



WATERSCHAP
vechtstromen

UNIVERSITEIT TWENTE.



MODELLEREN VAN VISPASSAGES

**Aanbevelingen voor het ontwerp van een
schaalmodel voor vispassages**

M.G.J. Mulder
s1365193

1 juli 2015

Bachelor Eindopdracht
Civiele Techniek

Afbeelding voorblad: Vispassage Vechtpark Hardenberg, april 2015

MODELLEREN VAN VISPASSAGES

Aanbevelingen voor het ontwerp van een schaalmodel voor vispassages

Definitief rapport, 1 juli 2015.

Onderzoek in het kader van:

Bachelor Civiele Techniek

Universiteit Twente

Faculteit der Construerende Technische Wetenschappen

Auteur

M.G.J. Mulder (*Martijn*)

Universiteit Twente

Stagebegeleider

Msc. Ing. I. De Vries (*Iwan*)

Waterschap Vechtstromen

Docentbegeleider

Dr. Ir. B.W. Borsje (*Bas*)

Universiteit Twente

Voorwoord

Voor u ligt het definitieve rapport van mijn bachelor eindopdracht met het thema vispassages en dan voornamelijk het ontwerpproces hierachter. Dit rapport is tot stand gekomen in de voorbije drie maanden, gedurende de eerste stage in mijn studententijd. In deze periode heb ik zeer veel geleerd en opgestoken van het werken in het civieltechnisch werkveld en dan met name in het vakgebied water. Het waterschap Vechtstromen was voor mij daarom de ideale omgeving om nog meer in aanraking te komen met de verschillende aspecten in het waterbeheer en hier een goed beeld van te krijgen. Daarbij heb ik langzaam maar steeds meer kennis opgedaan over het ontwerpproces van verschillende typen vispassages en ben ik te weten gekomen waar veelal rekening mee wordt gehouden in de praktijk. Vooral de insteek uit de praktijk was een welkome aanvulling op mijn stage.

Voor dit laatste wil ik mijn dank uitspreken aan mijn stagebegeleider, Iwan de Vries, die mij enthousiast heeft gemaakt voor het onderwerp vispassages. Door Iwan ben ik onder andere betrokken bij verschillende vergaderingen, ben ik aanwezig geweest op een vismigratieplatform in Hardenberg en een themabijeenkomst over de nog te realiseren vismigratierivier in de Afsluitdijk. Daarnaast ben ik regelmatig mee geweest 'het veld in', om voorbeelden van vispassages in de praktijk te aanschouwen. Dit was vaak zeer leerzaam, doordat ik ook zaken ben tegengekomen die je niet in de literatuur vindt, maar wel ontzettend veel van opsteekt. Tenslotte wil ik Iwan ook bedanken voor zijn begeleiding van mijn opdracht gedurende mijn stage.

Voor de totstandkoming van mijn bachelor eindopdracht wil ik graag mijn dank uitspreken aan mijn UT-begeleider, Bas Borsje. Bas heeft mij voor aanvang van mijn stage geholpen bij onder andere mijn voorverslag door middel van zeer nuttige feedback zo nu en dan handige tips en aanbevelingen voor dit eindrapport. Mede hierdoor is dit rapport tot stand gekomen.

Gedurende mijn stage ben ik naast Iwan ook bijgestaan door mijn vaste collega's op kamer 2.06, op het kantoor in Almelo. Hier ben ik hartelijk ontvangen gedurende mijn stage en heb ik veel geleerd over het werk van waterschap Vechtstromen. Mijn dank voor deze plezierige tijd gaat daarom uit naar Hans Gels, Jeroen Buitenweg, Hans Ellenbroek en Rob van Dongen.

Verder wil ik de overige collega's van Vechtstromen bedanken voor het meedenken en het beschikbaar stellen van literatuur. Hiervan heb ik gebruik kunnen maken bij de verslaglegging van mijn rapport, het bouwen van de wiskundige 'ontwerptool' en het uitvoeren van de validatie.

Tenslotte wil ik ook Peter Paul Schollema van waterschap Hunze en Aa's en Piet Riemersma van Grontmij bedanken. Peter Paul heeft mij voorzien van enkele ontwerphandleidingen voor vispassages uit Engeland en Duitsland. Piet heeft namens Grontmij een vergelijkbaar model opgestuurd ter inspiratie en de wens uitgesproken om deze verder te ontwikkelen. Mogelijk ligt hier in de toekomst nog een samenwerking tussen Iwan en Piet in het verschiet.

Al met al kijk ik terug op een leerzame en plezierige tijd als stagiair bij het waterschap Vechtstromen. De tijd is voorbij gevlogen en ik denk dat dit een mooi rapport heeft opgeleverd. Daarnaast hoop ik dat dit de aanzet is voor Vechtstromen om de 'ontwerptool' verder te ontwikkelen en hoop ik dat het rapport als basis kan dienen voor het ontwerp van een schaalmodel.

Martijn Mulder
Almelo, juli 2015

Samenvatting

Vispassages zijn civieltechnische bouwwerken die het mogelijk maken voor vissen om obstakels (zoals sluizen of stuwen) in waterstromen te overbruggen. Hierdoor wordt de natuurlijke vismigratie weer mogelijk. In Nederland en in het beheergebied van het Waterschap Vechtstromen zijn de afgelopen jaren veel vispassages aangelegd. Het meest voorkomend is de bekkervispassage met types als de 'Vertical-slot', 'de Wit' en de 'V-vormige overlaat'. Bij het ontwerpen van een vispassage komen verschillende aspecten kijken. Er zijn verschillende variabelen welke van invloed zijn op het debiet, de stroomsnelheid en de energie in de bekkens. In dit rapport is onderzoek gedaan naar welke variabelen het gevoeligst zijn voor de verschillende typen vispassages om zodoende aanbevelingen te kunnen doen voor een schaalmodel.

Dit onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een wiskundig model, dat is opgezet met Visual Basic in Excel. Met deze 'ontwerptool' zijn verscheidene berekeningen mogelijk voor de verschillende typen vispassages, waardoor de gebruiker gedurende het ontwerpproces de resultaten kan vergelijken. Op die manier kunnen afwegingen worden gemaakt voor het ontwerp van de vispassage. Uit een validatie van het wiskundige model met behulp van meetgegevens is gebleken dat het model en de gehanteerde methoden zeer valide zijn voor de verschillende vispassages met slechts kleine afwijkingen. Vervolgens is met een gevoeligheidsanalyse het gedrag van het model inzichtelijk geworden en kunnen uitspraken worden gedaan over de gevoeligheid voor de variabelen.

Uit de gevoeligheidsanalyse van het wiskundige model is gebleken dat de verschillende vispassages het gevoeligst zijn voor het verval over de bekkens, de waterdiepte in de bekkens en de afmetingen en het ontwerp van de slots/doorzwemvensters. Over het algemeen lieten de variabelen eenzelfde beeld zien voor de vispassages. Zo hadden groter wordende variabelen tot gevolg dat het debiet door de vispassage toenam.

Verder is ook duidelijk geworden dat het ontwerp van de slots voor de Vertical-slot vispassage een groot effect heeft op het debiet en de energiedemping. Zo kan worden geconcludeerd dat de energie in grote bekkens (groot volume, veel demping) veel lager is dan in kleine bekkens (klein volume, weinig demping). Hier dient rekening mee te worden gehouden aangezien de energiedemping een belangrijke randvoorwaarde is vanuit het oogpunt van vissen. Zo zijn er een aantal zaken duidelijk geworden in de analyse die van belang zijn in het ontwerpproces.

Met de resultaten die nu zijn geboekt kan in een vervolgonderzoek een schaalmodel worden ontworpen en gebouwd, waarmee de verschillen tussen verscheidene typen vispassages voor de gebruiker inzichtelijk worden. Daarom is het aan te raden om in het schaalmodel te kunnen variëren met verschillende variabelen en ook het ontwerp van de vispassages. Op die manier worden de gevolgen voor het debiet, de energiedemping en de stroomsnelheid zo goed mogelijk duidelijk. Daarbij is het ter ondersteuning van het schaalmodel voor een vervolgonderzoek aan te bevelen om het wiskundige model uit te breiden met meerdere typen vistrappen, zoals bijvoorbeeld andere typen overlaten en een natuurlijke nevengeul om het model te complementeren.

Leeswijzer

In dit rapport worden aan de hand van resultaten van een wiskundig model aanbevelingen gedaan voor het ontwerp van een schaalmodel. In de inleiding (Hoofdstuk 1) worden de aanleiding en de doelstelling voor het onderzoek gepresenteerd, evenals een beschrijving van de externe organisatie. Daarnaast komen onderzoeksvragen aan bod en zal de te hanteren onderzoeksmethode worden besproken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 2 een introductie gegeven in het onderwerp vispassages, waarbij onder andere verschillende typen vispassages worden besproken. In hoofdstuk 3 is een afweging gemaakt tussen de verschillende methodes en worden uitgangspunten voor het wiskundige model gepresenteerd, waarna deze in hoofdstuk 4 wordt gevalideerd aan de hand van beschikbare meetdata. Om vervolgens aanbevelingen te kunnen doen voor een schaalmodel, is in hoofdstuk 5 een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en worden de resultaten daarvan besproken. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 conclusies getrokken over de gevoeligheid van de variabelen. In hoofdstuk 7 volgt een discussie van de resultaten, waarna in hoofdstuk 8 aanbevelingen worden gedaan in het kader van een eventueel vervolgonderzoek en nog te ontwerpen schaalmodel.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
Leeswijzer	4
Inhoudsopgave	5
1 Inleiding	6
2 Introductie in vispassages	8
3 Uitgangspunten wiskundige model.....	16
4 Validatie.....	19
5 Resultaten Gevoeligheidsanalyse.....	24
6 Conclusie	26
7 Discussie	27
8 Aanbevelingen	28
9 Referenties	30
A. Bijlage Varianten Vertical-slot methode Katopodis (1992)	32
B. Bijlage Formules bekkervispassages.....	33
C. Bijlage Gevoeligheidsanalyse	35
D. Bijlage Opzet van wiskundige model.....	41
E. Bijlage Verificatie wiskundige model.....	49

1 Inleiding

1.1 Externe organisatie

Deze Bachelor Eindopdracht is uitgevoerd bij het Waterschap Vechtstromen, te Almelo. Het Waterschap Vechtstromen is één van de 23 waterschappen die Nederland kent en is ontstaan op 1 januari 2014 uit een fusie tussen de waterschappen Regge en Dinkel en Velt en Vecht. Vechtstromen beslaat een oppervlakte van 225.000 hectare, verdeeld over Drenthe, Overijssel en Gelderland, met in totaal 23 gemeentes en zo'n 800.000 inwoners (Waterschap Vechtstromen, 2015). De belangrijkste taken binnen het Waterschap Vechtstromen zijn Waterveiligheid, Waterkwantiteit en Waterkwaliteit. Echter is er in de afgelopen jaren binnen de waterschappen ook veel aandacht uitgegaan naar vismigratie. Zo zijn er bij het Waterschap Vechtstromen inmiddels bijna 130 vispassages gerealiseerd (Waterschap Vechtstromen, 2015).

1.2 Aanleiding

Dat er binnen het Waterschap Vechtstromen de laatste jaren steeds meer aandacht is uitgegaan naar vismigratie is terug te zien binnen verschillende projecten die zijn uitgevoerd door Vechtstromen. Enkele voorbeelden zijn een vispassage in de Vecht in Hardenberg (Vechtpark Hardenberg, 2015), een vissluis in de BerflobEEK in Hengelo (Waterschap Vechtstromen, 2015) en onderzoeken naar de vispasseerbaarheid van de Regge-onderleider onder het Twentekanaal (De Doorbraak, 2015).

Door deze verschillende projecten is er binnen het Waterschap Vechtstromen vraag ontstaan naar een hulpmiddel bij het ontwerpen van vispassages. Ondanks de kennis die is opgedaan de laatste jaren is er binnen Vechtstromen geen wiskundige 'tool' om verschillende typen vispassages te kunnen vergelijken. Daarbij is ook de wens uitgesproken te beschikken over een schaalmodel ter ondersteuning van voorlichtingen en andere activiteiten. Een dergelijk schaalmodel moet samen met een wiskundige 'tool' de gebruiker inzicht geven in de werking van een vispassage en de invloed hierop van verschillende variabelen.

1.3 Doelstelling

De Bachelor Eindopdracht zal zich richten op het bouwen van een wiskundige 'tool' in Excel, om vervolgens concrete aanbevelingen te kunnen doen voor het ontwerp van een schaalmodel.

De wiskundige 'tool' in Excel moet de gebruiker de mogelijkheid geven te kunnen variëren tussen verschillende typen vispassages en zelf de variabelen op te geven. Op die manier wordt de 'ontwerptool' een hulpmiddel voor de gebruiker om snel de resultaten van de verschillende typen vispassages te kunnen vergelijken. Vervolgens kunnen deze resultaten worden getoetst aan randvoorwaarden die zijn opgelegd aan het ontwerp van vispassages ten aanzien van de vispasseerbaarheid.

Het doel van het schaalmodel is om de gebruiker een beter inzicht te geven in de werking van een vispassage. Om tot concrete aanbevelingen te kunnen komen voor het ontwerp van een schaalmodel zullen de resultaten van de wiskundige 'tool' moeten worden geanalyseerd. Zo zal bijvoorbeeld duidelijk moeten worden welk type vispassage het meest geschikt is voor een schaalmodel en welke varianten kunnen worden toegepast.

1.4 Vraagstelling

De hoofdvraag van deze bachelor eindopdracht ter aansluiting op de doelstelling, luidt als volgt:

“Voor welke variabelen zijn de verschillende typen vispassages het gevoeligst?”

Om deze hoofdvraag te kunnen beantwoorden zijn er een aantal deelvragen welke moeten worden beantwoord. De volgende deelvragen moeten een aanzet geven voor de beantwoording van de hoofdvraag:

1. Welk type vispassage is het meest geschikt als basis voor het wiskundige model?
2. Welke varianten kunnen worden toegepast op dit type vispassage?
3. Welke variant geeft de beste resultaten in het wiskundige model en is het meest geschikt voor een schaalmodel?

Ten aanzien van de ontwikkeling van een wiskundige ‘tool’ dienen de volgende vragen te worden beantwoord, alvorens de onderzoeksvraag kan worden beantwoord. Deze vragen luiden als volgt:

4. Hoe wordt de wiskundige ‘tool’ opgebouwd?
5. Welke inputvariabelen moeten in het model kunnen worden ingevoerd?
6. Welke output moet het model kunnen berekenen
7. Welke formules kunnen worden geïmplementeerd in het model?
8. Wat zijn de randvoorwaarden die worden gesteld aan de vispassages?
9. Hoe valide zijn de resultaten van het wiskundige model?

1.5 Onderzoeksmethode

Het onderzoek kan globaal gezien worden opgedeeld in vijf stappen. Aan de hand van deze stappen kunnen de onderzoeksvragen worden beantwoord om zodoende aanbevelingen te kunnen doen.

1.5.1 Literatuurstudie

Het doel van dit onderdeel is om een antwoord te krijgen op deelvraag 1 en 2, namelijk welk type vispassage het meest geschikt is voor het wiskundige model. Daarbij is het belangrijk zoveel mogelijk kennis op te doen over het onderwerp vispassages, zodat deelvragen 4-8 kunnen worden beantwoord ten aanzien van het wiskundige model.

1.5.2 Wiskundig model

Op basis van de kennis en informatie welke is opgedaan uit de literatuurstudie kan vervolgens worden begonnen met de bouw van het wiskundige model. Deze zal worden ontwikkeld in Excel. Ook dienen uitgangspunten te worden opgesteld.

1.5.3 Validatie

Door het uitvoeren van een validatie van de wiskundige ‘tool’, kunnen uitspraken worden gedaan over de betrouwbaarheid van het model. De validatie wordt uitgevoerd door meetresultaten en modelresultaten met elkaar te vergelijken (Sargent, 2011), ter beoordeling van deelvraag 9.

1.5.4 Resultaten

Om aanbevelingen te kunnen doen voor een schaalmodel zullen de resultaten van het wiskundige model moeten worden geanalyseerd. Dit gebeurt met een gevoeligheidsanalyse ter beantwoording van deelvraag 3.

1.5.5 Conclusie en aanbevelingen

Tenslotte kan een conclusie worden vastgesteld ter beantwoording van de onderzoeksvraag en kunnen aanbevelingen worden gedaan voor het ontwerp van een schaalmodel.

2 Introductie in vispassages

In dit hoofdstuk zal een introductie worden gegeven in het onderwerp vispassages. Vispassages, of ook wel vistrappen genoemd, zijn Civieltechnische kunstwerken welke het mogelijk maken voor vissen om obstakels (bijvoorbeeld een stuw of sluis) in rivieren, beken of sloten te kunnen passeren. De vispassage draagt hiermee bij aan een natuurlijker habitat voor vissen, doordat de natuurlijke trek (weer) mogelijk wordt.

Bij het ontwerpen van een vispassage komen verschillende aspecten kijken. Zo dient een vispassage te voldoen aan verschillende randvoorwaarden zodat een vis kan passeren, afhankelijk van het type vis. Verder zijn er een aantal variabelen welke invloed hebben op de werking van een vispassage. Denk hier bijvoorbeeld aan het debiet door de passage, het verval tussen bovenstrooms en benedenstrooms en het aantal bekkens. Al met al zijn er een aantal oplossingsrichtingen die vismigratie weer mogelijk maken.

2.1 Oplossingsrichtingen vismigratie

Door Kroes en Monden (2005) zijn vier verschillende oplossingsrichtingen beschreven. De eerste daarvan is een natuurlijke oplossing, waarbij de oorspronkelijke situatie wordt hersteld. Indien een dergelijke oplossing niet mogelijk is wordt gekozen voor een semi-natuurlijke inrichting, welke vaak bestaat uit de aanleg van een nevengeul. Door ruimtegebruik kan het echter voorkomen dat ook een semi-natuurlijke oplossing niet geschikt is, waardoor moet worden gekozen voor een technische variant. Een technische oplossing neemt normaal gesproken veel minder ruimte in beslag dan een natuurlijkere oplossing. Tenslotte kan door de gebiedsbeheerder ook worden gekozen voor een aangepast beheer van knelpunten. In Tabel 1 zijn de verschillende oplossingsrichtingen kort weergegeven met enkele kenmerken volgens Kroes en Monden (2005).

OPLOSSINGSRICHTING	KENMERKEN
HERSTEL OORSPRONKELIJKE SITUATIE	Obstakel wordt verwijderd. Herstel van natuurlijke dynamiek. Afstroming water onder natuurlijk verhang. Focus op herstel van leefomgeving: Kwaliteitsverbetering en uitbreiding van leefgebieden. Oplossing neemt veel ruimte in beslag.
SEMI-NATUURLIJKE OPLOSSING	Toegepast indien oorspronkelijke/natuurlijke situatie niet mogelijk is. Vaak in de vorm van een natuurlijke nevengeul/bypass welke om het obstakel heen wordt gelegd. Afstroming water onder natuurlijk verhang van de nevengeul. De nevengeul kan naast doorgang ook dienen als leefgebied voor vissen. Oplossing beperkt door beschikbare ruimte.
TECHNISCHE OPLOSSING	Toegepast indien (semi-)natuurlijke oplossing niet mogelijk is. Neemt minder ruimte in beslag dan een natuurlijke nevengeul/bypass. Technische oplossingen zijn: Bekkenvispassage, Denil-vispassage of een vissluis. Niet geschikt als leefgebied voor vissen.

OPLOSSINGSRICHTING	KENMERKEN
AANGEPAST BEHEER	Toegepast indien bijvoorbeeld het obstakel niet kan worden verwijderd. Met aangepast beheer van peilen en stuwen wordt vismigratie mogelijk. Afhankelijk van lokale situatie en menselijk handelen, niet overal toepasbaar. Vismigratie kan niet permanent worden gewaarborgd.

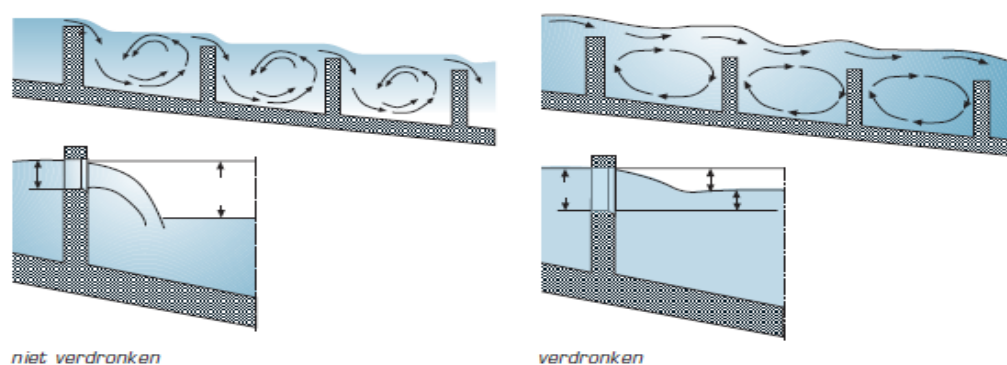
Tabel 1 Oplossingsrichtingen voor vismigratie volgens Kroes en Monden (2005)

2.2 Technische oplossingen

In Nederland is de afgelopen jaren doorgaans gekozen voor een technische oplossing, doordat herstel van de oorspronkelijke situatie of een semi-natuurlijke oplossing niet mogelijk was vanwege ruimtegebrek. Door de jaren heen zijn verschillende technische oplossingen ontwikkeld. Zo beschrijven Armstrong et al (2010) drie typen technische vispassages, namelijk de bekkervispassage, de Denil-vispassage en de vissluis. Volgens Boiten en Dommerholt (2006) wordt de bekkervispassage daarvan het meest toegepast in de laaglandbeken in Nederland.

2.2.1 Bekkervispassage

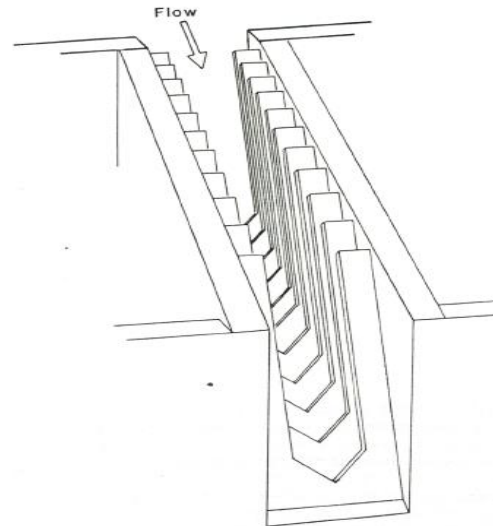
Een bekkervispassage is een vispassage opgebouwd uit verschillende bekkens die gezamenlijk het hoogteverschil tussen bovenstrooms en benedenstrooms overbruggen en worden gescheiden door tussenschotten of overlaten (Kroes & Monden, 2005). Volgens Boiten en Dommerholt (2006) zijn dergelijke vispassages vooral vanaf 1990 gerealiseerd. Echter is er geen eenduidig ontwerp voor de bekkenpassage maar zijn hierin verschillende varianten te onderscheiden. Zo beschrijven Kroes en Monden (2005), Armstrong et al (2010) en Coenen, Antheunisse, Beekman en Beers (2013) onder andere V-vormige overlaten, de vertical-slot vispassage en de Wit-vispassage. Indien overlaten worden toegepast in een bekkenpassage is het van belang voor de vispasseerbaarheid dat deze gedeeltelijk verdronken zijn, zodat een stromende in plaats van een 'kelderende' afvoer ontstaat (Figuur 1) (Kroes & Monden, 2005).



Figuur 1 Verdronken en niet verdronken overlaten volgens Kroes en Monden (2005).

2.2.2 Denil-vispassage

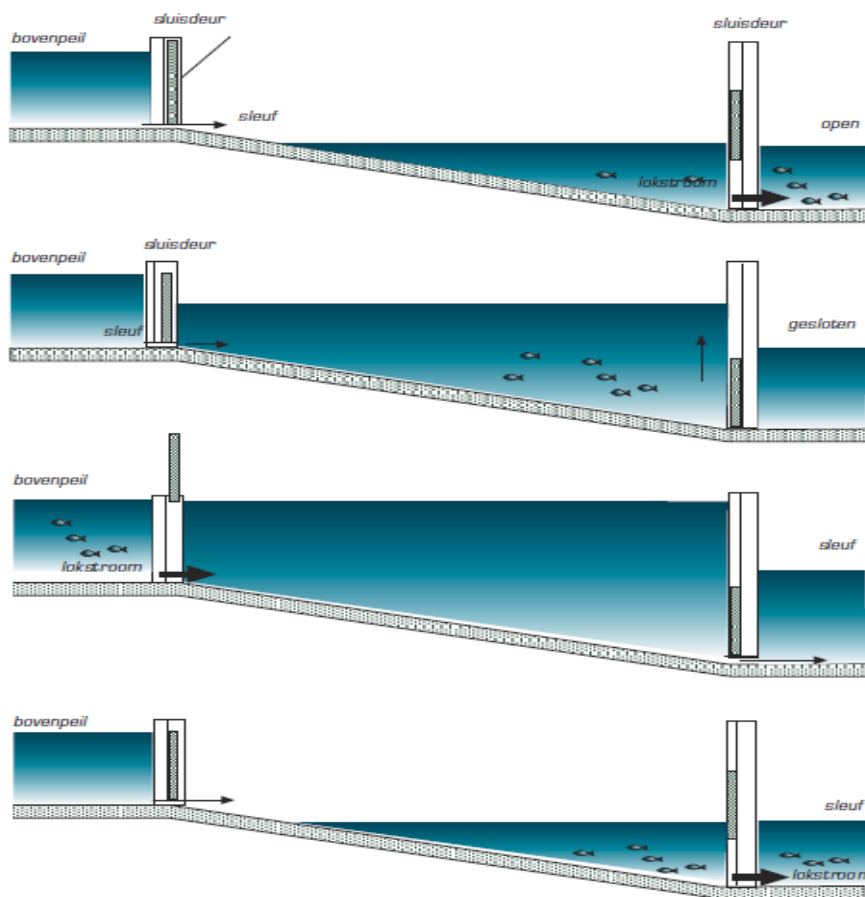
De Denilpassage, of ook wel 'baffle vispassage' (schotten vispassage) genoemd, bestaat uit een sterk hellend kanaal met tussenschotten aan de zijkanten en op de bodem (Katopodis, 1992). Een voorbeeld van een Denilpassage is weergegeven Figuur 2. De tussenschotten zorgen ervoor dat de energie in het water sterk wordt gedempt (Armstrong, et al., 2010), echter is de waterstroom volgens Katopodis (1992) zeer turbulent en Armstrong et al (2010) voegen daar aan toe dat een dergelijke vispassage alleen geschikt is voor sterke vissen, zoals bijvoorbeeld zalm. Een Denilpassage zal daarom niet veel voorkomen in laaglandbeken zoals die in Nederland.



Figuur 2 Denilpassage (Armstrong, et al., 2010)

2.2.3 Vissluis

Een vissluis kan volgens Kroes en Monden (2005) worden vergeleken met een schutsluis voor de scheepvaart. Vissen worden van een laag gelegen niveau benedenstrooms gescht naar een hoog gelegen niveau bovenstrooms of andersom. Via een waterstroom worden de vissen in de sluis gelokt, waarna schuiven de sluis afsluiten en het compartiment wordt gevuld met water. Wanneer het waterpeil in het sluiscompartiment gelijk is met het waterpeil bovenstrooms, gaan de schuiven open en kunnen de vissen op eigen kracht wegzwemmen (Kroes & Monden, 2005). In Figuur 3 is dit proces schematisch weergegeven, waarbij vissen van benedenstrooms naar bovenstrooms kunnen migreren.



Figuur 3 Schematische weergave van de werking van een vissluis (Kroes & Monden, 2005)

In Tabel 2 zijn de technische oplossingen met hun belangrijkste kenmerken weergegeven.

TECHNISCHE OPLOSSING	KENMERKEN
BEKKENVISPASSAGE	Nevengeul/bypass bestaande uit bekkens. Bekkens overbruggen het totale verval tussen boven- en benedenstrooms in gelijke stappen. Bekkens gescheiden door schotten of overlaten. Varianten zijn: Vertical-slot, de Wit, V-vormige of rechte overlaten. Geschikt in vlakke gebieden, rustige stroming. Geschikt voor veel verschillende vissoorten. Meest toegepast in Nederland.
DENIL-VISPASSAGE	Sterk hellend kanaal/nevengeul. Tussenschotten dempen energie. Water zeer turbulent, snelle stroming. Geschikt voor steilere gebieden. Geschikt voor sterke vissoorten.
VISSLUIS	Werking volgens schutsluis-principe Neemt weinig ruimte in beslag bij groot hoogteverschil Geschikt voor diverse vissoorten. Geen continue vismigratie mogelijk door schutproces Technische- en mechanische constructie vergt veel onderhoud.

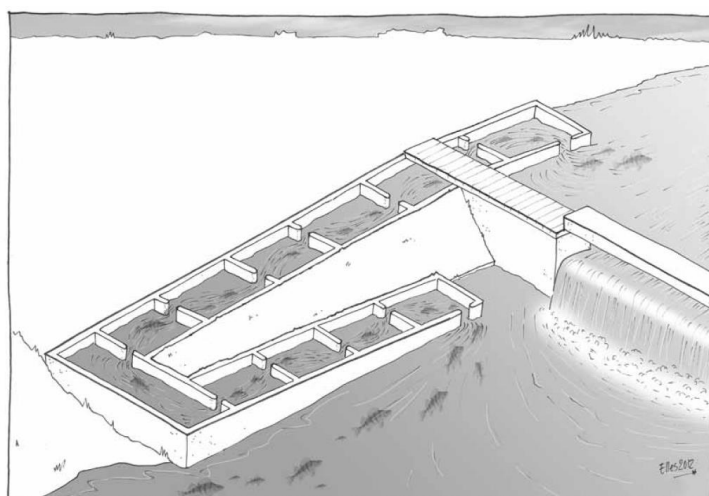
Tabel 2 Technische oplossingen vispassages volgens Kroes en Monden (2005)

2.3 Bekkenvispassages

In paragraaf 2.2 is duidelijk geworden dat de bekkenvispassage het meest voorkomend is in Nederland volgens Boiten en Dommerholt (2006). Dit heeft onder meer te maken met het feit dat (afhankelijk van de waterpeilen) vismigratie continu mogelijk is en dit type zeer geschikt is voor laaglandbeken in vooral vlakke gebieden met rustige stroming voor veel verschillende vissoorten. Enkele bekkenvispassages zijn de Vertical-slot vispassage, de Wit-vispassage, de Vormige- of rechte overlaat of een combinatie van een van de typen.

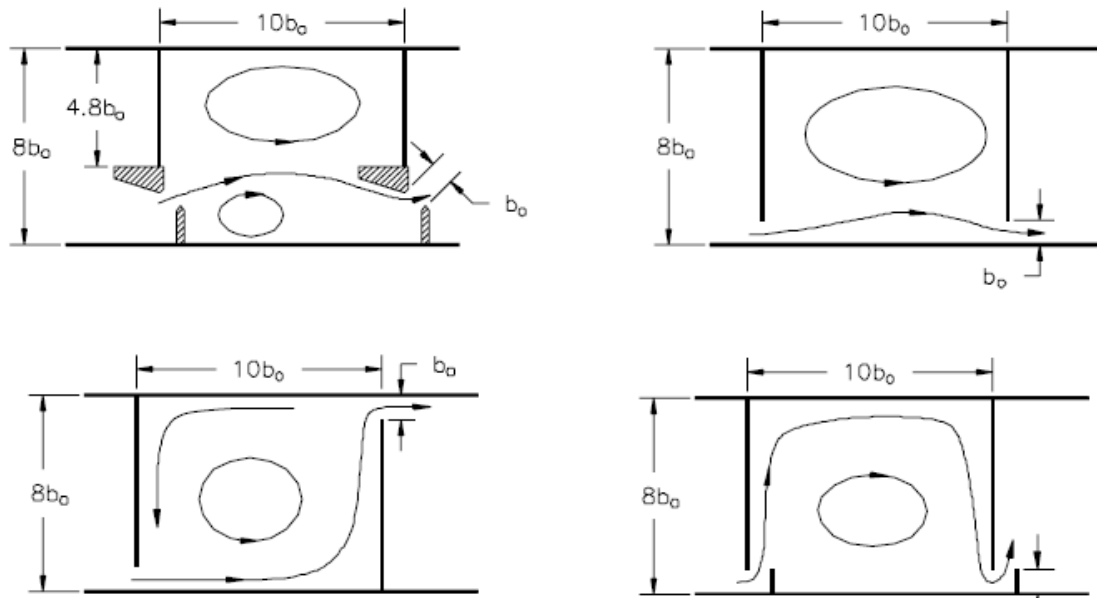
2.3.1 Vertical-slot vispassage

De Vertical-slot vispassage is een bekkenpassage waarbij in de tussenschotten over de gehele hoogte verticale sleuven zijn aangebracht, zoals weergegeven in Figuur 4 (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013). Het voordeel hiervan is dat de vertical-slot geschikt is voor variërende waterpeilen en de vissen op iedere gewenste waterdiepte kunnen zwemmen (Kroes & Monden, 2005).



Figuur 4 Vertical-slot vispassage
(Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013)

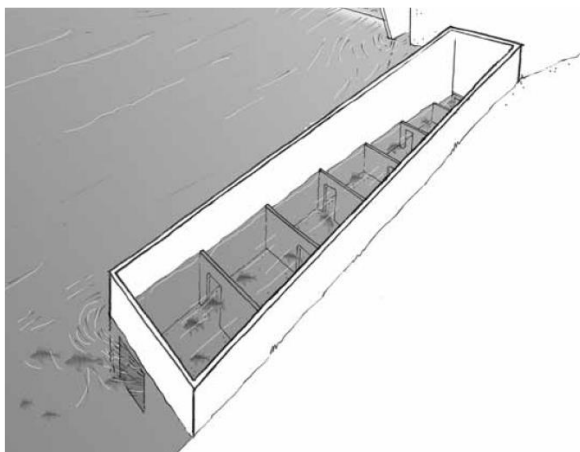
Katopodis heeft al in 1992 onderzoek gedaan naar het ontwerp van de vertical-slot vispassage en varianten opgesteld. In dit onderzoek is onder andere rekening gehouden met het ontwerp van de 'slots' en de stromingspatronen binnen de bekkens. Figuur 5 laat zien dat door te variëren in het ontwerp er vele verschillende stromingspatronen kunnen ontstaan. In Bijlage A zijn alle 18 varianten van de methode van Katopodis (1992) gepresenteerd.



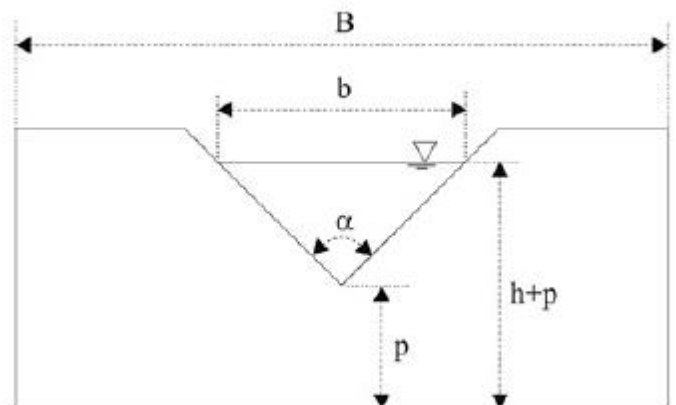
Figuur 5 Verschillende ontwerpen vertical-slots met kenmerkende stromingspatronen volgens Katopodis (1992)

2.3.2 De Wit-vispassage

Een variant op de vertical-slot vispassage is de 'De Wit-vispassage', waarbij de verticale doorzwemvensters zijn vervangen door onderwateropeningen (Figuur 6). Het voordeel hiervan, ten opzichte van de vertical-slot vispassage, is dat de gemiddelde stroomsnelheden in alle vensters dezelfde waarde hebben (Kroes & Monden, 2005). Naar het ontwerp van de Wit-vispassage is veel onderzoek gedaan. Zo zijn Boiten en Dommerholt (2003) met een aangepast ontwerp gekomen op de originele de Wit-vispassage en hebben onder andere aanpassingen gedaan in de afmetingen van de bekkens.



Figuur 6 De Wit-vispassage
(Coenen, Anthéunis, Beekman, & Beers, 2013)



Figuur 7 V-vormige overlaat (Chanson & Wang, 2013)

2.3.3 V-overlaat

In plaats van een doorzwemvenster voor vissen, worden doorgaans ook vaak V-vormige overlaten toegepast in het ontwerp voor vistrappen, waar het water overheen stroomt (Kroes & Monden, 2005). In Figuur 7 is een dwarsdoorsnede van een V-vormige overlaat weergegeven. Het voordeel van een V-vormige overlaat is dat de hoofdstroom zich in het midden van de overlaat vormt en hier onder variërende debieten altijd een doorzwemhoogte van voldoende hoogte is. Net zoals bij de Witvispassage is er door Boiten (1990) uitvoerig onderzoek gedaan naar de afvoerrelatie van een V-vormige vistrap en dit type is inmiddels bij veel vispassages in Nederland toegepast in tegenstelling tot een rechte overlaat.

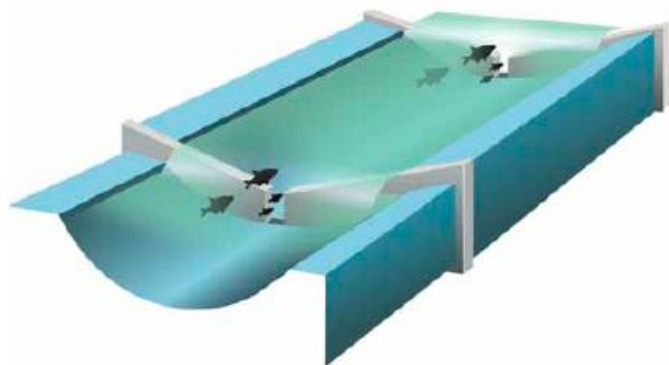
2.3.4 Andere overlaat typen

Naast een V-vormige overlaat zijn er ook andere typen welke kunnen worden toegepast. Zo zijn er rechte overlaten, met een brede of een smalle kruin (Parílková, Ríha, & Zachoval, 2012), rechthoekige overlaten met contractie van de zijanten (Aydin, Altan-Sakarya, & Sisman, 2011) en overlaten met een ronde kruin voor een betere afstroming (Haghiabi, 2012). Voor al deze typen geldt dat ze verdronken moeten zijn met een verdrinkingsgraad van tenminste 0,5 volgens Kroes en Monden (2005). Gezien het feit dat de aanstroomcondities bij dit type overlaten doorgaans niet optimaal zijn voor vispassages, worden deze normaal gesproken weinig toegepast in Nederland in de laaglandbeken.

2.3.5 Combinatie overlaat - de Wit/Vertical-slot

Een alternatief op een overlaat of een de Wit/Vertical-slot is een combinatie tussen beide. Volgens Kroes en Monden (2005) is een dergelijk ontwerp uitermate geschikt indien er sprake is van sterke waterpeilwisselingen. Bovendien is de vispassage hierdoor ook beter geschikt voor verschillende soorten vissen. Een voorbeeld van een combinatie tussen een V-vormige overlaat en een vertical-slot is weergegeven in Figuur 8.

Katopodis (1992) en Guven, Hassan en Sabir (2013) beschrijven het totale debiet over een dergelijke constructie als de som van het debiet over de overlaat en het debiet door de vertical-slot/de Wit.



Figuur 8 Combinatie V-vormige overlaat en Vertical-slot (Kroes & Monden, 2005)

In Tabel 3 zijn de belangrijkste kenmerken van de verschillende bekkervispassages weergegeven.

BEKKENVISPASSAGE	KENMERKEN
VERTICAL-SLOT VISPASSAGE	Schotten met verticale sleuven. Geschikt voor variërende waterpeilen. Vissen kiezen gewenste doorzwemhoogte. Stromingspatroon afhankelijk van ontwerp en locatie van de 'slots'. Beperkt bij grote debieten. (smalle doorzwemvensters) Gevoelig voor drijfvuil, dat de openingen blokkeert.
DE WIT-VISPASSAGE	Schotten met onderwateropeningen Geschikt voor variërende waterpeilen. Onderwateropeningen verspringen van elkaar. Doorzwemvensters hebben zelfde gemiddelde snelheid in de vispassage. Vispassage werkt ook bij lage debieten. Niet gevoelig voor drijfvuil. Vispassage geschikt voor bodemvissen.
(V-VORMIGE) OVERLAAT	Schotten zijn overlaten, waar water overheen stroomt. Niet geschikt voor schommelende waterpeilen. Bij laag debiet altijd water in bekkens. Echter, bij te laag debiet een te lage doorzwemhoogte voor vissen. Overlaat is niet geschikt voor slechte zwemmers of bodemvissen.
COMBINATIE DE WIT/VERTICAL SLOT – OVERLAAT	Combinatie tussen overlaat en doorzwemvenster/slot. Geschikt voor variërende waterpeilen. Geschikt voor variërende debieten. Geschikt voor veel vissoorten. Vis kiest gewenste doorzwemhoogte.

Tabel 3 Verschillende typen bekkervispassages

2.4 Belangrijkste randvoorwaarden en variabelen

Om de migratie van vissen door een vispassage mogelijk te maken, zijn er een aantal hydraulische randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan en waar normaal gesproken aan wordt getoetst bij het ontwerp van een vispassage. Volgens Kroes en Monden (2005) zijn de belangrijkste randvoorwaarden de stroomsnelheid in de bekkens, een minimaal ontwerpdebiet en de maximale energiedemping per bekken. Echter zijn er een aantal variabelen, zoals de minimale waterdiepte in de vispassage, de vensterbreedte in de schotten en een maximaal verval per bekken, die invloed hebben op bovengenoemde randvoorwaarden.

2.4.1 Minimaal debiet

Om vismigratie door de vispassage mogelijk te maken moet er een minimaal debiet door de passage stromen. Vistrappen worden ontworpen aan de hand van een ontwerpdebiet en dit debiet is afhankelijk van bijvoorbeeld de breedte en waterdiepte in de doorzwemvensters (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013). De debietberekeningen verschillen echter per type vispassage en zijn opgenomen in bijlage B. Bovendien worden verschillende methodes gehanteerd

door bijvoorbeeld Katopodis (1992) en Kroes en Monden (2005). De belangrijkste variabelen die het debiet bepalen zijn het Verval, de breedte van de vensters, de hoogte van de vensters, de waterdiepte en de afvoercoëfficiënt welke wordt bepaald door het ontwerp van de vensters/bekkens.

2.4.2 Maximale stroomsnelheid

De stroomsnelheden binnen een vispassage mogen niet te hoog zijn, waardoor situaties ontstaan waardoor de vispassage onmogelijk te passeren is voor vissen. De zwemsnelheid van vissen wordt bepaald door de soort vis, de lichaamsbouw en de grootte van de vis (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013). Tevens speelt het uithoudingsvermogen van vissen een belangrijke rol, waardoor stroomversnellingen niet te lang mogen zijn er voldoende rustpunten aanwezig zijn. Doorgaans worden bekkenpassages ontworpen op de maximale of gemiddelde stroomsnelheid die ontstaat op de drempels. De stroomsnelheid wordt bepaald door het verval per bekken en het ontwerp van de bekkens en slots/vensters.

2.4.3 Energiedemping

Door de hoogteverschillen in vispassages, de stroomversnellingen en verschillende drempels ontstaat er turbulentie in de vispassage, wat door de vissen wordt ervaren als een tegenkracht (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013). Het is daarom belangrijk dat bij het ontwerpen van een vispassage deze turbulentie en weerstand voor de vissen zo laag mogelijk is, zodat een vispassage goed te passeren is voor vissen. De turbulentie wordt volgens Coenen, Antheunisse, Beekman en Beers (2013) berekend als de energie per m^3 . De variabelen die de energiedemping bepalen zijn het debiet in de vispassage, het verval, de lengte en breedte van de bekkens en de waterdiepte.

2.4.4 Belangrijkste variabelen

De belangrijkste variabelen die het debiet, de stroomsnelheid en de energiedemping bepalen zijn weergegeven in Tabel 4.

RANDVOORWAARDE	VARIABELEN
DEBIET	Verval per bekken
	Breedte van de slots
	Hoogte van de slots
	Waterdiepte in de slots
	Afvoercoëfficiënt (wordt bepaald door ontwerp van de vensters/bekkens)
STROOMSNELHEID	Verval per bekken
	Afvoercoëfficiënt (wordt bepaald door ontwerp van de vensters/bekkens)
ENERGIEDEMPING	Verval per bekken
	Debiet in de vispassage
	Lengte van bekkens
	Breedte van bekkens
	Waterdiepte in bekkens

Tabel 4 Belangrijkste variabelen voor de randvoorwaarden

In bijlage B zijn de debietberekeningen voor de verschillende bekkenvispassages gegeven en worden de bijbehorende variabelen gepresenteerd. Tevens wordt ingegaan op de formules voor de stroomsnelheid in de bekkens en de energiedemping.

3 Uitgangspunten wiskundige model

Voordat kan worden begonnen met de uitwerking van het wiskundige model, zullen in dit hoofdstuk de uitgangspunten worden gepresenteerd. Allereerst zal het model worden opgesplitst in drie typen vispassages. In hoofdstuk 2 is duidelijk geworden dat de meest voorkomende vispassage in Nederland een bekkenpassage is, waarbij vaak wordt gekozen uit een Vertical-slot vispassage, een de Wit-vispassage en een V-vormige overlaat. Bovendien worden deze typen vispassages uitgebreid besproken in de literatuur en zijn afvoerformules beschikbaar. Om die reden is de afweging gemaakt het model op te bouwen uit deze typen vispassages, waarbij verschillende berekeningsmogelijkheden gekozen kunnen worden door de gebruiker.

3.1 Afweging van methoden

3.1.1 Vertical-slot vispassage

Voor de uitwerking van de Vertical-slot vispassage zal een afweging moeten worden gemaakt tussen de formule (Vergelijking 1) van Katopodis (1992) en de formule (Vergelijking 2) van Kroes en Monden (2005) en Coenen, Antheunisse, Beekman en Beers (2013) (Zie ook bijlage B), waarin wordt verwezen naar de methode van Katopodis (1992). Het belangrijkste verschil is dat de methode van Katopodis (1992) is gebonden aan verhoudingen tussen de slotbreedte, bekkenbreedte en bekkenlengte (Zie bijlage A), terwijl bij de methode van Kroes en Monden (2005) dit niet het geval is en de afmetingen van de slots en bekkens vrij kunnen worden gekozen. Dit resulteert in het feit dat de energiedemping bij de methode van Katopodis (1992) doorgaans ruimschoots voldoet als gevolg van de grote verhoudingen tussen de breedte van de slots en de lengte en breedte van de bekkens (waardoor grote volumes ontstaan), terwijl dit bij de methode van Kroes en Monden (2005) niet altijd het geval is doordat de afmetingen (en het volume van de bekkens als resultante) naar wens kunnen worden aangepast.

Het voordeel van de methode van Katopodis (1992) in tegenstelling tot die van Kroes en Monden (2005) is echter dat Katopodis dieper ingaat op de waarde van de afvoercoëfficiënt (Q^*) en deze ook definieert aan de hand van het ontwerp van de bekkens (in totaal 18 varianten, zie bijlage A) en de verhouding tussen de waterdiepte en de slotbreedte. Kroes en Monden (2005) gaan voor de afvoercoëfficiënt (C_D) niet verder dan twee mogelijkheden, namelijk: Verspringende slots en slots in rechte lijn. Coenen, Antheunisse, Beekman en Beers (2015) maken daarbij nog onderscheid tussen korte bekkens en lange bekkens, waardoor de mogelijkheden voor andere varianten beperkt blijven.

De grote mate aan variabiliteit in ontwerpmogelijkheden voor de Vertical-slot vispassage, maakt de methode van Katopodis (1992) geschikt voor een wiskundige 'ontwerptool' in Excel, doordat de gebruiker veel keuzemogelijkheden krijgt. Daarbij komt het feit dat er verschillende modelstudies zijn gedaan, waarbij diverse ontwerpen die zijn gebruikt door Katopodis (1992) zijn getest. Zo werd er in 1986 onderzoek gedaan door Rajaratman, Van der Vinne en Katopodis naar zeven verschillende varianten en presenteerden Liu, Rajaratman en Zhu in 2006 een onderzoek naar de stroming in Vertical slot vispassages. Dit maakt het mogelijk voor de methode van Katopodis een validatie uit te voeren. Tot slot wordt ook in literatuur van Armstrong et al (2010) en Kamula (2001) verwezen naar de methode van Katopodis (1992) en stellen Kroes en Monden (2005) dat de afvoercoëfficiënt van hun methode hiervan is afgeleid, waardoor de methode van Katopodis (1992) het geschiktst is voor de uitwerking van een wiskundige 'ontwerptool'.

3.1.2 De Wit-vispassage

Voor de uitwerking van de Wit-vispassage zullen de formules van Kroes en Monden (2005) en Coenen, Antheunisse, Beekman en Beers (2013) worden gebruikt. Deze formules zijn eerder gepresenteerd door Boiten en Dommerholt (2003) in hun onderzoek naar de afvoerrelatie en snelheidsverdeling van de (aangepaste) Wit-vispassage. In tegenstelling tot de Vertical-slot vispassage zullen de afmetingen van de bekkens als variabele dienen te worden ingevoerd en zijn daarmee niet beperkt tot vaste verhoudingen. Boiten en Dommerholt (2010) beschrijven daarbij een gemiddelde afvoercoëfficiënt van $C_D = 0,93$ die is afgeleid van de vensterhoogte. Hierbij wordt aangenomen dat de afvoercoëfficiënt gelijk blijft bij verschillende afmetingen voor de bekkens.

3.1.3 V-vormige overlaat

Voor de uitwerking van de V-vormige overlaat zal een afweging moeten worden gemaakt tussen de methode (Vergelijking 4) van Boiten (1990) en de methode (Vergelijking 5) van Chanson en Wang (2013). Beide methodes zijn vergelijkbaar, maar maken gebruik van andere constante factoren, wat resulteert in een afvoercoëfficiënt (C_D) die bij Boiten (1990) ongeveer dubbel zo groot is als die van Chanson en Wang (2013). Zo hanteert Boiten voor een scherpe rechthoekige overlaat een afvoercoëfficiënt van ongeveer $C_D = 1,1$, terwijl Chanson en Wang (2013) een afvoercoëfficiënt hanteren van $C_D = 0,58$.

In de literatuur wordt doorgaans verwezen naar de methode van Boiten. Dit heeft te maken met het feit dat Boiten (1990) in zijn afvoerrelaties onderscheid maakt in het type kruin. Naast een scherpe rechthoekige kruin wordt ook een scherpe afgeschuinde kruin beschreven ($C_D = 1,25$). Onder andere Larinier (2002), Armstrong et al (2010) en Kroes en Monden (2005) maken gebruik van dit onderscheid in hun handboek. Ook de DIWA (Dienst Landinrichting en Beheer Landbouwgronden, 1996) hanteert de methode van Boiten (1990), maar beschrijft in plaats van de afgeschuinde kruin een vergelijkbaar alternatief, namelijk een ronde kruin. Zij stellen dat dit type een gunstig effect heeft op de afvoer, doordat het water het oppervlak van het stuwlichaam beter volgt. Dit resulteert in minder beluchting, wat gunstiger is voor de vispasseerbaarheid (Kroes & Caldenhoven, 2008). Daarnaast resulteert dit in een hogere afvoercoëfficiënt dan die van een scherpe rechthoekige overlaat. Boiten (1990) gaat voor de afgeschuinde overlaat uit van een afvoercoëfficiënt (C_D) van ongeveer 1,25. Deze afvoercoëfficiënt zal daarom, samen met de methode van Boiten (1990), worden gehanteerd in het wiskundige model.

3.2 Berekeningsmogelijkheden

3.2.1 Vertical-slot

In het model wordt de gebruiker de mogelijkheid geboden te kiezen tussen verschillende berekeningsmethoden. Voor de Vertical-slot vispassage zijn dat de volgende berekeningen:

- Afmetingen slots → Debiet
- Debiet → Waterdiepte bekkens
- Debiet → Verval per bekken

Dit betekent dat bijvoorbeeld voor 'Afmetingen slots → Debiet' geldt dat de afmetingen van de slots als inputparameter worden genomen en het Debiet als output wordt berekend, tezamen met de maximale stroomsnelheid en de energiedemping per bekken.

3.2.2 De Wit-vispassage

Voor de Wit-vispassage zijn de volgende berekeningen mogelijk:

- Afmetingen → Debiet
- Debiet → Verval per bekken
- Debiet → Minimale vensterbreedte
- Debiet → Minimale vensterhoogte

De berekening van het volume en de energiedemping is vergelijkbaar met die van de Vertical-slot.

3.2.3 V-vormige overlaat

Voor de V-vormige overlaat zijn de volgende berekeningen mogelijk:

- Hoek V-vorm → Debiet
- Breedte V-vorm → Debiet
- Debiet → Overstortende straal
- Debiet → Afmetingen V-vorm

Het volume in de bekkens en de energiedemping zullen op een zelfde wijze worden berekend als bij de andere twee typen vispassages. Hierbij dienen de afmetingen van de bekkens vooraf te worden ingevoerd, aangezien hier geen vaste verhoudingen aan zitten, zoals bij een Vertical-slot vispassage. Daarbij worden de V-vormige overlaten doorgaans in het midden van de drempel geplaatst.

Verder is het bij overlaten van belang dat deze gedeeltelijk verdronken zijn om vispasseerbaarheid mogelijk te maken. Kroes en Monden (2005) stellen dat 0,5 een gunstige waarde is voor de verdrinkingsgraad. Dit betekent dat hiermee rekening dient te worden gehouden bij het ontwerp.

4 Validatie

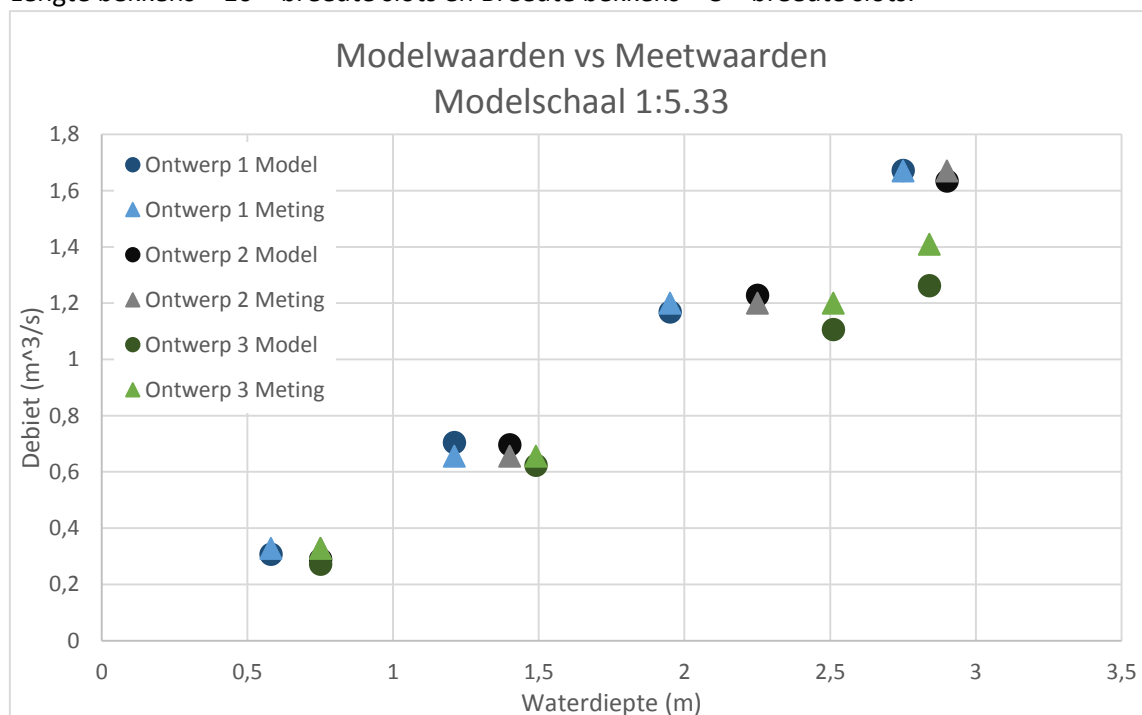
Om aan de hand van het wiskundige model aanbevelingen te kunnen doen voor het ontwerp van een schaalmodel, is het van belang dat het rekenmodel een accurate weergave geeft van een reëel systeem. Kortom, het wiskundige model moet valide zijn en daarmee dus een goede weergave geven van de werkelijkheid.

Om te testen of het model daadwerkelijk valide is zijn er een aantal tests die kunnen worden uitgevoerd. Hierbij zullen de uitkomsten en het gedrag uit het model worden vergeleken met resultaten van een werkelijke situatie. Dit gebeurt per type vispassage. Bij deze validatie is geen rekening gehouden met meetonzekerheden in de modeluitkomsten en meetresultaten (H7).

4.1 Validatie Vertical-slot vispassage

Voor de Vertical-slot vispassage is een modelonderzoek uitgevoerd in 1986 door Rajaratman, Van der Vinne en Katopodis. In totaal zijn acht varianten getest die later door Katopodis (1992) zijn overgenomen (Bijlage A, varianten 1-8). De meetresultaten van dit modelonderzoek zullen worden gebruikt als vergelijking tussen het wiskundige model en de werkelijke situatie. Bij dit modelonderzoek zijn verschillende schalen voor de modellen gehanteerd, namelijk: 1:5.33, 1:8 en 1:16.

In Grafiek 1 zijn voor een schaal van 1:5.33 de meetwaarden en de modelwaarden tegenover elkaar gezet voor varianten 1, 2 en 3. In het model zijn de debieten berekend door de waterdiepte als variabele op te geven. De overige parameters hebben vaste waarden gekregen, namelijk: Verval = 0,305m (helling 10%) en breedte slots = 0,305m. Bekkens zijn berekend volgens de verhouding: Lengte bekkens = 10 * breedte slots en Breedte bekkens = 8 * breedte slots.

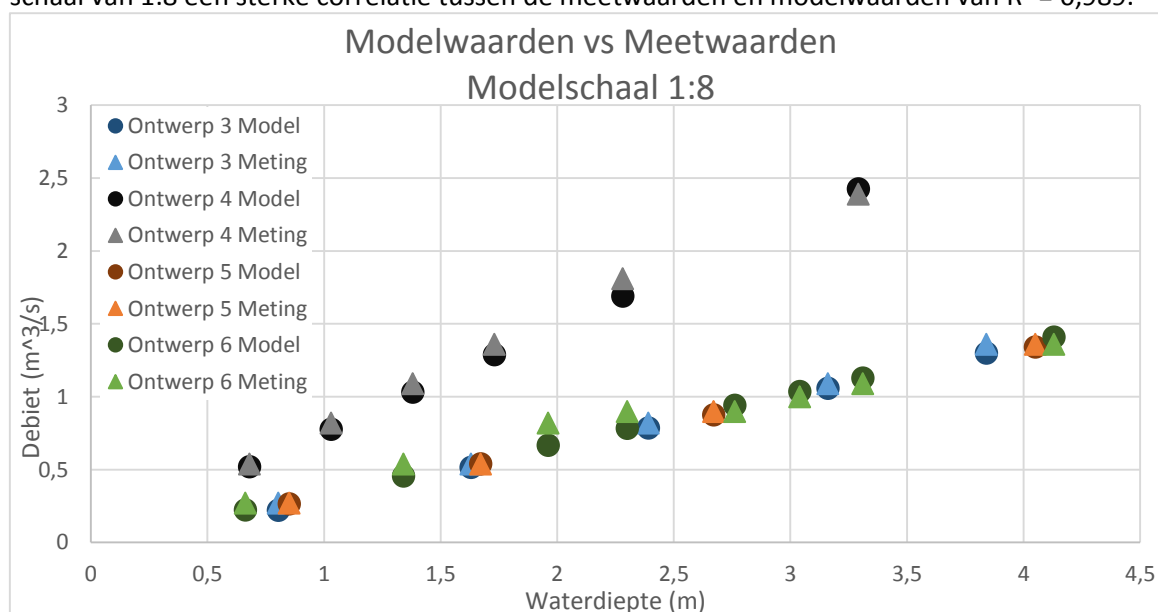


Grafiek 1 Modelschaal 1:5.33, vergelijking modelwaarden en meetwaarden varianten 1 t/m 3 (Verhang = 10%).

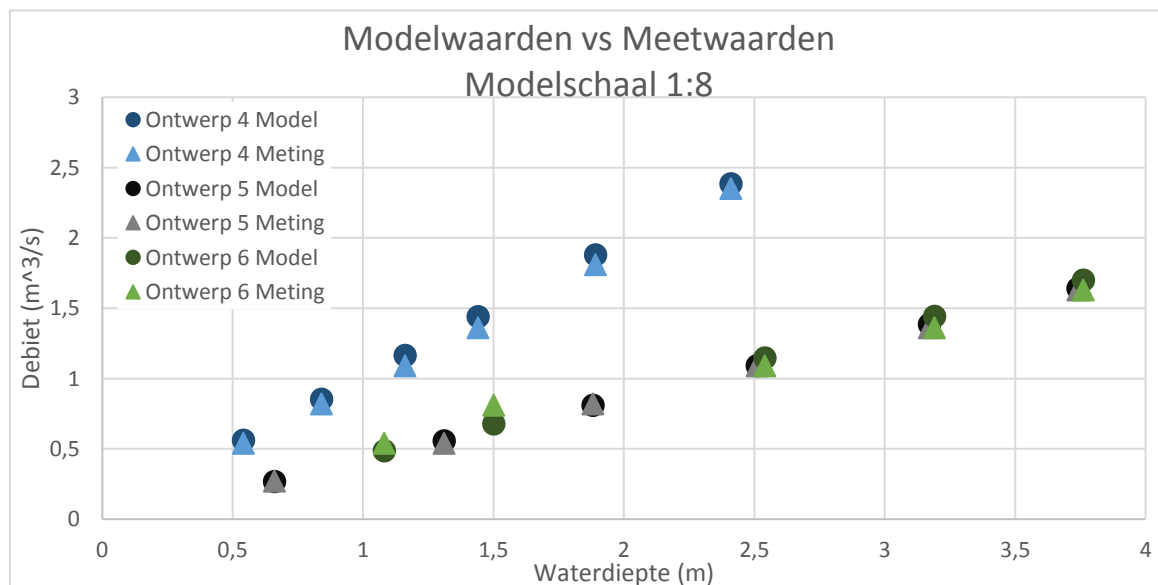
Zoals Grafiek 1 laat zien, liggen de modelwaarden en meetwaarden dicht bij elkaar, met kleine verschillen. Gemiddeld betekent dit een verschil tussen de modelwaarden en meetwaarden van 0,048m³. Dit is een gemiddelde afwijking van 6,5% ten opzichte van de meetwaarden. Bovendien hebben de meetwaarden en modelwaarden een correlatie van $R^2 = 0,988$.

In Grafiek 3 en Grafiek 2 zijn voor een schaal van 1:8 de meetwaarden en de modelwaarden tegenover elkaar gezet. Dit is gebeurd voor de varianten 3 t/m 6. In Grafiek 3 is onderscheid gemaakt in twee hellingen. Varianten 3 en 4 zijn berekend met een helling van 5,6%, wat gelijk is aan een verval van 17,1cm. Varianten 5 en 6 hebben in Grafiek 3 een helling van 5,7%, wat gelijk staat aan een verval van 17,4cm. In Grafiek 2 daarentegen, zijn alle varianten berekend met eenzelfde verhang, namelijk 10%. Dit resulteert in een verval van 30,5cm. De breedte van de slots is ingesteld op 0,305m. De bekkens zijn berekend volgens een vaste verhouding: Lengte bekkens = 10 * breedte slots en Breedte bekkens = 8 * breedte slots.

Uit Grafiek 3 en Grafiek 2 blijkt dat ook voor een modelschaal van 1:8 de berekende modelwaarden en meetwaarden dicht tegen elkaar liggen. De afwijking tussen modelwaarden en meetwaarden voor een schaal van 1:8 is (vergelijkbaar met Grafiek 1) gemiddeld $0,048\text{m}^3$. Procentueel is dit een gemiddelde afwijking van 5,5% ten opzichte van de meetwaarden. Bovendien is er ook voor een schaal van 1:8 een sterke correlatie tussen de meetwaarden en modelwaarden van $R^2 = 0,989$.

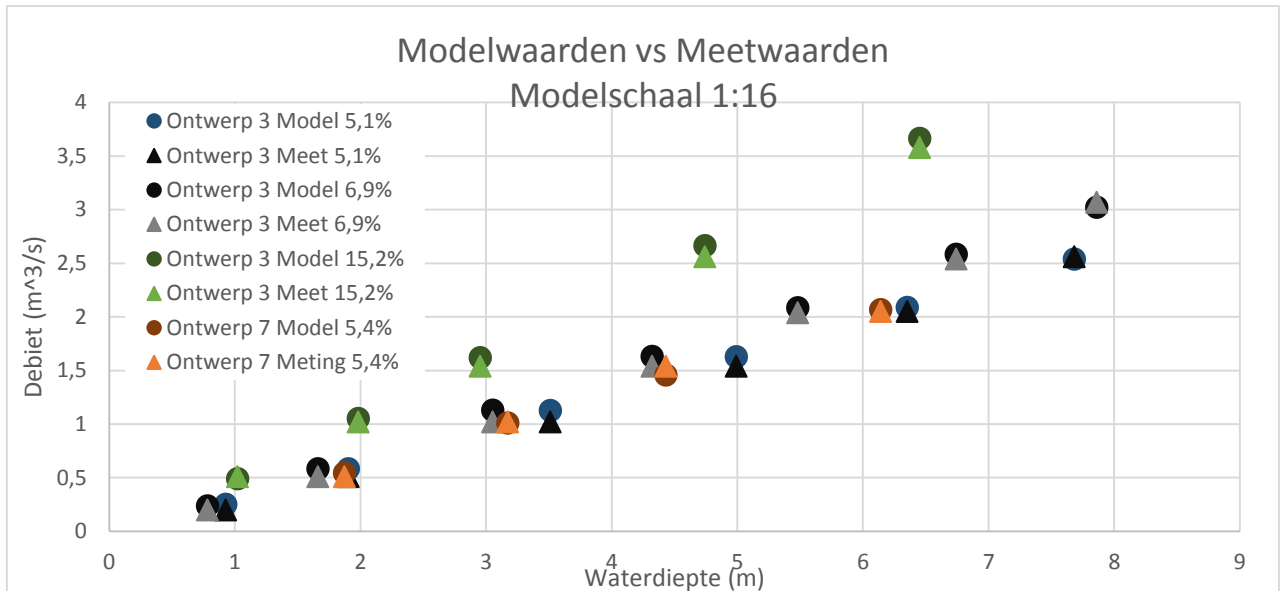


Grafiek 3 Modelschaal 1:8, vergelijking modelwaarden en meetwaarden voor varianten 3 & 4 (Verhang = 5,6%) en 5 & 6 (Verhang = 5,7%)

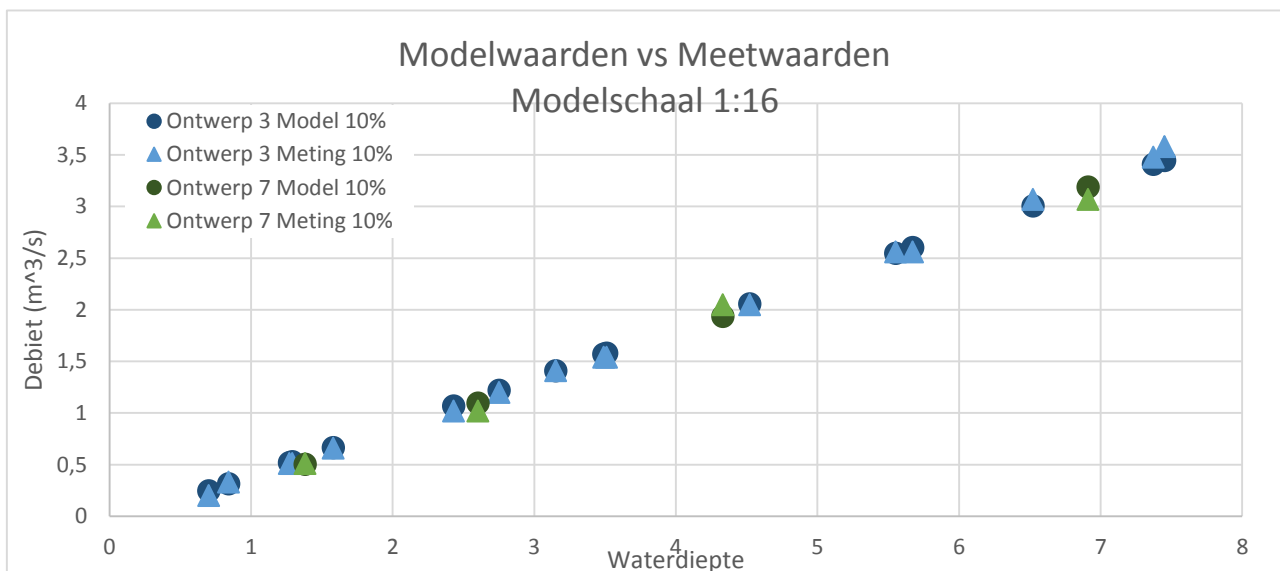


Grafiek 2 Modelschaal 1:8, vergelijking modelwaarden en meetwaarden voor varianten 4 t/m 6 (Verhang = 10%)

Tenslotte zijn ook de modelwaarden en meetwaarden vergeleken voor een modelschaal van 1:16 voor de ontwerpen 3 en 7. Hierin is onderscheid gemaakt tussen verschillende hellingen. In Grafiek 5 zijn voor ontwerp 3, hellingen van 5,1% ($\Delta h = 15,6\text{cm}$), 6,9% ($\Delta h = 21,1\text{cm}$) en 15,2% ($\Delta h = 46,4\text{cm}$) opgenomen en is voor ontwerp 7 een verhang van 5,4% ($\Delta h = 16,5\text{cm}$) aangehouden. In Grafiek 4 zijn voor ontwerp 3 en 7 een verhang van 10% ($\Delta h = 30,5\text{cm}$) aangehouden. De breedte van de slots is ingesteld op 0,305m. De bekkens zijn berekend volgens een vaste verhouding: Lengte bekkens = 10 * breedte slots en Breedte bekkens = 8 * breedte slots.



Grafiek 5 Modelschaal 1:16, vergelijking modelwaarden en meetwaarden voor variant 3 (Verhang = 5,1%, Verhang = 6,9% en Verhang = 15,2%), en variant 7 (Verhang = 5,4%)



Grafiek 4 Modelschaal 1:16, vergelijking modelwaarden en meetwaarden voor variant 3 en 7 met een verhang van 10%.

Ook uit zowel Grafiek 5 als Grafiek 4 blijkt dat de modelwaarden en meetwaarden dicht bij elkaar liggen. Dit wordt bevestigd door het feit dat de gemiddelde afwijking voor het debiet $0,054\text{m}^3/\text{s}$ is, wat gelijk staat aan een percentage van gemiddeld 5,4% ten opzichte van de meetwaarden van Rajaratman, Van der Vinne en Katopodis (1986). Tenslotte is er tussen deze waarden een correlatie van $R^2 = 0,997$

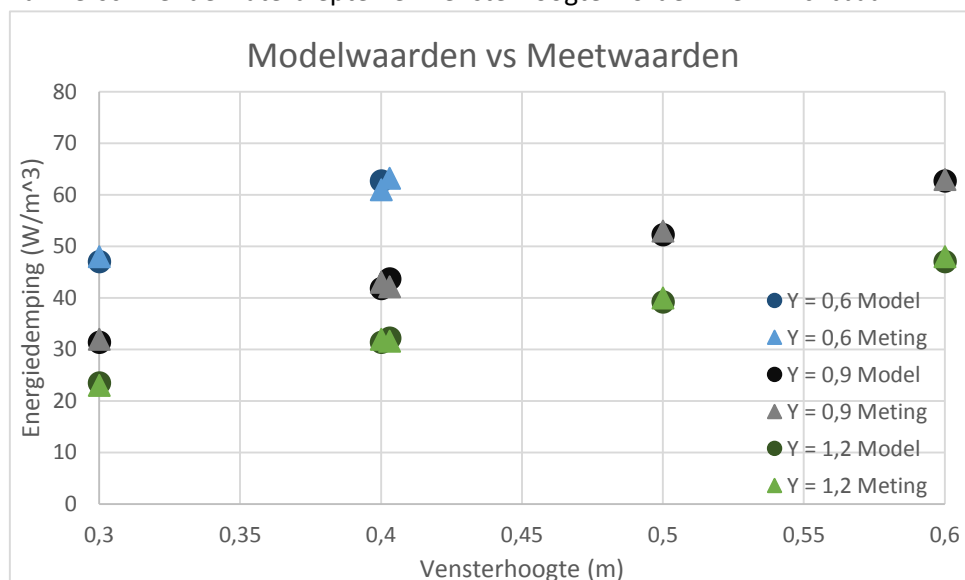
Al met al betekent dit voor alle modelwaarden uit het model en alle meetwaarden van Rajaratman, Van der Vinnen en Katopodis (1986) dat de gemiddelde afwijking gelijk is aan een debiet van $0,050\text{m}^3$. Dit is een procentuele afwijking ten opzichte van de meetwaarden van 5,6%, met een correlatie tussen meetwaarden en modelwaarden van 0,994. Het feit dat de Grafieken 1 t/m 5 laten zien dat dit percentage bij de verschillende schaalmodellen ook dicht bij een waarde van 5,6% ligt, geeft aan dat deze afwijking vrij constant is over alle waarden. Om die reden kan ook worden aangenomen dat de overige 11 varianten van Katopodis (1992) betrouwbaar zijn en gelijke verschillen opleveren tussen meetwaarden en modelwaarden.

Rekening moet worden gehouden met het feit dat vergelijkingen tussen de modelwaarden en meetwaarden zijn verricht voor meetwaarden in het interval $0,2\text{m}^3$ tot en met $3,58\text{m}^3$. Echter laten alle grafieken een grote mate van lineariteit zien. Ter illustratie, er is een groot verband tussen bijvoorbeeld de meetwaarden van ontwerp 3 in Grafiek 4, met $R^2 = 0,9989$. Om die reden kan worden aangenomen dat voor kleinere debieten sprake is van een dergelijk verband tussen meetwaarden en modelwaarden, waardoor de methode van Katopodis (1992) ook geschikt is voor kleinere of grotere parameters.

4.2 Validatie de Wit-vispassage

Voor de validatie van de Wit-vispassage zullen meetgegevens uit een modelonderzoek van Boiten en Dommerholt (2003) worden gebruikt. Boiten en Dommerholt (2003) hebben onderzoek gedaan naar de energiedemping binnen het standaardontwerp van een de Wit-vispassages, met de invloed hierop van de waterdiepte en de vensterhoogte. De meetgegevens van de Energiedemping zullen worden gebruikt ter vergelijking met de modelwaarden om te zien of de gehanteerde formules de juiste zijn.

Het standaardontwerp van een de Wit-vispassage levert de volgende parameters: Lengte bekken = 0,8m, Breedte bekken = 1,2m, Breedte venster = 0,2m en Verval = 0,05m. In Grafiek 6 zijn de modelwaarden tegenover de meetwaarden van Boiten en Dommerholt (2003) gegeven. De effecten van verschillende waterdiepten en vensterhoogte worden hierin zichtbaar.

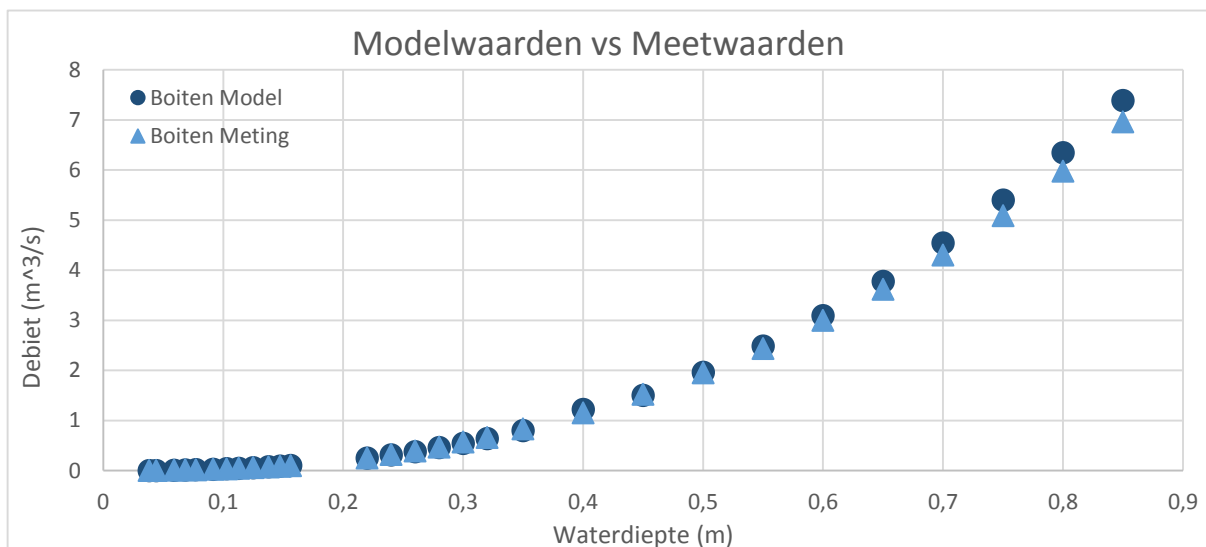


Grafiek 6 Modelwaarden vs. Meetwaarden voor standaardontwerp de Wit-vispassage.

Uit Grafiek 6 wordt duidelijk dat het de verschillen in energiedemping tussen de modelwaarden en meetwaarden klein is. De gemiddelde afwijking in energiedemping is $0,913\text{ W/m}^3$. Dit betekent een percentage ten opzichte van de meetwaarden van 2,1% met een correlatie van $R^2 = 0,995$. Daarmee is de Wit-vispassage vrij betrouwbaar met slechts een kleine afwijking.

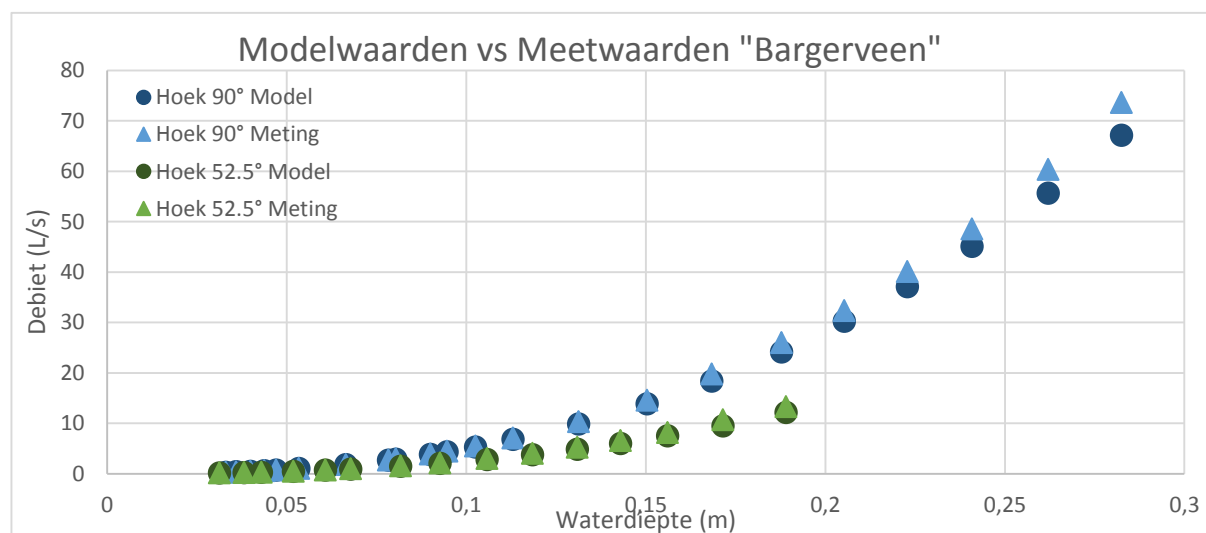
4.3 Validatie V-vormige overlaat

Voor de V-vormige overlaat zijn meetgegevens beschikbaar uit een modelonderzoek dat is uitgevoerd door Boiten (1990). Daarnaast zijn meetgegevens beschikbaar bij Vechtstromen van een overlaat in het Bargerveen (2003), waarbij de methode van Boiten (1990) is toegepast. In Grafiek 7 zijn de modelwaarden en meetgegevens van Boiten (1990) weergegeven, bij een hoek in de overlaat van 164° . In Grafiek 8 bij de overlaten in het Bargerveen zijn hoeken van 90° en 52.5° gebruikt.



Grafiek 7 Modelwaarden vs. Meetwaarden van V-vormige overlaat, met een hoek van 164° .

Uit Grafiek 7 wordt duidelijk dat de meetwaarden en modelwaarden bij de methode van Boiten (1990) ook bij de V-vormige overlaat dicht bij elkaar liggen. Tussen de meetwaarden en modelwaarden treedt een gemiddelde afwijking op van $0,065\text{m}^3$, wat gelijk staat aan een procentuele afwijking ten opzichte van de meetwaarden van 4,5% en een correlatie van $R^2 = 0,999$.



Grafiek 8 Modelwaarden vs. Meetwaarden van V-vormige overlaat bij Bargerveen, met hoeken van 52.5° en 90° .

Tussen de modelwaarden en meetwaarden van Grafiek 8 zit een gemiddelde afwijking van 0,80 liter, wat gelijk staat aan een procentuele afwijking ten opzichte van de meetwaarden van 4,5% met $R^2 = 0,998$.

De V-vormige overlaat heeft daarmee ongeveer eenzelfde betrouwbaarheid als zowel de Vertical-slot vispassage en de Wit-vispassage en is daarmee betrouwbaar genoeg voor het gebruik in de wiskundige tool.

5 Resultaten Gevoeligheidsanalyse

Om aanbevelingen te kunnen doen voor het ontwerp van een schaalmodel is het belangrijk om een inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de variabelen op de verschillende varianten. Om die reden is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd (Bijlage C) zodat duidelijk wordt voor welke parameters de verschillende typen vispassages het gevoeligst zijn en goed in een schaalmodel kunnen worden toegepast. In dit hoofdstuk zullen de resultaten worden besproken.

Voor de volgende variabelen is (afhankelijk per vispassage) een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd:

- Verval per bekken
- Waterdiepte in de bekkens
- Breedte van vensters/slots
- Hoogte van vensters
- Hoek/Breedte van overlaat
- Overstortende straal/Waterhoogte boven de kruin

5.1 Resultaten parameters Vertical-slot vispassage

In Grafiek 9 wordt duidelijk dat een toenemend verval resulteert in een groter debiet en energie per bekken. Dit is volgens verwachting, aangezien een toenemend verval resulteert in een hogere stroomsnelheid. De grootste uitschieter voor het debiet is variant 4 (zie bijlage A varianten), terwijl variant 10 het minst gevoelig is voor het verval. Dit heeft vermoedelijk te maken met het feit dat bij variant 4 de openingen in de schotten recht achter elkaar zijn geplaatst aan de zijkant van de bekkens, waardoor de weerstand op het water laag is. Echter, in variant 10, zijn de bekkens klein ontworpen wat leidt tot een hogere weerstand en daardoor resulteert in een lager debiet.

Voor de energiedemping per bekken laat Grafiek 9 een ander beeld zien. Overigens komt dit wel overeen met de verwachtingen. Uitschieters zijn varianten 9, 10 en 13 met een hoge energie per bekken, terwijl de overige varianten flink lager zitten (50-150W/m³ lager). Varianten 9, 10 en 13 zijn vermoedelijk uitschieters gezien het feit dat bij deze varianten de bekkens klein zijn ontworpen in tegenstelling tot de overige varianten welke een groot volume per bekken hebben, waardoor de energie in de bekkens wordt gedempt.

In Grafiek 10 wordt duidelijk dat ook een toenemende breedte van de slots resulteert in een groter debiet, terwijl bij de energiedemping sprake is van een afname. Een toenemende breedte van de slots heeft tot gevolg dat het doorstroomoppervlak in de slots wordt vergroot en leidt tot een groter debiet. Ook in dit geval is de grootste uitschieter variant 4, terwijl de overige varianten dicht bij elkaar liggen, waarbij variant 3, 7 en 10 uitschieters naar beneden zijn. Dit is mogelijk te verklaren gezien het feit dat variant 3 is ontworpen met 'verspringende' slots (Bijlage A), wat leidt tot een hoge weerstand, terwijl variant 7 een laag debiet ondervindt met slots die in het midden van de schotten zijn geplaatst. Bij variant 10 ondervindt het water mogelijk veel weerstand vanwege de kleine bekkens.

Voor de energiedemping per bekken wordt in Grafiek 10 duidelijk dat een vergroting van de breedte van de slots leidt tot een afname van de energiedemping in de bekkens. Dit is te verklaren gezien het feit dat bij de methode van Katopodis de afmetingen van de bekkens vastliggen, met verhoudingen tussen de breedte van de slots en de lengte en breedte van de bekkens. Dus bij een toenemende slotbreedte neemt het volume van de bekkens toe, wat zeer sterk resulteert in een afname van de energie per bekkens, desondanks de toename van het debiet. Uitschieters bij een kleine slotbreedte zijn, overeenkomstig met het verval, varianten 9, 10 en 13, mogelijk veroorzaakt door het kleine ontwerp van de bekkens.

Tenslotte treedt in Grafiek 11 een vergelijkbaar beeld op met het verval en de slotbreedte voor de waterdiepte in een Vertical-slot vispassage voor het debiet. Een toenemende waterdiepte resulteert in een toenemend doorstroomoppervlak in de slots, wat leidt tot een groter wordend debiet. De grootste uitschieter in bijlage C is in dit geval weer variant 4, terwijl variant 10 de kleinste waardes vertegenwoordigt.

Voor de energiedemping treedt in Grafiek 11 een ander beeld op. Weliswaar neemt het debiet toe bij een grotere waterdiepte, maar geldt dit ook voor het volume, waardoor de energiedemping niet gevoelig is voor de waterdiepte in de bekkens bij factoren tussen 0,5 en 2. Grootste uitschieters zijn varianten 9, 10 en 13.

5.2 Resultaten parameters de Wit-vispassage

Uit de gevoeligheidsanalyse van de Wit-vispassage is gebleken dat dit type vispassage voor het debiet het gevoeligst is voor de afmetingen van het doorzwemvenster. Grafiek 12 laat zien dat de breedte en hoogte van het venster in een zelfde verband het gevoeligst zijn voor het debiet door de Wit-vispassage. Immers, een toenemend doorstroomoppervlak resulteert in een toenemend debiet door de passage. Ook is de Wit-vispassage gevoelig voor het verval over de bekkens. Een toenemend verval resulteert in hogere stroomsnelheden door de vispassage. De resultaten in Grafiek 12 laten ook zien dat dit type vispassage ook sterk gevoelig is voor de waterdiepte in de bekkens. Echter, indien de waterdiepte gelijk of groter is aan de hoogte van het doorzwemvenster, heeft deze geen invloed meer op het debiet. De waterdiepte in de bekkens voor de Wit-vispassage is daarom beperkt gevoelig voor het debiet.

In tegenstelling tot het debiet, is de energiedemping in de bekkens sterk negatief gevoelig voor de waterdiepte in de bekkens. Grafiek 13 laat zien dat een toenemende waterdiepte (indien de waterdiepte groter is dan de vensterhoogte) resulteert in een afnemende energie per bekkens. Daarentegen is de energiedemping het sterkst gevoelig bij een stijgend verval. Dit resulteert in een sterk toenemende energie per bekken. De afmetingen van de vensters, de hoogte en breedte van de vensters, vertonen een zelfde verband, waarbij de energie toeneemt bij grotere afmetingen, ten gevolge van een toenemend debiet.

5.3 Resultaten parameters V-vormige overlaat

Uit bijlage C (Grafiek 14) blijkt tenslotte dat de V-vormige overlaat voor het debiet het gevoeligst is voor de overstorthoogte, of ook wel de waterhoogte boven de kruin van de overlaat genoemd. Deze gevoeligheid kan het beste worden beschreven met een kwadratisch verband. In Grafiek 14 wordt ook duidelijk dat dit type vispassage voor het debiet gevoelig is voor de breedte van de overlaat en de hoek van de overlaat. Hierbij is de overlaat gevoeliger voor de hoek van de overlaat, zo blijkt uit de grafiek, echter is de hoek van de overlaat beperkt aan de maximale breedte van de bekkens. Dit betekent dat bij een groter wordende hoek, de breedte van de overlaat groter wordt en deze breedte beperkt is aan de maximale breedte van de bekkens. Tenslotte wordt ook duidelijk dat met de gehanteerde methode van Boiten het debiet niet gevoelig is voor het verval, dit is te verklaren gezien het feit dat Boiten (1990) deze variabele niet opneemt in zijn formules.

Echter, Grafiek 15 laat zien dat het verval wel degelijk van invloed is op de Energiedemping in de bekkens volgens een lineair verband. Overigens zijn de overstorthoogte, de hoek en de breedte van de overlaat gevoeliger voor de energiedemping, met de overstorthoogte als grootste uitschieter, terwijl de hoek van de overlaat gevoeliger lijkt voor de energiedemping dan de breedte van de overlaat. Ook in dit geval blijkt uit Grafiek 15 dat de hoek van de overlaat is gebonden aan de maximale breedte van de bekkens.

6 Conclusie

De hoofdvraag van de bachelor eindopdracht luidde als volgt: Voor welke variabelen zijn de verschillende typen vispassages het gevoeligst?

Op basis van de resultaten van het wiskundige model kunnen vervolgens aanbevelingen worden gedaan voor het ontwerp van een schaalmodel, ter voltooiing van de doelstelling.

6.1 Conclusies ten aanzien van Vertical-slot vispassage

Uit de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 5) is gebleken dat de Vertical-slot vispassage voor het debiet het gevoeligst is voor de breedte van de slots en de waterdiepte in de bekkens. In mindere mate is er ook gevoeligheid voor het debiet voor het verval. Uit de grafieken in bijlage C is te concluderen dat een toename van deze variabelen een groter wordend debiet tot gevolg heeft. Voor dit type vispassage is de grootste uitschieter variant 4, die het gevoeligst is voor de variabelen voor het debiet. Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse is ook gebleken dat varianten 3, 7 en 10 de grootste tegenhangers zijn van variant 4, met uitschieters naar beneden.

Ten aanzien van de energiedemping in de bekkens is het verval over de bekkens het gevoeligst, terwijl de Vertical-slots in mindere mate ook negatief gevoelig zijn voor de breedte van de slots. Daarentegen is dit type niet gevoelig voor de waterdiepte in de bekkens, zo is gebleken in hoofdstuk 5. De grootste uitschieter voor de energiedemping in de bekkens is variant 10, met ook varianten 9 en 13. De overige varianten zijn in veel mindere mate gevoelig voor de genoemde variabelen.

6.2 Conclusies ten aanzien van de Wit-vispassage

Uit de gevoeligheidsanalyse van de Wit-vispassage in hoofdstuk 5 en bijlage C is gebleken dat dit type het sterkst gevoelig is voor de afmetingen van het doorzwemvenster in de tussenschotten. De breedte en hoogte van het venster hebben, zo is gebleken, eenzelfde lineair verband. In mindere mate is er ook gevoeligheid voor een toenemend verval en waterdiepte in de bekkens voor het debiet. Echter is de waterdiepte daarbij gebonden aan de hoogte van de vensters.

Voor de energiedemping is de Wit-vispassage het gevoeligst voor het verval over de bekkens. In mindere mate is er gevoeligheid voor de afmetingen van de bekkens, terwijl voor een toenemende waterdiepte dit type negatief gevoelig is voor de energiedemping.

6.3 Conclusies ten aanzien van V-vormige overlaat

Tenslotte kan worden geconcludeerd dat de V-vormige overlaat voor het debiet het gevoeligst is voor de waterhoogte boven de kruin (overstorthoogte). In mindere mate is er ook een gevoeligheid voor de breedte en hoek van de overlaat, waarbij deze variabelen zijn gebonden aan de maximale breedte van de bekkens. Uit de gevoeligheidsanalyse is tevens ook gebleken dat de V-vormige overlaat voor het debiet niet gevoelig is voor het verval over de bekkens.

De energiedemping is het sterkst gevoelig voor de waterhoogte boven de kruin. Echter doen de breedte en hoek van de overlaat qua gevoeligheid hier niet veel voor onder. In tegenstelling tot voor het debiet, is de energiedemping wel gevoelig voor het verval over de bekkens bij de V-vormige overlaat.

7 Discussie

In dit hoofdstuk zullen de resultaten en de uitgangspunten van dit rapport met een kritische blik worden bediscussieerd. Hierbij worden eventueel verbeterpunten en/of aanbevelingen gedaan voor een eventueel vervolgonderzoek.

Methodes Katopodis vs. Kroes en Monden

In hoofdstuk 3 zijn uitgangspunten gepresenteerd voor de bouw van de wiskundige ontwerptool/model. Hierbij is een afweging gemaakt tussen de methode van Katopodis (1992) en Kroes en Monden (2005). Katopodis heeft voor de Vertical-slot vispassage verschillende varianten ontworpen, met vaste verhoudingen voor de slotbreedte, breedte- en lengte van de bekkens. Het nadeel van deze vaste verhoudingen is dat er weinig variatie mogelijk is met betrekking tot de afmetingen van de bekkens, los van de verschillende ontwerpen. Daardoor is het voor de ontwerper niet mogelijk om afmetingen aan te passen om bijvoorbeeld kosten of ruimte te besparen. Dit is een nadeel ten opzichte van de methode van Kroes en Monden (2005) waar deze afmetingen zonder beperking kunnen worden gekozen. Het voordeel van de methode van Katopodis is het feit dat deze relaties heeft beschreven voor de afvoercoëfficiënt (Q^*). Hierdoor kan, zoals de validatie (Hoofdstuk 4.1) heeft uitgewezen, zeer nauwkeurig het debiet in de Vertical-slot vispassage worden berekend.

Berekening breedte van de slots bij Vertical-slot vispassage

In aansluiting op de methode van Katopodis (1992), was het in het wiskundige model/ontwerptool berekening technisch niet mogelijk om een berekening te maken voor de breedte van de slots bij een opgegeven ontwerpdebiet. Door de vaste verhoudingen en enkele extra vaste componenten in de berekening van de afvoercoëfficiënt (Q^*) voor varianten 1t/m5 en 7. Dit is geprobeerd om op te lossen via de 'target finder' in Excel, maar het is niet gelukt om deze functie te implementeren in Excel VBA, waar het script van het model is uitgewerkt.

Verdronken overlaten en verval V-vormige overlaat

Een opvallend feit aan de methodes voor de berekening van het debiet over een V-vormige overlaat is dat in de literatuur geen rekening lijkt te worden gehouden met een verdronken situatie. Echter verschillen hierover de meningen van verschillende experts binnen en buiten het waterschap. Een dergelijke verdronken overlaat is essentieel voor de passage van vissen (50% verdrinkingsgraad volgens Kroes en Monden (2005)). Echter wordt in de literatuur wel gesproken over een dergelijke situatie, maar worden geen bijbehorende afvoerrelaties beschreven. Dit geldt niet alleen voor V-vormige overlaten, maar bijvoorbeeld ook voor rechte overlaten of andere typen. Dit is opvallend en leidt bijvoorbeeld tot het feit dat volgens de methode van Boiten en Chanson en Wang het verval niet van invloed is op het debiet. Dit is terug te zien in de resultaten van de gevoeligheidsanalyse (Grafiek 14), waar het debiet geen gevoeligheid toont voor het verval. Bovendien beschrijft Boiten (1990) schematische weergaven van een overlaat met een kelderende afvoer. Aangezien de stroomsnelheid echter wel wordt bepaald door het verval, zou dit bij gelijke afmetingen en overstorthoogte bij de V-vormige overlaat wel moeten leiden tot een verhoogd debiet bij een toenemend verval, volgens de relatie: debiet = stroomsnelheid * doorstroomoppervlak.

Meetonzekerheden

Bij het uitvoeren van de validatie is in dit rapport geen rekening gehouden met meetonzekerheden in de meetresultaten van verschillende modelonderzoeken uit de literatuur. Dit betekent dat indien er bijvoorbeeld meetfouten zijn ontstaan in de resultaten uit de gehanteerde literatuur, met deze meetfouten is doorgerekend in de validatie in dit rapport. Dit houdt in dat voor bijvoorbeeld de validatie van de Wit-vispassage geen rekening is gehouden met eventuele afrondingsfouten uit de meetwaarden van Boiten (2003).

8 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk zullen aanbevelingen worden gepresenteerd ten aanzien van een eventueel vervolgonderzoek en het ontwerp van een schaalmodel voor vispassages.

8.1 Aanbevelingen ten aanzien van een vervolgonderzoek

Koppeling tussen methoden Katopodis en Kroes en Monden

Een eerste aanbeveling voor een eventueel vervolgonderzoek is om de afvoercoëfficiënt (C_D) van Kroes en Monden te bepalen voor de varianten van Katopodis. Dit is wellicht mogelijk door per variant het debiet voor de methode van Katopodis te berekenen, om vervolgens met de methode van Kroes en Monden terug te rekenen naar een afvoercoëfficiënt (C_D) voor de betreffende variant. Op die manier kunnen mogelijk relaties worden beschreven voor de methode van Kroes en Monden voor varianten met een verschillend ontwerp van de positionering en afmetingen van de slots. Gezien het feit dat er de afgelopen jaren veel vispassages zijn aangelegd in Nederland, is er mogelijk behoefte naar een dergelijk onderzoek, eventueel in samenwerking tussen meerdere instanties, wat de ontwerpmogelijkheden voor ontwerpers verder vergroot.

Uitbreiding berekeningen wiskundige model

Voor de compleetheit van het wiskundige model is het aan te raden om voor de Vertical-slot een oplossing te vinden voor de berekening van de breedte van de slots. Zoals reeds besproken in de conclusie is geprobeerd met behulp van de tool 'target finder' in VBA dit probleem op te lossen. Echter is het rapport hier op vastgelopen. Ter compleetheit en voor later gebruik is het aan te bevelen het model met deze optie uit te breiden.

Uitbreiding kruintypes V-vormige overlaat

In hoofdstuk 3 is naast een afweging voor de methode voor de Vertical-slot ook een afweging gemaakt voor de V-vormige overlaat. Hier is gekozen voor de methode van Boiten (1990), omdat deze in de literatuur het meest wordt vermeld en er tevens ook verschillende varianten voor de kruin mogelijk zijn. In dit rapport is uitgegaan van een afgeschuinde kruin, waarvoor onder andere ook meetgegevens beschikbaar waren voor een validatie. Voor een vervolgonderzoek is het aan te raden om de verschillende mogelijkheden voor wat betreft andere kruintypes nader te onderzoeken. Deze verschillende kruintypes hebben effect op de stroomsituatie over de kruin en bepalen daarmee de afvoer. Tevens is het aan te raden om uit te zoeken wat het effect op het debiet is als de V-vormige overlaten verspringend van elkaar worden geplaatst, zoals bij de Vertical-slot bijvoorbeeld vaak het geval is. Deze ingreep zal namelijk resulteren in een correctie van de afvoercoëfficiënt voor de V-vormige overlaat die nu alleen wordt bepaald door het kruintype.

Effect verdrongen overlaten op afvoer

In de discussie is ook gebleken dat er bij de berekening van een overlaat doorgaans geen rekening wordt gehouden met een verdrongen situatie. Ook was er tussen verschillende specialisten discussie over de te hanteren formules. Bovendien lijkt Boiten (1990) hier in zijn literatuur geen rekening mee te houden, wat resulteert in het feit dat het verval niet van invloed is op het debiet volgens de gehanteerde methode (Grafiek 14). Het is daarom aan te bevelen om het effect van een verdrongen overlaat nader te onderzoeken en te bepalen welke methode uiteindelijk geschikt is. Ook hier is wellicht een samenwerking tussen verschillende instanties van belang in verband met het feit dat de V-vormige overlaat in combinatie met een bekkenpassage nog veelvuldig is toegepast in Nederland.

Uitbreiding model met natuurlijkere varianten van vispassages

Tenslotte is het aan te bevelen om in een vervolgonderzoek het model ook uit te breiden naar natuurlijkere varianten in plaats van alleen technische vispassages. Een voorbeeld uit hoofdstuk 2 is bijvoorbeeld de traploze nevengeul, die voor verschillende doorstroomoppervlakken kan worden geschematiseerd. Bovendien zouden varianten kunnen worden opgesteld met obstakels zoals grote stenen of boomstammen. Voor deze verschillende 'weerstand' zouden coëfficiënten kunnen worden opgesteld om het debiet door de nevengeul te kunnen bepalen, bijvoorbeeld met de methode van Chézy en Manning.

Bovendien is aangedragen dat te grote vispassages te veel ruimte in beslag kunnen nemen of te duur zijn vanuit kosten oogpunt. Echter zou een nevengeul goed passen in het plaatje van maatregelen tegen hoogwater. Op die manier kunnen in de toekomst dergelijke oplossingen wellicht gemakkelijk worden gecombineerd.

8.2 Aanbevelingen ten aanzien van het ontwerp van een schaalmodel

Variëren in type vispassage

Op de eerste plaats is het voor het schaalmodel aan te bevelen deze zo flexibel mogelijk te maken, waardoor gevarieerd kan worden tussen de Vertical-slot, de Wit en V-vormige overlaat. Dit betekent dat het aan te raden is te werken met een stroomgoot, waarin verschillende schotten kunnen worden geplaatst om zo de verschillen tussen de vispassages duidelijk te maken voor de gebruiker.

Verval, waterdiepte en afmetingen/vormgeving schotten

De literatuur en de gevoeligheidsanalyse hebben uitgewezen dat de belangrijkste variabelen het verval, de waterdiepte in de bekkens en de afmeting/vormgeving van de schotten zijn. Het is daarom aan te bevelen om te kunnen variëren in deze variabelen. Door te variëren in deze variabelen zal het effect zichtbaar worden op de randvoorwaarden. Zo heeft de gevoeligheidsanalyse bijvoorbeeld al laten zien dat een toenemend verval doorgaans resulteert in een toenemend debiet. Voor de V-vormige overlaat en de Wit-vispassage is het bovendien aan te raden schotten te ontwerpen met verschillende afmetingen. Zo kan voor de V-vorm worden gekozen voor verschillende kruinhoogtes van de overlaat maar ook voor een andere hoek/breedte van de V-vorm. Voor de Wit-vispassage is het aan te raden om schotten met verschillende hoogte en breedtes te ontwerpen.

Varianten Vertical-slot vispassage

De gevoeligheidsanalyse voor de Vertical-slot vispassage heeft uitgewezen dat om het effect op het debiet inzichtelijk te maken voor de gebruiker het beste varianten 3, 4 en 7 kunnen worden toegepast. Variant 4 (slots achter elkaar geplaatst) heeft laten zien dat, door de lage weerstand, het debiet in de vispassage hoger is dan bij varianten 3 (slots verspringend) en 7 (slots achter elkaar in het midden geplaatst). Dit zal in een schaalmodel daardoor resulteren in hogere waterdieptes in de vispassage bij een gelijk debiet en breedte van de slots.

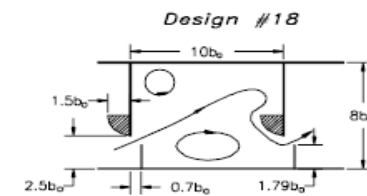
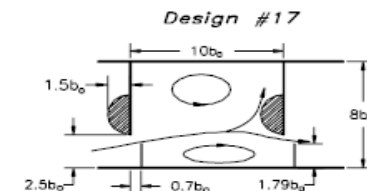
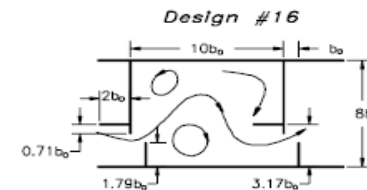
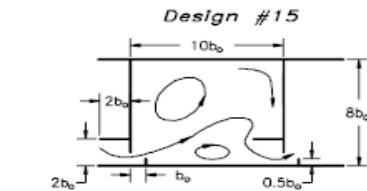
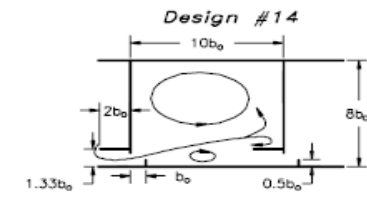
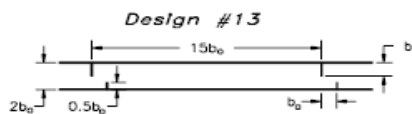
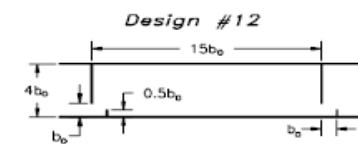
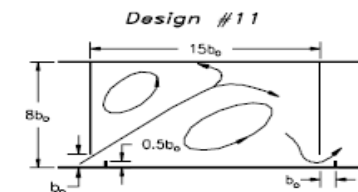
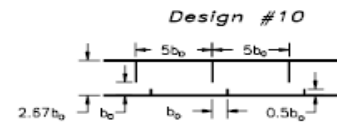
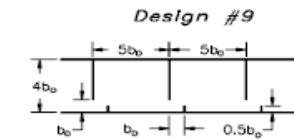
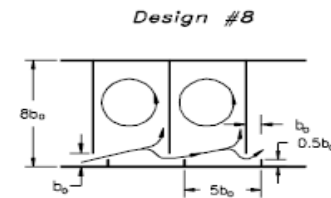
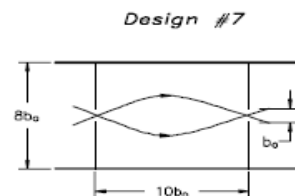
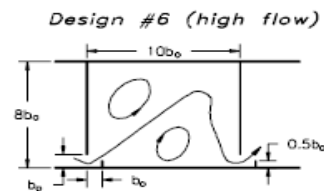
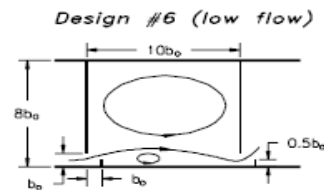
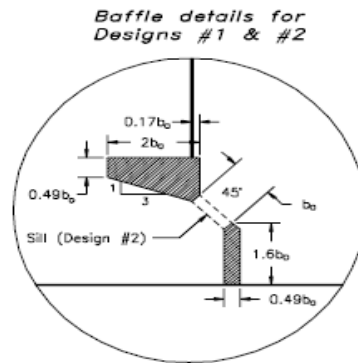
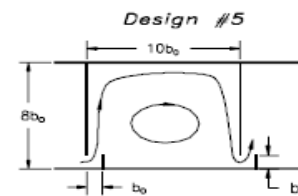
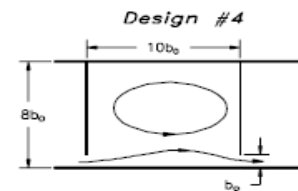
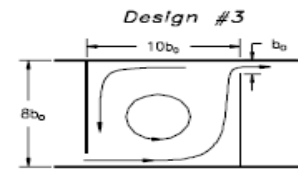
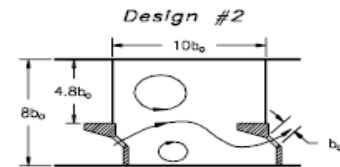
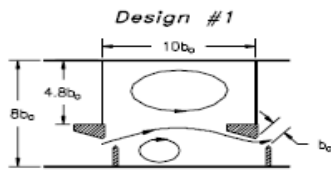
Voor de energiedemping is het aan te bevelen om variant 10 (kleine bekkens) toe te passen samen met variant 6 (grote bekkens). Door de verschillende afmetingen van de bekkens wordt het effect op de energiedemping inzichtelijk. Zo is de energie per bekken in variant 6 gemiddeld 77% kleiner dan in variant 10, bij eenzelfde debiet, zo is gebleken in de gevoeligheidsanalyse.

9 Referenties

- Armstrong, G., Aprahamian, M., Fewings, G., Gough, P., Reader, N., & Varallo, P. (2010). *Environment Agency Fish Pass*. Environment Agency.
- Aydin, I., Altan-Sakarya, A., & Sisman, C. (2011). Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*(22), 144-151.
- Boiten, W. (1990). *Afvoerrelatie V-vormige vistrap*. Wageningen.
- Boiten, W., & Dommerholt, A. (2003). *Uniform ontwerp van de aangepaste De Wit vispassage*. Wageningen.
- Boiten, W., & Dommerholt, A. (2006). Standard design of the Dutch pool and orifice fishway,. *International Journal of River Basin Management*, 4(3), 219-227.
doi:10.1080/15715124.2006.9635291
- Chanson, H., & Wang, H. (2013). Unsteady discharge calibration of a large V-notch weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013(29), 19-24.
- Coenen, J., Antheunisse, M., Beekman, J., & Beers, M. (2013). *Handreiking Vispassages in Noord-Brabant*. Waterschap De Dommel, waterschap Aa en Maas & waterschap Brabantse Delta.
- De Doorbraak. (2015). *Onderzoek: zwemt vis door Regge-onderleider?* Opgehaald van Website van De Doorbraak: <http://www.dedoorbraak.info/vaste-onderdelen/zoeken/@33836/onderzoek-zwemt-vis/>
- Dienst Landinrichting en Beheer Landbouwgronden. (1996). *Handleiding voor het gebruik van programmapakket DIWA*. Utrecht.
- Güven, A., Hassan, M., & Sabir, S. (2013). Experimental investigation on discharge coefficient for a combined broad crested weir-box culvert structure. *Journal of Hydrology*(500), 97-103.
- Haghiabi, A. (2012). Hydraulic characteristics of circular crested weir based on Dressler theory. *Biosystems Engineering*(112), 328-334.
- Kamula, R. (2001). *Flow over weirs with application to fish passage facilities*. University of Oulu, Department of Process and Environmental Engineering , Oulu.
- Katopodis, C. (1992). *Introduction to fishway design*. Department of Fisheries and Oceans, Winnipeg.
- Kroes, M., & Caldenhoven, R. (2008). *Beoordeling functionaliteit 7 vispassages en een onderleider waterschap Regge en Dinkel*. VisAdvies, Utrecht.
- Kroes, M., & Monden, S. (2005). *Vismigratie, een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland*. Nieuwegein/Brussel: Organisatie ter verbetering van de Binnenvisserij en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, AMINAL.
- Larinier, M. (2002). Pool Fishways, Pre-Barrages and Natural Bypass Channels. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*(364), 54-82.
- Liu, M., Rajaratman, N., & Zhu, D. Z. (2006). Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*(132), 765-777.
- Parílková, J., Riha, J., & Zachoval, Z. (2012). The influence of roughness on the discharge coefficient of a broad-crested weir. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*(60), 101-114.

- Rajaratman, N., Van der Vinne, G., & Katopodis, C. (1986). Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*(112).
- Sargent, R. (2011). Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, (pp. 183-198).
- Vechtpark Hardenberg. (2015). *Ruimte voor water in gebied rond monding Molengoot*. Opgehaald van Website van Vechtpark Hardenberg: <http://www.vechtparkhardenberg.nl/deelprojecten/ruimte-water-gebied/>
- Waterschap Vechtstromen. (2015). *Eerste vissluis in Twente draait op zonne-energie*. Opgehaald van Website van Waterschap Vechtstromen: <http://www.vechtstromen.nl/projecten/projecten/natuurlijk-water/bornsebeek/eerste-vissluis/>
- Waterschap Vechtstromen. (2015). *Kengetallen Waterschap Vechtstromen*. Opgehaald van Website van Waterschap Vechtstromen: <http://www.vechtstromen.nl/organisatie/>
- Waterschap Vechtstromen. (2015). *Kunstwerken bij Waterschap Vechtstromen*. Opgehaald van Website van Waterschap Vechtstromen: <http://www.vechtstromen.nl/water-beleven/kunstwerken/>
- Waterschap Vechtstromen. (2015). *Organisatie en Kerntaken Waterschap Vechtstromen*. Opgehaald van Website van Waterschap Vechtstromen: <http://www.vechtstromen.nl/organisatie/onze-taken/>

A. Bijlage Varianten Vertical-slot methode Katopodis (1992)



B. Bijlage Formules bekkervispassages

Uitleg van symbolen

In deze bijlage worden de formules voor het debiet, stroomsnelheden en energiedemping gepresenteerd. In onderstaand overzicht wordt de bijbehorende symbolenlijst gepresenteerd met de verschillende variabelen.

Symbol	Variabele	Eenheden
Q	Debiet	m ³ /s
Q*	Dimensie loze afvoercoëfficiënt (Katopodis, 1992)	-
C_D	Afvoercoëfficiënt (Kroes en Monden, 2005)	-
g	Valversnelling / Zwaartekrachtversnelling (= 9,81m/s ²)	m/s ²
ρ	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	kg/m ³
b	Breedte van slots/doorzwemvenster	m
y₀	Waterdiepte	m
Δh	Verval per bekken	m
S₀	Verhang (Verval per meter)	-
h_v	Hoogte doorstroomvenster	m
h_s	Overstortende straal/Doorzwemhoogte boven de kruin van overlaat/Waterhoogte boven kruin	M
α	Hoek van de V-vormige overlaat	°
V_{max}	Maximale stroomsnelheid	m/s
V_{gem}	Gemiddelde stroomsnelheid	m/s
ε	Energiedemping per bekken	W/m ³
L	Lengte van bekkens	m
B	Breedte van bekkens	m

Debietformules

In onderstaand overzicht zijn de formules voor het debiet van de verschillende bekkervispassages weergegeven die worden gehanteerd in het wiskundige model.

Vertical-slot vispassage

Voor de vertical-slot vispassage zijn er twee methoden om het debiet te bepalen; namelijk de methode van Katopodis (1992) en die van Kroes en Monden (2005). In Vergelijking 1 is de methode van Katopodis opgenomen. In Vergelijking 2 die van Kroes en Monden.

$$Q = Q_* * \sqrt{g * S_0 * b^5}$$

Vergelijking 1 Berekening van Debiet in Vertical-slot vispassage (Katopodis, 1992)

$$Q = C_D * b * y_0 * \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Vergelijking 2 Berekening van debiet in Vertical-slot vispassage (Kroes & Monden, 2005)

De Wit-vispassage

De formule van de Wit-vispassage lijkt op die van de Vertical-slot vispassage volgens de methode van Kroes en Monden (2005). In dit geval wordt het maximale debiet niet bepaald door de waterdiepte, maar door de hoogte van de doorzwemvensters (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013).

$$Q = C_D * b * h_v * \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Vergelijking 3 Berekening van debiet in De Wit-vispassage (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013)

V-vormige overlaat

In Nederland wordt de V-vormige overlaat doorgaans vaker toegepast dan een rechte overlaat vanwege de betere aanstroomsituatie van het water. Er zijn twee methoden om het debiet te bepalen. Volgens de methode van Boiten (1990) en die van Chanson en Wang (2013), die zijn weergegeven in Vergelijking 4 en respectievelijk Vergelijking 5.

$$Q = C_D * \left(\frac{4}{5}\right)^{2,5} * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \sqrt{\frac{g}{2} * h_s^5}$$

Vergelijking 4 Berekening van debiet voor V-vormige overlaat door Boiten (1990).

$$Q = C_D * \left(\frac{8}{15}\right) * \tan(\alpha) * \sqrt{2 * g * h_s^5}$$

Vergelijking 5 Berekening van debiet voor V-vormige overlaat door Chanson en Wang (2013)

Hierin is de hoek (met tangens) de hoek van de V-vorm, zoals weergegeven in Figuur 7.

Formules Stroomsnelheid

Voor de berekening van de stroomsnelheid zijn twee methoden mogelijk om te berekenen. Die van de maximale stroomsnelheid, door Katopodis (1992) en die van de gemiddelde stroomsnelheid van Kroes en Monden (2005). Deze formules zijn weergegeven in Vergelijking 6 en Vergelijking 7

$$V_{max} = \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Vergelijking 6 Maximale stroomsnelheid (Katopodis, 1992)

$$V_{gem} = C_D * \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Vergelijking 7 Gemiddelde stroomsnelheid (Kroes & Monden, 2005)

Formule Energiedemping

Voor de berekening van de Energiedemping wordt een methode van Larinier gebruikt die wordt beschreven door Coenen, Antheunisse, Beekman en Beers (2013). De formule hiervan is weergegeven in Vergelijking 8

$$\varepsilon = \frac{P}{V} = \frac{\rho * g * Q * \Delta h}{L * B * y_0}$$

Vergelijking 8 Berekening van de energiedemping volgens Larinier (Coenen, Antheunisse, Beekman, & Beers, 2013).

C. Bijlage Gevoeligheidsanalyse

Sargent (2011) beschrijft de gevoeligheidsanalyse als een test waarbij de variabelen/parameters van een model worden verandert om te bepalen hoe het model reageert. De reactie van het model moet daarbij overeenkomen met de reactie in een werkelijke situatie. Om die reden zullen per parameter 20 tests worden uitgevoerd door deze variabele te vermenigvuldigen met factoren variërend van 0,1 tot 2,0 in stappen van 0,1. Op die manier wordt de reactie van het model zichtbaar bij kleiner en groter wordende variabelen en wordt zo duidelijk welke parameter het gevoeligst is.

De gevoeligheidsanalyse zal worden uitgevoerd op zowel de vertical-slot vispassage, de Wit-vispassage en de V-vormige overlaat. Per vispassage krijgen de overige parameters vaste waarden toegekend om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de verscheidene variabelen.

Gevoeligheid Vertical slot vispassage

Voor de vertical slot vispassage zullen alle varianten worden getest voor het verval, de breedte van de slots en de waterdiepte, met als resultaat het debiet en de energie per bekken.

De standaardafmetingen zijn als volgt:

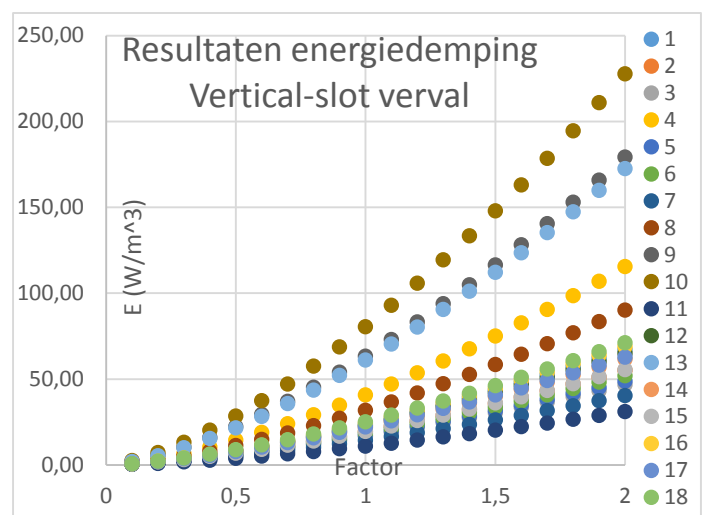
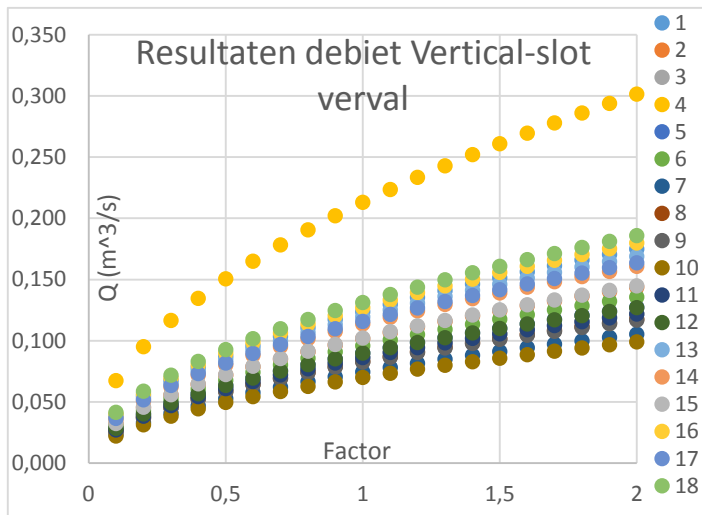
- $\Delta h = 0,05\text{m}$
- $y_0 = 0,8\text{m}$
- $b = 0,2\text{m}$

De verwachting voor de parameters verval, waterdiepte en breedte slots is dat het debiet toeneemt bij een grotere factor, terwijl het effect voor de energiedemping niet duidelijk is, doordat er vaste verhoudingen zitten aan de afmetingen met het volume in de bekkens als resultaten.

Gevoeligheid voor verval in vertical slot vispassage

In Grafiek 9 is te zien dat een stijgende factor voor het verval bij alle varianten leidt tot een toenemend debiet. Hierbij gedragen de varianten zich als een wortelfunctie, met als grote uitschieter variant 4 met een debiet van ongeveer $0,3\text{m}^3/\text{s}$ bij een factor 2 voor het verval. De overige varianten eindigen dicht bij elkaar binnen een range van $0,1\text{m}^3/\text{s}$, met ontwerp 10 als minimum en ontwerp 18 als maximum. Al met al is het verval dus het gevoeligst voor het debiet bij ontwerp 4.

Voor de energiedemping ontstaat in Grafiek 9 een vergelijkbaar beeld met een stijgende energie per bekken bij een toenemende factor voor het verval. De varianten nemen hierbij een exponentiële/kwadratische vorm aan. In tegenstelling tot bij het debiet, worden de uitschieters hier veroorzaakt door de ontwerpen 9, 10 en 13. De overige ontwerpen liggen dicht bij elkaar binnen een range van 100 W/m^3 . De uitschieters voor de ontwerpen 9, 10 en 13 worden waarschijnlijk veroorzaakt door de geringe afmetingen in het ontwerp van deze varianten, waardoor bij een toenemend verval, een toenemend debiet ontstaat, maar de demping achterwege blijft door een laag volume.

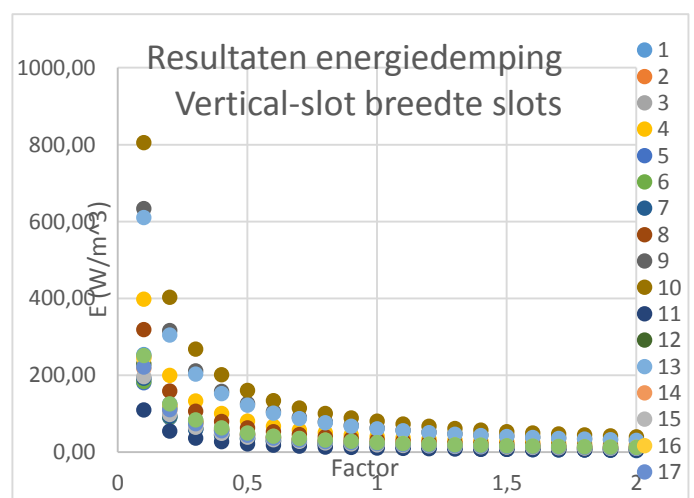
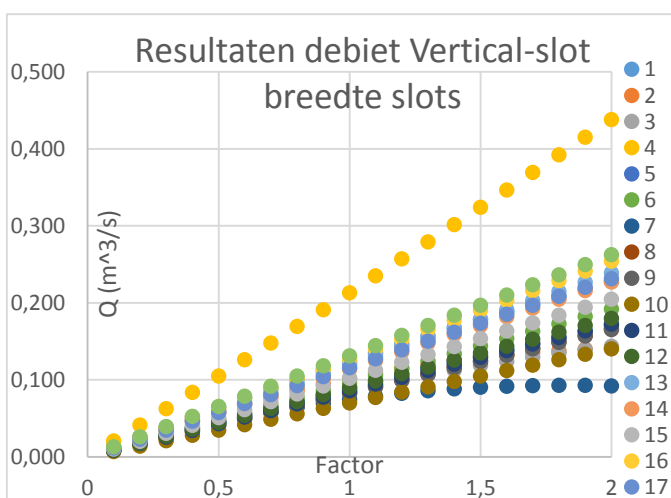


Grafiek 9 Resultaten gevoeligheid van verval voor debiet en energiedemping Vertical-slot

Gevoeligheid voor breedte slots in vertical slot vispassage

Overeenkomstig met het verval in Grafiek 9, treedt bij de breedte van de slots eenzelfde beeld op in Grafiek 10 voor het debiet. Bij een toenemende factor voor de breedte van de slots ontstaat een toenemend debiet. De varianten nemen hierbij veelal een lineaire vorm aan. De grootste uitschieter is hier eveneens ontwerp 4 voor het debiet, met een waarde van ongeveer $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een factor 2. De overige ontwerpen liggen binnen de range van $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $0,275 \text{ m}^3/\text{s}$. Daaruit volgt dat het model voor de vertical-slot vispassage en het debiet gevoeliger is voor de breedte van de slots dan voor het verval.

Voor de energiedemping treedt een ander beeld op in Grafiek 10 in vergelijking met Grafiek 9. Eveneens is hier sprake van een exponentiële/kwadratische functie, echter wel negatief. Bij een groter wordende factor voor de breedte van de slots, neemt de energie per bekken af. Bij lage factoren zijn de varianten zeer verspreid en lijkt de breedte van de slots hier het gevoeligst bij ontwerp 10. De afname van de energie per bekken bij hoge factoren heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat bij de methode van Katopodis (1992) de afmetingen in de bekkens zijn gebonden aan de verhouding met de breedte van de slots. Dit betekent dat indien de breedte van de slots groter wordt (hogere factor), de bekkens groter worden en dus een groter volume ontstaat, wat resulteert in een daling van de energie per bekken.

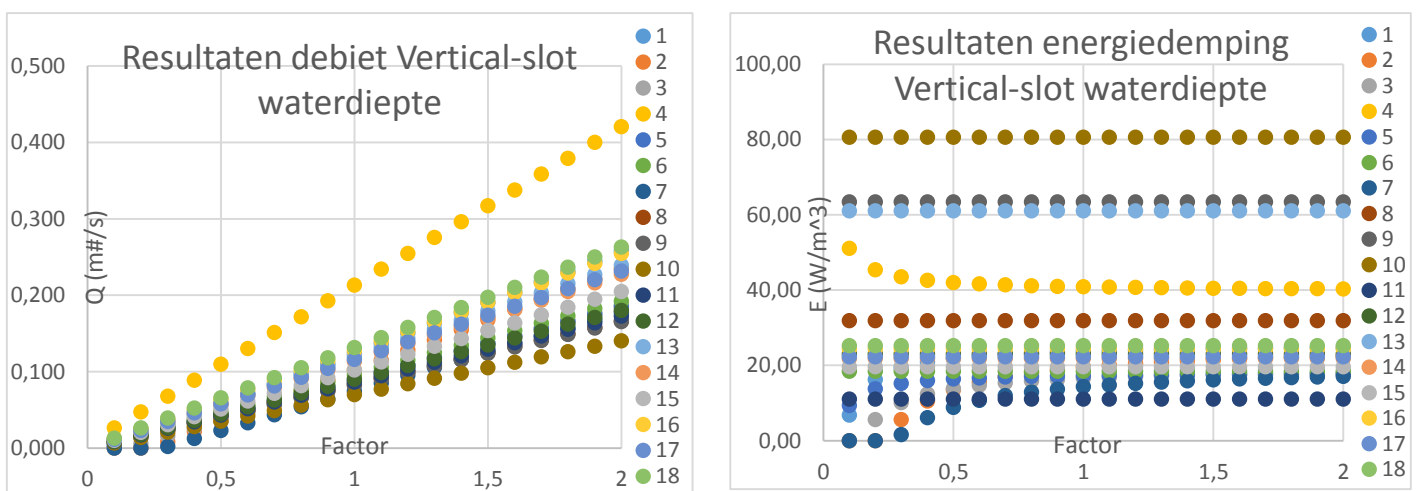


Grafiek 10 Resultaten gevoeligheid van breedte slots voor debiet en energiedemping Vertical-slot

Gevoeligheid voor waterdiepte bekken in vertical slot vispassage

Ook in Grafiek 11 treedt een overeenkomstig beeld op voor de waterdiepte in vergelijking met het verval en de breedte van de slots. Vergelijkbaar met Grafiek 10, laten de verschillende varianten een lineair beeld zien bij een toenemende factor voor de waterdiepte, met ontwerp 4 als grote uitschieter met ongeveer $0,425\text{m}^3/\text{s}$. De overige ontwerpen liggen binnen een range van ongeveer $100\text{m}^3/\text{s}$. De waterdiepte is daarmee voor wat betreft de gevoeligheid voor het debiet vergelijkbaar met de breedte van de slots.

Voor de energie per bekken laat Grafiek 11 een lineair beeld zien voor alle ontwerpen vanaf een factor van ongeveer 0,5. Dit houdt in dat de energiedemping in feite niet gevoelig is voor verandering van de waterdiepte bij de gegeven parameters. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat bij een toenemende waterdiepte (grotere factor) het debiet toeneemt, zoals te zien in Grafiek 11, maar ook het volume in de bekken toeneemt, waardoor de energie in de bekken gelijk blijft.



Grafiek 11 Resultaten gevoeligheid van waterdiepte bekken voor debiet en energiedemping Vertical-slot

De Wit-vispassage

Vier parameters zullen worden getest op de Wit-vispassage, namelijk het verval, de waterdiepte in de bekken en de breedte en hoogte van de doorzwemvensters, met als resultaat het debiet en de energie per bekken.

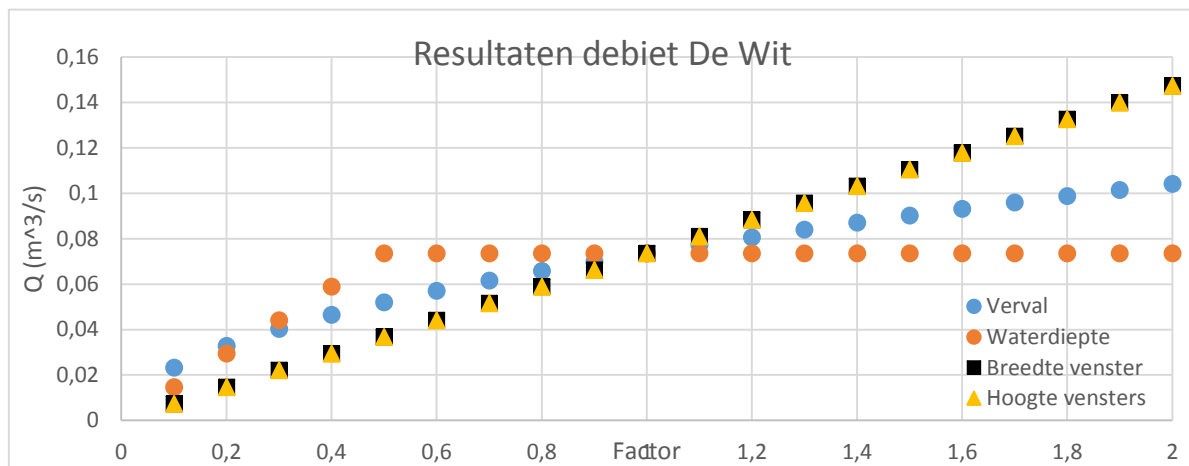
De standaardwaarden voor de variabelen zijn als volgt:

- $\Delta h = 0,05\text{m}$
- $y_0 = 0,8\text{m}$
- $b = 0,2\text{m}$
- $h_v = 0,4\text{m}$
- Lengte bekken = $0,8\text{m}$ & Breedte bekken = $1,2\text{m}$.

De verwachting voor alle parameters is dat het debiet toeneemt bij een hogere factor, waarbij de toename van het debiet bij een stijgende waterdiepte afhankelijk is van de hoogte van het venster. Bovendien is de verwachting dat hoger verval en grotere breedte en hoogte van het venster zal leiden tot meer energie in de bekken, terwijl de energie afneemt bij een hogere waterdiepte.

Gevoeligheid parameters voor debiet de Wit-vispassage

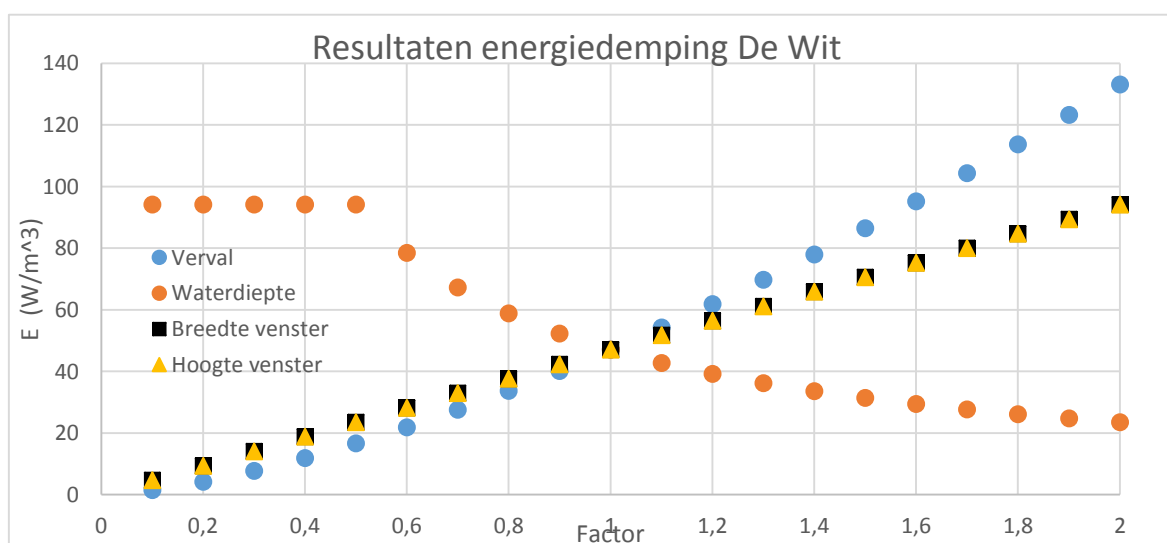
In Grafiek 12 zijn de resultaten voor het debiet voor de Wit-vispassage weergegeven voor de genoemde parameters. Hierbij is een duidelijk lineair verband waar te nemen voor de breedte en hoogte van het venster, die samen de sterkste parameter zijn bij een factor hoger dan 1. Bij een factor kleiner dan 1 is de waterdiepte de gevoeligste variabele, echter wanneer de waterdiepte groter of gelijk is aan de hoogte van het venster, heeft deze geen invloed meer op het debiet, maar slechts nog op de energiedemping zoals weergegeven in Grafiek 13. Het verval kan het beste worden omschreven als een wortelfunctie.



Grafiek 12 Resultaten voor gevoeligheid van parameters voor debiet in de Wit-vispassage.

Gevoeligheid parameters voor energiedemping de Wit-vispassage

Uit de resultaten in Grafiek 13 blijkt dat voor de energie per bekken het verval de sterkste parameter is bij een factor groter dan 1. Het verval wordt het best omschreven door een kwadratische/exponentiële functie. Voor de breedte en de hoogte van het venster is een lineair verband waar te nemen. In Grafiek 13 wordt ook bevestigd dat de waterdiepte een tegengesteld effect heeft op de energie per bekken bij een groter wordende factor. De waterdiepte is hierbij afhankelijk van de hoogte van het doorzwemvenster. Indien de waterdiepte groter is dan de hoogte van het venster, wordt de energie per bekken kleiner bij een groter wordende factor voor de waterdiepte. De Wit-vispassage voldoet daarmee aan de verwachtingen die vooraf zijn opgesteld.



Grafiek 13 Resultaten voor gevoeligheid van parameters voor energiedemping in de Wit-vispassage

V-vormige overlaat

Tenslotte zullen ook voor de V-vormige overlaat vier testen worden uitgevoerd, namelijk met het verval, de waterhoogte boven de kruin (h_1), de hoek van de overlaat en de breedte van de overlaat, met als eindresultaat het debiet en de energiedemping per bekken.

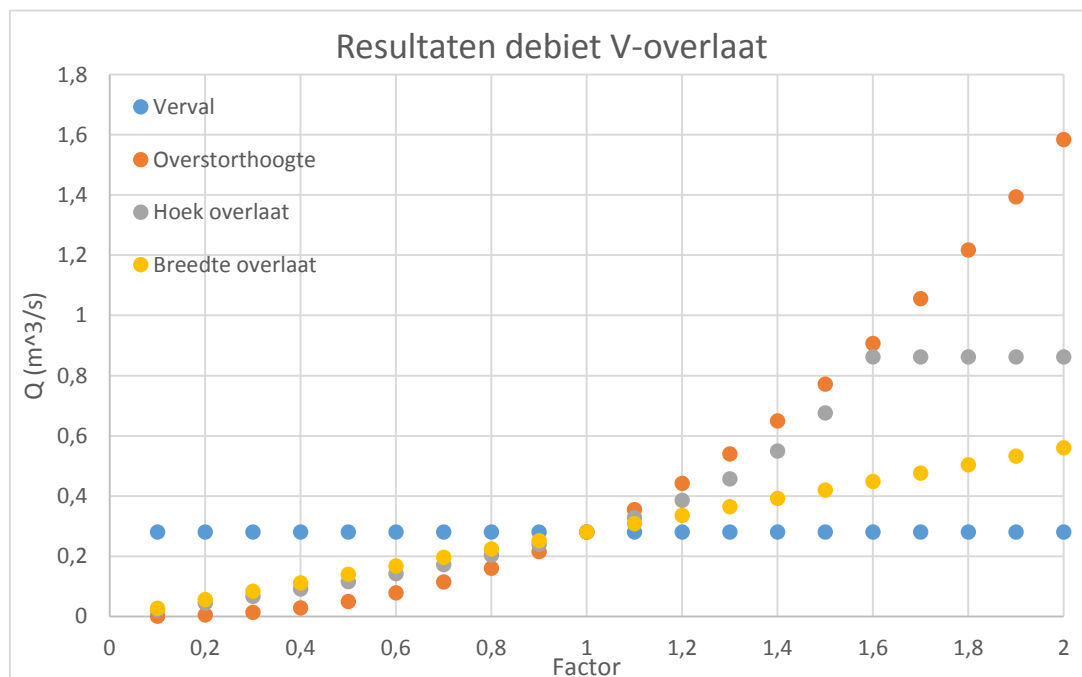
De standaardwaarden voor de variabelen zijn als volgt:

- $\Delta h = 0,05\text{m}$
- $h_1 = 0,5\text{m}$
- hoek = 90°
- $B = 1,5\text{m}$.
- Lengte bekkens = 5m & Breedte bekkens = 3m.

Ook voor de V-vormige overlaat is de verwachting dat bij groter wordende parameters het debiet zal toenemen, waarbij de hoek en de breedte van de overlaat zijn gebonden aan de maximale breedte van de bekkens. Voor de energie per bekken zal een zelfde beeld verwacht worden bij toenemende factoren voor de variabelen.

Gevoeligheid parameters voor debiet V-vormige overlaat

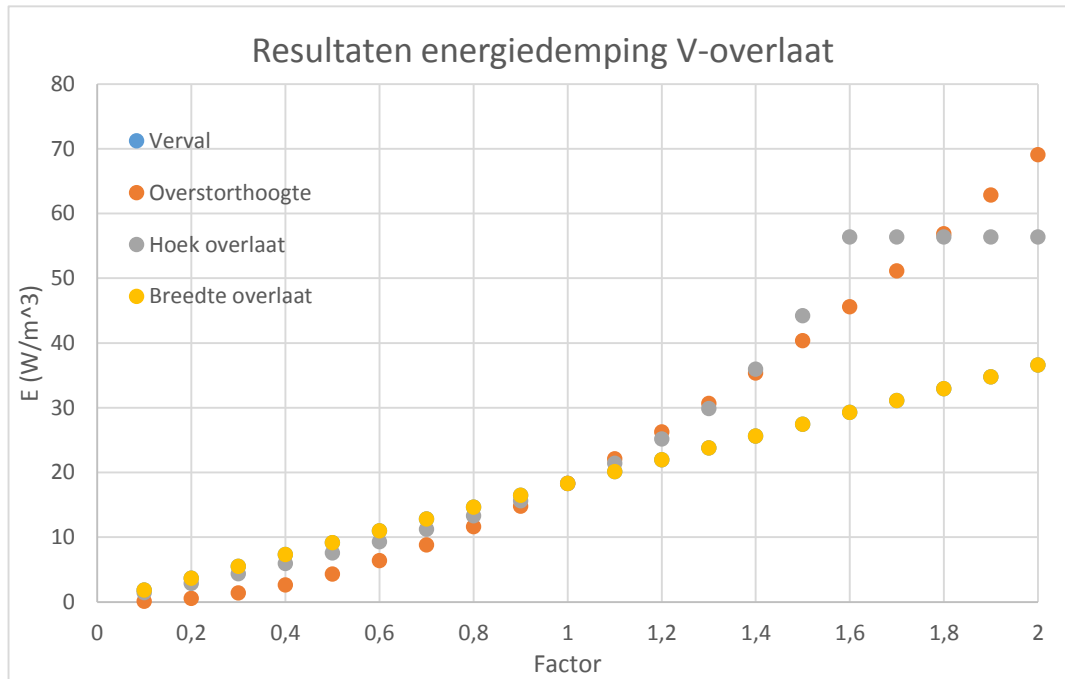
Uit Grafiek 14 blijkt dat de overstorthoogte de gevoeligste parameter is voor het debiet van een V-vormige overlaat voor de bovengenoemde standaardwaarden, met een debiet van $1,6\text{m}^3$ bij factor 2. Het verval heeft geen invloed op het debiet, terwijl de breedte van de overlaat een lineair verband laat zien. De hoek van de overlaat laat een vergelijkbare gevoeligheid zien, maar blijft beperkt aan de maximale breedte van de bekkens. In dit geval, bij een hoek van 144° (factor 1,6), wordt een breedte van de overlaat van 3m berekend, wat gelijk is aan de breedte van de bekkens.



Grafiek 14 Resultaten voor gevoeligheid van parameters voor debiet in V-vormige overlaat

Gevoeligheid parameters voor energiedemping V-vormige overlaat

In Grafiek 15 zijn de resultaten voor de gevoeligheid van de parameters voor de energiedemping weergegeven. Hierbij komt naar voren dat het verval en de breedte van de overlaat een lineair verband omschrijven, waarbij de V-vormige overlaat iets gevoeliger is voor de breedte van de overlaat. De overstorthoogte en de hoek van de overlaat kunnen volgens Grafiek 15 het beste worden omschreven met een kwadratisch/exponentieel verband, waarbij de hoek van de overlaat afhankelijk is van de maximale breedte van de bekken.



Grafiek 15 Resultaten voor gevoeligheid van parameters voor energiedemping in V-vormige overlaat

D. Bijlage Opzet van wiskundige model

In deze bijlage zijn de verschillende berekeningsmethoden in het wiskundige model ingevoegd. Deze berekeningen komen uit het script van het wiskundige model, dat is geprogrammeerd in Excel VBA.

```
'Berekeningen
'Ontwerp 1
'Afmetingen bekken
    Dim Breedte_bekkens_1 As Variant
    Dim Lengte_bekkens_1 As Variant
    Dim Volume_bekkens_1 As Variant
    Dim Helling_bekkens_1 As Variant

    Breedte_bekkens_1 = 8 * Breedte_slots
    Lengte_bekkens_1 = 10 * Breedte_slots
    Volume_bekkens_1 = Breedte_bekkens_1 * Lengte_bekkens_1 * Waterdiepte_bekkens
    Helling_bekkens_1 = Verval / Lengte_bekkens_1

    Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("H23").Value = Breedte_bekkens_1
    Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("J23").Value = Lengte_bekkens_1
    Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("L23").Value = Volume_bekkens_1

'Afvoercoëfficiënt
    Dim Afvoercoëfficiënt_1 As Variant
    Dim Verhouding_1 As Variant

    Verhouding_1 = Waterdiepte_bekkens / Breedte_slots
    Afvoercoëfficiënt_1 = 3.77 * (Verhouding_1) - 1.11

    Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("N23").Value = Afvoercoëfficiënt_1

'Berekenen van Debiet.
    Dim Debiet_1 As Variant

    Debiet_1 = Afvoercoëfficiënt_1 * (Valversnelling * Helling_bekkens_1 * (Breedte_slots ^ 5)) ^ 0.5

    Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("R23").Value = Debiet_1

'Berekenen van Energiedemping.
    Dim Energiedemping_1 As Variant

    Energiedemping_1 = (Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet_1 * Verval) / Volume_bekkens_1

    Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Value = Energiedemping_1

'Randvoorwaarden
    If Snelheid > Maximale_snelheid Then
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("P23").Font.Bold = True
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("P23").Font.Color = vbRed
    Else
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("P23").Font.Bold = False
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("P23").Font.Color = vbBlack
    End If

    If Energiedemping_1 > Maximale_demping Then
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Font.Bold = True
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Font.Color = vbRed
    Else
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Font.Bold = False
        Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Font.Color = vbBlack
    End If
```

Figuur 9 Berekening Vertical-Slot van Afmetingen --> Debiet


```

'Berekeningen
'Ontwerp 1
'Afmetingen bekken
Dim Breedte_bekken_1 As Variant
Dim Lengte_bekken_1 As Variant
Dim Helling_bekken_1 As Variant

Breedte_bekken_1 = 8 * Breedte_slots
Lengte_bekken_1 = 10 * Breedte_slots
Helling_bekken_1 = Verval / Lengte_bekken_1

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("H23").Value = Breedte_bekken_1
Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("J23").Value = Lengte_bekken_1

'Berekenen van Waterdiepte
Dim Waterdiepte_bekken_1 As Variant

Waterdiepte_bekken_1 = (((Debiet / ((Valversnelling * Helling_bekken_1 * (Breedte_slots ^ 5)) ^ 0.5)) + 1.11) * Breedte_slots) / 3.77

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("F23").Value = Waterdiepte_bekken_1

'Volume van bekken
Dim Volume_bekken_1 As Variant

Volume_bekken_1 = Breedte_bekken_1 * Lengte_bekken_1 * Waterdiepte_bekken_1

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("L23").Value = Volume_bekken_1

'Afvoercoëfficiënt
Dim Afvoercoëfficiënt_1 As Variant
Dim Verhouding_1 As Variant

Verhouding_1 = Waterdiepte_bekken_1 / Breedte_slots
Afvoercoëfficiënt_1 = 3.77 * (Verhouding_1) - 1.11

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("N23").Value = Afvoercoëfficiënt_1

'Berekenen van Energiedemping.
Dim Energiedemping_1 As Variant

Energiedemping_1 = (Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval) / Volume_bekken_1

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Value = Energiedemping_1

```

Figuur 10 Berekeningen Vertical-Slot van Debiet --> Waterdiepte

```

'Berekeningen
'Ontwerp 1
'Afmetingen bekken
Dim Breedte_bekken_1 As Variant
Dim Lengte_bekken_1 As Variant
Dim Volume_bekken_1 As Variant

Breedte_bekken_1 = 8 * Breedte_slots
Lengte_bekken_1 = 10 * Breedte_slots
Volume_bekken_1 = Breedte_bekken_1 * Lengte_bekken_1 * Waterdiepte_bekken_1

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("H23").Value = Breedte_bekken_1
Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("J23").Value = Lengte_bekken_1
Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("L23").Value = Volume_bekken_1

'Afvoercoëfficiënt
Dim Afvoercoëfficiënt_1 As Variant
Dim Verhouding_1 As Variant

Verhouding_1 = Waterdiepte_bekken_1 / Breedte_slots
Afvoercoëfficiënt_1 = 3.77 * (Verhouding_1) - 1.11

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("N23").Value = Afvoercoëfficiënt_1

'Verval
Dim Verval_1 As Variant
Verval_1 = (Debiet / (Afvoercoëfficiënt_1 * (Valversnelling / Lengte_bekken_1 * Breedte_slots ^ 5) ^ 0.5)) ^ 2

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("C23").Value = Verval_1

'Maximale snelheid
Dim Snelheid_1 As Variant
Snelheid_1 = (2 * Valversnelling * Verval_1) ^ 0.5

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("P23").Value = Snelheid_1

'Berekenen van Energiedemping.
Dim Energiedemping_1 As Variant

Energiedemping_1 = (Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval_1) / Volume_bekken_1

Sheets("Vertical-slot vispassage").Range("S23").Value = Energiedemping_1

```

Figuur 11 Vertical-slot van Debiet --> Verval

```

'Berekeningen
'Rekenhoogte
    Dim Rekenhoogte As Variant

    If Waterdiepte_bekkens >= Hoogte_venster Then
        Rekenhoogte = Hoogte_venster
    ElseIf Waterdiepte_bekkens < Hoogte_venster Then
        Rekenhoogte = Waterdiepte_bekkens
    End If

'Debiet
    Dim Debiet As Variant

    Debiet = Afvoercoefficient * Breedte_venster * Rekenhoogte * ((2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5)

'Maximale snelheid
    Dim Snelheid As Variant
    Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

'Volume
    Dim Volume As Variant
    Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

'Energiedemping
    Dim Energiedemping As Variant

    Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

```

Figuur 12 Berekeningen de Wit-vispassage van Afmetingen --> Debiet

```

'Berekeningen

'Rekenhoogte
    Dim Rekenhoogte As Variant

    If Waterdiepte_bekkens >= Hoogte_venster Then
        Rekenhoogte = Hoogte_venster
    ElseIf Waterdiepte_bekkens < Hoogte_venster Then
        Rekenhoogte = Waterdiepte_bekkens
    End If

'Ontwerp verval
    Dim Verval As Variant

    Verval = (Debiet / (Afvoercoefficient * Breedte_venster * Rekenhoogte * ((2 * Valversnelling) ^ 0.5))) ^ 2

'Maximale snelheid
    Dim Snelheid As Variant

    Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

'Volume
    Dim Volume As Variant
    Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

'Energiedemping
    Dim Energiedemping As Variant

    Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

```

Figuur 13 Berekeningen de Wit-vispassage van Debiet --> Verval

```

'Berekeningen

'Rekenhoogte
Dim Rekenhoogte As Variant

If Waterdiepte_bekkens >= Hoogte_venster Then
    Rekenhoogte = Hoogte_venster
ElseIf Waterdiepte_bekkens < Hoogte_venster Then
    Rekenhoogte = Waterdiepte_bekkens
End If

'Breedte van vensters
Dim Breedte_venster As Variant

Breedte_venster = Debiet / (Afvoercoefficient * Rekenhoogte * ((2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5))

'Maximale snelheid
Dim Snelheid As Variant

Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

'Volume
Dim Volume As Variant
Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

'Energiedemping
Dim Energiedemping As Variant

Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

```

Figuur 14 Berekening van de Wit-vispassage van Debiet --> Vensterbreedte

```

'Berekeningen

'Hoogte venster
Dim Hoogte_venster As Variant

Hoogte_venster = Debiet / (Afvoercoefficient * Breedte_venster * ((2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5))

'Maximale snelheid
Dim Snelheid As Variant

Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

'Volume
Dim Volume As Variant
Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

'Energiedemping
Dim Energiedemping As Variant

Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

```

Figuur 15 Berekening van de Wit-vispassage van Debiet --> Vensterhoogte

```

'Berekeningen
'Overstortende straal (t.o.v. kruin)
Dim Overstortende_straal As Variant
Overstortende_straal = Waterdiepte_bekkens - Hoogte_kruin

Sheets("V-vormige overlaat").Range("H25").Value = Overstortende_straal

'Waterstand beneden drempel (t.o.v. kruin)
Dim Peil_beneden As Variant
Peil_beneden = Overstortende_straal - Verval

Sheets("V-vormige overlaat").Range("J25").Value = Peil_beneden

'Verdrinkingsgraad
Dim Verdrinkingsgraad As Variant
If Peil_beneden < 0 Then
    Verdrinkingsgraad = "Niet verdrongen!"
ElseIf Peil_beneden >= 0 Then
    Verdrinkingsgraad = Peil_beneden / Overstortende_straal * 100
End If

Sheets("V-vormige overlaat").Range("L25").Value = Verdrinkingsgraad

'Breedte overlaat
Dim Breedte_overlaat As Variant
Breedte_overlaat = 2 * Tan((Hoek / 2) * 3.14159265358979 / 180) * Overstortende_straal

Sheets("V-vormige overlaat").Range("N25").Value = Breedte_overlaat

'Volume bekkens
Dim Volume As Variant

Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

Sheets("V-vormige overlaat").Range("V25").Value = Volume

'Debiet bepalen
Dim Debit As Variant
Debit = ((4 / 5) ^ (5 / 2)) * ((Valversnelling / 2) ^ (1 / 2)) * Tan(Hoek * 3.14159265358979 / 180 / 2) * Afvoercoëfficiënt * (Overstortende_straal ^ (5 / 2))

Sheets("V-vormige overlaat").Range("AB25").Value = Debit

'Maximale snelheid
Dim Snelheid As Variant

Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

Sheets("V-vormige overlaat").Range("Z25").Value = Snelheid

'Energiedemping
Dim Energiedemping As Variant

Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debit * Verval / Volume

Sheets("V-vormige overlaat").Range("AC25").Value = Energiedemping

```

Figuur 16 Berekening van V-vormige overlaat van Hoek V-vorm --> Debit

```

'Berekeningen
'Overstortende straal (t.o.v. kruin)
Dim Overstortende_straal As Variant
Overstortende_straal = Waterdiepte_bekkens - Hoogte_kruin

Sheets("V-vormige overlaat").Range("H25").Value = Overstortende_straal

'Waterstand beneden drempel (t.o.v. kruin)
Dim Peil_beneden As Variant
Peil_beneden = Overstortende_straal - Verval

Sheets("V-vormige overlaat").Range("J25").Value = Peil_beneden

'Verdrinkingsgraad
Dim Verdrinkingsgraad As Variant
If Peil_beneden < 0 Then
    Verdrinkingsgraad = "Niet verdronken!"
Elseif Peil_beneden >= 0 Then
    Verdrinkingsgraad = Peil_beneden / Overstortende_straal * 100
End If

Sheets("V-vormige overlaat").Range("L25").Value = Verdrinkingsgraad

'Hoek v-vorm
Dim Hoek As Variant
Hoek = 2 * Atn((Breedte_overlaat / 2) / Overstortende_straal) * 180 / 3.14159265358979

Sheets("V-vormige overlaat").Range("P25").Value = Hoek

'Volume bekkens
Dim Volume As Variant

Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

Sheets("V-vormige overlaat").Range("V25").Value = Volume

'Debiet bepalen
Dim Debiet As Variant
Debiet = ((4 / 5) ^ (5 / 2)) * ((Valversnelling / 2) ^ (1 / 2)) * Tan(Hoek * 3.14159265358979 / 180 / 2) * Afvoercoëfficiënt * (Overstortende_straal ^ (5 / 2))

Sheets("V-vormige overlaat").Range("AB25").Value = Debiet

'Maximale snelheid
Dim Snelheid As Variant

Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

Sheets("V-vormige overlaat").Range("Z25").Value = Snelheid

'Energiedemping
Dim Energiedemping As Variant

Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

Sheets("V-vormige overlaat").Range("AC25").Value = Energiedemping

```

Figuur 17 Berekening van V-vormige overlaat van Breedte V-vorm --> Debiet

```

'Berekeningen
'Overstortende straal (t.o.v. kruin)
    Dim Overstortende_straal As Variant

    Overstortende_straal = (Debiet / (((4 / 5) ^ (5 / 2)) * ((Valversnelling / 2) ^ (1 / 2)) * Tan(Hoek * 3.14159265358979 / 180 / 2) * Afvoercoëfficiënt)) ^ (2 / 5)

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("H25").Value = Overstortende_straal

'Waterdiepte bekkens
    Waterdiepte_bekkens = Hoogte_kruin + Overstortende_straal

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("D25").Value = Waterdiepte_bekkens

'Waterstand beneden drempel (t.o.v. kruin)
    Dim Peil_beneden As Variant
    Peil_beneden = Overstortende_straal - Verval

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("J25").Value = Peil_beneden

'Verdrinkingsgraad
    Dim Verdrinkingsgraad As Variant
    If Peil_beneden < 0 Then
        Verdrinkingsgraad = "Niet verdronken!"
    ElseIf Peil_beneden >= 0 Then
        Verdrinkingsgraad = Peil_beneden / Overstortende_straal * 100
    End If

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("L25").Value = Verdrinkingsgraad

'Breedte overlaat
    Dim Breedte_overlaat As Variant

    Breedte_overlaat = 2 * Tan((Hoek / 2) * 3.14159265358979 / 180) * Overstortende_straal

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("N25").Value = Breedte_overlaat

'Volume bekkens
    Dim Volume As Variant

    Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("V25").Value = Volume

'Maximale snelheid
    Dim Snelheid As Variant

    Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("Z25").Value = Snelheid

'Energiedemping
    Dim Energiedemping As Variant

    Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

    Sheets("V-vormige overlaat").Range("AC25").Value = Energiedemping

```

Figuur 18 Berekening van V-vormige overlaat van Debiet --> Overstortende straal

```

'Berekeningen
'Overstortende straal (t.o.v. kruin)
Dim Overstortende_straal As Variant
Overstortende_straal = Waterdiepte_bekkens - Hoogte_kruin

Sheets("V-vormige overlaat").Range("H25").Value = Overstortende_straal

'Waterstand beneden drempel (t.o.v. kruin)
Dim Peil_beneden As Variant
Peil_beneden = Overstortende_straal - Verval

Sheets("V-vormige overlaat").Range("J25").Value = Peil_beneden

'Verdrinkingsgraad
Dim Verdrinkingsgraad As Variant
If Peil_beneden < 0 Then
    Verdrinkingsgraad = "Niet verdronken!"
Elseif Peil_beneden >= 0 Then
    Verdrinkingsgraad = Peil_beneden / Overstortende_straal * 100
End If

Sheets("V-vormige overlaat").Range("L25").Value = Verdrinkingsgraad

'Berekening van hoek
Dim Hoek As Variant
Hoek = Atn(Debiet / (((4 / 5) ^ (5 / 2)) * ((Valversnelling / 2) ^ (1 / 2)) * Afvoercoëfficiënt * (Overstortende_straal ^ (5 / 2)))) * 180 / 3.14159265358979 * 2

Sheets("V-vormige overlaat").Range("P25").Value = Hoek

'Breedte overlaat
Dim Breedte_overlaat As Variant
Breedte_overlaat = 2 * Tan((Hoek / 2) * 3.14159265358979 / 180) * Overstortende_straal

Sheets("V-vormige overlaat").Range("N25").Value = Breedte_overlaat

'Volume bekkens
Dim Volume As Variant

Volume = Lengte_bekkens * Breedte_bekkens * Waterdiepte_bekkens

Sheets("V-vormige overlaat").Range("V25").Value = Volume

'Maximale snelheid
Dim Snelheid As Variant

Snelheid = (2 * Valversnelling * Verval) ^ 0.5

Sheets("V-vormige overlaat").Range("Z25").Value = Snelheid

'Energiedemping
Dim Energiedemping As Variant

Energiedemping = Dichtheid_water * Valversnelling * Debiet * Verval / Volume

Sheets("V-vormige overlaat").Range("AC25").Value = Energiedemping

```

Figuur 19 Berekening van V-vormige overlaat van Debiet --> Hoek V-vorm

E. Bijlage Verificatie wiskundige model

De verificatie van een computer model wordt door Sargent (2011) beschreven als het testen van het geprogrammeerde model en de terugkoppeling met het conceptuele model, in dit geval de theorie achter het model. De verificatie is voor het wiskundige model uitgevoerd gedurende het programmeren van het script, om te voorkomen dat fouten optreden in de modeluitkomsten. Zo zijn met de gevoeligheidsanalyse al gedeeltelijk degeneratietests uitgevoerd. Tevens is bekeken hoe het model reageert op extreme waarden. Tenslotte zijn de modelwaarden voor de verschillende berekeningsmethoden met elkaar vergeleken om zodoende zeker te zijn van het feit dat het model correct is.

Degeneratie tests

De degeneratie tests zijn gedaan in combinatie van de gevoeligheidsanalyse, om vast te stellen of het model bij vastgestelde parameters voldoet aan de verwachtingen. Uit de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 5) is gebleken dat voor de Vertical-slot vispassage het debiet toeneemt bij een groter wordend verval, grotere breedte van de slots en hogere waterdiepte. Dit is voor de hand liggend gezien het feit dat een groter doorstroomoppervlak of een hogere snelheid (als gevolg van verval) leidt tot een hoger debiet. Een zelfde patroon is terug te zien bij de Wit-vispassage en de V-vormige overlaat. Echter, zoals ook is vermeld in de Discussie, is de V-vormige overlaat niet gevoelig voor het verval volgens de methode van Boiten. Dit is niet volgens verwachting, maar komt wel overeen met de gehanteerde methode van Boiten (1990). Over het algemeen laten de modeluitkomsten geen afwijkende waarden zien, waardoor het wiskundige model wel reageert naar verwachting.

Extreme waarden

Door een extreme waarden test uit te voeren, wordt vastgesteld hoe het model reageert bij extreme/uitzonderlijke waarden. Bij de degeneratie tests is al laten zien dat het model bij hoge waarden voldoet volgens verwachting. Echter, dient het model niet te voldoen bij variabelen kleiner of gelijk aan nul. Het model is hierop ingesteld door geen uitvoerwaarde te geven indien één van de parameters kleiner of gelijk aan nul is. Uit testen met het model is gebleken dat het model hier inderdaad aan voldoet en ook geen foutmelding weergeeft. Bij waarden kleiner dan nul worden bovendien waarschuwingen gegeven en dient de gebruiker een nieuwe waarde in te voeren. Tevens wordt het model ook getoetst aan de randvoorwaarden. Voor verschillende extreme waarden is getest of het model wel of geen foutmelding geeft indien een randvoorwaarde is overschreden. Ook hier voldeed het model voor verschillende waarden voor de parameters.

Vergelijken met andere berekeningsmethoden

Tenslotte zijn de modelwaarden van de verschillende berekeningsmethoden met elkaar vergeleken bij gelijke inputparameters. Op die manier is gecontroleerd of het model de juiste berekeningen uitvoert en of deze berekeningen ook daadwerkelijk kloppen.

