlatendheid sluisbodem, staat van de kwelschermen etc.). Voor een betrouwbaar en nauwkeurig grondwatermodel van de schutsluis bij Hasselt moet derhalve nog een validatie worden uitgevoerd met een hoogwatergolf of een kunstmatig aangebracht verval over de sluis. Dit betekent dat of gewacht moet worden op een natuurlijk hoog water (waarvan het niet zeker is of het überhaupt zal optreden op korte termijn) of dat geïnvesteerd moet worden in een proef waarbij de waterstand aan één zijde van de sluis kunstmatig verhoogd c.q. verlaagd wordt. In de loop van het onderzoek is vanwege de hoge extra kosten en risico's met betrekking tot de uitvoering besloten af te zien van het creëren van een kunstmatig verval op bovengenoemde wijzen.

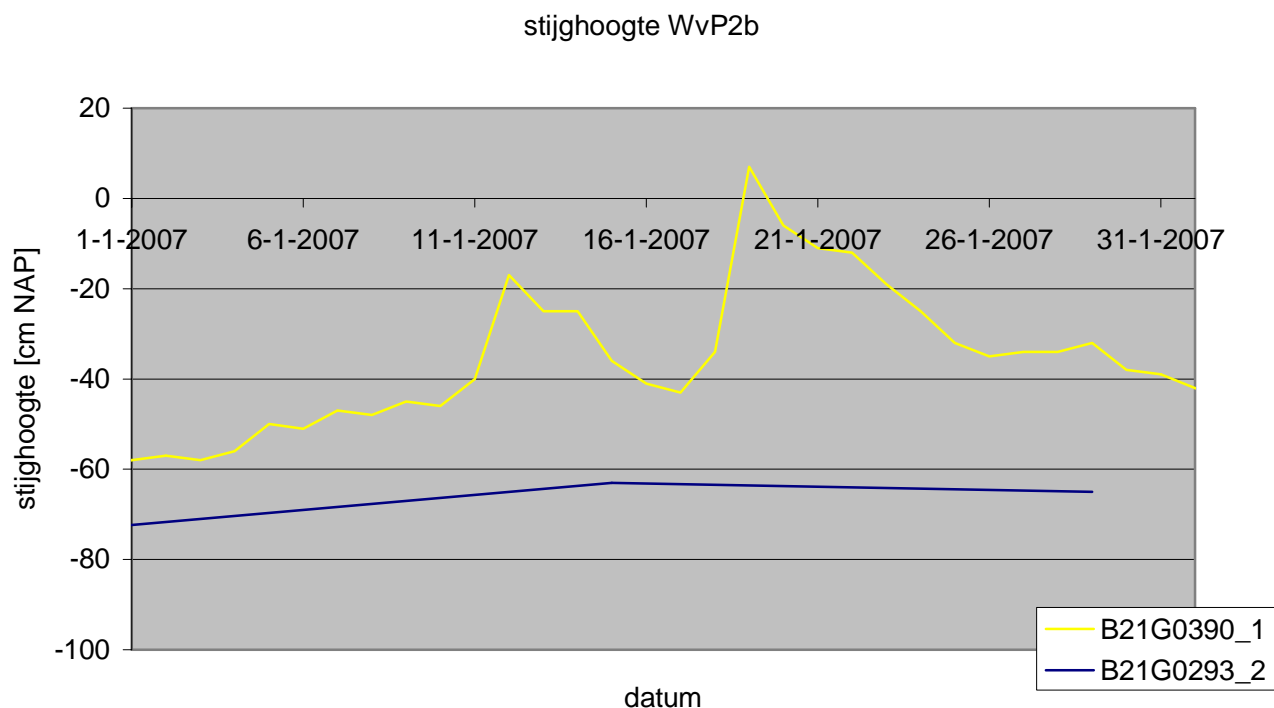
Hoewel het grondwatermodel voor de schutsluis in Hasselt niet gevalideerd is met een hoogwatersituatie, is er wel sprake van een realistisch grondwatermodel vanwege de kalibratie op basis van een meetperiode van ca. 3 maanden. Dit neemt niet weg dat van een aantal parameters onzeker blijft hoe ze de stijghoogte (in de normale situatie maar met name ook tijdens hoogwater) rondom de sluis beïnvloeden, omdat er bijvoorbeeld geen of te weinig informatie over te vinden is. Het betreft o.a. de staat van de kwelschermen, de aanwezigheid van de kolkbodem, de doorlatendheid van (dam)wanden of de intredeweerstand van de bodem in het open water. Uit een eerste gevoeligheidsanalyse [2] is gebleken dat deze parameters een belangrijke invloed op het verticale uittredeverhang bij het benedenstroomse kwelscherm hebben.

2.2 Situatie tijdens hoogwater 1998

Op 19 januari 2007 is er een relatief hoge hoogwatergolf opgetreden in het Zwarte Water, waarbij de deuren van de schutsluis dicht zijn gegaan. Omdat in januari 2007 nog geen peilbuizen rondom de sluis geplaatst waren, is de grondwaterstroming rondom de sluis niet in detail bekend. Wel kan op basis van peilbuismetingen in TNO *Dino* vastgesteld worden dat het Zwarte Water waarschijnlijk in vrij goed contact staat met in ieder geval het 2^{de} watervoerende pakket. In figuur 2.1 is de waterstand van het Zwarte Water nabij Streukelerzijl en in figuur 2.2 is de stijghoogte in het 2^{de} watervoerende pakket op een tweetal locaties weergegeven. De locaties zijn in figuur 2.3 weergegeven.



Figuur 2.1 Hoogwatergolf in het Zwarte Water op 19 januari 2007 gemeten te Streukelerzijl (ca. 2 km stroomopwaarts van de schutsluis te Hasselt).



Figuur 2.2 Stijghoogte in het 2^{de} watervoerende pakket van ten tijde van de hoogwatergolf in het Zwarte Water op twee locaties in de omgeving van Hasselt (zie Figuur 2.3).

Bij peilbuis B21G0390 is duidelijk dezelfde trend waar te nemen als in het open water. Bij peilbuis B21G0293 zijn veel minder waarnemingen beschikbaar, zodat geen exact verloop waar te nemen is. Wel is in de periode van de hoogwatergolf een lichte toename te zien. Zonder in detail in te gaan op de bijbehorende geohydrologische parameters betekent dit waarschijnlijk dat het Zwarte Water in redelijk goed contact staat met het 2^{de} watervoerende pakket en dat afhankelijk van de stijghoogte in het 2^{de} watervoerende pakket een sterke infiltratie van oppervlakte water kan ontstaan tijdens hoogwater.



Figuur 2.3 Locatie van meetpunt Streukelerzijl (bij Streukel) en de peilbuizen B21G0390 en B21G0293.

Bij het begrip infiltratie gaat het om een meetbare grootheid. Door op 1 locatie zowel de waterstand van het Zwarte Water als de stijghoogte in onderliggende watervoerende pakketten te meten, kan de infiltratie bepaald worden. Wat vervolgens de invloed van de infiltratie op piping bij een historisch kunstwerk is, is dan nog niet bekend.

2.3 Opzet vervolgonderzoek

Zoals in paragraaf 2.1 is vermeld, luidt de conclusie dat weliswaar een realistisch 3D-grondwatermodel van een schutsluis als waterkering is opgezet, maar dat dit model niet gevalideerd kon worden met de situatie tijdens een hoogwatergolf. De onzekerheid bij het opzetten van het model over noodzakelijke parameters inzake het kunstwerk zoals lengte kwelschermen, doorlatendheid sluisbodem, staat van de kwelschermen of toestand van de kade, kan door valideren met een hoogwatergolf dus niet gereduceerd worden. Juist de invloed van deze punten op het ontstaan / optreden van piping tijdens een hoogwatergolf was echter inzet van het onderzoek. Met een betrouwbaar grondwatermodel waar deze punten voldoende nauwkeurig bekend zijn, zou immers onderzocht worden wat de invloed is en zou een hulpmiddel ontwikkeld worden hoe er mee omgegaan zou moeten worden als één of meerdere van deze punten niet bekend zijn.

In tegenstelling tot de staat van het kunstwerk zijn zaken als infiltratie, diepteligging van grondlagen en (hoewel in iets minder mate) doorlatendheden te meten. Uitgaande van dergelijke meetbare grootheden, vormt de redenering uit paragraaf 2.2 de basis voor het uitgevoerde vervolgonderzoek: wat is de invloed van de variatie van meetbare grootheden op piping bij de schutsluis en hoe verhoudt die variatie zich tot de staat van een kunstwerk?

2.3.1 Invloed meetbare grootheden in relatie tot staat kunstwerk

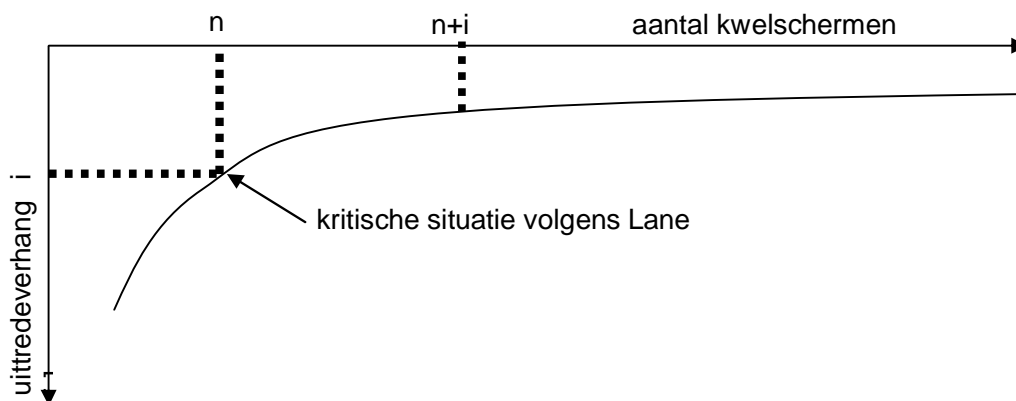
Het kritische verval waarbij een kunstwerk verondersteld wordt te bezwijken door piping (waarschijnlijk als een doorgaande pipe onder het kunstwerk door is ontstaan) kan berekend worden met de rekenregel van Sellmeijer of met de empirische rekenregels van Lane of Bligh. De rekenregel van Sellmeijer heeft alleen betrekking op horizontale piping. Aangezien bij kunstwerken met kwelschermen de (maatgevende) kwelweg vrijwel altijd een verticale component bevat (mits de aansluiting tussen scherm en constructie in goede staat verkeert) is deze rekenregel dus niet geschikt voor het bepalen van het kritische verhang bij een kunstwerk. Wat betreft de empirische rekenregels wordt algemeen verondersteld dat in Lane de verticale component meer geschikt is dan in Bligh. Daarom beperkt het onderzoek zich tot Lane (en Bligh).

De formule van Lane gaat uit van de horizontale en verticale kwelweglengte versus het verval over een kunstwerk (zie [1]). Meetbare grootheden als dikte van het zandpakket onder een kunstwerk of mate van infiltratie tijdens hoogwater komen echter niet voor in deze formules, maar hebben wel invloed op de grondwaterstroming rondom een kunstwerk. Door de invloed van dergelijke meetbare grootheden op het mechanisme piping in relatie tot de staat van het kunstwerk te onderzoeken kan mogelijk een waarde of range van de meetbare grootheid worden vastgesteld, waarbij de staat van het kunstwerk geen invloed meer heeft. Zodoende zou dan het probleem over het ontbreken van gegevens van een historisch kunstwerk omzeild kunnen worden, zodat een aantal kunstwerken in Nederland dan alsnog getoetst kunnen worden op piping, mits de meetbare grootheden binnen de vastgestelde range vallen.

Daarmee is echter nog niets gezegd over de relatie van de meetbare grootheid met de staat van het kunstwerk. Bij de vergelijking wordt er immers nog steeds vanuit gegaan dat de maximale kwelweglengte ook daadwerkelijk aanwezig is en dat er geen verkorting van de kwelweg is door een gat in het kwelscherm. Dit is van belang indien men een model voor extrapolatie naar het toetspeil MHW wil gebruiken dat is gekalibreerd en gevalideerd aan een verval dat is opgetreden bij een waterstand lager dan het toetspeil (MHW).

Aanvullend dient derhalve bepaald te worden in hoeverre de relatie tussen de meetbare grootheid en het verticale uittredeverhang benedenstrooms van het kunstwerk tijdens hoogwater beïnvloed wordt door de staat van het kunstwerk. Door van een ondergrens benadering voor wat betreft de staat van het kunstwerk uit te gaan, zou theoretisch een range vastgesteld kunnen worden, waarbij het verticale uittredeverhang benedenstrooms van het kunstwerk niet (meer) afhankelijk is van de staat van het kunstwerk maar alleen van de meetbare grootheid.

Aan de hand van figuur 2.4 wordt een en ander met een voorbeeld toegelicht. Weergegeven is een *verondersteld* verloop van het verhang bij het uittredepunt afhankelijk van het aantal kwelschermen onder een kunstwerk, gegeven een vast verval over het kunstwerk. Indien er slechts één kwelscherm is aangebracht, wordt het verhang groot en bij veel kwelschermen zal het verhang in ieder geval afnemen. Bij n kwelschermen komt de corresponderende kwelweglengte overeen met de kritische situatie volgens Lane (gegeven het verval en het kritische verval i_{max}). Uit figuur 2.4 kan geconcludeerd worden dat vanaf $n+i$ kwelschermen het er niet meer toe doet hoeveel kwelschermen er nog meer aanwezig zijn, omdat het verhang toch niet meer noemenswaardig verandert. Dit laatste betekent dan dat enige onzekerheid over het aantal kwelschermen onder een historisch kunstwerk bij een groot aantal kwelschermen minder ernstig is voor het uitvoeren van een toetsing op piping.



Figuur 2.4 *Indicatieve afhankelijk van het aantal kwelschermen op het verhang onder een kunstwerk.*

Als vervolgens figuur 2.4 uitgebreid wordt met de invloed van de staat van het kunstwerk zouden de situaties volgens figuur 2.5 a t/m c verkregen kunnen worden. Onzeker is bijvoorbeeld de aanwezigheid van een gat in één van de kwelschermen onder een kunstwerk. Indien onder een kunstwerk slechts één kwelscherm aanwezig is, zal de invloed van dat gat op het verticale uittredeverhang bij het kwelscherm naar verwachting groot zijn. Indien benedenstrooms van het betreffende kwelscherm meerdere kwelschermen aanwezig zijn, zal de invloed op het uittredeverhang bij het benedenstroomse kwelscherm wellicht veel geringer zijn. In figuur 2.5a is bovenstaande situatie weergegeven dat vanaf een bepaalde range de invloed van de meetbare grootheid op het uittredeverhang constant is en dat de staat van het kunstwerk (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een gat in één van de kwelschermen) in dezelfde range van de meetbare grootheid ook geen invloed meer heeft op het verhang. Kunstwerken waarvan de meetbare grootheid in deze range ligt, kunnen dan alsnog op piping getoetst worden, omdat er geen afhankelijkheid meer is van de staat van het kunstwerk.

Voor figuur 2.5b geldt min of meer hetzelfde als voor figuur 2.5a geldt. Het grote verschil is echter dat de staat van het kunstwerk geen invloed heeft op het verhang in die fase dat de meetbare grootte nog wel een variërende invloed heeft op het verhang. Op het moment dat de invloed van de meetbare grootte op het verhang constant is (oftewel de grootte van de meetbare grootte er niet meer toe doet), gaat de staat van het kunstwerk echter een rol spelen. Zolang bij kunstwerken te bepalen is of de meetbare grootte in het traject ligt waar de staat van het kunstwerk geen invloed heeft op het verhang, kan in de situatie van figuur 2.5b alsnog een toetsing op piping uitgevoerd worden.

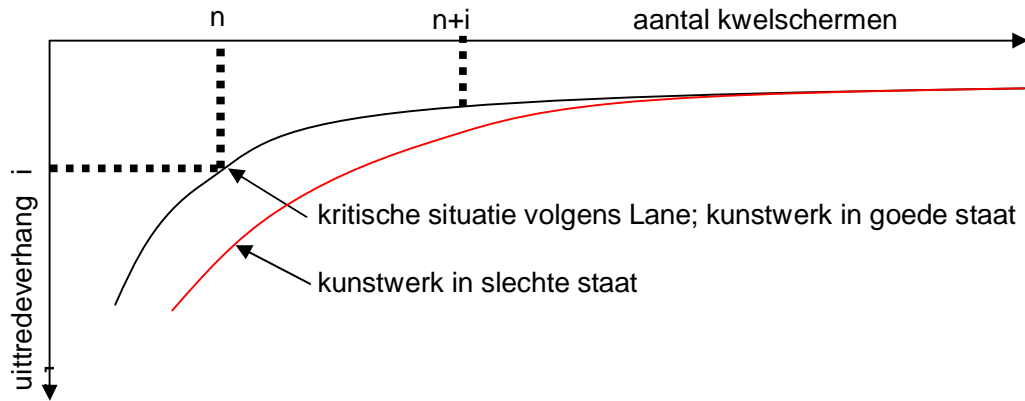
Een probleem ontstaat als de situatie uit figuur 2.5c optreedt. De staat van het kunstwerk bepaalt in hoge mate de grootte van het verhang. In deze situatie moet de staat van het kunstwerk bekend zijn, ongeacht de grootte van de meetbare grootte. Indien niet aan deze laatste voorwaarde voldaan kan worden, kan geen toetsing op piping worden uitgevoerd.

2.3.2 Monitoring staat kunstwerk

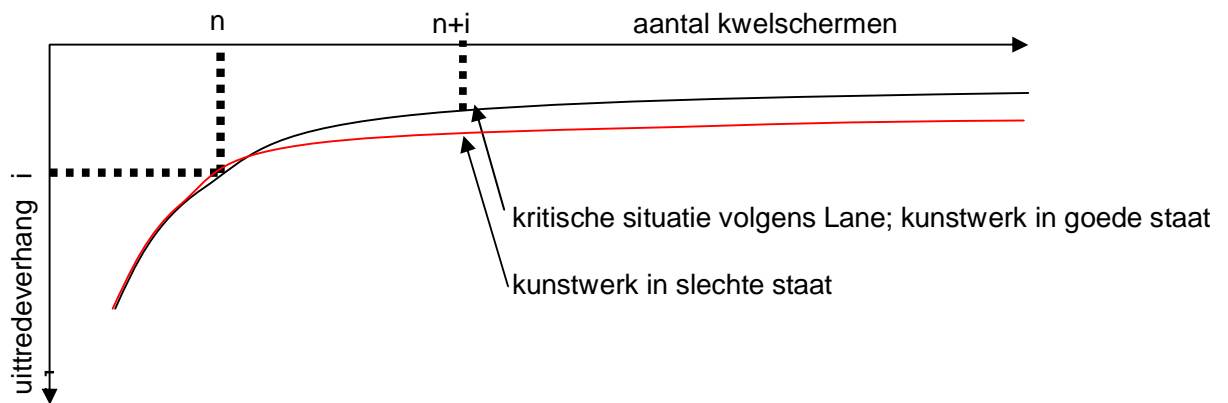
Indien uit de vorige paragraaf volgt dat er geen relaties zijn te leggen, zodanig dat ongeacht de staat van het kunstwerk toch een bepaalde categorie kunstwerken getoetst kan worden, is een mogelijk back-up scenario om te onderzoeken of het middels monitoring mogelijk is om de staat van het kunstwerk vast te stellen. Zodoende zou dan alsnog een toets op o.a. piping uitgevoerd kunnen worden. Overigens zou dit onderzoeksspoor ook geheel los van paragraaf 2.3.1 kunnen worden beschouwd.

In rapport [1] is een overzicht gegeven van allerlei monitoringstechnieken die hiervoor ingezet kunnen worden. Iedere techniek heeft zijn eigenschappen voor wat betreft de meetbare parameter (stijghoogte, stroomsnelheid, temperatuur etc.), nauwkeurigheid, bereik etc. Onderzocht moet worden in hoeverre de effecten van een aantal "standaard onvolkomenheden" meetbaar zijn met verschillende technieken. Het gaat er hierbij overigens niet alleen om of ze meetbaar zijn qua absolute grootte van de invloed van een onvolkomenheid, maar ook hoeverre de invloed van een onvolkomenheid in de omgeving reikt. Concreet betekent dit dat de volgende randvoorwaarden gelden:

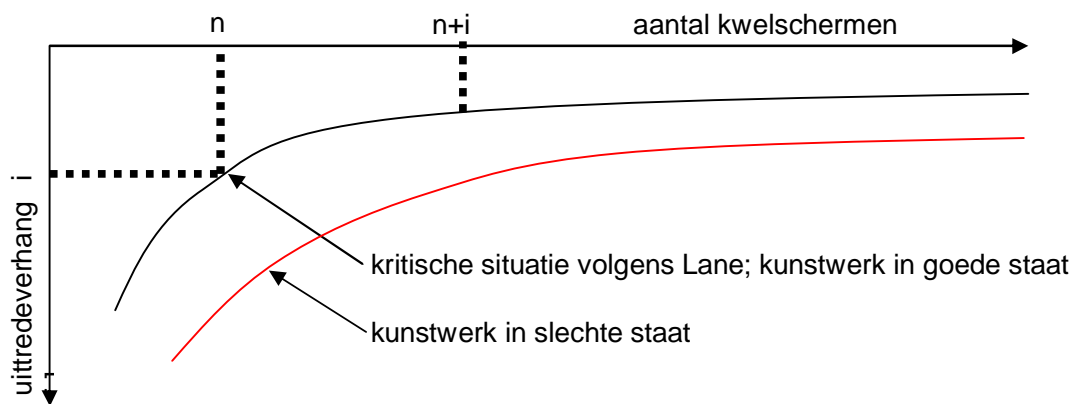
- De invloed van een onvolkomenheid moet meetbaar zijn. Dit punt is uiteraard afhankelijk van de meetmethode, zodat het onderzoek zich moet toespitsen op meerdere parameters (stijghoogte en stromingssnelheid). Als voorbeeld: de nauwkeurigheid van handmatig af te lezen peilbuizen is ca. 0,05 m. Als de invloed minder is, valt de invloed weg in de meetnauwkeurigheid, natuurlijke fluctuaties etc.
- Het invloedsgebied moet voldoende groot zijn om een onvolkomenheid te kunnen vaststellen. Als de invloed beperkt is tot een zeer klein gebied, zijn òf veel opnemers (peilbuizen, sensoren) nodig òf de onzekerheid is groter (onvolkomenheid wordt niet waargenomen, maar is wel aanwezig). In het geval dat stijghoogte de te bepalen parameter is, is het bijvoorbeeld niet realistisch om parallel aan het kwelscherm peilbuizen om de 0,2 m te plaatsen. Een reëlere minimale hart-op-hart afstand is bijvoorbeeld 1,0 m, zodat het invloedsgebied tenminste ca. 2 m in diameter moet zijn om iets met peilbuizen waar te kunnen nemen.



a) slechte staat van kunstwerk heeft slechts gedeeltelijk invloed op verhang.



b) slechte staat van kunstwerk heeft slechts gedeeltelijk invloed op verhang.



c) slechte staat van kunstwerk heeft invloed op verhang.

Figuur 2.5 Voorbeelden van mogelijke relatie tussen staat van het kunstwerk, verhang en een meetbare grootheid (in dit figuur aantal kwelschermen)

Onvolkomenheden kunnen zich op talrijke manieren voordoen. Het probleem bij een 3-dimensionale onvolkomenheid (meestal een gat) is dat de vorm, diepte en grootte van het gat allemaal invloed kunnen hebben op de grootte van het invloedsgebied. Om de invloed van al deze (combinaties van) factoren te bepalen, is een zeer grote hoeveelheid variatieberekeningen met een grondwaterstromingsmodel (in dit onderzoek MODFLOW) noodzakelijk. Om te voorkomen dat oneindig veel onvolkomenheden onderzocht moeten worden, is een selectie gemaakt van een drietal onvolkomenheden in een kwelscherm die voor historische kunstwerken relevant lijken. Daarbij is ervan uitgegaan dat er vrijwel altijd sprake is van kwelschermen bestaande uit ca 25 cm brede houten planken:

- gat 0,25x0,25 m direct onder de sluisbodem; dit geeft de situatie weer dat de aansluiting tussen kwelscherm en sluisbodem verrot is over de breedte van 1 plank. Tijdens inspecties van historische kunstwerken is gebleken dat dit voor kan komen, o.a. bij de sluis in Hasselt.
- gat 0,25x0,25 m, 1 m onder de sluisbodem; het is niet zeker of een relatief groot gat redelijkerwijs voor kan komen op diepte. Omdat niet te controleren is of een dergelijk gat aanwezig is met bestaande technieken is het van belang om te bepalen of een dergelijk gat gelokaliseerd kan worden;
- spleet 0,025 m breed over de volle hoogte van het scherm. Door aantasting of kromtrekken van het hout kan het voorkomen dat de planken van het kwelscherm niet meer op elkaar aansluiten. Deze situatie is gemodelleerd door een verticale spleet.

Afhankelijk van de resultaten van het onderzoek bij bovenstaande “standaard onvolkomenheden” kan in vervolgonderzoek het soort en de omvang van de onvolkomenheden eventueel nog uitgebreid worden.

2.4 Grondwatermodel vervolgonderzoek

De basis voor het vervolgonderzoek vormt het huidige gekalibreerde grondwatermodel, waarvan de opzet beschreven is in [2]. Dit betekent dat de resultaten niet specifiek voor de schutsluis in Hasselt van toepassing zijn (omdat dit model niet gevalideerd is), maar voor een fictieve historische schutsluis in een dijk. Omdat het doel juist het opstellen van een algemene rekenregel is voor het mechanisme piping bij gebrek aan gegevens van het kunstwerk, leidt dit niet tot afbreuk van het onderzoeksdoel binnen SBW. Nadeel is dat het uiteindelijke resultaat van het onderzoek niet voorzien kan worden van een voorbeeld van een bestaande situatie.

3 Resultaten vervolgonderzoek 2009

3.1 Grondwatermodel

Ten behoeve van het onderzoek is het bestaande grondwatermodel, zie paragraaf 2.1, van de schutsluis in Hasselt aangepast vanwege de onzekere factoren, bijvoorbeeld lengte kwelschermen, doorlatendheid sluisbodem, staat van de kwelschermen etc. Daar waar het grondwatermodel zoals beschreven in paragraaf 2.1 een zo goed mogelijke benadering van de werkelijkheid was, is het model geschematiseerd waarin de genoemde onzekere factoren zijn geëlimineerd, door bijvoorbeeld een ondoorlatende sluisbodem te veronderstellen. Omdat Hasselt, wat betreft de overige parameters een representatief kunstwerk is, is het geschematiseerde model wel zo dicht mogelijk bij het grondwatermodel van de sluis in Hasselt gehouden.

3.1.1 Opzet van het model

Het geschematiseerde model is een snede uit het basismodel ter hoogte van de schutsluis. Aan de voorzijde van de schutsluis bevindt zich het Zwarte Water, terwijl het achterland verondersteld wordt als een rechte vaart (i.p.v. het gekromde werkelijke verloop van de grachten) tot aan de Dedemsvaart. Het model heeft een breedte (loodrecht op de stromingsrichting) van 150 m en een lengte (parallel aan de stromingsrichting) van 600 m. In eerste instantie wordt uitgegaan van een 2D-situatie en heeft de gemodelleerde schutsluis een eindige lengte en hoogte, maar een oneindige breedte. Verondersteld is dat onder de schutsluis alleen grondlagen worden gemodelleerd met eigenschappen overeenkomend met het werkelijke eerste watervoerende pakket. In tabel 3.1 is de gehanteerde laagopbouw en de verschillende parameters weergegeven. Net als bij het oorspronkelijke "Hasselt-model" is er aangenomen dat er een kier onder de sluis aanwezig is ten gevolge van fundering van de sluis op palen en zakking van de grond onder de sluis. Uit een gevoeligheidsstudie met de fragmentenmethode [4] blijkt dat de invloed van een spleet op het uittredeverhang groot is, met name bij kunstwerken die relatief lang zijn ten opzichte van de dikte van de onder de constructie liggende watervoerende zandlaag.

Daarnaast zijn de volgende parameters ingevoerd, die onafhankelijk zijn van de laagopbouw (zie ook figuur 3.2):

- gemiddelde effectieve neerslag 1 mm/d;
- waterpeil Zwarte Water NAP +1,4 m (d.i. MHW-peil);
- waterpeil binnenwater NAP +0,2 m (bij NAP +0,2 m gaan de sluisdeuren dicht en wordt het waterpeil gereguleerd);
- stijghoogte in het 2^{de} watervoerende pakket NAP -0,2 m;
- gemiddelde bodemligging:
 - Zwarte Water NAP -2,2 m;
 - Dedemsvaart NAP -3,5 m;
 - grachten/sluis NAP -2,2 m.
- kier onder sluis met hoogte van 0,25 m (d.i. modellaag 6, zie tabel 3.1) met doorlatendheid van $k_v = k_h$ 10.000 m/d;
- diepte kwelscherm tot NAP -6,0 m. Dit komt overeen met een kwelschermlengte van 3,25 m. Met het gegeven verval $1,4 - 0,2 = 1,2$ m en een matige grove zandgrond ($C_{w,creep} = 6,3$) is deze diepte volgens Lane de kritische verticale kwelweglengte [3].
- lengte sluisbodem 60 m
- bovenkant sluisbodem NAP -2,50 m;
- onderkant sluisbodem NAP -2,75 m.

Laag	Geologische benaming	Dikte [m]	Hoogte bk [m NAP]	k_h [m/d]	k_v [m/d]	S_s [m-1]	n [%]	Spec.yield [%]	Opgelegde stijghoogte [m NAP]
1	Deklaag*)	1,5	1,0	10000	10000	0,1	0,99	0,99	+1,4 / +0,2
2		1,0	-0,5	10000	10000	0,1	0,99	0,99	+1,4 / +0,2
3		0,7	-1,5	10000	10000	0,1	0,99	0,99	+1,4 / +0,2
4	WvP1	0,3	-2,2	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
5		0,25	-2,5	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
6		0,25	-2,75	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
7		0,25	-3,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
8		0,25	-3,25	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
9		0,25	-3,5	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
10		0,25	-3,75	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
11		0,5	-4,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
12		0,5	-4,5	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
13		0,5	-5,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
14		0,5	-5,5	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
15		1,0	-6,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
16		1,0	-7,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
17		1,0	-8,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
18		1,0	-9,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	variabel
19	WvP2a**)	1,0	-10,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2
20		1,0	-11,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2
21		2,0	-12,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2
22		4,0	-14,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2
23	WvP2b**)	6,0	-18,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2
24		8,0	-22,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2
25		10,0	-30,0	15	15	0,0005	0,18	0,18	-0,2

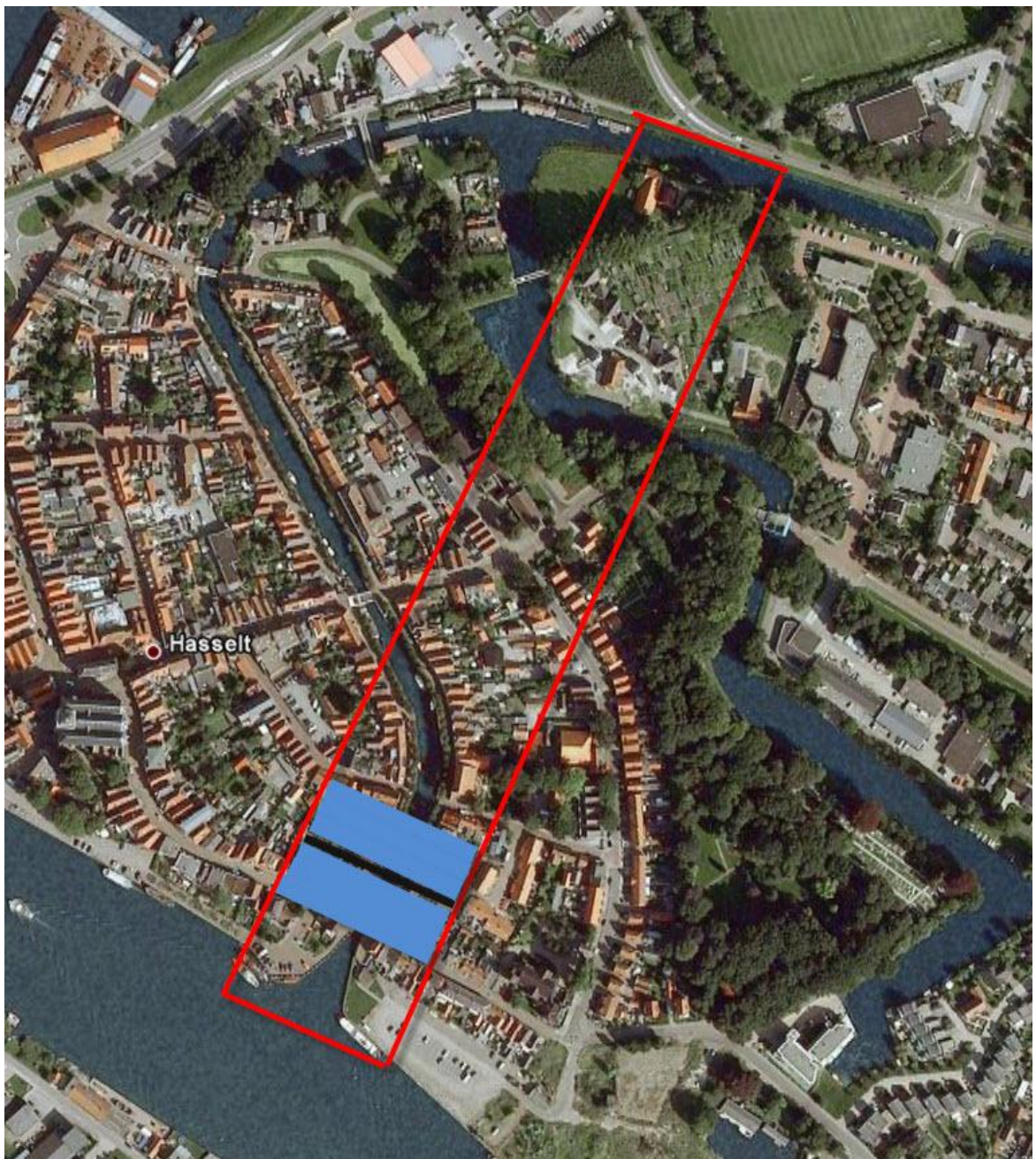
*) Vanwege de 2D-situatie in het geschematiseerde grondwatermodel bestaat de deklaag uit open water (Zwarte Water aan de ene zijde van de sluisdeur en de gracht aan de andere zijde) hetgeen de hoge doorlatendheden en porositeit verklaart.

**) Om het model zo eenvoudig mogelijk te houden, is aan het 2^{de} watervoerende pakket de geohydrologische eigenschappen van het 1^{ste} watervoerende pakket toegekend.

Tabel 3.1 Invoerparameters MODFLOW-model

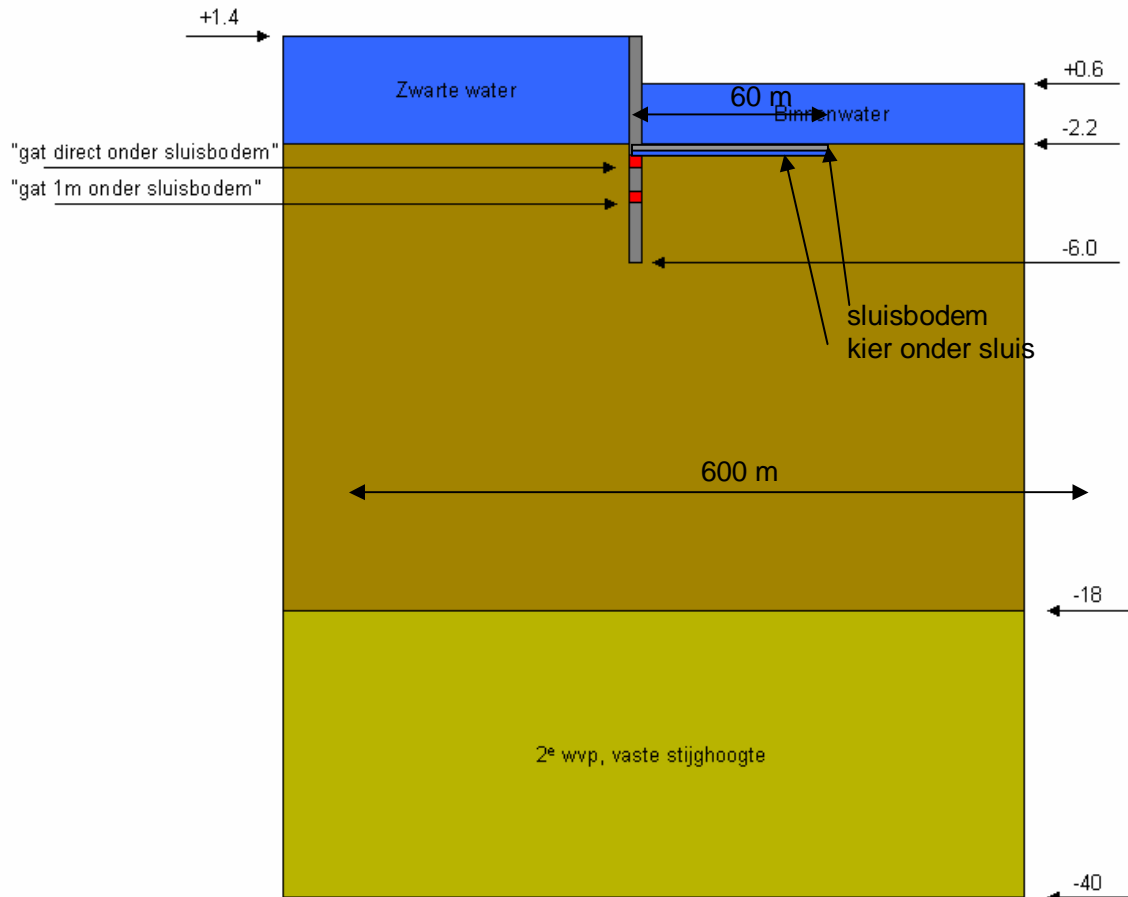
De randen van het model loodrecht op de stromingsrichting zijn gedefinieerd als cellen met een vaste stijghoogte. Deze stijghoogte verloopt lineair tussen de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket en de waterstand van het open water (gerekend vanaf de bodem). Bij aanpassing van de waterstand in het open water of van de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket is de stijghoogte aan de randen ook aangepast.

In figuur 3.1 en 3.2 is een bovenaanzicht en een dwarsdoorsnede van het model weergegeven. In figuur 3.1 is het modelgebied aangegeven met het rode kader. Het kwelscherm en de sluisbodem zijn aangegeven met respectievelijk een zwarte lijn en een blauw vlak. Omdat uitgegaan is van een 2D-model is de sluisbodem en het kwelscherm breder dan in werkelijkheid.



Figuur 3.1 Bovenaanzicht van het geschematiseerde modelgebied van de sluis in Hasselt.

Opbouw model originele situatie plus gaten



Figuur 3.2 Dwarsdoorsnede parallel aan de hoofdstromingrichting van het geschematiseerde grondwatermodel van de sluis in Hasselt.

Na een eerste run van het model bleek ondanks de doorlatendheid in de spleet van 10.000 m/d aan beide zijden van het kwel scherm een verval van 20 cm in de spleet onder de sluis op te treden. Het totale verval ten gevolge van horizontale kwelweg is hierdoor 40 cm, terwijl Lane uitgaat van een nihil verval bij een horizontale kwelweg indien het kunstwerk op palen gefundeerd is. De gekozen waterstanden en kwel scherm lengte is volgens Lane kritisch bij een uitsluitend verticale kwelweg. Om een goede vergelijking met Lane te kunnen maken, is de sluisbodem uit het model verwijderd, zodat er alleen nog een verticale kwelweg is. Bij verwijdering van de vloer is de kier onder de vloer ook verwijderd.

3.1.2 Controle correctheid modellering

Het waterpeil in het open water is gemodelleerd door de desbetreffende cellen (modellaag 1 t/m 3, zie tabel 3.1) een vaste stijghoogte op te leggen. Nadat er een aanzienlijke hoeveelheid berekeningen gemaakt was, ontstond er twijfel of de vaste stijghoogte in het open water niet een te grote invloed heeft op de berekende stijghoogte in de bovenste grondlagen (vanaf modellaag 4 en verder).

Om dit te controleren, zijn een aantal simulaties nog een keer uitgevoerd waarbij alleen de bovenste modellaag (1) een vaste stijghoogte kent en de overige lagen die het open water voorstellen (modellaag 2 en 3) een hoge doorlatendheid en porositeit te geven. Uit deze modelleringen blijkt dat het verschil tussen de twee mogelijke modelleringen verwaarloosbaar klein is.

Gegeven de laagopbouw in tabel 3.1 kan een gat in een kwelscherm, zoals omschreven is in paragraaf 2.3.2, gemodelleerd worden door aan de desbetreffende cellen grondeigenschappen toe te kennen in plaats van ondoorlatendheid. Een gat van 0,25 x 0,25 m bestaat in dat geval uit 1 cel. Om uit te sluiten dat de discretisatie van het gat geen noemenswaardige invloed heeft op de rekenresultaten, zijn ook controle-berekeningen uitgevoerd waarbij een gat van 0,25 x 0,25 mm uit 4 cellen bestond. Het bleek dat de resultaten van beide berekeningen vergelijkbaar waren.

3.2 Resultaten analyse meetbare grootheden vs. staat kunstwerk op verhang

Zoals in hoofdstuk 2 is uitgelegd, zijn van een historisch kunstwerk vaak niet alle gegevens bekend. Sommige gegevens kunnen wel bepaald worden door middel van metingen; het betreft dan vooral geohydrologische parameters (hoewel doorlatendheid zeer lastig nauwkeurig te bepalen is) of afmetingen van een kunstwerk. Dergelijke gegevens dienen als uitgangspunt voor de analyse. De onderzochte parameters zijn:

- diepte van het kwelscherm;
- stijghoogte 2^e watervoerende pakket (infiltratie);
- waterstand open water.

Voor deze parameters wordt onderzocht in welke mate het verticale uittredeverhang beïnvloed wordt. Het verticale uittredeverhang is hierbij gedefinieerd als het verschil tussen de stijghoogte in het uittredepunt (waarvan is aangenomen dat die gelijk is aan de binnenwaterstand, er is dus geen sprake van een uittredeweerstand) en de stijghoogte 1 m onder de bodem van het binnenwater, gedeeld door 1 m. In geval van een (oneindig breed) gat gaat het dus om het verschil in stijghoogte tussen de bovenkant van het gat en de binnenwaterstand.

Vervolgens is de analyse nogmaals gemaakt met een 2D gat in het kwelscherm. Zo kan bepaald worden in welke mate een gat in het kwelscherm invloed heeft op het verhang. Indien de invloed van het gat op het verhang groot is, zal er gekeken moeten worden of de invloed gemeten kan worden, zie hiervoor paragraaf 3.3. Indien dit niet mogelijk blijkt, is het niet mogelijk om het kunstwerk te toetsen.

Bij de gevoeligheidsanalyse worden relevante variabelen één voor één gevarieerd ten opzichte van de standaard situatie. Op deze manier kan geconstateerd worden wat de invloed van de variabele op het verhang is. Omdat aangenomen wordt dat piping plaatsvindt door terugschrijdende erosie, wordt er gekeken naar het verhang bij het uittredepunt. Een eventueel kanaal zal op dit punt beginnen.

Om de invloed van de staat van het kunstwerk te bepalen (gemodelleerd door een gat in het kwelscherm op te nemen), zijn alle berekeningen dubbel uitgevoerd zowel met als zonder een gat. Het gat is 2D ingevoerd (dat betekent met een oneindige breedte) met een hoogte van 0,25 m. De bovenzijde van het gat bevindt zich op NAP -3,75 m, oftewel 1 m onder de bovenkant van het kwelscherm.

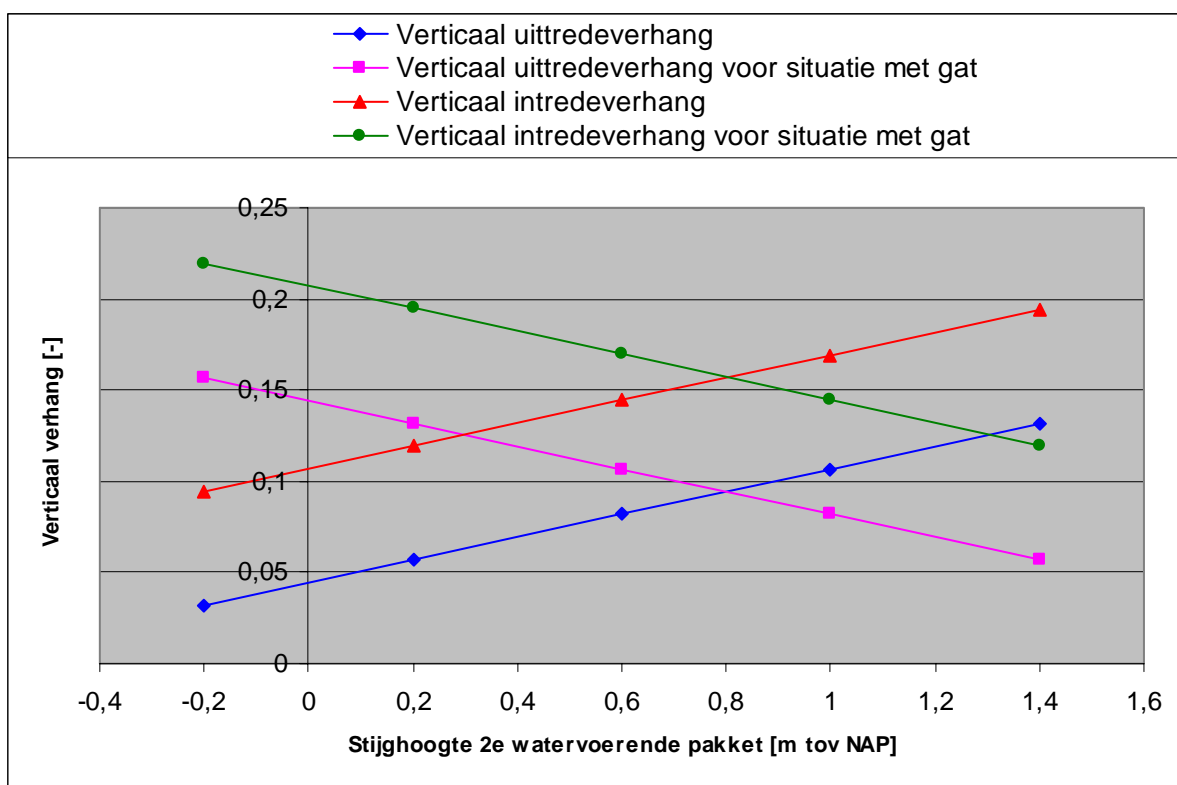
3.2.1 Referentiesituatie

De referentiesituatie is weergegeven in figuur 3.2. Omdat de doorgerkende varianten op het verschil in verhang nabij het uittredepunt beoordeeld worden, is het noodzakelijk het verhang van de referentiesituatie te kennen. In de referentiesituatie is het verval over de sluis 1,2 m. Het kwelscherm heeft een lengte van 3,25 m tot NAP – 6 m en de stijghoogte in het 2^e watervoerend pakket is gelijk aan het zwarte water namelijk +0,2 m. Het uittredeverhang in deze situatie is $i = 0,057$ [-].

3.2.2 Stijghoogte 2^e watervoerend pakket

De stijghoogte in het tweede watervoerend pakket is gevarieerd van -0,2 m tot +1,4 m. Het verhang bij het uittredepunt achter de sluis blijkt rechtlijnig toe te nemen met de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket. Hoe hoger de stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket, des te minder van het in de bodem van het Zwarte Water geïnfiltreerde water doordringt tot in het 2^{de} watervoerende pakket en des te meer onder de sluis door kan stromen, waardoor het verticale uittredeverhang toeneemt. Het verticale verhang bij het intredepunt neemt af doordat er steeds minder water infiltreert in het 2^e watervoerende pakket. Infiltratie naar een dieper watervoerend pakket komt niet in de formule van Lane voor, maar heet op grond van bovenstaande wel invloed op het verticale uittredeverhang.

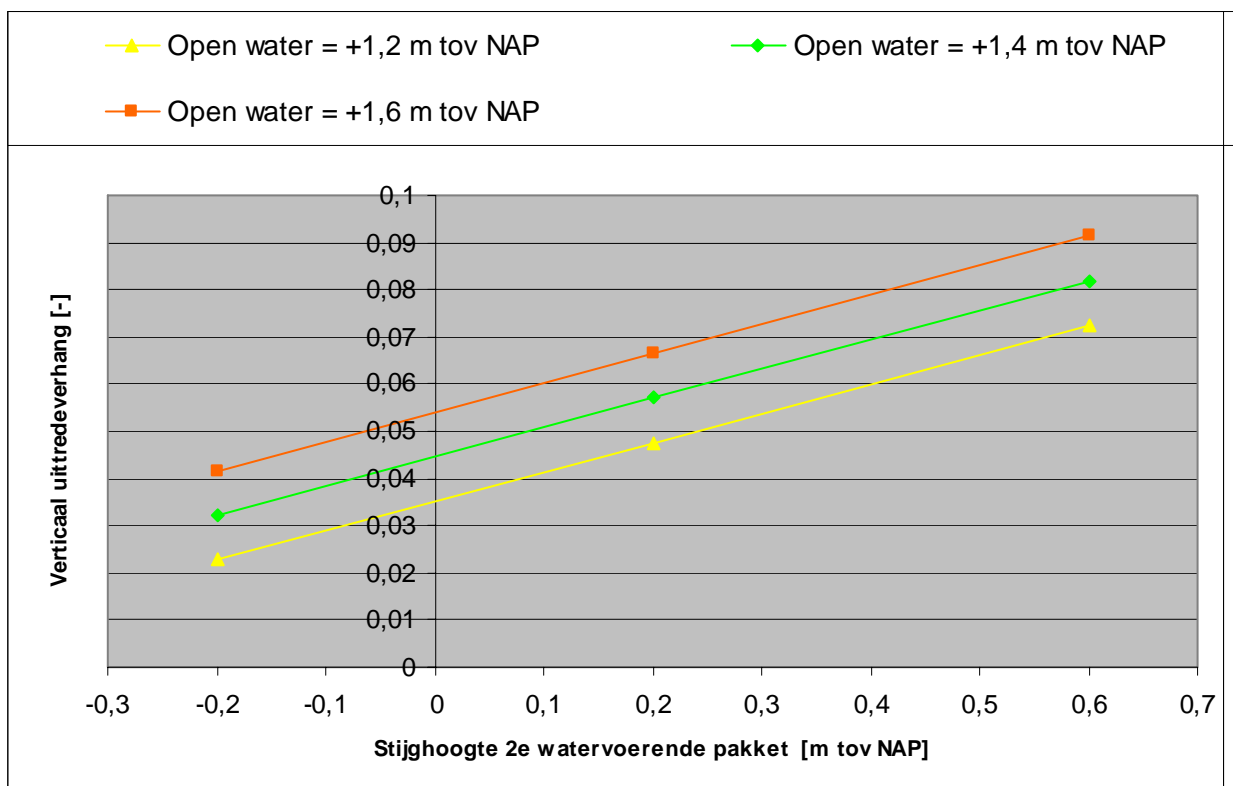
Indien er een gat in het kwelscherm zit, is het verloop van het uittredeverhang gelijk, maar de absolute waarde is wel groter. Hieruit volgt dus dat de invloed van de stijghoogte in het diepe zand op het verhang bij het uittredepunt sterk afhankelijk is van de aanwezigheid van een gat in het scherm; dit komt overeen met de situatie in figuur 2.5c. Het is derhalve van belang om te weten of een scherm nog intact is.



Figuur 3.3 Invloed stijghoogte diepe zand op het verticale verhang bij uittredepunt in de bovenste 1m van het scherm voor een 2D situatie met en zonder gat op 1 m diepte

3.2.3 Invloed waterstand open water

De invloed van het waterpeil in het Zwarte Water is bepaald door bij verschillende waterstanden in het open water de stijghoogte in het 2^{de} watervoerende pakket te variëren. De waterstand in het open water is 0,2 m naar boven en beneden gevarieerd ten opzichte van de standaard waterstand van NAP +1,4 m. De stijghoogte in 2^{de} watervoerende pakket is gevarieerd van NAP -0,2 m tot NAP +0,6 m. De invloed van de waterstand in het Zwarte Water op het verhang bij het uittredepunt blijkt rechtlijnig te zijn. Dit komt overeen met Lane, waar het verval immers ook rechtlijnig in zit.



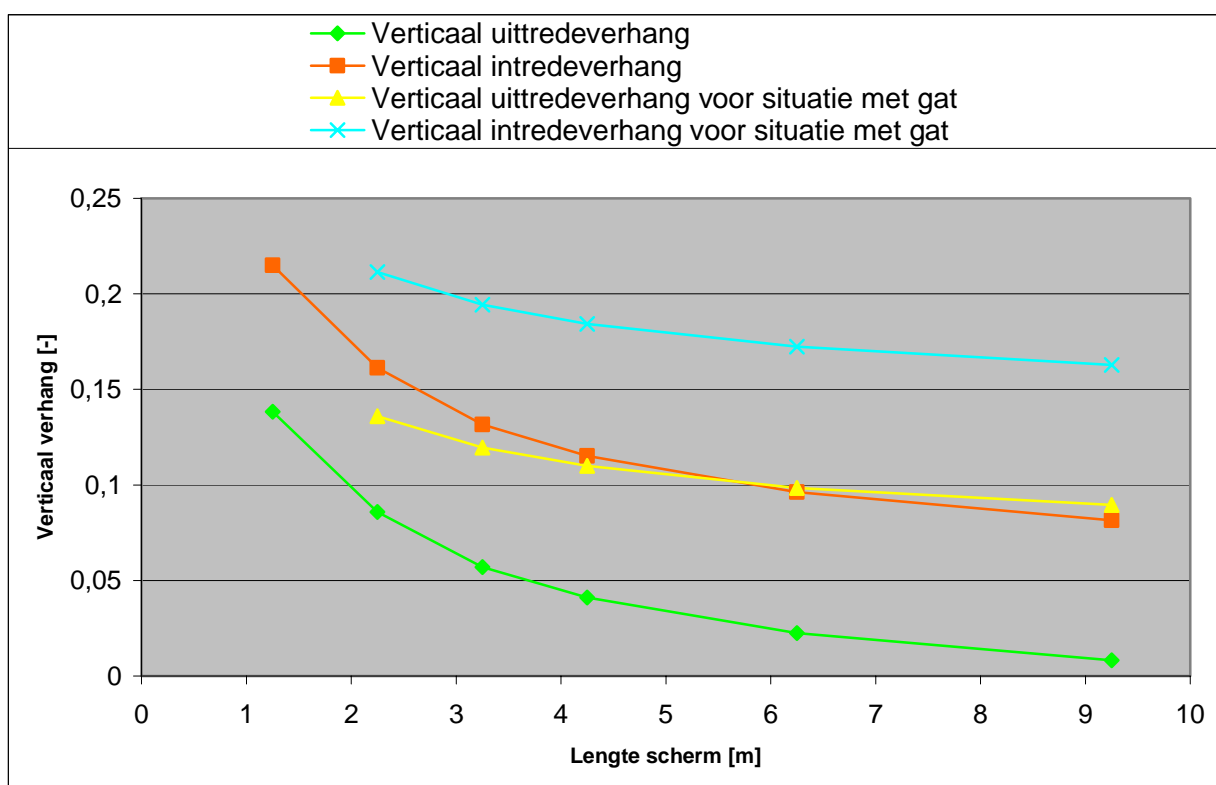
Figuur 3.4 Invloed stijghoogte diepe zand in relatie tot waterstand Zwarte Water op het verticale verhang bij uittredepunt in de bovenste 1m van het scherm voor een 2D situatie

3.2.4 Variatie lengte kwelscherm

De invloed van de lengte van het kwelscherm op het uittredeverhang is onderzocht door deze te variëren van 1 tot 9 m. De bovenkant van het scherm is gelijk aan de onderkant van de sluisbodem op NAP -2,75 m. Het verhang neemt steeds minder snel af bij toenemende kwelscherm lengte, zie figuur 3.4. Ook hierbij is de invloed van een oneindig breed gat op 1 m onder de bodem van het binnenwater onderzocht.

Zelfs met het gat heeft het kwelscherm nog effect. Wel is het effect sterk gereduceerd ten opzichte van een waterdicht kwelscherm. Het effect van een gat neemt overigens ook af naarmate het kwelscherm korter is. Dit is ook logisch, omdat het verschil voor een waterdeeltje om door het gat te stromen of onder het kwelscherm door te gaan steeds kleiner wordt, waardoor het verhang van beide varianten dicht bij elkaar komt te liggen.

Het is niet mogelijk om het verhang bij een scherm met een lengte van 1 m te berekenen, omdat het gat op 1 m onder de bovenkant van het scherm gemodelleerd is. De resultaten zoals die in figuur 3.5 gepresenteerd zijn, komen overeen met figuur 2.5c, ondanks dat het verschil in uittredeverhang veroorzaakt door de staat van het kunstwerk uitdempt naarmate de schermlengte afneemt.



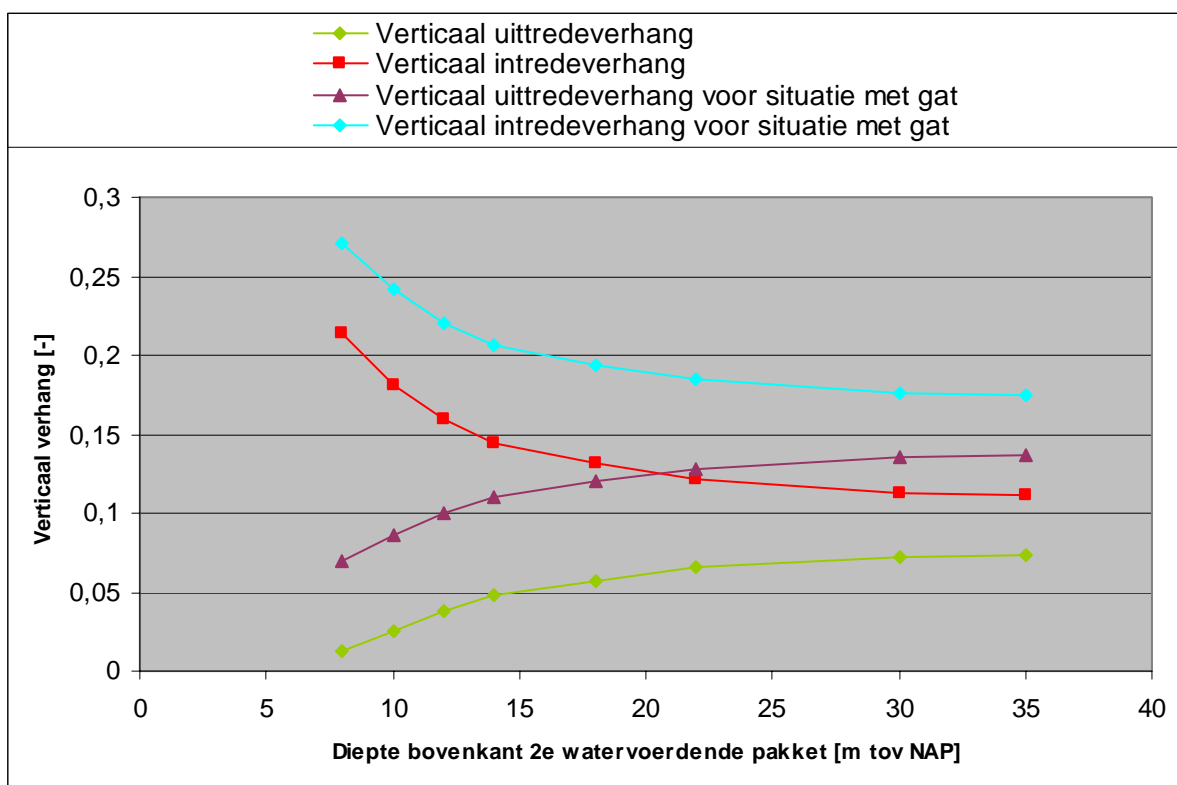
Figuur 3.5 Invloed van kwelschermlengte op het verticale verhang bij uittredepunt in de bovenste 1m van het scherm voor een 2D situatie met en zonder gat op 1 m diepte

3.2.5 Diepte bovenkant 2^e watervoerend pakket

De diepte van het 2^e watervoerende pakket is van belang voor de mate van infiltratie vanuit het open water; in het 2^{de} watervoerende pakket wordt in de referentiesituatie immers een lagere stijghoogte aangehouden dan het peil in het open water. De ligging van de bovenkant van het 2^{de} watervoerende pakket is gevarieerd van NAP -7 m tot NAP -35 m. In figuur 3.5 zijn de resultaten gepresenteerd. Het verhang bij het uittredepunt neemt zeer snel af rond de NAP -7 m. Dit wordt veroorzaakt door het kwelscherm dat tot NAP -6 m reikt, waardoor er nauwelijks een doorstroomopening overblijft (stijghoogte in het 2de watervoerende pakket ligt immers vast).

Het effect van het gat is vergelijkbaar met het effect bij een variërende stijghoogte in het 2^e watervoerende pakket, zoals beschreven in paragraaf 3.2.2 en weergegeven in Figuur 3.3. Het uittredeverhang neemt sterk toe, terwijl het verloop van het verhang gelijk blijft. Een diep watervoerend pakket is ongunstig voor het uittredeverhang, de invloed is echter beperkt door het asymptotische verloop. Ook deze parameter komt niet voor in de formule van Lane, maar blijkt wel van belang te zijn.

Het belangrijkste is echter dat ook hier geldt dat er een duidelijke relatie is tussen de kwelweglengte en het verhang enerzijds en de staat van het kunstwerk anderzijds, oftewel ook hier geldt dat de situatie zoals geschetst in figuur 2.5c van toepassing is.



Figuur 3.6 Invloed van de diepteligging van het 2^{de} watervoerende pakket op het verticale verhang bij uittredepunt in de bovenste 1m van het scherm voor een 2D situatie met en zonder gat op 1 m diepte

3.3 Monitoren invloed(sgebied) 3D gat

3.3.1 Algemeen

De modellering van de gaten is het enige dat 3-dimensionaal gemodelleerd is in het model; de sluis en de kwelchermen zijn nog steeds 2D gemodelleerd (oftewel oneindig breed). Om het gat te kunnen modelleren moet het model verfijnd worden. Het grid zal evenwijdig aan de stromingsrichting verfijnd worden tot een breedte van 0,25 m. Voor de 0,25 m brede verticale kier is het grid verfijnd tot 2,5 cm.

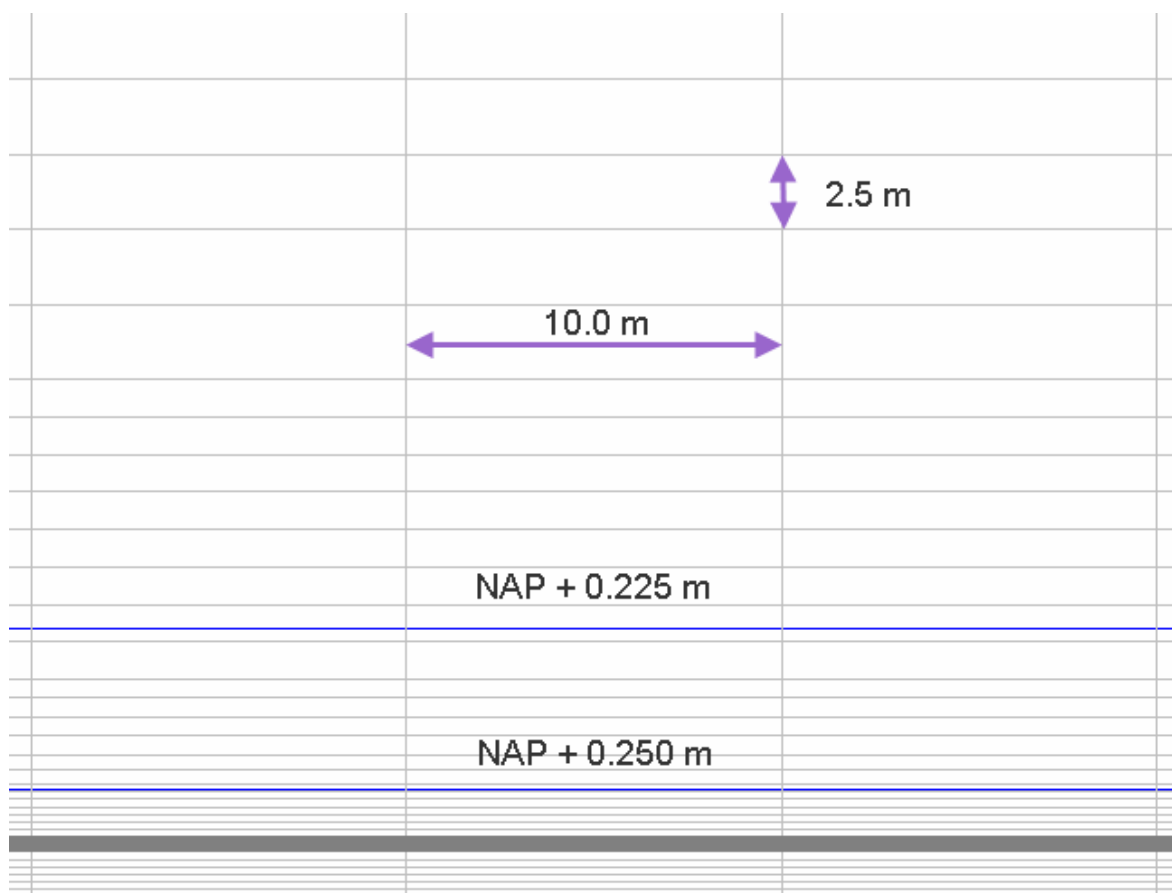
3.3.2 Resultaten invloedsgebied "standaard onvolkomenheden"

Om goed inzicht te krijgen in de stijghoogten rondom het gat, zijn voor alle situaties de met MODFLOW berekende stijghoogten door middel van equipotentiaallijnen weergegeven in een horizontale doorsnede van het model ter hoogte van het gat.

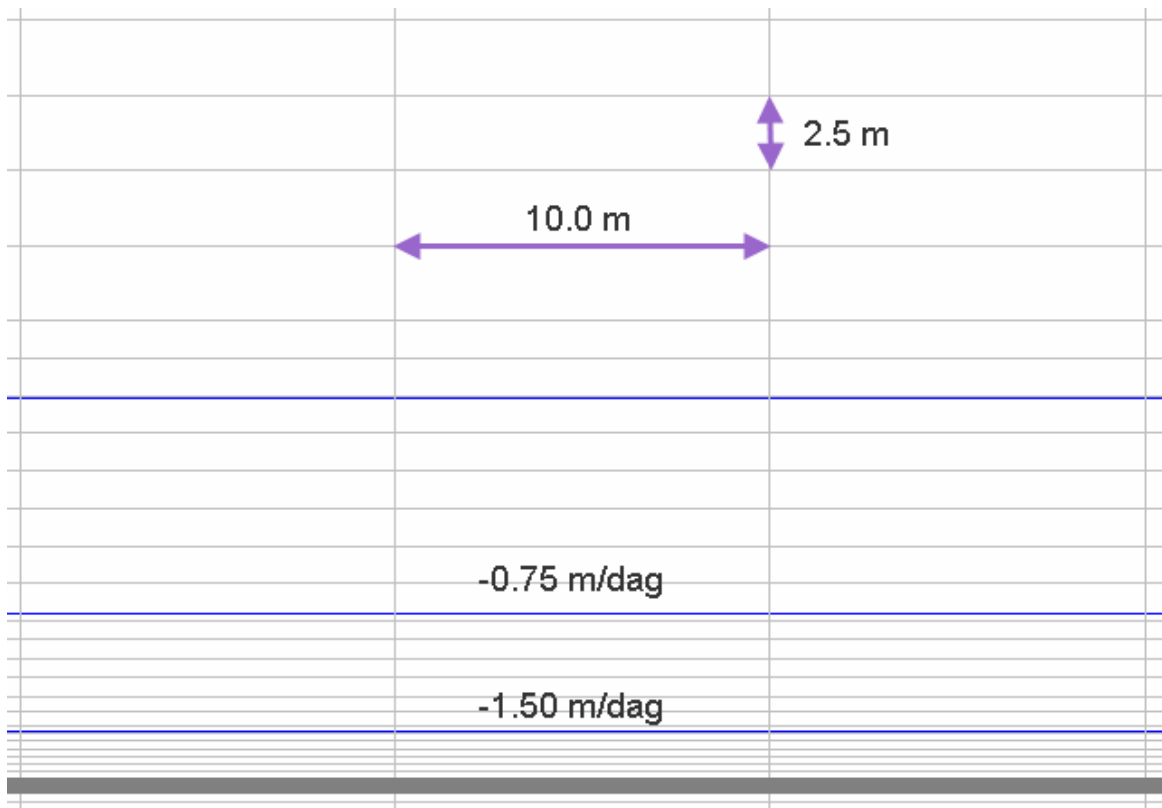
Naast de stijghoogte wordt ook de stroomsnelheid gepresenteerd. Dit zijn twee veelvoorkomende meetbare grootheden die met verschillende monitoringstechnieken bepaald kunnen worden, zie ook [1]. Ook temperatuur zou een meetbare grootheid kunnen zijn, maar is met het gebruikte MODFLOW-model niet te berekenen.

Voor de vergelijking is de verticale stroming genomen. De stroomsnelheden zijn geanalyseerd voor de referentiesituatie van de geschematiseerde sluis, waarin de gaten zijn gemodelleerd. In deze situatie is het verval over de sluis 1,2 m (oftewel MHW).

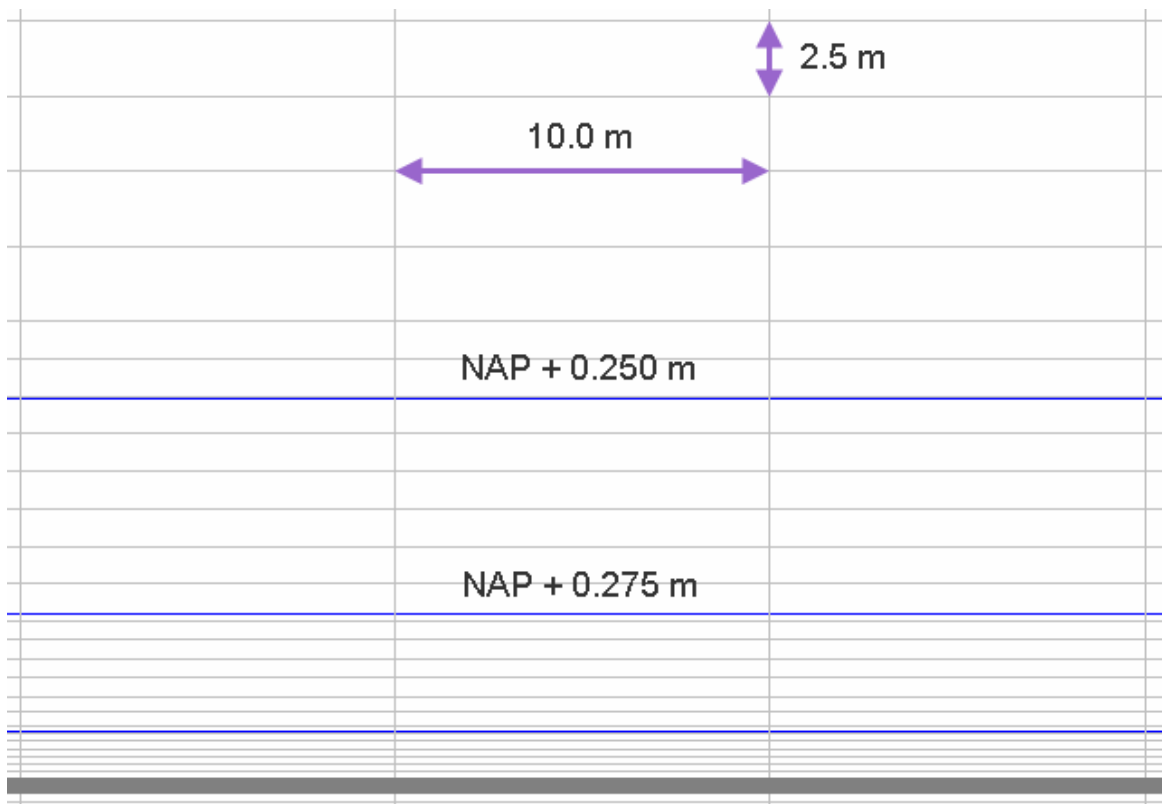
De resultaten van de stijghoogte en de stroomsnelheid, zonder dat een gat is het kwelscherm aanwezig is zijn te zien in onderstaande figuren. Dit worden de referentie-stijghoogte en verticale referentie-stroomsnelheid genoemd. Bij een verticaal opwaartse stromingsrichting is de stroomsnelheid negatief.



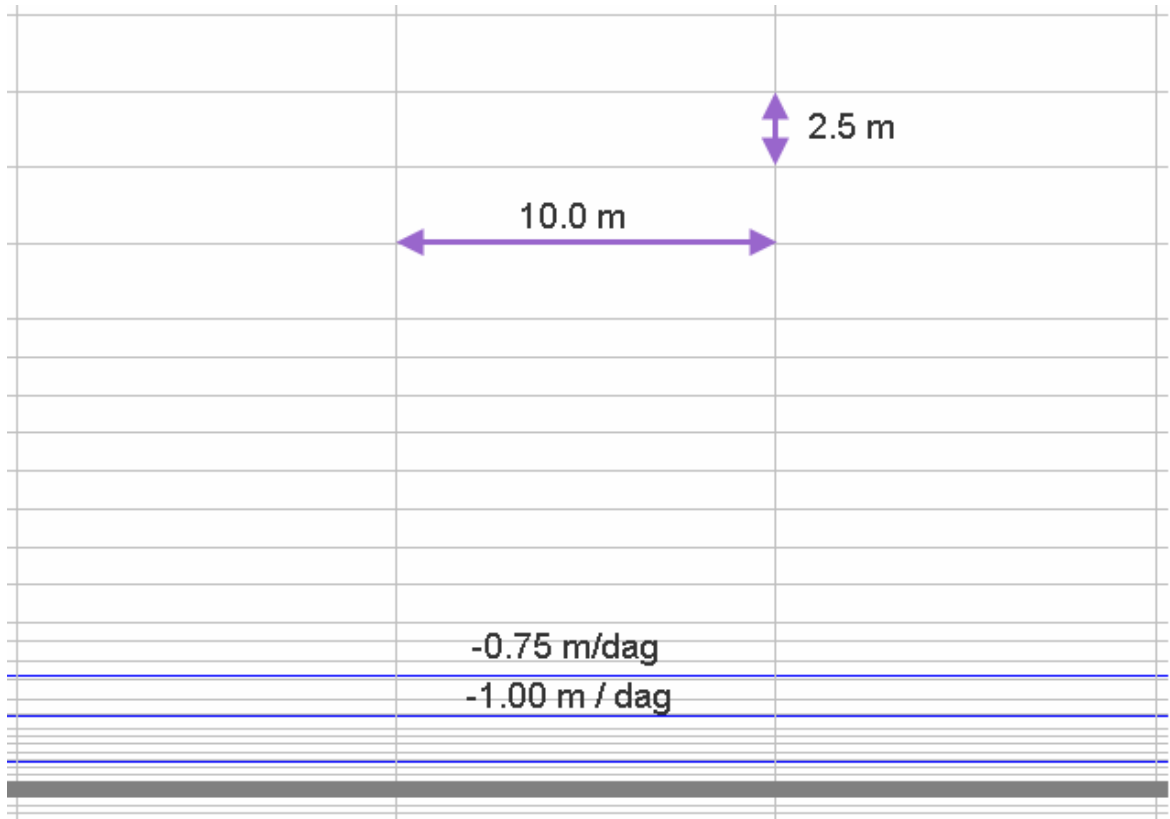
Figuur 3.7 Referentie stijghoogte direct onder sluisbodem



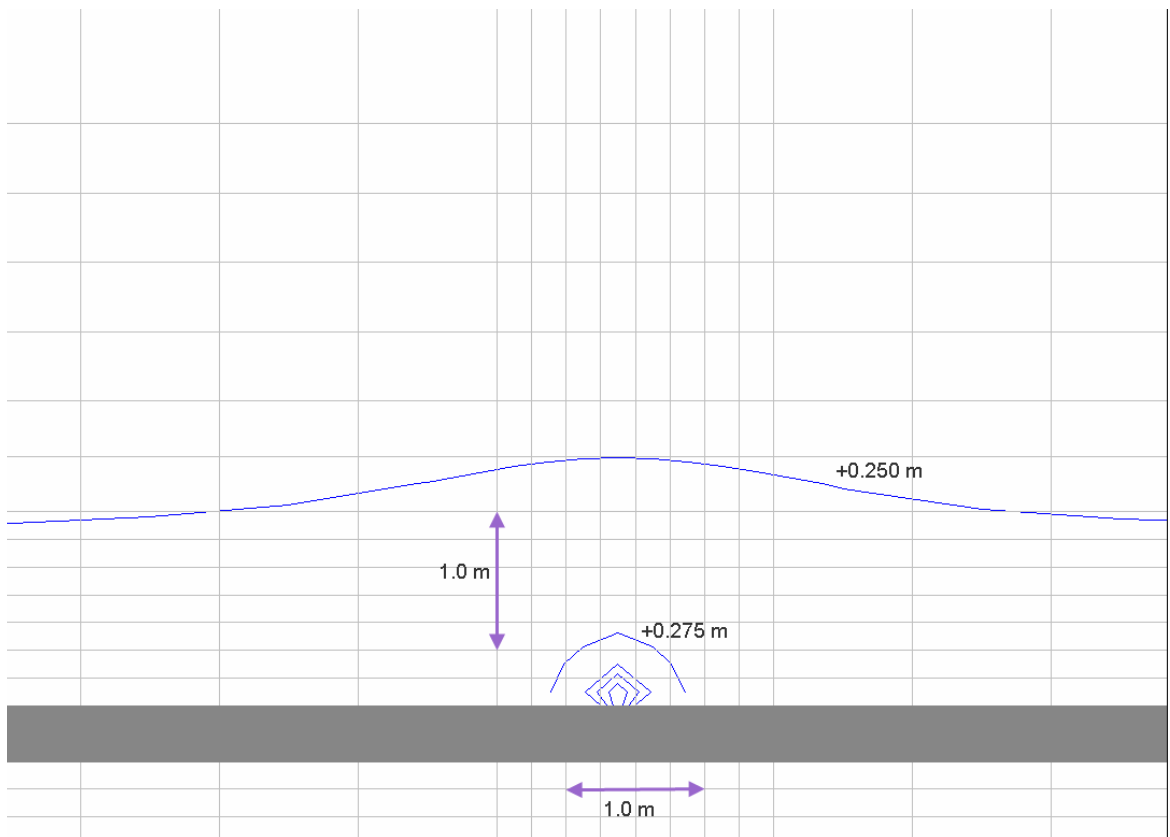
Figuur 3.8 Verticale referentie stroomsnelheid direct onder sluisbodem



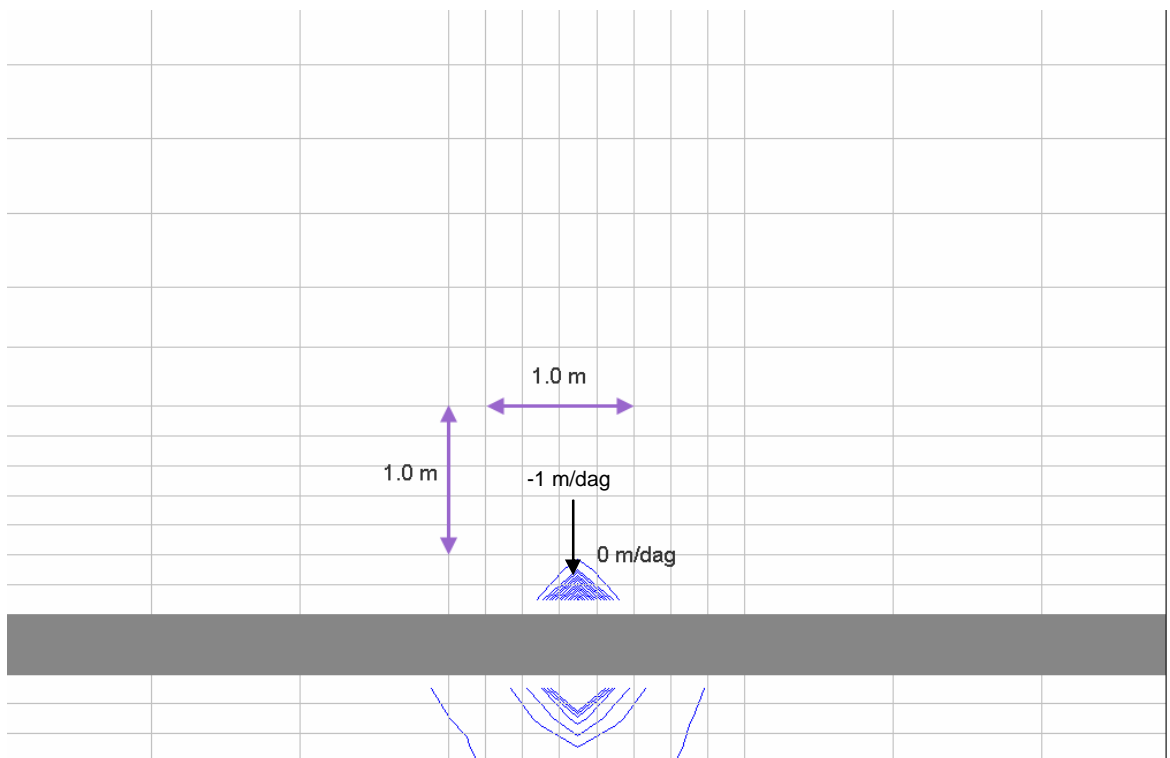
Figuur 3.9 Referentie stijghoogte 1 m onder sluisbodem



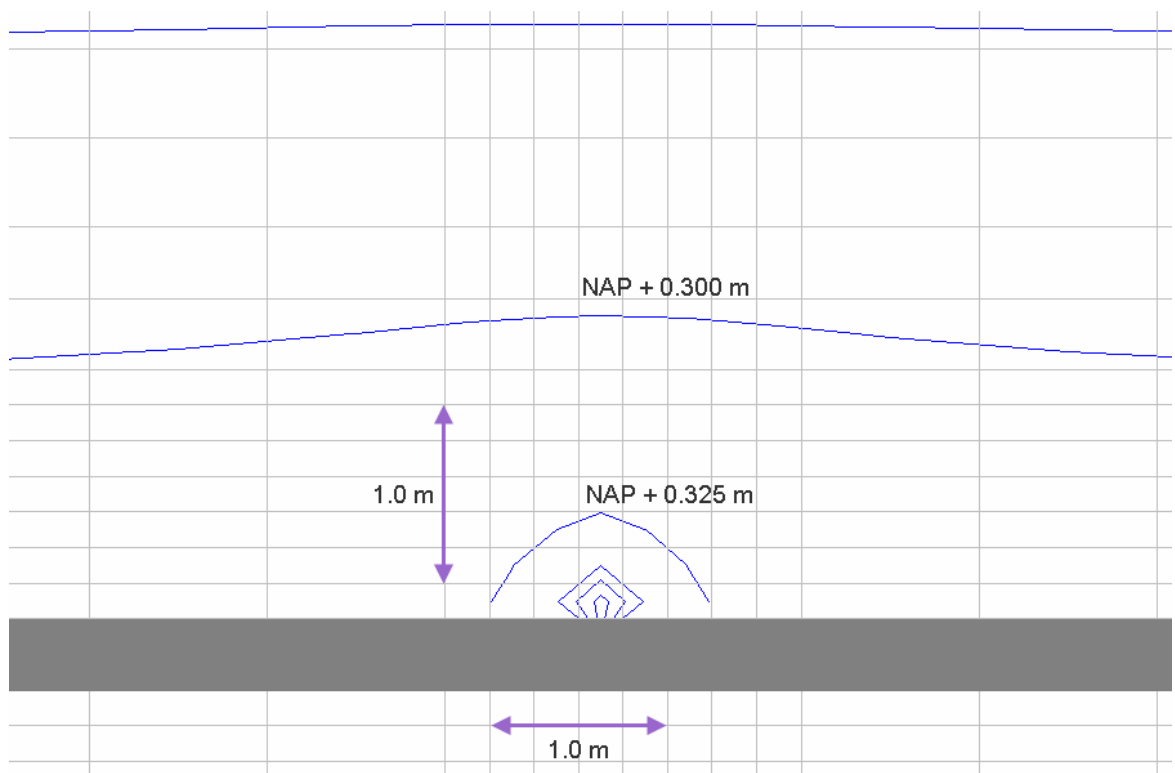
Figuur 3.10 Verticale referentie stroomsnelheid 1 m onder sluisbodem



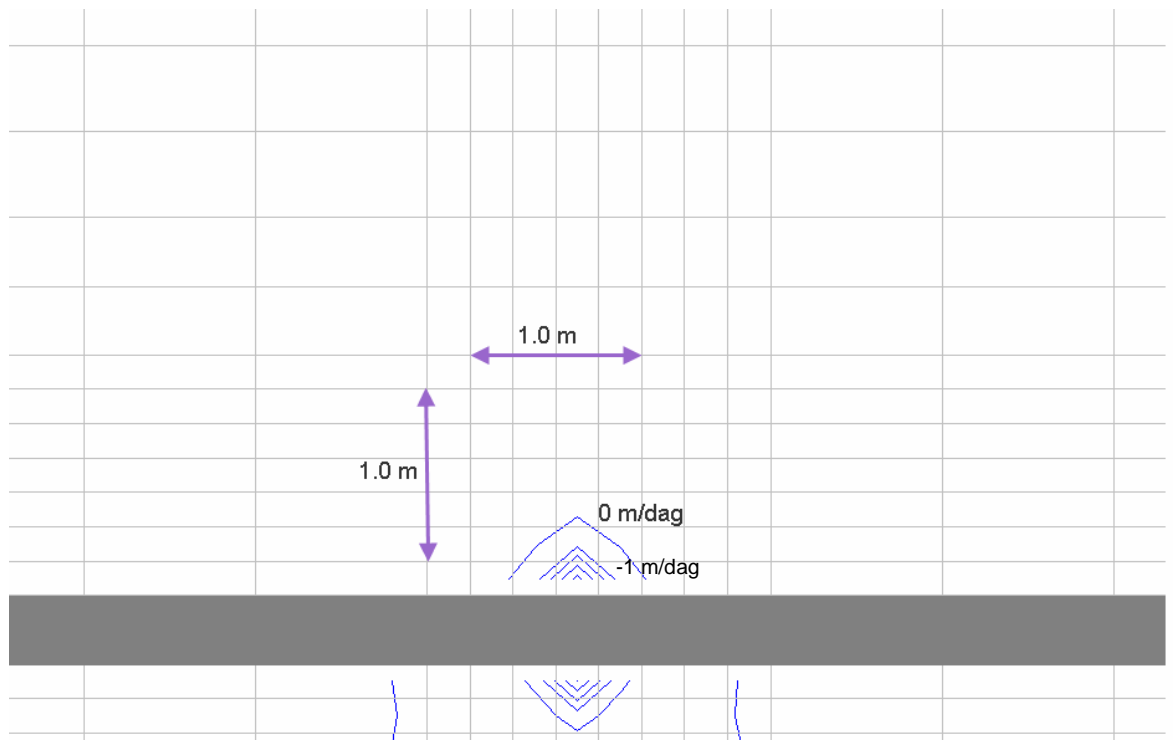
Figuur 3.11 Stijghoogte direct onder vloer bij gat 25 x 25 cm direct onder vloer



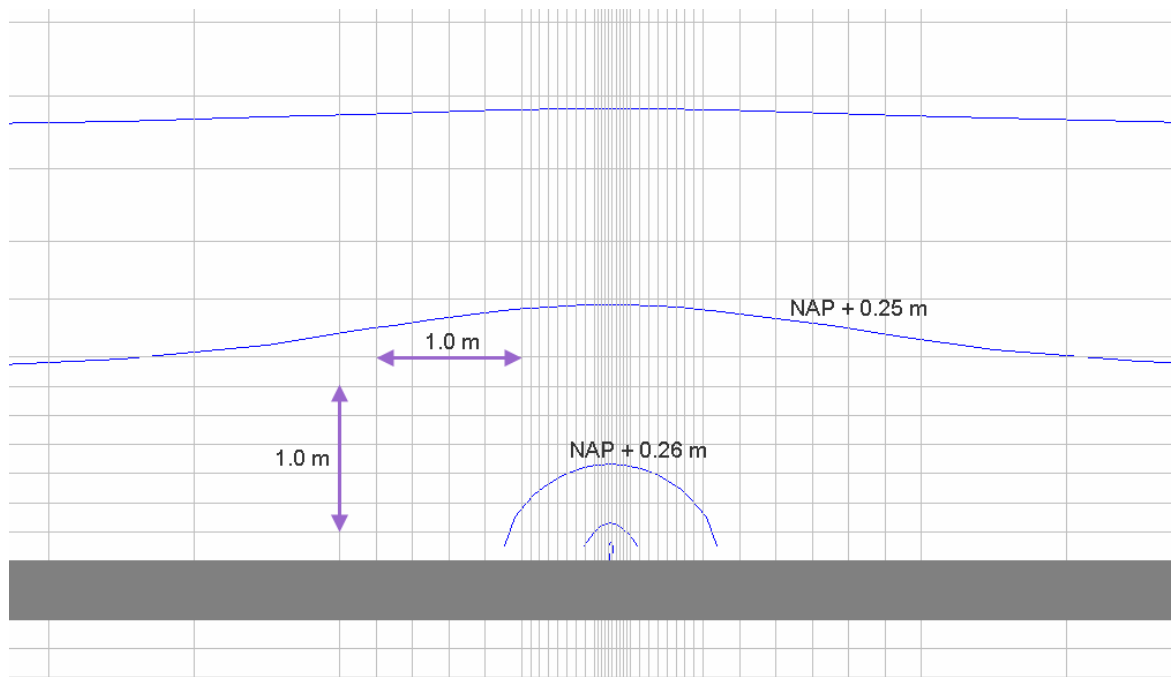
Figuur 3.12 Verticale stroomsnelheid direct onder vloer bij gat 25 x 25 cm direct onder vloer



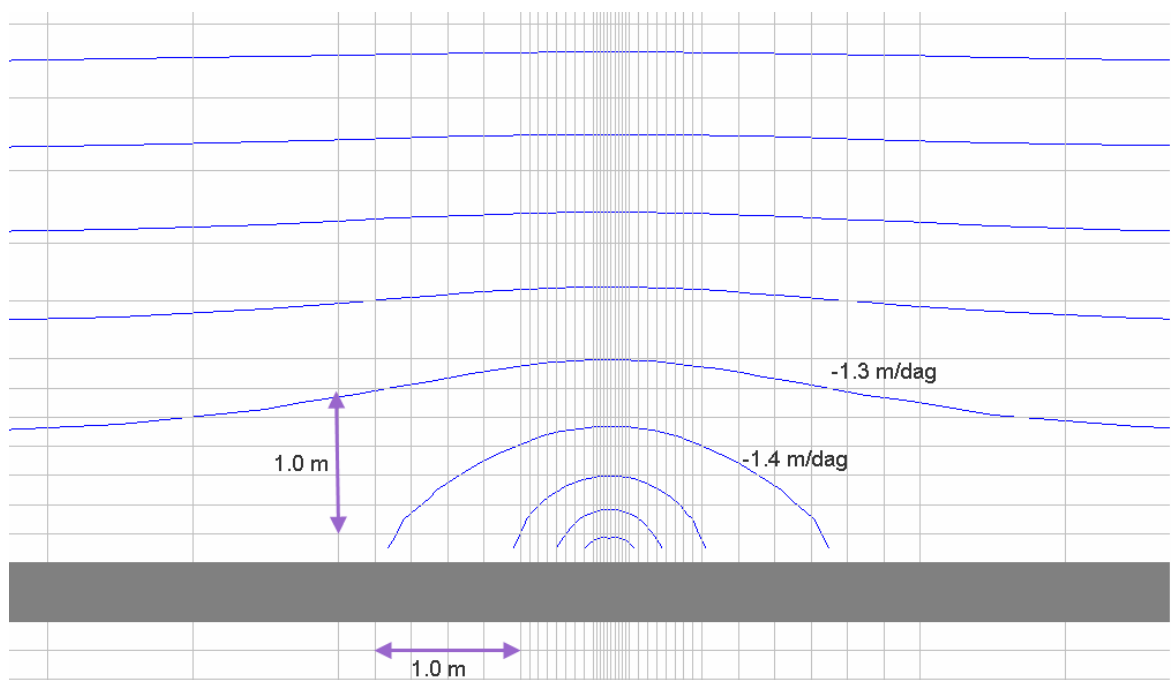
Figuur 3.13 Stijghoogte 1m onder sluisbodem bij gat 25 x 25 cm 1 m onder sluisbodem



Figuur 3.14 Verticale stroomsnelheid 1 m onder vloer bij gat 25 x 25 cm



Figuur 3.15 Stijghoogte direct onder sluisbodem bij kier 2,5 cm breed



Figuur 3.16 Verticale stroomsnelheid direct onder vloer bij kier 2,5 cm breed

3.3.3 Interpretatie resultaten

Uit de resultaten blijkt duidelijk dat er een sterk verhoogde, en dus meetbare stroomsnelheid is rond het gat indien het gat op zeer geringe diepte onder de sluisbodem zit. De snelheden nemen echter op korte afstand van het gat sterk af. Om een gat in het scherm op te kunnen sporen door middel van stromingsmetingen zal dus een zeer dicht grid ($< 0,5 \times 0,5$ m) van sensoren gecreëerd moeten worden. Nog los van de praktische haalbaarheid van het aanbrengen van instrumenten dicht bij het kwelscherm, lijkt een dergelijk dicht net van instrumenten niet realistisch. Omdat de stroomsnelheid sterk afneemt in alle richtingen is het derhalve moeilijk om een gat te kunnen detecteren op basis van stromingssnelheden.

Voor de stijghoogte geldt in principe hetzelfde als voor de stromingsnelheid. In absolute zin is de invloed meetbaar (peilbuis of waterspanningsmeter), maar de invloed dempt zeer snel uit waardoor een dicht net van meetpunten nodig is: h.o.h. afstand kleiner dan 1 m in zowel het horizontale als verticale vlak. Naar het oordeel van Deltares is het niet reëel van h.o.h. afstanden kleiner dan 1 m uit te gaan.

Bijkomend probleem is dat er geen metingen van de nulsituatie zijn. In de situatie van verval over een kunstwerk dat in goede staat verkeerd, zal sowieso al een gekromd verloop van contourlijnen waargenomen kunnen worden. Het grondwater stroomt immers 3D onder en achter (stroming om de zijkanten van de schermen heen) het kunstwerk, alhoewel bij achterloopsheid de kromming van de contourlijnen van de stijghoogte waarschijnlijk precies andersom is als bij een gat. In de contour plots met de referentiesituatie is dit niet zichtbaar, omdat dit een 2D situatie betreft (oneindig breed). Achterloopsheid kan daar dus niet optreden. Zoals uit paragraaf 3.3.2. blijkt, zal de invloed van een gat in het kwelscherm een radiaal verloop hebben. Dit betekent dat de kromming van de contourlijnen met de absolute waarde van de stijghoogte of stroomsnelheid iets verandert nabij het gat, maar dat moeilijk te bepalen is of dat een natuurlijk verloop is of dat er een gat zit.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Het in dit rapport gepresenteerde onderzoek heeft een verkennend karakter naar de invloed van de staat van een kunstwerk op grondwaterstroming, in het bijzonder het verticale uittredeverhang (en daarmee indirect op het mogelijk optreden van piping), en de mate waarin de staat van het kunstwerk middels monitoring vastgesteld kan worden. Dit houdt in dat niet alle mogelijke parameters en/of combinaties van parameters onderzocht zijn, maar dat volstaan is met voor de hand liggende parameters c.q. reëel veronderstelde situaties. Door een onderzoek op hoofdlijnen uit te voeren, heeft Deltares getracht vast te stellen in hoeverre het zinvol is om in het kader van SBW een gedetailleerd vervolgonderzoek uit te voeren.

De staat van een kunstwerk is moeilijk vast te stellen, in tegenstelling tot zogenaamde meetbare grootheden als de diepte van kwelschermen, stijghoogteverschil tussen het open water en het diepere zand (infiltratie c.q. kwel) of de dikte van het watervoerende pakket onder een kunstwerk. Meetbaar wil overigens niet zeggen dat er geen onzekerheid bestaat, maar in verhouding tot het vast stellen van de staat van het kunstwerk is het relatief gemakkelijk te achterhalen. Getracht is vast te stellen in hoeverre er ranges van de meetbare grootheden bestaan, waarbij de staat van het kunstwerk geen invloed meer heeft op het (verloop van het) verhang. Geconcludeerd kan worden dat:

- de stijghoogte in het diepere zandpakket onder een kunstwerk een lineaire en grote invloed heeft op het uittredeverhang achter een kwelscherm. Een grote verticale infiltratie van open water naar een diepere zandlaag is derhalve gunstig voor het risico op piping onder een kunstwerk;
- een dieper kwelscherm leidt tot een asymptotische afname van het uittredeverhang bij het uittredepunt, d.w.z. vanaf een bepaalde diepte verandert de invloed op het uittredeverhang niet meer. Een langer kwelscherm c.q. een kleinere doorstroomopening onder een kwelscherm (d.i. afstand tussen onderzijde kwelscherm en bovenzijde eerst volgende slecht doorlatende laag) is derhalve gunstig voor het risico op piping;
- naarmate het diepe zandpakket waar open water naar toe kan infiltreren, dieper ligt, wordt een asymptotische toename van het uittredeverhang waargenomen. Een diepe ligging van het zandpakket waar het open water naar kan infiltreren, is derhalve ongunstig voor het risico op piping;
- Het belangrijkste is echter dat het uittredeverhang achter een kwelscherm zowel voor de stijghoogte in het diepe zand, de diepte van een kwelscherm als de ligging van het diepe zandpakket sterk afhankelijk zijn van de staat van een kunstwerk, d.w.z. de aanwezigheid van gat;
- Er lijken geen situaties te kunnen worden gedefinieerd, waarbij toch een toetsing op piping kan worden uitgevoerd en de staat van een kunstwerk niet van belang is.

Onvolkomenheden in een kunstwerk, zoals gaten in kwelschermen, kwaliteit van het hout of lekke sluisbodems leiden tot een kortsluiting in de grondwaterstroming ten tijde van een verval over een kunstwerk. De invloed zou derhalve gemonitord kunnen worden om zodoende toch de staat van een kunstwerk te kunnen achterhalen. Nadeel van deze pragmatische aanpak is dat gewacht moet worden tot een representatief verval over het kunstwerk optreedt, d.w.z. een verval bij een waterstand dat in de buurt komt van het toetspeil.

Uit de MODFLOW simulaties bij een verval dat volgens Lane kritisch is, blijkt duidelijk dat het moeilijk is om een gat in een kwelscherm te detecteren met behulp van peilbuizen of stroomsnelheidsmeters. De toename van de stroomsnelheid is op enige diepte onder de sluisbodem niet meer meetbaar. Direct voor het gat zijn ze wel meetbaar, maar vervolgens dempen ze zeer snel uit in de omgeving. Hierdoor is het moeilijk de locatie van een gat te bepalen, uitgaande van een meetnet met een realistische hart-op-hart afstand van de sensoren. Daarnaast wordt een dergelijke meting bemoeilijkt door het ontbreken van een nulmeting (d.i. de situatie tijdens MHW zonder een gat in het kwelscherm).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat als het niet duidelijk is wat de staat van een kunstwerk is, er geen oordeel over het betreffende kunstwerk gegeven kan worden betreffende de toetsing op piping. Aangezien monitoring ook geen soelaas lijkt te bieden om de staat van een kunstwerk vast te stellen, wordt in dit stadium geconcludeerd dat het niet mogelijk is een hulpmiddel bij het toetsen op piping onder historische kunstwerken te ontwikkelen, indien onzekerheid over de staat van het kunstwerk bestaat.

4.2 Aanbevelingen

Op grond van de conclusies is het niet reëel om nader onderzoek te doen naar de invloed van de staat van een kunstwerk op piping. Om toch de veiligheid van de kunstwerken met “geen oordeel” te kunnen garanderen, kan eventueel vervolgonderzoek uitgevoerd worden:

- Voor wat betreft heave (fluïdisatie) benedenstrooms van het kwelscherm is de invloed van een gat in het kwelscherm gunstig, omdat het uittredeverhang gemiddeld over het gehele scherm gereduceerd wordt. Dit beïnvloedt de stabiliteit van het kwelscherm in positieve zin. De invloed van de aanwezigheid van een gat in een kwelscherm op het mechanisme piping (het verticaal uitspoelen van zand) is niet bekend. Het leidt weliswaar lokaal tot een toename van stijghoogten en stroomsnelheden, maar het is niet gezegd dat daardoor de kans op piping in grote mate toeneemt. In het meest gunstige geval zou dit betekenen dat een gat in een kwelscherm niet tot het eerder optreden van piping leidt in vergelijking met een kunstwerk dat in goede staat verkeert. Opgemerkt wordt dat in werkelijkheid de doorlatendheid van het zand benedenstrooms van het kwelscherm heterogeen zal zijn. Er zal daardoor sprake zijn van stromingsconcentratie. In het model is uitgegaan van een homogene doorlatendheid. Lokaal kunnen in werkelijkheid dus nog hogere stroomsnelheden ontstaan dan in het model.
- Opstellen van een calamiteitenprotocol tijdens een hoogwater. Doel van dit protocol zou kunnen zijn het waarnemen van piping en na bevinding te reageren, zie [1];
- Uitwerken van een herstellmethode, zodat de kunstwerken van degelijke voorzieningen wordt voorzien waarmee aan de huidige piping regels voldaan wordt, zie [1].