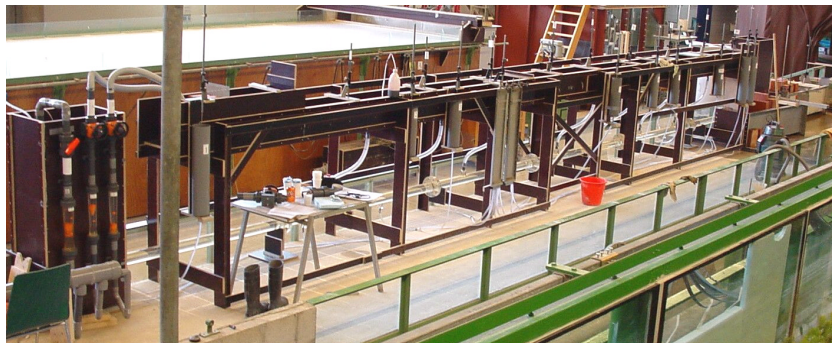


Modellering van rioolstelsels tijdens water op straat

Metingen in een schaalmodel

September 2002

Cornelis de Haan



Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Sectie Gezondheidstechniek
Technische Universiteit Delft

Modellering van rioolstelsels tijdens water op straat

Metingen in een schaalmodel

Afstudeerverslag

Cornelis de Haan
September 2002

Afstudeercommissie:

Prof. dr. ir. F.H.L.R. Clemens (Gezondheidstechniek)
Dr.ir. H.L. Fontijn (Vloeistofmechanica)
Prof.dr.ir. G.S. Stelling (Vloeistofmechanica)
Ir. R.G. Veldkamp (Gezondheidstechniek)

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Watermanagement
Sectie Gezondheidstechniek

In samenwerking met:
Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek
Sectie Vloeistofmechanica

VOORWOORD

Voor u ligt het resultaat van mijn afstudeerproject aan de opleiding Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Dit project is verricht bij de secties Gezondheidstechniek en Vloeistofmechanica. Tijdens mijn afstuderen heb ik in het laboratorium van vloeistofmechanica metingen verricht in een schaalmodel waarmee water op straat situaties kan worden nagebootst.

Het schaalmodel is grotendeels vervaardigd en opgebouwd door Jaap van Duin, werkzaam bij het laboratorium van vloeistofmechanica. Ik wil hem en alle andere mensen die hun steentje hebben bijgedragen aan dit project bedanken: al mijn begeleiders en de medewerkers van het Vloeistofmechanica Laboratorium en de sectie Gezondheidstechniek.

Tot zover de belangrijke en serieuze zaken.

Enkele promovendi van de sectie Gezondheidstechniek vonden dat de meeste afstudeerverslagen een saai voorwoord hebben. Zij vonden dat ik trendsetter moest worden door een leuke leus op te nemen die van toepassing is op het vakgebied van de riolering. Dit wordt:

“In het land der blinden is Eenoog koning.”

Daarnaast zal ik na mijn afstuderen één opmerking ontzettend gaan missen:

“dat is heel leerzaam voor jou”

Deze opmerking is zeker 100 keer gemaakt door de allergrootste riolist ter wereld: hoogleraar in de rioolkunde Prof. Dr. Ir. F.H.L.R. Clemens.

Cornelis de Haan

September 2002

SAMENVATTING

Voor het ontwerp van rioolstelsels wordt gebruik gemaakt van hydrodynamische modellen. Met deze modellen worden stelsels zo ontworpen dat alleen bij buien die eens per 2 of 5 jaar optreden niet al het water wordt afgevoerd. Door deze modellen wordt de waterbeweging in de riolering goed beschreven en het is goed mogelijk om te bepalen hoe vaak er water op straat blijft staan. Daarnaast is het mogelijk om te bepalen op welke locaties deze wateroverlast begint. De gebruikte modellen zijn echter niet geschikt om uitspraken te doen over de mate van wateroverlast: vragen zoals waar, hoeveel en gedurende welke tijdsperiode wateroverlast optreedt kunnen niet betrouwbaar worden beantwoord.

Door deze manier van ontwerpen, reageren stelsels die op gelijke wijze zijn ontworpen verschillend op extreme buien. In het ene stedelijk gebied worden putdeksels van het riool gedrukt en lopen gebouwen en tunnels onder, terwijl in een ander gebied bij een gelijkwaardige belasting alleen tijdelijk een paar cm water op de straat blijft staan.

Er zijn modellen beschikbaar waarvan wordt gezegd dat zij water op straat situaties kunnen beschrijven. Dit is echter nog nooit aangetoond door kalibratie en verificatie. Dit onderzoek is een eerste stap in het modelleren van extreme buien, maar dan op basis van zorgvuldige modelanalyse, kalibratie en verificatie. In dit onderzoek zijn metingen gedaan van water op straat situaties in een schaalmodel. Uit dit schaalmodel kan worden bepaald wat de belangrijkste processen zijn. De kennis die hiermee wordt verkregen kan worden gebruikt voor de modellering van een praktijksituatie.

Het schaalmodel is ontwikkeld door geometrische gelijkvormige schaling toe te passen gevolgd door Froude schaling van de stroomsnelheden. Voor schaalfactoren groter dan 1:5 wordt de stroming grotendeels laminair, de schaalfactor is derhalve op 5 gesteld. Ontwikkeld is een model met een recht stuk straat waar 7 regenkolken in de straat zijn gemonteerd en aangesloten op een onderliggende rioolbuis. Er is rekening gehouden met een toekomstige uitbreiding met zijstraten zodat een kruising ontstaat. Tevens is het mogelijk om de hellingshoek van de straat te veranderen.

Aan de bovenstroomse zijde van het riool en van de straat kan een waterdebiet worden gedoseerd. Aan de benedenstroomse zijde van de straat en het riool kan de waterstand worden geregeld. De gedoseerde en gemeten afvoeren zijn gemeten met vlotterdebietmeters en V-stuwen. Tevens is met behulp van kleurstof bepaald hoeveel water er door de regenkolken stroomt. In het riool is het piëzometrisch niveau behulp van drukaansluitingen gemeten: in het instroombassin, in het uitstroombassin en op 8 plaatsen in de rioolbuis. Op de straat is op 9 plaatsen de waterstand gemeten.

De uitkomsten van een ééndimensionale modellering van het riool lijken redelijk in overeenstemming met de metingen te zijn. Het is alleen met de hoeveelheid en nauwkeurigheid van de metingen niet mogelijk om vast te leggen wat parameterwaarden zijn. Voor de relatie tussen drukverschil (tussen riool en straat) en het debiet door de regenkolken blijkt er een aanzienlijk verschil te zijn tussen condities waarbij er water onder vrij verval het riool instroomt en situaties waarbij er water onder druk het riool instroomt. De relatie voor stroming door de regenkolken onder vrij verval van de straat naar het riool is niet eenduidig. Echter stroming onder druk van de straat naar het riool is net zoals stroming onder druk van het riool naar de straat eenvoudiger te beschrijven. Dit alles betekent dat in het schaalmodel situaties met hoge waterstanden op straat eenvoudiger te modelleren zijn dan situaties met lage waterstanden.

Vervolgonderzoek dient zich te concentreren op het direct meten van onbekende parameters en op meer en nauwkeuriger meten. Daarnaast is het verstandig om andere een manier van waterstandsregeling aan de benedenstroomse zijde van de straat en het riool toe te passen.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	III
-----------------	-----

SAMENVATTING	V
--------------------	---

1 INLEIDING.....	1
-------------------------	----------

1.1 AFVOER VAN AFVAL- EN HEMELWATER IN STEDELIJKE GEBIEDEN	1
1.2 PROBLEMEN MET OVERBELASTE RIOOLSTELSELS	1
1.3 ONTWERPMETHODES VAN RIOOLSTELSELS	2
1.3.1 <i>Traditionele ontwerpmethode</i>	2
1.3.2 <i>Huidige ontwerpmethode</i>	2
1.4 TEKORTKOMINGEN HUIDIGE ONTWERPMETHODIEK	2
1.5 MODELLEREN VAN EXTREME BUIEN	3
1.6 LEESWIJZER	4

2 MODELLERING VAN RIOOLSTELSELS TIJDENS WATER OP STRAAT.....	5
---	----------

2.1 WATERSTROMING TIJDENS NORMALE BUIEN	5
2.1.1 <i>Stroming van hemelwater naar het riool</i>	5
2.1.2 <i>Stroming door het riool</i>	5
2.2 WATERSTROMING TIJDENS NORMALE BUIEN	6
2.3 HUIDIGE MODELLERING VAN NORMALE BUIEN	6
2.3.1 <i>Gescheiden inloopmodel en rioolmodel</i>	6
2.3.2 <i>Hydrologisch model</i>	7
2.3.3 <i>Hydraulisch model</i>	7
2.4 MODELLERING VAN EXTREME BUIEN	8
2.4.1 <i>Gewenste modeluitkomsten</i>	8
2.4.2 <i>Verschillen tussen extreme en normale buien</i>	9
2.4.3 <i>Modelontwikkeling</i>	9
2.5 GESCHIKTE MODELOPZET	10
2.6 TOETSING VAN HET MODEL.....	11
2.6.1 <i>Stroming op de kruising als criterium voor modelvalidatie</i>	11
2.6.2 <i>Bepaling relaties uit model</i>	11
2.7 VEREISTE MEETSITUATIES	11

3 ONTWERPKEUZES SCHAALMODEL	13
--	-----------

3.1 SCHAALMETHODE.....	13
3.1.1 <i>Reproduceren van stromingsprocessen in een schaalmodel</i>	13
3.1.2 <i>Geometrische schaling en Froudeschaling</i>	14
3.2 MAXIMALE SCHAALFACTOR	15
3.2.1 <i>Indicators voor stroming in de praktijk</i>	15
3.2.2 <i>Schaalfactor</i>	15
3.3 INVLOED GEOMETRISCHE AFMETINGEN MEETOPSTELLING.....	17
3.3.1 <i>Parameters:</i>	18
3.3.2 <i>Diameter rioolbuis</i>	18
3.3.3 <i>Geometrisch geschaalde ruwheid of toepassing van transparante buis</i>	20
3.3.4 <i>Lokale verliezen in het riool</i>	21
3.3.5 <i>Afstand tussen twee regenkolkaansluitingen</i>	22
3.3.6 <i>Breedte van de straat</i>	22
3.3.7 <i>Lokale verliezen op straat</i>	24
3.3.8 <i>Ruwheid van de straat</i>	24
3.3.9 <i>Superkritische helling straat</i>	25
3.3.10 <i>De vorm van de regenkol en inlaatrooster</i>	25
3.3.11 <i>Diameter kolkaansluiting</i>	25
3.3.12 <i>De lengte van de regenkolkaansluiting</i>	26

3.4	AFMETINGEN SCHAALMODEL	26
3.5	LENGTE VAN HET VLAK VAN KRUISING.....	27
3.6	INVLOED MEETNAUWKEURIGHEID DEBIETEN / WATERHOOGTES	29
3.6.1	<i>Meetnauwkeurigheid drukverschil in het riool.</i>	29
3.6.2	<i>Meetnauwkeurigheid debiet op randen riool</i>	29
3.6.3	<i>Meetnauwkeurigheid uitwisselingsdebiet t.b.v. het riool</i>	29
3.6.4	<i>Meetnauwkeurigheid straat</i>	30
4	BESCHRIJVING MEETOPSTELLING.....	31
4.1	TOTAALOVERZICHT MET BASISELEMENTEN	31
4.2	BENEDENSTROOMS GEDEELTE MEETOPSTELLING	33
4.3	BOVENSTROOMS GEDEELTE MEETOPSTELLING	35
4.4	REGENKOLK / AFVOERPUTJE	36
4.5	DRUKAANSLUITINGEN EN PEILNAALDEN	37
4.6	AFMETINGEN	38
5	BESCHRIJVING MEETMETHODES	41
5.1	DEBIETMETING OP RANDEN MODEL	41
5.1.1	<i>Beschrijving apparatuur t.b.v. debietbepaling</i>	41
5.1.2	<i>Kalibratie van debietmeting</i>	42
5.1.3	<i>Correctievergelijkingen voor debietmetingen</i>	42
5.2	DEBIETMETING DOOR REGENKOLKEN	43
5.2.1	<i>Kalibratie van tracer methode</i>	45
5.3	MASSADEBIETBEPALING	48
5.3.1	<i>Kleine debieten</i>	48
5.3.2	<i>Grote debieten</i>	49
5.4	BODEM- EN REFERENTIE NIVEAU	49
5.5	ONTLUCHTEN VAN DE RIOOLBUIS EN DRUKSLANGETJES	50
5.6	INSTELLING VAN DE MEETSITUATIES	50
5.7	AFLEZING MEETWAARDEN.....	50
5.8	FOTO'S EN FILMPJES	51
6	BESCHRIJVING METINGEN.....	53
6.1	ONBEWERKTE GEGEVENS	53
6.1.1	<i>Uitleg dataopslag</i>	53
6.1.2	<i>Overzicht van verrichte metingen</i>	54
6.2	REFERENTIE NIVEAU EN BODEMPROFIEL	55
6.3	INSTELSNELHEID WATERSTAND.	58
6.4	OMGEZETTE MEETGEGEVENS.....	59
6.4.1	<i>Bepaling waterniveau's en debieten</i>	59
6.4.2	<i>Verschillen tussen manometerbord en peilnaaldaflezing riool</i>	59
6.4.3	<i>Volumebalans debieten op randen schaalmodel</i>	59
6.4.4	<i>Alternatieve afleiding correctieterm debieten bepaald met tracer</i>	60
6.4.5	<i>Interne volumebalans</i>	61
6.5	AFGELEIDE RELATIES.....	62
6.5.1	<i>Relatie tussen drukverschil drukpunt 1 en 2 en het debiet</i>	62
6.5.2	<i>Relatie tussen drukpunt 9 en 10.</i>	62
6.5.3	<i>Drukval tussen drukpunt 2 en 9 in de rioolbuis</i>	63
6.6	DEBIET DOOR PUTJES	64
6.7	RELATIE TUSSEN DRUKVERSCHIL EN UITWISSELINGSDEBIET REGENKOLK	65
7	EENDIMENSIONALE MODELLERING WATERSTROMING STRAAT EN RIOOL	67
7.1	RIOOLMODEL	67
7.1.1	<i>Instroomverlies</i>	68
7.1.2	<i>Uitstroomverlies</i>	69
7.1.3	<i>Wrijvingsverlies</i>	70

7.1.4	<i>Energieverlies t.p.v. de kolkaansluiting</i>	70
7.2	WANDWRIJVING ONAFHANKELIJK VAN K.....	74
7.3	WANDWRIJVING AFHANKELIJK VAN K EN δ	77
7.3.1	<i>Rekenmethode wandwrijving</i>	77
7.3.2	<i>Bepaling wandruwheid k en instroomcoëfficiënt ξ</i>	79
7.4	STRAATMODEL	82
7.4.1	<i>Wrijvingsverlies t.g.v. de bodemruwheid</i>	82
7.4.2	<i>Lokale energieverliezen t.p.v. de kolkaansluitingen op de straat</i>	84
7.5	RESULTATEN STRAATMODEL	86
7.6	CONCLUSIES	89
7.6.1	<i>Rioolmodel</i>	89
7.6.2	<i>Straatmodel</i>	89
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	91
8.1	CONCLUSIES	91
8.1.1	<i>Meetopstelling</i>	91
8.1.2	<i>Metingen</i>	91
8.1.3	<i>Data-analyse en modelonderzoek</i>	91
8.2	AANBEVELINGEN	92
8.2.1	<i>Meetopstelling</i>	92
8.2.2	<i>Metingen</i>	92
8.2.3	<i>Data-analyse en modelonderzoek</i>	92
	LITERATUUR	93
	BIJLAGE 1: K-WAARDE ACRYLAAT	95
	BIJLAGE 2: GRAFIEKEN VAN VERLIESCOËFFICIËNTEN UIT MILLER (1971)	97
	BIJLAGE 3: V-STUWEN EN VLOTTERDEBIETMETERS	99
1.1	BESCHRIJVING GEBRUIKTE VLOTTERDEBIETMETERS EN V-STUWEN.....	99
1.2	MONTAGE EISEN	100
1.3	UITGEVOERDE METINGEN	101
1.4	VERGELIJKING METINGEN VLOTTERS MET ELEKTROMAGNETISCH INDUCTIEVE DEBIETMETER....	102
1.4.1	<i>Metingen</i>	103
1.4.2	<i>Gekalibreerde waardes, met behulp van lineaire regressie</i>	104
1.5	NULNIVEAU BEPALING V-STUWEN	106
1.6	VERGELIJKING VLOTTERS EN V-STUWEN MET MASSAEXPERIMENTEN.....	108
1.6.1	<i>Uitgevoerde metingen na polijsten van Vstuwen</i>	116
1.7	TOE TE PASSEN FORMULES VOOR DEBIETKALIBRATIE	117
	BIJLAGE 4: OVERZICHT FOTO'S EN FILMPJES	119
	BIJLAGE 5: VERSCHIL TUSSEN MANOMETERBORD EN PEILNAALDEN	131
	BIJLAGE 6: INSTELSNELHEID WATERSTAND	135

1 Inleiding

1.1 Afvoer van afval- en hemelwater in stedelijke gebieden

In Nederland zijn bijna alle stedelijke gebieden aangesloten op de riolering. Riolering zorgt voor de afvoer van hemelwater en afvalwater afkomstig van huishoudens en bedrijven. De meeste rioolstelsels zijn gebaseerd op transport van water onder vrij verval. Deze stelsels zijn onder te verdelen in type gemengd en gescheiden.

Bij een gemengd stelsel wordt het afvalwater van huishoudens en bedrijven, maar ook overtollig hemelwater afgevoerd via één rioolstelsel. Dit water stroomt onder normale omstandigheden naar een rioolgemaal. Vanaf dit gemaal wordt het water naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) gepompt. Hier wordt het water gezuiverd voordat het geloosd wordt op groot oppervlaktewater.

Een gescheiden stelsel bestaat uit twee rioolstelsels, het hemelwaterstelsel voor overtollig regenwater en het vuilwaterstelsel voor afvalwater. Het water uit het vuilwaterstelsel stroomt naar een rioolgemaal vanwaar het naar de rwzi wordt gepompt. Het water in het hemelwaterstelsel stroomt naar oppervlaktewater in de nabije omgeving.

Hemelwater stroomt het rioolsysteem in via huisaansluitingen en kolkaansluitingen. Daken van woningen zijn via huisaansluitingen aangesloten op het hemelwaterstelsel. In het geval van een gemengd stelsel op het gemengde stelsel. Regenkolken zijn via kolkaansluitingen aangesloten op het hemelwaterstelsel. In een normale straat zijn om elke 5 m tot 20 m regenkolken gemonteerd.

Gemengde en gescheiden systemen zullen allebei, mits goed onderhouden, goed functioneren tijdens normale regenbuien. Goed functioneren betekent dat al het hemelwater het riool instroomt. Omdat het economisch niet haalbaar is om al het water in het rioolstelsel te bergen of direct naar de rwzi te pompen zijn noodoverstorten aangebracht. Tijdens zware buien wordt via deze noodoverstorten water uit het stelsel op het oppervlaktewater geloosd. Deze overstorten treden pas na verloop van tijd in werking, waardoor de vervuiling van het oppervlaktewater beperkt blijft.

Tijdens extreme buien stroomt niet al het water het riool in. Een deel van het hemelwater blijft op straat staan. Dit soort situaties worden water op straat (w.o.s.) situaties genoemd.

Veelgebruikte definities:

Normale bui: Al het water stroomt in het riool en wordt vervolgens naar de rwzi gepompt.

Zware bui: Al het water stroomt het riool in en stroomt voor een groot deel naar het rioolgemaal. Een deel van het rioolwater wordt via noodoverstorten direct op de oppervlakte water geloosd.

Extreme bui: Het water kan niet overal het riool instromen en blijft op sommige plaatsen op de straat staan. Hoogstwaarschijnlijk treden alle noodoverstorten in werking. Deze situatie wordt water op straat (w.o.s.) genoemd.

1.2 Problemen met overbelaste rioolstelsels

Tijdens extreme buien functioneren niet alle rioolstelsels even goed. Bij een goed ontworpen en onderhouden stelsel blijft tijdens een extreme bui water op straat staan maar dit zal voor weinig overlast zorgen. De overlast zal resulteren in een gelijkmatige verdeelde wateroverlast op straat, bijvoorbeeld enkele centimeters stagnerend water op straat in verschillende straten. Doordat water naar de rwzi wordt gepompt verdwijnt dit water na enkele uren.

Het is mogelijk dat in een ander gebied waar de riolering met dezelfde methode is ontworpen bij een zelfde bui lokaal veel meer wateroverlast ontstaat. Dit kan zich manifesteren in putdeksels die van putten afkomen, rioolwater dat uit rioolstelsels stroomt, kelders en tunnels die onderlopen en water dat uit wc's

omhoogkomt. Vaak moet bij dit soort situaties een beroep gedaan worden op allerlei nooddiensten zoals brandweer en politie.

1.3 Ontwerpmethodes van rioolstelsels

Voor het ontwerp en het aanpassen van rioolstelsels wordt gebruik gemaakt van modellen. In de loop der tijd zijn de modellen en de bijbehorende ontwerpmethodes verfijnd. Voor een nieuw ontwerp wordt voor onbekende parameters gebruik gemaakt van defaultwaarden. Door deze waarden te gebruiken wordt een eerste indicatie verkregen van het gedrag van het rioolstelsel. Bij aanpassingen in een bestaand stelsel wordt soms gebruik gemaakt van gekalibreerde modellen om de gevolgen van veranderingen in het stelsel beter te kunnen inschatten. De parameterwaarden die bij een kalibratie worden gevonden wijken soms aanzienlijk af van de defaultwaarden.

1.3.1 Traditionele ontwerpmethode

Oude rioolstelsels zijn ontworpen op basis van een stationaire neerslag van 60 l/s/ha voor vlakke gebieden en 90 l/s/ha voor hellende gebieden. Als ontwerpeis werd de eis gesteld dat de waterstand in het rioolstelsel overal twintig centimeter beneden het straatniveau moest blijven.

Met deze ontwerpmethodiek kunnen aanzienlijke verschillen tussen rioolstelsels ontstaan doordat:

1. Alle stelsels een andere afmeting en vorm hebben
2. De bovengrondse straatgeometrie niet overal gelijk is: de maaiveldhelling en het dwarsprofiel van het wegdek zijn per stelsel verschillend.
3. Het verschil tussen het straatniveau en de waterstand van het oppervlaktewater waarop noodoverstorten zijn aangesloten overal anders is.
4. Meerdere ontwerpen voldoen aan de ontwerpnorm.

De verschillen tussen stelsels uiteten zich in verschillende herhalingstijden van water op straat en verschillende gevolgen bij extreme buien. Ervaring heeft geleerd dat deze ontwerpmethode goed functionerende rioolstelsels oplevert. Het aantal keer dat water op straat blijft en de mate van wateroverlast is acceptabel.

1.3.2 Huidige ontwerpmethode

De laatste jaren worden geavanceerde modellen en ontwerpmethoden gebruikt. Een ontworpen stelsel wordt nu belast met een aantal standaardregenbuien waarmee een dynamische stromingsberekening wordt uitgevoerd. Voor het simuleren van de neerslagafstroming tot het riool wordt gebruik gemaakt van een black-box runoff model. Voor de stroming in het riool wordt gebruik gemaakt van een ééndimensionaal stromingsmodel. Als norm wordt gesteld dat het stelsel standaardbuien met een herhalingstijd van 2, 5 of 10 jaar moet kunnen afvoeren of tijdelijk bergen in het riool zodat de waterstand in het riool beneden het straatniveau blijft.

Deze ontwerpmethode geeft een goede indicatie van de herhalingstijd dat water op straat blijft staan. Verschillende stelsels hebben dankzij deze methode ook een vrijwel gelijke kans op water op straat. De ontwerpmethode geeft echter geen betrouwbare informatie over wat er gebeurt tijdens water op straat.

1.4 Tekortkomingen huidige ontwerpmethodiek

De traditionele ontwerpregels zijn lang geleden ontwikkeld voor de Nederlandse situatie. In deze tijd hadden veel straten een ouderwets straatprofiel met een groot bergend oppervlak tussen de trottoirs. Wanneer een dergelijk stelsel door een extreme bui werd belast waren de gevolgen van wateroverlast vaak beperkt dankzij de grote bergingsmogelijkheid op straat.

De huidige ontwerpmethodiek is zeer geavanceerd en lijkt een grote verbetering. Het is echter maar de vraag of dit ook zo is. Deze methode is aan het begin van een periode ontwikkeld waarin veel aanpassingen in de straatgeometrie in onder andere winkelcentra zijn verricht. Op veel plaatsen zijn trottoirs verdwenen en is het straatprofiel vrijwel horizontaal geworden, door verlaging of zelfs verwijdering van stoepranden en de afwezigheid van drempels bij winkeldeuren. Voor het winkelend publiek is dit een vooruitgang omdat de kans op valpartijen kleiner is geworden en omdat voor minder valide mensen de winkels

toegankelijker zijn geworden. Wanneer bij dergelijke veranderingen van de straatgeometrie echter geen aanpassingen in de riolering worden gedaan kunnen de gevolgen van water op straat kostbaar worden. Hoewel de kans op water op straat gelijk is gebleven, kan de kans dat (riool)water winkels instroomt aanzienlijk groter zijn geworden.

De huidige gebruikte normen hebben geen aanvullende eisen met betrekking tot de straatgeometrie. Ook is het met de huidige modellen niet mogelijk om wateroverlast op straat te kwantificeren. Het is zodoende moeilijk om de gevolgen van veranderingen in de straatgeometrie te betrekken in het ontwerp van rioolstelsels. Vanwege de grote economische gevolgen is het gewenst dat situaties waarbij enerzijds wel wordt voldaan aan de normen voor kans van water op straat, maar waarbij anderzijds ten gevolge van een wat zwaardere bui de winkels onderlopen, moet worden voorkomen.

Het verbeteren van de ontwerpen kan onder andere door:

1. Het gebruik van een zwaardere norm voor de kans van water op straat.
2. Gebruikmaking van een model waarmee water op straat situaties gekwantificeerd kunnen worden

Bij punt 1 zullen de dimensies de rioolbuizen en / of de vorm van het stelsel veranderen, maar dit kan een zeer kostbare aangelegenheid worden, waarvan de meerwaarde mogelijk zeer beperkt is. Bij punt 2 is het noodzakelijk om een ontwerpnorm vast te stellen, dit kan wettelijk worden vastgelegd, maar dit kan ook worden besproken met de verantwoordelijke beheerder. Op dit moment is nog geen model beschikbaar waarmee water op straat situaties betrouwbaar kunnen worden voorspeld. Sommige modellen hebben een mogelijkheid om wateroverlast te kwantificeren, maar het (wetenschappelijke) bewijs dat deze modellen betrouwbaar en nauwkeurig zijn is niet geleverd. Gezien de grote investeringen die op basis van modeluitkomsten worden gedaan is het gebruik van deze modellen riskant. In sommige situaties zal punt 1 een verstandige keus zijn, in andere gevallen zal dit een overgedimensioneerd stelsel betekenen en kan mogelijk winst worden behaald met punt 2.

1.5 Modelleren van extreme buien

Dit rapport is een bijdrage in de ontwikkeling van een model waarmee water op straat situaties gekwantificeerd kunnen worden. Voor praktische toepasbaarheid van een dergelijk model is het belangrijk dat de meerwaarde van een dergelijk model opweegt tegen de extra inspanning.

De meerwaarde bestaat uit het verschil in wateroverlast en aanlegkosten van het rioolstelsel, bij gebruikmaking van de huidige modellen versus een model dat wateroverlast op straat kan kwantificeren. Het exact kwantificeren van de kosten van wateroverlast is geen eenvoudige zaak en mogelijk ook minder relevant. Inzicht in extreme situaties heeft in elk geval meerwaarde voor ontwerpers en beheerders. Op basis van dit inzicht kunnen betere ontwerpbeslissingen worden genomen.

De extra inspanning bestaat uit de benodigde hoeveelheid geld, tijd en kennis. Deze inspanning is vooral afhankelijk van de complexiteit van het gebruikte model, de benodigde hoeveelheid en de kwaliteit van de geometrische data. Dit alles heeft een sterke samenhang met de processen die gemodelleerd worden en de gewenste betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de modeluitkomsten. De betrouwbaarheid van de modeluitkomsten beïnvloeden de kwaliteit van het ontwerp van het rioolstelsel.

Om uitspraken te kunnen doen over de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten is het noodzakelijk om meetresultaten te hebben van enkele water op straat gebeurtenissen in meerdere stelsels. Door kalibratie van de modeluitkomsten moet het mogelijk zijn om de gevolgen met betrekking tot water op straat situaties t.g.v. enkele aanpassingen in een stelsel te voorspellen. Door dit voor enkele verschillende stelsels uit te voeren, wordt inzicht verkregen in de waarde van te kalibreren parameters en de noodzakelijke modelcomplexiteit.

Allereerst is een gevalideerd model noodzakelijk: oftewel een model dat alle processen die in werkelijkheid optreden goed beschrijft. Het is mogelijk een model op basis van metingen in een praktijksituatie te valideren, maar hier zijn een aantal nadelen aan verbonden:

1. Metingen in een praktijksituatie brengen hoge kosten met zich mee.

2. Door verstoringen van buitenaf en de complexiteit van het systeem bestaat een aanzienlijke kans dat niet alle (deel) processen worden begrepen. Dit betekent dat de kosten en tijd van de ontwikkeling van een gevalideerd model aanzienlijk worden
3. Metingen kunnen alleen worden verricht in overleg met de beheerder van het stelsel, wat de meetmogelijkheden aanzienlijk vertraagt en beperkt.

Daarnaast is het mogelijk om een gevalideerd model te ontwikkelen met behulp van een schaalmodel. Voordelen hiervan zijn lagere kosten, reductie in de verstoringen van buitenaf en onbeperkte meetmogelijkheden.

In dit onderzoek is een schaalmodel ontwikkeld waarin de optredende stromingsprocessen vrijwel gelijk zijn aan die in de praktijksituatie. Het schaalmodel bestaat uit een lange straat waarvan het bovenstroomse en benedenstroomse deel in helling verstelbaar zijn en waar zijstraten aan kunnen worden toegevoegd zodat een kruising ontstaat. In de straat zijn zeven regenkolken geplaatst die verbonden zijn met een rioolbuis. Het is mogelijk om de benedenstroomse waterstand in het riool en op de straat in te stellen, evenals de toevoer van water aan de straat en het riool.

Om kennis te maken met dit schaalmodel zijn metingen aan stationaire situaties verricht. Met de resultaten hiervan kunnen de belangrijkste processen worden bepaald. Daarnaast kan door kalibratie en verificatie van het schaalmodel inzicht worden verkregen in de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van de modeluitkomsten van water op straat situaties. De kalibratie in het schaalmodel geeft veel inzicht in problemen die kunnen optreden bij kalibratie van een praktijksituatie. De metingen zullen worden geanalyseerd en vergeleken met een ééndimensionale modellering.

1.6 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de stromingsprocessen van hemelwater in een stedelijk gebied besproken. Tevens zal worden ingegaan op de modellering hiervan t.b.v. het ontwerp van rioolstelsels. Verder wordt in dit hoofdstuk bepaald welke processen duidelijk anders zijn tijdens extreme buien met water op straat vergeleken met normale buien. Het resultaat is een analyse van situaties die relevant zijn voor het modelleren van water op straat. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de problematiek van het schaalmodel behandeld waarbij de belangrijkste ontwerpkeuzes van het schaalmodel worden toegelicht. In hoofdstuk 4 worden de afmetingen en uiteindelijke fabricage van de meetopstelling besproken. De meetmethodes die zijn gebruikt worden in hoofdstuk 5 toegelicht. De meetuitkomsten worden in hoofdstuk 6 beschreven en geanalyseerd. Daarnaast worden in hoofdstuk 7 de meetwaarden vergeleken met een ééndimensionale modellering van de waterstroming. De conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek worden besproken in hoofdstuk 8.

2 Modellering van rioolstelsels tijdens water op straat

In dit hoofdstuk worden processen die optreden tijdens normale en extreme buien toegelicht. Vervolgens zal uitgelegd worden hoe deze processen door middel van modellen worden beschreven. Aansluitend hierop zal op enkele tekortkomingen bij gebruik van deze modellen voor extreme buien worden gewezen. Het resultaat van dit hoofdstuk is een destillatie van situaties die belangrijk zijn voor het modelleren van extreme buien. De problematiek die in dit hoofdstuk wordt besproken is van toepassing op gemengde rioolsystemen en op het hemelwaterstelsel van het gescheiden systeem.

2.1 Waterstroming tijdens normale buien

2.1.1 Stroming van hemelwater naar het riool

Hemelwater komt in een stedelijk gebied op verschillende typen oppervlak terecht, te weten:

1. Verhard oppervlak, zoals (daken van) gebouwen en straatoppervlak zoals: straten, trottoirs, parkeerplaatsen en pleinen.
2. Onverhard oppervlak, zoals parken en tuinen.
3. Oppervlakte water, zoals sloten, singels, vijvers en grachten.

Van 1 en 2 bestaan combinaties, te denken valt aan tegelpaden met een open structuur.

Water dat op de daken van gebouwen valt, stroomt via de dakafvoeren (een intern of extern leidingsysteem) en de huisaansluiting naar het riool. Een gedeelte van dit water zal op het dak of in de leidingen achterblijven en uiteindelijk verdampen. Alleen in een slecht functionerend afvoersysteem zal water vanaf dakoppervlak naar andere oppervlakken stromen. Over het algemeen heeft elk gebouw een eigen aansluiting op het rioolstelsel.

Water dat op straatoppervlak valt, stroomt in principe naar het rioolstelsel, maar kan ook:

1. Blijven staan, dit zal in het vervolg berging worden genoemd.
2. Voortijdig verdampen
3. Infiltreren naar het grondwater
4. Wegstromen (run-off)

Enige berging, verdamping en infiltratie naar het grondwater treden altijd op. De hoeveelheid is afhankelijk van de atmosferische omstandigheden, de doorlatendheid van het oppervlak en de grondwaterstand. Het verharde oppervlak is zodanig aangelegd dat water naar de dichtstbijzijnde regenkolle stroomt. In een hellend gebied stroomt het water naar de dichtstbijzijnde, lager gelegen regenkolle. Deze zijn door middel van een korte leiding aangesloten op een rioolbuis. De leiding is in veel gevallen van PVC en heeft een binnendiameter van 10 cm tot 15 cm. Elke regenkolle heeft een eigen aansluiting op het riool. Meestal liggen de regenkolken aan weerszijden van de straat, soms slechts aan één zijde van de straat. Per circa 100 m² verhard oppervlak is één regenkolle geplaatst, wat resulteert in een tussenafstand van 5 tot 20 m voor normale straten. Als water naar andere gebieden stroomt is hoogstwaarschijnlijk een slecht wegdek aangelegd.

Water dat op onverharde oppervlaktes valt zal bij normale regenbuien voor het grootste gedeelte infiltreren in de bodem en/of verdampen. Bij hoge neerslagintensiteiten zal een gedeelte van dit water naar oppervlaktewater of verhard oppervlak stromen.

2.1.2 Stroming door het riool

Over het algemeen ligt in het midden van elke straat een rioolbuis. Deze buis is vaak gemaakt van prefab betonelementen, met een lengte van ongeveer twee meter. Deze zijn onderling verbonden door middel van een mof- en spieverbinding. In een rechte straat wordt minimaal elke 30 m een inspectieput geplaatst, in een straat met veel bochten is deze afstand kleiner. T.p.v. een inspectieput kan het riool worden geïnspecteerd en schoongemaakt.

Ter plaatse van kruisingen van wegen en straten worden rioolbuizen uit meerdere straten vaak gekoppeld op een grotere rioolbuis. Deze koppeling wordt altijd tot stand gebracht in een inspectieput, waar twee of

meer leidingen samenkomen. Water dat in het riool is gekomen stroomt via de rioolbuizen naar een rioolgemaal, vanwaar het water wordt verpompt naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie. In een rioolstelsel zijn vaak ook enkele noodoverstorten aangebracht, die bij zware buien water direct op het oppervlaktewater lozen. Noodoverstorten zijn gebouwd om bij verstoppingen in het riool de wateroverlast op straat te beperken. Daarnaast is het economisch niet haalbaar om buien die eens in de 2 of 5 jaar plaatsvinden geheel te bergen in een stelsel. De piekafvoer van dergelijke buien wordt direct op het oppervlaktewater geloosd. Het rioolwater wat op het oppervlaktewater wordt geloosd is wel sterk verdund.

Een rioolbuis die aan het begin van het stelsel ligt en waarop dus geen andere rioolbuizen zijn aangesloten zal vaak een binnendiameter van slechts 0.30 m hebben. Vlak voor een rioolgemaal kan de diameter echter toenemen tot maximaal 1.50 m.

2.2 Waterstroming tijdens normale buien

Tijdens extreme buien treden in eerste instantie dezelfde stromingsprocessen op als tijdens normale buien, echter doordat op een gegeven moment de waterstand in het riool net onder, of zelfs boven het straatniveau komt te liggen, veranderen de stromingsprocessen significant. Met extreme buien worden buien bedoeld met herhalingstijden van meer dan 2 respectievelijk 5 jaar. Een bovengrens voor de herhalingstijd is moeilijk te geven. Voor het rioleringsvakgebied zijn waarschijnlijk alleen buien met een herhalingstijd tot +/- 100 jaar interessant. Bij grotere herhalingstijden wordt de kans van optreden tijdens de levensduur van een stelsel zeer klein. In eerste instantie worden derhalve situaties onderzocht met een aanzienlijke waterhoeveelheid op straat staat. Als eerste uitgangspunt zal worden uitgegaan van lokale waterstanden van maximaal 20 cm tot 50 cm, dit is ongeveer het moment dat water gebouwen instroomt.

Indien de waterstand in het riool stijgt tot het straatniveau dan zal de instroom vanaf straatoppervlak op een gegeven moment stagneren. Het toegevoerde water blijft dan boven de regenkolk staan en vormt grote plassen. Als dan nog steeds regen valt en er meer water wordt toegevoerd dan zal op een gegeven moment water over de straat wegstromen naar andere delen van het straatoppervlak of andere aangrenzende typen oppervlak. Het water stroomt dan niet meer naar de dichtstbijzijnde regenkolk.

Water afkomstig vanaf daken en gebouwen zal waarschijnlijk nog steeds het riool instromen omdat hier veel druk in de toevoerleidingen kan worden opgebouwd. Dit stromingsproces zal tijdens extreme buien weinig veranderen maar het zorgt er wel voor dat er aanzienlijke waterhoeveelheden naar het riool worden toegevoerd ondanks dat de waterstand in het riool reeds boven straatniveau ligt.

Water dat op onverharde oppervlakken valt zal tijdens buien met een lage intensiteit voor het grootste deel infiltreren in de bodem. Bij buien met een hoge intensiteit zal afhankelijk van de bodemstructuur een aanzienlijk deel van dit water afstromen naar andere plaatsen.

Doordat lokaal de waterdruk in het riool boven het straatniveau komt te liggen zal op sommige plaatsen het drukverschil zodanig worden dat water uit het riool door de regenkolken en in mindere mate door de putdeksels naar de straat stroomt. In sommige gevallen zal de druk zo hoog worden dat riooldeksels omhoog komen, zelfs als deze vastgeklemd zitten.

2.3 Huidige modellering van normale buien

2.3.1 Gescheiden inloopmodel en rioolmodel

Elk rioolmodel kan worden onderverdeeld in drie basiscomponenten:

- Het procesmodel, een beschrijving van de hydraulische processen
- Het geometrische model, een geometrische beschrijving van het systeem dat wordt gemodelleerd.
- Een hydraulische belasting, waarbij onderscheid wordt gemaakt in droogweer condities en regenbuien.

Het procesmodel bestaat meestal uit twee delen:

- Het hydraulisch model waarmee de processen in de riolering worden gesimuleerd.

- De processen die betrekking hebben op de omzetting van neerslagintensiteiten in een run-off, het hydrologisch model.

De uitkomst van het hydrologisch model krijgt het hydraulisch model als belasting. Het hydrologisch model wordt niet beïnvloed door de toestand in het riool.

2.3.2 Hydrologisch model

De processen die invloed hebben op de run-off zijn:

- Bevochtiging van het aardoppervlak
- Infiltratie
- Berging van water in lokale depressies in het oppervlak, bij t.p.v. lokale verzakkingen, kuilen en scheefliggende straatstenen.
- Verdamping van water
- Stroming over het oppervlak

Theoretisch kan elk proces worden beschreven met een deterministisch model. Om dit te realiseren dient een zeer groot aantal parameters, initiële en atmosferische condities bekend te zijn. Het verkrijgen en modelleren hiervan kost veel tijd en geld en is voor praktisch gebruik beperkt mogelijk.

In de huidige praktijk wordt vaak een black-box model gebruikt, waarbij per type oppervlak waarden geselecteerd kunnen worden voor:

- Initiële berging
- Verdampingssnelheid
- Infiltratiecapaciteit
- Afstroomsnelheid

De genoemde parameters kunnen per oppervlaktype verschillen, hierbij kan onderscheid worden gemaakt in platte daken, schuine daken, verhard en onverhard oppervlak. Dit black-box model vertaalt de neerslagintensiteit in een watertoevoer per regenkolk of een groep van regenkolken, geconcentreerd gedacht op één knooppunt in een stelsel. De gebruikte parameters hebben niet allemaal een zuivere fysische betekenis. Met name de afstroomsnelheid is een uiterst dubieuze parameter aangezien deze afhankelijk is van de hoeveelheid water die reeds op straat aanwezig is, maar in het model als onafhankelijk wordt aangenomen.

2.3.3 Hydraulisch model

Voor de simulatie van de waterbeweging in het riool wordt gebruik gemaakt van de Saint-Venant vergelijkingen in ééndimensionale vorm, zie ook verg. 2-1 en 2-2. Aangezien geen analytische oplossing beschikbaar is, worden deze vergelijkingen door middel van discretisatie numeriek opgelost. Ten behoeve van deze beschouwing wordt een rioolstreng opgesplitst in delen waar wrijvingsverliezen optreden en delen waar energieverliezen optreden.

De wrijving wordt meestal met behulp van Colebrook-White in rekening gebracht, zie verg. 2-3, waarin k de Nikuradse wandruwheid van de rioolbuis is. Dit is een zeer eenvoudige benadering, aangezien de wrijvingsverliezen ook afhankelijk zijn van de hoeveelheid zand en slib op de bodem. Tevens is vaak geen uniform snelheidsprofiel ingesteld, waardoor Colebrook-White eigenlijk niet toepasbaar is.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\beta Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial h}{\partial x} + c_f \frac{Q|Q|}{RA} = 0 \quad \text{Impulsbalans} \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A(h)}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} + B(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Massabalans} \quad (2-2)$$

$$C = 18 \log \frac{12R}{k + \frac{\delta}{3.5}} \quad (2-3)$$

$$Q = mA\sqrt{2g\Delta H} \quad (2-4)$$

Waarin:

Q	het debiet	[m ³ /s]
β	kental van Boussinesq	[-]
A	doorstroomd oppervlak	[m ²]
R	hydraulische straal	[m]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]
c_f	wrijvingsconstante	[-]
h	waterdiepte	[m]
C	gladheidcoëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
δ	dikte van de laminaire grenslaag	[m]
k	Nikuradse wandruwheid	[m]
m	empirische coëfficiënt	[-]
ΔH	verschil in waterniveau	[m]

Lokale energieverliezen treden op vele plaatsen op:

- Aansluitingen van buiselementen onderling.
- Inspectieputten, op regelmatige afstand en op locaties waar twee of meer leidingen samengevoegd worden.
- Huisaansluitingen, waar de afvoerleiding van huizen op aangesloten zijn
- Kolkaansluitingen, waar de afvoerleiding van kolken op aangesloten is

T.p.v. inspectieputten is de stroming sterk driedimensionaal en hier is een eendimensionale beschouwing niet geldig. Dit betekent dat de verliescoëfficiënten in een één dimensionale beschouwing afhankelijk zijn van de stromingscondities. Voor de inspectieputten, zijn voor specifieke situaties, verliescoëfficiënten als functie van de waterstand en debietverdeling beschikbaar. Aangezien het aantal verschijningsvormen van inspectieputten legio is en vaak niet gedocumenteerd is wat voor putten gemonteerd zijn, is de verliescoëfficiënt vaak niet bekend.

In praktijksituaties worden de lokale verliezen van aansluitende buizen, huis- en kolkaansluitingen meestal verdisconteerd in de wandruwheid. Gevolg is wel dat de wandruwheid geen zuivere fysische parameter meer is. Vanwege de grote onzekerheid van de lokale verliescoëfficiënt van de inspectieputten, worden de lokale verliezen van de inspectieputten meestal ook verdisconteerd in de waarde voor wandwrijving. Een andere mogelijkheid is om te rekenen met een langere buislengte.

In veel rioolstelsels is er sprake van speciale constructies, zoals noodoverstorten, overlaten, lokale vernauwingen en sluizen. Deze constructies worden veelal apart gemodelleerd, waarbij gebruik gemaakt wordt van eenvoudige ééndimensionale formules, meestal in de vorm van verg. 2-4. De waarde van de parameter in deze vergelijkingen wijken meestal af van de theoretische waarde uit de literatuur omdat niet voldaan wordt aan de eisen voor o.a. de ongestoorde aanstroming en eventuele beluchting.

2.4 Modellering van extreme buien

2.4.1 Gewenste modeluitkomsten

De modellen die gebruikt worden voor het beschrijven van de waterbeweging in het riool zijn niet ontwikkeld voor water op straat situaties. In sommige gevallen worden de modellen, al dan niet met kleine aanpassingen wel voor water op straat situaties gebruikt. Dit is foutief gebruik van deze modellen, alhoewel waarschijnlijk wel een goede indicatie wordt verkregen van de zwakke plekken in het rioolstelsel.

De gewenste modeluitkomsten zijn afhankelijk van het doel dat bereikt dient te worden. Belangrijke informatie bestaat uit:

1. De locaties, tijdsduur en maximale waterhoogtes op straat, i.v.m. het onderlopen van woningen en tunnels
2. De maximale waterdruk in het riool, i.v.m. het loskomen van putdeksels
3. De locaties waar en hoeveelheden van rioolwater die vanuit het riool naar de straat stromen i.v.m. hygiëne en verkeersoverlast.

Om deze informatie uit een model te verkrijgen dient een model gebruikt te worden dat waterstanden op straat, waterdrukken in het riool, de debietverdeling in het riool en op straat en de afvoeren door de regenkolken als functie van tijd en plaats bepaalt.

De nauwkeurigheid waarmee deze gegevens bepaald dienen te worden is sterk afhankelijk van de toepassing. Het gebruik van een nieuw model, wat de mogelijkheid biedt om extreme buien te evalueren, is alleen relevant indien:

- a) Het gebruik van het model een beter ontwerp oplevert dan met de huidige ontwerpmethodieken en modellen mogelijk is.
- b) Deze verbetering van het ontwerp opweegt tegen de extra inspanning oftewel de hogere ontwerpkosten.

Om dit te bepalen zijn twee zaken van belang:

1. Het moet mogelijk zijn om de wateroverlast tijdens water op straat situaties te kwantificeren
2. De modeluitkomsten moeten betrouwbaar en voldoende nauwkeurig zijn.

Kwantificering van wateroverlast kan geavanceerd worden gedaan door een ingewikkelde kostenfunctie op te stellen. Het kan echter ook door gedifferentieerde normstelling toe te passen zoals bijvoorbeeld: het stellen van de eis dat tijdens buien met een herhalingsdij van 10 jaar wel water tussen de trottoirbanden mag blijven staan, maar dat geen rioolwater uit het riool mag stromen naar huizen. Overleg met de beheerder van het stelsel kan ook uitkomst bieden.

Het evalueren van de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten kan door voor een aantal praktijksituaties een model te ontwikkelen dat water op straat berekent als functie van de neerslagbelasting. De berekende overlast moet dan overeenkomen met de werkelijke overlast. Met het ontwikkelde model moeten de gevolgen van enkele ingrepen in het systeem, voor water op straat situaties, goed voorspeld kunnen worden. Ingrepen kunnen veranderingen van buisdiameters zijn, maar ook de hoogtes van noodoverlaten. Evaluatie van de voorspelkracht van het model kan alleen door een vergelijking met metingen.

2.4.2 Verschillen tussen extreme en normale buien

Ondanks dat de huidige modellen niet ontwikkeld zijn voor extreme buien, worden deze soms wel gebruikt, al dan niet met kleine aanpassingen. Deze modellen bevatten een aantal tekortkomingen als ze voor water op straat situaties worden gebruikt:

- Interactie tussen het hydrologisch en het hydraulisch model is niet mogelijk. Hierdoor kan in de modellen geen water uit het riool stromen.
- Water dat op de straat staat kan niet naar andere gebieden stromen.
- De hydraulische weerstand van de regenkolk en de kolkaansluitingen wordt vaak verwaarloosd.

De volgende processen zijn wezenlijk anders.

1. Interactie tussen de stroming in het riool en op straat.
2. Stroming en berging van water op het verharde oppervlak.
3. Stroming en berging op onverhard oppervlak.
4. Stromingsovergangen tussen verschillende oppervlaktypen.

Aangezien een stedelijk gebied voor het grootste deel uit straatoppervlak en daken bestaat zijn punt 1 en 2 waarschijnlijk de belangrijkste processen die gemodelleerd dienen te worden. Door hier mee te beginnen kan geëvalueerd worden of modellering van water op straat überhaupt haalbare kaart is.

2.4.3 Modelontwikkeling

Omdat een ander systeem wordt gemodelleerd is het noodzakelijk om alle stappen voor modelontwikkeling opnieuw te doorlopen. Achtereenvolgens dienen de volgende stappen te worden doorlopen:

1. Modelvalidatie: het opgezette model zal de processen die in werkelijkheid optreden moeten weergeven. Het is niet mogelijk om alle processen die optreden te modelleren, derhalve zal bepaald moeten of de belangrijkste processen worden beschreven. Dit kan worden geëvalueerd aan de hand van metingen.

2. Modelkalibratie: het bepalen van modelparameters zodanig dat de modeluitkomsten de meetwaarden zo goed mogelijk benaderen. Hiermee kan worden geëvalueerd worden hoe nauwkeurig de modelbeschrijving is.
3. Modelverificatie: vergelijken van de modeluitkomsten met metingen voor een onbekende situatie op basis van gekalibreerde modelparameters. Hiermee kan de betrouwbaarheid en voorspelkracht van het model worden geëvalueerd.

Het is moeilijk om al deze stappen vanaf nul voor een praktijksituatie te doorlopen, vanwege:

4. De relatief hoge kosten van metingen in een praktijksituatie
5. De complexiteit van het systeem bestaat er een aanzienlijke kans dat niet alle (deel)processen worden begrepen en de ontwikkeling van een model langdurig of onmogelijk wordt.
6. De beperkte bereidheid van gemeentes om mee te werken aan het meten van extreme buien, al dan niet gecombineerd met het gedeeltelijk onder water zetten van (delen) van stadswijken.

De modelvalidatie zal om deze redenen in een schaalmodel worden onderzocht. Het gebruik van schaalmodellen is mogelijk omdat het praktijkprobleem is te reproduceren op kleinere schaal, terwijl de stromingsprocessen in het schaalmodel bijna gelijk zijn aan die in de praktijk. In een schaalmodel kan tevens ervaring worden opgedaan met het kalibreren. Als kalibreren in een schaalmodel reeds voor problemen zorgt, dan wordt het kalibreren in een praktijksituatie waarschijnlijk een onmogelijke taak.

2.5 Geschikte modelopzet

Voor de modellering van water op straat wordt de volgende modelopzet voorgesteld:

1. De afstroming op straat en de stroming op straat tijdens water op straat situaties zal gemodelleerd worden door een tweedimensionaal stromingsmodel. De afstroomcomponent in het black-box inloopmodel komt te vervallen.
2. Het inloopmodel voor de straat zal alleen initiële berging, infiltratie en verdamping bevatten.
3. Voor de stroming van de straat naar de regenkolle en voor de stroming van het riool naar de straat zal een empirische relatie worden toegepast. Voor elke kolle zal dezelfde, gemiddelde relatie worden toegepast. De relatie is alleen afhankelijk van de waterstand in het riool en op de straat en dient gemeten of gekalibreerd te worden.
4. Inloopmodellen voor andere oppervlakttypen blijven gelijk aan het gebruikelijke model.
5. Voor het rioolmodel zal een ééndimensionaal stromingsmodel worden gebruikt.

Aan deze modelleerwijze liggen een aantal uitgangspunten ten grondslag:

- De stroming op straat is vooral één- of tweedimensionaal
- De stroming in het riool is vooral ééndimensionaal
- De afvoer door de regenkolle is niet afhankelijk van de stroomsnelheid in de rioolbuis en de stroomsnelheid boven de regenkolle.
- Het gebruik van een gemiddelde relatie voor alle regenkolken betekent een kleine afwijking t.o.v. de realiteit.

Het is belangrijk dat door modelvalidatie wordt beoordeeld of met deze modelopzet de belangrijkste processen die in praktijksituaties optreden correct worden beschreven. Indien dit niet zo is, dan zal het model moeten worden verbeterd. Vragen waarop antwoord gegeven dient te worden:

- Hoe nauwkeurig moet de geometrie van de straat in het numeriek model worden toegepast?
- Is het gebruik van een gemiddelde relatie voor de stroming door regenkolle mogelijk, of moet de relatie van individuele regenkolken bekend zijn?
- Kan de stroming in het riool in het geval van grote in- / uitstroom door regenkolken worden gemodelleerd met een ééndimensionaal stromingsmodel?
- Kan de stroming op de straat in het geval van grote in- / uitstroom door regenkolken worden gemodelleerd met een ééndimensionaal / tweedimensionaal stromingsmodel?

2.6 Toetsing van het model

2.6.1 Stroming op de kruising als criterium voor modelvalidatie

Het model zal de belangrijkste processen in een praktijksituatie goed moeten beschrijven. De stroming t.p.v. een kruising is waarschijnlijk het moeilijkst te modelleren. Hier wordt de waterstroming gesplitst of samengevoegd, waarbij tevens overgangen van het stromingstype zoals watersprongen optreden. Dit zijn lastig te modelleren situaties, waar drie dimensionale stroming een belangrijke rol kan spelen. Zodoende is het belangrijk om te bepalen of met een tweedimensionaal stromingsmodel de stroming hier goed wordt beschreven. Als met deze modelleeraanpak de stroming op kruisingen goed beschreven wordt, dan zal voor de meeste andere locaties op straat de modelleeraanpak zeker voldoen. T.p.v. een kruising zal de stroming beïnvloed worden door de in- en uitstroming door regenkolken. Onbekend is hoeveel invloed dit heeft op de stroming op de kruising. Derhalve dient toetsing van het model verricht te worden aan een kruising met een aantal regenkolken.

2.6.2 Bepaling relaties uit model

Hoe de relatie voor o.a. het instroomgedrag t.p.v. de regenkolken eruit ziet is niet bekend. Om deze reden zal in eerste instantie gemeten moeten worden hoe deze relatie eruit ziet. Dit kan in een systeem met een kruising, maar door de complexiteit, wordt het hierin moeilijk om relaties voor de instroom t.p.v. regenkolken te meten. Als eerste stap zal derhalve gekeken worden naar een rechte straat met een aantal regenkolken.

Vervolgstappen betreffen het meten en modelleren van:

- Overgangen van stromingstypen: superkritische stroming naar subkritische stroming en vice versa.
- Subkritische stroming op kruising
- Overgangen van stromingstypen op kruising.

2.7 Vereiste meetsituaties

Met de meetopstelling moet het mogelijk zijn om de volgende situaties in te stellen

1. Straat met een flauw hellende / horizontale bodem (= subkritische helling), met stromingsuitwisseling met het riool
2. Straat waarbij het bovenstroomse gedeelte steil wordt gemonteerd en het benedenstroomse deel flauw hellend of zelfs horizontaal.
3. Straat waarbij het bovenstroomse gedeelte flauw hellend (horizontaal) wordt gemonteerd en het benedenstroomse deel steil.
4. Straat met steil benedenstrooms gedeelte, een horizontaal middendeel en een steil bovenstrooms gedeelte
5. Kruising met steile / flauw hellende straten.

Flauwe hellingen variëren, afhankelijk van de stromingscondities en de wandruwheid van ongeveer 0 tot 1%. Op het bovenstroomse en benedenstroomse deel zijn een aantal regenkolken gewenst, zodat de invloed van deze op de plaats van transitie van waterstroming kunnen worden bepaald. In eerste instantie zal de helling op 0% worden gesteld, hierbij kan veel inzicht worden gekregen in de afwerking van de putjes. Het aantal regenkolken dat toegepast dient te worden dient zodanig te zijn dat voldoende inzicht in, dit aantal dient zo hoog te zijn dat invloed op de stroming in het riool en op straat meetbaar wordt. Het toepassen van inspectieputten is voor dit onderzoek minder van belang, het is immers goed mogelijk om tijdens normale situaties de waterstand in rioolstelsels te voorspellen. Voor het modelleren van water op straat is het dus niet strikt noodzakelijk om inspectieputten in het schaalmodel op te nemen.

3 Ontwerpkeuzes schaalmodel

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste parameters voor het ontwerp van het schaalmodel bepaald. Het uitgangspunt voor dit ontwerp is het meten van stationaire stromingscondities in een rechte straat met 7 regenkolken. In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk wordt de problematiek van het schalen behandeld. In paragraaf twee wordt de keuze voor de schaalfactor vastgesteld. Vervolgens wordt in de derde paragraaf de invloed van de belangrijkste geometrische afmetingen op de stroming bepaald. Per onderdeel wordt een keus voor het schaalmodel gemaakt. De afmetingen van het schaalmodel in paragraaf vier samengevat. In paragraaf vijf wordt ingegaan op de gewenste uitbreidingsmogelijkheid met zijstraten zodat een kruising ontstaat. In de laatste paragraaf wordt kort worden ingegaan op de gewenste meetnauwkeurigheid van debieten.

3.1 Schaalmethode

Het bouwen van een meetopstelling op ware grootte is het meest betrouwbaar en heeft de voorkeur omdat dan geen schaaffecten aanwezig zijn. Een opstelling 1:1 heeft echter een aantal nadelen:

- Het grote ruimtebeslag
- De onhandelbaarheid van elementen
- De relatief hoge kosten.

Praktische en meettechnische eisen vragen daarnaast aanpassingen ten opzichte van een echt rioolsysteem. Bijvoorbeeld de mogelijkheid om in rioolbuizen te kunnen kijken, tracers te kunnen volgen en luchtinsluitingen te achterhalen. Dit is in echte rioolelementen ook mogelijk maar dit vereist veel arbeidsintensief werk voor het maken van kijkgaatjes of hoge uitgaven voor grote transparante rioolbuizen. Een schaalmodel is niet gelijk aan de werkelijkheid, maar heeft wel de voorkeur.

3.1.1 Reproduceren van stromingsprocessen in een schaalmodel

Het gebruik van schaalmodellen is mogelijk omdat het praktijkprobleem is te reproduceren op een veel kleinere schaal terwijl de stromingsprocessen in het schaalmodel gelijk zijn aan die in de praktijk. Deze gelijkheid heeft betrekkingen op meerdere aspecten:

1. Geometrische gelijkvormigheid
2. Kinematische gelijkvormigheid
3. Dynamische gelijkvormigheid etc.

Er zijn hulpmiddelen beschikbaar zoals dimensieloze kentallen die informatie geven over de gelijkvormigheid tussen de werkelijkheid en het schaalmodel. De belangrijkste zijn: het kental van Reynolds, Froude en Weber (verg. 3-1 t/m 3-4).

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gR}} \quad (3-1)$$

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad \text{buisstroming} \quad (3-2)$$

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad \text{vrije oppervlakte stroming} \quad (3-3)$$

$$We = \frac{\rho U^2 l}{\sigma} \quad (3-4)$$

Waarin:

Fr	kental van Froude	[-]
Re	kental van Reynolds	[-]
We	kental van Weber	[-]
U	stroomsnelheid	[m/s]
D	buisdiameter	[m]
h	waterdiepte	[m]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]

l	kromtestraal oppervlak	[m]
ρ	dichtheid vloeistof	[kg/m ³]
σ	grensvlakspanning	[N/m]
ν	kinematische viscositeit vloeistof	[m ² /s]

In het schaalmodel wordt gebruik worden gemaakt van dezelfde vloeistof (water) als in de praktijksituatie. Schaling zonder schaaffecten is dan alleen mogelijk voor een 1:1 schaling. Ervaring heeft geleerd dat het gebruik van schaalmodellen voor andere schaalfactoren desondanks goed mogelijk is. Bij het ontwerp van het schaalmodel moet wel veel aandacht worden besteed aan het vertalen van de optredende processen in de praktijksituatie naar het schaalmodel. Wanneer bijvoorbeeld in de praktijksituatie turbulente stroming aanwezig is dan moet in het schaalmodel in elk geval de mogelijkheid tot het simuleren van turbulente stroming aanwezig zijn. Het belang van turbulente stroming voor de modelvalidatie is dat het moeilijker is om turbulente stroming te modelleren dan laminaire stroming.

Voor de eerder genoemde kentallen is het van belang dat bekend is hoe de stroming zich gedraagt binnen bepaalde bereiken:

- Als het kental van Froude getal kleiner is dan 1 dan is de stroming subkritisch. Voor waarden groter dan 1 is de stroming superkritisch.
- Voor buisstroming is de stroming waarschijnlijk laminair als het kental van Reynolds kleiner is dan 2300 en turbulent voor waarden groter dan 4000. Het werkelijke kental van Reynolds overgang tussen laminair en turbulent is afhankelijk van de voorgeschiedenis en lokale stromingscondities.
- Voor vrije oppervlaktestroming is de stroming waarschijnlijk laminair voor Reynolds waarden van 500 – 1000. De stroming is gegarandeerd turbulent zijn voor waarden groter dan 3000.
- Het Weber getal geeft een indicatie of grensvlakspanning tussen lucht en water grote invloed heeft op de stromingscondities. De effecten van grensvlakspanning zijn verwaarloosbaar voor grote waterdieptes en stroomsnelheden zoals in de praktijksituatie. De stroming in het schaalmodel wordt meer beïnvloed door dit fenomeen dan de stroming in de praktijksituatie. Voor waterdieptes groter dan 1 cm of 2 cm, of turbulente stroming is het effect van grensvlakspanning beperkt. Het is belangrijk om te realiseren dat drogen en bevochtiging van het oppervlak wordt beïnvloed door grensvlakspanning.

3.1.2 Geometrische schaling en Froudeschaling

Voor het ontwerp van het schaalmodel wordt in eerste instantie uitgegaan van geometrisch gelijkvormige schaling van alle dimensies. Vervolgens wordt voor de bepaling van de bijbehorende stroomsnelheden en debieten gebruik worden gemaakt van Froude schaling. Het kental van Froude voor de stroming is in het schaalmodel dan gelijk aan het kental van Froude getal in de praktijksituatie. Als de invloed van de viscositeit wordt verwaarloosd dan zijn bij deze schaalmethode de waterstanden in het schaalmodel gelijk aan die in de praktijksituatie gedeeld door de schaalfactor. In het schaalmodel oefent de viscositeit echter grote invloed uit op de wandwrijving doordat de laminaire grenslaag relatief groter is en doordat bij verandering van het kental van Reynolds het snelheidsprofiel vervormd. Bij toepassing van deze schaalmethode moet aandacht worden gegeven aan de waarde van de Reynolds kentallen. Als deze kleiner worden dan de overgangswaarden van laminair / turbulent stroming dan is de schaalfactor te klein gekozen.

Afwijkingen van de voorgestelde schaalmethode zijn mogelijk zeker omdat het niet gaat om het vertalen van de resultaten van het schaalmodel naar een specifieke praktijksituatie. Het hoofddoel is om de resultaten te gebruiken voor de validatie en kalibratie van een numeriek model. Voor numerieke modellering is het minder belangrijk dat het Reynolds en het Froude getal dezelfde waarde hebben als in de praktijksituatie. Echter de stroming dient wel hetzelfde gedrag te hebben. Dit wordt bereikt door ervoor te zorgen dat de waarde van de kentallen in het schaalmodel in hetzelfde bereik liggen als in de praktijksituatie.

Afgeleide aanvullende eisen:

1. Praktijksituaties met een sterk gekromde verhanglijn moeten in het schaalmodel gesimuleerd kunnen worden.
2. In de praktijk situatie treden overgangen van stromingstype zoals een watersprong en een overgangen van subkritische naar superkritische stroming op. Deze moeten in het schaalmodel ook gerealiseerd kunnen worden.

Andere afwijkingen zijn ook mogelijk bijvoorbeeld door de breedte van de straat extra te verkleinen in verhouding tot de zuivere geometrische schaling. De stroming op een rechte straat blijft bij halvering van de breedte van de straat grotendeels gelijk, voornamelijk één- of tweedimensionale ondiepwaterstroming.

3.2 Maximale schaalfactor

In deze paragraaf wordt afgeleid wat de maximale schaalfactor is op basis van geometrische en Froude schaling. Deze maximale schaalfactor wordt bepaald door de waarde van het kental van Reynolds voor de verschillende elementen in het systeem.

3.2.1 Indicators voor stroming in de praktijk

Stroming in de rioolbuis

De diameter van een rioolbuis varieert in de praktijk van 0.30 m tot 1.50 m. De stroomsnelheden variëren van 0.5 m/s tot 1.5 m/s. In een volledig gevulde buis van 0.4 m bij een stroomsnelheid van 1 m/s is het kental van Reynolds $= 3 \cdot 10^5$. Dit is duidelijk turbulente stroming.

Stroming op de straat

Het simuleren van stroming van water op straat wordt belangrijk wanneer de debieten in dezelfde orde van grootte komen te liggen als de debieten zoals die in het riool voorkomen. Bij afvoeren op straat van 5 l/s of meer is dit het geval. De watervoerende breedte ($\approx$ breedte van de straat) varieert in praktijk situaties van 1 m tot 10 m. Dit betekent dat de ondergrens voor afvoer op straat varieert van 0.5 l/s/m tot 5 l/s/m. Deze waarde is de ondergrens voor significante stroming op straat. Een bovengrens is moeilijk te bepalen maar deze kan enkele orden hoger kunnen zijn.

Voor waarden van Reynolds groter dan 3000 is de stroming gegarandeerd turbulent. Dit betekent turbulente stroming voor afvoeren vanaf 3 l/s/m (watertemperatuur $= 20^\circ\text{C}$) tot 4 l/s/m (watertemperatuur $= 10^\circ\text{C}$). Het optreden van superkritische of subkritische stroming is sterk afhankelijk van de helling/ruwheid / geometrie van het oppervlak en het debiet. Voor de waterdieptes wordt uitgegaan van 5 cm tot 20 cm water.

Stroming door regenkolkaansluitingen

Normaal gesproken stroomt regenwater door regenkolken het riool in. In de meeste gevallen bestaat de regenkolkaansluiting uit een Pvc-buis met een diameter van 0.10 m tot 0.15 m. De ontwerpafvoer van een individueel putje is ongeveer 2.5 l/s. Het kental van Reynolds waarde is dan $2 \cdot 10^4$, dit betekent dat de stroming net turbulent is wanneer water door de regenkolken stroomt. Bij uitstroom ligt het debiet in dezelfde orde van grootte, lokaal kan de uitstroom echter groter zijn vanwege de hoge druk in het riool.

3.2.2 Schaalfactor

Voor het bepalen van de schaalfactor wordt eerst geometrisch gelijkvormige schaling toegepast. Vervolgens wordt voor de bepaling van de stroomsnelheden schaling met behulp van het kental van Froude gebruikt. Dit gaat alleen goed voor kleine schaalfactoren omdat daar de invloed van viscositeit kan worden verwaarloosd. Bij grote schaalfactoren moet worden bepaald of het schaalmodel niet teveel gaat afwijken. Deze beperkingen kunnen worden vertaald in de volgende eisen:

1. Reynoldswaarden in het schaalmodel dienen groter te zijn dan 3000 voor vrije oppervlaktestroming respectievelijk 4000 voor volledig gevulde buizen.
2. Waterdieptes op straat dienen vanwege de invloed van grensvlakspanning minimaal 1 cm tot 2 cm te blijven.

Door gebruik te maken van een minder viskeuze vloeistof is het mogelijk om dezelfde Reynolds waarden in het schaalmodel te handhaven als in het praktijkmodel. Dit is alleen mogelijk door het gebruik van een andere vloeistof of een verhoging van de temperatuur. Omdat deze vloeistoffen meestal gevaarlijk, vluchtig, duur en soms agressief zijn, is een andere vloeistof geen optie. Verhoging van de temperatuur is maar beperkt mogelijk omdat bij hoge temperaturen de vloeistof snel verdampt. Het veranderen van de viscositeit is niet praktisch en niet noodzakelijk.

Geometrische gelijkvormigheid vereist dat alle lengteschalen inclusief de Nikuradse wandruwheid (k) met de gekozen schaalfactor worden verkleind. Als vervolgens Froude schaling wordt toegepast dienen de wrijvingsverhangen bij Froude geschaalde afvoeren gelijk te zijn aan die van de praktijksituatie. Wanneer het wrijvingsverhang in het schaalmodel gelijk dient te zijn aan het verhang zoals deze zich in de praktijk voordoet dan is een gelijke waarde voor de Chezy gladheidcoëfficiënt noodzakelijk. In het geval van viskeuze invloeden betekent dit dat k sneller moet afnemen dan de schaalfactor omdat de viskeuze sublaag (δ) een relatief belangrijk deel van de ruwheid bepaalt. Dit betekent een afwijking van de schaalmethode. De invloed van deze afwijking dient derhalve te worden onderzocht. Dit kan door gebruik te maken van vergelijking 3-5 t/m 3-8.

$$i_w = \frac{u^2}{C^2 R} \quad (3-5)$$

$$C = 18 \log \frac{12R}{k + \frac{\delta}{3.5}} \quad (3-6)$$

$$\delta = \frac{11.6\nu}{u_*} \quad (3-7)$$

$$u_* = \sqrt{g R i_w} \quad (3-8)$$

Waarin

i_w	wrijvingsverhang	[m/m]
u	gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
u_*	schuifspanningsnelheid	[m/s]
R	hydraulische straal	[m]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]
C	gladheidcoëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
δ	dikte van de laminaire grenslaag	[m]
k	Nikuradse wandruwheid	[m]

Wanneer viscositeitseffecten worden verwaarloosd en alle dimensies eerst geometrisch en vervolgens de stroomsnelheden Froude worden geschaald dan geeft dit de verhoudingen tussen praktijksituatie en schaalmodel die in tabel 3-1 staan. Deze verhoudingen kunnen worden afgeleid uit verg. 3-1, 3-2 en 3-5.

Tabel 3-1: Verhoudingsfactoren voor afmetingen en stromingsparameters als functie van de schaalfactor.

Lengte [m]	$L_{\text{praktijk}} = L_{\text{schaalmodel}} * sf$
Stroomsnelheid [m/s]	$U_{\text{praktijk}} = U_{\text{schaalmodel}} * (sf)^{1/2}$
Specifiek debiet [m ² /s]	$q_{\text{praktijk}} = q_{\text{schaalmodel}} * (sf)^{3/2}$
Debiet [m ³ /s]	$Q_{\text{praktijk}} = Q_{\text{schaalmodel}} * (sf)^{5/2}$
Chezy [m ^{1/2} /s]	$C_{\text{praktijk}} = C_{\text{schaalmodel}}$
Reynolds [-]	$Reynolds_{\text{praktijk}} = Reynolds_{\text{schaalmodel}} * (sf)^{3/2}$

sf = Schaalfactor

In tabel 3-2 staan de resultaten van geometrische schaling gevolgd door Froude schaling voor verschillende schaalfactoren. Zoals in de tabel is te zien is het schalen geen triviaal probleem; door vergroting van de schaalfactor gaat de stroming op de straat zich zeer snel laminair gedragen.

Tabel 3-2: Het Reynolds getal als functie van de schaalfactor gebaseerd op geometrische en Froude schaling toegepast op de waarden voor debiet zoals in paragraaf 3.2.1. Hierbij is voor de viscositeit uitgegaan van water van 10°C. Laminaire stroming treedt in het schaalmodel op voor schaalfactoren hoger dan 5 en in de regenkolkaansluitingen voor schaalfactoren van 3 en hoger. Bij de vetgedrukte en onderstreepte waarden is de stroming mogelijk laminair.

Schaalfactor	Rioolbuis		Straat		Regenkolk aansluiting	
	Debiet [l/s]	Reynolds [-]	Debiet [l/s/m]	Reynolds [-]	Debiet [l/s]	Reynolds [-]
Praktijksituatie	126.0	3.0E+05	33.0	30000	2.5E+00	17000
1:2	22.3	1.1E+05	11.7	10607	4.4E-01	6010
1:3	8.1	5.8E+04	6.4	5774	1.6E-01	<u>3272</u>
1:4	3.9	3.8E+04	4.1	3750	7.8E-02	<u>2125</u>
1:5	2.3	2.7E+04	3.0	2683	4.5E-02	<u>1521</u>

Vanwege de beperkte ruimte en beschikbaar budget heeft een hoge schaalfactor de voorkeur. De grootste nadelen van een 1:5 opstelling is dat de stroming op straat en in de regenkolkaansluitingen laminair is. Het feit dat de stroming in de regenkolk laminair is wordt als een minder belangrijk probleem beschouwd. Bij laminaire stroming door de kolk is het snelheidsprofiel meer parabolisch en het wrijvingsverlies onafhankelijk zijn de wandruwheid. Door nu licht af te wijken van de geometrische en Froude schaling kan wel worden voldaan aan alle eisen:

1. De afvoer op de straat wordt enigszins verhoogd tot een niveau waar turbulente stroming optreedt.
2. De waterstanden op straat zullen iets worden verhoogd. Toepassing van een schaalfactor van 1:5 betekent waterstanden van 0.01 m tot 0.04 m. Deze 0.01 m kan problemen veroorzaken op de stroming door invloed van de grensvlakspanning.

Het schaalmodel is door deze aanpassingen niet over het gehele bereik van situaties in de praktijk gelijkvormig aan de praktijksituatie zijn. Echter voor hoge afvoeren en waterstanden zijn de stromingsprocessen in het schaalmodel vrijwel gelijkwaardig aan die in de praktijksituatie. Wordt in het schaalmodel bij 20°C een situatie ingesteld waarbij de stroming op straat gelijk is aan 3 l/s/m en de waterdiepte 0.04 m dan is dit gelijkwaardig aan een waterdiepte op straat van 0.20 m en een afvoer van 33.5 l/s/m bij een temperatuur van 10°C.

3.3 Invloed geometrische afmetingen meetopstelling

Belangrijk voor het bouwen zijn de geometrische afmetingen van het ontwerp. Het ontwerp beïnvloedt de meetnauwkeurigheid en het systeemgedrag. Om dit goed te kunnen ontwerpen is inzicht nodig in de invloed van de verschillende parameters op de stroming.

Daarnaast dienen voor de praktische uitvoering de volgende vragen te worden beantwoord:

- Hoe gedetailleerd moeten regenkolken en regenkolkaansluitingen worden nagemaakt?
- Moet een relatief kleine of een grote buis worden toegepast?
- Wat voor bodemhellingen moeten worden ingesteld voor de straat en het riool?
- Wat voor ruwheid is noodzakelijk voor het riool en de straat?

In praktijksituaties kunnen geometrische dimensies zoals buisdiameter, straatbreedte etc. sterk verschillen. Een adequate selectie zal gemaakt worden van de toe te passen afmetingen in het schaalmodel zodanig dat zoveel mogelijk informatie uit het schaalmodel wordt verkregen.

3.3.1 Parameters:

Er zijn zeer veel ontwerpvariabelen die invloed uitoefenen op de stromingsprocessen en diensgevolge de meetresultaten. In tabel 3-3 zijn de belangrijkste genoemd met een minimale waarde en een maximale waarde in de praktijksituatie. De minimale / maximale waarden voor Nikuradse ruwheid zijn geschatte waarden.

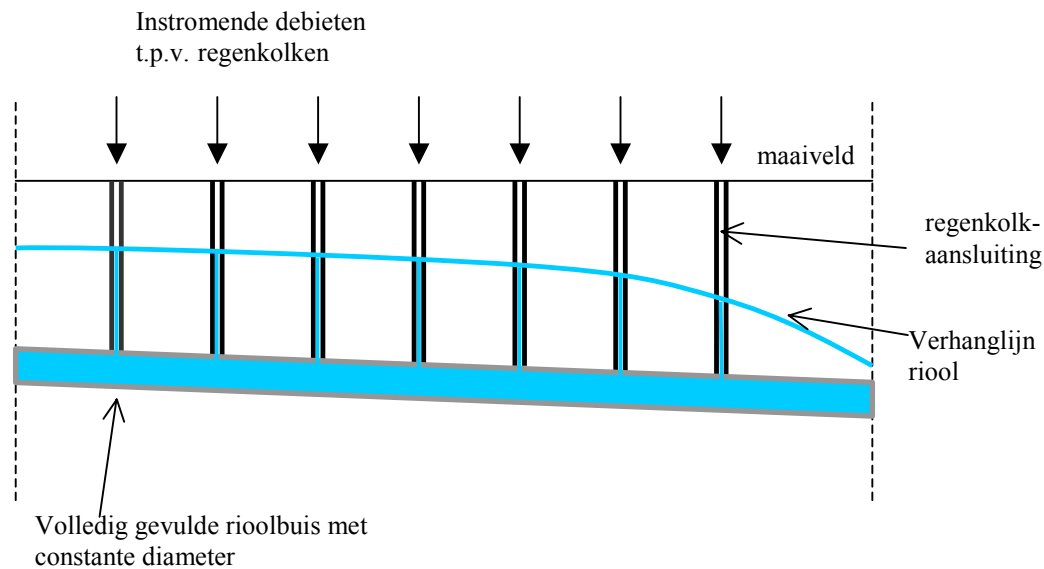
Tabel 3-3: parameters die de afmetingen bepalen van de meetopstelling

Beschrijving	Ondergrens	Bovengrens
Geometrie		
De diameter van de rioolbuis	0.3 m	1.5 m
De diameter van de regenkolkaansluiting	0.10 m	0.15m
De lengte van de regenkolkaansluiting	2 m	6 m
De instroomopening van de regenkolk	0.005m ²	0.05m ²
De breedte van de straat	2 m	10 m
De gemiddelde helling van de straat in langsrichting	0%	10%
De afstand tussen twee opeenvolgende regenkolken	5 m	20 m
De lengte van het kruisingsvlak	4 m	10m.
Waterstanden / afvoeren		
Waterstand op straat	0	0.2m
Afvoer op straat	0	40 l/s/m
Debiet door regenkolk (instroom)	0	2.5 l/s
Debiet door regenkolk (uitstroom)	0	5 l/s
Stroomsnelheid in volledige gevulde rioolbuis	0.5 m/s	2 m/s
Geometrie gerelateerde onderwerpen		
Nikuradse ruwheid van rioolbuis, meestal gemaakt van beton met sediment op de bodem	0.002 m	0.02m
Nikuradse ruwheid van de straat, van glad/ruw beton / asfalt tot scheef liggende klinkers.	0.002 m	0.02m
Nikuradse ruwheid van kolkaansluiting, meestal een PVC buis	0.0001m	0.002 m

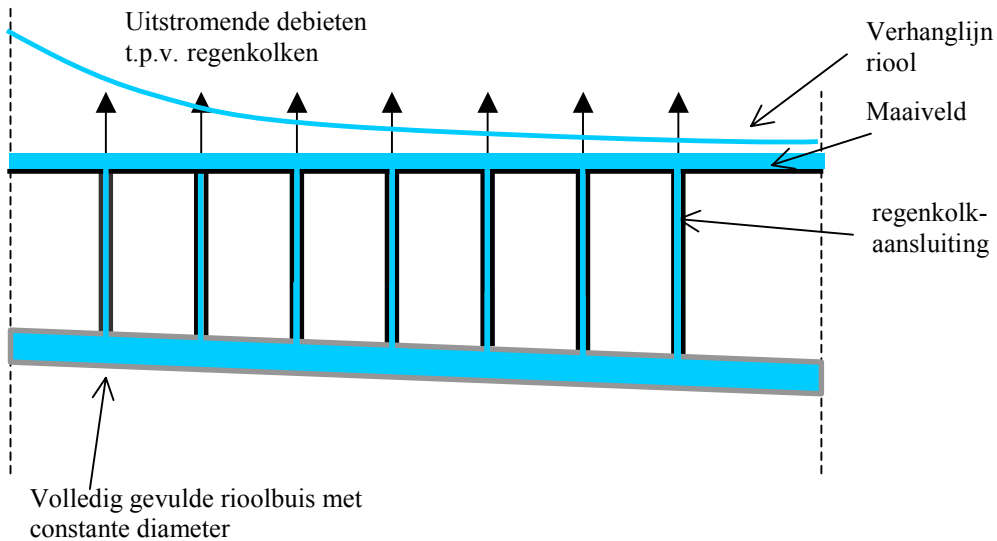
3.3.2 Diameter rioolbuis

Het doel van deze paragraaf is inzicht geven in de invloed van de diameter op de stromingssituatie in het riool.

In figuur 3-1 is een schematisatie van het riool getekend bij situaties met stroming van de straat naar het riool. Bij verwaarlozing van de lokale vertragsverliezen kan het energieverhang worden beschreven met de vergelijking van het evenwichtsverhang (verg. 3-5). Aan de benedenstroomse zijde is het debiet groter en daardoor het wrijvingsverhang ook. In figuur 3-2 staat de situatie geschetst als water van het riool naar de straat stroomt. Het verschil tussen deze twee situaties is groot bij toepassing van een kleine rioolbuis. Dit betekent dat de verschillen tussen in- en uitstroom goed zijn te meten. Bij een grote buis is dit verschil moeilijker te meten



Figuur 3-1: Energieverhanglijn van het riool met stroming van straat naar het riool. De verhanglijn is overdreven getekend.

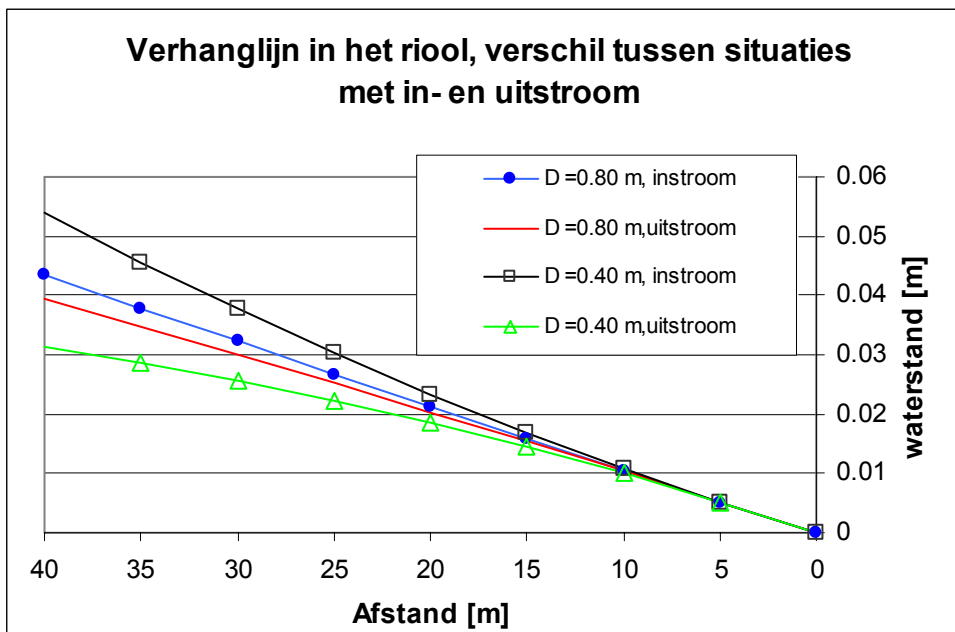


Figuur 3-2: Energieverhanglijn van het riool met stroming van het riool naar de straat. De verhanglijn ligt boven het straatniveau en is overdreven getekend.

Bij gebruik van een grote buis is alleen bij toepassing van veel regenkolken een duidelijk verschil te zien tussen de twee situaties. Veel regenkolken betekent een grotere en duurdere opstelling. Ter illustratie zal een buis met een diameter van 0.40 m met een rioolbuis met een diameter van 0.80 m worden vergeleken. De resultaten hiervan staan in figuur 3-3. Uit deze figuur blijkt dat het toepassen van een kleine buis grote verschillen tussen in- en uitstroom betekent

Vertaling naar het schaalmodel

Als de invloed van de viscositeit wordt verwaarloosd zijn in het schaalmodel de verhanglijnen even steil. De verhanglijn wordt wel beïnvloed door de viscositeit maar het verschil ten gevolge van de keuze voor de buisdiameter blijft vergelijkbaar. In het schaalmodel is een buisdiameter van $0.40 \text{ m} / 5 = 0.08 \text{ m}$ toegepast.



Figuur 3-3: Verloop van de energieverhanglijn in het riool, vergelijking van situaties met in- en uitstroom van water door de regenkolken. Dit is gedaan voor een buis van 0.40 m en een buis van 0.80 m. De berekening is gebaseerd op verg. 3-5 en 3-6 waarbij de lokale verliezen worden verwaarloosd. Andere uitgangspunten in de berekening: h.o.h. afstand kolken is 5 m. Wandruwheid $C=50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Het debiet voor de kleine buis is op 64 l/s gesteld, bij gelijk wrijvingsverhang benedenstrooms is het debiet in de grote buis dan 362 l/s. Duidelijk is te zien dat voor de kleine buis de verschillen tussen in- en uitstroom groter zijn.

3.3.3 Geometrisch geschaalde ruwheid of toepassing van transparante buis

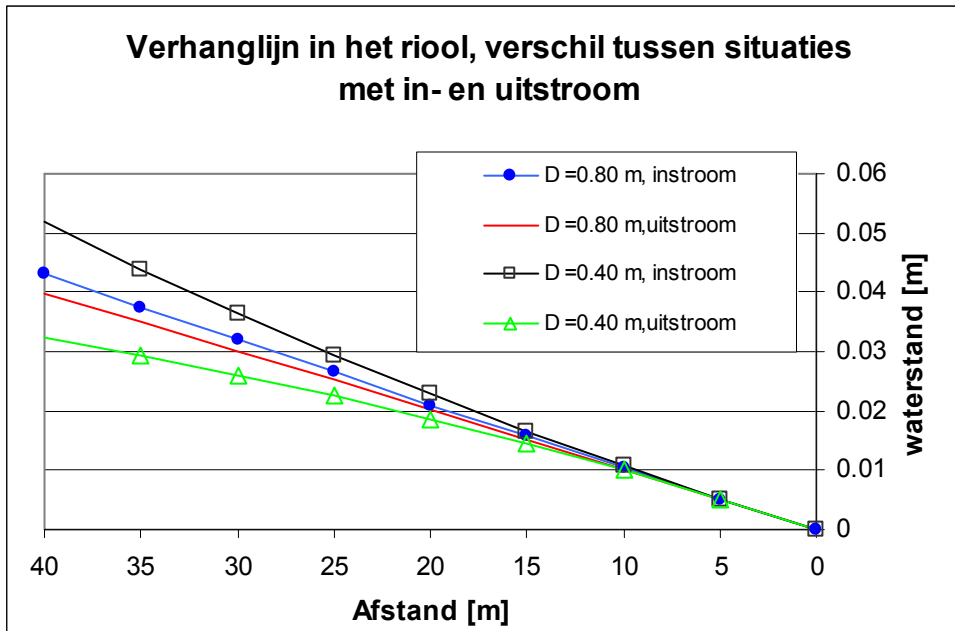
In deze paragraaf wordt bepaald wat de invloed van de ruwheid van de rioolbuis op de stroming is. Tevens wordt bepaald of het toepassen van een transparante buis mogelijk is en wat voor gevolgen dit heeft voor de stroming.

De Nikuradse wandruwheid in een rioolbuis varieert in praktijksituaties van 1.5 mm voor nieuwe schone buizen tot 20 mm voor oude buizen met sediment op de bodem. Voor een buis met een diameter van 0.40 m ligt bij gemiddelde stromingscondities de waarde van de Chezy gladheidcoëfficiënt tussen $32 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $52 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

Wanneer viskeuze effecten worden verwaarloosd dan moet de Nikuradse wandruwheid evenredig met de schaalfactor worden verkleind. Dit betekent een Nikuradse wandruwheid van 0.3 mm tot 4 mm. Wordt nu de Chezy waarde bepaald dan blijkt deze te variëren tussen $32 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $49 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. De buis wordt bij voornamelijk kleine waarden van k bij schaling minder glad. In een schaalmodel moet om viskeuze effecten te compenseren de k -waarde iets minder dan met de schaalfactor worden verkleind. Het effect blijft bij de toegepaste schaalfactor beperkt.

Het gebruik van een transparante rioolbuis van acrylaat is vanuit praktische overwegingen prettig. Kleurstoffen kunnen worden gevolgd en luchtinsluitingen kunnen worden gedetecteerd. Echter de wandruwheid van acrylaat ($k = \pm 0.1 \text{ mm}$) is kleiner dan volgens geometrische schaling gewenst is. Wanneer in het schaalmodel een transparante rioolbuis wordt gebruikt met een Nikuradse wandruwheid van 0.1 mm dan is $C = 58 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ (in het schaalmodel). Doordat de wandruwheid afneemt worden de verschillen tussen in- en uitstroomcondities kleiner. Tevens wordt de verhanglijn minder steil. Dit heeft gevolgen voor de hoeveelheid water die uitstroomt.

Door het debiet in de rioolbuis enigszins te verhogen wordt de verhanglijn in een gladde buis net zo steil als voor een ruwe buis. Het verschil tussen in- en uitstroom blijft kleiner echter bij toepassing van een kleine buis is dit verschil nog steeds meetbaar. Hieruit kan geconcludeerd worden dat een transparante buis toegepast kan worden. In figuur 3-4 is de situatie met verhoogd debiet en een hogere C-waarde getekend.



Figuur 3-4: Energieverhanglijn bij toepassing van $C = 58 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. De resultaten zijn op basis van dezelfde berekening als bij figuur 3-3 verkregen. Door verhoging van het debiet is het benedenstroomse verhang gelijk als bij figuur 3-3. Het debiet in de buis van 0.40 m is nu gelijk aan 71 l/s en in de buis van 0.80 m gelijk aan 402 l/s. Het bovenstroomse verschil in energieniveau tussen de twee situaties is iets kleiner geworden.

Vertaling naar het schaalmodel

Er zal een buis van acrylaat worden toegepast.

3.3.4 Lokale verliezen in het riool

Het doel van deze paragraaf is inzicht geven in de verhouding tussen lokale energieverliezen en wrijvingsverliezen in het riool. Dit geeft aan waarop gelet moet worden bij het meten.

De lokale verliezen t.p.v. regenkolken kunnen worden bepaald met coëfficiënten uit de literatuur. In Miller(1971) worden grafieken gegeven waarmee de waarde van deze coëfficiënten kan worden bepaald. Miller(1971) heeft deze coëfficiënten bepaald voor Reynoldswaarden die in dezelfde orde liggen als de praktijk situatie van het riool. In Bijlage 2 staan de belangrijkste bladzijden uit Miller(1971) die gebruikt worden om de lokale verliezen te bepalen. In hoofdstuk 7 worden de coëfficiënten uitgebreid behandeld waar ze worden gebruikt voor de modellering van de stroming in het riool.

Bij een rioolbuis van 0.40 m diameter en een kolkaansluiting met een diameter van 0.10 m is de verhouding van oppervlaktes van de regenkolkaansluiting en de rioolbuis gelijk aan 0.06. Bij een debiet van 64 l/s door een rioolbuis van 0.40 m en een debiet door de regenkolk van 7 l/s is de verliescoëfficiënt voor stroming van straat naar het riool ± 0.2 (Miller(1971), grafiek 5.2.4). De verliescoëfficiënt voor stroming van het riool naar de straat is ± 0.015 (Miller(1971), grafiek 5.3.3). Het energieverlies wordt bij stroming van straat naar het riool dan ongeveer 2.6 mm. Bij stroming van het riool naar de straat wordt dit 0.2 mm. Bij toepassing van 7 regenkolken wordt het energieverlies voor stroming van straat naar het riool ongeveer 18 mm en bij stroming van het riool naar de straat 1.4 mm. Het totale wrijvingsverschil volgt uit figuur 3-3, dit is gemiddeld 40 mm. Hieruit volgt dat de lokale verliezen niet te verwaarlozen zijn t.o.v. de

wrijvingsverliezen. Uit de metingen zal een duidelijk verschil in de verhanglijn bij stroming van het riool naar de straat t.o.v. de verhanglijn bij stroming van de straat naar het riool naar voren moeten komen.

Gevolgen voor het schaalmodel

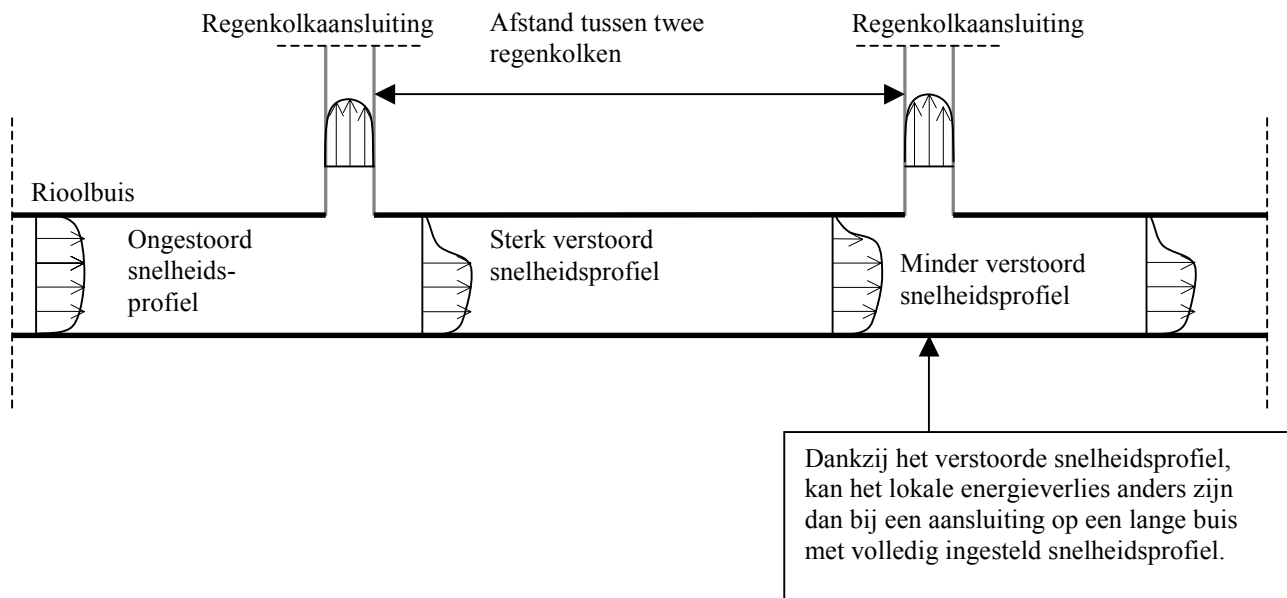
De lokale verliezen zijn niet te verwaarlozen t.o.v. de wrijvingsverliezen. Bij het meten in het schaalmodel zal hier rekening mee moeten worden gehouden.

3.3.5 Afstand tussen twee regenkolkaansluitingen

Bij gelijke debieten door de regenkolken leidt een kleinere afstand tussen regenkolkaansluitingen tot een vergroting van de lokale verliezen ten opzichte van de wrijvingsverliezen (zie ook paragraaf 3.3). Een tweede orde effect bestaat uit de mogelijkheid dat de regenkolken invloed op elkaar uitoefenen doordat het snelheidsprofiel wordt verstoord. In figuur 3-5 is dit toegelicht met behulp van een schematisatie van de optredende stroming. De verhouding tussen de afstand tussen twee aansluitingen en de buisdiameter varieert voor een kleine buis (0.40 m) van 12 tot 50. De afstand waarover een snelheidsprofiel zich instelt is een factor 20 tot 40 keer de diameter. Dit effect kan zich dus manifesteren. Derhalve is het verstandig de afstand niet kleiner te maken dan in praktijksituaties optreedt.

Gevolgen voor het schaalmodel

In de praktijksituatie is de minimale afstand tussen regenkolken 5 m. In het schaalmodel 1:5 betekend dit een minimale afstand tussen regenkolken van 1 m.



Figuur 3-5: Schematisatie van de stroming in de rioolbuis t.p.v. de regenkolkaansluitingen

3.3.6 Breedte van de straat

Het doel van deze paragraaf is om inzicht te geven in de invloed van de breedte van de straat op de stromingssituatie.

Als de breedte van de straat wordt verkleind dan blijft de stroming vrijwel gelijk voornamelijk één- of tweedimensionaal. Bij een gelijk aantal regenkolken is bij een kleine breedte het verschil tussen situaties met in- en uitstroming groter. Het wordt dan eenvoudiger om verschil tussen situaties met in- en uitstroom te meten. Het lokale energieverlies wordt bij kleine breedtes ook groter derhalve is een kleine breedte waarschijnlijk moeilijker te modelleren dan grote breedtes. Kleine stroomvoerende breedtes zijn relevant omdat kleine stroomvoerende breedtes in praktijksituaties ook optreden.

$$c_f = \frac{g}{C^2}$$

(3-9)

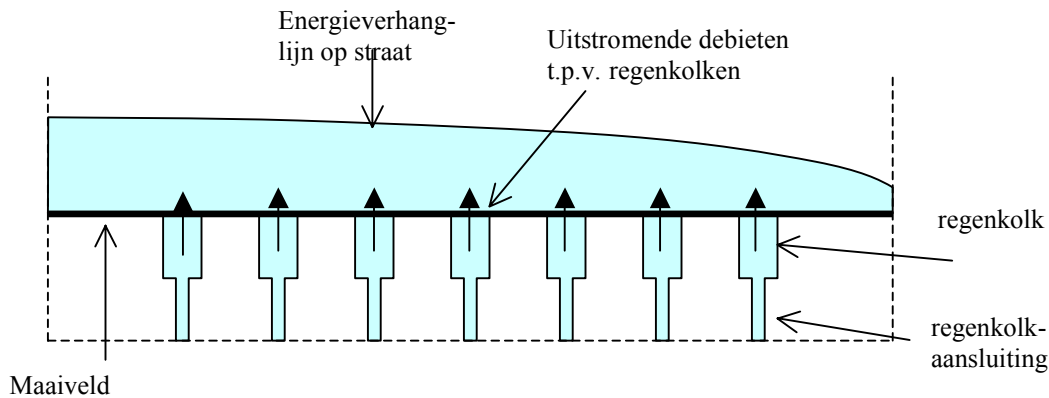
Waarin

c_f	Wrijvingscoëfficiënt	[-]
g	Gravitatieconstante	[m ² /s]
C	Gladheidcoëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]

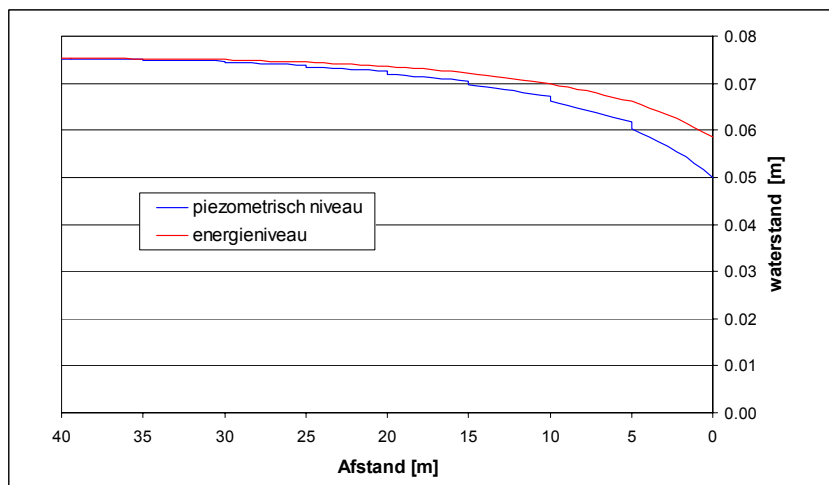
Om het voorgaande toe te lichten is een berekening gemaakt van de verhanglijn op basis van vergelijking 3-13 en vergelijking 3-9 waarin het verband tussen c_f en C staat. In figuur 3-6 is een schematisatie gemaakt van de situatie. In figuur 3-7 staat de situatie op straat voor stroming van het riool naar de straat. In figuur 3-8 staat de situatie op straat voor stroming van de straat naar het riool. Deze berekening is gemaakt op basis van een breedte van 1.0 m. Duidelijk is te zien dat de verhanglijnen duidelijk verschillen. Dit betekent dat bij deze breedte een duidelijk verschil is te meten.

Vertaling naar het schaalmodel

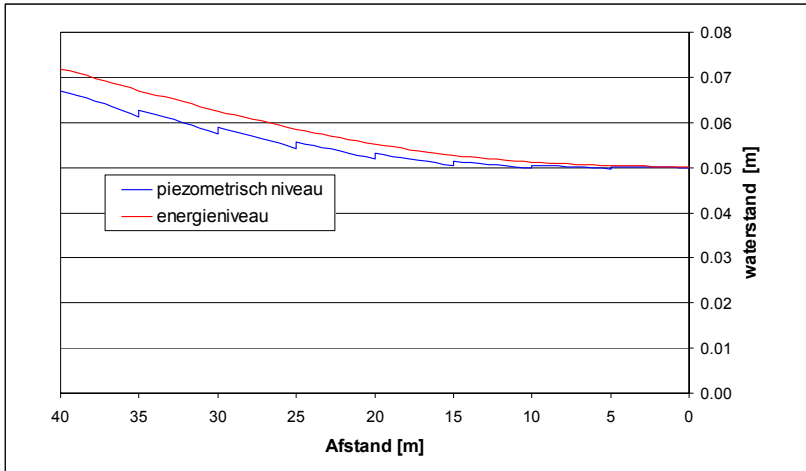
Bij een maximale waterdiepte op straat in het schaalmodel van 4 cm tot 5 cm is de invloed van wandeffecten op de stroming door de putjes verwaarloosbaar bij een breedte van ongeveer 25 cm. Bij deze breedte zijn duidelijke verschillen tussen in- en uitstroom te meten, iets minder dan in het voorbeeld hiervoor maar nog steeds significant.



Figuur 3-6: Schematisatie situatie op straat bij uitstroming van water uit het riool naar de straat.



Figuur 3-7: Stroming van het riool naar de straat bij een breedte van 1.0 m. Het debiet door de kolken is 2.5 l/s en het bovenstrooms debiet is 3 l/s/m, voor de wandruwheid wordt uitgegaan van $c_f = 0.006$.



Figuur 3-8: Strooming van de straat naar het riool bij een breedte van 1.0 m. Het debiet door kolken is 2.5 l/s. Het benedenstrooms debiet is 3 l/s/m en $c_f=0.006$.

3.3.7 Lokale verliezen op straat

Lokale verliezen op straat zijn ten behoeve van het ontwerp niet bepaald. Ze bestaan echter wel aangezien een kleine breedte wordt toegepast. Uit de meetresultaten zal blijken of deze significant zijn.

3.3.8 Ruwheid van de straat

Het doel van deze paragraaf is inzicht geven in de invloed van de bodemruwheid van de straat op de strooming.

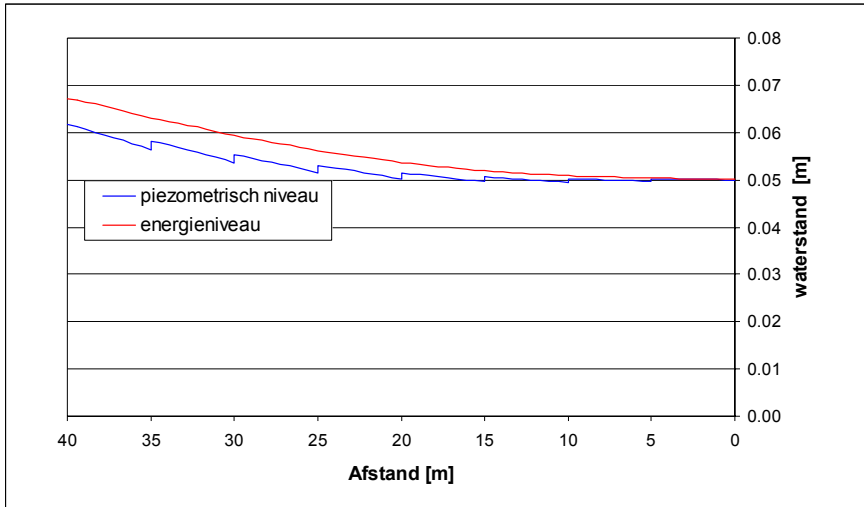
De Nikuradse ruwheid van de straat kan sterk variëren van ± 1 mm tot ± 10 mm voor nieuw glad wegdek respectievelijk slecht oud beton / straatklinkers. Turbulente strooming treedt waarschijnlijk op bij waterdieptes vanaf 5 cm. In praktijksituaties bestaan ook kleinere waterdieptes maar vaak is dan ook sprake van laminaire strooming waarbij praten over ruwheid niet relevant is. In tabel 3-4 staat de waarde van C als functie van de genoemde waterdieptes en k-waarden. Wordt de ruwheid uitgedrukt in c_f dan varieert deze van 0.003 tot 0.0095. In figuur 3-9 is voor $c_f=0.004$ de verhanglijn strooming van straat naar riool getekend. Als deze figuur wordt vergeleken met figuur 3-8 dan is te zien dat de verhanglijn minder steil is en dat de verhanglijn nog steeds meetbaar blijft. Voor het numerieke model maakt het weinig uit wat de waarde van c_f is.

Tabel 3-4: Bodemruwheid uitgedrukt in C als functie van de waterdiepte en de Nikuradse wandruwheid. De invloed van de laminaire grenslaag op C is verwaarloosd.

	k = 1 mm	k = 10 mm
Diepte =0.05m	50 m ^{1/2} /s	32 m ^{1/2} /s
Diepte =0.20m	60 m ^{1/2} /s	43 m ^{1/2} /s

Vertaling naar het schaalmodel

Voor de bodemruwheid kan een c_f van 0.003 tot 0.010 worden toegepast. Om grote verschillen tussen in- en uitstroom te meten dient een hoge waarde voor c_f geselecteerd te worden. Bij een lagere waarde van c_f blijven de verschillen ook nog aanzienlijk.



Figuur 3-9: Stroming van de straat naar het riool bij een breedte van 1.0 m. Het debiet door kolken is 2.5 l/s en het benedenstrooms debiet is 3 l/s/m, $c_f=0.004$.

3.3.9 Superkritische helling straat

Bij lange steile ($i_w > c_f$) hellingen treedt superkritische stroming op. Dit is reeds bij hellingen van 1% tot 2% mogelijk. In het geval van superkritische hellingen in praktijksituaties betekend een waterstand van 1 cm tot 2 cm een grote afvoer. Toekomstige experimenten met superkritische stroming hebben hierdoor extra aandacht nodig.

3.3.10 De vorm van de regenkolle en inlaatrooster

De stroming naar / in een regenkolle valt bij vrije instroming zonder tegendruk in de regenkolle. Twee verschillende instroomsituaties zijn mogelijk:

- 1) Geen water boven de regenkolle, de stroming lijkt dan op de stroming bij een overlaat
 - 2) Wel water boven de regenkolle, de stroming lijkt dan op de stroming bij een verdronken overlaat
- Het is mogelijk om een regenkolle gedetailleerd na te maken. Dit is echter zeer arbeidsintensief werk en het introduceert een aantal problemen. De inlaatopeningen in een echte regenkolle zijn ± 12 cm lang bij ± 3 cm breed. In een schaalmodel 1:5 betekent dit een opening van 24 mm bij 6 mm. Met deze afmeting zullen luchtinsluitingen en grensvlakspanning problemen veroorzaken. Om deze reden wordt besloten dit rooster geheel weg te laten. Dit is een aanpassing van het systeem, echter beide genoemde instroomsituaties blijven optreden.

De vorm van de regenkolle is minder belangrijk of deze rond of vierkant is maakt weinig uit. Gewenst is een systeem met weinig of geen luchtinsluitingen. Dus een opening die weinig lucht vanaf de straat laat binnenkomen maar makkelijk wel makkelijk lucht uit laat stromen. In plaats van een aansluiting aan de zijkant van de regenkolle wordt derhalve de aansluiting in de bodem van de regenkolle gemaakt.

Als het rooster wordt weggelaten dan is de diameter van de inlaatopening in het schaalmodel relatief groter ten opzichte van de praktijksituatie. Daarom wordt in het schaalmodel een iets smallere regenkolle gekozen van 5 cm tot 6 cm binnendiameter. De lengte wordt geometrisch geschaald: 1 m hoogte wordt 20 cm.

Resultaten voor schaalmodel

Cilindervormige regenkolle met een lengte van 20 cm met een diameter van 5 cm tot 6 cm zonder rooster en / of gestroomlijnde instroomopening.

3.3.11 Diameter kolkaansluiting

De diameter van de kolkaansluiting is minder belangrijk, de drukval ten gevolge van wrijving is zeer beperkt en hierbij maakt het weinig uit welke diameter wordt toegepast. Bij toepassing van geometrische

schaling ligt de diameter in het schaalmodel tussen 20 en 30 mm. In dit geval wordt gekozen voor slang van 25 mm inwendig.

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3-10)$$

$$i_w = f \frac{u^2}{2gD} \quad (3-11)$$

Waarin

i_w	wrijvingsverhang	[m/m]
f	wrijvingscoëfficiënt	[-]
u	de gemiddelde stroomsnelheid in de buis	[m/s]
D	diameter van de buis	[m]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]

Ter illustratie het volgende voorbeeld:

In de praktijk is de diameter van een regenkolkaansluiting 12cm. geometrisch geschaald betekent dit 2.4 cm. Een debiet van 2.5 l/s in de praktijksituatie betekent in het schaalmodel 0.045 l/s. Het Reynolds getal voor de praktijk is dan 17000 en in het schaalmodel slechts 1500. Voor de praktijksituatie wordt uitgegaan van een C (Chezy) van 45 m^{1/2}/s. Het energieverlies ten gevolge van de wrijving is voor een leiding van 3 m dan 2.1 mm. In het schaalmodel is de stroming laminair, verg 3-9 is dan toepasbaar. Voor het schaalmodel wordt het energieverlies dan 0.5 mm. De verhouding hiertussen is 4.2, bij grotere debieten neemt de wrijvingscoëfficiënt voor laminaire stroming echter af en hierdoor wordt deze factor groter dan 5. Daarnaast zijn de lokale verliezen in een echte aansluiting veel groter, terwijl deze in het schaalmodel klein zijn.

3.3.12 De lengte van de regenkolkaansluiting

De bijdrage van de lengte van de regenkolk verbinding aan de hydraulische drukval over een regenkolk is beperkt. De lokale verliezen in deze buis en de aansluiting op de regenkolk en de rioolbuis zijn naar verhouding belangrijker. Deze lengte wordt geometrisch geschaald, dit betekent in het schaalmodel een lengte van 40 cm tot 120 cm. De lengte kan afhangen van eventueel te plaatsen instrumentarium.

3.4 Afmetingen schaalmodel

Met de informatie uit paragraaf 3.3 wordt een opstelling 1:5 gebouwd. Hierbij worden de afmetingen, debieten en waterstanden overeenkomstig de verhoudingen in tabel 3-1 geschaald. Om de invloed van de viscositeit op de wrijving in het schaalmodel te bepalen zijn enkele berekeningen voor een schaalmodel 1:5 uitgevoerd. Deze berekeningen zijn identiek aan de berekeningen in paragraaf 3.3 maar dan met geschaalde afmetingen en afvoeren. Hieruit bleek dat de invloed bij 1:5 klein is.

Derhalve wordt de opstelling als volgt gebouwd:

- De breedte van de straat is 0.25 m.
- De diameter van de rioolbuis is 0.08 m.
- De rioolbuis wordt van acrylaat gemaakt.
- Cilindervormig regenkolken met een diameter van 50 mm tot 60mm en een lengte van 200 mm (en er wordt geen rooster geplaatst).
- Regenkolkaansluiting van flexibel slang met een diameter van 25 mm.

De waterstanden en debieten die hierin toegepast zullen worden zijn:

- 1 l/s tot 2.5 l/s voor het riool.
- Debieten op de straat van ± 0.75 l/s, aangezien de stroming dan in elk geval turbulent is.
- Debieten door de regenkolken van 0.045 tot 0.1 l/s.
- Waterstanden op straat van 1 cm tot 5 cm.

De debieten door de regenkolken zijn sterk afhankelijk van de waterdruk in het riool en de waterstand op straat. De hiervoor genoemde debieten zijn schattingen. In het schaalmodel kunnen debieten optreden die iets groter zijn.

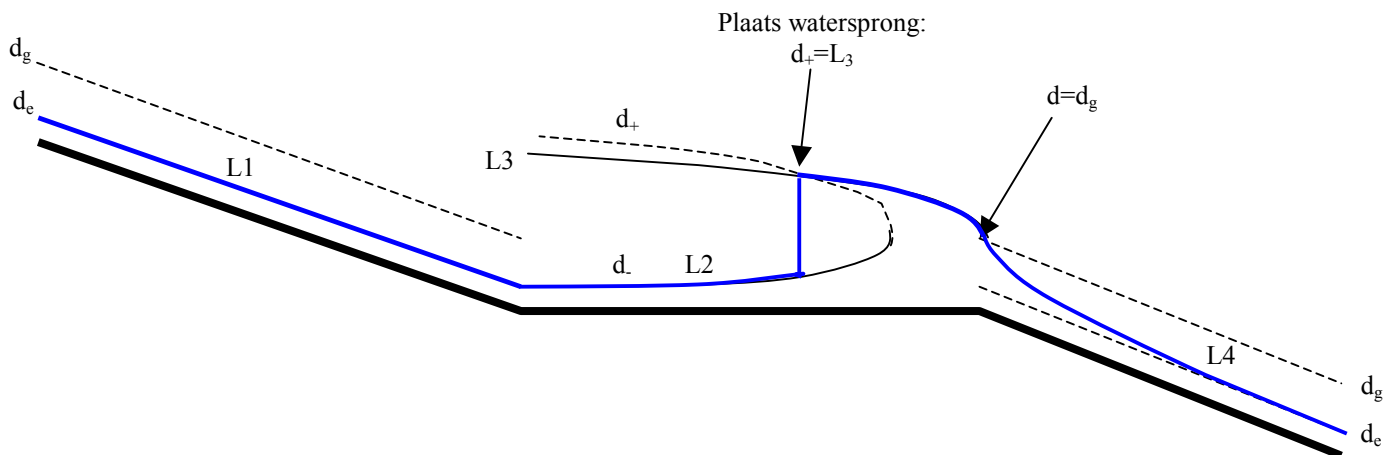
Het is belangrijk om turbulente stroming te simuleren, dit kan het makkelijkst worden bereikt met een rechthoekige dwarsdoorsnede. Tevens zijn de effecten van grensvlakspanning dan minimaal. Als blijkt dat de stroming op straat sneller turbulent is, dan kunnen meer situaties worden gemeten die vergelijkbaar zijn met de praktijksituatie.

3.5 Lengte van het vlak van kruising

In de toekomst dient een kruising te worden opgenomen. Hiervoor moet het mogelijk zijn om de straat uit te breiden met een kruising van wegen. De straten die op de kruising aankomen dienen in helling verstelbaar te zijn.

Op hellingen die aansluiten op kruisingen in steile gebieden kan de stroming superkritisch zijn. Ter plaatse van de kruisingen kunnen dan transitie van stromingstype plaatsvinden zoals watersprongen. Het schaalmodel moet deze transitie ook kunnen simuleren. De breedte van de straat is beperkt tot ongeveer 25 cm, dit is voldoende voor het simuleren van ondiepwaterstroming. Als voor het horizontale vlak van een kruising 25 cm wordt gehanteerd dan bestaat een aanzienlijke kans dat superkritische stroming niet overgaat in subkritische stroming.

Bepaald is dat een minimale lengte van het kruisingsvlak in het schaalmodel 1.0 m tot 1.25 m dient te bedragen. Indien een kleinere lengte wordt toegepast zal zeer zelden een watersprong optreden omdat het water op het horizontale vlak superkritisch blijft. Voor een geschatte waarde van c_f (0.005), een helling van de straten van 2%, een waterdiepte op de bovenstroomse helling van 2 cm is de afvoer van 16 l/s/m en ligt de theoretische plaats van de watersprong ongeveer halverwege. Voor de berekening wordt gebruik gemaakt van verg. 3-12 t/m 3-15. In figuur 3-10 wordt de berekening toegelicht.



Figuur 3-10: Langsdoorsnede van kruising met superkritische stroming op de bovenstroomse en de benedenstroomse straten. De zijstraten worden niet meegenomen in deze analyse. De hellingen van de straten zijn overdreven getekend. L1 is de verhanglijn op de bovenstroomse helling, de diepte is gelijk aan de evenwichtsdiepte. L2 sluit aan op L1. Tussen deze twee treedt een klein verlies op t.g.v. het ombuigen van de stroming. Dit verlies wordt verwaarloosd, L2 kan dan vanaf bovenstrooms worden berekend. Aan de benedenstroomse zijde van het horizontale vlak wordt aangenomen dat de waterdiepte gelijk is aan de grensdiepte. L3 en L4 kunnen vanaf dit punt worden berekend. Van L2 (d) is de geconjugeerde (d_+) bepaald. Waar de geconjugeerde L3 snijdt zit de watersprong. Voor de berekening van de verhanglijnen zijn verg. 3-12 t/m 3-15 gebruikt.

Consequenties voor het schaalmodel

Het horizontale middendeel wordt 1.25 m lang gemaakt. Bij de breedte van 0.25 m kan geen zuivere kruising worden ontwikkeld. Het is wel mogelijk een enigszins hybride kruising te bouwen, zoals geschematiseerd in figuur 3-11. De breedte van de zijstraten later nog kan worden vastgesteld. Dit kruisingsmodel is een afwijking van de werkelijke situatie maar de stromingsprocessen zijn wel gelijkwaardig: er treden transitities van stromingstype op en de waterstroming kan splitsen en samenkomen. De hellingen van de kruising zullen zo worden gemaakt dat deze nog in hoogte kunnen worden versteld.

$$\frac{dd}{ds} = \frac{i_b - c_f \frac{q^2}{gd^3}}{1 - \beta \frac{q^2}{gd^3}} \quad (3-12)$$

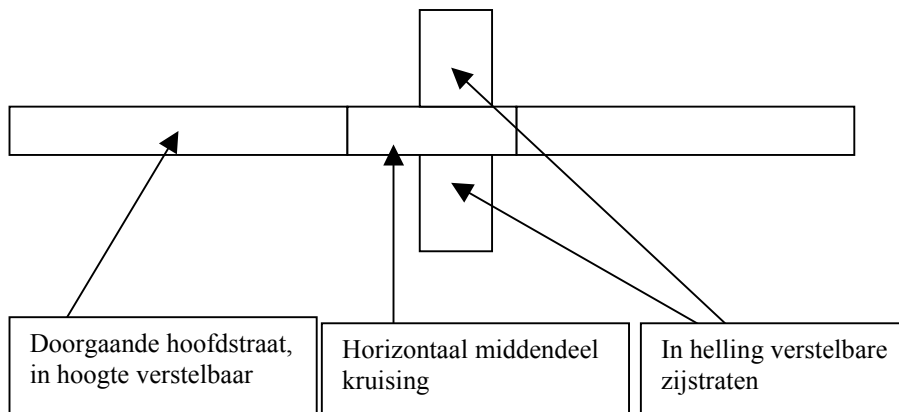
$$\frac{1}{4} d^4 - dd_g^3 + c_f d_g^3 s = constant \quad (3-13)$$

$$\frac{1}{2} \rho g d_-^2 + \frac{\rho q^2}{d_-} = \frac{1}{2} \rho g d_+^2 + \frac{\rho q^2}{d_+} \quad \text{impulsbalans} \quad (3-14)$$

$$\frac{1}{2} (d_- + d_+) d_- d_+ = \frac{q^2}{g} = d_g^3 \quad (3-15)$$

Waarin:

i_b	bodemhelling	[-]
c_f	bodemruwheid	[-]
q	debiet per eenheid van breedte	[m ² /s]
g	gravitatie constante	[m ² /s]
d	waterdiepte	[m]
d_g	grensdiepte	[m]
s	afstandskoördinaat	[m]
d_-	bovenstroomse waterdiepte	[m]
d_+	geconjugeerde van d_-	[m]
β	getal van Boussinesq	[-]



Figuur 3-11: Hybride kruising waarbij niet alle straten even breed zijn als het vlak van kruising maar waarbij wel transitities van stromingstype en splitsing en combinaties van waterstroming optreden.

3.6 Invloed meetnauwkeurigheid debieten / waterhoogtes

In deze paragraaf wordt inzicht gegeven in de gewenste meetnauwkeurigheid van debietmetingen. De waterstand op straat wordt direct met peilnaalden gemeten en het piëzometrisch niveau in het riool ook. Verder wordt het debiet op de randen van de straat en het riool en de debieten door de regenkolken bepaald.

3.6.1 Meetnauwkeurigheid drukverschil in het riool.

Waterstanden zullen met peilnaalden worden bepaald. Peilnaalden kunnen op 0.1 mm nauwkeurig worden afgelezen. Het is echter maar de vraag of de waterstand zo stabiel is dat deze nauwkeurigheid ook behaald kan worden. Gesteld wordt dat de hoogtemeting met een peilnaald ongeveer 0.25 mm nauwkeurig is.

Uitgangssituatie:

1. Een debiet van 2 l/s in de rioolbuis.
2. Geen uitwisseling door de regenkolken.
3. Een Chezy-waarde van 58 m^{1/2}/s.
4. Een lengte van de rioolbuis van 10 m.
5. Een diameter van de rioolbuis van 80 mm.

Indien lokale verliezen worden verwaarloosd dan kan met verg. 3-5 worden bepaald dat het energieverlies ten gevolge van wrijving 24 mm is. Aangezien het debiet en de diameter constant zijn is, is het verschil in piëzometrisch niveau gelijk aan het energieverlies. De verwachte fout in het verschil tussen twee piëzometrisch niveaus is dan 0.35mm, bepaald m.b.v. verg. 3-16 en 3-17. Dit komt overeen met een relatieve meetnauwkeurigheid van 1.5%. Het nauwkeurig meten van de hoogte is belangrijk omdat de lokale verliezen klein zijn

3.6.2 Meetnauwkeurigheid debiet op randen riool

Gegeven een situatie waarbij geen uitwisseling met het water op de straat plaatsvindt. Het is ideaal als de meetnauwkeurigheid van de debieten zodanig is dat uit het benedenstrooms debiet het drukverschil kan worden bepaald. De debietmeting ligt dan in dezelfde orde van nauwkeurigheid. Dezelfde uitgangssituatie als in 3.6.1. dient als referentie. Als lokale verliezen worden verwaarloosd dan kan met behulp van vergelijking 3-18 het verschil in piëzometrisch niveau worden bepaald. Als uit vergelijking voor de verwachte fout (verg. 3-19) komt dat de fout in het drukverschil gelijk is aan 1.5% dan is dit ideaal.

De fout in C en de lengte zullen klein zijn derhalve worden beide op nul gesteld. De diameter (D) en het debiet reteren nu. Als D niet nauwkeurig wordt gemeten dan is 1% verwachte fout niet haalbaar. De fout in D is afhankelijk van de meetmethode. Met een schuifmaat kan op 0.1 mm nauwkeurig worden gemeten, het is echter de vraag of de diameter overal in de buis gelijk is. De fout kan dan wel 0.5 mm bedragen. Als wordt voldaan aan 1.5% nauwkeurigheid dan is bij een D bepaling op 0.1 mm een debietmeting van 1.0% nauwkeurig noodzakelijk. Bij een bepaling van D op 0.3 mm is een debietmeting van 0.7% noodzakelijk. Dit betekent dat een nauwkeurige bepaling van de diameter belangrijk is.

3.6.3 Meetnauwkeurigheid uitwisselingsdebiet t.b.v. het riool

Stel dat benedenstrooms in de buis 1.65 l/s en t.p.v. de regenkolken ongeveer 0.1 l/s uitstroomt. Als benedenstrooms en t.p.v. de 7 kolken het debiet gemeten wordt dan kan hier het debiet bovenstrooms uit afgeleid worden, dit is immers het totaal, zie verg 3-20. Als nu benedenstrooms op 1% nauwkeurig het debiet wordt gemeten en t.p.v. de kolken met 6 % dan kan met verg 3-21 worden bepaald dat de verwachte fout in het bovenstroomse debiet 1% is. Dit betekent dat de debieten door de regenkolken minder nauwkeurig gemeten hoeven te worden dan de debieten op de randen van het riool.

$$\Delta h_{12} = h_1 - h_2 \quad (3-16)$$

$$\frac{\delta \Delta h_{12}}{\Delta h_{12}} = \sqrt{\left(\frac{\delta h_1}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta h_2}{h_2}\right)^2} \quad (3-17)$$

$$Q = CA\sqrt{Ri} = \frac{\pi CD^{\frac{9}{2}}}{4} \sqrt{\frac{\Delta h}{L}} \rightarrow \Delta h = \left(\frac{4Q}{\pi CD^{\frac{9}{2}}} \right)^2 L \quad (3-18)$$

$$\frac{\delta \Delta h}{\Delta h} = \sqrt{2 \left(\frac{\delta C}{C} \right)^2 + 9 \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2} \quad (3-19)$$

$$Q_{\text{bovenstrooms}} = Q_{\text{benedenstrooms}} + \sum_{i=1}^{n=7} Q_i \quad (3-20)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{bovenstrooms}}}{Q_{\text{bovenstrooms}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_{\text{benedenstrooms}}}{Q_{\text{benedenstrooms}}} \right)^2 + \sum_{i=1}^{n=7} \left(\frac{\partial Q_i}{Q_i} \right)^2} \quad (3-21)$$

Waarin:

h	piëzometrisch niveau	[m]
Δh	verschil in piëzometrisch niveau.	[m]
Q	debiet	[l/s]
C	Chezy gladheidcoëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
R	hydraulische straal	[m]
A	doorstroomd Oppervlak	[m ²]
D	diameter buis	[m]
∂	onzekeerheid	n.v.t.
i	regenkolknummer	[-]

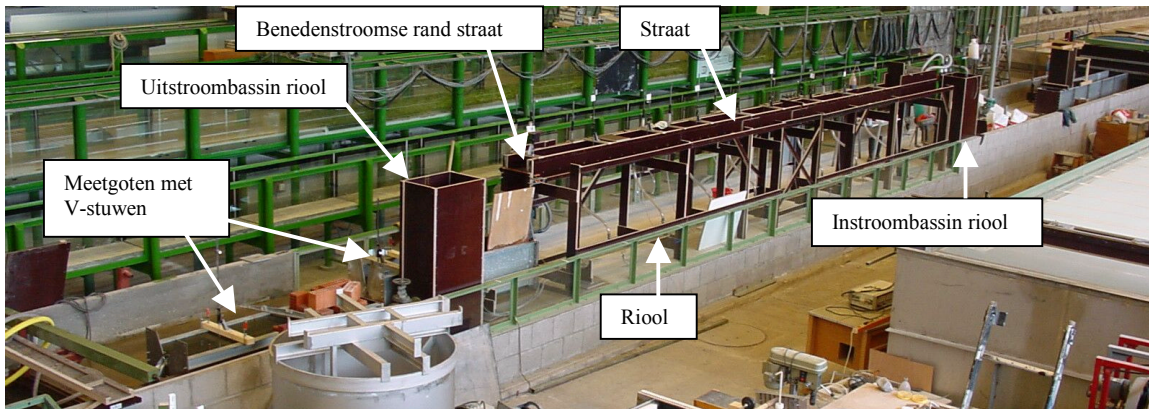
3.6.4 Meetnauwkeurigheid straat

Op de straat is het moeilijker om een maat voor de meetnauwkeurigheid te vinden. De waterstandsverschillen zijn kleiner dan in het riool. Zodoende wordt op straat relatief meer informatie verkregen uit debieten dan uit stijghoogtes. Voor de meetnauwkeurigheid van de uitwisselingsdebieten op straat kan dezelfde analyse als voor het riool worden uitgevoerd. De debieten op straat zijn kleiner en daarom worden de uitwisselingsdebieten groter t.o.v. de debieten op straat. Dit betekent dat de meetnauwkeurigheid van de uitwisselingsdebieten beter dient te zijn.

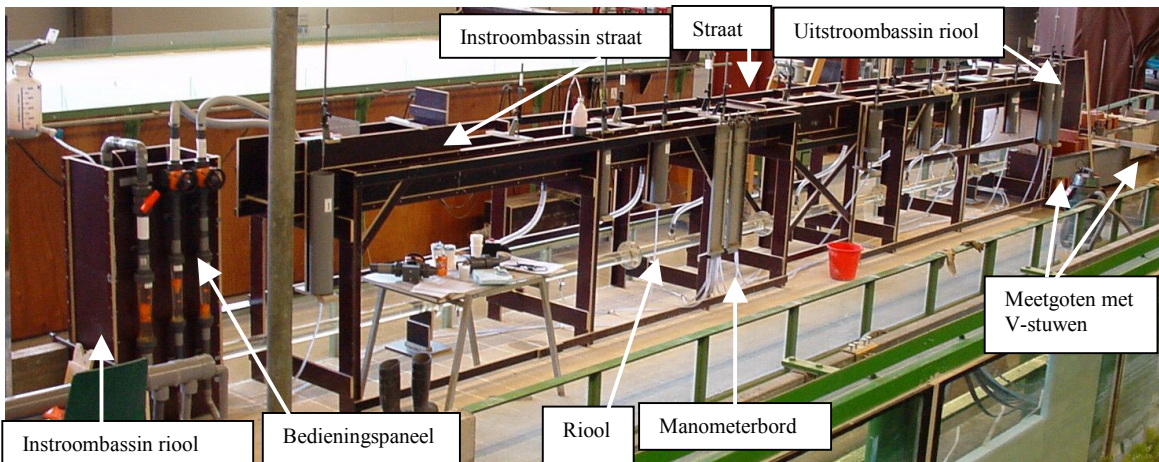
4 Beschrijving meetopstelling

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk wordt een overzicht van de opstelling gepresenteerd. In de hierop volgende paragrafen zal steeds verder worden ingezoomd op delen van de opstelling. Details zoals drukaansluitingen, peilnaalden en kolkaansluitingen komen in paragraaf vier en vijf aan de orde. In paragraaf zes staan alle afmetingen van de rioolbuis, de straat en de regenkolken respectievelijk de locaties van drukaansluitingen en peilnaalden.

4.1 Totaaloverzicht met basiselementen

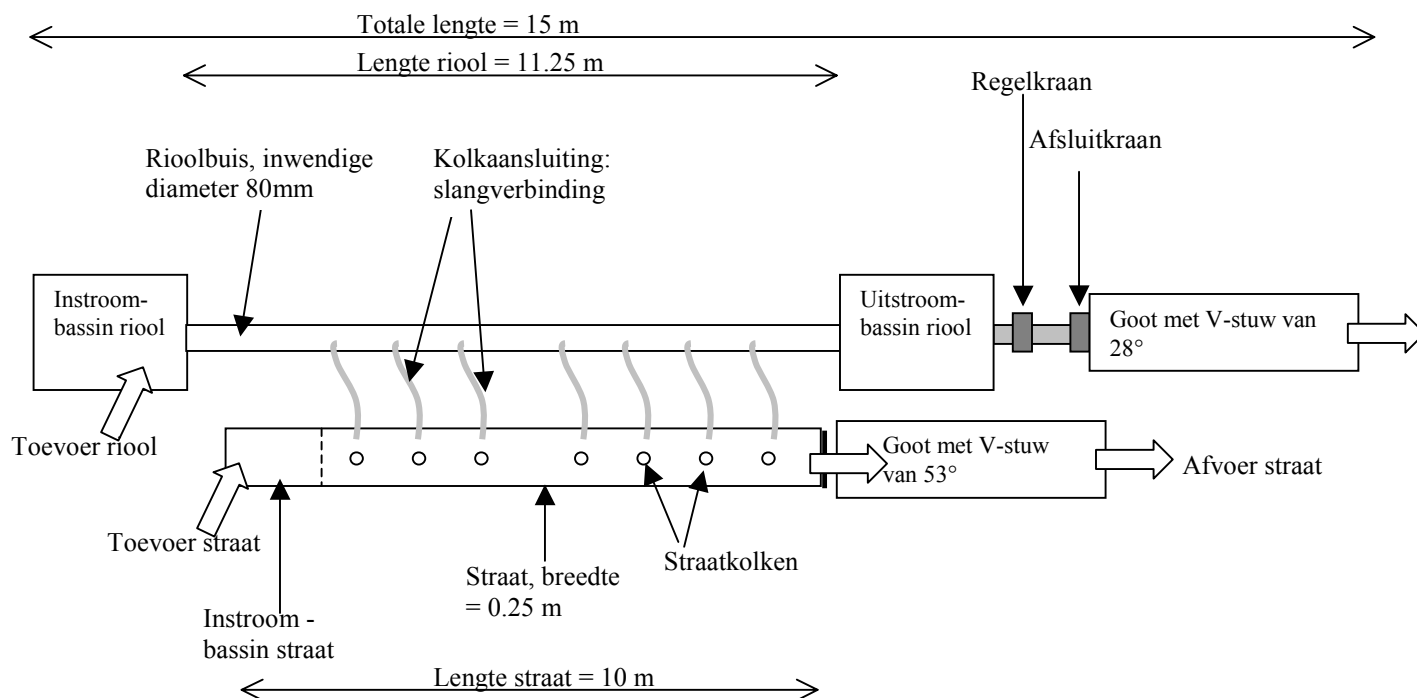


Figuur 4-1: Totaal overzicht, de linkerkant van de foto is de benedenstroomse zijde van de opstelling.



Figuur 4-2: Overzichtsfoto, vanaf de zijde waar de meetinstrumenten worden afgelezen. De linkerkant van de foto is de bovenstroomse zijde van de opstelling.

In figuur 4-1 t/m 4-3 zijn de belangrijkste onderdelen van de opstelling benoemd. Het riool is uitgevoerd als een doorzichtige buis van acrylaat en is horizontaal gemonteerd. De straat is uitgevoerd als een rechthoekige goot met horizontale bodem van betonplex. In de goot zijn PVC buisjes gemonteerd die de straatkolken voorstellen. Tussen het riool en de straatkolken zijn slangetjes gemonteerd, deze stellen de kolkaansluitingen voor. Doordat het riool en de straat in horizontale richting iets t.o.v. van elkaar zijn verplaatst komen de verbindingsslangetjes krom te staan.



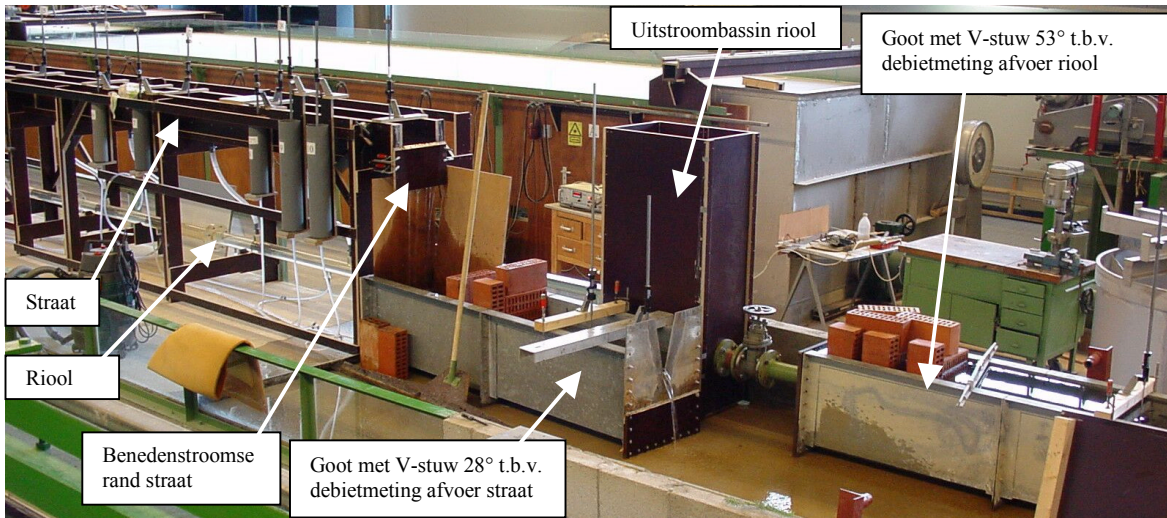
Figuur 4-3: Schematisatie bovenaanzicht van de meetopstelling: niet op schaal. De afmetingen van de meetgoten is 2 m bij 0.5 m. Het uit- en instroombassin meet 0.4m (breedte) bij 0.6 m (lengte). Het water dat toegevoerd wordt aan het instroombassin van het riool respectievelijk de straat is afkomstig uit het centrale watersysteem van het laboratorium. Water van de straat valt in de goot met de V-stuw van 28°. Water uit het riool stroomt via het uitstroombassin via een korte leiding met een regel- en een afsluitkraan naar de goot met een V-stuw van 53°. Het water uit de meetgoten stroomt naar een opvangbak van het centrale systeem.

Aan de bovenstroomse zijde van de opstelling is een toevoerleiding afkomstig uit het watersysteem van het laboratorium aangesloten op een verdeelwerk. Aan dit verdeelwerk zitten drie leidingen met elke een kraan en een vlotterdebietmeter. Met de kranen kan de toevoer naar het riool en de straat worden ingesteld en met een vlotterdebietmeter worden afgelezen. De grootste vlotterdebietmeter met een bereik van 1000 l/h – 10000 l/h (0.28 l/s tot 2.8 l/s) staat altijd op het riool gericht. De andere twee debietmeters hebben een meetbereik van 300 l/h - 3000 l/h (0.083 l/s tot 0.83 l/s) en kunnen naar keuze op de instroombak van het riool of op het instroombassin van de straat worden gericht. De debietregeling m.b.v. deze vlotters is afhankelijk van de druk in het watersysteem van het laboratorium en de waterdruk aan de benedenstroomse zijde van de vlotter. Deze druk wordt bepaald door de waterstand in het instroombassin van het riool respectievelijk de waterstand op de straat. Door deze afhankelijkheid neemt bij gelijke kraanstand de toevoer licht af bij een hoge waterstand in het instroombassin respectievelijk een hoge waterstand op de straat.

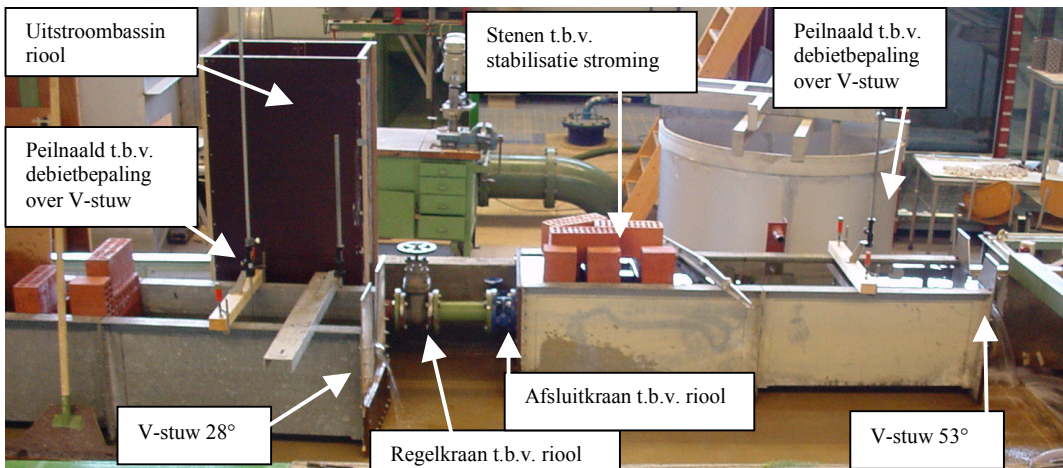
De straat bestaat uit een 9 m lange goot met rechte zijwanden met een hoogte van 14 cm en een breedte van 25 cm. De eerste meter van deze goot functioneert als instroombassin. In dit bassin wordt de stroming gestuurd en gestabiliseerd. De straat wordt op 8 plaatsen ondersteund door een frame van betonplex. Deze goot kan ook op een andere manier worden gemonteerd: met relatief geringe ingrepen kan het bovenstroomse en benedenstroomse gedeelte enkele graden worden gekanteld t.o.v. het middendeel. Het middendeel heeft een lengte van 1.25 m, het boven- en benedenstroomse deel zijn beide 4 m lang. Op het bovenstroomse gedeelte zijn drie putjes gemonteerd en op het benedenstroomse deel vier. Benedenstrooms kan de waterstand op de straat worden geregeld met een in hoogte verstelbare overstortrand welke eventueel ook geheel kan worden weggelaten. Het water van de straat wordt opgevangen in een 2 m lange goot waarop een V-stuw is gemonteerd. Met deze V-stuw met een hoek van 28 graden kunnen debieten van 0.4 l/s tot 1.4 l/s worden gemeten.

Het riool bestaat uit een instroombassin, 6 doorzichtige acrylaat buissegmenten en een uitstroombassin. De buissegmenten zijn met een siliconen pakking en een door middel van een bout / moer verbinding aan elkaar gemonteerd. In het instroombassin wordt het water toegediend. Aan de benedenstroomse zijde van het uitstroombassin wordt afvoer en waterstand gestuurd met behulp van een regelkraan en een klepafsluiter. Deze kraan is net na het uitstroombassin van het riool gemonteerd. Het water uit het riool stroomt naar een 2 m lange goot waarop een V-stuw is gemonteerd. Met deze V-stuw met een hoek van 53 graden kunnen debieten van 0.7 l/s tot 2.5 l/s worden gemeten. Voor extra informatie wordt naar de figuur 4-1 tot 4-13 verwezen.

4.2 Benedenstrooms gedeelte meetopstelling



Figuur 4-4: Benedenstroomse zijde meetopstelling. Voor aanvullende informatie wordt naar figuur 4-5 verwezen

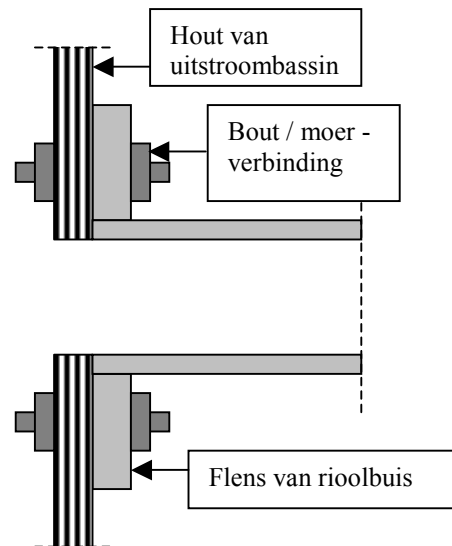
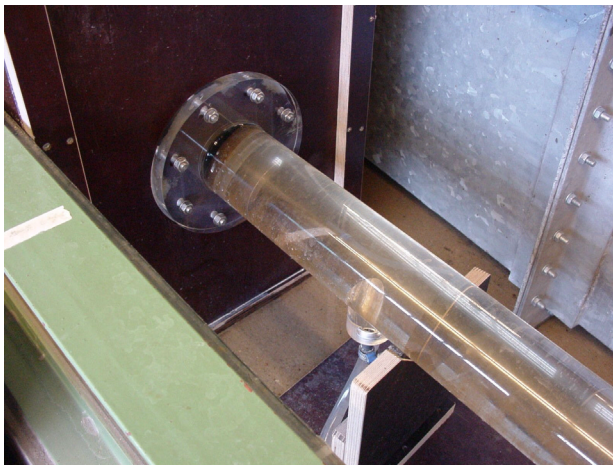


Figuur 4-5: Benedenstroomse zijde: er zijn twee kranen gemonteerd: een klepafsluiter om de waterstand in het uitstroombassin van het riool te regelen en een vlinderkraan om voor snel inregelen de afvoer te kunnen afsluiten. Het is nu mogelijk om tijdelijk de afvoer te kunnen stopzetten zonder dat de klepstand van de regelkraan wordt gewijzigd.



Figuur 4-6: Links, instelling benedenstroomse waterstand op de straat. Met plaat van betonplex kan een hoge waterstand worden ingesteld. Deze plaat wordt vastgezet met 4 lijmklemmen en waterdicht gemaakt met mandoline (klei).

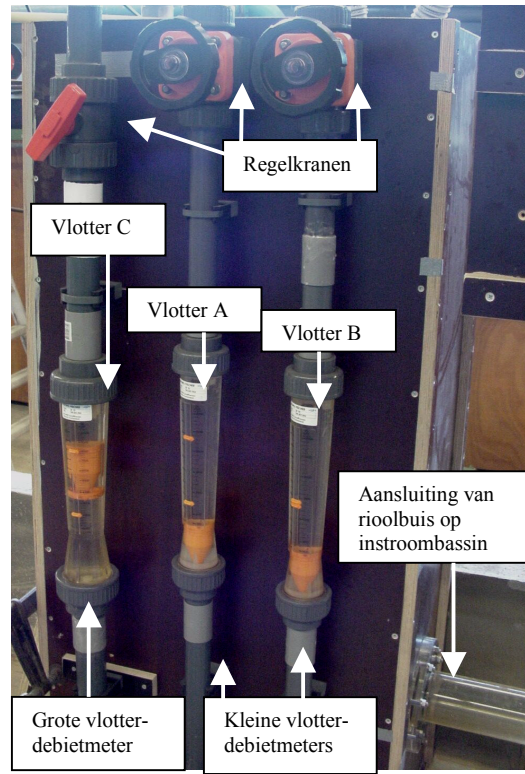
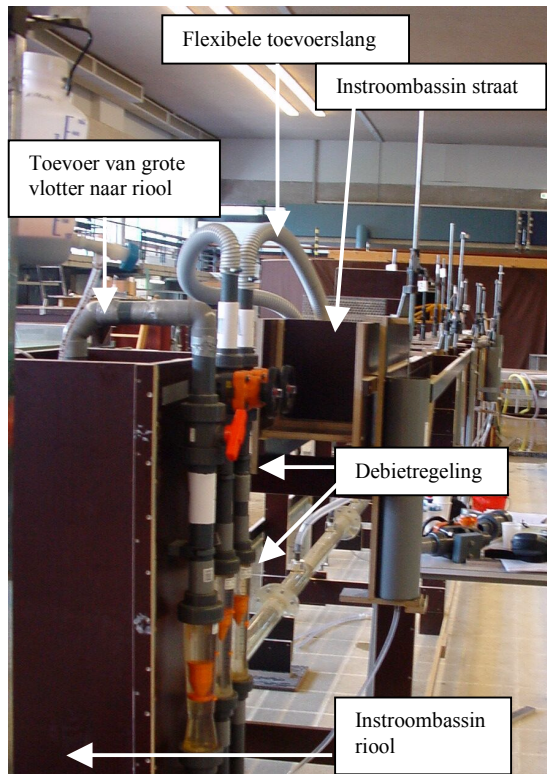
Figuur 4-7: Rechts, idem maar zonder plaat, als de plaat wordt weggelaten kan een lage waterstand worden ingesteld.



Figuur 4-8 : Links, aansluiting van de rioolbuis op het uitstroombassin. In de houten wand van het uitstroombassin met een dikte van 18 mm is een rond gat van 80mm diameter gemaakt. Op het uiteinde van de rioolbuis is een flens gemonteerd welke met 8 boutjes (m8) is gemonteerd op het uitstroombassin.

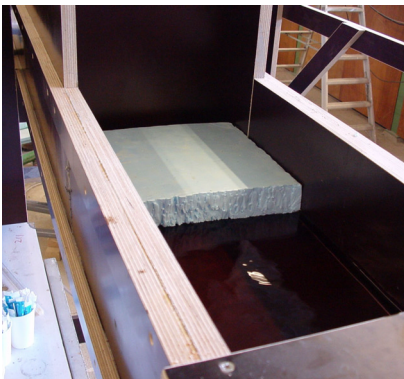
Figuur 4-9: Rechts, schematisatie van de verbinding.

4.3 Bovenstrooms gedeelte meetopstelling



Figuur 4-10: Links, bovenstrooms gedeelte meetopstelling.

Figuur 4-11: Rechts, bovenstrooms gedeelte meetopstelling. De vlotterdebietmeters hebben de toevoeging A, B of C gekregen. De grote vlotterdebietmeter heeft de letter C gekregen. De kleine vlotterdebietmeters hebben de letter A en B gekregen. Deze letters staan ook op het etiket van de vlotter. Met de grote vlotter kunnen debieten van 1000-10000 l/h worden ingesteld met de kleine vlotterdebietmeters kunnen debieten van 300-3000 l/h worden ingesteld. Op de rechter foto is tevens de aansluiting van de rioolbuis op het instroombassin te zien. Deze is op identieke wijze gemonteerd als de aansluiting van de rioolbuis op het uitstroombassin.

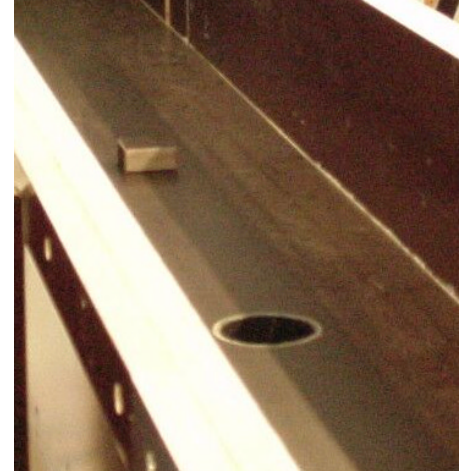
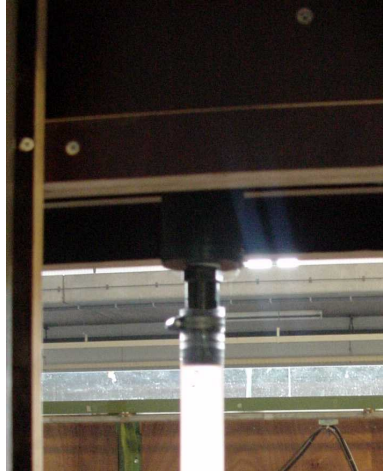


Figuur 4-12: Links, inlaatbassin van de straat, met piepschuim na de onderlaat waarmee de stroming wordt gereguleerd.

Figuur 4-13: Rechts, inlaatbassin van de straat. De geperforeerde plaat is een diffusieschot om de stroming te stabiliseren. 30 cm na dit schot is een plaatje van betonplex geplaatst om de waterstand te reguleren. Op de foto is tevens het meest bovenstrooms gelegen putje te zien (putje nr. 1).

4.4 Regenkolk / afvoerputje

In de opstelling zijn 7 regenkolken (straatputjes) gemonteerd, deze zijn vanaf de bovenstroomse zijde genummerd met 1 tot 7. De putjes staan op een onderlinge afstand van ongeveer 1 meter gemonteerd met uitzondering van het derde en vierde putje, deze staan op 1.75 m afstand h.o.h. Zie verder figuur 4-14 t/m 4-17.



Figuur 4-14: Links, regenkolkaansluiting op de rioolbuis. De aansluiting bestaat uit een flexibele slang met een binnendiameter van 25mm. Deze is aangesloten op een Pvc-slangaansluiting met een inwendige diameter van 19 mm. De gaten geboord in de aangesloten rioolbuis zijn scherp en haaks.

Figuur 4-15: Midden, aansluiting aan de regenkolk. Op de bodem van de regenkolk is een slang aansluiting gemonteerd t.b.v. slang met een binnendiameter van 25 mm.

Figuur 4-16: Rechts, putje, het putje bestaat uit een PVC buisje van 20.5 cm lang met een binnendiameter van 56 mm. Op de bodem van dit putje is de genoemde slangverbinding gemonteerd. De overgang van dit putje tot de straat is een 90° hoek.

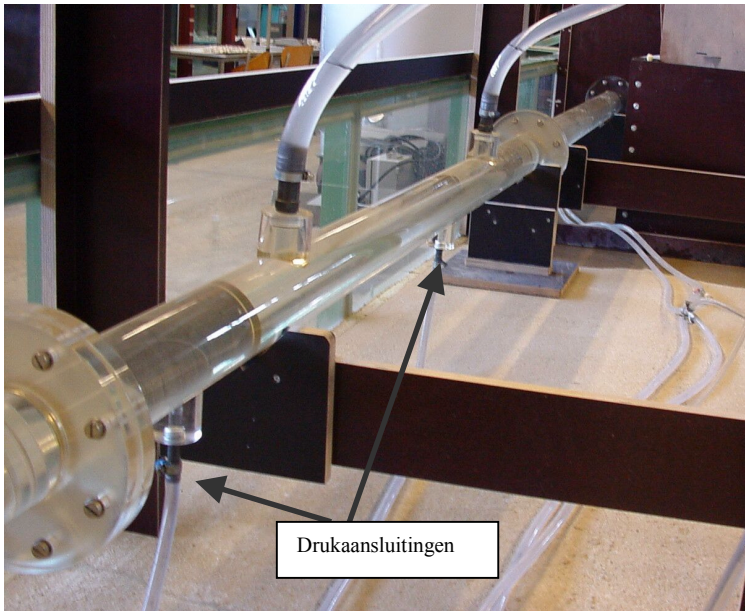


Figuur 4-17: Foto met slang aansluiting van riool t.b.v. aansluiting regenkolk. Zonder gemonteerde verbindingsslangen

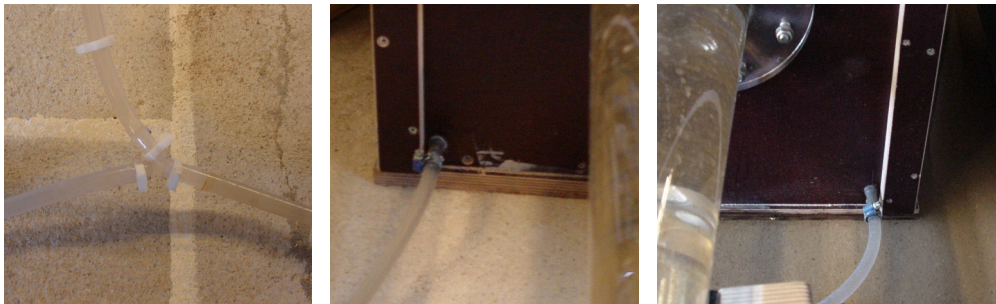
4.5 Drukaansluitingen en peilnaalden

In de buis van het riool zijn 8 drukaansluitingen gemaakt. Daarnaast zijn in het instroombassin en het uitstroombassin ook drukaansluitingen gemaakt. De drukaansluitingen zijn vanaf de bovenstroomse zijde genummerd van 1 tot 10 waarbij 1 de drukaansluiting van het instroombassin is en 10 de drukaansluiting van het uitstroombassin. Per drukaansluiting is d.m.v. een splitsing een drukpotje met peilnaald en een buisje van een manometerbord aangesloten. In de buis zijn alle drukpunten 25 cm bovenstrooms van de kolkaansluitingen gemonteerd.

Op de straat is de waterstand met peilnaalden bepaald, hier zijn er in totaal 9 van gemonteerd. De peilnaalden op straat staan met uitzondering van peilnaald 4 op 25 cm bovenstrooms van de regenkolken gemonteerd. De peilnaalden op straat zijn van bovenstrooms naar benedenstrooms genummerd van 1 t/m 9. Zie verdere informatie de figuren 4-18 tot 4-24.



Figuur 4-18: Foto met drukaansluitingen aan rioolbuis. De aansluitingen zijn 8 mm inwendig, op de rioolbuis zijn 8 drukaansluitingen gemaakt. Op de drukaansluitingen zijn slangetjes aangesloten, die worden vervolgens gesplitst in twee slangetjes, waarvan er één naar het manometerbord gaat en één naar een drukpotje met peilnaald. De aansluiting op het manometerbord dient om de optredende situatie in het riool visueel waarneembaar te houden.



Figuur 4-19: Links, splitsing van slang aangesloten op een drukaansluitingen van het riool.

Figuur 4-20: Midden, drukaansluiting in de hoek van het instroombassin van het riool.

Figuur 4-21: Rechts, drukaansluiting in de hoek van het uitstroombassin van het riool.



Figuur 4-22: Foto met manometerbord en drukpotje met peilnaald. Tevens zijn de peilnaalden op de straat te zien.



Figuur 4-23: Manometerborden, er zijn twee borden gebruikt. Drukpunt 1 t/m 8 zijn op het linker bord aangesloten, drukpunt 9 en 10 op het rechter bord. Door montage van dit manometerbord is een snel overzicht van de optredende situatie in het riool mogelijk.



Figuur 4-24: Op de straat is de waterhoogte direct gemeten met peilnaalden, deze staan in het midden van de straat gemonteerd op 25 cm bovenstrooms van de regenkolken.

4.6 Afmetingen

Riool

De rioolbuis is volledig rond en gemaakt van acrylaat. De binnendiameter is 80 mm en de wanddikte is 5mm. Door het fabricageproces hebben deze buizen soms maatafwijkingen. Bij de aansluitingen van de buizen op elkaar is geprobeerd om deze zo goed mogelijk op elkaar te laten aansluiten. Helemaal glad zal deze aansluiting echter niet zijn. De buis van het riool is gemiddeld horizontaal gemonteerd waarbij de as van de buis op 30 cm boven de vloer ligt. De breedte van het instroom- en uitstroombassin is 40 cm de breedte 60 cm, de hoogte is 145 cm. Deze afmeting is voldoende om de snelheidshoogte te kunnen verwaarlozen.

Straat

De bodem van de goot van de straat ligt op 128 cm boven de vloer en de zijwanden van de goot steken 14 cm boven de bodem uit. De breedte van de straat is 25 cm, dit varieert echter t.g.v. bevochtiging en kromtrekken ± 1 mm. De straat is horizontaal gemonteerd, deze trekt echter krom door veranderingen in vochtigheid en belasting.

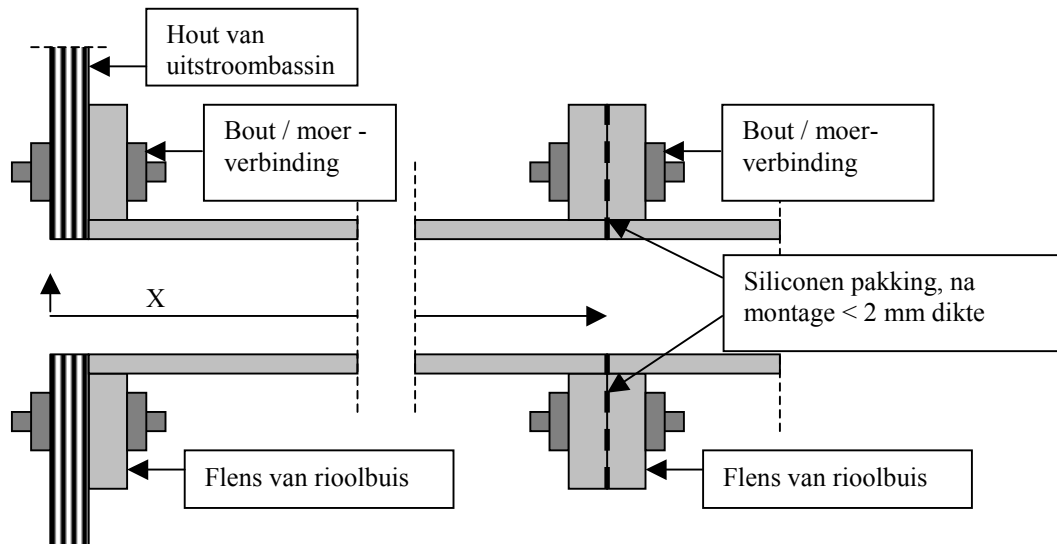
Putje

Voor de aansluiting van de straat geldt dat het putje 21 cm diep is met een binnendiameter van 56 mm. In de bodem van het putje is een afgezaagde slangaansluiting gemonteerd met een lengte van 84 mm, over deze afstand is de binnendiameter 19 mm.

Kolkaansluiting

De verbindingsslangen zijn doorzichtig met een binnendiameter van 25 mm en een wanddikte van ± 3 mm. De lengte van de verbindingsslangen is 70 cm. Deze afstand is de lengte van de slang tussen de uiteinden van de slangverbindingen. Voor de aansluiting van het riool geldt dat over een lengte van 139 mm de binnendiameter 19 mm is.

In de rest van deze paragraaf worden in tabelvorm de locaties van peilnaalden, drukaansluitingen en kolkaansluitingen gepresenteerd. Als referentiepunt is de binnenkant van het uitstroombassin van het riool gebruikt, zie ook figuur 4-25.



Figuur 4-25: Detail aansluiting rioolbuis op uitstroombassin en aansluiting buiselementen onderling. Het referentiepunt voor de x-coördinaat is aan de binnenkant van het uitstroombassin gesteld.

Tabel 4-1: Afmeting en locatie segmenten rioolbuis. De rioolbuis bestaat uit 6 elementen, vanaf benedenstrooms gezien is de lengte 1.753 m, 2.002 m, 2.002 m, 1.753 m, 2.002 m, respectievelijk 1.753 m. De dikte van de houten wand van het instroombassin = 18mm.

Segment nr.	Lengte segment [m]	X-coördinaat Segmenteinde [m]
0	-	0.018
1	1.753	1.771
2	2.002	3.773
3	2.002	5.775
4	1.753	7.528
5	2.002	9.530
6	1.753	11.283

Tabel 4-2: Plaats van de kolkaansluitingen, de kolken zijn vanaf bovenstrooms genummerd. De plaats is gedefinieerd t.o.v. het midden van de kolkaansluiting. De kolkaansluitingen op de straat hebben gelijke x-coördinaten als de kolkaansluitingen op het riool. Op de straat is de afstand tussen de putjes binnen ± 2 mm gelijk aan de afstand tussen putjes in het riool. Uit het middelpunt van put 7 kan het beginpunt van de straat worden bepaald: dit ligt op X=1.258m. Dit is zonder toepassing van een overstortrand. Het middelpunt van de kolk is gedefinieerd als de x-coördinaat.

Kolkaansluiting nr.	X-coördinaat kolkaansluiting [m]
7	2.271
6	3.271
5	4.273
4	5.273
3	7.025
2	8.028
1	9.028

Tabel 4-3: Drukaansluitingen van het riool, in de rioolbuis zijn drukaansluitingen gemaakt, 25 cm stroomopwaarts van de kolkaansluitingen. 25 cm voor het uitstroombassin van het riool is nog een drukpunt aanwezig. De drukpunten zijn vanaf bovenstrooms genummerd. Het eerste drukpunt is aangesloten op het instroombassin van het riool en het tiende drukpunt op het uitstroombassin. De drukaansluitingen zijn aangesloten op het manometerbord en een drukpotje met peilnaald. Het manometerbord staat in het midden van de constructie en de drukpotjes staan vlakbij het drukpunt en hangen aan de ondersteuningsconstructie van de straat.

Drukpunt nr.	X-coördinaat drukaansluiting [m]
10	0
9	0.268
8	2.521
7	3.521
6	4.523
5	5.523
4	7.275
3	8.278
2	9.278
1	11.301

Tabel 4-4: Plaats van de peilnaalden op de straat. Op de straat is telkens op ongeveer 25 cm bovenstrooms van de putjes de waterstand direct met een peilnaald bepaald. Een uitzondering is peilnaald nummer 4, dit is een extra meetpunt tussen put 3 en 4. De peilnaalden zijn vanaf bovenstrooms genummerd. De plaats van drukpunt is als nummer 10 gedefinieerd.

Peilnaald nr.	X-coördinaat peilnaald[m]
9	1.493
8	2.493
7	3.493
6	4.488
5	5.408
4	6.198
3	7.258
2	8.258
1	9.248

5 Beschrijving meetmethodes

5.1 Debietmeting op randen model

5.1.1 Beschrijving apparatuur t.b.v. debietbepaling

Aan de bovenstroomse zijde van de meetopstelling kan het debiet worden ingesteld door m.b.v. vlotterdebietsmeters en regelkranen. Er zijn drie vlotterdebietsmeters aanwezig: één met een meetbereik van 1000-10000 l/h, in het vervolg Vlotter C genoemd en twee met een meetbereik van 300-3000 l/h, in het vervolg vlotter A en Vlotter B genoemd. Het etiket van deze vlotters is gemarkeerd met een A respectievelijk een B. Vlotter A en B kunnen op het riool of de straat worden gericht, vlotter C staat altijd op het riool gericht.

Aan de benedenstroomse zijde staan V-stuwen om het debiet te bepalen. Bij de uitstroomkant van de straat staat een V-stuw met een inwendige hoek van 28.4 graden, deze wordt in het vervolg V28 genoemd. Bij de uitstroomkant van het riool staat een V-stuw met een inwendige hoek van 53.8 graden, deze wordt in het vervolg V53 genoemd. De hoek van de V-stuwen is nagemeten door de lengtes van de driehoek te bepalen en hieruit de hoek te berekenen. Deze V-stuwen zijn zo gemonteerd dat wordt voldaan aan de eisen zoals gesteld in het ISO Standards Handbook 16(1983). Debieten kunnen volgens deze norm 1.5 tot 2 % nauwkeurig worden gemeten. Voor V28 mag de hoogte van de overstortende straal variëren van 6 tot 10.3 cm, dit betekent een afvoer van ± 0.4 l/s tot ± 1.4 l/s. Voor V53 mag de hoogte van de overstortende straal variëren van 6 tot 10.6 cm dit betekent een afvoer van ± 0.7 l/s tot ± 2.5 l/s. Bij deze afvoeren kan volgens ISO Standards Handbook 16(1983) de basisvergelijking voor het debiet over V-stuwen van Kindsvater-Shen (verg. 5-1) worden toegepast.

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} h_e^{5/2} \quad (5-1)$$

$$C_e = f\left(\frac{h}{p}, \frac{p}{B}, \alpha\right) \quad (5-2)$$

$$h_e = h + k_h \quad (5-3)$$

Hierin is:

Q	debiet	[m ³ /s]
C _e	afvoercoëfficiënt	[-]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]
α	de hoek tussen de twee zijden van de V-stuw (radialen of graden)	[°]
h _e	de effectieve hoogte van de overstortende straal	[m]
p	afstand van de hals van de V-stuw tot de bodem van de meetgoot	[m]
B	breedte van de meetgoot	[m]
k _h	experimentele waarde die de invloed van viscositeit en oppervlaktespanning compenseert	[m]

Voor water van 5°C tot 30°C is de coëfficiënt C_e bepaald door metingen. C_e is een functie (verg. 5-2) van 3 variabelen met vergelijking 5-3 kan de effectieve hoogte worden bepaald. Met behulp van de figuren 8 en 9 op blz. 238 en 239 van het ISO Standards Handbook 16(1983) kunnen de waarden voor k_h en C_e worden bepaald, zie tabel 5-1.

Tabel 5-1: Waarden voor k_h en C_e behorende bij α.

α [°]	k _h [m]	C _e [-]
28.4	0.0023	0.588
53.8	0.0013	0.578

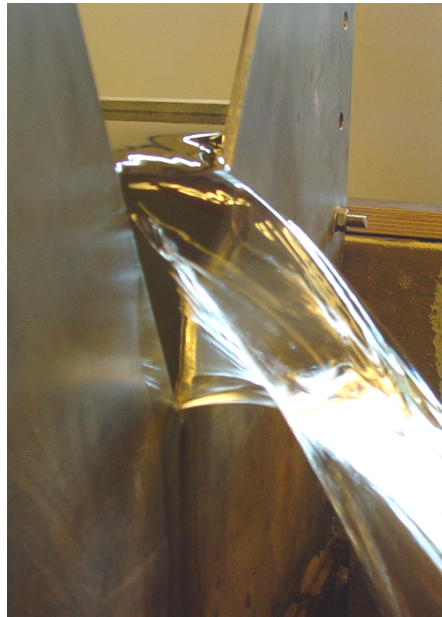
5.1.2 Kalibratie van debietmeting

Voordat de vlotters in de meetopstelling zijn geplaatst is in het laboratorium van gezondheidstechniek de aflezing van deze vlotters vergeleken met de aflezing van een elektromagnetische debietmeter. Volgens de fabrikant heeft de elektromagnetische debietmeter een nauwkeurigheid van 0.5%. Dit experiment wordt beschreven in bijlage 3, hieruit bleek dat de vlotterdebietmeters aanzienlijk afweken. In een later stadium is in het laboratorium van vloeistofmechanica een massadebietbepaling gedaan om uitsluitsel te geven over de werking van de V-stuwen en Vlotterdebietmeters. Deze massadebietbepaling bevestigde de eerder gevonden afwijkingen van de vlotterdebietmeters en toonde aan dat de V-stuwen een $\pm 5\%$ tot 7% te lage afvoer opleverde bij toepassing van de ISO norm.

Een mogelijke oorzaak voor de afwijkingen van de vlotterdebietmeters is dat de toegepaste diameter van de toevoerleidingen kleiner is dan origineel voorgeschreven maar aangezien niet voor alle vlotters een vergelijkbare afwijking is geconstateerd is dit een zwak argument. Oorzaken voor de afwijking van de V-stuwen moeten worden gezocht in het blijven aankleven van de overstortende straal en het mogelijk lekken van water door de hals van de V (zie ook figuur 5-1 en 5-2). Het aankleven stopt bij een overstortende straal hoger dan 12 cm echter hiervoor is de ISO norm niet meer geldig en tevens stroomt de meetgoot dan over. Een plausibele verklaring voor het aankleven is dat er kleine beschadigingen op de rand zitten en het feit dat de laatste 2 cm van de V een andere oppervlaktestructuur heeft, dit duidt op een handmatige fabricage. De kleine beschadigingen zijn pas duidelijk te zien nadat de V is opgepoetst met polijstpapier. Polijsten heeft nauwelijks invloed op de afvoer. Voor de kalibratie en meer informatie wordt verwezen naar de bijlage 3. Zie voor de gebruikte manier van massadebietbepaling paragraaf 5.3.



Figuur 5-1: Links: Overstortende straal met aankleving aan de zijkant en lekkend water recht onder de hals van de V.



Figuur 5-2: Rechts: Mooie overstortende straal. Het lijkt alsof hier ook water lekt, dit is echter niet zo. De plaat was nog vochtig

5.1.3 Correctievergelijkingen voor debietmetingen

In tabel 5-2 staan de vergelijkingen die toegepast moeten worden om de meetafwijkingen te corrigeren. Deze vergelijkingen zijn m.b.v. lineaire regressie tussen massadebietbepaling en aflezing bepaald. Deze correcties gelden binnen het meetbereik van vlotters en voor de V-stuwen voor het bereik waarbinnen de ISO norm geldig is. De afleiding van deze vergelijkingen staat beschreven in bijlage 3.

Tabel 5-2: Correctievergelijkingen voor de debietmetingen.

	Correctievergelijking [l/s]	Gemiddelde afwijking in %
Vlotter A	$Q_{\text{werkelijk}} = 1.079 Q_{\text{bepaald}} - 0.0154$	5.7
Vlotter B	$Q_{\text{werkelijk}} = 1.0103 Q_{\text{bepaald}} + 0.0147$	3.4
Vlotter C	$Q_{\text{werkelijk}} = 0.9605 Q_{\text{bepaald}} + 0.0133$	-0.8
V28	$Q_{\text{werkelijk}} = 1.0048 Q_{\text{bepaald}} + 0.0482$	4.5
V53	$Q_{\text{werkelijk}} = 0.9965 Q_{\text{bepaald}} + 0.04$	6.5

5.2 Debietmeting door regenkolken

Door injectie van een kleurstof is bepaald wat de minimale looptijd is tussen twee streepjes op de kolkaansluiting. Het betreft hier een minimale looptijd aangezien de kleurstof (Kaliumpermangnaat) met de snelste vloeistofdeeltjes door de slang stroomt. Met deze looptijd is een snelheid berekend door de tijd te delen door de afstand tussen deze streepjes (0.50 m). Onder andere door dispersie en snelheidsverschillen in de slang is de berekende snelheid hoger dan de gemiddelde snelheid. In figuur 5-3 staat een duidelijk voorbeeld van de snelheidsverschillen in de slang. Desondanks is het debiet berekend door de gevonden snelheid te vermenigvuldigen met het natte oppervlak van de slang (binnendiameter = 0.025 m). Het berekende debiet is een overschatting van het werkelijke debiet die veroorzaakt wordt door de genoemde factoren en het feit dat de slang niet geheel rond is.



Figuur 5-3: Grote snelheidsverschillen in kolkaansluiting zichtbaar gemaakt door kleurstof.

Overzicht foutenbronnen bepaling debiet uit tracerlooptijd:

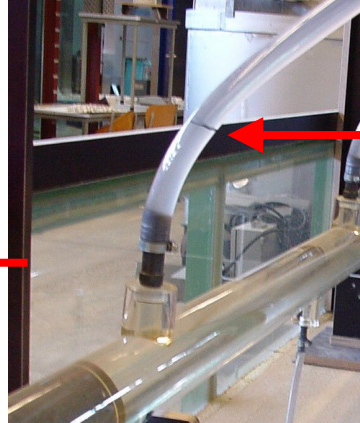
- 1) Er is dispersie en er zijn grote snelheidsverschillen in de slang.
- 2) Bij korte looptijden wordt een grote fout gemaakt bij de tijdmeting met een stopwatch.
- 3) In sommige gevallen is er geen scherpe overgang van de kleurstof zichtbaar. Het is dan lastig om het moment te bepalen wanneer de tracer het meettraject binnenkomt en verlaat.
- 4) De slang staat enigszins krom en is daarom niet zuiver rond.
- 5) De lengte van de slang is te kort om een homogeen snelheidsprofiel te ontwikkelen.
- 6) Het injecteren van de vloeistof veroorzaakt kleine verstoringen van de waterstroming.



Figuur 5-4: Links: injectie van kleurstof in putje
Figuur 5-5: Rechts: stroming van kleurstof door slang.

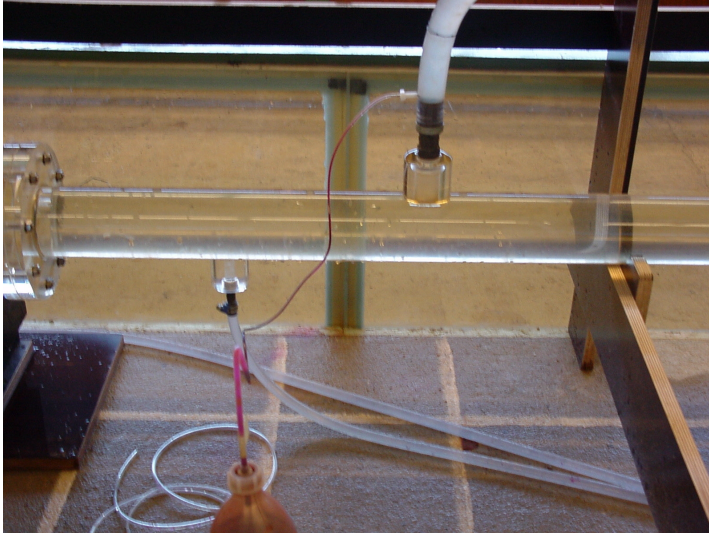
Meetopzet bij stroming van straat naar riool

- 1) Voeg kleurstof toe in het putje, zie figuur 5-4.
- 2) Start de tijd als de kleurstof het meettraject binnenkomt, zie ook figuur 5-5 tot 5-7.
- 3) Stop de tijd als de kleurstof het meettraject verlaat.
- 4) Herhaal stap 1 t/m 3 drie keer.

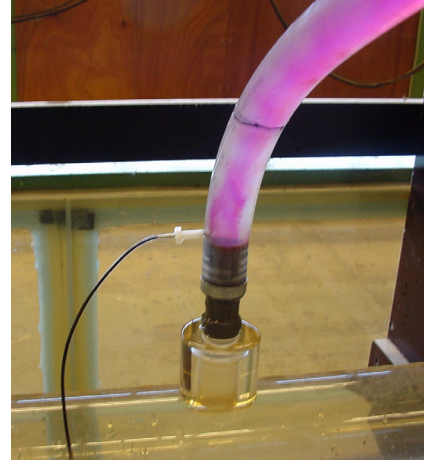


Figuur 5-6: Links: regenkolckverbinding (straatkant) met de grens van het meettraject aan de straatkant gemarkeerd.
Figuur 5-7: Rechts: regenkolckverbinding aan het riool, met de grens van het meettraject aan de rioolkant gemarkeerd.

Voor uitstroomcondities is gebruik gemaakt van een iets andere methode voor injectie. Hiervoor is een klein buisje met een diameter van 1 mm in de slang geduwd waardoor kleurstof wordt geïnjecteerd, zie hiervoor ook figuur 5-8 en 5-9. Verder zijn de handelingen gelijk gebleven.



Figuur 5-8: Links, opstelling voor het injecteren van kleurstof bij uitstroom condities.

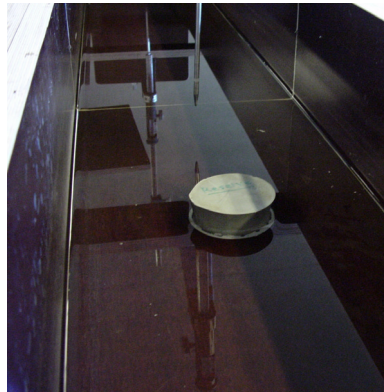


Figuur 5-9: Rechts, idem als figuur 5-8 maar uitvergroot en met een kleurstof.

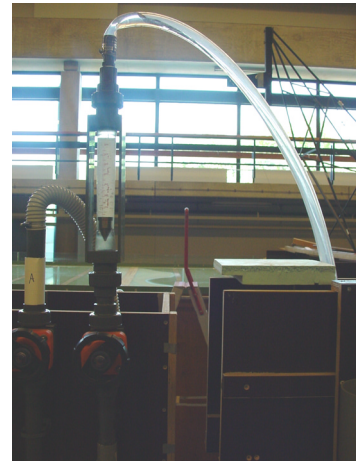
5.2.1 Kalibratie van tracer methode



Figuur 5-10: Links, plaat in goot.



Figuur 5-11: Midden, rubber stop in put.



Figuur 5-12: Rechts, vlotterdebietmeter t.b.v. dosering kleine debieten in put 1 in serie geschakeld met vlotter B.

Er is een vijftal metingen gedaan om te bepalen wat de verhouding is tussen het debiet berekend uit de tracerlooptijd en het werkelijke debiet. Dit is gedaan door te zorgen dat al het gedoseerde water op straat door put 1 instroomt en door put 7 uitstroomt.

Vorbereiding:

- 1) Zet een plaatje benedenstrooms van put 1 welke het water keert, zie ook figuur 5-10
- 2) Zet rubber stoppen in put 2 t/m 6 , zie ook figuur 5-11
- 3) Zet een plaatje bovenstrooms van put 7 welke het water keert
- 4) Sluit de aan- en afvoer van water op het riool af
- 5) Doseer een klein debiet aan de bovenstroomse zijde van de straat, zie ook figuur 5-12

Vanwege de grote drukverschillen (drukpotjes lopen snel onder) is de benedenstroomse rand van de straat geheel weggehaald. Daarnaast is veel aandacht nodig voor het voorkomen van lekken. M.b.v. kleurstoffen is dit eenvoudig te constateren en eventueel lekken kan worden verholpen met mandoline (flexibele klei).

Voor de massabepaling is gebruik gemaakt van een vlotterdebietmeter van het laboratorium van Gezondheidstechniek met een meetbereik vanaf 150 l/h –1500 l/h. Het debiet is tegelijkertijd ook m.b.v. een massadebietbepaling gemeten, waaruit geconcludeerd mag worden dat de gebruikte debietmeter goed geijkt is. De massadebietbepaling wordt in paragraaf 5.3 toegelicht. Door het in serie schakelen met vlotter bleek onmiddellijk dat vlotter B een te lage waarde aangeeft zoals eerder geconstateerd bij de kalibratie van de vlotters en V-stuwen.

Correctiefactor

Het blijkt dat de verhouding tussen direct geïntegreerd debiet uit de tracerlooptijd en het werkelijke debiet ongeveer 1.33 bedraagt met een standaardafwijking van ongeveer 0.05, zie voor resultaten tabel 5-1 t/m 5-3 en figuur 5-14. Deze factor geldt voor debieten tussen 0.05 l/s en 0.2 l/s, voor lagere afvoeren geldt mogelijk een andere correctiefactor echter deze zijn minder relevant. Daarnaast moet nog worden opgemerkt dat in de slang debieten optreden die in het theoretische overgangsgebied tussen laminaire en turbulente stroming liggen. Bij afvoeren tot 0.045 l/s (= 162 l/h, $Re=2300$) is de stroming theoretisch laminair, daarboven ligt het overgangsgebied waar dus waarschijnlijk turbulente stroming optreedt. Vanwege de vorm van de slang en de aansluitingen is de stroming waarschijnlijk sneller turbulent dan op grond van theoretische waarde wordt verwacht.

Q-h relatie putje

Op basis van het referentieniveau bepaald in hoofdstuk 6 is de Q-h relatie van de putjes 1 en 7 bepaald voor in- respectievelijk uitstroomcondities. Zie voor resultaten tabel 5-4 en figuur 5-13. Tijdens deze metingen is de stroomsnelheid in de rioolbuis bijna verwaarloosbaar waardoor de stroming laminair wordt, dit in tegenstelling tot de metingen die zijn verricht.

Tabel 5-1: Meting van looptijden tracer door kolk 1

Nr.	tijd_1	tijd_2	tijd_3	tijd_4	tijd_5	tijd_6	Gemiddelde tijd	Snelheid	debiet
[-]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[l/s]
1	6.82	5.40	5.69	6.25	6.03	6.04	6.04	0.08	0.041
2	3.56	3.72	3.72	3.66	3.75	3.75	3.69	0.14	0.066
3	2.31	2.47	2.47	2.46	2.40	2.35	2.41	0.21	0.102
4	1.38	1.47	1.47	1.44	1.50	1.50	1.46	0.34	0.168
5	1.06	1.09	1.06	1.03	1.04	0.99	1.05	0.48	0.235

Tabel 5-2: Meting van looptijden tracer door kolk 7

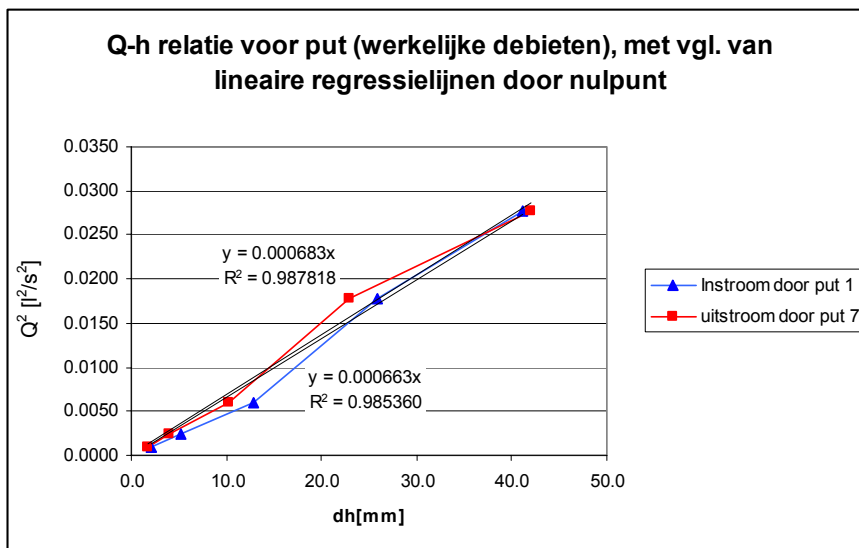
Nr.	tijd_1	tijd_2	tijd_3	tijd_4	tijd_5	tijd_6	gemiddelde tijd	Snelheid	debiet
[-]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[l/s]
1	6.32	6.28	6.50	6.44	6.03	6.47	6.34	0.08	0.039
2	3.59	3.60	3.55	3.83	3.41	3.78	3.63	0.14	0.068
3	2.34	2.38	2.50	2.56	2.31	2.50	2.43	0.21	0.101
4	1.40	1.47	1.50	1.53	1.44	1.47	1.47	0.34	0.167
5	1.13	1.09	1.14	1.09	1.04	1.03	1.09	0.46	0.226

Tabel 5-3: Vergelijking van debieten berekend uit de looptijd van de tracer met de meting van debieten m.b.v. massadebietbepaling en vlotteraflezing. Het debiet met de tracer is bepaald door integratie van de maximale snelheid over het natte oppervlak van de slang. Bij meting 1 was het niet mogelijk om de vlotter af te lezen, hier is de massadebietbepaling als referentie gebruikt.

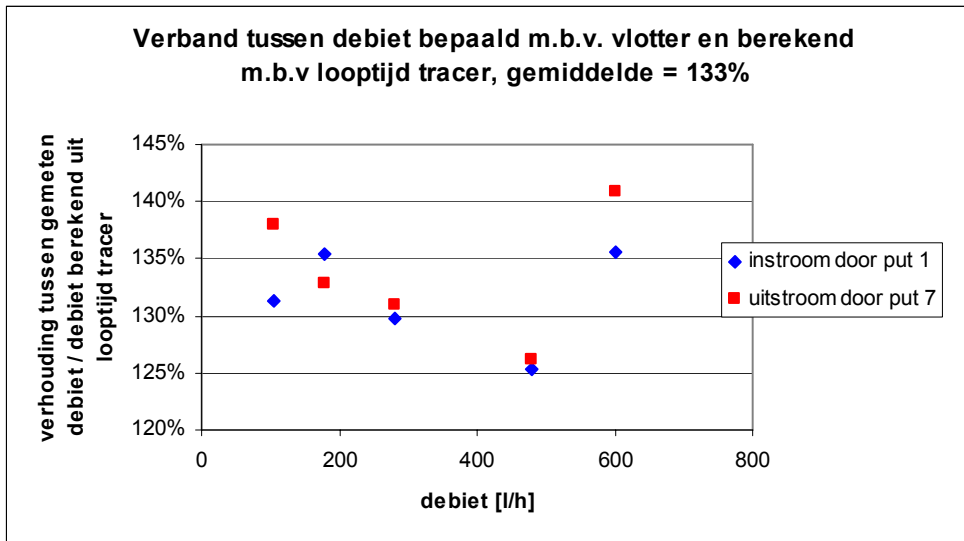
Nr.	Vlotter Aflezing	Massa-experiment			Afwijking	Reynolds	Berekend uit tracer kolk 1	verhouding		Berekend uit tracer kolk 7	verhouding	
	Debiet	Tijd	Massa	debiet	t.o.v. massa			t.o.v. massa	t.o.v. vlotter		t.o.v. massa	t.o.v. vlotter
	[-]	[l/h]	[s]	[kg]	[l/h]	[%]	[-]	[%]	[%]	[l/h]	[%]	[%]
1	106*	120.21	3.543	106	n.v.t.	2.1E+03	146	1.38	n.v.t.	139	1.31	n.v.t.
2	180	131.48	6.513	178	0.9%	3.4E+03	239	1.34	1.33	244	1.37	1.35
3	280	96.35	7.277	272	3.0%	5.2E+03	367	1.35	1.31	363	1.34	1.30
4	480	79.66	10.624	480	0.0%	8.6E+03	605	1.26	1.26	602	1.25	1.25
5	600	-	-	n.v.t.	n.v.t.	1.2E+04	846	n.v.t.	1.41	813	n.v.t.	1.36
* is hetzelfde genomen als massa							Gemiddeld	1.33	1.33	Gemiddeld	1.32	1.32
							Standaard-deviatie	0.051	0.062	Standaard-deviatie	0.048	0.049

Tabel 5-4: Gemeten waterstanden en afgeleide drukverschillen op 25 cm voor kolk 1 respectievelijk kolk 7.

Aflezing peilnaalden				Absolute hoogte				drukverschil		
h1straat	h2riool	h8straat	h8riool	h1straat	h2riool	h8straat	h8riool	Δh 1	Δh 7	Q^2
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[l ² /s ²]
24.92	40.00	39.08	25.38	1.0588	1.0568	1.0551	1.0569	2.0	1.8	0.0009
20.70	35.46	34.36	20.88	1.0166	1.0114	1.0079	1.0119	5.2	4.0	0.0025
22.14	36.14	34.43	21.57	1.0310	1.0182	1.0086	1.0188	12.8	10.2	0.0060
24.95	37.65	34.57	22.98	1.0591	1.0333	1.0100	1.0329	25.8	22.9	0.0178
28.41	39.57	34.64	24.96	1.0937	1.0525	1.0107	1.0527	41.2	42.0	0.0278



Figuur 5-13: Vergelijking van het gekwadeerde uitwisselingsdebiet met de verschillen in piëzometrisch niveau op straat en in het riool 25 cm voor putje 1 respectievelijk putje 7. In deze figuur zijn ook de regressielijnen getekend, voor put 7 staat de vergelijking hiervan linksboven en voor put 1 rechtsonder.



Figuur 5-14: Verhouding tussen het gemeten debiet en het debiet berekent uit tracerlooptijd. De debieten zitten op of net boven het overgangsbijdebiet van laminair en turbulent. Het gemiddelde is 133% maar varieert bij de metingen van 125 % tot 142%. Dit wordt veroorzaakt door een snelheidsprofiel in de slang dat afhankelijk is van het debiet maar ook door meetfouten die worden gemaakt met het bepalen van de looptijd.

5.3 Massadebietbepaling

5.3.1 Kleine debieten

Ten behoeve van de kalibratie van de tracermethode is een massadebietbepaling uitgevoerd. In het betreffende experiment is de tijd en massa beschreven. Om de massa te bepalen is gebruik gemaakt van de digitale elektronische weegschaal van het vloeistofmechanica laboratorium. De gebruikte weegschaal kan op 0.1 gram worden afgelezen. Water is gedurende 1½ tot 2 minuten opgevangen in een emmer. Door vervolgens de emmer met water te wegen en hier het gewicht van de emmer van af te halen is de massa van het opgevangen water bepaald. Zie ook figuur 5-15 en 5-16.



Figuur 5-15: Links, emmer gebruikt t.b.v. massadebietbepaling van kleine debieten

Figuur 5-16: Midden, display van de weegschaal

Figuur 5-17: Rechts, vat van 60 liter inhoud wat is gebruikt t.b.v. massadebietbepaling van grote debieten noodzakelijk voor de kalibratie van de V-stuwen en vlotterdebetmeters A, B en C.

Het debiet bij een massadebietbepaling volgt uit verg. 5-4. Met verg. 5-5 kan de maximale meetfout worden bepaald met verg. 5-6 kan de verwachte fout worden bepaald. De temperatuur van het water was tijdens de massadebietbepaling 22°C.

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{m}{\rho T} \quad (5-4)$$

$$\frac{\Delta Q_{\max}}{Q} \leq \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta T}{T} \quad (5-5)$$

$$\frac{\Delta Q_{\max}}{Q} \leq \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta T}{T} \quad (5-6)$$

Waarin:

Q	het debiet is in m ³ /s	m ³ /s
m	massa in kg	kg
ρ	soortelijke massa in kg/m ³	kg/m ³
T	tijdsduur van de massabepaling	s

De fout in de massabepaling zal kleiner zijn dan 1%. De fout in de soortelijke massa is verwaarloosbaar klein. Een schatting voor de fout die met de tijdsbepaling wordt gemaakt is ongeveer 0.5 s. Bij een tijdsduur van 40 seconden is de fout die wordt gemaakt in de tijd 1.3%. De maximale fout in de massadebietbepaling is dan 2% en de verwachte fout is 1.6%. Dit is voldoende nauwkeurig om de debieten te kunnen kalibreren.

5.3.2 Grote debieten

Deze zijn analoog uitgevoerd als die van de kleine debieten alleen met een groter vat. Het vat wat gebruikt is voor de grote debieten staat in figuur 5-17, dit is een vat met een inhoud van 60 l. In dit vat is water opgevangen van de vlotters en V-stuwen. Als de totale massa van vat en water groter is dan 30 kg dan wordt met een emmer water uit het vat geschept en wordt dit apart gewogen. Eventueel wordt deze stap herhaald totdat wel de massa van vat en water kan worden bepaald.

5.4 Bodem- en referentieniveau

Omdat de goot is geconstrueerd van hout vervormd deze als hij nat of droog wordt. Door een aantal keer een horizontale waterspiegel in te stellen kan bepaald worden of deze buiging door drogen en nat worden significant is. Daarnaast wordt inzicht verkregen in de bodemvorm in langsrichting. Met de informatie kan ook een referentieniveau worden bepaald. De resultaten en analyse worden in hoofdstuk 6 besproken.

Meetopzet

- 1) Zorg dat alle luchtbellen uit het riool weg zijn
- 2) Sluit de benedenstroomse afvoer van het riool.
- 3) Zet de rand aan de benedenstroomse zijde van de straat op ± 8cm en zorg met klei dat dit waterdicht wordt.
- 4) Vul het systeem zo dat enkele centimeters water op de straat staat en sluit hierna de toevoer van water
- 5) Wacht tot het water in equilibrium is, dit kan ± 30 minuten duren omdat de drukpotjes geheel gevuld moeten worden
- 6) Bepaal met de peilnaalden van de straat en het riool het waterniveau. Bepaal ook met de manometerbuisjes de waterstand.
- 7) Bepaal vervolgens het bodemniveau met behulp van de peilnaalden op de straat af. Wanneer dit gedaan wordt moet de punt van de peilnaald voorzichtig tegen de bodem van straat worden gedraaid omdat anders een putje in het hout ontstaat en de aflezing niet meer representatief is.

5.5 Ontluchten van de rioolbuis en drukslangetjes

Op het moment dat in het riool een lage waterstand is en water vanaf de straat het riool instroomt komen er luchtbelllen in de rioolbuis. Deze luchtbelllen blijven soms op dezelfde plaats hangen. Het is belangrijk om op de aanwezigheid van lucht te controleren. Worden luchtbelllen geconstateerd dan zijn deze eenvoudig te verwijderen door een combinatie van hoge stroomsnelheid in het riool en tijdelijk afsluiten van enkele putjes. Bij een waterstand in het riool van minder dan 15 cm onder het straatniveau komt er geen lucht meer in het systeem.

Tijdens de eerste metingen is één keer een luchtbel met een diameter van ± 1 cm waargenomen aan de onderkant van de slangaansluiting aan de straatzijde. Dit is op analoge wijze te verhelpen echter om dit te constateren moet goed worden opgelet.

Als het systeem tijdelijk droog heeft gestaan of als er veel luchtbelllen in het riool zijn gekomen bestaat de kans dat er luchtbelllen in de drukslangetjes aanwezig zijn. Door de slangetjes die gekoppeld zijn aan het manometerbord en de drukpotjes een voor een af te koppelen en door te laten spoelen worden alle luchtbelllen gegarandeerd uit het systeem gespoeld.

5.6 Instelling van de meetsituaties

Het instellen van een van tevoren opgegeven benedenstrooms debiet en of waterstand kost zeer veel tijd. Het systeem reageert traag op de stand van de regelkraan maar de drukval is over de kraan is wel sterk afhankelijk van de kraanstand. Daarnaast staat alle apparatuur in serie geschakeld. Dit is lastig omdat als bovenstrooms een debiet wordt ingesteld en de waterstand in het instroombassin van het riool toeneemt, het debiet lager wordt.

Bij lage waterstanden in het riool komt veel lucht in de rioolbuis, het niveau van de manometerbuisjes varieert dan zeer sterk. Bij hoge waterstanden komt geen lucht meer in het riool maar de niveaus van de manometerbuisjes fluctueren soms nog wel enigszins.

5.7 Aflezing meetwaarden

Achtereenvolgens zijn de volgende stappen doorlopen:

- Aflezing peilnaalden op straat, peilnaalden op de drukpotjes van het riool en het manometerbord
- Aflezing van de debieten op de vlotterdebietsmeters.
- Bepaling van de hoogte van de overstortende straal bij de V-stuw
- Bepaling van de looptijd van de tracer voor alle putjes

Peilnaalden en manometerbord

De gebruikte peilnaalden hebben een cm verdeling waarop tot $\frac{1}{100}$ cm = $\frac{1}{10}$ mm kan worden afgelezen. Het manometerbord heeft een mm verdeling, deze kan alleen op hele millimeters worden afgelezen, de meniscus is niet in alle gevallen netjes hol.

Voor de metingen is als volgt gehandeld: na ± 45 minuten is eenmaal de verhanglijn in het riool gemeten en vervolgens is bepaald of tijdens het aflezen de waterhoogte t.p.v. het eerste drukpunt is veranderd. Als de verandering meer was dan $\frac{1}{10}$ mm dan is nogmaals 15 minuten gewacht. Dit is herhaald tot de verandering minder dan $\frac{1}{10}$ mm was.

Vervolgens is de waterstand op de straat afgelezen waarbij de peilnaalden langzaam naar beneden worden gedraaid tot het moment dat de punt de gehele tijd het wateroppervlak raakte. Deze methode is consequent aangehouden. Dit is met name bij golfjes op het oppervlak van belang.

Debieten van de vlotterdebietsmeters

Deze zijn eenmaal afgelezen na de aflezing van de peilnaalden op de straat en van het riool

Debieten van de V-stuwen

De peilnaald is eenmaal afgelezen na de aflezing van de peilnaalden op de straat en van het riool

Looptijdbepaling van de tracer

Deze zijn bepaald nadat alle andere waarden voor de debieten en waterstanden waren afgelezen. Eerst is 3 keer voor de meest benedenstroomse put de looptijd bepaald en vervolgens is dit voor de volgende put ook 3 keer gedaan, etc.

5.8 Foto's en filmpjes

In bijlage 4 staat een overzicht van de digitale foto's en filmpjes die zijn gemaakt tijdens de constructiefase en tijdens de metingen.

6 Beschrijving metingen

6.1 Onbewerkte gegevens

6.1.1 Uitleg dataopslag

Het bestand meetresultaten.xls bevat de meetresultaten van de metingen. In de sheet “ruwe data” van dit bestand staan de onbewerkte gegevens van de metingen. In de eerste rij staat een omschrijving van de gegevens in de kolom, deze omschrijving wordt in tabel 6-1 toegelicht. Op de volgende rijen staan vervolgens de meetwaarden per meting.

Tijdens de gepresenteerde metingen is echter alleen een klepafsluiter gebruikt. De watertemperatuur is dagelijks afgelezen op een thermometer met verdeling op hele graden, de gemeten temperatuur was altijd ± 22 °C.

Tabel 6-1: Toelichting op de namen van de verschillende kolommen in de sheet “ruwe data”.

Number	Nummer van de meting, is opvolgend in de tijd
Time [hr:min]	Tijd van de meting
Date[d:m]	Datum van de meting
Number of closing turns	Aantal slagen dat de kraan is dichtgedraaid, t.o.v. geheel geopend
Sew_1_inlet	Aflezingspeilnaald in cm van drukpotje 1: instroombassin riool
Sew_2_pressure t/m Sew_9_pressure	Aflezingspeilnaald in cm van drukpotje 2 t/m 9: drukpunten riool
Sew_10_outlet	Aflezingspeilnaald in cm van drukpotje 10: uitstroombassin riool
Street_1 t/m Street_9	Aflezingspeilnaald in cm van straat punt 1 t/m 9, 1 is het meest bovenstroomse meetpunt
Supply sewer A [l/h]	De uitstroomslang van vlotter A kan op het riool of de straat worden gericht, als deze op het riool staat wordt hier een waarde ingevuld.
Supply sewer B [l/h]	De uitstroomslang van vlotter B kan op het riool of de straat worden gericht, als deze op het riool staat wordt hier een waarde ingevuld.
Supply sewer C [l/h]	Vlotter C staat altijd op het riool gericht, als er een debiet wordt gedoseerd, wordt hier een waarde genoteerd.
Supply street A[l/h]	De uitstroomslang van vlotter A kan op het riool of de straat worden gericht, als deze op de straat staat wordt hier een waarde ingevuld.
Supply street B[l/h]	De uitstroomslang van vlotter B kan op het riool of de straat worden gericht, als deze op de straat staat wordt hier een waarde ingevuld.
zero_level_v_notch_53_sewer	Referentieniveau op peilnaald in cm: deze wordt bepaald bij nulstelling V-stuw 53.8 graden
head_v_notch_53_sewer	Afgelezen waarde op peilnaald V-stuw 53.8 graden in cm, geen waarde betekent geen afvoer
dh_v_notch_53_sewer [cm]	Hoogte overstortende straal peilnaald V-stuw 53.8 graden in cm
Discharge_v_notch_53_sewer	Debiet bepaald voor peilnaald V-stuw 53.8 graden formule volgens ISO toegepast op hoogte overstortende straal, zonder correctie
zero_level_v_notch_28_street [cm]	Referentieniveau op peilnaald in cm: deze wordt bepaald bij nulstelling V-stuw 28.4 graden
head_v_notch_28_street [cm]	Afgelezen waarde op peilnaald V-stuw 28.4 graden in cm, geen waarde betekent geen afvoer
dh_v_notch_28_street [cm]	Hoogte overstortende straal peilnaald V-stuw 28.4 graden in cm
Discharge_v_notch_28_street	Debiet bepaald voor peilnaald V-stuw 28.4 graden formule volgens ISO toegepast op hoogte overstortende straal, zonder correctie
Nonius_1_sewer t/m Nonius_10_sewer	Aflezingsnoniusbord, is aangesloten op dezelfde drukpunten als de drukpotjes van het riool.
Distance for tracer time [m]	Afstand waarover de tijd van de kleurstof is bepaald. kan 50 of 70 cm zijn: 50 cm is tussen streepjes, 70cm is gehele slang, dit is aan het begin enkele keren gebruikt
Tracer_time_connection_1 [s]_1 t/m	1e t/m 3e geklokte tijd met stopwatch voor kolkaansluiting 1 t/m 7,

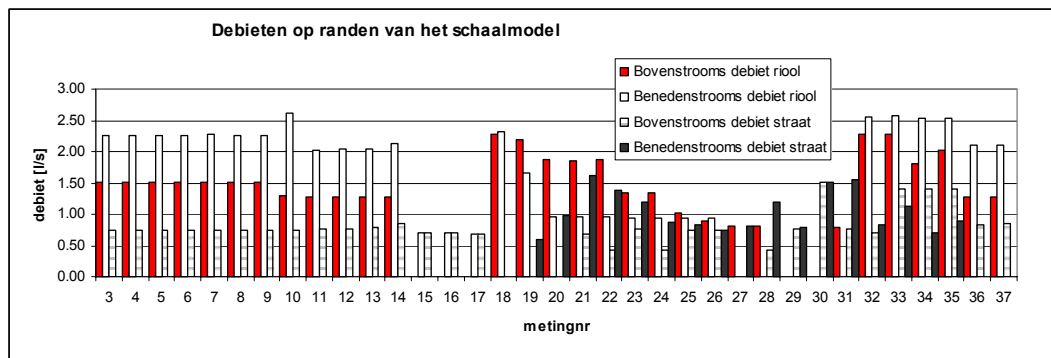
tracer_time_connection_7 [s]_3	negatieve waarden betekend stroming van riool naar straat. In een aantal gevallen staat alleen instroom of uitstroom vermeld. Geen waarde betekent niet gemeten of nul, dit laatste is direct te zien aan de waterstanden en debieten.
weir street [m]	Hoogte waarop de overstort is ingesteld aan de benedenstroomse zijde. Deze is niet bij alle metingen bepaald.
Remarks	Opmerkingen over meting, over golfjes, stabiliteit etc.

6.1.2 Overzicht van verrichte metingen

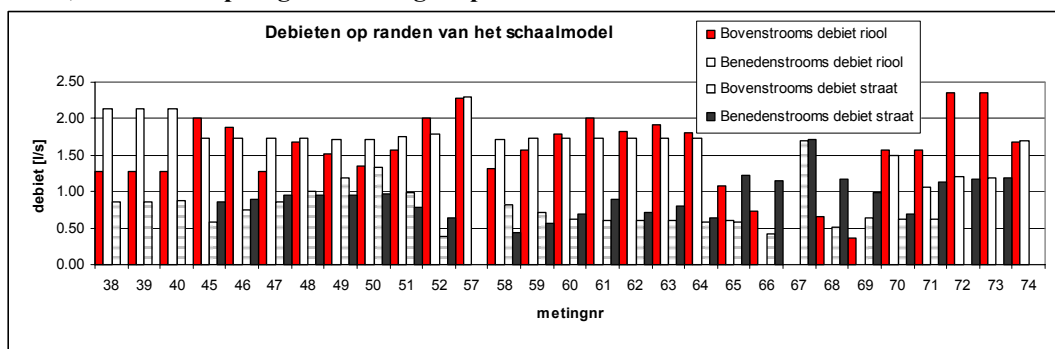
In totaal zijn 74 metingen uitgevoerd, dit zijn verschillende type metingen:

- T.b.v. de bepaling van het referentieniveau en het bodemniveau: meting 1, 2, 41, 42, 43, 44, 53, 54, 55, 56.
- Meting met superkritische stroming op het bovenstroomse gedeelte van de straat: meting nr. 67.
- Tevens zijn er een aantal metingen met alleen stroming in het riool: meting nr. 18,57 en 74.
- Daarnaast zijn er metingen met stroming van het riool naar de straat maar ook andersom. Tevens zijn er een aantal metingen met stroming naar het riool en naar de straat.
- In een aantal gevallen is de stroming op de straat of het riool op nul gesteld. Hierbij moet worden gerealiseerd dat de waterstroming bij lage afvoeren de neiging heeft om laminair te worden.

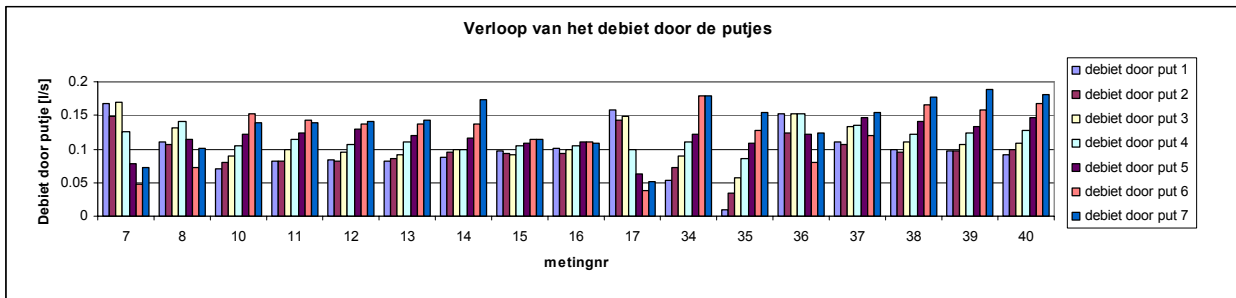
In figuur 6-1 en 6-2 zijn de debieten op de randen van de opstelling gegeven in grafiek vorm. In figuur 6-3 en 6-4 wordt het verloop van de debieten door de putjes getoond. Met deze figuren kan voor een meting snel worden bepaald of water naar het riool stroomt of naar de straat.



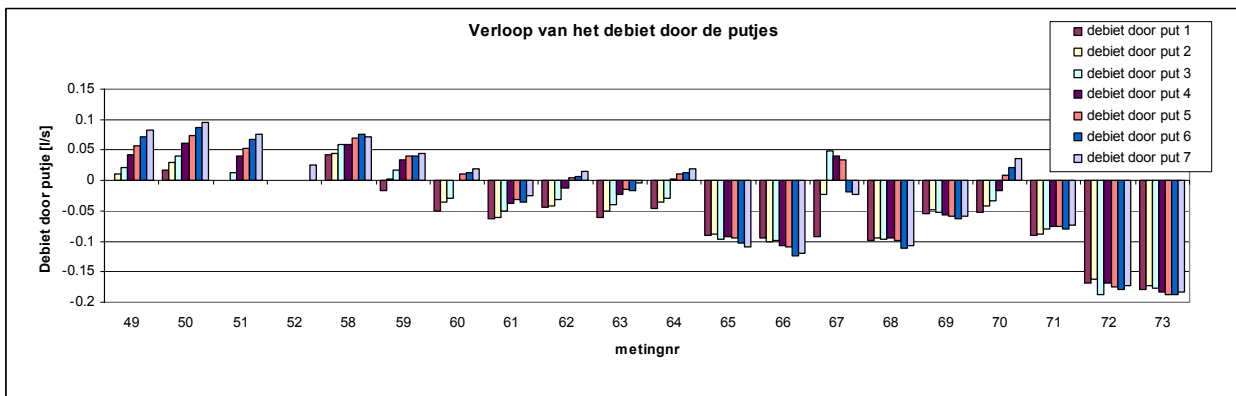
Figuur 6-1: Debieten op de randen van het schaalmodel voor meting 3 t/m 37, metingen die gebruikt zijn t.b.v. het referentieniveau zijn niet weergegeven. Het betreft in deze figuur de gekalibreerde debieten, dit wordt in paragraaf 6.4 nog besproken



Figuur 6-2: Debieten op de randen van het schaalmodel voor meting 38 t/m 74, metingen die gebruikt zijn t.b.v. het referentieniveau zijn niet weergegeven. Het betreft in deze figuur de gekalibreerde debieten, dit wordt in paragraaf 6.4 nog besproken



Figuur 6-3: Verloop van het debiet door de putjes van meting 7 t/m 40: put 1 is het meest bovenstrooms gelegen putje. Alleen metingen waarbij met de tracermethode (zie hoofdstuk 5) de debieten zijn gemeten zijn gebruikt. Positieve waarden voor het debiet betekent stroming van de straat naar het riool



Figuur 6-4: Verloop van het debiet door de putjes van meting 49 t/m 73: put 1 is het meest bovenstrooms gelegen putje. Alleen metingen waarbij met de tracermethode (zie hoofdstuk 5) de debieten zijn gemeten zijn gebruikt. Meting 67 is afwijkend, dit is een meting zonder toe- en afvoer in de rioolbuis, maar met de instelling van een superkritische randvoorwaarde bovenstrooms op straat, waardoor er een watersprong optreedt. Positieve waarden voor het debiet betekent stroming van straat naar riool

6.2 Referentieniveau en bodemprofiel

De goot is geconstrueerd van hout en zal vervormen als hij nat of droog wordt. Door geen water aan of af te voeren kan bepaald worden of deze vervorming significant is. Daarnaast kan de bodemvorm in langsrichting worden bepaald en hiermee kan een referentieniveau worden vastgesteld. De procedure die hiervoor is gevolgd staat in paragraaf 5-4. De resultaten staan in tabel 6-2 t/m 6-5 en figuur 6-5 en 6-6.

Tabel 6-2: Aflezingen tijdens nulstelling op verschillende data

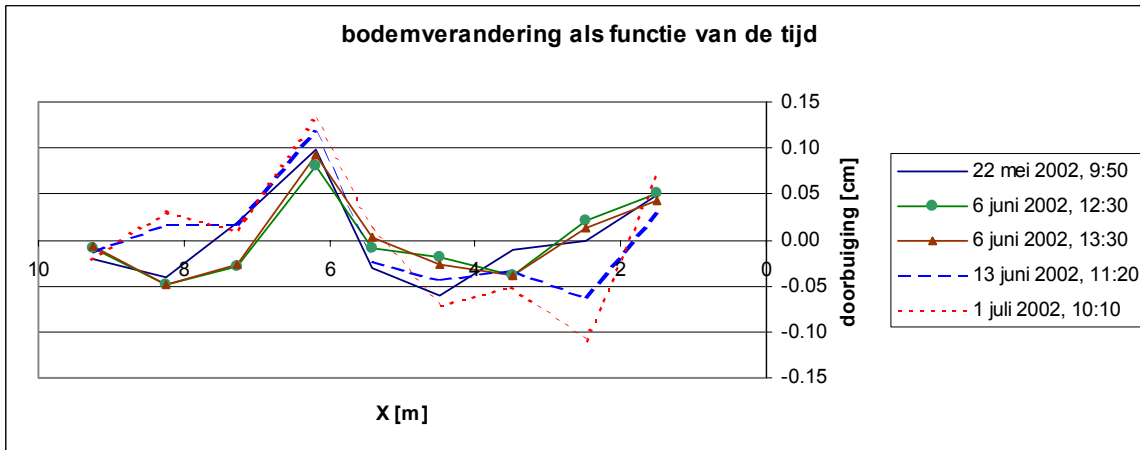
Number	Time [hr:min]	Date[d:m]	Sew_1_inlet [cm]	Sew_2_pressure [cm]	Sew_3_pressure [cm]	Sew_4_pressure [cm]	Sew_5_pressure [cm]	Sew_6_pressure [cm]	Sew_7_pressure [cm]	Sew_8_pressure [cm]	Sew_9_pressure [cm]	Sew_10_outlet [cm]	Street_1_upstream [cm]	Street_2 [cm]	Street_3 [cm]	Street_4 [cm]	Street_5 [cm]	Street_6 [cm]	Street_7 [cm]	Street_8 [cm]	Street_9_downstream [cm]
1	9:50	5/22/02	42.14	35.64	36.32	21.19	23.30	21.46	21.03	21.03	37.00	21.10	20.38	20.76	20.90	33.96	34.58	34.96	20.70	34.91	33.73
2	9:51	5/22/02											19.02	19.52	19.50	32.48	33.23	33.64	19.33	33.53	32.30
41	12:30	6/6/02	45.00	38.53	39.22	24.04	26.18	24.32	23.89	23.91	39.90	23.94	23.26	23.63	23.79	36.82	37.47	37.85	23.55	37.78	36.59
42	13:30	6/6/02	42.78	36.32	36.99	22.02	23.94	22.10	21.65	21.68	37.67	21.73	21.03	21.40	21.56	34.60	35.25	35.61	21.32	35.54	34.35
43	13:31	6/6/02											19.05	19.46	19.60	32.52	33.26	33.65	19.37	33.54	32.32
44	13:32	6/6/02	25.84	19.46	20.16	4.94	7.09	5.22	4.84	4.83	20.81	4.89									
53	11:20	6/13/02	42.80	36.35	37.07	21.87	24.02	22.13	21.71	21.72	37.67	21.75	21.07	21.45	21.60	34.65	35.28	35.66	21.35	35.60	34.40
54	11:21	6/13/02											19.05	19.40	19.55	32.50	33.27	33.67	19.37	33.60	32.34
55	10:10	7/1/02	43.47	36.98	37.70	22.52	24.65	22.77	22.34	22.39	38.40	22.44	21.70	22.07	22.23	35.28	35.92	36.25	21.97	36.22	35.05
56	10:15	7/1/02											19.08	19.40	19.48	32.51	33.27	33.68	19.38	33.69	32.34

Tabel 6-3: Waterdieptes in cm berekend uit het verschil van de van het waterniveau en de aflezing van de bodem van de goot.

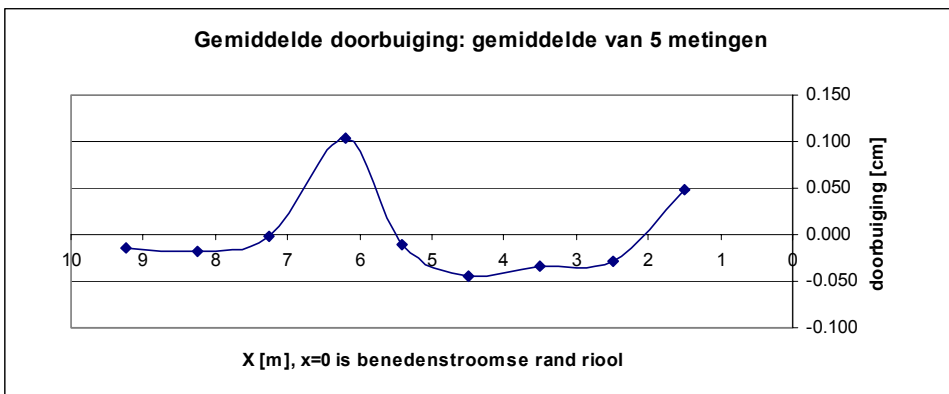
	waterlevel_1 [cm]	waterlevel_2 [cm]	waterlevel_3 [cm]	waterlevel_4 [cm]	waterlevel_5 [cm]	waterlevel_6 [cm]	waterlevel_7 [cm]	waterlevel_8 [cm]	waterlevel_9 [cm]	gemiddeld [cm]
22 mei, 2002, 9:50	1.36	1.34	1.40	1.48	1.35	1.32	1.37	1.38	1.43	1.38
6 juni, 2002, 12:30	4.21	4.17	4.19	4.30	4.21	4.20	4.18	4.24	4.27	4.22
6 juni, 2002, 13:30	1.98	1.94	1.96	2.08	1.99	1.96	1.95	2.00	2.03	1.99
13 juni, 2002, 11:20	2.02	2.05	2.05	2.15	2.01	1.99	2.00	1.97	2.06	2.03
1 juli, 2002, 10:10	2.62	2.67	2.65	2.77	2.65	2.57	2.59	2.53	2.71	2.64

Tabel 6-4: Afwijking t.o.v. gemiddelde waterdiepte, deze is berekend uit de waterdiepte uit tabel 6-3.

Afwijkingen t.o.v. gemiddelde waterdiepte in cm	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 1	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 2	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 3	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 4	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 5	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 6	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 7	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 8	afwijking t.o.v. gemiddeld waterniveau 9
22 mei, 2002, 9:50	-0.02	-0.04	0.02	0.10	-0.03	-0.06	-0.01	0.00	0.05
6 juni, 2002, 12:30	-0.01	-0.05	-0.03	0.08	-0.01	-0.02	-0.04	0.02	0.05
6 juni, 2002, 13:30	-0.01	-0.05	-0.03	0.09	0.00	-0.03	-0.04	0.01	0.04
13 juni, 2002, 11:20	-0.01	0.02	0.02	0.12	-0.02	-0.04	-0.03	-0.06	0.03
1 juli, 2002, 10:10	-0.02	0.03	0.01	0.13	0.01	-0.07	-0.05	-0.11	0.07
Gemiddeld	-0.014	-0.018	-0.002	0.104	-0.010	-0.044	-0.034	-0.028	0.048



Figuur 6-5: Bodemverloop voor de verschillende metingen, dit is bepaald t.o.v. gemiddelde waterdiepte zoals berekend in tabel 6-4.



Figuur 6-6: Gemiddeld bodemverloop, waarbij het gemiddelde bodemniveau op nul is gesteld. De gegevens afkomstig uit laatste regel van tabel 6-4.

Referentie niveau:

De bepaling van een goed referentieniveau is geen eenvoudige zaak, in dit geval zal worden uitgegaan van het gemiddelde bodemniveau als referentie, waarbij uit de hiermee bepaalde absolute waterhoogtes de waterdiepte kan worden berekend door hier het referentieniveau vanaf te trekken. Er wordt vanuit gegaan dat het gemiddelde bodemniveau op 13 juni op 1.0 m ligt. Deze meting is gebruikt omdat het bodemverloop bij deze meting het meeste lijkt op de gemiddelde doorbuiging. Vervolgens zijn de referentiewaarden bepaald waar de aflezing van de peilnaalden bij opgeteld dient te worden om de waterhoogte te verkrijgen. Referentiewaarden die hierbij horen zijn in tabel 6-5 en 6-6 gezet. Vanuit praktisch oogpunt is 1.0 m te prefereren, uit waterstanden kan dan snel worden berekend wat deze hoogte is t.o.v. het straatniveau. De bijbehorende waarde voor het referentieniveau van de manometerbuizen 1 t/m 8 wordt dan $= 1-752/1000-2.03/100=0.268$ m, voor 9 en 10 wordt dit 0.269m, dit bord hangt ongeveer 1 mm lager.

Tabel 6-5: referentiewaarden voor drukpunten riool

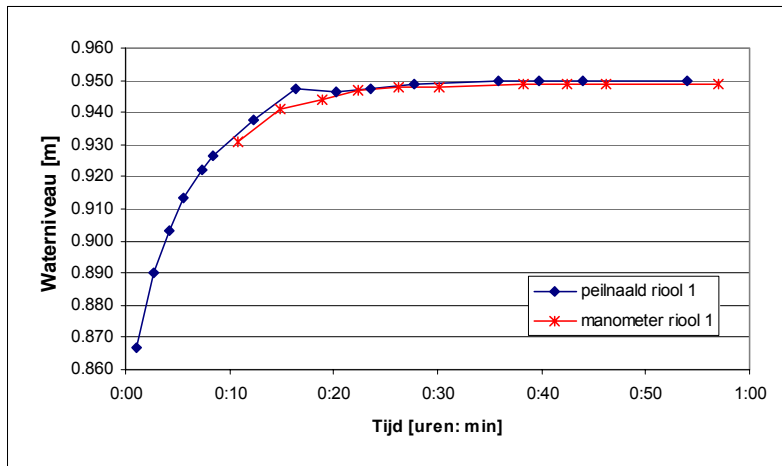
Sew_1_inlet [m]	Sew_2_pres sure [mm]	Sew_3_pres sure [m]	Sew_4_pres sure [m]	Sew_5_pres sure [m]	Sew_6_pres sure [m]	Sew_7_pres sure [m]	Sew_8_pres sure [m]	Sew_9_pres sure [m]	Sew_10_out let [m]
0.5923	0.6568	0.6496	0.8016	0.7801	0.7990	0.8032	0.8031	0.6436	0.8028

Tabel 6-6: referentiewaarden voor peilnaalden op straat

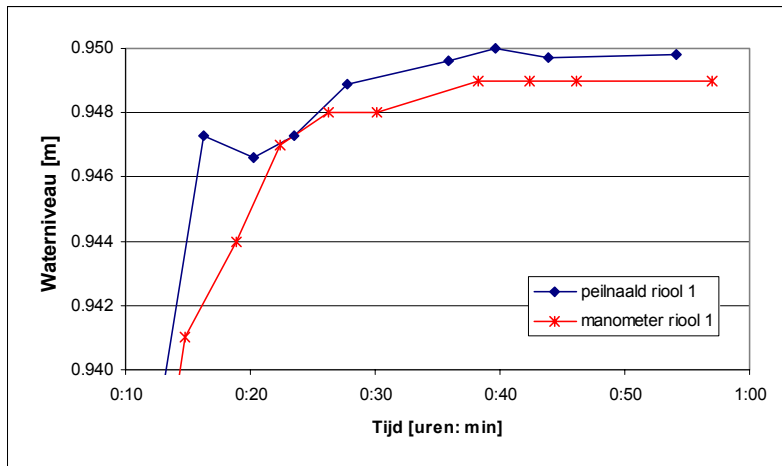
Street_1_ upstream [m]	Street_2 [m]	Street_3 [m]	Street_4 [m]	Street_5 [m]	Street_6 [m]	Street_7 [m]	Street_8 [m]	Street_9_ downstream [m]
0.8096	0.8058	0.8043	0.6738	0.6675	0.6637	0.8068	0.6643	0.6763

6.3 Instelsnelheid waterstand.

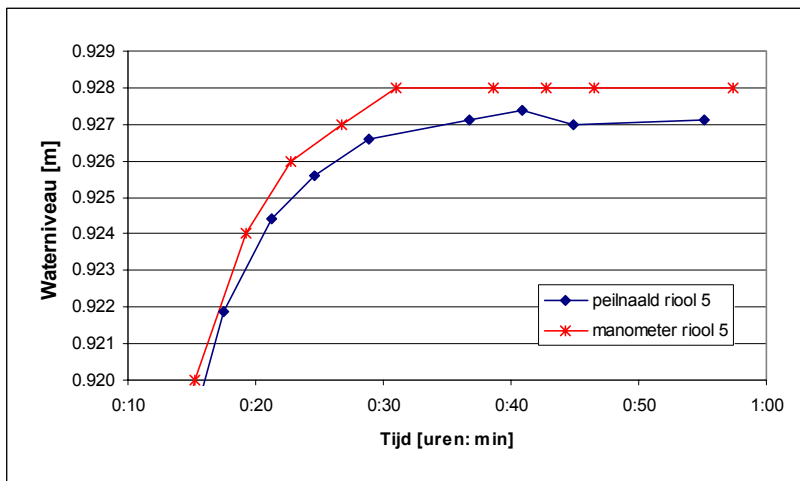
Het bestand “tijdserie.xls” bevat meetresultaten van de instelsnelheid bij riool. Hierbij is begonnen met een leeg riool, waar een debiet van 6200 l/h (afgelezen waarde) wordt gedoseerd. Vervolgens zijn met hoge frequentie zijn de peilnaalden en de drukpunten afgelezen. In bijlage 6 staan de resultaten voor alle drukpunten, in deze paragraaf staan enkele voorbeelden in figuur 6-7 t/m 7-9. Te zien is dat het een uur kost voordat er een evenwichtssituatie optreedt. In dit geval is er alleen stroming van water in het riool, met een waterstand beneden het straatniveau. Tijdens het meten was reeds opgevallen dat drukpotje 5,7 en 9 snel gevuld werden met water. Soms is er een afwijking van 1.5 mm tussen de waterstand bepaald met de peilnaalden t.o.v. de drukpunten. Afwijkingen van deze grootte zijn niet geheel verklaarbaar, echter de aflezing van de manometerborden is slechts 1 mm nauwkeurig en de constructie vervormd in de tijd waardoor de drukpotjes t.o.v. het manometerbord verplaatsen. Daarnaast is het zo dat als er water naar het drukpotje stroomt er een verlaging van piëzometrisch niveau optreedt. Geconcludeerd kan worden dat het al gauw 40 minuten duurt voordat er een stabiele waarde is ingesteld.



Figuur 6-7: Peilverloop bij meetpunt 1 van het riool bij instelling van een debiet op t=0.



Figuur 6-8: Peilverloop bij meetpunt 1 van het riool, sterk uitvergroete eindsituatie.



Figuur 6-9: Peilverloop bij meetpunt 5 van het riool, sterk uitvergrote eindsituatie.

6.4 Omgezette meetgegevens

6.4.1 Bepaling waterniveau's en debieten

In de sheet getransformeerd van het excelbestand meetresultaten.xls staan de omgezette meetresultaten. In de sheet staat op de eerste 2 rijen de meting die dient als referentie, in dit geval is de meting van 13/06 (meting nr. 53) weer als uitgangspunt genomen. De werkelijke waterstanden op de straat en piëzometrisch niveaus in het riool zijn met dit referentieniveau bepaald. Voor het riool is dit voor de peilnaalden en het manometerbord gedaan. De debieten op de randen van het model zijn met behulp van de correctievergelijkingen (zie ook par. 5.1) gecorrigeerd. De debieten bepaald met behulp van de kleurstof zijn op basis van een correctiefactor (zie ook par. 5.3) van 1.33.

6.4.2 Verschillen tussen manometerbord en peilnaaldaflezing riool

Bij veel metingen is er een verschil tussen de aflezing op het manometerbord. In de figuren in bijlage 5 is te zien dat er soms aanzienlijke afwijkingen zijn. Bedacht moet worden dat afwijkingen van 1mm nog verklaarbaar zijn uit de nauwkeurigheid van de aflezing van het manometerbord. Verder geldt dat gemiddeld genomen voor de tweede helft van de metingen de verschillen kleiner zijn dan voor de eerste helft. Vanaf meting 35 is extra aandacht besteed aan het continue nat houden van de goot, ook in de periodes dat minder is gemeten. Dit betekent mogelijk dat de goot in deze periode minder is vervormd dan daarvoor.

Mogelijk oorzaken voor grote verschillen:

- Vervormingen t.g.v. verschillen in vochtigheid en belasting kunnen er voor zorgen dat drukpotjes verplaatsen t.o.v. manometerbord.
- Tijdens instellen is er sprake van stroming in de drukaansluiting en dan klopt de aflezing op het manometerbord niet, er wordt dan te vroeg afgelezen.
- Als plotseling een verandering in de afvoer optreedt, door bijvoorbeeld het plotseling dichtdraaien van een kraan, dan is er sprake van slingering, met een periode van ongeveer 30 seconden.
- Het instellen van de eindsituatie duurt soms lang, zeker bij een lage afvoer door het riool aan de benedenstroomse zijde.
- Het aflezen van de manometerbuisjes is niet altijd even duidelijk, er is niet altijd een mooie meniscus en het gebruikte afleesliniaalje is scheef gemonteerd.

6.4.3 Volumebalans debieten op randen schaalmodel

In paragraaf 5-1 zijn correctievergelijkingen voor de debietmetingen gepresenteerd. Het wel/ niet toepassen van deze vergelijkingen heeft grote gevolgen voor de volumebalans (zie verg. 6-1), zie voor resultaten

figuur 6-10. Uit de gegevens voor en na kalibratie blijkt dat bij de debietbepaling van meting 10, 32, 47, 65 de volumebalans niet klopt, hier treden afwijkingen van 9% en meer dan 20% op. Dit duidt erop dat er waarschijnlijk iets is misgegaan bij deze metingen. Bij meting 10 en 47 is eigenlijk sprake van een te hoge overstortende straat (volgens de ISO norm, zie ook par. 5.1), bij 65 een te kleine. Aangezien deze afvoeren niet binnen het gekalibreerde bereik vallen, worden deze metingen niet meegenomen. Bij de metingen 21, 22, 30, 31 lijkt sprake van een verhoogde afwijking van de volume balans, deze debieten vallen wel binnen het bereik van de ISO norm (zie ook par. 5.1) en de kalibratie. De metingen 10, 32, 47 en 65 moeten niet worden meegenomen in verdere analyse.

$$VB = \frac{(Q_{riool,bovenstrooms} + Q_{straat,bovenstrooms}) - (Q_{riool,benedenstrooms} + Q_{straat,benedenstrooms})}{Q_{riool,bovenstrooms} + Q_{straat,bovenstrooms}} * 100\% \quad (6-1)$$

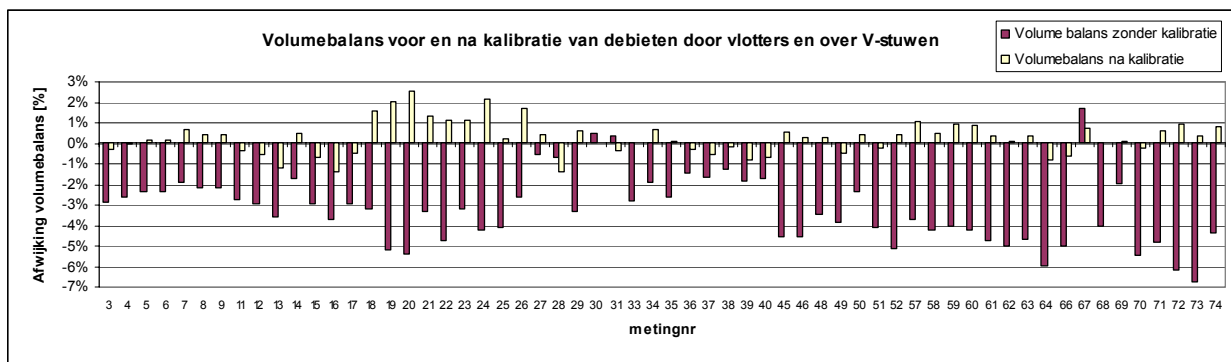
Waarin:

VB Volumebalans

[%]

Q Debiet

[l/s]



Figuur 6-10: Volumebalans met en zonder toepassing van correctievergelijkingen voor debietmetingen

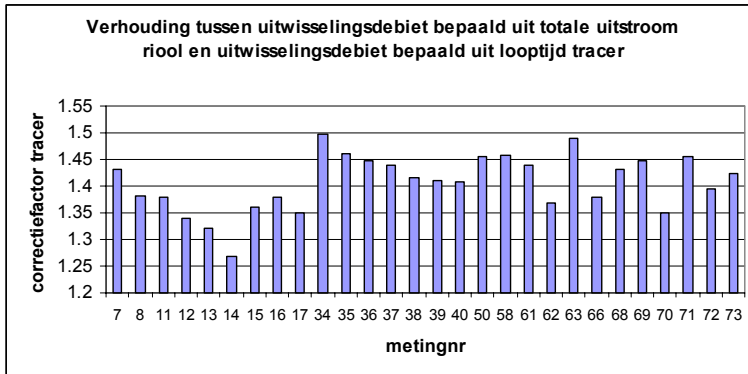
6.4.4 Alternatieve afleiding correctieterm debieten bepaald met tracer.

In paragraaf 5.2 is een verhouding tussen het werkelijke debiet en het debiet berekend uit de looptijd van de tracer bepaald. Deze verhouding bleek 1.33. Deze factor kan ook op een andere manier worden afgeleid.

Hiervoor dienen de volgende stappen te worden doorlopen:

1. De debieten bepaald met de kleurstoffen (zonder correctie) kunnen worden opgeteld, dit is $Q_{\text{totaaltracer}}$.
2. Tevens kan uit het verschil in toe en afvoer door het riool respectievelijk straat kan het totale uitwisselingsdebiet worden bepaald. Dit uitwisselingsdebiet kan worden berekend uit het verschil tussen toe- en afvoer op straat maar ook uit het verschil tussen toe- en afvoer in het riool. Het gemiddelde wordt $Q_{\text{totaal volumebalans}}$.
3. De verhouding tussen $Q_{\text{totaaltracer}}$ en $Q_{\text{totaal volumebalans}}$ is ook een maat voor de correctiefactor.

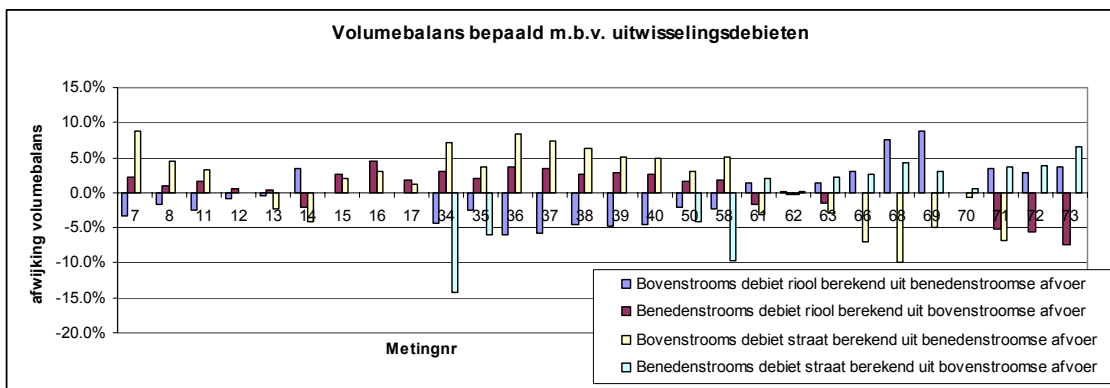
De berekening is alleen gedaan voor hoge waarden van het totale uitwisselingsdebiet en metingen die geheel compleet waren met een sluitende volumebalans, zie voor resultaten figuur 6-11. Uit de berekende verhoudingen is het gemiddelde en de standaarddeviatie bepaald. Hieruit volgt voor het gemiddelde 1.41 en voor de standaarddeviatie 0.053.



Figuur 6-11: Correctiefactor voor het debiet door de kolkaansluitingen berekend uit de totale uitwisseling.

6.4.5 Interne volumebalans

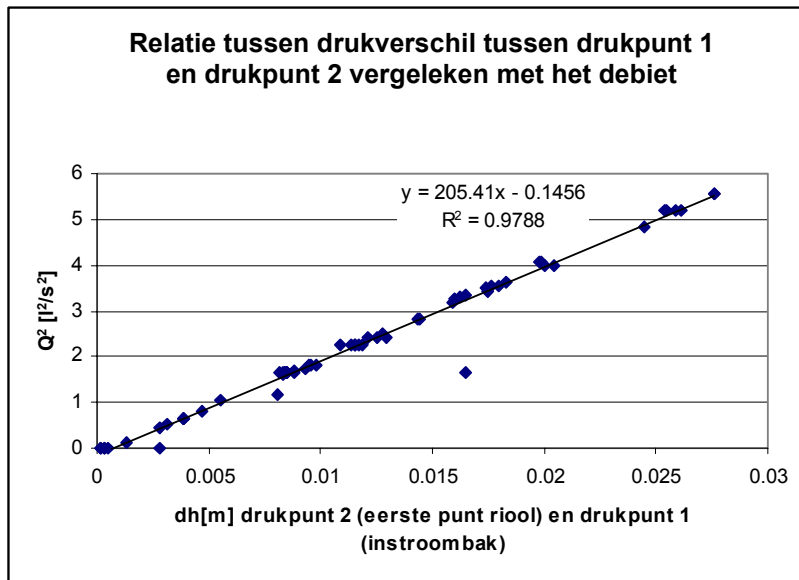
Uit het benedenstroomse debiet van de straat kan het bovenstroomse debiet worden uitgerekend door de debieten bepaald m.b.v. de tracer hierbij op te tellen. Uit deze berekening zou het benedenstroomse gemeten debiet moeten volgen echter vanwege meetfouten is dit niet zo. Dit is ook gedaan voor het riool maar ook vanaf de benedenstroomse zijde. Bij alle berekeningen is gebruik gemaakt van een correctiefactor van 1.33. In figuur 6-20 is te zien dat een aantal zaken niet zijn getekend, er zijn namelijk aardig wat metingen met aan een zijde geen afvoer / toevoer. Hierdoor is het niet mogelijk een relatieve fout in de volumebalans te bepalen, immers dan moet door nul worden gedeeld. In deze gevallen is de fout maximaal 0.08 l/s, meestal in de buurt van de 0.04 l/s. De onnauwkeurigheid is groot als het debiet wat wordt berekend klein is.



Figuur 6-12: Volumebalans bepaald uit uitwisselingsdebieten en debiet aan 1 zijde van de opstelling. Zoals is te zien springt meting 34 eruit: mogelijk zit bij deze meting een fout in de benedenstroomse debietbepaling van de straat.

6.5 Afgeleide relaties

6.5.1 Relatie tussen drukverschil drukpunt 1 en 2 en het debiet



Figuur 6-13: Links, in deze figuur blijkt al duidelijk dat er een verband is tussen het instromende debiet en drukpunt 1 en 2. Voor de regressielijn kan ook $y = 196.65x$ met $R^2 = 0.9763$ worden gebruikt.

Tussen drukpunt 1 en 2 is het debiet gelijk aan het instromende debiet. De drukval tussen deze 2 punten is gelijk aan een deel wrijving, een deel instroomverlies, omzetting drukhoogte in snelheid, een eventuele fout op het drukpunt, welke ook evenredig met de snelheidshoogte kan zijn. Het blijkt dat het verband tussen Debiet en drukval nagenoeg lineair is, dit betekent dat een ééndimensionale beschouwing perspectief biedt. De totale drukval is gelijk aan de omzetting van druk in snelheid plus een instroomverlies plus wrijving over de afstand tussen de drukpunten. Al deze onderdelen zijn evenredig met de snelheidshoogte, zie verg. 6-2. Als C wordt berekend uit de regressielijn $y = 196.65 \cdot x$ dan is $C = 2.45$.

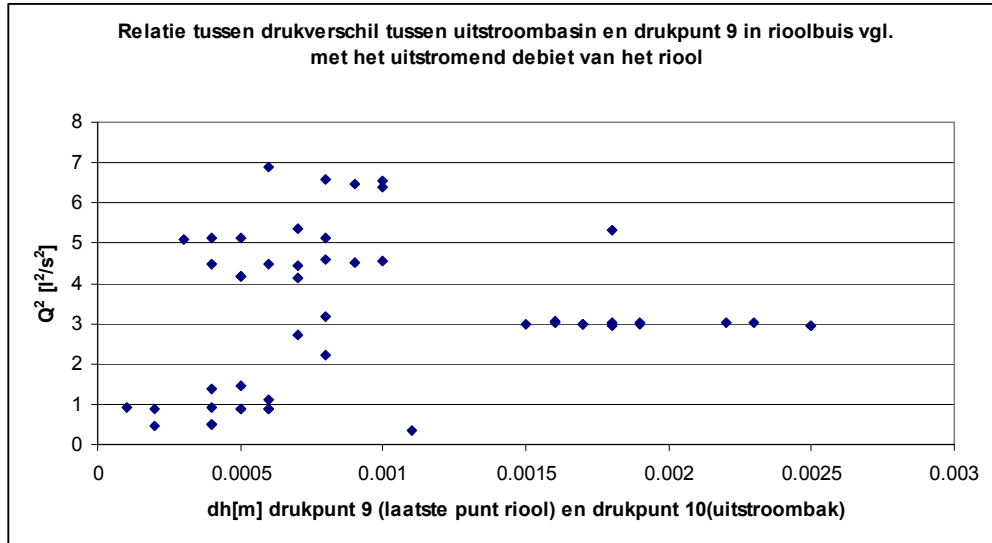
$$\Delta h = C * \frac{u^2}{2g} \quad (6-2)$$

Waarin:

Δh	verschil in piëzometrisch niveau	[m]
u	stroomsnelheid in de rioolbuis	[m/s]
g	gravitatieconstante	[m²/s]
C	constante waarin vertragsingsverliezen, wrijvingsverliezen en omzetting van druk in snelheid in is verdisconteerd	[-]

6.5.2 Relatie tussen drukpunt 9 en 10.

Tussen drukpunt 9 en 10 is het debiet gelijk aan het uitstromende debiet door het riool. De drukval is hier gelijk aan het uitstroomverlies, ongeveer gelijk aan de snelheidshoogte, plus een beetje wrijving, min de omzetting van snelheid in drukhoogte. In figuur 6-14, is de relatie tussen debiet en drukval te zien. Er is weinig samenhang in de meetpunten, dit komt vanwege de kleine drukverschillen die worden gemeten.



Figuur 6-14: Drukval tussen drukpunt 9 en 10, zoals te zien is gaat het hier over kleine drukverschillen, waarbij van tevoren al een selectie is gemaakt door grote debieten te kiezen. De punten in deze grafiek zijn afkomstig van de metingen: 7, 8, 10 - 14, 18, 34 - 40, 50, 57 - 64 en 70 - 74.

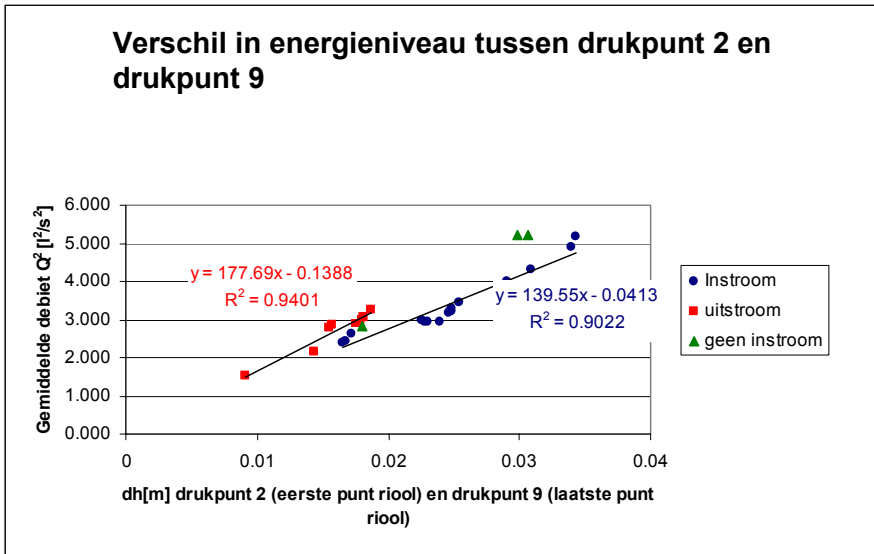
6.5.3 Drukval tussen drukpunt 2 en 9 in de rioolbuis

Tussen de meetpunten 2 en 9 in het riool speelt wrijving waarschijnlijk een belangrijke rol. Het energieverlies dat hiermee gepaard gaat is bij benadering (Chezy voor evenwichtsverhang) evenredig met het debiet tot de tweede macht. Hetzelfde geldt vaak de drukval t.g.v. lokale verliezen, met uitzondering van lokale verliezen t.g.v. splitsende of samenkomende stroming. Indien wordt verondersteld dat wrijving het enige mechanisme is, dan kan verg. 6-3 worden afgeleid. In de opstelling is niet het energieverval, maar het verschil in piëzometrisch niveau gemeten. Het energieverval tussen punt 2 en 9 is gelijk aan het p.n. verschil plus de snelheidshoogte t.p.v. drukpunt 2, min de snelheidshoogte t.p.v. drukpunt 9, dit is weergegeven in figuur 6-15. Uit deze figuur blijkt een significant verschil tussen uitstroom en instroom. Een verklaring hiervoor is dat de lokale verliezen in langsrichting van de buis bij instroomcondities groter zijn dan bij uitstroomcondities. Dit betekent dat als vertragsingsverliezen worden verwaarloosd het bij uitstroomsituaties lijkt alsof de buis gladder wordt.

$$\sum_{i=1}^n \Delta H_{wrijving} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2 L_i}{C^2 A^2 R} = \frac{Q_{gem}^2 \sum_{i=1}^n L_i}{C^2 A^2 R} \rightarrow \quad (6-3)$$

$$Q_{gem}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^2 L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}$$

Q	debiet	[m ³ /s]
L	lengte waarover wrijving dominant is	[m]
A	doorstroomd oppervlak	[m ²]
R	hydraulische straal	[m]
C	gladheidcoëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
ΔH	verschil in energiehogte	[m]



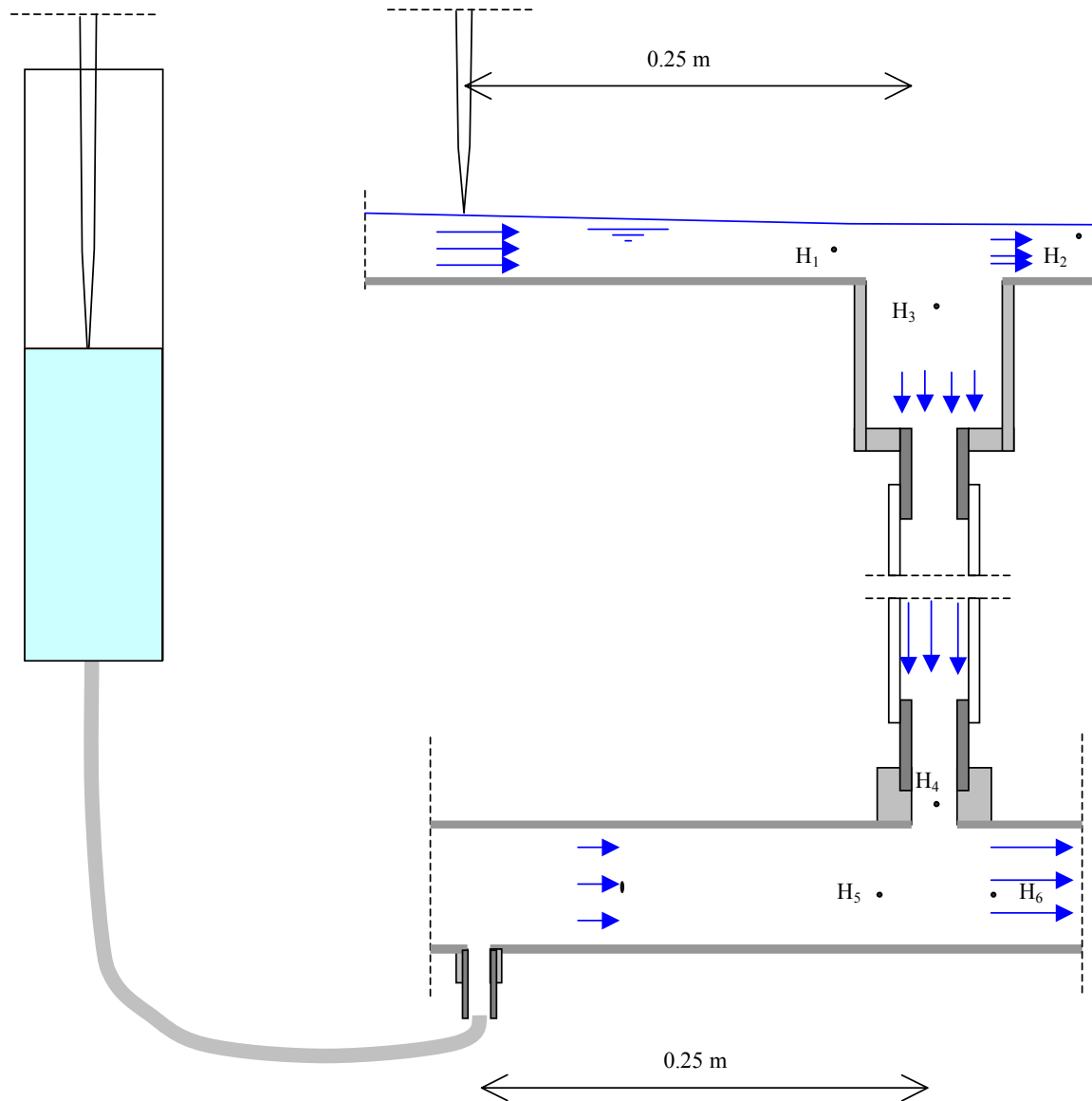
Figuur 6-15: Vershil in energieniveau tussen drukpunt 2 en 9. Het energie niveau bij deze punten is bepaald uit het gemeten piëzometrisch niveau plus de snelheidshoogte. De snelheidshoogte is bepaald uit het debiet in en de oppervlakte van de rioolbuis. Dit debiet is het gewogen gemiddelde debiet in de rioolbuis. In verg. 6-2 staat de afleiding van dit gewogen gemiddelde debiet. De debieten in de buis zijn bepaald uit het bovenstroomse debiet in het riool en de uitwisselingsdebieten. In deze figuur zijn meting nr. 7, 8, 10-14, 18, 34 – 40, 50, 57-64, 70-74 getekend. Duidelijk is een verschil te zien tussen geen en wel uitstroom. De punten zonder uitwisseling vallen hier net tussen.

6.6 Debiet door putjes

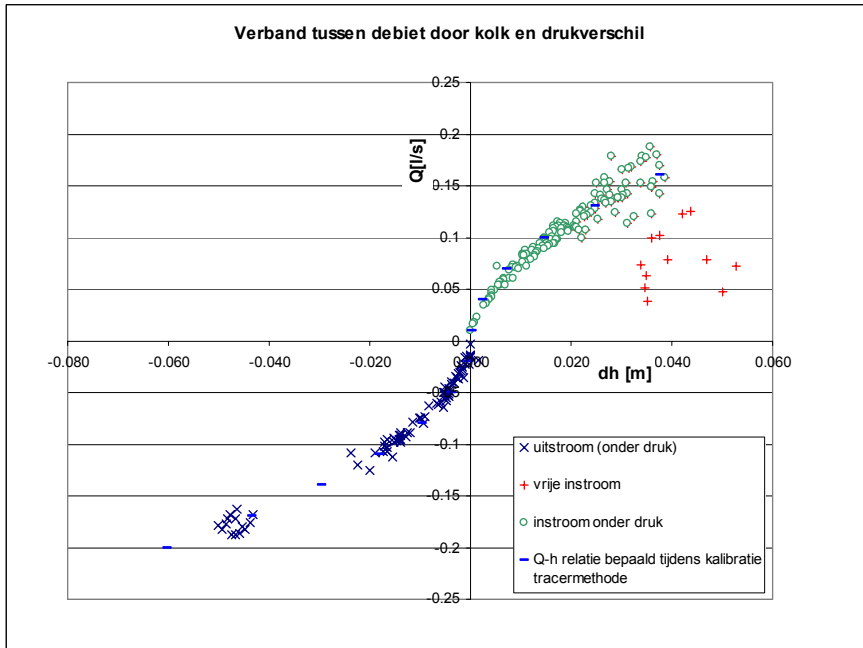
In figuur 6-3 en 6-4 is te zien dat over het algemeen het debiet redelijk continue afneemt of toeneemt. In sommige gevallen, meting nr. 7, 8, 17, 36, 37 is te zien dat putje 6 soms een lagere afvoer heeft dan putje 5 en 7. Dit kan verklaard worden uit een iets hogere bodemligging of slechter afgewerkte verbindingen van riool en straat. De afwijkingen kunnen ook veroorzaakt zijn door luchtinsluiting: bij het instellen van meting 37 is geconstateerd dat er een luchtbel in de slangverbinding van putje 6 aanwezig was. Dit is een luchtbel van ± 1 cm diameter die bleef hangen in de slangaansluiting van de regenkolk. Na afloop van deze meting is deze bel wel verwijderd, deze bel werd pas geconstateerd bij instelling van de volgende situatie. Mogelijk is dit een verklaring voor deze afwijking. Overigens is de meetnauwkeurigheid beperkt en zit er ruis op de metingen, waardoor conclusies beperkt mogelijk zijn. Het is wel duidelijk dat er veel aandacht aan het fenomeen luchtinsluiting dient te worden besteed.

6.7 Relatie tussen drukverschil en uitwisselingsdebiet regenkolle

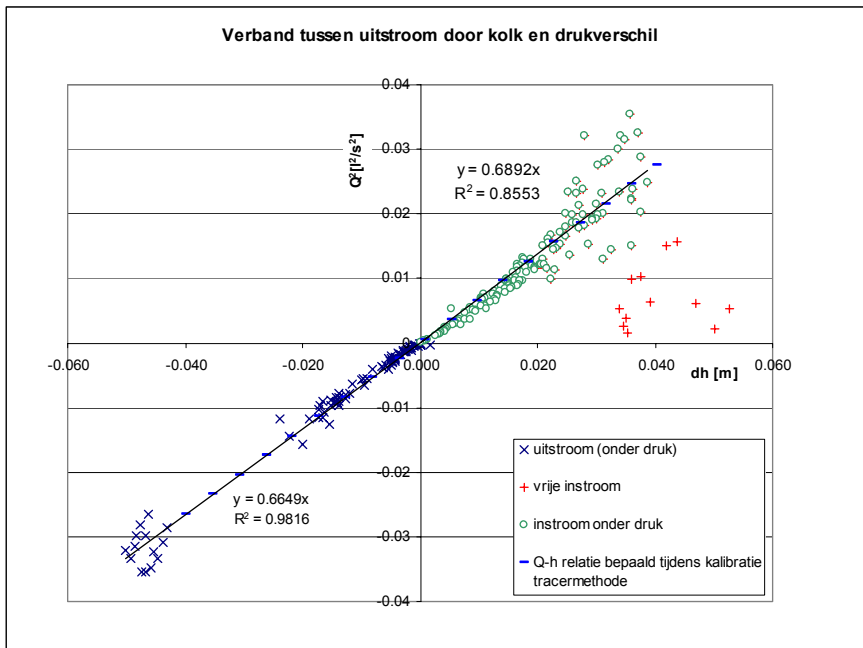
Tijdens de metingen is met behulp van kleurstof bepaald wat de afvoer door de individuele regenputjes was. Tevens is 25 cm voor de regenkolleken bepaald wat het piëzometrisch niveau op straat en in het riool is. Uit deze informatie kan een Q-h relatie voor de putjes worden bepaald. Zie figuur 6-17 voor een schematisatie van de meetsituatie. In figuur 6-18 staan de resultaten hiervan en in figuur 6-19 zijn dezelfde waarden geplot in een grafiek waar Q^2 is uitgezet tegen het verschil in piëzometrisch niveau. Bij deze Q-h relatie moet worden bedacht dat het een verschil in gemeten piëzometrisch niveau betreft, en niet het verschil in energieniveau. Dit kan een oorzaak zijn van de spreiding van de metingen: de energiehoogte in het riool varieert van 0 mm tot ± 10 mm, en op straat van 0 mm tot ± 2 mm.



Figuur 6-17: Schematisatie meetopzet t.b.v. Q-h bepaling kolk: links staat het drukpotje getekend met peilnaald, dit is aangesloten op een drukaansluiting 25 cm bovenstrooms van een kolkaansluiting. Op de straat is 25 cm voor een kolk een peilnaald gemonteerd.



Figuur 6-18: Debiet door de regenkolle vergeleken met het piëzometrisch niveauverschil tussen het water in het riool en op de straat. Het piëzometrisch niveau is 25 cm voor elk putje bepaald. Voor situaties met instroom wordt een zeer grote spreiding gevonden. Dit is te verklaren doordat in sommige gevallen er sprake is van vrije instroom: er is dan minder water beschikbaar dan wat eigenlijk het putje in kan stromen. Voor $Re < 2300$, oftewel debieten tot ± 0.045 l/s is mogelijk sprake van laminaire stroming. Debiten variëren tot 0.18 l/s, hierbij is $Re = 9200$.



Figuur 6-19: Gelijke gegevens als figuur 6-18 maar met gekwadrateerd debiet. Te zien is dat de punten afkomstig uit de Q-h relatie van de tracerkalibratie bijna exact op deze lijn passen, tijdens deze kalibratie was de energiehoogte op straat en in het riool praktisch verwaarloosbaar. In de figuur zijn tevens de regressielijvergelijkingen opgesteld voor instroom respectievelijk uitstroom.

7 Eëndimensionale modellering waterstroming straat en riool

In dit hoofdstuk worden de meetwaarden vergeleken met een ééndimensionale modellering van de waterstroming. Voor het riool en de straat zijn aparte modellen ontwikkeld: een model voor de waterstroming op straat, het straatmodel en een model voor de waterstroming in het riool, het rioolmodel. De procesparameters in deze modellen zullen met behulp van de metingen worden bepaald. Hierbij zal als doelfunctie gebruik worden gemaakt van de kleinste kwadraten norm (zie verg. 7-1).

$$\min \left[\sqrt{\frac{1}{N} \sum (h_{\text{model}} - h_{\text{meting}})^2} \right] \quad (7-1)$$

waarin:

N	aantal meetwaarden	
h_{model}	modeluitkomst piëzometrisch niveau	[m]
h_{meting}	meetwaarde piëzometrisch niveau	[m]

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk wordt de opbouw van het rioolmodel toegelicht. In dit model wordt voor de wrijving uitgegaan van hydraulisch gladde stromingscondities. In paragraaf twee wordt dit model vergeleken met de meetwaarden. Vervolgens wordt in paragraaf drie voor de berekening van wandwrijving ook de wandruwheid in rekening gebracht. In paragraaf vier zal het model voor de straat worden uitgelegd. Dit model zal in paragraaf vijf worden vergeleken met de meetwaarden. Het hoofdstuk zal in paragraaf zes worden afgesloten met conclusies over de modeluitkomsten en metingen.

7.1 Rioolmodel

In figuur 7-1 is het rioolmodel schematisch weergegeven, in dit model wordt onderscheid gemaakt in lokale energieverliezen en energieverlies t.g.v. wrijving. Deze verliezen zijn afhankelijk van het debiet in de rioolbuis en de debieten in de regenkolkaansluitingen. Deze debieten zijn gemeten en op basis hiervan kan de debietverdeling in de rioolbuis worden berekend (zie ook verg. 7-2). Dit kan vanuit het bovenstroomse debiet, maar ook vanuit het benedenstroomse debiet. Voor het rioolmodel zal de debietverdeling uit het bovenstroomse debiet van het riool en de debieten door de regenkolken worden bepaald. Hiermee kan de stroomsnelheid in de buis en het verloop van het energieniveau in de rioolbuis worden bepaald. Het verloop van het energieniveau wordt bepaald door wrijvingsverliezen en lokale verliezen (zie ook verg. 7-3). Uit het energieniveau kan vervolgens het piëzometrisch niveau worden berekend (zie verg. 7-4). De lokale verliezen en wrijvingsverliezen in dit model bestaan uit:

1. Een instroomverlies ter plaatse van de aansluiting van het instroombassin op het riool
2. Een uitstroomverlies ter plaatse van de aansluiting van het riool op het uitstroombassin
3. Wrijvingsverlies ten gevolge van wandwrijving in de rioolbuis
4. Lokale energieverliezen ter plaatse van de kolkaansluitingen op het riool.

De lokale verliezen ter plaatse van de aansluitingen van de buiselementen zullen worden verwaarloosd.

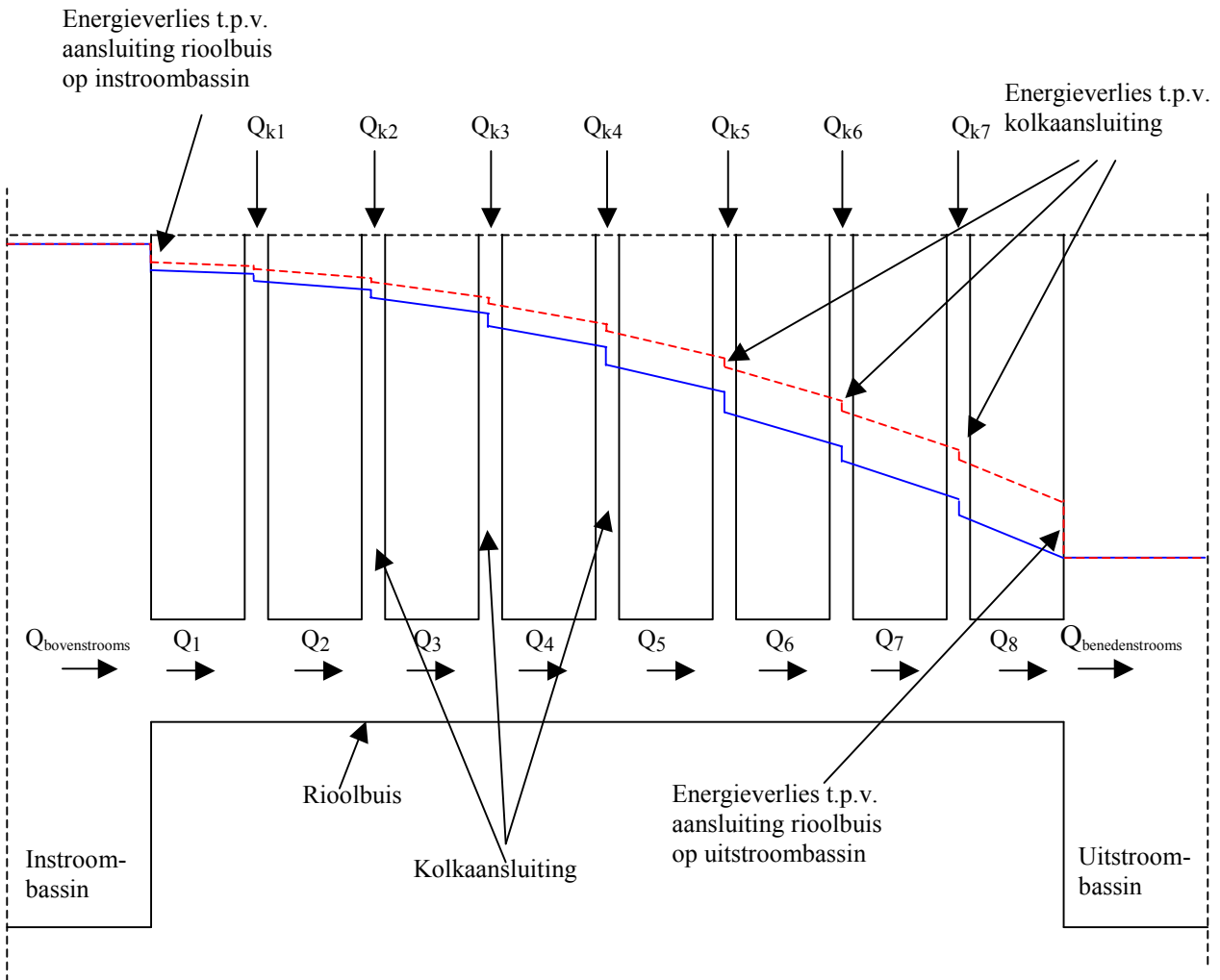
$$Q_n = Q_0 + \sum Q_{ki} \quad (7-2)$$

$$\Delta H = \sum \xi \frac{u^2}{2g} + \sum f \frac{u^2 L}{2gd} \quad (7-3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2g} \quad (7-4)$$

Q_{ki}	debiet door regenkol i	[m ³ /s]
Q_0	bovenstrooms debiet	[m ³ /s]
Q_n	debiet in rioolbuis	[-]
h	piëzometrisch niveau	[m]
u	stroomsnelheid in de rioolbuis	[m/s]

H	energie niveau	[m]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]
ξ	verliescoëfficiënt	[-]
f	weerstandcoëfficiënt	[-]
L	lengte waarover wandwrijving plaatsvindt	[m]
d	diameter van de rioolbuis	[m]



Figuur 7-1: Schematisatie rioolmodel, de rode lijn is het energieniveau en de blauwe is het piëzometrisch niveau. In deze situatie stroomt er water van de straat naar het riool. Dit is duidelijk te zien aan de toename van het verschil tussen energiehoogte en piëzometrisch niveau. Lokale verliezen grijpen treden op bij de overgang van het instroombassin naar de rioolbuis, ter plaatse van de regenkolken en bij de overgang van de rioolbuis naar het uitstroombassin.

7.1.1 Instroomverlies

T.p.v. de aansluiting van het instroombassin op de rioolbuis treedt energieverlies op. Dit verlies is afhankelijk van de geometrie en de stromingcondities. In figuur 7-2 is de verbinding van de buis en het instroombassin schematisch weergegeven. De ééndimensionale beschouwing voor het energieverlies wordt beschreven door verg. 7-5.

$$\Delta H_v = \xi \frac{u_{buis}^2}{2g} \quad (7-5)$$

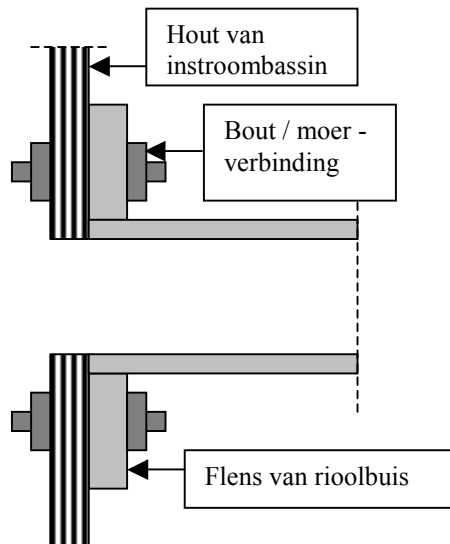
Hierbij is:

ΔH_v	het totale energieverlies	[m]
ξ	de verliescoëfficiënt voor instroming	[-]
u_{buis}	de stroomsnelheid in de buis	[m/s]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]

In het geval van een scherpe, naadloze aansluiting van een buis op een groot bassin is volgens Battjes (1998) $\xi \approx 0.45$, volgens Idelc'cik (1978) is $\xi = 0.49$. In het schaalmodel is de waarde van deze verliescoëfficiënt hoogstwaarschijnlijk groter omdat ondanks de nauwkeurige vervaardiging:

1. De vorm van de verbinding niet naadloos is.
2. Het gat in de houten plaat niet zuiver haaks is.
3. De grootte van het gat in het bassin niet exact gelijk is aan de binnendiameter van de rioolbuis.
4. Het bevestigingsmateriaal de vrije toestroming hindert.

Al deze factoren kunnen de contractie en toestroming sterk beïnvloeden waardoor de verliescoëfficiënt een hogere waarde kan hebben. De exacte waarde van de coëfficiënt is niet bekend en kan alleen bepaald worden met de meetresultaten.



Figuur 7-2: Schematisatie van de aansluiting van rioolbuis op het instroom- en uitstroombassin.

7.1.2 Uitstroomverlies

De aansluiting van de rioolbuis op het uitstroombassin is gelijk aan de aansluiting van de rioolbuis op het instroombassin, zie ook figuur 7-2. T.p.v. de aansluiting van de rioolbuis op het uitstroombassin treedt energieverlies op. De grootte van dit verlies is afhankelijk van de geometrie en de stromingcondities. Bij een ééndimensionale benadering wordt dit energieverlies beschreven door verg. 7-6.

$$\Delta H_v = \xi \frac{u_{buis}^2}{2g} \quad (7-6)$$

Hierbij is:

ΔH_v	het totale energieverlies	[m]
ξ	de verliescoëfficiënt voor uitstroming	[-]
u_{buis}	de stroomsnelheid in de buis	[m/s]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]

In het geval van een scherpe, naadloze aansluiting van een buis op een groot bassin is de waarde van de verliescoëfficiënt ± 1 . In het schaalmodel is deze verliescoëfficiënt misschien iets groter vanwege dezelfde oorzaken als genoemd bij het instroomverlies. Waarschijnlijk is het effect op de uitstroomcoëfficiënt kleiner, omdat reeds veel energie verloren gaat. Voor verdere berekening is uitgegaan van 1 als waarde voor deze coëfficiënt.

7.1.3 Wrijvingsverlies

De rioolbuis is gemaakt van acrylaat met een binnendiameter van 80 mm. In de buis treden energieverliezen t.g.v. wandwrijving op. Wandwrijving is afhankelijk van de geometrie en wandruwheid van de buis maar ook van de stromingscondities. De Nikuradse wandruwheid (k) van de rioolbuis is afhankelijk van de ruwheid van het oppervlak maar ook van de vervuilingsgraad door bijvoorbeeld algen. De k -waarde ligt in elk geval tussen $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ m (k -waarde van vlak gelast staal) en $1 \cdot 10^{-5}$ m. (k -waarde van glas). De verhouding van D/k varieert dan van 160 tot 8000.

Wrijving kan in rekening worden gebracht met verg. 7-7. In eerste instantie wordt uitgegaan van hydraulisch gladde stromingscondities. De wrijvingscoëfficiënt f kan dan met verg. 7-8 worden bepaald, die kan worden omgeschreven in verg. 7-9. De aanname van hydraulisch glad is een afwijking t.o.v. de werkelijk waarde voor de wrijvingscoëfficiënt, voor grote verhoudingen van D/k is de afwijking t.o.v. de werkelijke wrijvingscoëfficiënt beperkt. Het grote voordeel van dit uitgangspunt is dat de berekening eenvoudiger wordt.

$$i_w = f \frac{u^2}{2gD} \quad (7-7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong 1.8 \log \frac{Re}{7} \quad (7-8)$$

$$f \cong \frac{1}{\left(1.8 \log \frac{Re}{7}\right)^2} \quad (7-9)$$

Waarin:

i_w	wrijvingsverhang	[m/m]
f	wrijvingscoëfficiënt (Darcy Weisbach)	[-]
u	gemiddelde stroomsnelheid in de buis	[m/s]
D	diameter van de buis	[m]
Re	kental van Reynolds	[-]
ν	viscositeit van water	[m ² /s]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]

7.1.4 Energieverlies t.p.v. de kolkaansluiting

Ter plaatse van een kolkaansluiting treedt energieverlies op, dit is afhankelijk van het debiet door de kolkaansluiting en het debiet in de rioolbuis. De regenkolkaansluiting staat haaks (90°) op de doorgaande rioolbuis gemonteerd. Deze aansluiting is scherp en de hoeken zijn niet afgerond. De diameter van de kolk is 19 mm en de diameter van de rioolbuis is 80 mm. Het debiet in de kolkaansluiting varieert in beide stroomrichtingen van 0 l/s tot ± 0.16 l/s. Het debiet in het riool varieert van ± 0.5 l/s tot ± 2.5 l/s. De oppervlakteverhouding tussen deze leidingen “a” is gelijk aan 0.056. De debietverhouding “q” tussen het debiet door de regenkolkaansluiting en de rioolbuis varieert dan van 0 tot ± 0.3 . In de literatuur worden verliescoëfficiënten voor situaties met samenkomende stroming en splitsende stroming beschreven. Deze zullen in het vervolg van de paragraaf worden besproken.

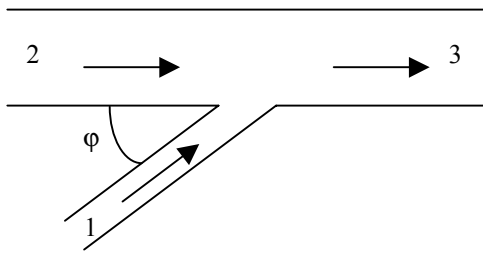
Verliescoëfficiënten voor samenkomende stroming

In Miller (1971) worden verliescoëfficiënten besproken voor waarden van Reynolds $> 10^5$. In het schaalmodel varieert het kental van Reynolds van $\pm 8 \cdot 10^3$ tot $\pm 4 \cdot 10^4$. Deze bereiken komen niet met elkaar overeen maar met deze coëfficiënten kan waarschijnlijk wel een goede indicatie van de energieverliezen worden berekend. Miller (1971) definieert de verliescoëfficiënt voor samenkomende stroming zoals in verg. 7-10, hierbij hoort de tekening van figuur 7-3.

$$K_{23} = \frac{\left(\frac{u_2^2}{2g} + h_2 \right) - \left(\frac{u_3^2}{2g} + h_3 \right)}{\frac{u_3^2}{2g}} \quad (7-10)$$

Hierin is:

u	stroomsnelheid	[m/s]
h	piëzometrisch niveau	[m]
K_{23}	verliescoëfficiënt in langsrichting van de buis	[-]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]



Figuur 7-3: Principe tekening uit Miller (1971) voor toepassing van vergelijkingen met lokale verliescoëfficiënten in de situatie met samenkomende stroming

Tevens geeft Miller (1971) een vergelijking van Gardel (verg. 7-11) voor de verliescoëfficiënt. Hij vermeldt hierbij dat de verschillen tussen de resultaten van zijn metingen en de uitkomsten van Gardel beperkt zijn.

$$K_{23} = 0.03(1-q)^2 - q^2 \left[1 + \left(1.62 - r^{\frac{1}{2}} \right) (\cos \varphi / a - 1) - 0.38(1-a) \right] + (2-a)q(1-q) \quad (7-11)$$

Vergelijking van Gardel afkomstig uit Miller (1971)

$$K_{23} = -1.3742q^2 + 2.1424q \quad (7-12)$$

Geëxtrapoleerde grafiekwaarden uit Miller (1971)

$$K_{23} = 1 - \frac{2}{a}q^2 \cos \varphi - \frac{2}{n}(1-q)^2 \cos \delta + \left(\frac{1-q}{n} \right)^2 \quad (7-13)$$

Vischer

$$K_{23} = q[2 - (1 + 2a - 1 \cos(\varphi))q] \quad (7-14)$$

Favre

Waarin:

K_{23}	verliescoëfficiënt	[-]
q	debietverhouding (Q_1/Q_3)	[-]
a	oppervlakteverhouding leidingen (A_1/A_3)	[-]
n	oppervlakteverhouding leidingen (A_2/A_3)	[-]
r	afrondingstraal van de aansluiting van leidingen op elkaar	[m]

φ	hoek van de zijleiding t.o.v. hoofdleiding	[°]
δ	hoek van leiding 2 t.o.v. leiding 3	[°]

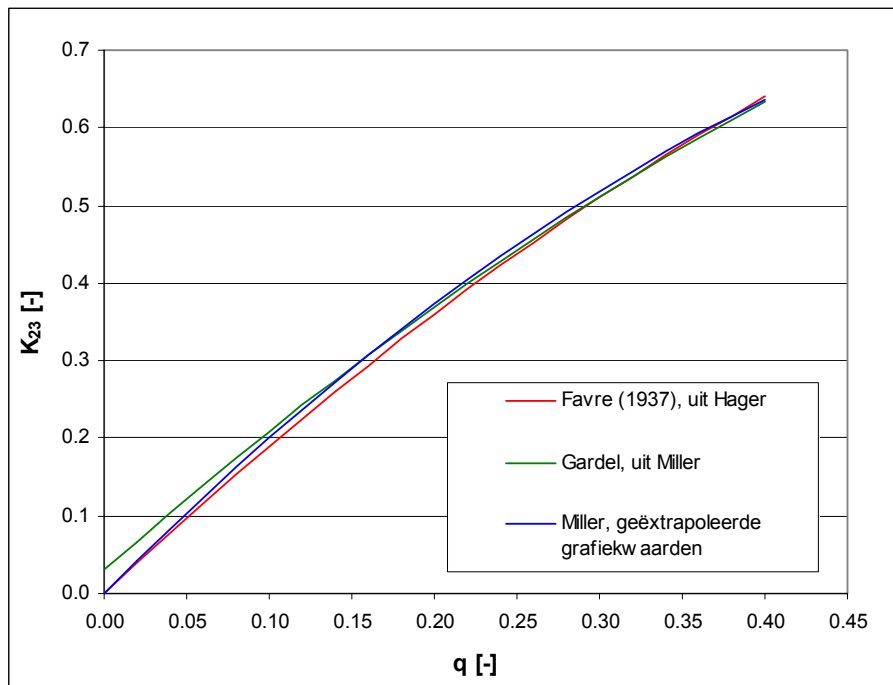
In grafiek 5.2.4 uit Miller (1971), zie ook bijlage 2, zijn de coëfficiënten alleen beschreven voor grote verhoudingen tussen de oppervlakte van de zijleiding en de oppervlakte van de hoofdleiding. Door extrapolatie van de grafiek naar kleine verhoudingen is voor een aantal waarden van de debietverhouding de waarde van de verliescoëfficiënt afgelezen (zie tabel 7-1). Met deze punten is op basis van lineaire regressie bepaald wat de best passende tweedegraads vergelijking is. Dit is vergelijking 7-12 met $R^2 = 0.9953$.

Hager (1999) beschrijft ook de vergelijkingen van Vischer en Favre (verg. 7-13 en 7-14). Indien diameter 2 gelijk is aan diameter 3 dan kunnen de vergelijkingen van Favre uit de vergelijkingen van Vischer worden afgeleid.

Tabel 7-1: Afgelezen waarden voor q en K_{23} uit figuur 5.2.4. van Miller (1971) voor de verliescoëfficiënt in langsrichting.

q	K_{23}
0.1	0.2
0.16	0.3
0.22	0.4
0.27	0.5
0.38	0.6
0.46	0.7

De verschillende verliescoëfficiënten die uit deze vergelijkingen volgen zijn in figuur 7-4 getekend. Uit de figuur blijkt duidelijk dat de verschillen slechts klein zijn. Extrapolatie is onbetrouwbaar, derhalve wordt voor lokale verliezen bij samenkomende stroming de vergelijking van Gardel (verg. 7-11), afkomstig uit Miller (1971) toegepast.



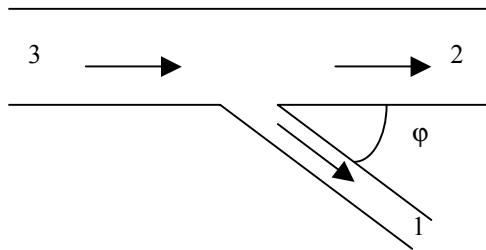
Figuur 7-4: Verliescoëfficiënt K_{23} als functie van de debietverhouding q [Q_1/Q_3]. In deze figuur zijn de vergelijking 7-11, 7-12 en 7-14 grafisch weergegeven. Te zien is dat de vergelijkingen gelijkwaardig resultaat opleveren, behalve voor de geëxtrapoleerde waarden uit Miller (1971). Bij

kleine waarden van q wijken deze waarden af. Dit is te wijten aan de onbetrouwbaarheid van extrapolatie.

Verliescoëfficiënten voor splitsende stroming

Bij de verliescoëfficiënten voor splitsende stroming is een vergelijkbare analyse uitgevoerd als bij de verliescoëfficiënten voor samenkomende stroming. In Miller (1971) worden verliescoëfficiënten besproken voor Reynolds getallen $> 10^5$. In het schaalmodel varieert het kental van Reynolds van $8 \cdot 10^3$ tot $4 \cdot 10^4$. Deze bereiken komen niet overeen, derhalve zijn de coëfficiënten eigenlijk niet overdraagbaar naar het schaalmodel. Miller (1971) definieert de verliescoëfficiënt voor splitsende stroming zoals in verg. 7-15, hierbij hoort de tekening van figuur 7-5.

$$K_{32} = \frac{\left(\frac{u_3^2}{2g} + h_3 \right) - \left(\frac{u_2^2}{2g} + h_2 \right)}{\frac{u_3^2}{2g}} \quad (7-15)$$



Figuur 7-5: Principe tekening uit Miller (1971) voor lokale verliescoëfficiënten bij splitsende stroming

Miller (1971) presenteert een vergelijking van Gardel (verg. 7-16) voor de waarde van de verliescoëfficiënt. Volgens Miller (1971) zijn de verschillen tussen zijn metingen en de vergelijkingen van Gardel klein.

$$K_{32} = -0.03(1-q)^2 - 0.35q^2 + 0.2q(1-q) \quad (7-16)$$

$$K_{32} = 1.0357q^2 - 0.5293q + 0.0357 \quad (7-17)$$

$$K_{32} = \frac{4}{5}q \left(q - \frac{1}{2} \right) \quad (7-18)$$

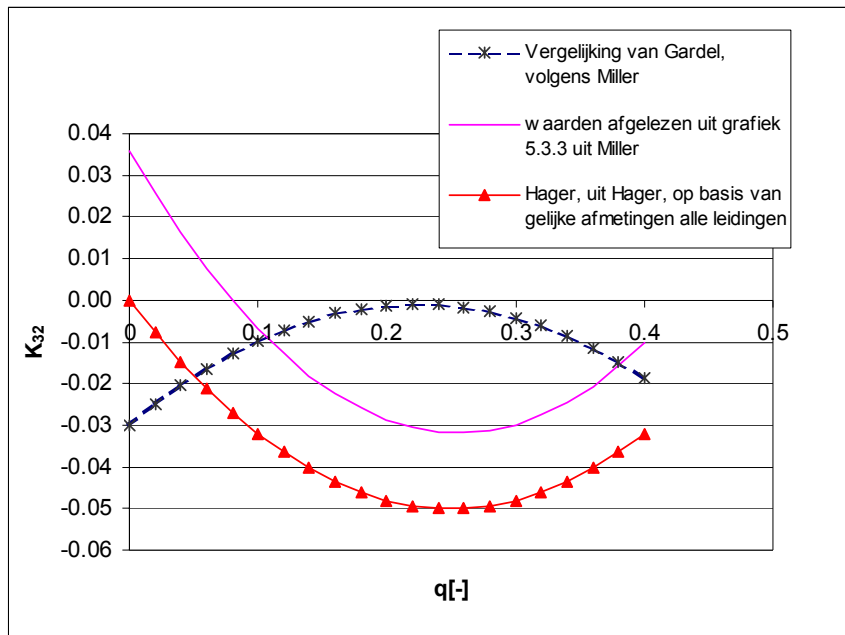
Waarin:

K_{23}	Verliescoëfficiënt	[-]
q	debietverhouding (Q_1/Q_3)	[-]
r	straal afronding	[m]

In figuur 5.3.3 van Miller (1971), zie ook bijlage 2, staat de verliescoëfficiënt K_{32} voor splitsende stroming uitgezet als functie van het debiet. Volgens Miller (1971) is deze onafhankelijk van het verhoudingsgetal "a" en is gedefinieerd voor alle waarden van q tussen 0 en 1. Uit deze figuur zijn een aantal punten afgelezen, zie tabel 7-2. Op basis van de punten is met lineaire regressie een tweedegraads vergelijking bepaald die deze punten beschrijft. Dit is verg. 7-17 met $R^2 = 0.9986$.

Tabel 7-2: Afgelezen waarden voor q en K_{32} uit figuur 5.3.3. van Miller (1971) voor de verliescoëfficiënt in langsrichting.

Q	K_{32}
0	0.035
0.1	-0.005
0.2	-0.03
0.3	-0.03
0.4	-0.01
0.5	0.03



Figuur 7-6: Verliescoëfficiënt (K_{32}) als functie van q (Q_1/Q_3) voor splitsing van stroming

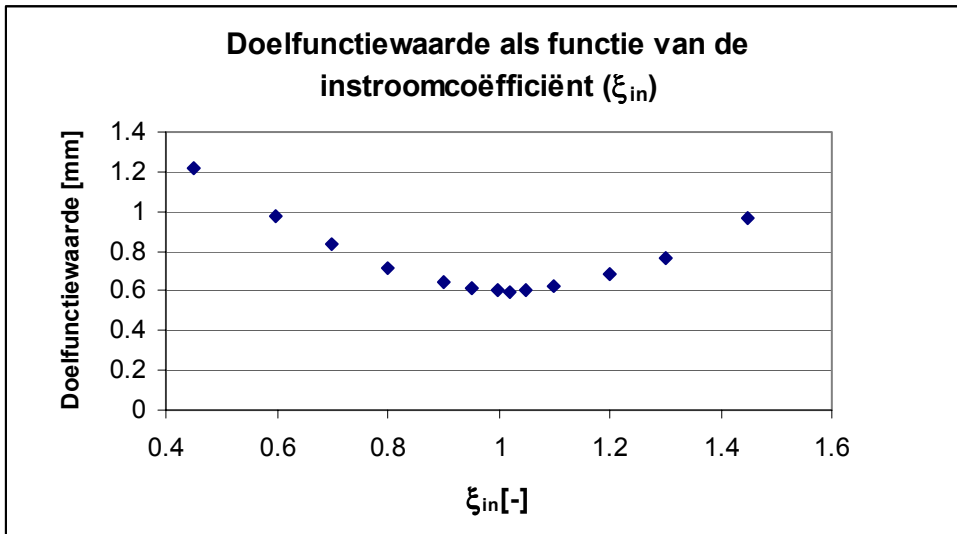
Hager (1999) geeft een vergelijking voor de lokale verliezen waarbij alle buizen een gelijkwaardige diameter hebben (verg. 7-18). De verschillende vergelijkingen zijn in figuur 7-6 getekend. Tussen de drie benaderingen zitten grote verschillen. Besloten wordt om de verliescoëfficiënt van Miller (1971) (verg. 7-17) te gebruiken, dit is een directe bron waar de verliescoëfficiënt in grafiekvorm staat. Huisman (1955) geeft enkele waarden voor de verliescoëfficiënten echter deze gelden voor andere oppervlakteverhoudingen dan die relevant zijn voor het schaalmodel.

7.2 Wandwrijving onafhankelijk van k

In het rioolmodel is de waarde van de coëfficiënt (ξ) voor het instroomverlies van het instroombassin naar het riool onbekend. Voor de bepaling hiervan worden de volgende stappen doorlopen:

- 1) De debietverdeling in de rioolbuis wordt vanaf de bovenstrooms zijde uitgerekend m.b.v. het bovenstrooms debiet in het riool en de debieten door de regenkolken.
- 2) De waarde van de instroomcoëfficiënt wordt voor alle metingen gelijk gesteld en vervolgens wordt per meting bepaald wat het benedenstroomse energieniveau is zodat het model de meetwaarden zo goed mogelijk beschrijft. Dit is het zoeken van de minimale waarde van de doelfunctie (verg 7-1). Dit is voor meerdere waarden van ξ gedaan, de resultaten staan in figuur 7-7.

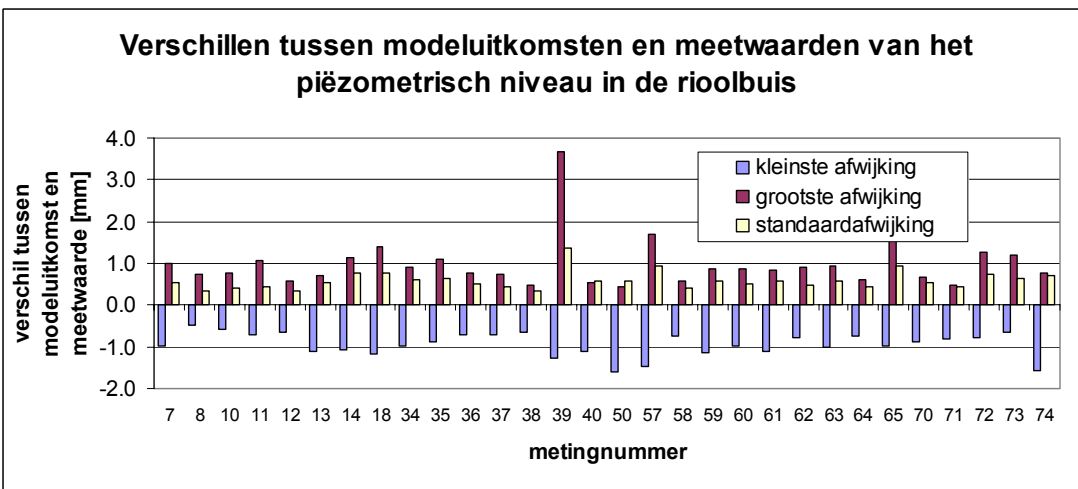
De waarde van de doelfunctie is minimaal bij $\xi=1.03$, de doelfunctie waarde is dan gelijk aan 0.59 mm. In figuur 7-8 staan de afwijkingen van de modeluitkomsten t.o.v. de meetwaarden bij toepassing van $\xi=1.03$. Enkele voorbeelden van metingen staan in figuur 7-9 t/m figuur 7-11. In tabel 7-3 staan de afwijkingen per drukpunt.



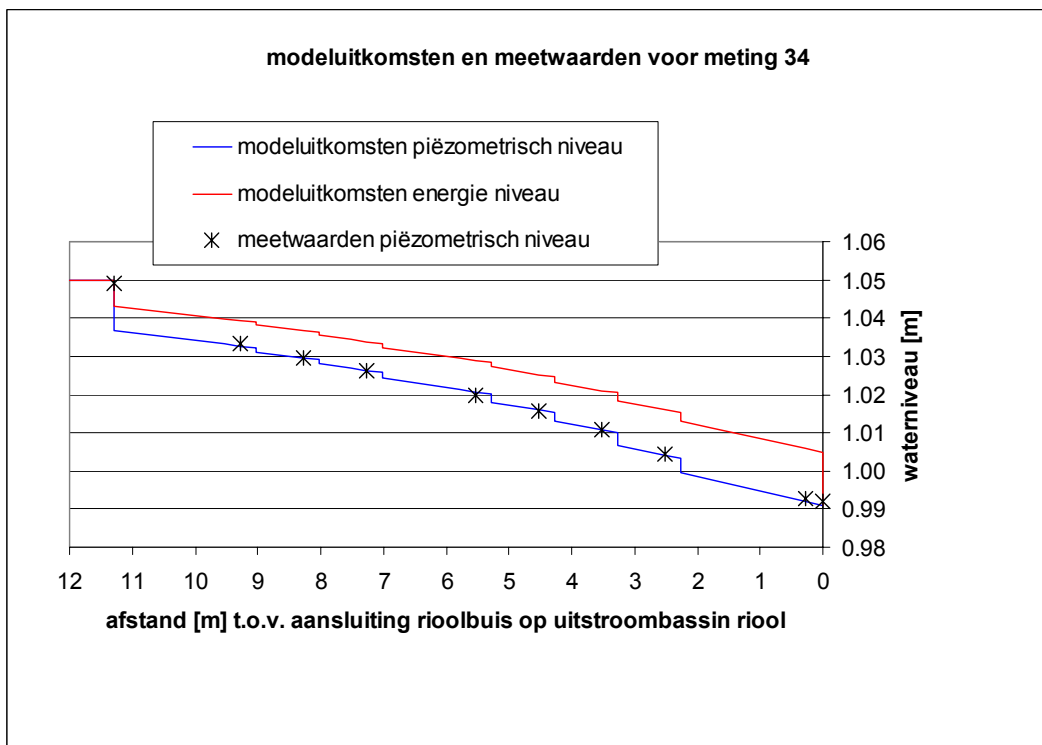
Figuur 7-7: Doelfunctie als functie van de instroomcoëfficiënt. De waarde van de instroomcoëfficiënt is voor alle metingen gelijk gesteld en vervolgens is per meting bepaald wat het benedenstroomse energieniveau is zodat de doelfunctie minimaal wordt.

Tabel 7-3 : Afwijkingen van het model per drukpunt. In de tabel is het gemiddelde (gem) van de verschillen tussen het model en de metingen weergegeven alsmede de standaardafwijking (std).

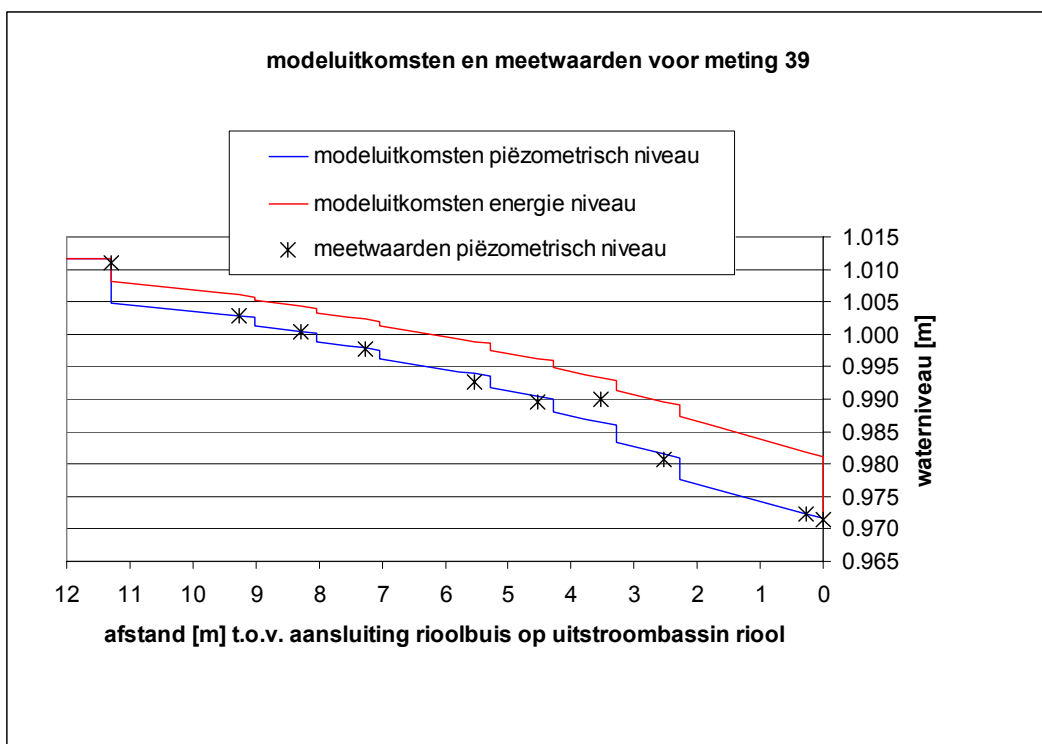
drukpunt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
gem [mm]	0.08	0.69	0.24	0.31	-0.62	-0.32	0.17	-0.30	0.08	-0.33
std [mm]	0.56	0.40	0.30	0.38	0.34	0.35	0.72	0.32	0.45	0.68



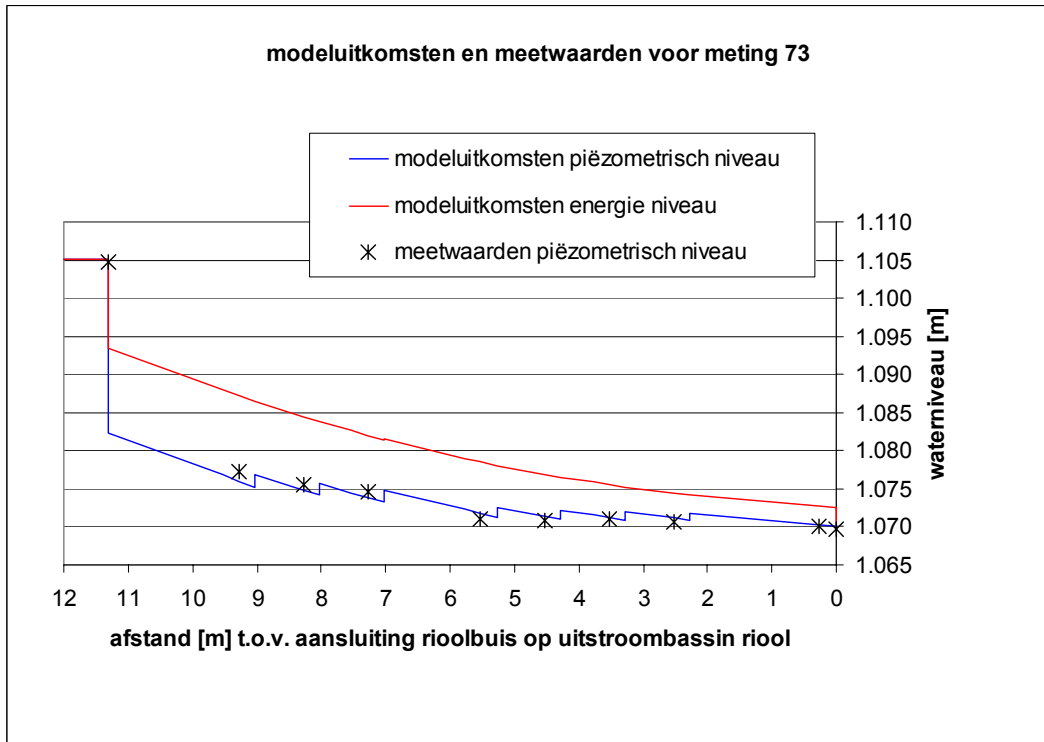
Figuur 7-8: Modeluitkomsten voor de instroomcoëfficiënt (ξ) waarbij de doelfunctie minimaal is. Hierbij is $\xi=1.03$ en de uitkomst van de doelfunctie 0.59.



Figuur 7-9: Voorbeeld van een meting met stroming van de straat naar het riool. Kleine afwijkingen tussen model en meetwaarden.



Figuur 7-10: Voorbeeld van een meting met stroming van de straat naar het riool. Eén meetwaarde wijkt sterk af van de modeluitkomst



Figuur 7-11: Voorbeeld van een meting met stroming van riool naar de straat.

7.3 Wandwrijving afhankelijk van k en δ

De buis in het schaalmodel heeft een diameter van 80 mm. Zelfs bij een kleine Nikuradse wandruwheid k , is de verhouding van D/k beperkt. Als $k = 0.1$ mm dan is de verhouding $D/k = 800$ en bij $k = 0.01$ mm (wandruwheid van glas) is de verhouding $D/k = 8000$. Alleen voor een verhouding $D/k > 10000$ zijn de stromingscondities hydraulisch glad. Waarschijnlijk heeft k dus wel invloed op de wrijving en is de aanname van hydraulisch glad niet terecht. Met behulp van de vergelijkingen 7-19 t/m 7-24 kan bepaald worden wat de waarde van f is als functie van k en δ . In deze paragraaf wordt een eenvoudigere benadering gebruikt die wordt afgeleid in paragraaf 7.3.1.

7.3.1 Rekenmethode wandwrijving

Voor debieten van 0.5 l/s tot 2.7 l/s is met deze formules de afmeting van de laminaire sublaag bepaald. Dit is gedaan voor $k = 0$ mm, 0.01 mm, 0.02 mm, 0.04 mm, 0.1 mm, 0.2 mm en 0.4 mm. Hierbij is de viscositeit gelijkgesteld aan $0.97 \cdot 10^{-6}$ (22°C). In figuur 7-12 is voor enkele waarden de dikte van de sublaag getekend als functie van de afvoer in de buis. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de dikte van de laminaire sublaag relatief weinig varieert t.g.v. een verandering in k .

$$i_w = f \frac{U^2}{2gD} \quad (7-19)$$

$$i_w = \frac{U^2}{C^2 R} \quad (7-20)$$

$$f = \frac{8g}{C^2} \quad (7-21)$$

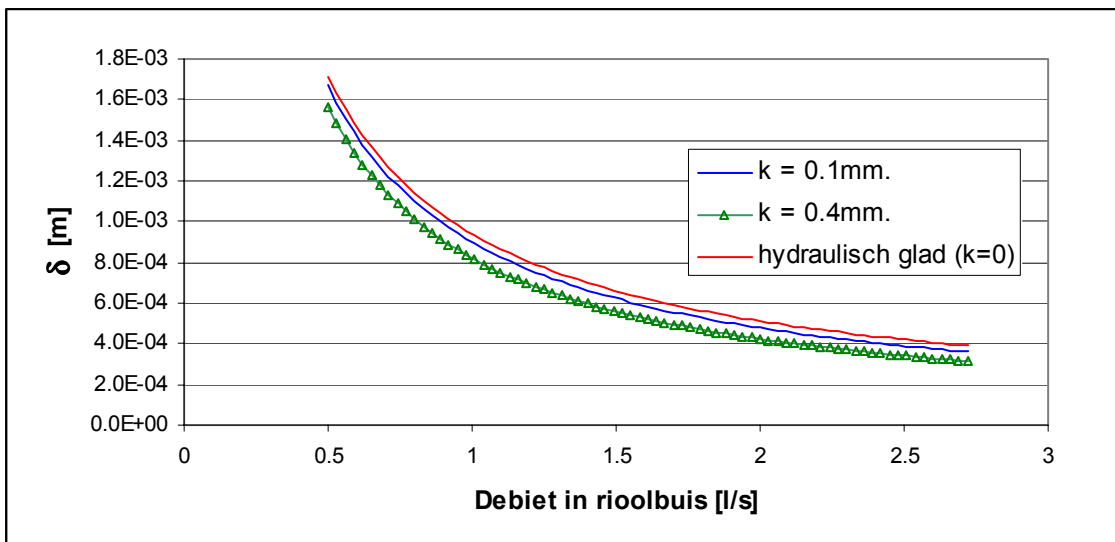
$$C = 18 \log \frac{12R}{k + \frac{\delta}{3.5}} \quad (7-22)$$

$$\delta = \frac{11.6\nu}{u_*} \quad (7-23)$$

$$u_* = \sqrt{gRi_w} \quad (7-24)$$

Waarin

i_w	wrijvingsverhang	[m/m]
f	wrijvingscoëfficiënt	[-]
u	de gemiddelde stroomsnelheid in de buis	[m/s]
u_*	schuifspanningsnelheid	[m/s]
R	hydraulische straal	[m]
D	diameter van de buis	[m]
ν	viscositeit van water	[m ² /s]
g	gravitatieconstante	[m ² /s]
C	gladheidcoëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
δ	dikte van de laminaire sublaag	[m]
k	Nikuradse wandruwheid	[m]



Figuur 7-12: Dikte van de laminaire sublaag als functie van het debiet in de rioolbuis en de Nikuradse wandruwheid k .

Voor $k = 0.1$ mm is m.b.v. lineaire regressie de vergelijking voor delta bepaald op het bereik van 0.5 l/s tot 2.7 l/s, zie verg. 7-25 met $R^2 = 0.99941$. Met behulp van deze vergelijking kan de wandruwheid worden bepaald, door eerst delta te berekenen met verg. 7-25 en vervolgens C en f met verg. 7-21 en 7-22. Als C op deze wijze wordt berekend voor een k -waarde van 0.1 mm, dan is de fout die gemaakt wordt maximaal 0.3% t.o.v. de iteratief te berekenen oplossing. Voor k -waardes van 0.01 mm tot 0.4 mm is de fout die gemaakt wordt in C maximaal 1%.

$$\delta = 1.5493 \cdot 10^{-4} Q^4 - 1.2201 \cdot 10^{-3} Q^3 + 3.6377 \cdot 10^{-3} Q^2 - 5.1161 \cdot 10^{-3} Q + 3.4568 \cdot 10^{-3} \quad (7-25)$$

waarin

Q	debiet in rioolbuis	[l/s]
δ	dikte laminaire sublaag	[m]

7.3.2 Bepaling wandruwheid k en instroomcoëfficiënt ξ

Voor meerdere waarden van k en ξ is bepaald hoe nauwkeurig het model de meetwaarden beschrijft. Dit is gedaan door voor alle metingen de waarde van k en ξ vast te stellen en vervolgens per meting de benedenstroomse waterstand te bepalen zodat de modelwaarden de meetwaarden zo goed mogelijk beschrijven. Hierbij is de waarde van de doelfunctie minimaal (verg. 7-1), zie voor de resultaten tabel 7-4 en figuur 7-13. In de figuur is goed te zien dat bij een k -waarde van ± 0.07 mm tot ± 0.10 mm voor een groot bereik van ξ -waardes de waarde van de doelfunctie bijna constant is. Als de figuur 7-13 wordt vergeleken met figuur 7-7 dan is duidelijk te zien dat doelfunctie van figuur 7-13 een vlakker verloop heeft en minder gevoelig is voor de waarde van ξ . Tevens is in figuur 7-13 goed te zien dat bij lage k -waardes het minimum van de doelfunctie lager ligt, maar dat dit optimum bij een grotere waarde van ξ ligt. ξ bedraagt volgens literatuur ongeveer 0.45 tot 0.50. Aangezien in deze opstelling de stromingscondities minder ideaal zijn is het goed mogelijk dat de verliescoëfficiënt een iets grotere waarde heeft.

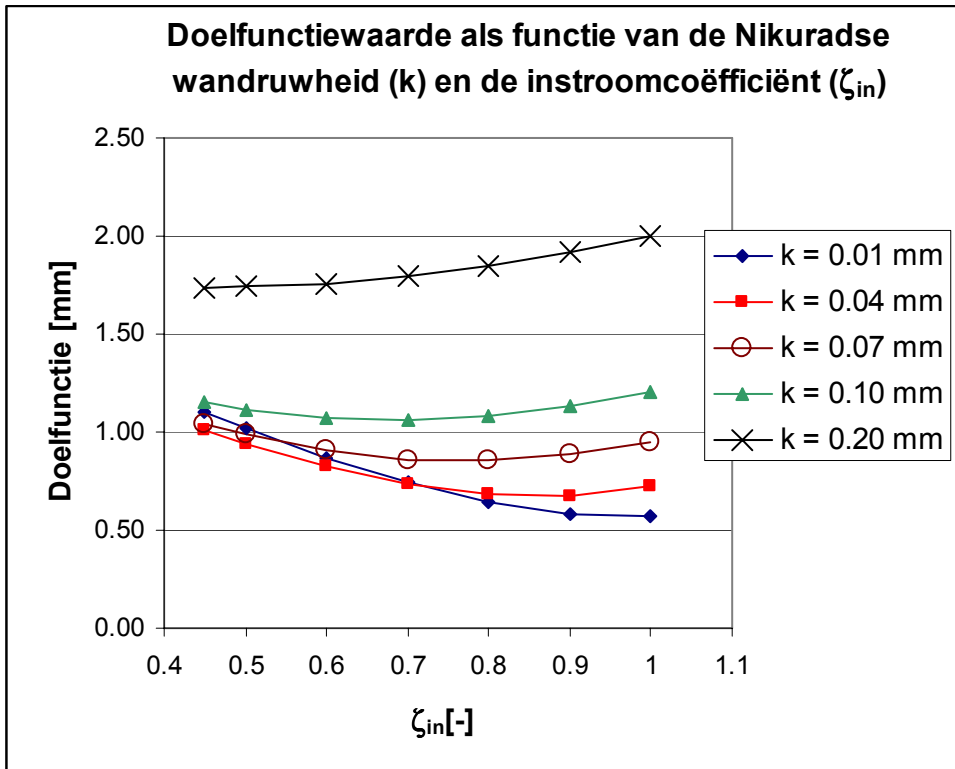
Uit een eerder verricht experiment is voor acrylaat een k - waarde van ± 0.07 mm gevonden. Deze waarde is bepaald bij stroomsnelheden, en dus niet rechtstreeks overdraagbaar (zie ook bijlage 1). Op basis van een geschatte waarde voor k (0.07 mm) en ξ (0.6) worden enkele modeluitkomsten vergeleken met de meetwaarden (zie ook figuur 7-15 t/m 7-17). Tevens worden in figuur 7-14 de afwijkingen voor alle metingen getoond. De afwijkingen per drukpunt staan in tabel 7-5.

Tabel 7-4: Waarden van de doelfunctie als functie van ζ_{in} [-] en k [mm].

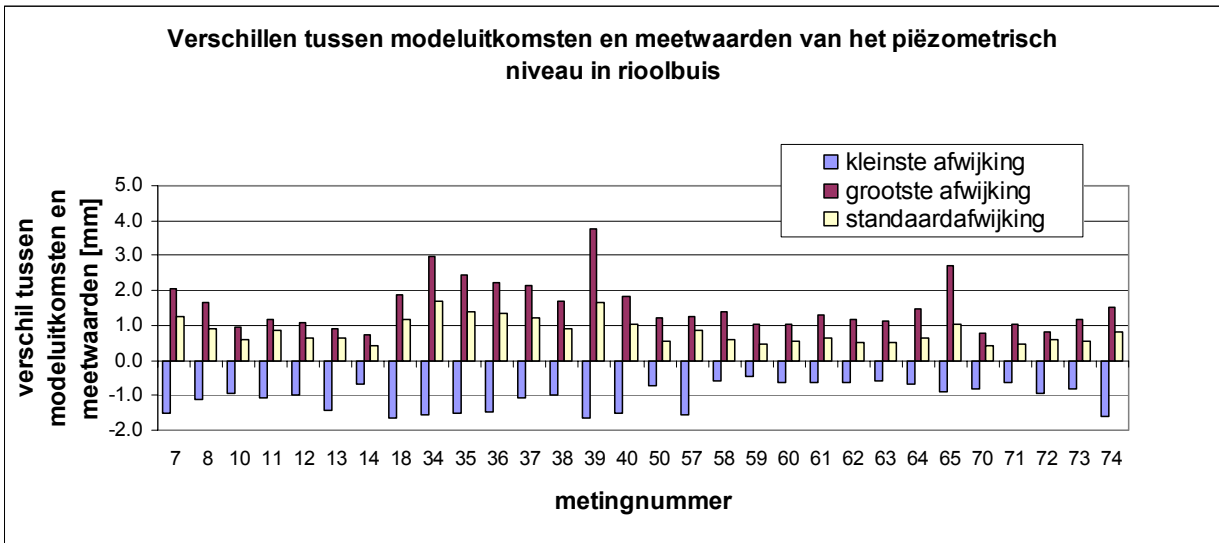
ζ_{in} [-]	0.45	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
k [mm]							
0.01	1.10	1.02	0.87	0.74	0.64	0.58	0.57
0.03	1.03	0.95	0.82	0.72	0.65	0.62	0.65
0.04	1.01	0.94	0.83	0.73	0.68	0.67	0.72
0.07	1.04	0.99	0.91	0.86	0.85	0.88	0.95
0.10	1.15	1.11	1.07	1.06	1.08	1.13	1.20
0.20	1.73	1.74	1.76	1.80	1.85	1.92	2.00
0.40	2.98	3.00	3.06	3.12	3.20	3.28	3.37

Tabel 7-5: afwijkingen per drukpunt, gemiddelde (gem) afwijking en standaardafwijking (std)

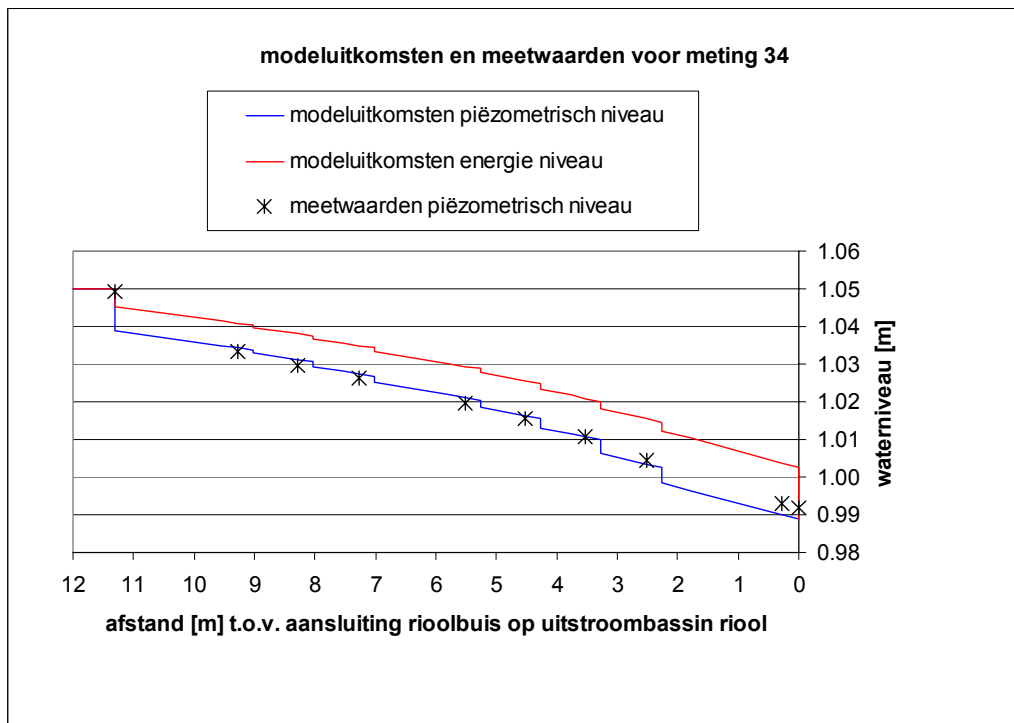
Drukpunt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
gem [mm]	0.35	-0.42	-0.67	-0.38	-0.93	-0.40	0.33	0.13	1.16	0.83
std [mm]	0.71	0.37	0.44	0.43	0.42	0.34	0.72	0.37	0.69	1.01



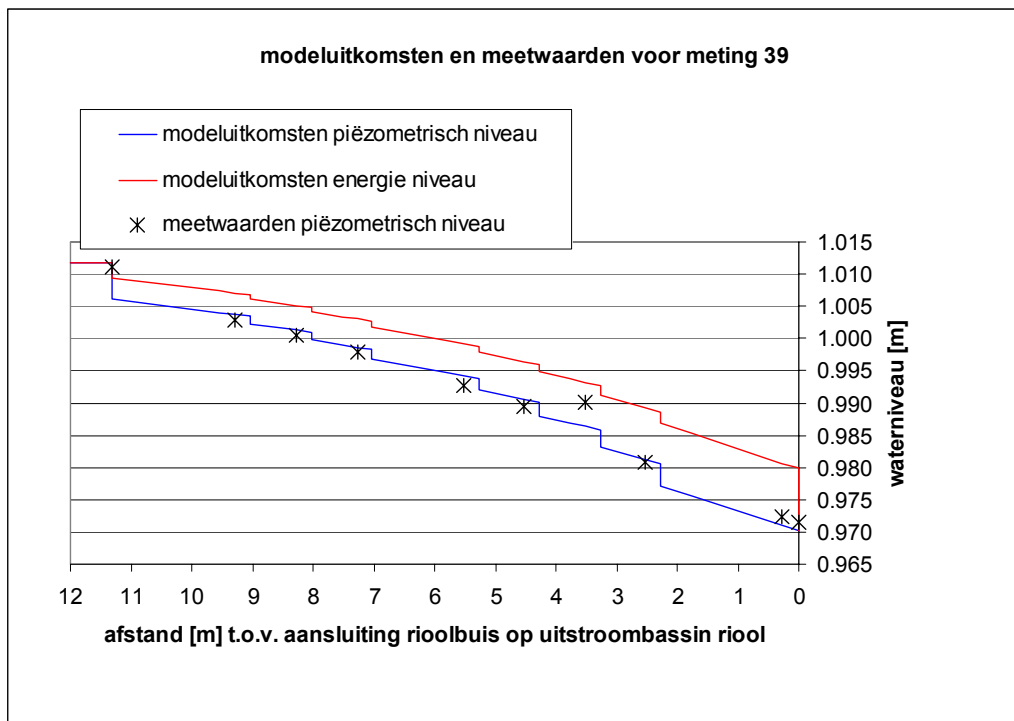
Figuur 7-13: Doelfunctie [mm] als functie van de Nikuradse wandruwheid (k) en de instroomcoëfficiënt (ξ).



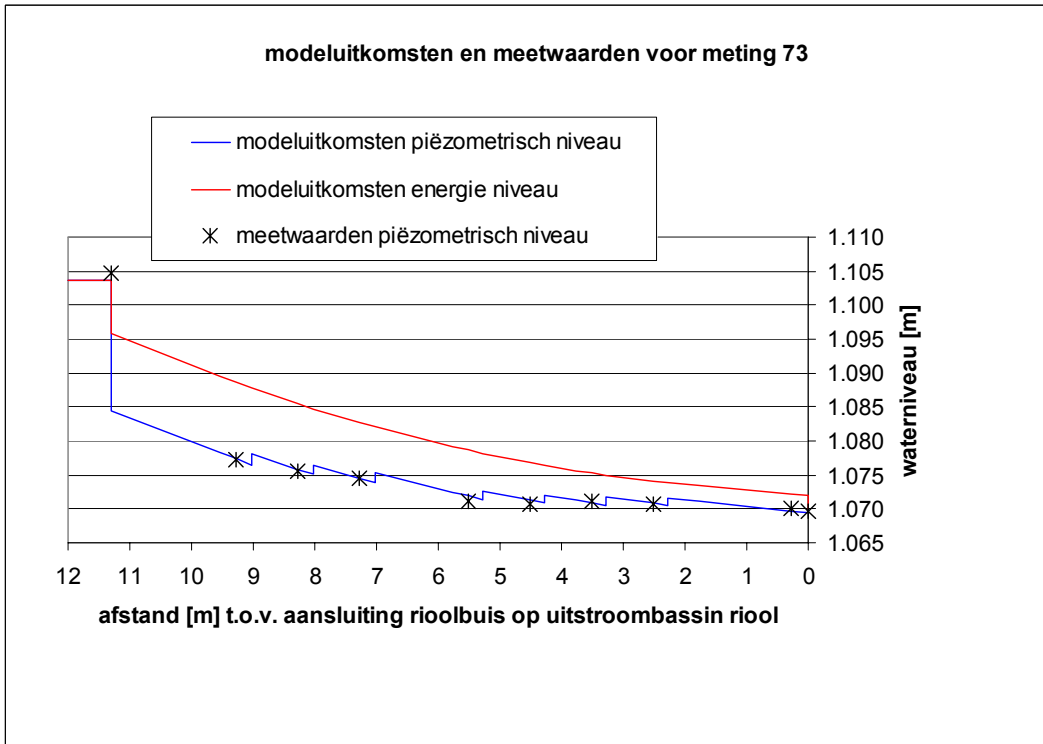
Figuur 7-14: Verschil tussen modeluitkomsten en meetwaarden



Figuur 7-15: Voorbeeld van situatie met stroming van de straat naar het riool.



Figuur 7-16: Voorbeeld van situatie met stroming van de straat naar het riool. Eén meetwaarde wijkt duidelijk af.



Figuur 7-17: Voorbeeld van situatie met stroming van de straat naar het riool.

7.4 Straatmodel

Met behulp van de gemeten debieten kan de debietverdeling op straat worden berekend. Dit is de invoer voor het straatmodel. Dit model heeft betrekking op het verloop van het energieniveau en het piëzometrisch niveau op de straat, tussen het meest bovenstroomse en meest benedenstroomse meetpunt. In dit model wordt de stroming vereenvoudigd tot:

1. Wrijvingsverlies t.g.v. bodemruwheid op de straat
2. Lokale energieverliezen t.p.v. de kolkaansluitingen op de straat.

Als een benedenstroomse waterstand wordt opgegeven, dan kan de gehele verhanglijn worden berekend.

In figuur 7-18 is de opbouw van het straatmodel geschematiseerd weergegeven.

7.4.1 Wrijvingsverlies t.g.v. de bodemruwheid

Om het wrijvingsverlies t.g.v. de bodemruwheid in het model te brengen wordt gebruik gemaakt van een analytische formule voor de verhanglijn (verg. 7-27), deze geldt alleen voor een horizontale bodem. Deze vergelijking kan worden afgeleid uit de vergelijking van Belanger (verg. 7-26).

$$\frac{dd}{ds} = \frac{i_b - c_f \frac{q^2}{gd^3}}{1 - \beta \frac{q^2}{gd^3}} \quad (7-26)$$

$$\frac{1}{4} d^4 - dd_g^3 + c_f d_g^3 s = \text{constant} \quad (7-27)$$

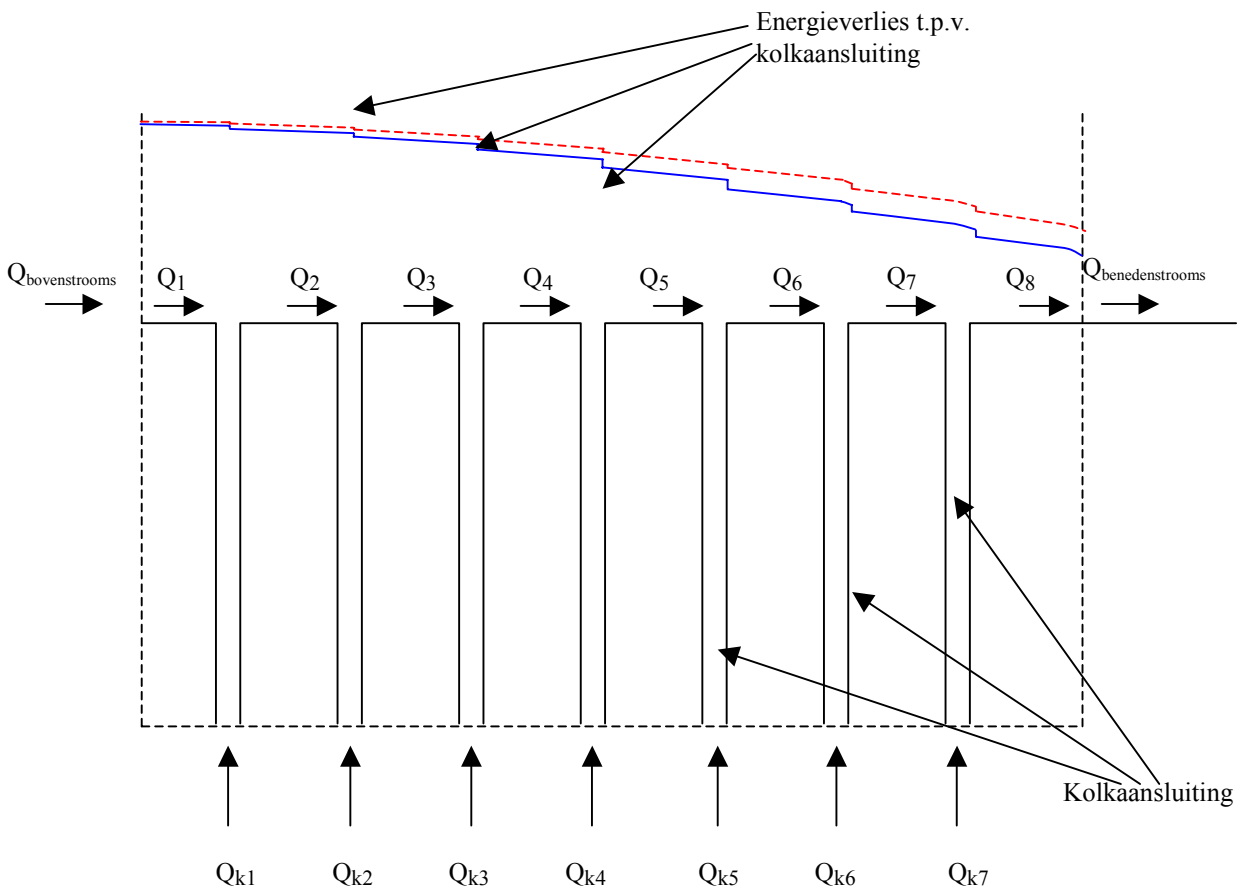
$$d_g = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (7-28)$$

$$d_{\text{berekend}} = \sqrt[4]{4(\text{constant} \cdot c_f d_g^3 s + d_{\text{geschat}}^3)} \quad (7-29)$$

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (7-30)$$

Hierin is:

i_b	bodemhelling	[-]
c_f	bodemruwheid	[-]
C	gladheidcoëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
q	debiet per eenheid van breedte	[m ² /s]
d	waterdiepte	[m]
d_g	grensdiepte	[m]
s	afstand	[m]



Figuur 7-18: Schematisatie van het straatmodel, de rode lijn is het energieniveau en de blauwe is het piëzometrisch niveau. In deze situatie stroomt er water van het riool naar de straat. Lokale verliezen grijpen treden op ter plaatse van de regenkolken.

Verg. 7-27 is een vierdegraads functie, als “s” is gegeven dan kan “d” niet in een keer bepaald worden. Deze vergelijking zal iteratief worden opgelost:

1. Uit de benedenstroomse randvoorwaarde en het debiet kan de grensdiepte worden bepaald
2. Vervolgens kan de waarde van de constante worden bepaald.
3. Om nu op $s = x$ te bepalen wat de waterhoogte is wordt de vergelijking eerst omgeschreven tot verg. 7-29.

4. In deze vergelijking wordt de eerste keer de benedenstroomse randvoorwaarde als schatting voor d ingevuld.
 5. Vervolgens wordt d_{berekend} ingevuld voor d_{geschat}
- Stap 5 moet 12-20 keer herhaald worden, de afwijking tussen berekende en geschatte waarde is dan $< 0.01\text{mm}$. Met behulp van verg. 7-30 kan de waarde van c_f omgerekend worden naar een Chezy gladheidcoëfficiënt.

7.4.2 Lokale energieverliezen t.p.v. de kolkaansluitingen op de straat

Hager (1999) beschrijft het transformatieprincipe. Volgens dit principe kunnen de verliescoëfficiënten in volledig gevulde buisleidingen worden vertaald naar verliescoëfficiënten in open waterlopen. Dit principe is alleen toepasbaar voor subkritische stroming waarbij het kental van Froude bij voorkeur kleiner is dan 0.7. In plaats van het dwarsoppervlak van de leiding is nu de stroomvoerend oppervlak van de straat noodzakelijk om de verhouding van a te bepalen, a wordt nu verg. 7-31.

De binnendiameter van de regenkolk is 56 mm, de breedte van de straat is 25 cm, de waterdiepte op straat varieert van ± 5 mm tot ± 50 mm.

$$a = \frac{A_1}{A_3} = \frac{A_1}{Bh} \quad (7-31)$$

Waarin

A	oppervlakteverhouding	$[-]$
A_1	oppervlakte regenkolk	$[\text{m}^2]$
A_3	stroomvoerende oppervlak straat	$[\text{m}^2]$
B	breedte van de straat	$[\text{m}]$
h	gemiddelde waterdiepte van de straat	$[\text{m}]$

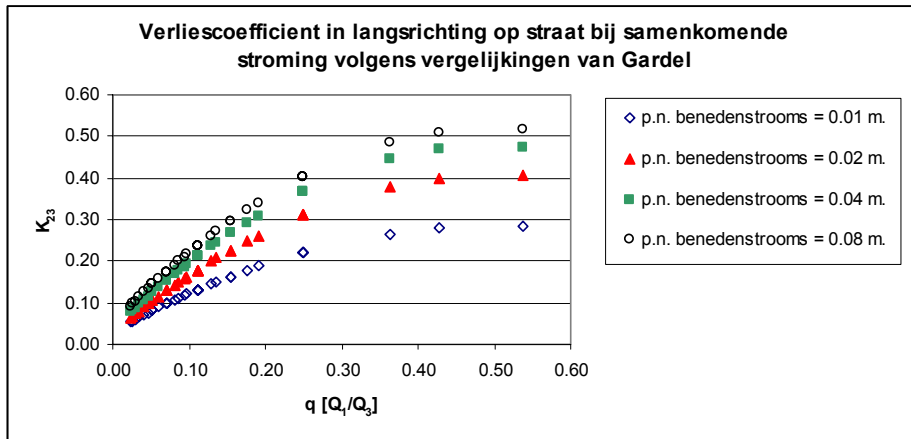
Verliescoëfficiënten voor samenkomende stroming

Voor de verliescoëfficiënt voor samenkomende stroming wordt gebruik gemaakt van dezelfde vergelijkingen als voor het riool maar dan met gebruikmaking van het transformatieprincipe. De lokale verliezen zijn gedefinieerd zoals in paragraaf 7.1.4. De waarde van a en q wordt bepaald door de bovenstroomse waterstand. Voor de berekening van de verhanglijn op straat dient vanaf benedenstrooms te worden uitgerekend. Hierdoor is het noodzakelijk om de verliescoëfficiënt iteratief te bepalen. In figuur 7-19 en 7-20 staan voor een aantal situaties de waarden van de verliescoëfficiënt en het energieverlies. Hieronder wordt de oplosmethode besproken:

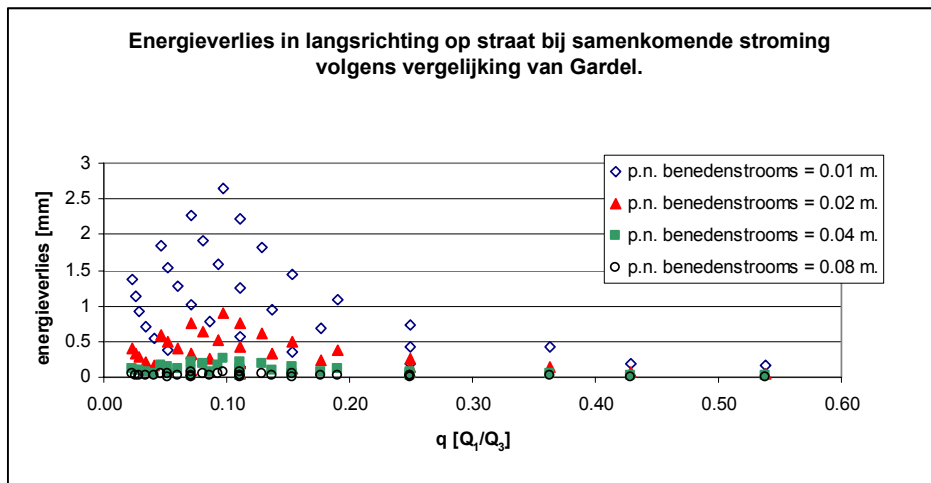
Oplosmethode:

1. Een eerste schatting voor het piëzometrisch niveau bovenstrooms is het piëzometrisch niveau benedenstrooms ($h_{\text{bovenstrooms}} = h_{\text{benedenstrooms}}$).
2. De snelheidshoogte bovenstrooms kan worden berekend m.b.v. $h_{\text{bovenstrooms}}$ en het debiet.
3. Daarna kan de energiehoogte $H_{\text{bovenstrooms}}$ worden berekend uit $h_{\text{bovenstrooms}}$ plus de snelheidshoogte.
4. Uit $H_{\text{bovenstrooms}}$ en $H_{\text{benedenstrooms}}$ kan het verschil in energieniveau worden berekend, deze moet gelijk zijn aan het werkelijke energieverlies.
5. Als nieuwe schatting voor $h_{\text{bovenstrooms}}$ wordt nu de vorige schatting van $h_{\text{bovenstrooms}}$ plus het werkelijke energieverlies gebruikt.

Om het lokale energieverlies op 0.01 mm nauwkeurig te bepalen moeten stap 3 t/m 5, 3 of 4 keer worden herhaald.



Figuur 7-19: Verliescoëfficiënt op straat volgens de vergelijking van Gardel bij toepassing van het transformatieprincipe. Uit de lijnen blijkt dat bij lage waterstanden de verliescoëfficiënt kleiner is dan bij hoge waterstanden.



Figuur 7-20: Energieverlies op straat volgens vergelijking van Gardel bij toepassing van het transformatieprincipe. In de grafiek zijn de energieverliezen voor alle combinaties van $Q_3 = 0.4 \text{ l/s}$, 0.6 l/s .. 1.8 l/s en $Q_1 = 0.04 \text{ l/s}$, 0.08 l/s .. 0.16 l/s getekend. Duidelijk te zien is dat het energieverlies bij lage waterstanden groter is dan bij hoge waterstanden.

Verliescoëfficiënten voor splitsende stroming

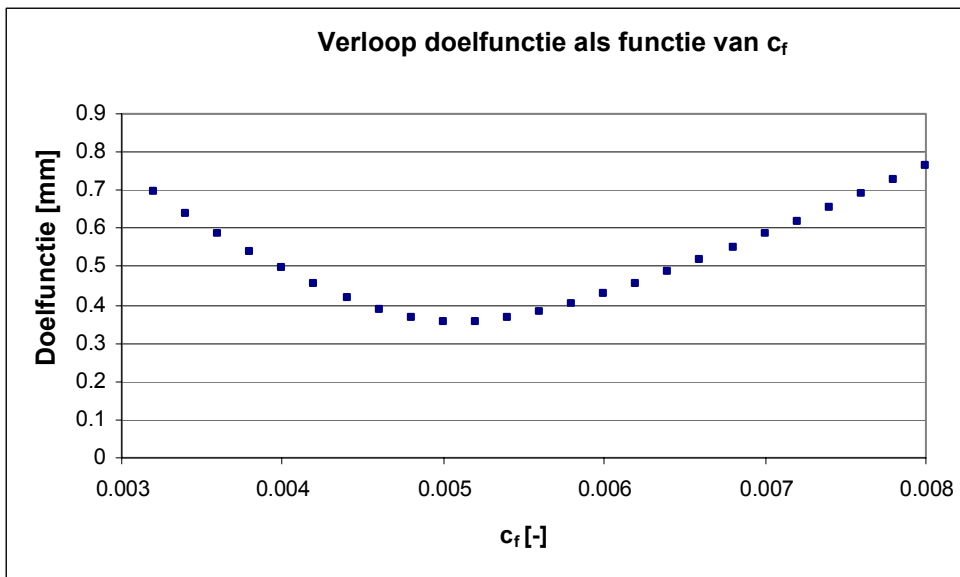
Hiervoor worden dezelfde vergelijkingen toegepast als in het riool. De verliescoëfficiënt is in deze vergelijking onafhankelijk van de oppervlakteverhouding en dus eenvoudig toe te passen.

7.5 Resultaten straatmodel

Voor de straat zijn voor de bepaling van de wrijvingscoëfficiënt de volgende stappen doorlopen:

- 1) De debietverdeling op straat is vanaf de benedenstroomse zijde uitgerekend m.b.v. het benedenstroomse debiet en de debieten door de regenkolken.
- 2) De waarde van c_f is voor alle metingen gelijk gesteld en vervolgens is per meting bepaald wat de benedenstroomse energieniveau is zodat de waarde van de doelfunctie minimaal wordt. Deze berekening is herhaald voor meerdere waarden van c_f , de resultaten hiervan staan in figuur 7-21.

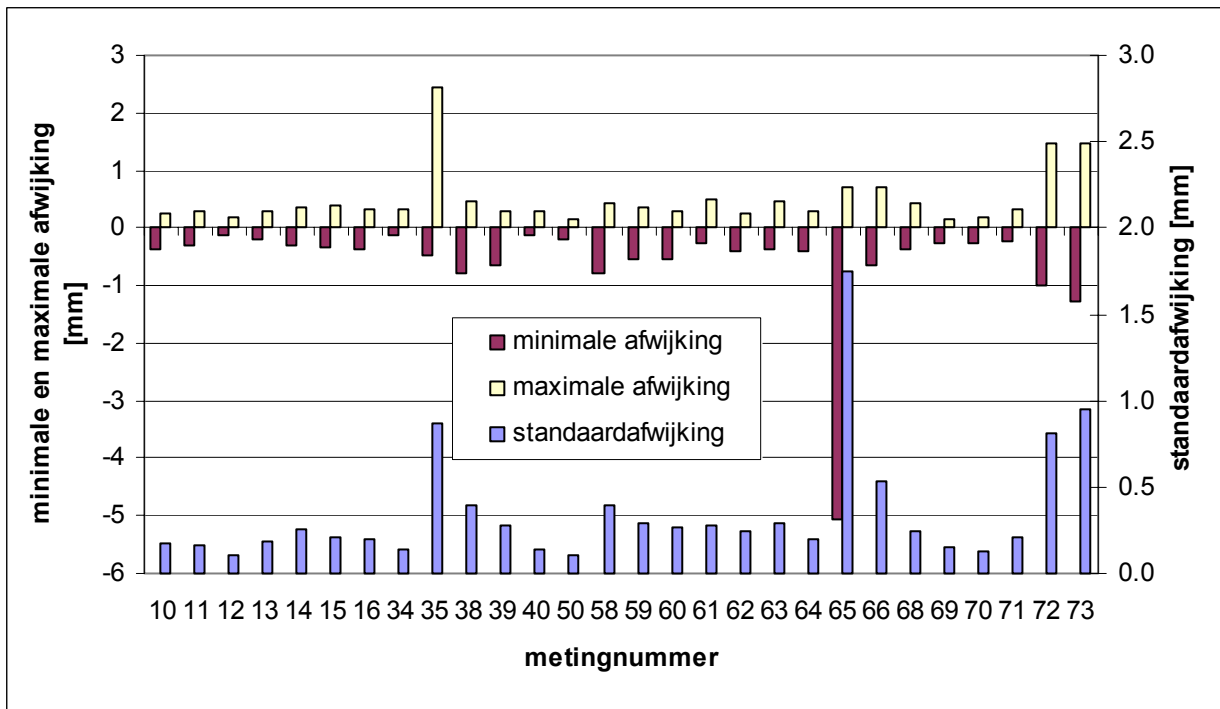
De waarde van de doelfunctie is minimaal bij $c_f = 0.005$, de doelfunctie waarde is dan gelijk aan 0.37 mm. In figuur 7-23 staan de afwijkingen van de modeluitkomsten t.o.v. de meetwaarden bij toepassing van $c_f = 0.005$. In figuur 7-24 t/m figuur 7-27 staan enkele voorbeelden van metingen en modeluitkomsten.



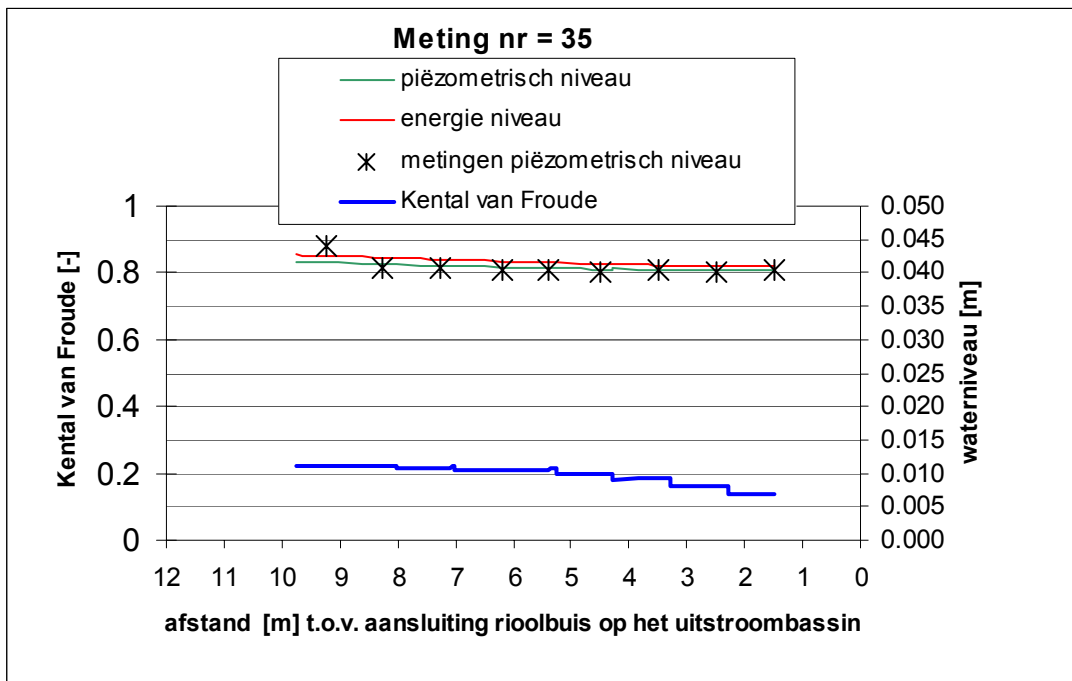
Figuur 7-22: Verloop doelfunctie als functie van c_f

Tabel 7-6: Afwijkingen per meetpunt, het gemiddelde (gem) verschil tussen meetwaarden en modeluitkomsten en de standaardafwijking (std).

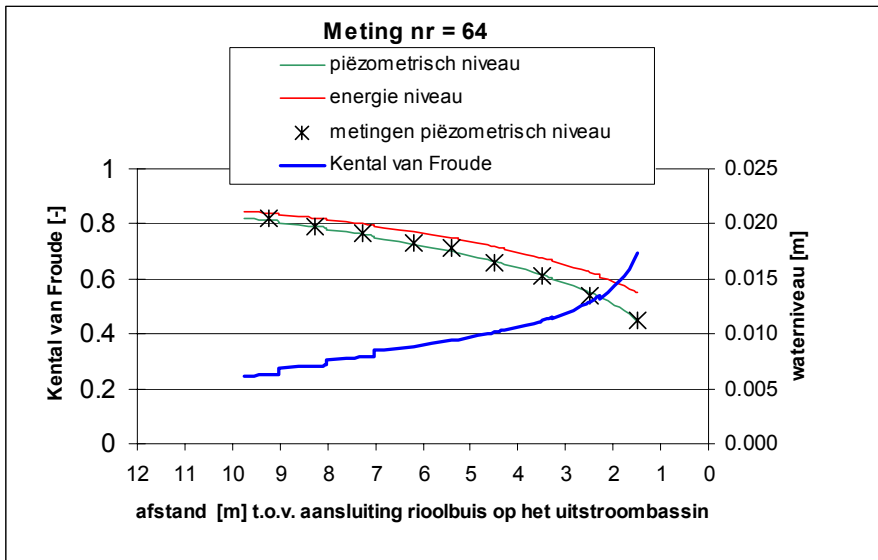
Meetpunt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
gem [mm]	0.13	0.12	0.05	0.06	0.16	-0.05	0.13	-0.31	-0.05
std [mm]	0.70	0.48	0.23	0.29	0.35	0.20	0.21	0.95	0.39



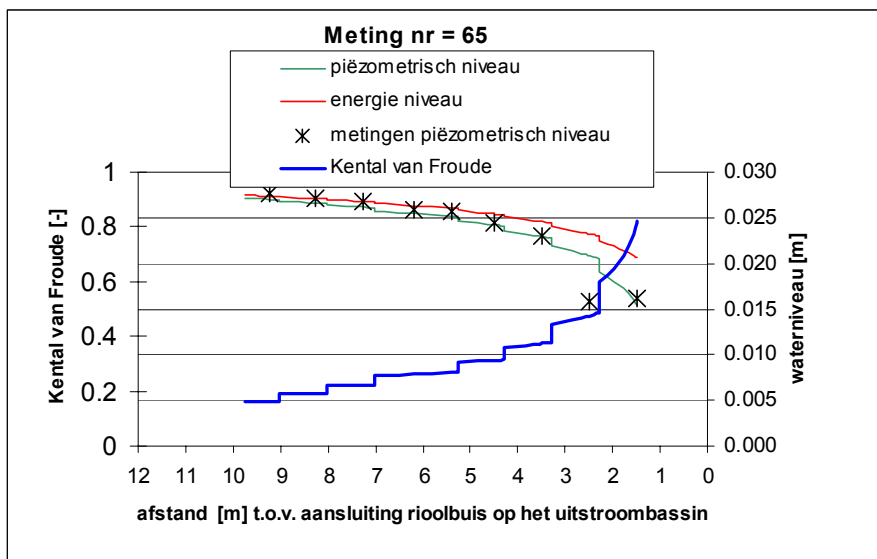
Figuur 7-23: Afwijking model en meting bij toepassen $c_f=0.005$



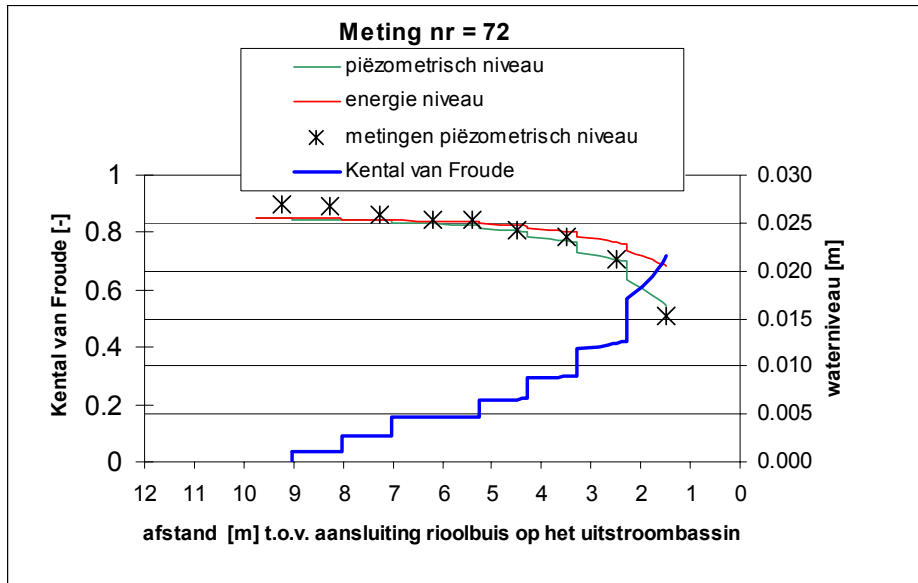
Figuur 7-24: Voorbeeld meting met stroming van straat naar het riool. Eén duidelijke meetfout.



Figuur 7-25: Voorbeeld met een beetje stroming van riool naar straat en kleine verschillen tussen model en meting



Figuur 7-26: Voorbeeld meting met stroming van het riool naar de straat. Eén duidelijke meetfout.



Figuur 7-27: Stroming van het riool naar de straat met zeer grote uitwisselingsdebieten en golven op het oppervlak. Golven op het oppervlak, of meetfouten zijn een mogelijke verklaring voor de afwijkingen tussen model en meting. De afwijkingen kunnen ook worden veroorzaakt door een beperkte modelbeschrijving van de stroming op de straat bij hoge uitwisselingsdebieten.

7.6 Conclusies

7.6.1 Rioolmodel

De beide rioolmodellen zijn een sterke versimpeling van de werkelijkheid:

- 1) lokale verliezen t.p.v. de buisaansluitingen zijn verwaarloosd
- 2) de lokale verliezen t.p.v. de regenkolken zijn onzeker

Indien wordt uitgegaan van hydraulisch gladde wandwrijving dan wordt tevens de invloed van de k-waarde op de wrijving verwaarloosd.

Deze factoren zorgen mogelijk ervoor dat de bepaling van het optimum van de kleinste kwadraten norm op het eerste gezicht vreemde parameterwaarden oplevert. Voor een deel kan wordt dit misschien verklaard door de meetfouten. Waarschijnlijker is echter dat er te weinig informatie is om de parameters te bepalen en dat het gebruikte model te eenvoudig is. Dit wordt geïllustreerd door de vorm van de doelfunctie (figuur 7-13), vanaf $k = 0.07$ mm, wordt de invloed van de instroomcoëfficiënt op de doelfunctie zeer klein. Indien k gelijk is aan 0.07 mm dan is eigenlijk te weinig informatie beschikbaar om uit de metingen te concluderen wat de waarde van ξ is.

- Een ééndimensionale modellering geeft een redelijke indicatie voor het verloop van het piëzometrisch en energieniveau.
- Grote afwijkingen van meerdere millimeters tussen modeluitkomsten en meetwaarden zijn meetfouten.

7.6.2 Straatmodel

De waarde die voor c_f wordt gevonden is gelijk aan 0.005. Een c_f waarde van 0.005 en een waterdiepte van 0.025 m betekent bij verwaarlozing van de viskeuze sublaag een k-waarde van 1 mm. Wordt uitgegaan van een debiet van 0.5 l/s, dan is de stroomsnelheid gelijk aan 0.08 m/s. Indien k wordt berekend, rekening houdend met de dikte van de viskeuze sublaag (verg. 7-22 t/m 7-24) dan is $k = 0.5$ mm. De berekende waarde heeft niet de werkelijke waarde te zijn omdat de lokale verliezen anders kunnen zijn dan die in het model zijn gebruikt. Daarnaast zijn de hoogtemetingen waarschijnlijk onbetrouwbaar, vanwege golfjes op het wateroppervlak.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

8.1.1 Meetopstelling

- Het is lastig en het kost veel tijd om de benedenstroomse waterstand en de afvoer in het riool in te stellen op een gewenste waarde.
- De meetapparatuur voor de debietbepaling aan de bovenstroomse en benedenstroomse zijde van het riool en de straat is onnauwkeurig. Na kalibratie van de apparatuur wordt de meting nauwkeuriger maar verbetering blijft mogelijk.
- Het bepalen van debieten uit de looptijd van een tracer geeft een redelijke indicatie voor het werkelijke debiet. Deze methode werkt tot debieten van 0.15 l/s.
- Het bepalen van het waterniveau op de straat met peilnaalden is bij aanwezigheid van golfjes op het oppervlak onnauwkeurig
- Sommige peilnaalden zijn krom en van sommige is het rolmechanisme defect, dit veroorzaakt kleine meetfouten.

8.1.2 Metingen

- Het instellen van evenwichtssituatie duurt ongeveer 1 uur.
- Bij hoge druk in het riool lopen de drukpotjes met de peilnaalden over, dit beperkt de meetmogelijkheden.
- Luchtbellen kunnen makkelijk uit het riool weggespoeld worden, speciale aandacht is benodigd voor luchtbellen in de aansluitingen op de regenkolken en de instroomopening bij het instroombassin.
- Het bepalen van een referentieniveau en het bepalen van de gemiddelde bodemligging is lastig omdat een vast punt ontbreekt.

8.1.3 Data-analyse en modelonderzoek

- Voor stroming onder druk is de relatie tussen debiet en het drukverschil eenduidig
- Voor instroom onder vrij verval van straat naar het riool is de relatie tussen debiet en drukverschil tussen riool en straat complexer.
- Er is onvoldoende informatie beschikbaar om de waarde van modelparameters te bepalen.

8.2 Aanbevelingen

8.2.1 Meetopstelling

- De bediening kan worden verbeterd door een in hoogte verstelbare overstort te maken.
- Voor de waterstandsbepaling op straat kunnen beter drukaansluitingen worden gemaakt, verstoringen t.g.v. golfjes worden dan kleiner
- Vervanging en / of reparatie van peilnaalden.

8.2.2 Metingen

- Metingen verrichten waarbij er gedoseerd debieten worden toegevoegd, hiermee kunnen de lokale verliezen en de afvoerrelaties voor vrije instroom kunnen worden bepaald
- Metingen verrichten waarbij de aanzuigende werking van het riool wordt getest
- Een vast referentiepunt kiezen en met een landmeetinstrument het verschil tussen dit punt en de constructie inmeten.
- Metingen verrichten waarbij er lagere afvoeren worden gerealiseerd op straat, door een aantal putjes dicht te zetten: hierbij kan de afvoerrelatie voor putjes worden bepaald.
- Nauwkeuriger meten

8.2.3 Data-analyse en modelonderzoek

- Verfijnen model voor het riool door andere vergelijkingen voor het lokale verlies t.p.v. regenkolken en van de buissegmenten te bepalen d.m.v. kalibratie
- Verfijnen model voor de straat door vergelijkingen voor het lokale verlies t.p.v. regenkolken en te bepalen d.m.v. kalibratie

Literatuur

Prof.dr.ir. J.A. Battjes (1998)

TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Vloeistofmechanica
TU Delft, 1998, collegedictaat CTme2100

F.H.L.R. Clemens (2001)

Hydrodynamic models in urban drainage: application and calibration, Dissertatie Delft 2001
DUP, ISBN 90-407-2163-7

Willi H. Hager (1999)

Wastewater hydraulics, theory and practice
Berlin, Springer, 1999, ISBN 3-540-62998-X
Oorspr. titel: Abwasserhydraulik; Theorie und Praxis

L. Huisman (1955)

Stromingsweerstand in buisleidingen
Kiwa, 1955

I.E. Idelc'cik (1978)

Memento des pertes de charge
Paris, Eyrolles, 1969-1978

ISO Standards Handbook 16 (1983)

Measurements of liquid flow in open channels.
Geneve, ISBN 92.67.10077.7

Bruce E.Larock (2000)

Hydraulics of pipeline systems
Bruce E.Larock, Roland W.Jeppson, Gary Z. Watters (2000)
Publisher Boca Raton , CRC Press, 2000, ISBN 0-8493-1806-8

Ir. Harry van Luijtelaa (1999)

Design criteria, flooding of sewer systems in 'flat' areas, 8th international conference urban storm drainage, Sydney 30 august-3 september 1999, pagina 538-545

Prof. Cedo Maksimovic and Dr Dusan Prodanovic (2001)

Modelling of Urban Flooding- Breakthrough or recycling of Outdated concepts,. Urban drainage modeling, proceedings of the speciality symposium of the world water and enviromental resources congress, 20-24 mei, 2001, Orlando, Florida, pagina 1-9.

Donald S. Miller (1971)

Internal Flow, a guide to losses in pipe and duct systems
Corporate author British Hydromechanics Research Association, Cranfield, 1971

Leonarda Nania*,Manuel Gómez, Josep Dolz (1999)

Numerical and experimental study of the urban storm runoff in a street network, Department of hydraulic engineering, Civil engineering school, universitat Politecnica de Catalunya. 8th international conference urban storm drainage, Sydney 30 augustus -3 september 1999, pagina 849-856.

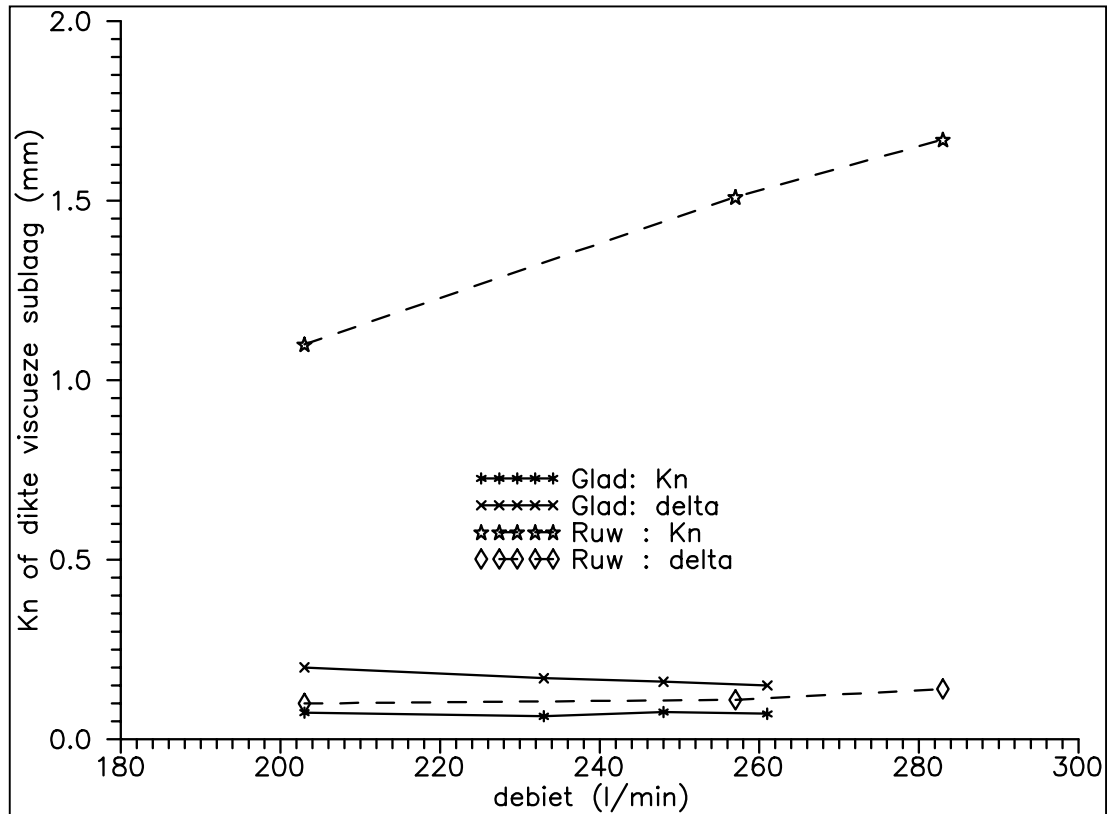
David Pezzaniti, Linton Johnston and John R. Argue (1999)

Road surface stormwater drainage hydraulics: new design information, urban water resources centre, university of south australia. 8th international conference urban storm drainage, sydney 30 augustus-3 september 1999, pagina 754-762.

Prof. Dr. M. de Vries (1982).
Scale models in hydraulic engineering, Delft
Delft, International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1982

Bijlage 1: K-waarde acrylaat

Onderstaande grafiek is afkomstig uit het practicum vloeistofmechanica wateropleiding aan het buizenmodel. In dit practicum is de Nikuradse wandruwheid (k) en de dikte van de laminaire sublaag bepaald. Voor de hydraulisch gladde situatie is gebruik gemaakt van een buis van acrylaat. Uit de grafiek blijkt dat k ongeveer gelijk is aan 0.07 mm. Prof. Clemens heeft meegewerkt aan deze metingen.



Bijlage 2: Grafieken van verliescoëfficiënten uit Miller (1971)

I DESIGN DATA

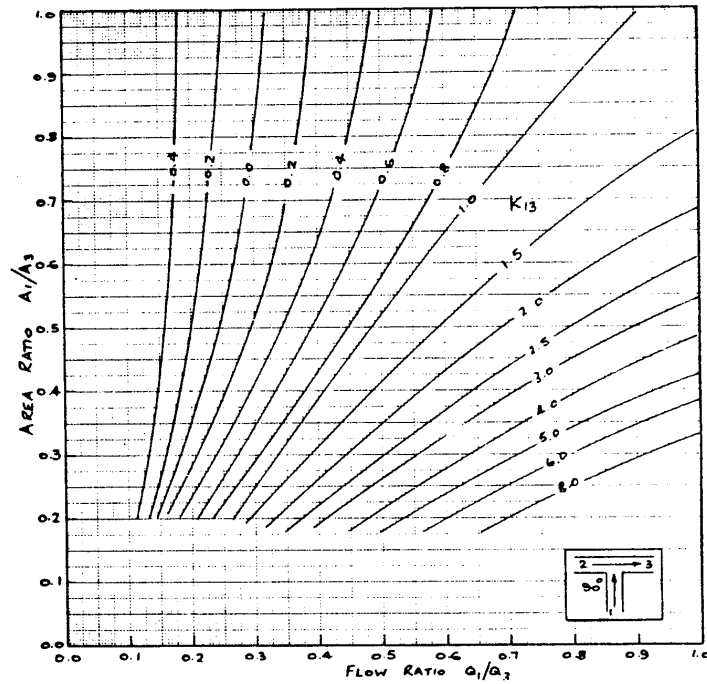


Fig.5.2.3. Loss coefficients K_{13} for 90 degree sharp - edged combining tees

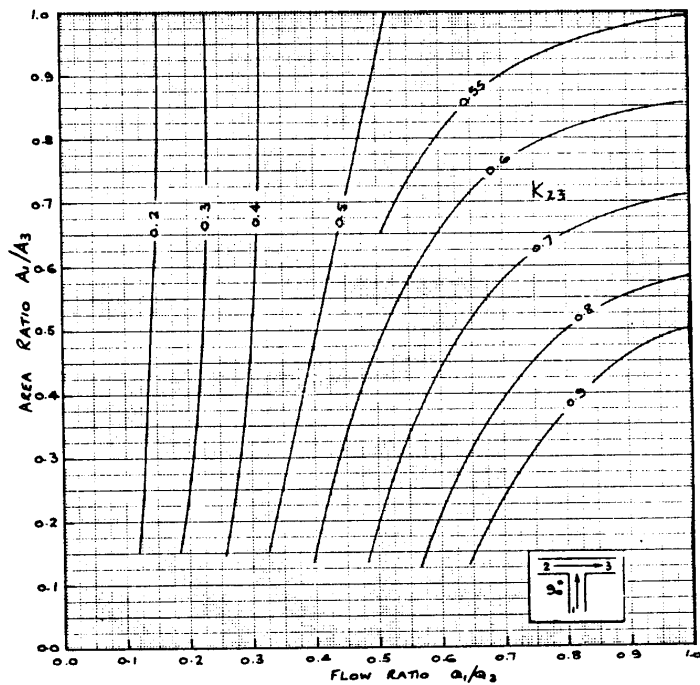


Fig.5.2.4. Loss coefficients K_{23} for 90 degree sharp - edged combining tees

I DESIGN DATA

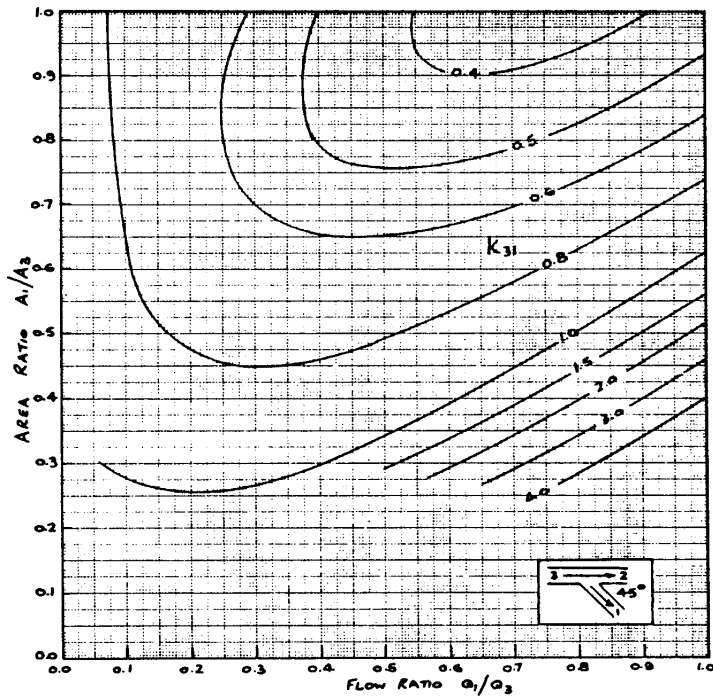


Fig.5.3.2. Loss coefficients K_{31} for 45 degree sharp - edged dividing tees

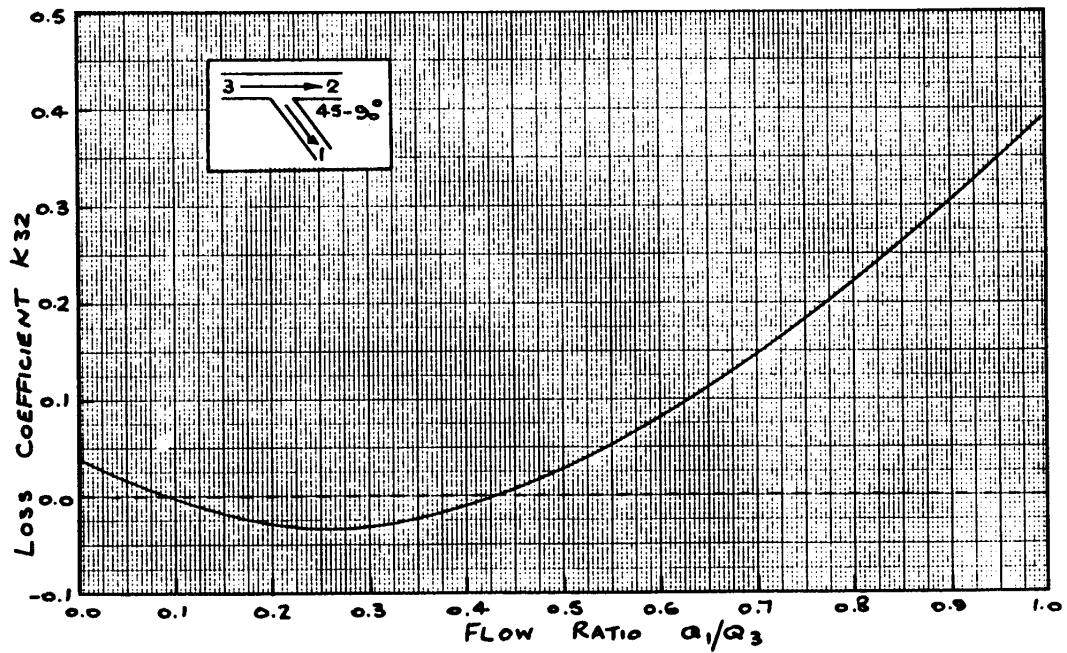


Fig.5.3.3. Loss coefficients K_{32} for sharp - edged dividing tees

Bijlage 3: V-stuwen en vlotterdebietmeters

1.1 Beschrijving gebruikte Vlotterdebietmeters en V-stuwen



Gebruikte vlotters in opstelling

VlotterA en Vlotter B

2 identieke vlotterdebietmeters met een bereik van 300-3000 l/h, nauwkeurigheid volgens fabrikant 5%. Op de etiketten zijn een A respectievelijk een B aangebracht:

George Fischer

Type: sk20

No 198.801.904

CH-8201

Deze vlotters zullen in het vervolg vlotterA respectievelijk vlotterB worden genoemd. Aan de uitstroomzijde van de vlotters is een flexibele slang gemonteerd, deze kunnen naar keuze in de instroombak van het riool of de straat worden gehangen.

Vlotter C

1 vlotterdebietmeter met een bereik van 1000-10000 l/h, nauwkeurigheid volgens fabrikant 5%.

George Fischer

Type: sk30

No 198.801.908

CH-8201

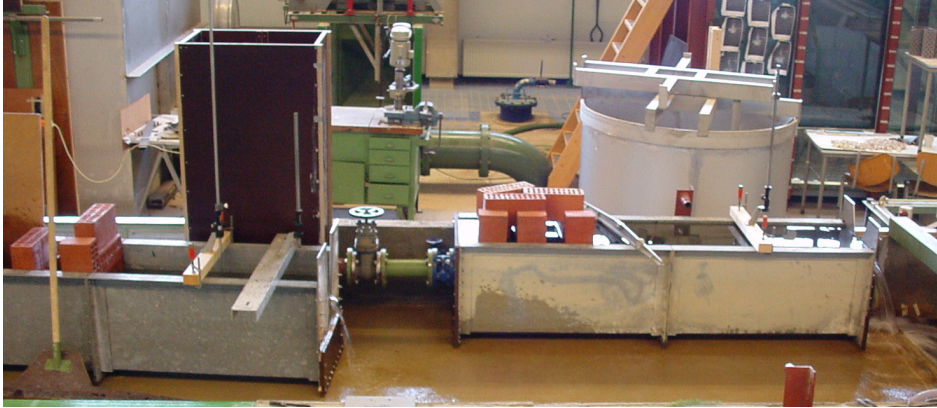
Deze vlotter zal in het vervolg vlotter C worden genoemd. De uitstroomzijde van deze vlotter komt in de instroombak van het riool uit.

V-stuw 28.4°

1 V-stuw met een hoek van 28.4°, te gebruiken voor afvoeren met een overstortende straal met een hoogte van 6 tot 10.6 cm (ISO norm geldt voor dit meetbereik). Indien gemonteerd en werkend volgens de ISO norm wordt deze geacht 1.5 tot 2% (ook voor lage afvoeren) nauwkeurig te zijn. Deze V-stuw staat aan de benedenstroomse zijde van de straat. Deze V-stuw zal in het vervolg V-28 worden genoemd. De bovenstroomse gootelementen zijn gemaakt van +/- 8 mm dik staal. Deze elementen zijn recht en glad, alleen de verbinding tussen twee elementen is niet glad.

V-stuw 53.8°

1 V-stuw met een hoek van 53.8°, te gebruiken voor afvoeren met een overstortende straal met een hoogte van 6 tot 10.3 cm (ISO norm geldt voor dit bereik). Indien gemonteerd en werkend volgens de ISO norm wordt deze geacht 1.5 tot 2% (voor lage afvoeren) nauwkeurig te zijn. Deze V-stuw staat aan de benedenstroomse zijde van het riool. Deze V-stuw zal in het vervolg V53 worden genoemd.



Zij aanzicht van het benedenstroomse gedeelte van de meetopstelling, met meetgoten voor V-stuwen: rechts voor het riool en links voor de straat.

1.2 Montage eisen

VlotterA, Vlotter B, Vlotter C

Vlotters dienen zuiver verticaal te staan en ongestoorde aanstroom van water te krijgen. Als maat voor ongestoorde aanvoer kan een rechte aanstroomlengte van $6 \times$ de binnendiameter van de aanvoerbuus worden genomen. Verder kan worden vermeld dat de gebruikte lijmmoffen waarschijnlijk niet origineel zijn:

- Voor vlotterA en VlotterB is gebruik gemaakt van lijmmoffen met een uitwendige diameter van 40 mm terwijl dit origineel waarschijnlijk 50mm is geweest. Dit is te zien aan de lijmmoffen, en dit staat tevens als diameter vermeld bij een leverancier: www.eriks.be.
- Voor vlotter C is gebruik gemaakt van lijmmoffen met een uitwendige diameter van 50 mm terwijl dit origineel waarschijnlijk 63 mm is. Dit is te zien aan de lijmmoffen, en dit staat tevens als diameter vermeld bij een leverancier: www.eriks.be.

De drukval over een vlotter bedraagt 30 –40 cm, dit is empirisch bepaald. De debietmeters waren oorspronkelijk gemonteerd op een regelbord, echter in deze configuratie was het onmogelijk om het maximale debiet door de grote vlotter te krijgen vanwege de kleine kraan en vele bochten die toegepast waren. Verder werd op dit bord niet voldaan aan de vrije aanstroomlengte van $6 \times D$. Tevens stonden kranen net voor de vlotters gemonteerd, in plaats van hierna.

V-stuw 28.4° en V-stuw 53.8°

De belangrijkste eis die volgde uit het mogen toepassen van de ISO-norm is de vorm van het aanstromende kanaal, dit is de reden dat de V-stuwen hoger zijn gemonteerd dan de originele montagegaten.

Eisen ISO norm:

1. $h > 0.06$, waarin h de hoogte van de overstortende straal is.
2. $p > 0.09$, waarin p de hoogte van de hals van de V tot de bodem van de aanstroomgoot is.
3. Voor toepassing van de coëfficiënten uit de ISO norm geldt dat: $h/p < 0.35$. Voor V28 geldt dat $p = 29.3$, hieruit volgt dat h maximaal 10.26 cm mag zijn. Voor V53 geldt dat $p = 34$, hieruit volgt dat h maximaal 11.9 cm mag zijn, deze kan echter maar 10.6 zijn omdat anders de goot overstroomt.
4. $0.1 < p/B < 1.5$, waarin B de breedte van de aanstromende goot is. Hieruit volgt dat voor V28 $0.20 \text{ m} < B < 2.93 \text{ m}$, en voor V53 $0.23 < B < 3.40 \text{ m}$. De breedte van de goot is 0.45 m, dit voldoet dus aan de norm.
5. De hoogte van de overstortende straal moet op een afstand van 4 tot $5 \times h_{\max}$ worden gemeten. Dit betekent voor beide V-stuwen op een afstand van +/- 0.41 tot 0.51 m. Dit is gedaan op 0.50 m.
6. De stroming die bij de V-stuw aankomt dient gelijkmatig en stabiel te zijn, daarom is een vrije aanstroomlengte van minimaal $10 \times W$ vereist. W is de breedte van de overstortende straal. Voor V28 is W maximaal 5.2 cm, en voor V53 is w maximaal 10.5 cm. Voor V53 is 1.30 m en voor V28 is 1.00 m vrije aanstroomlengte toegepast.
7. De breedte van de overstortrand = 2.0 mm, deze mag volgens de norm variëren tussen 1 en 2 mm.

Verdere eisen aan de overstorting zijn een gladde overstortende straal, dit bleek niet geheel het geval te zijn, er “lekte” water recht langs de stalen plaat van de V-stuw. Dit komt deels door het feit dat er beschadigingen op de V zitten, en waarschijnlijk doordat de laatste 2cm van de V handmatig is gevijld, dit is te zien aan een andere oppervlaktestructuur. Zodoende bleef de straal soms gedeeltelijk aankleven. De basisvergelijking voor het debiet over V-stuwen is de vergelijking van Kindsvater-Shen

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} h_e^{5/2} (l)$$

Q is het debiet in m³/s

C_e is de dimensieloze afvoer coëfficiënt

g is de gravitatieconstante in m²/s

α is de hoek tussen de twee zijden van de V-stuw (radialen of graden)

h_e is de effectieve hoogte van de overstortende straal in m.

Voor water bij normale temperaturen: van 5 tot 30°C is de coëfficiënt C_e, bepaald door metingen en is een functie van 3 variabelen.

$$C_e = f\left(\frac{h}{p}, \frac{p}{B}, \alpha\right)$$

Waarin

h is de gemeten hoogte in meters.

p is de hoogte van de hals tot de bodem van de bovenstroomse goot in meters

B is de breedte van de bovenstroomse goot in meters

De effectieve hoogte, h_e wordt bepaald door

$$h_e = h + k_h$$

waarin

k_h is een experimenteel bepaalde waarde in meters die de invloed van viscositeit en oppervlaktespanning compenseert. Met behulp van de figuren 8 en 9 op blz. 238 en 239 van ISO standards Handbook 16 kunnen de waarden voor k_h en C_e worden bepaald:

alfa V[°]	k _h [m]	C _e [-]
28.4	0.0023	0.588
53.8	0.0013	0.578

1.3 Uitgevoerde metingen

Ten behoeve van laboratorium metingen in het schaalmodel zijn de V-stuwen en vlotterdebietmeters getest:

1. Voordat besloten is gebruik te maken van vlotterdebietmeters is in eerste instantie bepaald wat de drukval over een vlotter is. Aangezien hierover nauwelijks informatie over beschikbaar was is dit gemeten m.b.v. de proefopstelling “beluchting” in het gezondheidstechniek laboratorium. De drukval bedraagt circa 30-40 cm en is nauwelijks afhankelijk van het debiet.
2. Voor aanvang van de metingen zijn de afleeswaarden van de gebruikte vlotterdebietmeters vergeleken met de afleeswaarden van een elektromagnetisch inductieve debietmeter uit het gezondheidstechniek laboratorium.
3. Tijdens de metingen is van de V-stuwen meerdere keren bepaald wat het nulniveau op de peilnaald is. Dit is nauwkeurig gedaan volgens de beschrijving en nog enkele malen nagemeten met een rolmaat.
4. Tijdens de 1 na laatste week is met massadebietmetingen bepaald of de aflezing van vlotterdebietmeters en V-stuwen ook daadwerkelijk kloppen.
5. Naar aanleiding van de resultaten van 3 zijn de V-stuwen gepolijst met schuurpapier met een ruwheid van +/- 1000, hierna zijn de afleeswaarden van de vlotterdebietmeters vergeleken met de afvoer van de V-stuwen.

Uit 1 bleek dat de aflezing van vlotterdebietmeter A en B systematisch een debiet van 3, respectievelijk 5% te laag aangeven t.o.v. de elektromagnetisch inductieve debietmeter. Vlotter C daarentegen was wel ongeveer goed. Uit 3 bleek dat de V-stuwen beide een afvoer aangaven die +/-5% te laag is. Na 4 bleek dat de verschillen slechts na polijsten slechts klein waren: slechts enkele tienden van procenten.

1.4 Vergelijking metingen Vlotters met elektromagnetisch inductieve debietmeter

Vergelijking met waarden van magnetisch-inductieve debietmeter in het gezondheidstechniek laboratorium, met een meetbereik van 600-20000 l/h, welke wordt gebruikt door Jasper Verberk. De meetnauwkeurigheid is volgens de fabrikant 0.5%. De verschillende debietmeters zijn achtereenvolgens in serie gezet met de magnetisch-inductieve debietmeter. In eerste instantie is gebruik gemaakt van een gesloten systeem met een circulatiepomp, later is gebruik gemaakt van leidingdruk. Het gesloten systeem bestond voornamelijk uit slangen met een binnendiameter van +/-25mm, dit bleek in combinatie met de pomp te klein om debieten van meer dan 4500 l/h te realiseren. Later is bij gebruik van de leidingdruk gebruik gemaakt van slangmateriaal van 40mm, hiermee was het mogelijk om debieten tot 7500 l/h door te pompen. Hoger was vanwege de vele bochten, lange leidingen en voornamelijk door de op het meetbord toegepaste, te kleine kraan (Membraanafsluiter George Fischer type 314, d 50, dn40, pn 10) niet mogelijk.

Werkwijze:

De diverse debietmeters stonden gemonteerd op bord met verdelingswerk en kranen.

1. Montage debietmeter
2. Pomp aan /kraan open en wachten tot luchtbellens uit systeem en stabiel debiet
3. Aflezing magnetische debietmeter
4. Aflezing vlotterdebetmeter: bovenrand vlotter op midden van streepje schaalverdeling.
5. Stap 3 en 4, 2 keer herhalen
6. Stap 3 t/m 5 herhalen voor andere debieten.

Opmerkingen bij metingen:

1. De vlotter van de vlotterdebetmeter is bij debieten rond het maximum niet geheel stabiel: fluctuaties van maximaal +/- 40 l/h (voor de debietmeter van 300-3000 l/h)
2. De vlotterdebetmeters zijn aan de ondergrens onnauwkeurig, de vlotter reageert nauwelijks op het verder openen/sluiten van de kraan
3. Het maximumbereik van de vlotterdebetmeter van 1000-10000 l/h is nog niet getest: -problemen met toevoer van grote debieten(>7500 l/h): 40mm slang was in combinatie met de gebruikte kranen onvoldoende.
4. Water in het gesloten circuit was licht troebel.
5. Debetmeter reageert niet echt op kleine veranderingen in hoek waaronder deze gemonteerd staat.
6. Vlotterdebetmeters 300-3000 l/h meten consequent te lage waarden: dit wordt niet significant beïnvloed door toepassing van een langer recht aanstroomstuk. Om dit te bepalen is gebruik is gemaakt van een stuk slang van 40mm diameter en 80 cm lengte i.p.v. een stuk pijp van 25 cm met een kraan en 90° bocht hiervoor gemonteerd. De meetwaarden zijn niet verwerkt, de waarden staan hieronder.

Metingen bij 19 graden Celsius: schoon water uit leidingsysteem. Metingen met een langer recht voorstuk, 80cm flexibel slang van 40mm inwendig.

Magnetische debietmeter			Vlotterdebetmeter B: 300-3000 l/h		
Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3
[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]
1012	1006	1006	960	960	950
1520	1520	1516	1460	1470	1470
1990	1986	1986	1900	1900	1900
2624	2624	2626	2500	2500	2490
2984	2980	2984	2880	2870	2880
1516	1510	1516	1480	1480	1480

7. Het 40 mm slang had een sterke ribbelstructuur, niet zuiver glad aan de binnenzijde.

1.4.1 Metingen

Meting bij 20 graden Celsius, gesloten systeem, vlotter A

Magnetische debietmeter				VlotterA 300-3000 l/h					
Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Afwijking	
[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	%
860	864	868	864	800	800	800	800	64	7%
1052	1046	1060	1053	990	990	990	990	63	6%
1574	1576	1544	1565	1500	1500	1480	1493	71	5%
2100	2102	2106	2103	2000	2000	2000	2000	103	5%
2114	2118	2116	2116	2000	2000	2000	2000	116	5%
2640	2646	2646	2644	2500	2500	2500	2500	144	5%
3176	3174	3176	3175	3000	2970	3020	2997	179	6%

Meting bij 20 graden Celsius, vlotter B

Magnetische debietmeter				Vlotter B, 300-3000 l/h					
Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Afwijking	
[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	%
756	764	756	759	700	690	700	697	62	8%
1060	1072	1074	1069	980	1020	1000	1000	69	6%
1546	1546	1546	1546	1500	1500	1500	1500	46	3%
2044	2062	2066	2057	2000	2010	2000	2003	54	3%
2592	2582	2586	2587	2500	2520	2520	2513	73	3%
2776	2782	2784	2781	2710	2730	2700	2713	67	2%
3112	3090	3090	3097	3000	2970	2990	2987	111	4%

Meting bij 20 graden Celsius, vlotter C

Magnetische debietmeter				VlotterC, 1000-10000 l/h					
Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Afwijking	
[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	%
1096	1100	1100	1099	1000	1000	1000	1000	99	9%
2012	2016	2006	2011	2000	2000	2000	2000	11	1%
2986	2990	2966	2981	3000	3000	2980	2993	-13	0%
3906	3900	3892	3899	4000	4000	3980	3993	-94	-2%
4576	4588	4584	4583	4600	4620	4620	4613	-31	-1%

Meting bij 19 graden Celsius, vlotter C, aangesloten op leidingsysteem

Magnetische debietmeter				VlotterC, 1000-10000 l/h					
Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Aflezing 1	Aflezing 2	Aflezing 3	Gemiddelde	Afwijking	
[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	[l/h]	%
1646	1646	1646	1646	1600	1600	1600	1600	46	3%
2626	2616	2616	2619	2580	2580	2580	2580	39	2%
3936	3932	3926	3931	3960	3950	4000	3970	-39	-1%
5016	5006	5000	5007	5000	5000	5000	5000	7	0%
6352	6340	6336	6343	6350	6300	6350	6333	9	0%
7526	7514	7536	7525	7400	7500	7500	7467	59	1%

1.4.2 Gekalibreerde waarden, met behulp van lineaire regressie

Hier geldt dat de afwijkingen worden uitgedrukt t.o.v. de magnetisch inductieve debietmeter.

Meting bij 20 graden Celsius, gesloten systeem, vlotter A

magnetisch inductieve debietmeter	Gemiddelde VlotterA		gekalibreerd met $y=1.0573x$, $R^2=0.9998$		gekalibreerd met $y=1.0541x+6.8275$, $R^2=0.9998$	
gemiddelde	Gemiddelde	afwijking	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/h]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]
864	800	7.4%	846	-2.1%	850	-1.6%
1053	990	6.0%	1047	-0.6%	1050	-0.2%
1565	1493	4.6%	1579	0.9%	1581	1.0%
2103	2000	4.9%	2115	0.6%	2115	0.6%
2116	2000	5.5%	2115	-0.1%	2115	0.0%
2644	2500	5.4%	2643	0.0%	2642	-0.1%
3175	2997	5.6%	3168	-0.2%	3166	-0.3%

Meting bij 20 graden Celsius, vlotter B

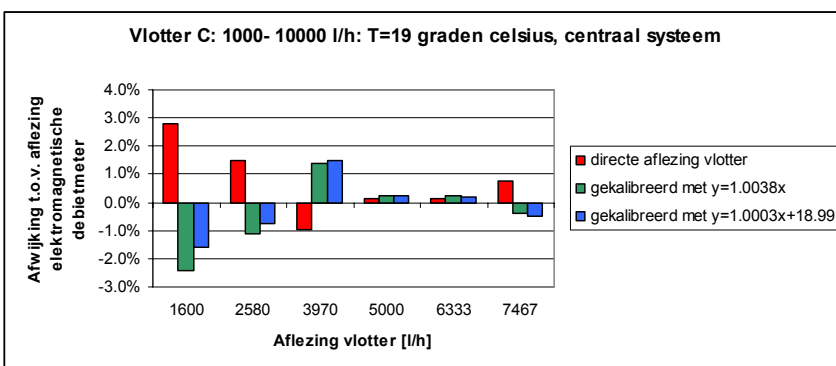
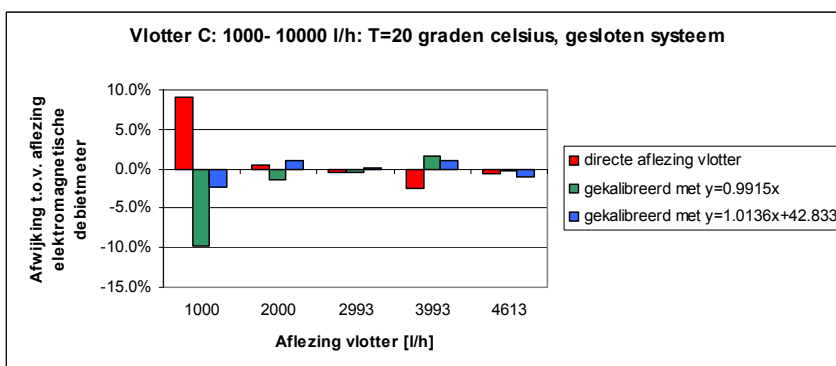
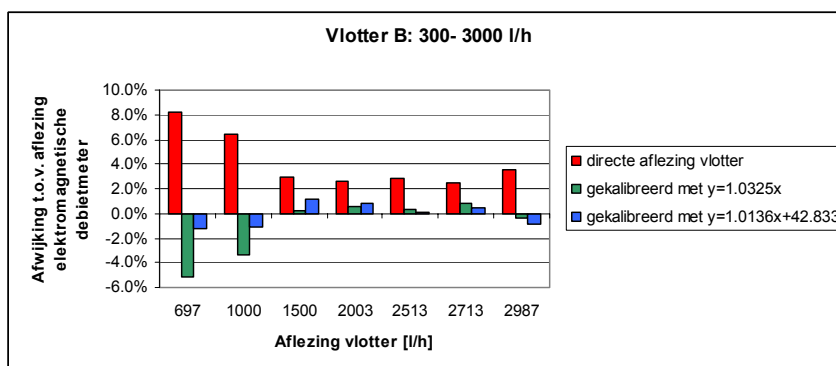
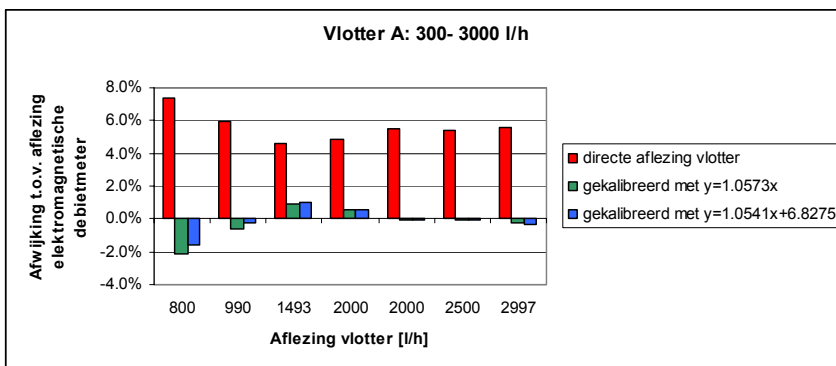
magnetisch inductieve debietmeter	Gemiddelde VlotterB		gekalibreerd met $y=1.0325x$, $R^2=0.9992$		gekalibreerd met $y=1.0136x+42.833$, $R^2=0.9996$	
Gemiddelde	gemiddelde	afwijking	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/h]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]
759	697	8.2%	719	-5.2%	749	-1.3%
1069	1000	6.4%	1033	-3.4%	1056	-1.1%
1546	1500	3.0%	1549	0.2%	1563	1.1%
2057	2003	2.6%	2068	0.5%	2073	0.8%
2587	2513	2.8%	2595	0.3%	2590	0.1%
2781	2713	2.4%	2802	0.7%	2793	0.4%
3097	2987	3.6%	3084	-0.4%	3070	-0.9%

Meting bij 20 graden Celsius, vlotter C

magnetisch inductieve debietmeter	Gemiddelde VlotterC, 20 graden, gesloten systeem		gekalibreerd met $y=0.9915x$, $R^2=0.998$		gekalibreerd met $y=0.9587x+115.19$, $R^2=0.9994$	
Gemiddelde	gemiddelde	afwijking	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/h]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]
1099	1000	9.0%	992	-9.8%	1074	-2.3%
2011	2000	0.6%	1983	-1.4%	2033	1.1%
2981	2993	-0.4%	2968	-0.4%	2985	0.1%
3899	3993	-2.4%	3959	1.5%	3944	1.1%
4583	4613	-0.7%	4574	-0.2%	4538	-1.0%

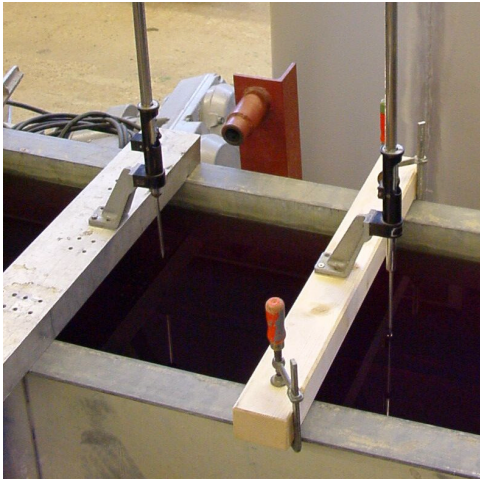
Meting bij 19 graden Celsius, vlotter C

magnetisch inductieve debietmeter	Gemiddelde VlotterC, 19 graden, leidingsysteem		gekalibreerd met $y=1.0038x$, $R^2=0.9997$		gekalibreerd met $y=1.0003x+18.99$, $R^2=0.9997$	
gemiddelde	gemiddelde	afwijking	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/h]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]	[l/h]	[%]
1646	1600	2.8%	1606	-2.4%	1619	-1.6%
2619	2580	1.5%	2590	-1.1%	2600	-0.7%
3931	3970	-1.0%	3985	1.4%	3990	1.5%
5007	5000	0.1%	5019	0.2%	5020	0.3%
6343	6333	0.1%	6357	0.2%	6354	0.2%
7525	7467	0.8%	7495	-0.4%	7488	-0.5%



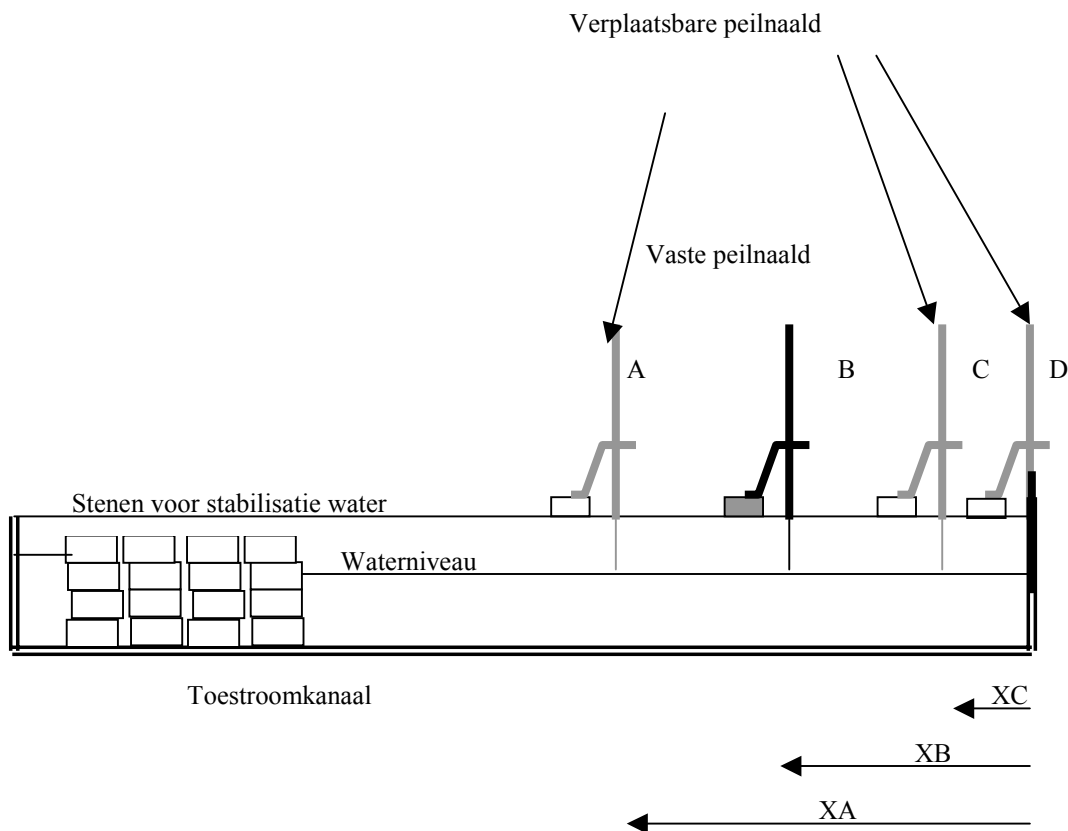
1.5 Nulniveau bepaling V-stuwen

Om de hoogte van de overstortende straal te bepalen, moet het nulniveau voor de vaste peilnaald worden bepaald. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een verplaatsbare peilnaald.



Rechts de vaste peilnaald en links de verplaatsbare peilnaald.

De verplaatsbare peilnaald moet op 3 plaatsen worden gemonteerd, de locatie is hieronder getekend:



Schematisatie van de Vnotch met verschillende locaties voor de verplaatsbare peilnaald: A, C en D. En de locatie van de vaste peilnaald: B.



Meten van de hoogte van de V-notch hals.



Oefen een beetje druk uit op 1 zijde van de aluminium balk.

Bepaling van het nulniveau

- 1) Zet het water beneden de V-notch
- 2) Meet de hoogtes met de verplaatsbare peilnaald en de vaste peilnaald.
- 3) Met de gemeten hoogtes bij A en C kan het waterniveau bij D worden berekend. ($H_{d,berekend}$).
- 4) Met $H_{d,berekend}$ en de gemeten waarde t.p.v. D kan het verschil in waterniveau tussen de rand en het water worden berekend. (dh)
- 5) $H_0 = H_{b,gemeten} + dh$

V-stuw van 28.4 °

datum	Aflezings mobiele peilnaald A [cm]	Aflezings vaste peilnaald b [cm]	Aflezings mobiele peilnaald C [cm]	Aflezings mobiele peilnaald D [cm]	X a [cm]	X b [cm]	X c [cm]	nulniveau [cm]
06-Jun-02	27.780	81.940	27.820	29.830	85	50	15	83.94
12-Jun-02	26.820	80.890	26.810	29.820	85	50	15	83.90
21-Jun-02	26.640	80.770	26.680	29.810	85	50	15	83.89
01-Jul-02	29.140	83.290	29.200	29.820	85	50	15	83.90

V-stuw van 53.8 °

datum	Aflezings mobiele peilnaald A [cm]	Aflezings vaste peilnaald b [cm]	Aflezings mobiele peilnaald C [cm]	Aflezings mobiele peilnaald D [cm]	X a [cm]	X b [cm]	X c [cm]	nulniveau [cm]
06-Jun-02	32.85	47.69	32.64	34.33	85	50	15	49.43
12-Jun-02	30.03	44.87	29.82	34.32	85	50	15	49.42
21-Jun-02	31.90	46.71	31.70	34.33	85	50	15	49.38
01-Jul-02	33.49	48.44	33.38	34.33	85	50	15	49.41

Op basis van deze resultaten is als nulniveau voor V28. 83.90cm gekozen en voor V53 49.41cm.

1.6 Vergelijking Vlotters en V-stuwen met massaexperimenten



Lichte aankleving van de overstortende straal

Om uitsluitsel te geven over de betrouwbaarheid van de apparatuur zijn enkele massaexperimenten gedaan. Dit is gedaan door een plastic vat met een inhoud van 60 l gedurende +/- 1 minuut te vullen met waterafkomstig van de straat respectievelijk de V-stuwen. Vervolgens is met een elektronische weegschaal, met een bereik van 0 tot 30.000 gram, afkomstig uit de analysekamer van het vloeistoflaboratorium de massa van de vloeistof bepaald. In het geval van grote volumes zijn eerst enkele emmers met water gewogen. Vanzelfsprekend is hier de massa van emmer en vat vanaf gehaald.

Meetwaarden

Nulaflizing peilnaald [cm]			83.90		Experimenten van 20/06/2002 tot 21/06/2002				
hoek [°]	28.4	C _e	0.588	kh [m]	0.0023	Temperatuur [°C]		23	
Massa			Vlotter A			V-notch			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Massa	Tijd	Debiet	Debiet	Debiet	gekalibreerd debiet	aflezing peilnaald	h	he	Q
[kg]	[s]	[l/s]	[l/h]	[l/s]	[l/s]	[cm]	[cm]	[m]	[l/s]
24.535	64.85	0.378	1320	0.367	0.388	89.92	6.02	0.0625	0.343
35.626	66.65	0.535	1830	0.508	0.538	90.64	6.74	0.0697	0.451
46.515	75.23	0.618	2120	0.589	0.623	91.25	7.35	0.0758	0.556
49.481	68.05	0.727	2450	0.681	0.719	91.84	7.94	0.0817	0.671
48.819	60.35	0.809	2770	0.769	0.813	92.28	8.38	0.0861	0.765
			1510	0.419	0.444	90.26	6.36	0.0659	0.392
			1800	0.500	0.529	90.71	6.81	0.0704	0.462
			1970	0.547	0.579	91.02	7.12	0.0735	0.515
			2200	0.611	0.646	91.37	7.47	0.0770	0.578
			2440	0.678	0.716	91.73	7.83	0.0806	0.648
			2780	0.772	0.816	92.22	8.32	0.0855	0.751

Nulaflizing peilnaald [cm]			83.90		Experimenten van 20/06/2002 tot 21/06/2002				
hoek [°]	28.4	C _e	0.588	kh [m]	0.0023	Temperatuur [C]		23	
Massa			Vlotter B			V-notch			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Massa	Tijd	Debiet	Debiet	Debiet	gekalibreerd debiet	aflezing peilnaald	h	he	Q
[kg]	[s]	[l/s]	[l/h]	[l/s]	[l/s]	[cm]	[cm]	[m]	[l/s]
35.024	81.28	0.431	1510	0.419	0.437	90.26	6.36	0.0659	0.392
40.640	79.72	0.510	1700	0.472	0.491	90.66	6.76	0.0699	0.454
39.973	72.63	0.550	1940	0.539	0.558	90.96	7.06	0.0729	0.504
41.797	63.34	0.660	2320	0.644	0.665	91.55	7.65	0.0788	0.613
50.311	63.00	0.799	2760	0.767	0.789	92.19	8.29	0.0852	0.745
49.949	62.34	0.801	2820	0.783	0.806	92.27	8.37	0.0860	0.762
			1510	0.419	0.437	90.26	6.36	0.0659	0.392
			1800	0.500	0.519	90.71	6.81	0.0704	0.462
			1970	0.547	0.567	91.02	7.12	0.0735	0.515
			2200	0.611	0.631	91.37	7.47	0.0770	0.578
			2440	0.678	0.699	91.73	7.83	0.0806	0.648
			2780	0.772	0.795	92.22	8.32	0.0855	0.751

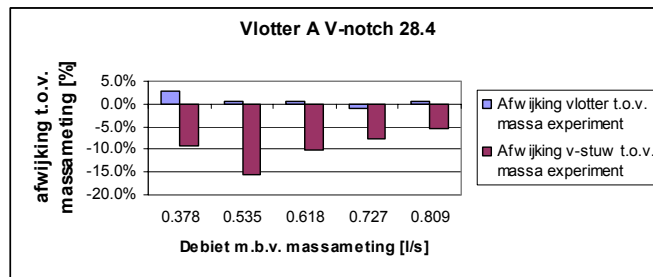
Nulaflizing peilnaald [cm]			83.90		Experimenten van 20/06/2002 tot 21/06/2002				
hoek [°]	28.4	C _e	0.588	kh [m]	0.0023	Temperatuur [C]		23	
Massa			Vlotter C			V-notch			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Massa	Tijd	Debiet	Debiet	Debiet	gekalibreerd debiet	aflezing peilnaald	h	he	Q
[kg]	[s]	[l/s]	[l/h]	[l/s]	[l/s]	[cm]	[cm]	[m]	[l/s]
39.653	70.81	0.560	2050	0.569	0.575	91.03	7.13	0.0736	0.517
53.575	66.97	0.800	2950	0.819	0.825	92.20	8.30	0.0853	0.747
55.561	62.50	0.889	3250	0.903	0.908	92.60	8.70	0.0893	0.838
48.850	42.00	1.163	4350	1.208	1.214	93.65	9.75	0.0998	1.106

			2800	0.778	0.783	91.98	8.08	0.0831	0.700
			4050	1.125	1.131	93.40	9.50	0.0973	1.038
			5150	1.431	1.436	94.46	10.56	0.1079	1.344

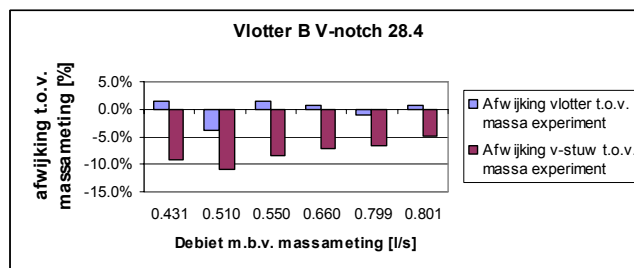
Nulaflezing peilnaald [cm]			49.41 Experimenten van 20/06/2002 tot 21/06/2002						
hoek[°]	53.4	Ce	0.578	kh [m]	0.0013	Temperatuur [C]		23	
Massa			Vlotter C			V-notch			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Massa	Tijd	Debiet	Debiet	Debiet	gekalibreerd debiet	aflezing peilnaald	h	he	Q
[kg]	[s]	[l/s]	[l/h]	[l/s]	[l/s]	[cm]	[cm]	[m]	[l/s]
39.212	57.72	0.679	2450	0.681	0.685	55.450	6.040	0.0617	0.655
40.791	39.47	1.033	3900	1.083	1.086	56.580	7.170	0.0730	0.997
46.740	27.69	1.688	6100	1.694	1.693	58.010	8.600	0.0873	1.560
			2500	0.694	0.699	55.460	6.050	0.0618	0.658
			4050	1.125	1.127	56.730	7.320	0.0745	1.049
			6050	1.681	1.679	58.100	8.690	0.0882	1.600
			7600	2.111	2.107	58.940	9.530	0.0966	2.009
			8900	2.472	2.466	59.620	10.210	0.1034	2.382

Afwijkingen

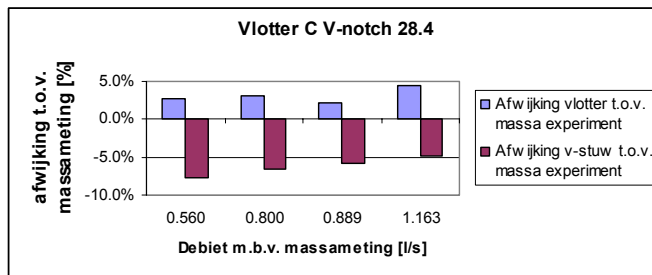
Vlotter A		
Massa	vlotter/massa	vnotch/massa
(3)	(11)	(12)
Debiet	$((6)-(3))/(3)$	$((10)-(3))/(3)$
[l/s]		
0.378	2.7%	-9.3%
0.535	0.6%	-15.7%
0.618	0.7%	-10.1%
0.727	-1.1%	-7.8%
0.809	0.5%	-5.5%



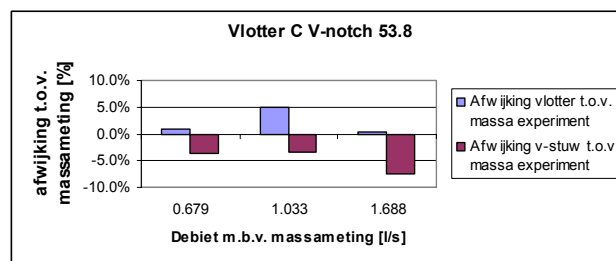
Vlotter B V-notch 28.4		
Massa	vlotter/massa	vnotch/massa
(3)	(11)	(12)
Debiet	$((6)-(3))/(3)$	$((10)-(3))/(3)$
[l/s]		
0.431	1.4%	-9.1%
0.510	-3.8%	-10.9%
0.550	1.4%	-8.4%
0.660	0.8%	-7.2%
0.799	-1.2%	-6.7%
0.801	0.6%	-4.9%



Vlotter C V-notch 28.4		
Massa	vlotter/massa	vnotch/massa
(3)	(11)	(12)
Debiet	$((6)-(3))/(3)$	$((10)-(3))/(3)$
[l/s]		
0.560	2.7%	-7.8%
0.800	3.1%	-6.6%
0.889	2.2%	-5.8%
1.163	4.4%	-4.9%



Vlotter C V-notch 53.8		
Massa	vlotter/massa	vnotch/massa
(3)	(11)	(12)
Debiet	$((6)-(3))/(3)$	$((10)-(3))/(3)$
[l/s]		
0.679	0.8%	-3.6%
1.033	5.0%	-3.5%
1.688	0.3%	-7.6%

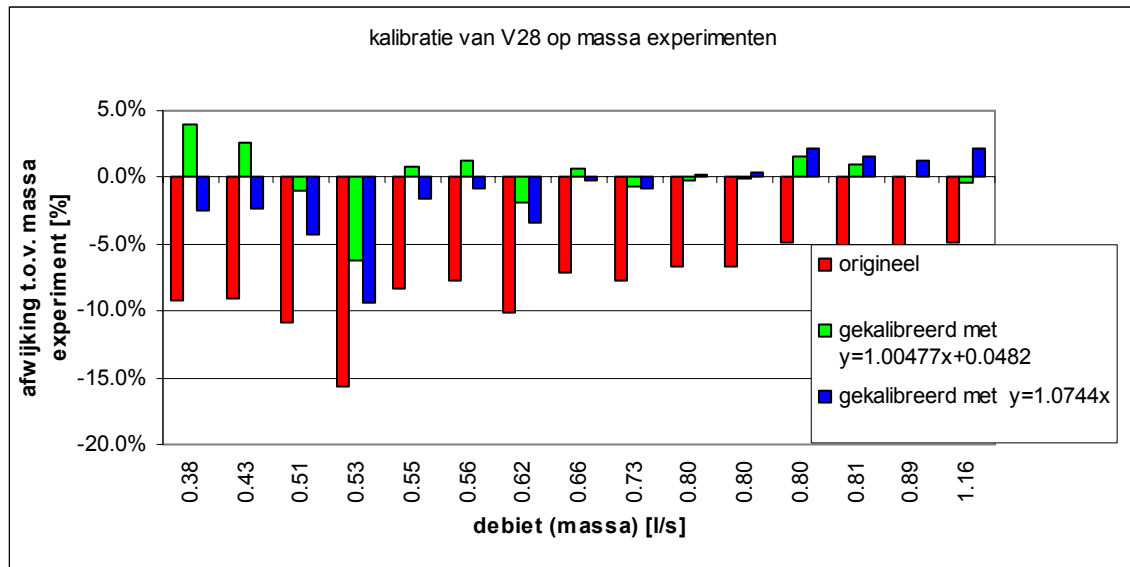


Op het eerste gezicht lijkt het zo dat vlotter A en B redelijk gekalibreerd zijn, vlotter C daarentegen lijkt nog steeds een systematische afwijking op te leveren. Om goed de resultaten te kunnen vergelijken zijn de massaexperimenten gesorteerd en zijn de verschillende debietmeters gekalibreerd.

Kalibratie V28 met massaexperimenten

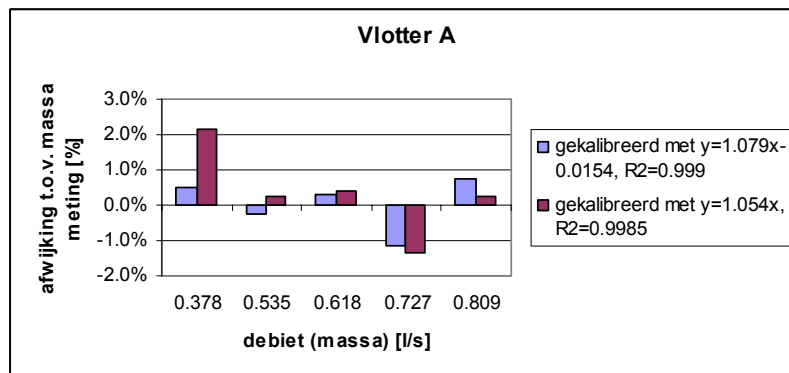
Massa versus V28						
(3)	(10)	(11)	(12a)	(12b)	(13a)	(13b)
Debiet Massa [l/s]	QVnotch [l/s]	$=((10)-(3))/(3)$	gekalibreerd met $y=1.00477x+0.0482$	gekalibreerd met $y=1.0744x$	$=((12a)-(3))/(3)$	$=((12b)-(3))/(3)$
0.378	0.343	-9.3%	0.393	0.369	3.9%	-2.5%
0.431	0.392	-9.1%	0.442	0.421	2.6%	-2.3%
0.510	0.454	-10.9%	0.504	0.488	-1.1%	-4.3%
0.535	0.451	-15.7%	0.501	0.484	-6.2%	-9.4%
0.550	0.504	-8.4%	0.555	0.542	0.8%	-1.5%
0.560	0.517	-7.8%	0.567	0.555	1.3%	-0.9%
0.618	0.556	-10.1%	0.607	0.597	-1.9%	-3.4%
0.660	0.613	-7.2%	0.664	0.658	0.6%	-0.2%
0.727	0.671	-7.8%	0.722	0.721	-0.7%	-0.9%
0.799	0.745	-6.7%	0.797	0.800	-0.3%	0.2%
0.800	0.747	-6.6%	0.799	0.803	-0.2%	0.3%
0.801	0.762	-4.9%	0.814	0.819	1.6%	2.2%
0.809	0.765	-5.5%	0.816	0.821	0.9%	1.5%

0.889	0.838	-5.8%	0.890	0.900	0.1%	1.2%
1.163	1.106	-4.9%	1.159	1.188	-0.3%	2.2%



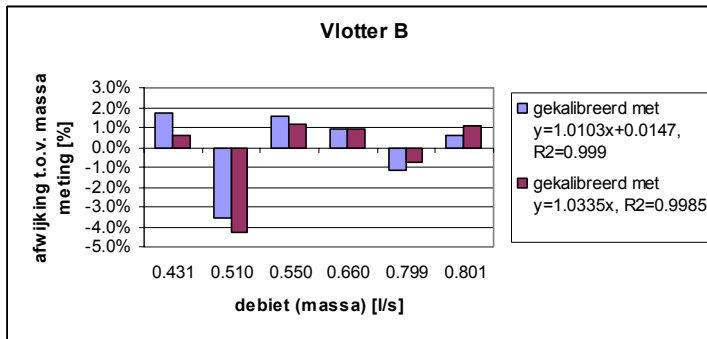
Kalibratie Vlotter A met massaexperimenten

Mass	Vlotter	gekalibreerd met $y=1.079x-0.0154$, $R^2=0.999$		gekalibreerd met $y=1.054x$, $R^2=0.9985$	
(3)	(5)				
Discharge	Discharge	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.378	0.367	0.380	0.5%	0.386	2.2%
0.535	0.508	0.533	-0.3%	0.536	0.2%
0.618	0.589	0.620	0.3%	0.621	0.4%
0.727	0.681	0.719	-1.1%	0.717	-1.4%
0.809	0.769	0.815	0.7%	0.811	0.3%



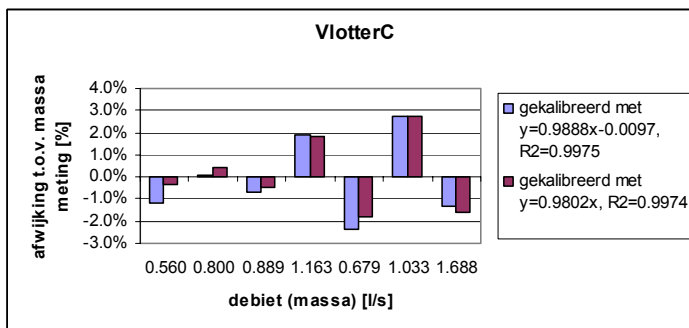
Kalibratie Vlotter B met massaexperimenten

Mass	Vlotter	gekalibreerd met $y=1.0103x+0.0147$, $R^2=0.999$		gekalibreerd met $y=1.0335x$, $R^2=0.9985$	
(3)	(5)				
debiet	debiet	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.431	0.419	0.377	-12.6%	0.433	0.6%
0.510	0.472	0.430	-15.6%	0.488	-4.3%
0.550	0.539	0.497	-9.6%	0.557	1.2%
0.660	0.644	0.604	-8.5%	0.666	0.9%
0.799	0.767	0.728	-8.9%	0.792	-0.8%
0.801	0.783	0.744	-7.1%	0.810	1.0%



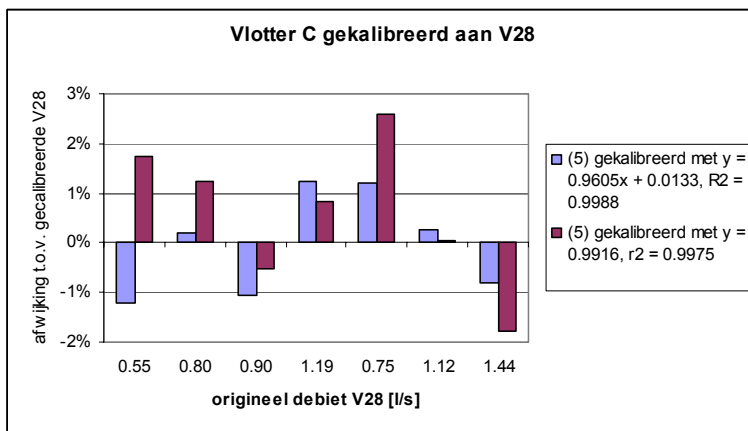
Kalibratie vlotter C met massa

Mass	Vlotter	gekalibreerd met $y=0.9888x-0.0097$, $R^2=0.9975$		gekalibreerd met $y=0.9802x$, $R^2=0.9974$	
(3)	(5)				
debiet	debiet	waarde	afwijking	waarde	afwijking
[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.560	0.569	0.553	-1.2%	0.558	-0.3%
0.800	0.819	0.801	0.1%	0.803	0.4%
0.889	0.903	0.883	-0.7%	0.885	-0.5%
1.163	1.208	1.185	1.9%	1.184	1.8%
0.679	0.681	0.663	-2.4%	0.667	-1.8%
1.033	1.083	1.062	2.7%	1.062	2.7%
1.688	1.694	1.666	-1.3%	1.661	-1.6%



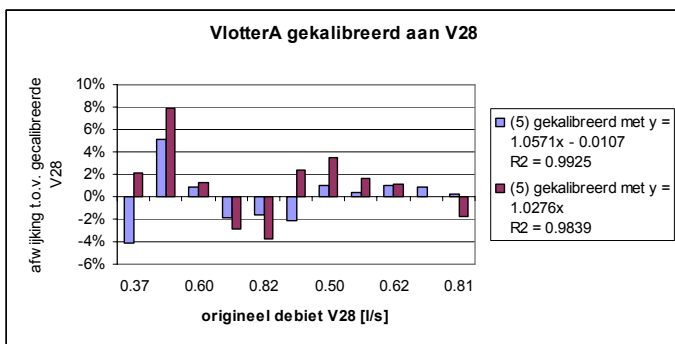
Kalibratie van C met V28

(10)	(5)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Debiet V28	Debiet Vlotter C	$=((5)-(10))/(10)$	(10) gekalibreerd met $y=1.00477x + 0.0482$, $R^2=0.997$	(10) gekalibreerd met $y=1.0744x$, $R^2=0.991$	(5) gekalibreerd met $y = 0.9605x + 0.0133$, $R^2 = 0.9988$	$=((14)-(12))/(12)$	(5) gekalibreerd met $y = 0.9916$, $r^2 = 0.9975$	$=((16)-(13))/(13)$
[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.517	0.569	10%	0.567	0.555	0.560	-1%	0.565	2%
0.747	0.819	10%	0.799	0.803	0.800	0%	0.813	1%
0.838	0.903	8%	0.890	0.900	0.880	-1%	0.895	-1%
1.106	1.208	9%	1.159	1.188	1.174	1%	1.198	1%
0.700	0.778	11%	0.751	0.752	0.760	1%	0.771	3%
1.038	1.125	8%	1.091	1.115	1.094	0%	1.116	0%
1.344	1.431	6%	1.399	1.444	1.387	-1%	1.419	-2%



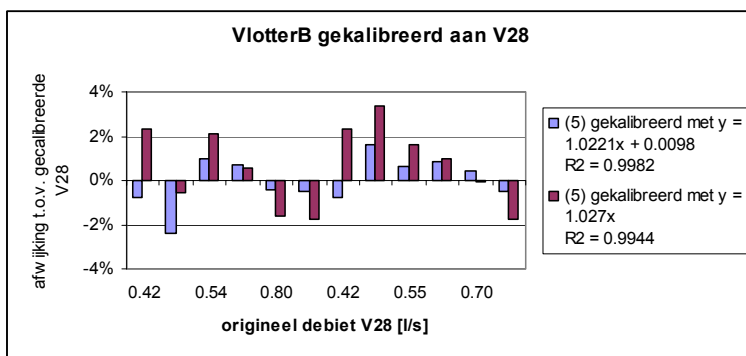
Kalibratie van A met V28

(10)	(5)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Q Vnotch	Debiet Vlotter	$=((5)-(10))/(10)$	(10) gekalibreerd met $y=1.00477x + 0.0482$, $R^2=0.997$	(10) gekalibreerd met $y=1.0744x$, $R^2=0.991$	(5) gekalibreerd met $y = 1.0571x - 0.0107$, $R^2 = 0.9925$	$=((14)-(12))/(12)$	(5) gekalibreerd met $y = 1.0276x$, $R^2 = 0.9839$	$=((16)-(13))/(13)$
[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.343	0.367	7%	0.393	0.369	0.377	-4%	0.377	2%
0.451	0.508	13%	0.501	0.484	0.527	5%	0.522	8%
0.556	0.589	6%	0.607	0.597	0.612	1%	0.605	1%
0.671	0.681	1%	0.722	0.721	0.709	-2%	0.699	-3%
0.765	0.769	1%	0.816	0.821	0.803	-2%	0.791	-4%
0.392	0.419	7%	0.442	0.421	0.433	-2%	0.431	2%
0.462	0.500	8%	0.513	0.497	0.518	1%	0.514	3%
0.515	0.547	6%	0.565	0.553	0.568	0%	0.562	2%
0.578	0.611	6%	0.629	0.621	0.635	1%	0.628	1%
0.648	0.678	5%	0.700	0.696	0.706	1%	0.696	0%
0.751	0.772	3%	0.803	0.807	0.806	0%	0.794	-2%



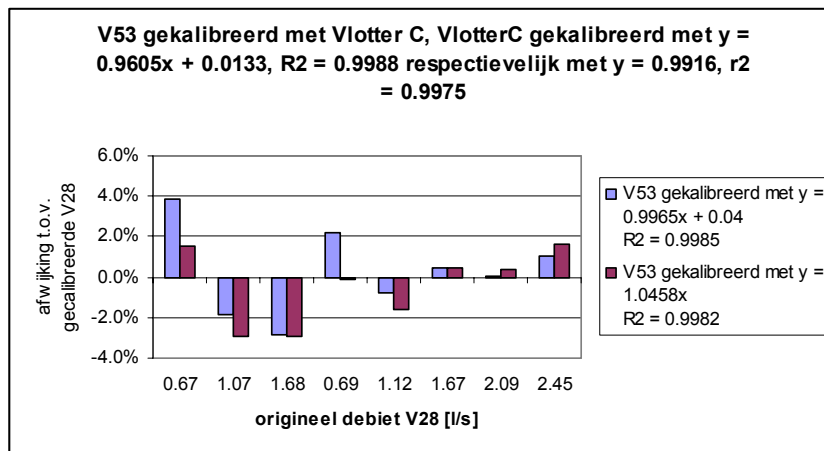
Kalibratie van B met V28

(10)	(5)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Q	Debiet	$=((5)-(10))/(10)$	(10) gekalibreerd met $y=1.00477x + 0.0482$, R2=0.997	(10) gekalibreerd met $y=1.0744x$, R2=0.991	(5) gekalibreerd met $y = 1.0221x + 0.0098$ R2 = 0.9982	$=((14)-(12))/(12)$	(5) gekalibreerd met $y = 1.027x$ R2 = 0.9944	$=((16)-(13))/(13)$
[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.392	0.419	7%	0.442	0.421	0.439	-1%	0.431	2%
0.454	0.472	4%	0.504	0.488	0.492	-2%	0.485	-1%
0.504	0.539	7%	0.555	0.542	0.561	1%	0.553	2%
0.613	0.644	5%	0.664	0.658	0.668	1%	0.662	1%
0.745	0.767	3%	0.797	0.800	0.793	0%	0.787	-2%
0.762	0.783	3%	0.814	0.819	0.810	0%	0.804	-2%
0.392	0.419	7%	0.442	0.421	0.439	-1%	0.431	2%
0.462	0.500	8%	0.513	0.497	0.521	2%	0.514	3%
0.515	0.547	6%	0.565	0.553	0.569	1%	0.562	2%
0.578	0.611	6%	0.629	0.621	0.634	1%	0.628	1%
0.648	0.678	5%	0.700	0.696	0.703	0%	0.696	0%
0.751	0.772	3%	0.803	0.807	0.799	-1%	0.793	-2%



Kalibratie van v53 met Vc

(5)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
debiet vlotter C	Qvnotch 53	$=((5)-(10))/(10)$	(5) gekalibreerd met $y = 0.9605x$ + 0.0133, $R^2 = 0.9988$	(5) gekalibreerd met $y = 0.9916$, $r^2 = 0.9975$	V53 gekalibreerd met $y = 0.9965x + 0.04$ $R^2 = 0.9985$	$=((14)-(12))/(12)$	V53 gekalibreerd met $y = 1.0458x$ $R^2 = 0.9982$	$=((16)-(13))/(13)$
[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[%]
0.681	0.655	4%	0.667	0.675	0.693	3.9%	0.685	1.5%
1.083	0.997	9%	1.054	1.074	1.034	-1.9%	1.043	-2.9%
1.694	1.560	9%	1.641	1.680	1.594	-2.8%	1.631	-2.9%
0.694	0.658	6%	0.680	0.689	0.695	2.2%	0.688	-0.1%
1.125	1.049	7%	1.094	1.116	1.086	-0.7%	1.098	-1.6%
1.681	1.600	5%	1.627	1.666	1.635	0.5%	1.674	0.4%
2.111	2.009	5%	2.041	2.093	2.042	0.1%	2.101	0.4%
2.472	2.382	4%	2.388	2.451	2.413	1.1%	2.491	1.6%



1.6.1 Uitgevoerde metingen na polijsten van Vstuwen

Op woensdag 26 juni, zijn de V-stuwjes opgepoetst met polijstpapier: schuurpapier met ruwheid 1000. De dag hierop zijn nog enkele metingen gedaan om de verandering te evalueren. Wanneer 6 met 10 wordt vergeleken voor vlotter B en V28 dan levert dit $y = 0.9269x$ met $R^2 = 0.995$ op. Terwijl dit eerder $y = 0.9255x$ met $R^2 = 0.9919$ was.

Wanneer 6 met 10 wordt vergeleken voor vlotter C en V53 dan levert dit $y = 0.9423x$ met $R^2 = 0.9978$ op. Terwijl dit eerder $y = 0.9488x$ met $R^2 = 0.998$ was. Dit zijn kleine verschillen.

Vlotter B			V-notch			
(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
debiet	debiet	gekalibreerd debiet	niveau peilnaald	h	he	Q
[l/h]	[l/s]	[l/s]	[cm]	[cm]	[m]	[l/s]
1970	0.547	0.567	91.05	7.15	0.0738	0.520
2440	0.678	0.699	91.75	7.85	0.0808	0.652
2900	0.806	0.828	92.36	8.46	0.0869	0.782
1620	0.450	0.468	90.43	6.53	0.0676	0.418
1120	0.311	0.327	89.50	5.60	0.0583	0.288

Vlotter C			V-notch			
(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
debiet	debiet	gekalibreerd debiet	niveau peilnaald	h	he	Q
[l/h]	[l/s]	[l/s]	[cm]	[cm]	[m]	[l/s]
2800	0.778	0.782	55.75	6.37	0.0650	0.740
3600	1.000	1.003	56.40	7.02	0.0715	0.939
4200	1.167	1.168	56.82	7.44	0.0757	1.083
4750	1.319	1.320	57.27	7.89	0.0802	1.251
5150	1.431	1.431	57.54	8.16	0.0829	1.359

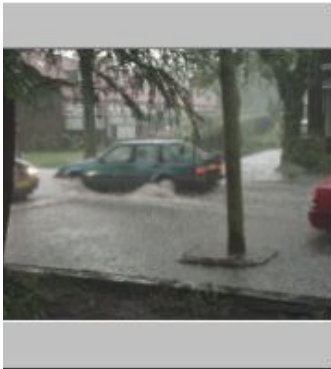
1.7 Toe te passen formules voor debietkalibratie

	Elektromagnetisch	Massa
Vlotter A, na aflezing	$y=1.0573x$	$y=1.054x$, $y=1.079x-0.0154$ $y = 1.0276x$, $y = 1.0571x - 0.0107$, (via gekalibreerde V28)
Vlotter B, na aflezing	$y=1.0325x$	$y=1.0335x$, $y=1.0103x+0.0147$ $y = 1.027x$, $y = 1.0221x + 0.0098$ (via gekalibreerde V28)
Vlotter C, na aflezing	$y=0.9915x$ $y=1.0038x$	$y=0.9802x$, $y=0.988x-0.0097$ $y=0.9916x$, $y=0.9605x+0.0133$
V28, na gebruik ISO formule		$y=1.0744x$, $y=1.00477x+0.0482$
V53, na gebruik ISO formule		$y=1.0458x$, $y=0.9965x+0.04$ (via gekalibreerde Vlotter C) $y=1.0652x$, $y = 1.1195x - 0.0652$ (op basis van 3 massameetwaarden)

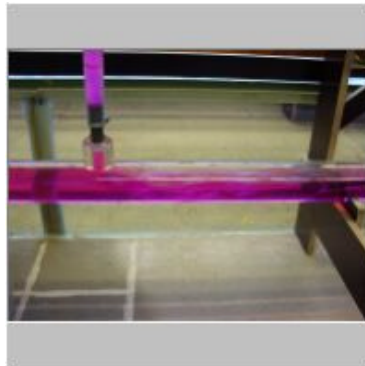
Dit betekent dat volgens de elektromagnetische debietmeter en de massaexperimenten het debiet van vlotter A +/- 5 % te laag is, van vlotter B +/- 3 % te laag is, vlotter C +/- 1% te hoog is, van V28 +/- 7% te laag is, van V53 +/- 5% te laag is. De vetgedrukte vergelijkingen worden toegepast.

Bijlage 4: Overzicht foto's en filmpjes

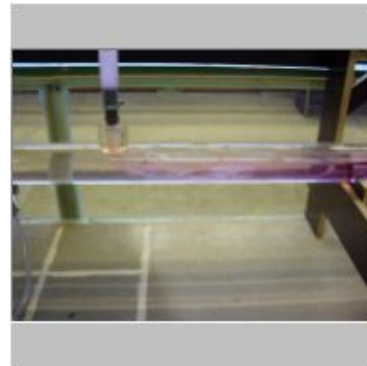
In deze bijlage staan thumbnails van de foto's die gemaakt zijn.



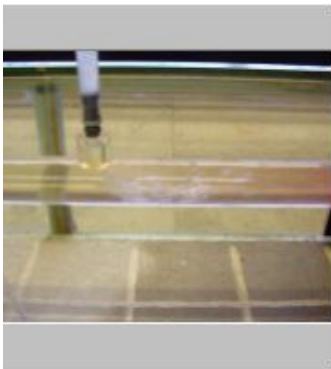
[050701 Regenbui 04.jpg](#)
335.38 KB



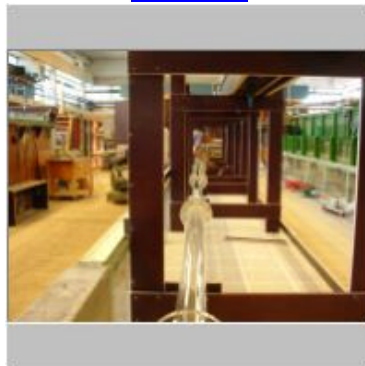
[air inflow in sewer conduit with huge air pocket good quality.jpg](#)
280.58 KB



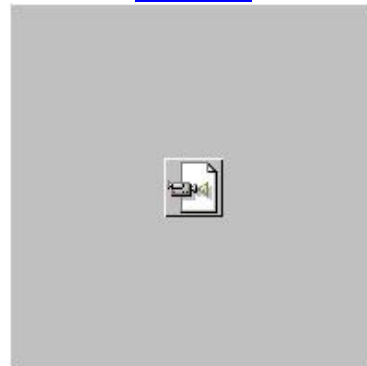
[air inflow in sewer conduit with huge air pocket.jpg](#)
249.43 KB



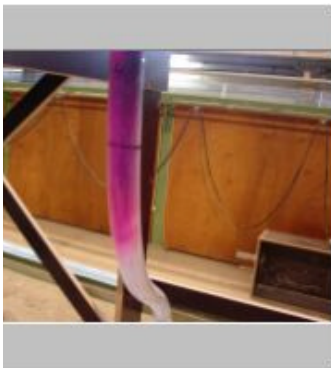
[air inflow in sewer conduit.jpg](#)
238.81 KB



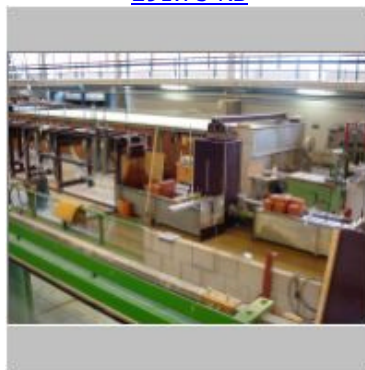
[assemblage of sewer conduit front view.jpg](#)
291.75 KB



[bouncing pressure heads in sewer.mpg](#)
761.72 KB



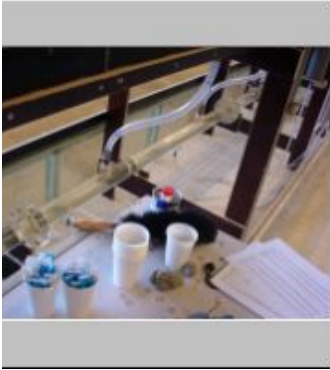
[clocking of tracer time.jpg](#)
276.56 KB



[complete view of downstream part.jpg](#)
374.87 KB



[conduit connection outlet basin.jpg](#)
258.29 KB



[conduit with pressure points
gullypot connections.jpg](#)
275.93 KB



[connection of sewer to flume with
vnotch.jpg](#)
252.67 KB



[construction front view
downstream part.jpg](#)
363.09 KB



[nstruction of flume side view
midsection with Jaap.jpg](#)
286.06 KB



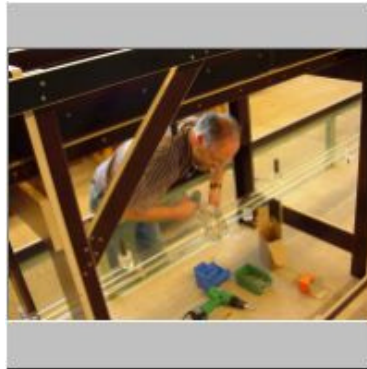
[construction of flume side view
upstream part.jpg](#)
286.93 KB



[Construction of flume with Jaap
complete view 2.jpg](#)
421.77 KB



[nstruction of flume with Jaap
complete view.jpg](#)
358.48 KB



[Construction of sewer conduit
with jaap detailed view.jpg](#)
280.34 KB



[defining level of weir enlarged
2.jpg](#)
273.26 KB



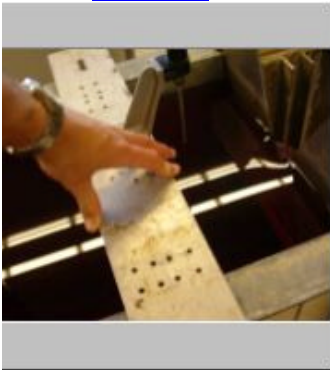
[ning level of weir enlarged.jpg](#)
231.25 KB



[defining level of weir.jpg](#)
290.33 KB



[defining waterlevel on of street.jpg](#)
274.08 KB



[defining zero level vnotch pushing on measurement device.jpg](#)
215.59 KB



[defining zero level vnotch.jpg](#)
289.84 KB



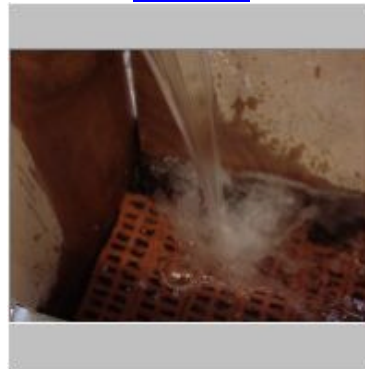
[detailed view of conduit with gullypot connection and pressure point.jpg](#)
203.60 KB



[dispersed tracer.jpg](#)
502.62 KB



[downstream street overflow of water 2.jpg](#)
302.17 KB



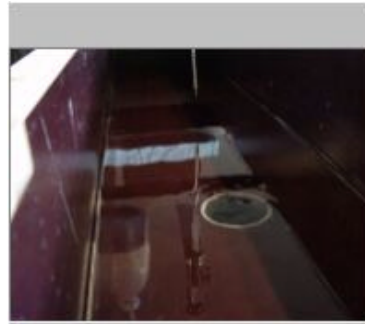
[downstream street overflow of water free overflow 2.jpg](#)
295.31 KB



[downstream street overflow of water free overflow.jpg](#)
290.48 KB



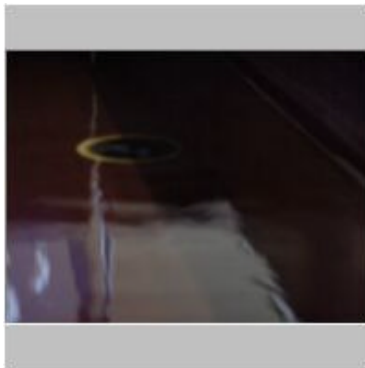
[downstream street overflow of water.jpg](#)
301.27 KB



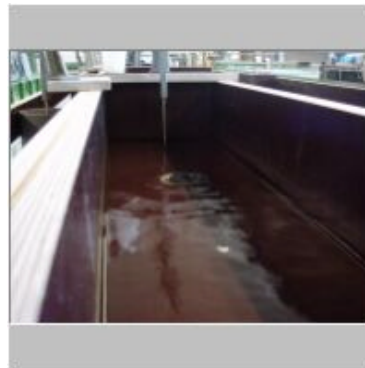
[filled gulypot with little inflow.jpg](#)
278.86 KB



[front view of complete equipment.jpg](#)
288.90 KB



[gulypot bad quality.jpg](#)
472.37 KB



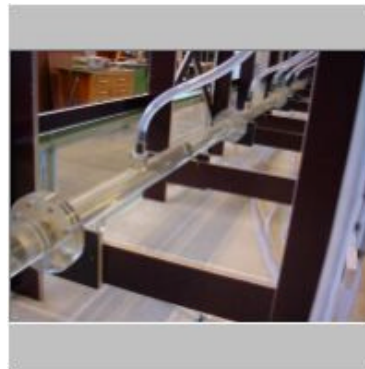
[gulypot bad quality2.jpg](#)
491.37 KB



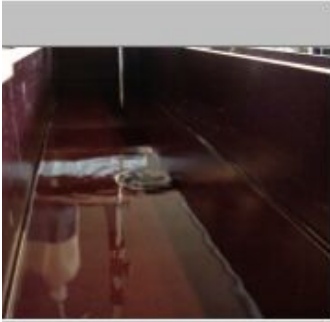
[gulypot connections and outlet basin 2.jpg](#)
272.63 KB



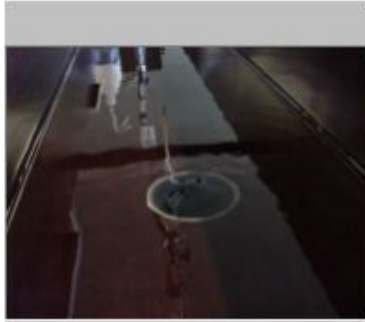
[gulypot connections and outlet basin.jpg](#)
269.95 KB



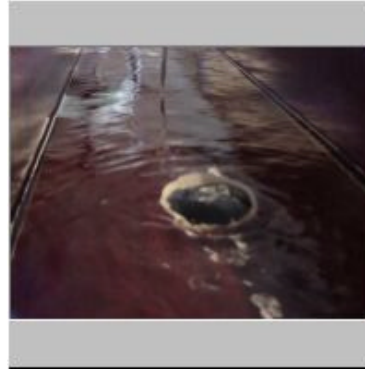
[gulypot connections sewer.jpg](#)
243.50 KB



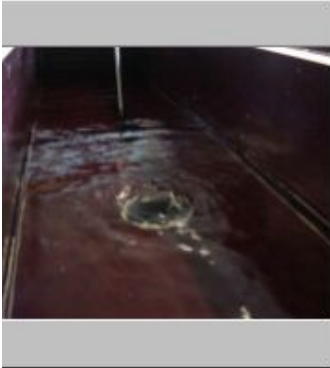
[gullypot with little outflow.jpg](#)
292.96 KB



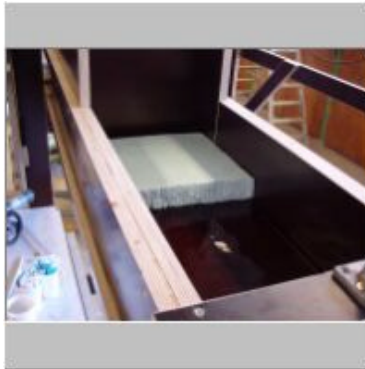
[gullypot with little outflow2.jpg](#)
282.63 KB



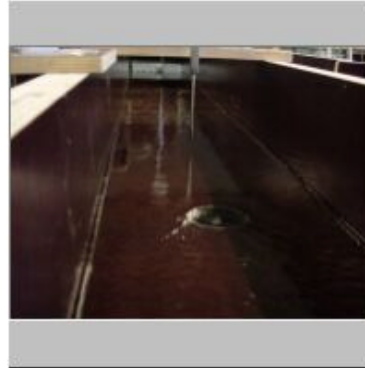
[gullypot with significant outflow
of water waves on street.jpg](#)
299.34 KB



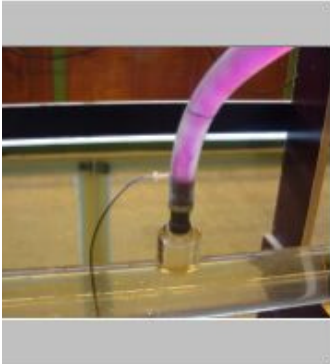
[gullypot with significant outflow
of water.jpg](#)
286.99 KB



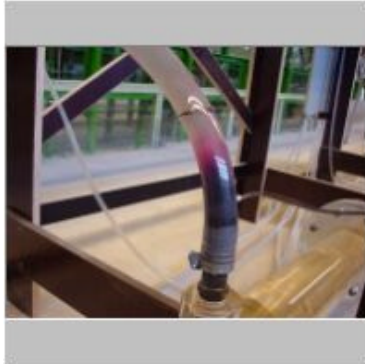
[inflow conditioning.jpg](#)
263.61 KB



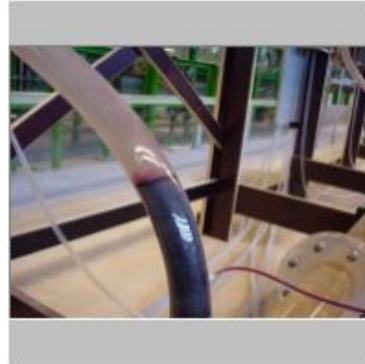
[inflow to gullypot significant
waves.jpg](#)
287.62 KB



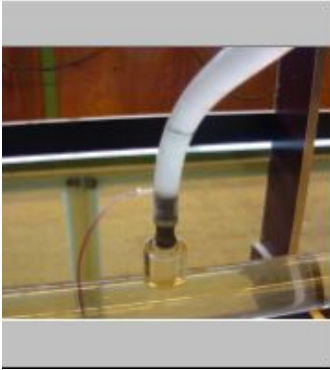
[injection of tracer .jpg](#)
382.23 KB



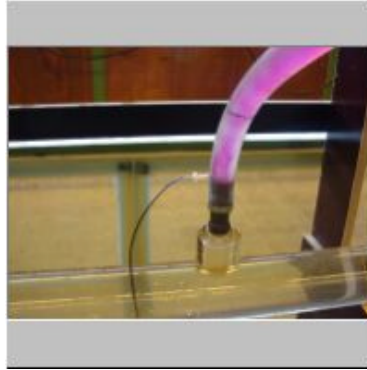
[injection of tracer 2 .jpg](#)
491.48 KB



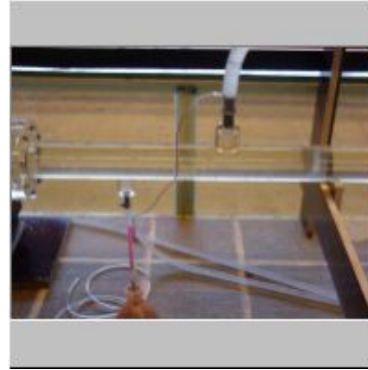
[injection of tracer 3.jpg](#)
454.62 KB



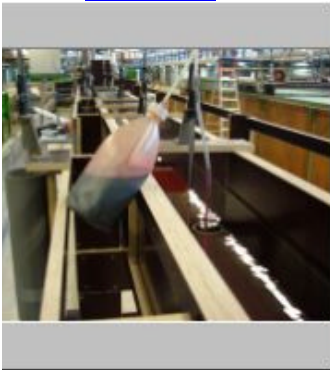
[injection of tracer for outflow conditions detail 2.jpg](#)
1000.68 KB



[injection of tracer for outflow conditions detail.jpg](#)
1000.47 KB



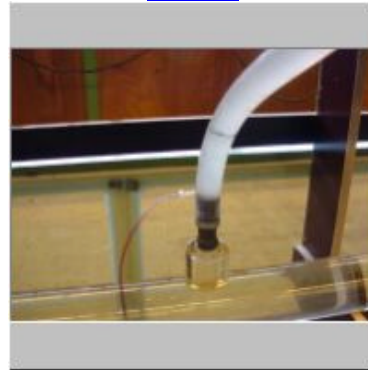
[injection of tracer for outflow conditions.jpg](#)
1.04 MB



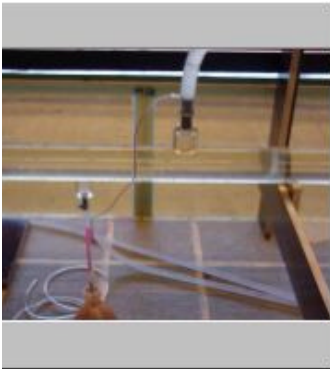
[injection of tracer for time clocking.jpg](#)
304.96 KB



[injection of tracer halfway.jpg](#)
488.39 KB



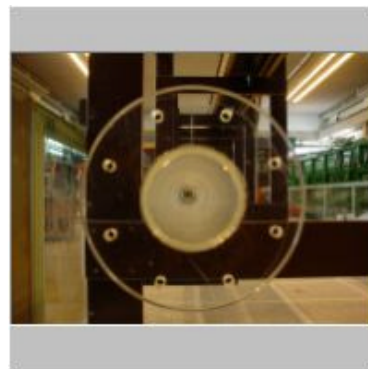
[injection of tracer measurement setup detailed.jpg](#)
384.38 KB



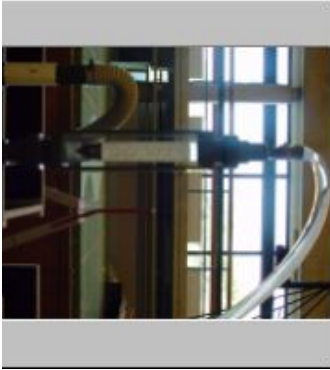
[ection of tracer measurement setup.jpg](#)
427.75 KB



[installation of vnotch with good view on vnotch.jpg](#)
303.94 KB



[interior of sewer conduit.jpg](#)
242.84 KB



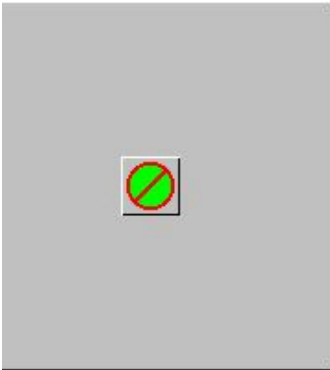
[kleine vlotter 150 l h .jpg](#)
396.60 KB



[kleine vlotter 150 l h 2.jpg](#)
309.51 KB



[operating devices.jpg](#)
291.75 KB



[overlast2.jpg](#)
0.00 KB



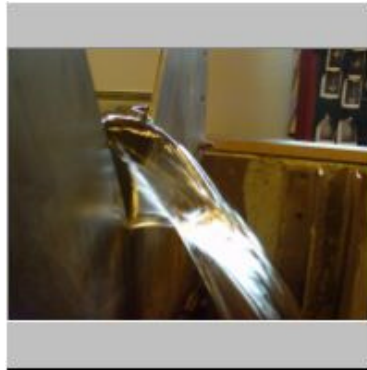
[overstortende straal vstuw 53 graden.jpg](#)
490.00 KB



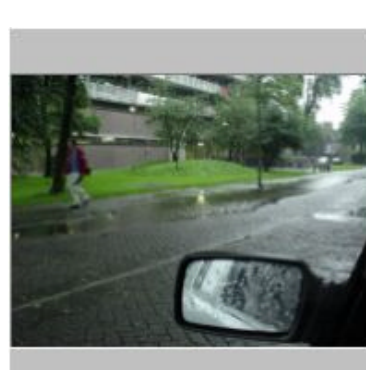
[overstortende straal vstuw met lichte aankleving.jpg](#)
430.09 KB



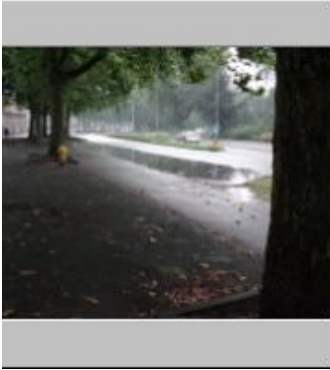
[overstortende straal vstuw mooi.jpg](#)
451.91 KB



[overstortende straal vstuw mooi2.jpg](#)
418.10 KB



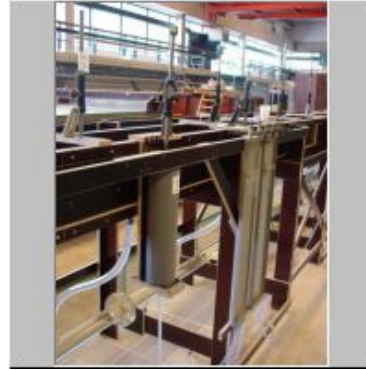
[praktijk1.jpg](#)
595.65 KB



[praktijk2.jpg](#)
602.63 KB



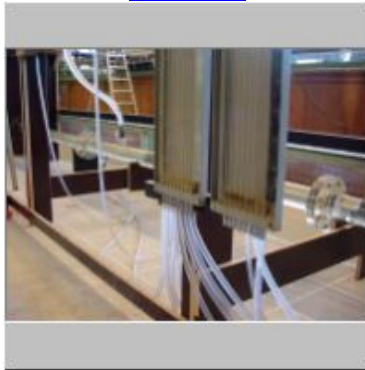
[pressure point equipment 2.jpg](#)
322.41 KB



[pressure point equipment](#)
[2_rotate.jpg](#)
324.94 KB



[pressure point equipment 4.jpg](#)
289.76 KB



[pressure point equipment](#)
[nanometerbord.jpg](#)
272.14 KB



[Pressure point equipment.jpg](#)
313.20 KB



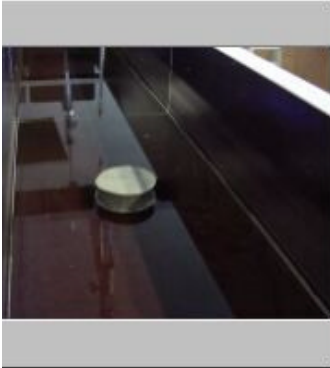
[pressure point inlet basin.jpg](#)
214.78 KB



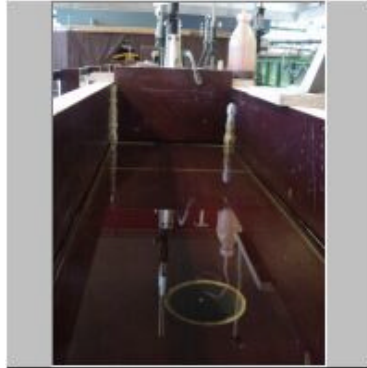
[pressure point outlet basin.jpg](#)
271.52 KB



[putten.jpg](#)
118.83 KB



[rubber dop in putje.jpg](#)
1.16 MB



[schot in goot 1.jpg](#)
1.15 MB



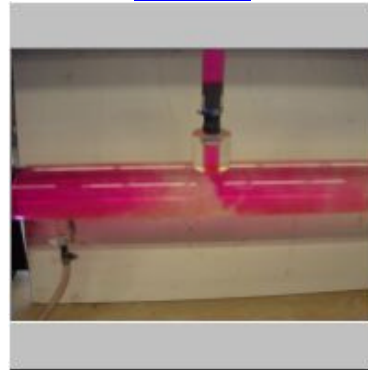
[sewer conduit and outlet basin.jpg](#)
295.49 KB



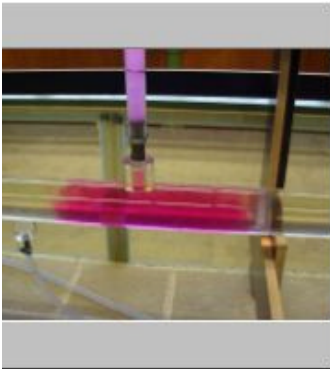
[sideview of downstream part notch and outlet basin.jpg](#)
305.21 KB



[supply crane.jpg](#)
303.60 KB



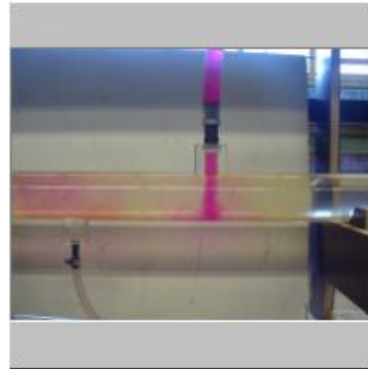
[tracer entering conduit average upstream flow velocity.jpg](#)
173.32 KB



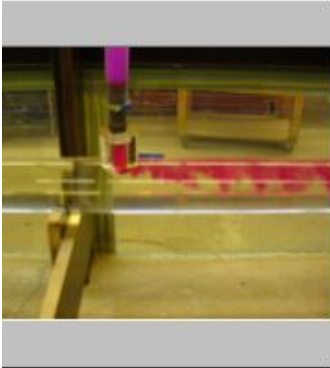
[tracer entering conduit upstream velocity in conduit is zero.jpg](#)
258.50 KB



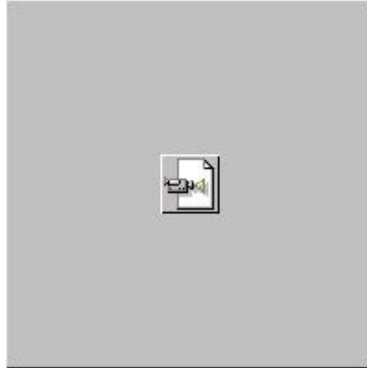
[tracer entering conduit with average upstream velocity 2.jpg](#)
214.15 KB



[tracer entering conduit with small upstream velocity.jpg](#)
193.44 KB



[tracer flowing into conduit with high velocity in sewer.jpg](#)
244.19 KB



[tracer flowing into sewer with significant flow velocity.mpg](#)
922.80 KB



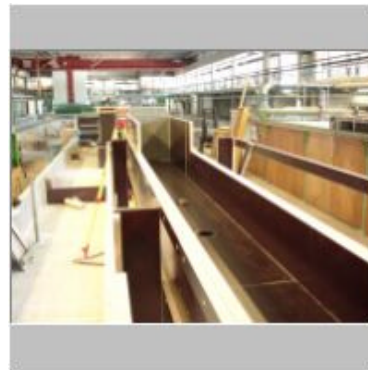
[vat gebruikt tijdens massakalibratie grote debieten.jpg](#)
1.11 MB



[view of complete experiment 2.jpg](#)
387.54 KB



[view of complete experiment.jpg](#)
392.64 KB



[view of inlet basin street.jpg](#)
314.60 KB



[tracer kleine debieten tbv ijking tracer methode.jpg](#)
966.38 KB



[v-notch installation bad quality.jpg](#)
253.46 KB



[v-notch installation good quality.jpg](#)
266.46 KB



[vstuw met lek via kruin.jpg](#)
429.07 KB



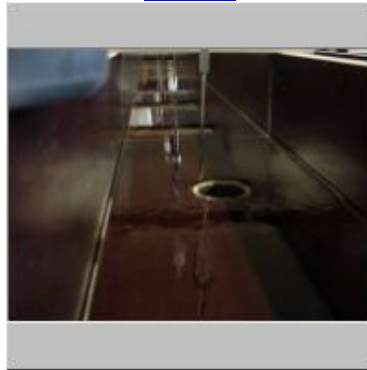
[vstuw met sterk aanklevende
straal.jpg](#)
1.03 MB



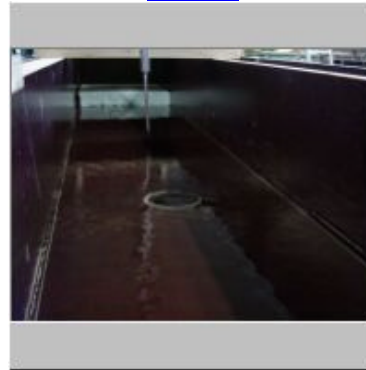
[vstuw straal ingezoomd.jpg](#)
1.03 MB



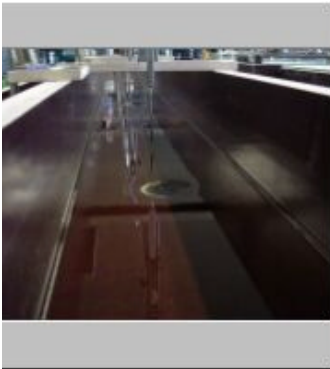
[water falling down of street.jpg](#)
281.42 KB



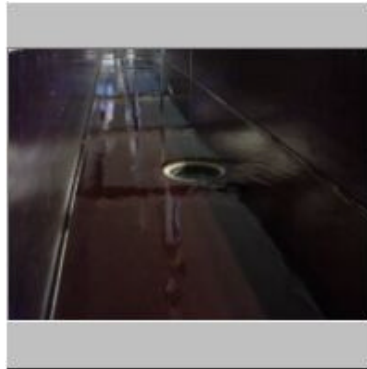
[water flowing into almost empty
gullypot.jpg](#)
278.81 KB



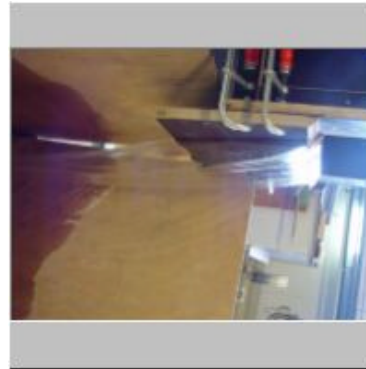
[water flowing into completely
filled gullypot inducing waves.jpg](#)
294.44 KB



[water flowing into completely
filled gullypot no waves.jpg](#)
311.91 KB



[water flowing into partly filled
gullypot.jpg](#)
289.70 KB



[water flowing of street semifree
overflow.jpg](#)
245.01 KB



[water flowing over vnotch.jpg](#)
307.48 KB



[water op straat.jpg](#)
402.88 KB



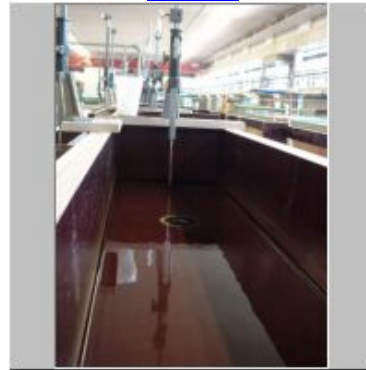
[water over rand straat bij lage afvoer tbv kalibratie tracer.jpg](#)
1.12 MB



[waterflowing over vnotch 28.jpg](#)
294.97 KB



[waterflowing over vnotch.jpg](#)
248.78 KB



[watersituatie bij uitstroom tijdens ijking tracer.jpg](#)
1.09 MB



[weegschaal aflezing.jpg](#)
1.13 MB



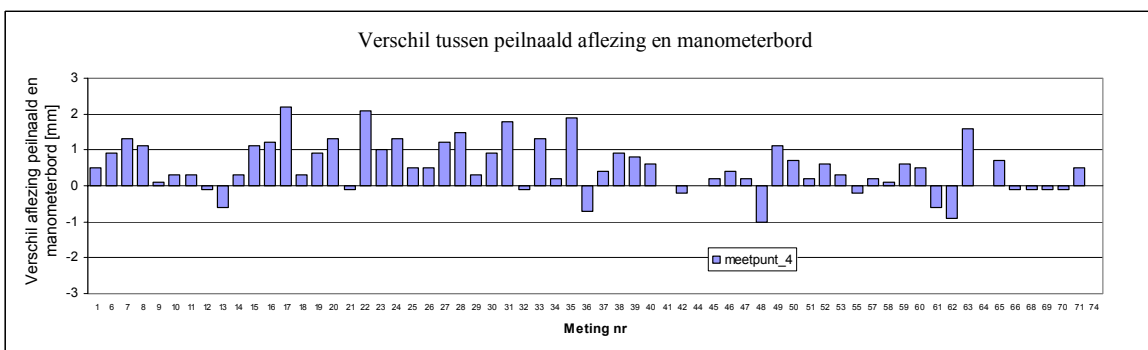
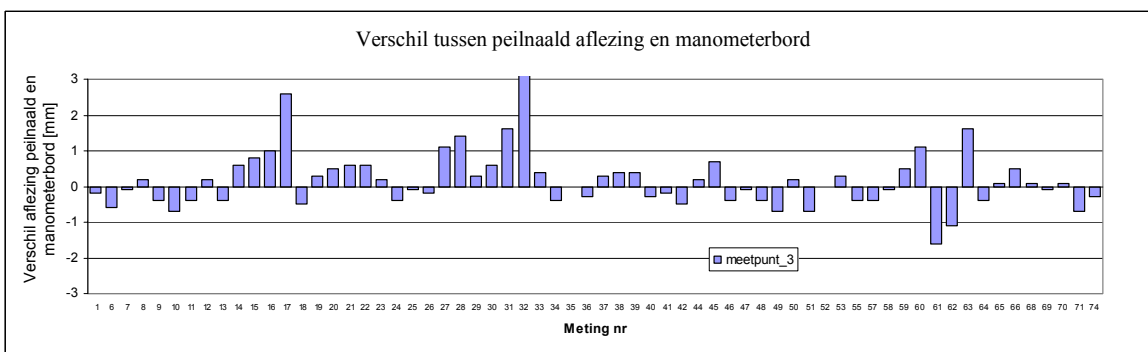
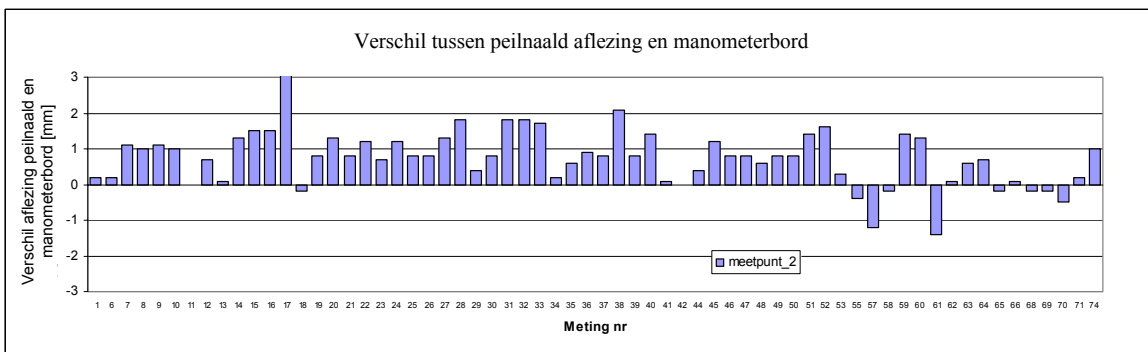
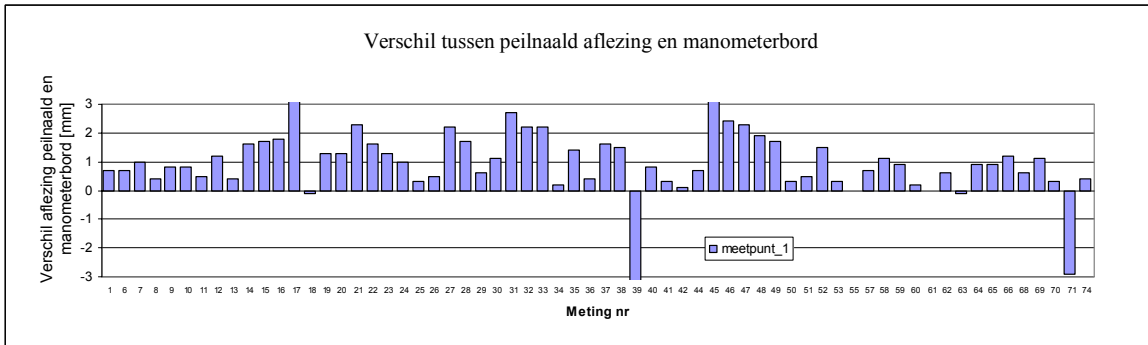
[weegschaal met emmer gebruikt t.b.v. massadebietmeting kleine vlotter.jpg](#)
1.08 MB

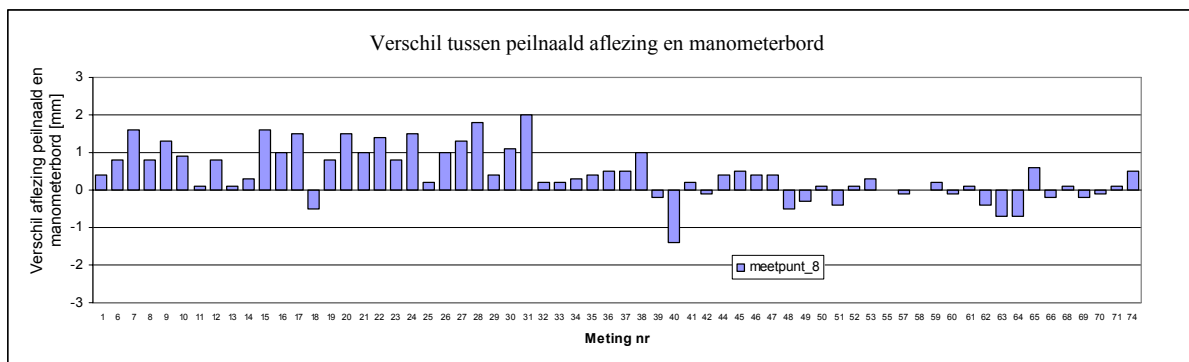
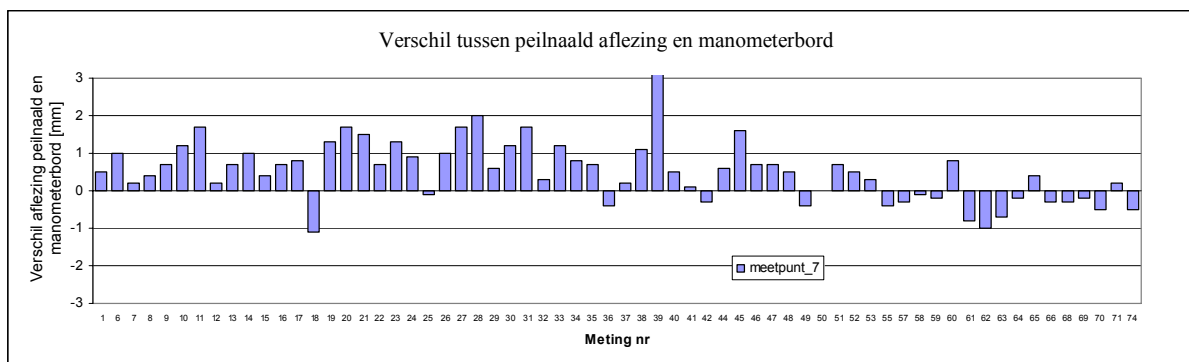
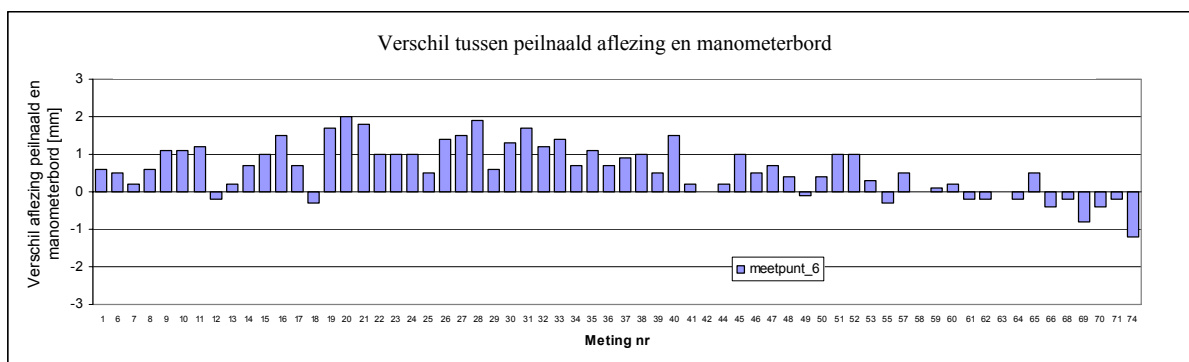
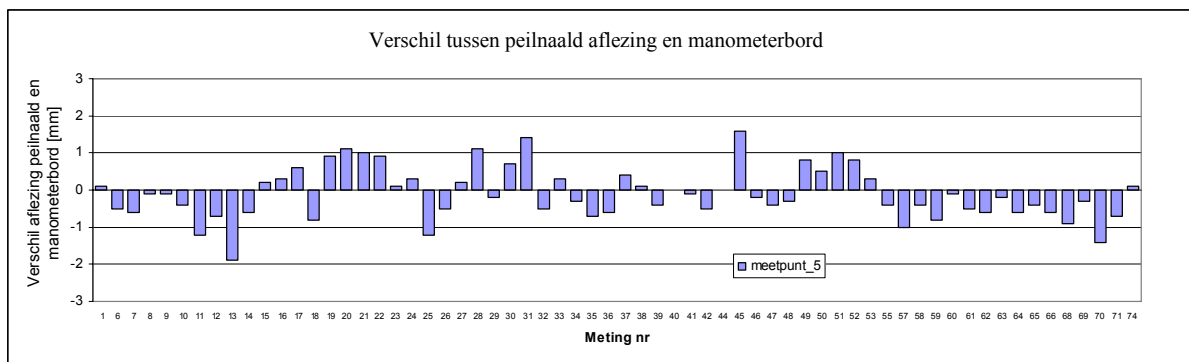


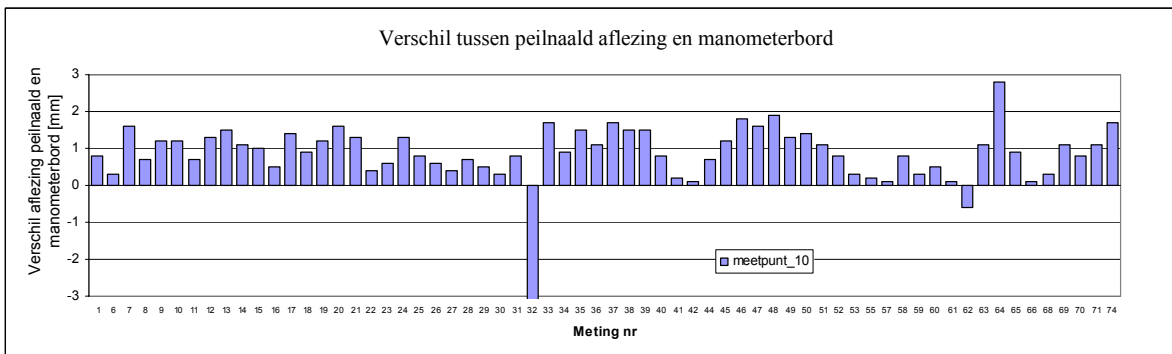
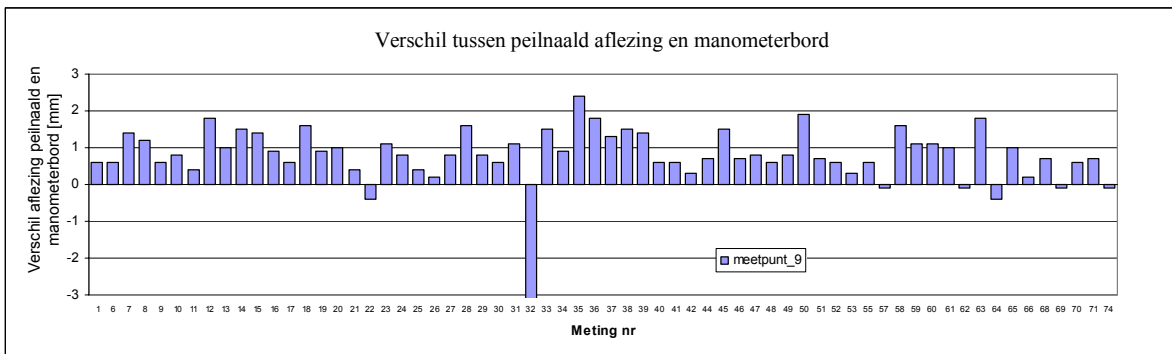
[Y junction pressure point.jpg](#)
310.98 KB

Bijlage 5: Verschil tussen manometerbord en peilnaalden

Op basis van het referentie niveau van 13/06/02 zijn de waterstanden berekend. In deze bijlage zijn voor de verschillen tussen manometerbord en peilnaalden de volgende grafieken gemaakt.







Het lijkt erop dat vanaf +/- meting 40 veel punten een systematische afwijking in positieve richting hebben. Dit kan niet zomaar worden verklaard. Vanaf ongeveer meting 30 is veel aandacht besteed aan het continue nathouden van de constructie. Dit kan gevolgen hebben voor de dikte van het hout en de vervorming van de goot van de straat.

Bijlage 6: Instelsnelheid waterstand

