

Nauwkeurighedsbepaling van diverse modellen voor debietberekeningen van rioolgemalen

Bachelor Eindopdracht

Definitief verslag

C. T. Jolink
s1015206

22 augustus 2013

Samenvatting

Dit onderzoek is verricht in het kader van de 'Bachelor Eindopdracht' Civiele Techniek aan de Universiteit Twente en is uitgevoerd bij I-Real te Terborg. Het onderzoek gaat over de ontwikkeling van diverse methodes om het debiet van een rioolgemaal te berekenen en de nauwkeurigheid van deze methodes te toetsen. Aanleiding tot het onderzoeken van de nauwkeurigheid van debietberekeningen is dat er veel kosten op speciale en dure debietmeters bespaard kunnen worden wanneer alternatieve methoden zonder debietmeters nauwkeurig genoeg blijken te zijn.

De volgende vier onderzoeksvragen worden beantwoord:

- Welke methoden zijn mogelijk om debieten te modelleren en welke gegevens zijn daarvoor nodig?
- Welke scenario's zijn te onderscheiden die van invloed kunnen zijn op de uitkomst van het model?
- Hoe moet het model gevalideerd worden?
- Hoe betrouwbaar en nauwkeurig zijn de ontwikkelde methoden om debieten te bepalen op basis van andere metingen dan debietmetingen?

Messelaar (2011) definieert *precieze debietmeting type P1* (op basis van een debietmeter), *globale debietmeting type P2* (op basis van het waterpeilverschillen in de put) en *zeer globale debietmetingen type P3* (op basis van capaciteit van pompen), die als uitgangspunt gelden voor het ontwikkelen van methoden.

Voor methode P2 moet minimaal het waterpeil en het oppervlak van de put op elke hoogte bekend zijn. Daarnaast moet een schatting gemaakt worden van een constante wateraanvoer gedurende het pompproces. Als uitbreiding op methode P2 is methode P2.1 ontwikkeld. Bij methode P2.1 wordt de wateraanvoer niet constant verondersteld, maar per cyclus opnieuw berekend aan hand van de vulsnelheid van de put in dezelfde cyclus.

Voor methode P3 moet minimaal bekend zijn wanneer de pomp in of uit schakelt en wat de constant veronderstelde capaciteit van de pomp is. Daarnaast moet een afzonderlijke capaciteit worden gespecificeerd voor tijden dat meerdere pompen tegelijk actief zijn. Als uitbreiding op methode P3 is methode P3.1 ontwikkeld. Methode P3.1 houdt rekening met een variabele opvoerhoogte door daling van het waterpeil in de put gedurende het pompproces. Benodigde gegevens voor deze methode zijn het vermogen van de pomp en de opvoerhoogte vanaf de pomp.

Scenario's waarvan de invloed op de resultaten is onderzocht zijn capaciteitsverlies door slijtage op lange termijn, rendementsverlies door meerdere pompen tegelijk te laten pompen (samenloop) en de invloed van verschillende meetfrequenties op de nauwkeurigheid van het model. Over capaciteitsverlies door slijtage kunnen uit dit onderzoek geen conclusies getrokken worden. Ten eerste is de maximale periode tussen twee sets metingen maar een jaar, wat vrij kort is om slijtage vast te kunnen stellen. Ten tweede is de variatie tussen cycli van een steekproef groter dan een eventueel capaciteitsverlies, waardoor een afname in de gemiddelde capaciteit niet zonder meer aan slijtage toe te wijzen is. Ten derde draaien pompen die op toeren gestuurd worden niet altijd op maximaal vermogen om energie te besparen, waardoor de maximale capaciteit niet bekend is zonder data over bijvoorbeeld energieverbruik.

Het inschakelen van een tweede pomp (samenloop) verhoogt de totale capaciteit met 60 tot 92 procent ten opzichte van voorgaande pompcycli. Door deze grote spreiding is het zeker nuttig om een specifieke capaciteit per gemaal toe te wijzen aan samenloop. Simpelweg veronderstellen dat de capaciteit verdubbelt is onvoldoende.

Een zeer lage meetfrequentie van het waterpeil verslechtert de nauwkeurigheid van de P2 en P2.1 methoden. Door de lage meetfrequentie kan het optoeren van de pomp niet correct worden gesimuleerd. Een lage meetfrequentie heeft bijzonder veel invloed op het resultaat wanneer de vorm van de put onregelmatig is en de oppervlakten per hoogte sterk verschillen.

Een hoge meetfrequentie komt de P2 methoden zeer ten goede. Het best presterende gemaal heeft een meetfrequentie van één keer per minuut. Bij zéér hoge frequenties (circa 12 metingen per minuut) gaan afrondingsfouten een te grote rol spelen. Dit kan gecorrigeerd worden door metingen te benaderen met polynomen, maar het is efficiënter om de frequentie te verlagen.

De modellen worden gevalideerd door uitkomsten te vergelijken met metingen van debietmeters, ook wel *type P1* genoemd. Evaluatie gebeurt met behulp van drie waarden: de “Nash-Sutcliffe coëfficiënt” (NSE), de “Relative Volume Error” (RVE) en de “RMSE-observations standard deviation ratio” (RSR). NSE en RSR verschaffen veel informatie over de mate waarin een model een bepaalde trend volgt. RVE verschaft informatie over een algemene over- of onderschatting van het model en is zeer bruikbaar wanneer men vooral in gemiddelden of (dag)totalen geïnteresseerd is.

Resultaat

Methode P2, gebaseerd op het waterniveau in de put, scoort met meegeleverde specificaties vrijwel overal onvoldoende volgens de prestatieclassificatie van Moriasi et al. (2007). Kalibreren van de parameters verbetert de score aanzienlijk, met name de RVE, maar in veel gevallen blijven de NSE en RSR onvoldoende. Methode P2.1, met variabele aanvoer, blijkt geen verbetering op te leveren ten opzichte van methode P2. Wel biedt P2.1 een mogelijkheid om een redelijke schatting te maken van de wateraanvoer wanneer hiervoor geen andere schattingen bekend zijn.

Methode P3, op basis van pompspecificaties, geeft een wisselend resultaat per gemaal met de aangeleverde specificaties, uiteenlopend van zeer slecht tot zeer goed. Er is een consequente overschatting van het model ten opzichte van de meting waar te nemen. Over het algemeen lijkt deze methode beter te presteren dan de P2 methode. Na kalibratie is er een duidelijke verbetering zichtbaar. Methode P3.1, welke rekening houdt met variabele opvoerhoogtes, kon slechts bij vier gemalen getoetst worden door een gebrek aan data. Over het algemeen komt deze methode tot goede resultaten, al is er geen verbetering zichtbaar ten opzichte van de gekalibreerde P3 methode.

Methode P2 blijkt erg gevoelig te zijn voor onzekerheden in putdimensies en aanvoer. Deze onzekerheden maken het moeilijk tot correcte parameters te komen, waardoor het gebruik van de P2 methode af wordt geraden. Mits het vermogen van pompen en de opvoerhoogte (inclusief verliezen door wrijvingsweerstand) bekend zijn, zijn beide P3 methoden geschikt om ten minste gemiddelden of (dag)totalen te bepalen. De mate waarin de precieze trend van het debiet wordt gesimuleerd wisselt sterk per gemaal. Mogelijk kan het energieverbruik of directe data over het toerental van het gemaal een toegevoegde waarde zijn om modellen verder uit te breiden.

Voorwoord

De bachelor van mijn studie “Civiele Techniek & Management” aan de Universiteit Twente rond ik af met de ‘Bachelor Eindopdracht’. Hiervoor heb ik gedurende tien weken zelfstandig een onderzoek uitgevoerd binnen het vakgebied ‘water’ en in de rioleringssector in het bijzonder.

Persoonlijke doelstellingen die ik met mijn eindopdracht wilde bereiken omvatten het leveren van significante bijdrage aan bepaalde vraagstukken, het bedrijfs- en ondernemingsleven leren kennen en het zelfstandig werken en verantwoordelijk zijn voor mijn onderzoek. I-Real bood mij de mogelijkheid om aan deze doelstellingen te werken, alsook om mijn technische bagage te kunnen gebruiken tijdens het onderzoek.

I-Real is een relatief klein bedrijf, waardoor ik makkelijk beeld kon krijgen van de werkzaamheden en interesses van het bedrijf. Door de goede positie in de markt van I-Real was het tevens mogelijk om met vraagstukken aan de gang te gaan die in deze markt nog onderontwikkeld zijn. Ik ben blij dat ik met mijn civieltechnische achtergrond een aanvulling kon zijn in dit vakgebied binnen I-Real, waardoor ik het gevoel heb iets wezenlijks bij te hebben gedragen aan het bedrijf.

Door verschillende achtergronden tussen mij en I-Real, in eerste plaats een ICT bedrijf, en de civieltechnische inhoud van het onderzoek, was het een voor de hand liggende keuze dat ik het onderzoek zo veel mogelijk zelf zou sturen en uitvoeren. Ik ben blij dat ik de vrijheid heb gekregen om het onderzoek naar eigen inzicht te kunnen uitvoeren en dat ik veel zelfstandige keuzes heb kunnen maken in welke richting het onderzoek zich heeft kunnen ontwikkelen.

Ondanks dat ik grotendeels zelfstandig werkte, heb ik goede contacten binnen het bedrijf kunnen opbouwen. Bij deze wil ik dan ook graag mijn collega's bedanken dat ze mij zo goed in het bedrijf hebben opgenomen, in het bijzonder Stefan C., Stefan W., Marcel, Rob en Leon met wie ik vele gezellige uren op de ontwikkelaarsafdeling doorgebracht heb. Daarnaast wil ik Peter Haverkamp en Marije Stronks bedanken voor het vinden van de opdracht waarmee ik mij met veel plezier en interesse heb beziggehouden. Niet in de laatste plaats wil ik ook Aarjan Langereis en Wouter Kranenburg bedanken voor de begeleiding van de opdracht.

Inhoudsopgave

1.Inleiding	1
1.1. Het bedrijf	1
1.2. Achtergrond en aanleiding van het onderzoek	1
1.3. Doel van het onderzoek	2
1.4. Onderzoeksvragen	2
1.5. Methodologie	3
1.6. Leeswijzer	3
2.Modelleren	4
2.1. Debietmeting type P2	4
2.2. Debietmeting type P2.1	6
2.3. Debietmeting type P3	7
2.4. Debietmeting type P3.1	8
3.Data	10
4.Validatie	12
4.1. Interpretatiemethoden	12
4.2. Algemene prestaties van ontwikkelde modellen	14
4.3. Theoretische validatie bij verschillende scenario's	16
4.4. Onbekende scenario's	19
5.Conclusies	20
6.Aanbevelingen	21
6.1. Resultaten gebruiken	21

6.2. Resultaten verbeteren	21
----------------------------	----

7.Bronnen	22
------------------	-----------

8.Bijlage	23
------------------	-----------

8.1. Bijlage 1: Voorbeeld datasheet	23
-------------------------------------	----

8.2. Bijlage 2: Script	24
------------------------	----

8.3. Bijlage 3: Resultaten	30
----------------------------	----

8.4. Bijlage 4: Voorbeeld prestatiecurve	32
--	----

8.5. Bijlage 5: Voorbeeld bouwtekening	33
--	----

1. Inleiding

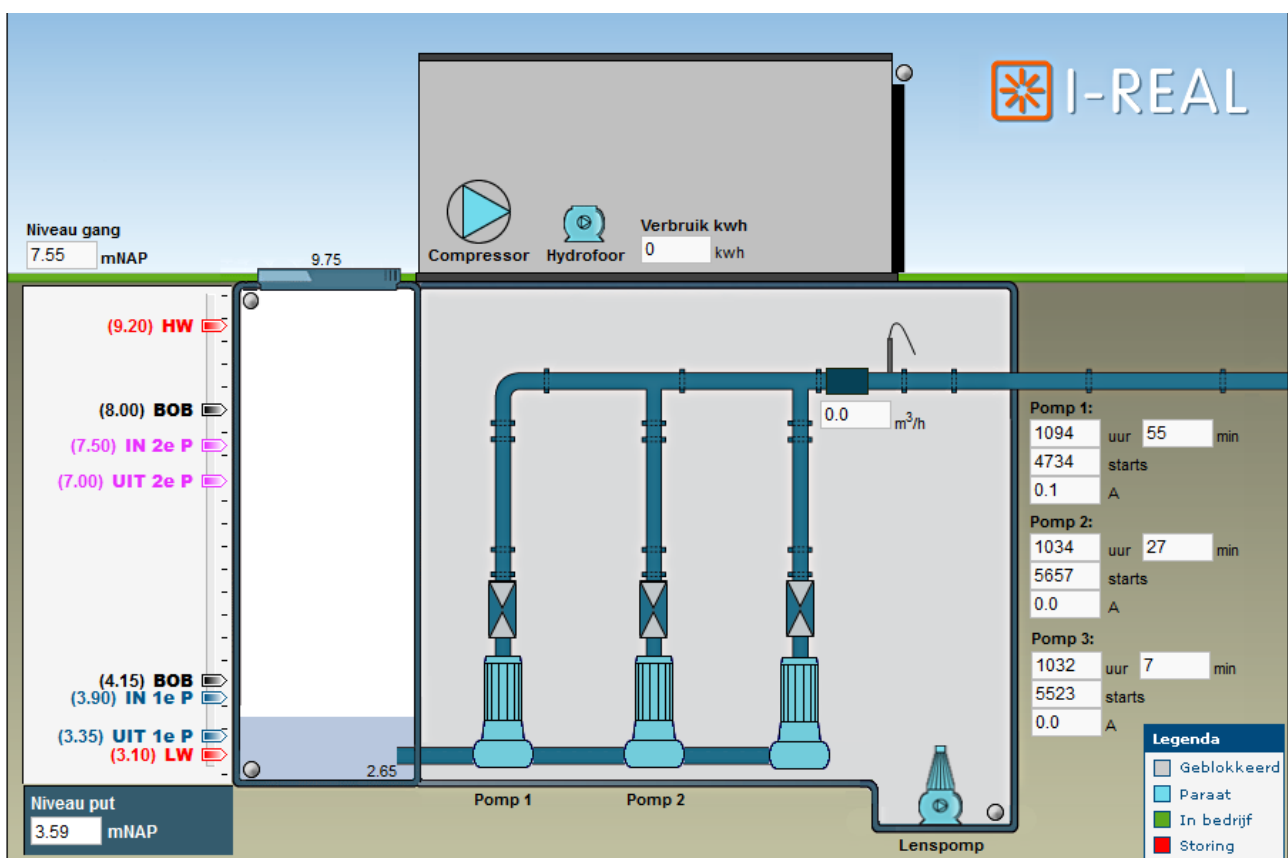
In dit onderzoek wordt de nauwkeurigheid bepaald van diverse modellen om het debiet van een rioolgemaal te simuleren op basis van diverse meetgegevens.

1.1. Het bedrijf

Het onderzoek wordt uitgevoerd bij I-Real te Terborg. I-Real is een ICT bedrijf dat zich specialiseert in webgebaseerde software voor o.a. de watersector. Voor de watersector heeft I-Real H2gO ontwikkeld; een open telemetriesysteem dat klanten, voornamelijk gemeenten en waterschappen, in staat stelt om diverse watersystemen te monitoren en te beheren. Een belangrijk watersysteem dat met H2gO gemonitord wordt, is het rioolgemaal. Met H2gO zijn alle rioolgemaal met geschikte besturingssystemen te ontsluiten, zodat constant gecontroleerd kan worden wat bijvoorbeeld de gemeten waterstanden in de put zijn, hoe groot het debiet in de uitgaande leiding is en op welke tijdstippen de pompen actief zijn.

1.2. Achtergrond en aanleiding van het onderzoek

Een rioolgemaal bestaat uit een put, vaak een soort grote kelder, waarin regen- en afvalwater stroomt vanuit een aanvoerende rioolleiding. Het water wordt hier tijdelijk opgeslagen totdat het verder geleid wordt naar een volgend gemaal of naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie. Hiervoor bevat het gemaal één of meerdere pompen die het water uit de put pompen.



Afbeelding 1; Schematisatie rioolgemaal, weergegeven in H2gO

In het gemaal worden diverse processen gemeten. Debietmetingen verschaffen veel informatie over stromingen en waterbalansen in het rioolsysteem, waarbij vooral de hoeveelheid verplaatst water interessant kan zijn. Het debiet wordt gemeten met een speciale debietmeter die in de uitgaande leiding wordt geplaatst, door Messelaar (2011) ook wel *precieze debietmeting* of *debietmeting type P1* genoemd. Debietmeters zijn echter duur en vaak moeilijk te plaatsen in bestaande leidingen. Daarom is het interessant om methoden te ontwikkelen waarbij het debiet berekend wordt op basis van andere reeds aanwezige en goedkopere metingen, zodat er bespaard kan worden op een aparte debietmeter.

De nauwkeurigheid van dergelijke alternatieve methoden is vooralsnog grotendeels onbekend. Om alternatieve methoden effectief te gebruiken om het debiet te bepalen, moet de nauwkeurigheid hiervan worden onderzocht.

1.3. Doel van het onderzoek

Het primaire doel van dit onderzoek is om de nauwkeurigheid te bepalen van diverse modelleermethoden die het debiet van een rioolgemaal simuleren. Daarnaast wordt onderzocht of de modellen uitgebreid kunnen worden om tot een nauwkeuriger resultaat te komen.

1.4. Onderzoeksvragen

In dit onderzoek staan vier onderzoeksvragen centraal:

- Welke methoden zijn mogelijk om debieten te modelleren en welke gegevens zijn daarvoor nodig?

Het debiet van een rioolgemaal kan op verschillende manieren berekend worden. Voor elke methode zijn bepaalde variabelen nodig die op een bepaalde manier samenhangen. Welke methoden bestaan en welke gegevens nodig zijn, wordt hier uitgezocht.

- Welke scenario's zijn te onderscheiden die van invloed kunnen zijn op de uitkomst van het model?

Een model kan zich onder bepaalde omstandigheden anders gedragen dan voorzien. Onderzocht wordt welke scenario's te onderscheiden zijn en wat de invloed op het model is.

- Hoe moet het model gevalideerd worden?

Om de betrouwbaarheid van een model te bepalen, moet de uitkomst vergeleken worden met een ijkwaarde, afkomstig uit een debietmeter. Hoe de nauwkeurigheid gekwantificeerd kan worden, komt hier aan bod.

- Hoe betrouwbaar en nauwkeurig zijn de ontwikkelde methoden om debieten te bepalen op basis van andere metingen dan debietmetingen?

Het resultaat van het onderzoek wordt hier samengevat.

1.5. Methodologie

Het onderzoek heeft een modelmatige aanpak waarbij data-analyse een grote rol speelt. Centraal staat het vergelijken van de uitkomsten van de ontwikkelde modellen met de uitkomsten van debietmeters. De uitvoering van dit onderzoek bestaat uit de volgende stappen:

1. **Data acquisitie:** verschillende gemalen moeten gekozen worden waarvan voldoende specificaties bekend zijn, alle benodigde metingen worden uitgevoerd en waarvan de meetfrequenties hoog genoeg zijn om nauwkeurige simulaties mogelijk te maken. Het verzamelen van data gebeurt direct vanuit H2gO, waarbij alle aangesloten gemalen van gemeente Arnhem, gemeente Rijssen-Holten en Platform Water Vallei en Eem ter beschikking staan.
2. **Modelleren:** het modelleren gebeurt met het programma MATLAB. In MATLAB wordt een script geschreven dat de verschillende datareeksen inleest en met elkaar in verband brengt. Het model moet op basis van verschillende berekeningen het debiet van het systeem kunnen voorspellen.
3. **Validatie:** per gemaal worden de noodzakelijke parameters in het model ingevoerd, die worden aangeleverd door de betreffende gemeenten of waterschappen. Op basis van de aangeleverde parameters wordt het gesimuleerde debiet uit het model vergeleken met de metingen van de aanwezige debietmeter, waaruit een eerste uitspraak kan volgen over de nauwkeurigheid van de methode met bekend veronderstelde specificaties.
4. **Kalibratie:** om onzekerheden in parameters te scheiden van onnauwkeurigheden van simulaties, wordt het model gekalibreerd. Onzekere parameters worden geoptimaliseerd om tot het maximale resultaat te komen dat het model toelaat. Uit deze stap kan een uitspraak volgen over de maximale theoretische nauwkeurigheid, mits diverse parameters nauwkeuriger worden bepaald.
5. **Model optimalisatie:** nadat de nauwkeurigheid van het model met de minimaal benodigde parameters bekend is, wordt het model uitgebreid met additionele variabelen die de nauwkeurigheid moeten verhogen.

1.6. Leeswijzer

In dit rapport worden de modellen, de data, de validatie en kalibratie en conclusies behandeld. Aansluitend volgen een aantal aanbevelingen.

In het hoofdstuk ‘modelleren’ worden diverse methoden uiteengezet waarmee het debiet van een gemaal gemodelleerd kan worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen vier methoden met beschrijving, noodzakelijke input en implementatie.

Het hoofdstuk ‘data’ behandelt de voorwaarden waaraan data voor dit onderzoek moet voldoen. Er wordt een keuze gemaakt voor locaties waar het onderzoek gedaan kan worden en op welke manier de data behandeld en gebruikt wordt.

‘Validatie’ beschrijft het koude resultaat van een vergelijking tussen verschillende modelleermethoden. Er worden meerdere interpretatiemethoden behandeld die de prestatie van de modellen kwantificeren. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen ongekalibreerde en gekalibreerde resultaten en de prestaties van modelleermethoden wordt onderling vergeleken. Ook komen hier scenario’s aan bod die de uitkomst van het model kunnen beïnvloeden en wordt hiervoor een theoretische validatie uitgevoerd.

In de conclusie worden de resultaten samengevat en worden conclusies van algemene en specifieke aard getrokken, die het doel van dit onderzoek moeten beantwoorden. Daarop volgen een aantal aanbevelingen over het gebruik van gemodelleerde debieten ten opzichte van debietmeters en worden suggesties gedaan voor mogelijke vervolgonderzoeken.

2. Modelleren

Welke methoden zijn mogelijk om debieten te modelleren en welke gegevens zijn daarvoor nodig?

Messelaar (2011) geeft drie methoden aan die als uitgangspunt voor dit onderzoek gelden. Dit is de *precieze debietmeting (type P1)*, gebaseerd op metingen van een speciale debietmeter, de *globale debietmeting (type P2)*, gebaseerd op het waterniveau in de put, en de *zeer globale debietmeting (type P3)*, gebaseerd op specificaties van de pomp. Hieronder worden de P2 en P3 methoden besproken met de noodzakelijke input, formules en implementatie. Vervolgens worden een aantal aanvullende variabelen besproken waarmee het model uitgebreid kan worden. Het resultaat van een aantal van deze aanvullingen zijn ook in dit onderzoek opgenomen.

2.1. Debietmeting type P2

Beschrijving

De definitie van debietmeting type P2 is als volgt:

“Registratie van het totale pompdebiet van een gemaal door middel van meting, of door berekening op basis van andere metingen, of op welke wijze dan ook” (Messelaar, 2011).

Voor de nauwkeurigheid van een *debietmeting type P2* beschrijft Messelaar (2011) de volgende eisen:

Ten minste gelijkwaardig aan de nauwkeurigheid bij debietberekening op basis van het volumeverschil van peildaling in de pompput/-kelder, waarbij;

- het oppervlak van de pompput/-kelder op alle hoogtes bekend is;
- in de berekening rekening gehouden wordt met een schatting van de hoeveelheid water die vanuit aangesloten leidingen in de pompput/-kelder stroomt.

Noodzakelijke input

Waterstand

De waterstand in de put, en vooral de verandering hiervan, is vanzelfsprekend van essentieel belang voor het bepalen van het debiet volgens de P2 methode. De verandering van het waterniveau, vermenigvuldigd met de oppervlakte van de put, vormt het volume dat in het tijdsinterval van de twee waterstanden verplaatst is, oftewel het debiet.

Putdimensies

De vorm van een put kan sterk variëren van een eenvoudige cilinder tot een onregelmatige bak met allerlei verhangen en goten in de bodem. Door onregelmatige vormen zal het water niet op elke hoogte even snel stijgen of dalen. De dimensies van de put moeten daarom op elke hoogte bekend zijn om de niveauverandering correct te relateren aan een debiet.

Constant aanvoerend debiet

De put vult zich gedurende een bepaalde periode door de aanvoer van regen- en afvalwater. Wanneer een bepaald niveau bereikt is, zullen de pompen aan gaan en zal het niveau in de put weer dalen. Het is belangrijk om op te merken dat de aanvoer op dit moment gewoon doorgaat. Dat betekent dat niet alleen het reeds aanwezige water wordt weggepompt, maar ook het water dat gedurende dit proces wordt aangevoerd. Deze aanvoer moet dus worden opgeteld bij het afvoerdebiet. De aanvoer wordt constant verondersteld.

Implementatie

Om het debiet te modelleren wordt het programma MATLAB gebruikt. Met MATLAB zijn grote hoeveelheden data te analyseren, algoritmen te ontwikkelen en modellen te maken.

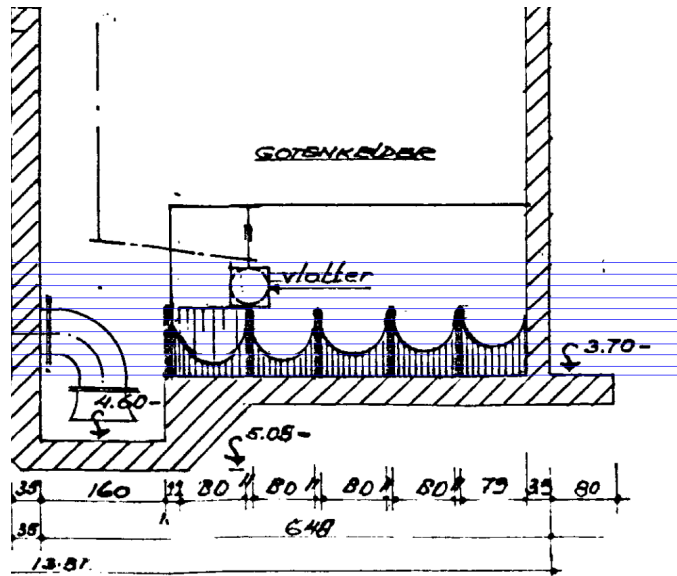
Hier wordt de implementatie van het ontwikkelde model in grote lijnen behandeld. Een gedetailleerde uitwerking van het MATLAB script wordt behandeld in bijlage 2: *Script*.

Oppervlakte

De oppervlakte van de put is lastig of onmogelijk uit te drukken als een vergelijking in termen van het waterpeil. Veel putten zijn onregelmatig van vorm en op de bodem bevinden zich vaak goten met een verhang om het water en het vuil naar de pomp te leiden.

Om de oppervlakte op iedere hoogte te benaderen, wordt de put in 10 "lagen" verdeeld tussen het in- en uitslagpunt van de pomp. Op basis van technische tekeningen kan de grootte van elke laag worden bepaald. Zie afbeelding 4 en bijlage 5: *voorbeeld bouwtekening*.

Een nieuwe datareeks met oppervlakten wordt aangemaakt op basis van de waterpeilreeks. Aan elk logtijdstip wordt een oppervlakte toegewezen op basis van de "laag" waarin het waterpeil op dat tijdstip valt. Zo ontstaan een datareeks met actuele oppervlaktes voor elk logtijdstip.



Afbeelding 4: dwarsdoorsnede kelder 'Kabof' met lagenverdeling

Peilverschil

Vervolgens wordt een datareeks met peilverschillen aangemaakt, door van elke waarde in de waterpeilreeks de voorgaande waarde af trekken. Deze reeks geeft dan het verschil in waterpeil ten opzichte van de vorige meting.

Een zelfde bewerking wordt gedaan op de datareeks met tijdstippen. Zo ontstaat een nieuwe reeks met intervallen sinds de vorige meting.

Formule

Het debiet wordt als volgt berekend:

$$Q_i = \frac{\text{oppervlakte}_i \cdot \text{peilverschil}_i}{\text{interval}_i} + C$$

waarbij C de constant veronderstelde instroom is. Als laatste stap worden alle tijdstippen bepaald waarop het niveau stijgt en wordt het debiet op deze tijdstippen op nul gezet. Immers is er tijdens het vullen van de put geen sprake van een negatief debiet in de uitgaande leiding, waar het model anders wel vanuit zou gaan. Een uitzondering hierop is een zeer hevige regenbui waarbij de aanvoer groter is dan de maximale capaciteit van de pompen: in dat geval kan het wel voorkomen dat het niveau stijgt terwijl er wél water wordt afgevoerd. Als alternatief op deze laatste stap kan het gemodelleerde debiet ook op nul worden gezet wanneer geregistreerd wordt dat de pompen uit staan. Dit vraagt wel een extra datareeks.

2.2. Debietmeting type P2.1

Beschrijving

Als aanvulling op methode P2 is het mogelijk om het aanvoerende debiet variabel te maken. Deze methode noem ik *debietmeting type 2.1*.

Noodzakelijke input

Naast de waterstand en putdimensies zoals bij methode P2 is volgende input noodzakelijk:

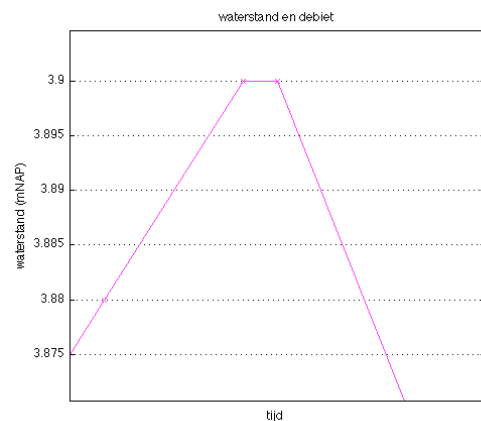
Variabel aanvoerend debiet

De aanvoer constant veronderstellen is een erg grove benadering. Deze zal bijvoorbeeld aanzienlijk groter zijn gedurende en vlak na een flinke regenbui of 's ochtends wanneer veel mensen tegelijk douchen. 's Nachts, wanneer de meeste mensen slapen, zal deze daarentegen kleiner zijn dan gemiddeld.

Ter verbetering van het model kan het aanvoerende debiet variabel gemaakt worden per afvoerpiek, berekend op basis van de gemiddelde vulsnelheid in de voorafgaande vulperiode. Voor details, zie bijlage 2: *script*.

Implementatie

Een eenvoudige maar zeer onnauwkeurige methode om de instroom te berekenen, is door het laatste stijgende peilverschil in de cyclus, vermenigvuldigd met het oppervlak, te delen door het bijbehorende interval. Vaak is het laatste stuk stijging niet representatief, bijvoorbeeld doordat de pomp al begonnen is met draaien (zie afbeelding 5). Om die reden kan beter de gemiddelde stijging in de cyclus worden gebruikt om de instroom tijdens het pompen te schatten. Zie bijlage 2: *Script* voor details.



Afbeelding 5: Afgevlakte piek in de niveaumeting

Formule

De berekening van het debiet is dan als volgt:

$$Q_i = \frac{\text{oppervlakte}_i \cdot \text{-peilverschil}_i}{\text{interval}_i} + \text{instroom}_i$$

Verwaarlozingen

De volgende variabele kan van invloed zijn op het resultaat van de P2 methoden, maar wordt niet verder behandeld:

Buffering in de aanvoerende buis

De aanvoerende buis sluit in veel gevallen relatief hoog aan op de put of bergingskelder, zodat het water in de put valt en niet kan terugstromen. Het inschakelniveau van de pompen is doorgaans zo ingesteld dat de put leeggepompt wordt voordat de Binnenkant Onderkant Buis (BOB) bereikt wordt. Bij zware regenval kan het gebeuren dat de put zich sneller vult dan de pompen kunnen afvoeren, waardoor soms het niveau van de BOB bereikt wordt. In dat geval zal het water niet alleen in de put stijgen, maar ook in de aanvoerende buis. Doordat het stijgende oppervlak zo ineens veel groter wordt, zal de stijg-/daalsnelheid op dit punt veel kleiner zijn.

Om deze lage snelheid ten opzichte van het debiet te corrigeren, moet het oppervlak in de buis worden opgeteld bij het oppervlak van de put op die hoogte. Het buizenstelsel is echter zo complex door vertakkingen en verhangen, dat het zeer moeilijk is om de juiste oppervlakte per hoogte te bepalen. Daarnaast komt het in een normaal scenario überhaupt niet voor dat het niveau zo hoog stijgt. Om deze redenen is deze variabele niet in het model opgenomen.

2.3. Debietmeting type P3

Beschrijving

De definitie van debietmeting type P3 is als volgt:

“Registratie van de pomphoeveelheden van een gemaal op basis van de draaitijden van de pompen, of andere metingen en bedrijfsgegevens” (Messelaar, 2011).

Voor de nauwkeurigheid van een *debietmeting type P3* beschrijft Messelaar (2011) de volgende eisen:

Ten minste gelijkwaardig aan de nauwkeurigheid bij debietberekening op basis van de draaitijd van de pompen vermenigvuldigd met constant veronderstelde pompcapaciteiten, waarbij voor de pompcapaciteiten wordt uitgegaan van reële waarde in de betreffende situatie en verschillende capaciteiten worden aangehouden voor enkelvoudig en meervoudig bedrijf (samenloop) van de pompen.

Noodzakelijke input

Draaitijd

Om de capaciteit te relateren aan het actuele debiet, is het van belang om te weten of de pomp(en) aan of uit staan. Ook moet onderscheiden worden of één of meerdere pompen tegelijk draaien.

Capaciteit

De capaciteit van de pompen wordt constant verondersteld en is geschat op basis van specificaties, aangeleverd door de leverancier. De capaciteit wordt uitgedrukt in m³/u en is dus direct gerelateerd aan het actuele debiet. Er wordt onderscheid gemaakt in capaciteit bij enkelvoudig bedrijf en wanneer meerdere pompen tegelijk actief zijn (samenloop).

Implementatie

De datareeks voor aan-/uitstand bestaat enkel uit éénen en nullen, met één voor aan en nul voor uit. De berekening van het debiet is eenvoudig. De aan/uitstand wordt voor elke pomp vermenigvuldigd met de opgegeven capaciteit. Vervolgens worden de reeksen van de afzonderlijke pompen opgeteld.

Formule

$$Q_i = \text{aan-uit}_{1i} \text{ capaciteit}_1 + \text{aan-uit}_{2i} \text{ capaciteit}_2 + \text{aan-uit}_{3i} \text{ capaciteit}_3$$

Vervolgens worden alle tijdstippen bepaald waarop meer dan één pomp aan staat. Op deze tijdstippen wordt het debiet vervangen door de opgegeven capaciteit voor samenloop.

2.4. Debietmeting type P3.1

Beschrijving

Als aanvulling op methode P3 is het mogelijk om de capaciteit variabel te maken. Deze methode noem ik *debietmeting type P3.1*.

Noodzakelijke input

Naast de draaitijd van de pompen is de volgende input noodzakelijk:

Pompvermogen en opvoerhoogte

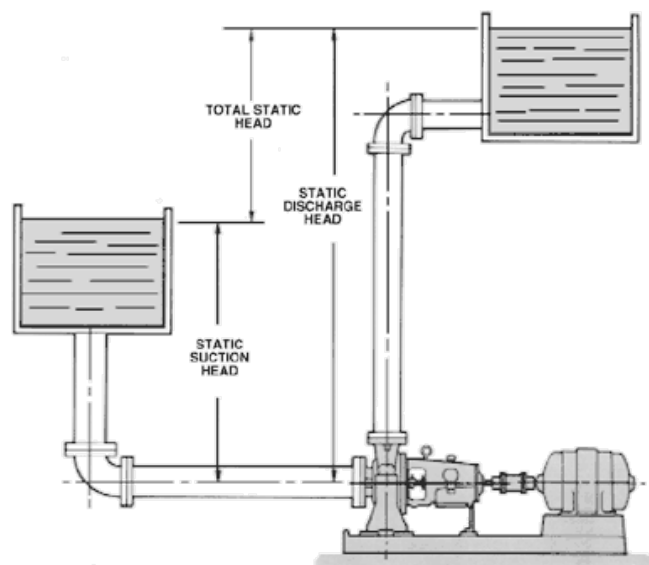
In werkelijkheid is de capaciteit van een pomp niet constant, maar is dit afhankelijk van het vermogen van de pomp en de opvoerhoogte, of meer algemeen, van de relatieve druk in de leiding voor en achter de pomp. Het (hydraulisch) vermogen van de pomp staat in relatie tot het debiet volgens de volgende formule:

$$P = \rho Q g H$$

Waarbij P het vermogen is (W), ρ de soortelijke massa (kg/m^3), Q het debiet (m^3/s), g de gravitatieconstante (m/s^2) en H de opvoerhoogte (m).

Waterstand

De waterstand speelt in deze ook een rol, omdat deze het verschil in opvoerhoogte bepaalt. Naarmate het water hoger staat, hoeft het water minder ver opgepompt te worden, wat de capaciteit van de pompen ten goede komt. Naarmate het pompproces vordert en het niveau in de put daalt, moet het water steeds verder opgepompt worden, ten nadele van de pompcapaciteit. Door een variabele waterstand in het model op te nemen, kan de reële pompcapaciteit beter benaderd worden.



Afbeelding 2: opvoerhoogte

Implementatie

De P3.1 methode is aanzienlijk complexer te implementeren.

Hiervoor is als toevoeging op de P3 methode de waterpeilreeks nodig en een aantal extra parameters. Deze parameters omvatten het vermogen van de pomp, de dynamische opvoerhoogte waarin leidinglengte en wrijvingsverliezen zijn opgenomen, de hoogte van de pomp en de pompefficiëntie.

Een datareeks met netto opvoerhoogten wordt aangemaakt op basis van de dynamische opvoerhoogte en het waterpeil in de put.

Formule

$$Q_i = (aan-uit_{1i} + aan-uit_{2i} + aan-uit_{3i}) \cdot \frac{P}{H_i \rho g}$$

Verwaarlozingen

De volgende parameters en variabelen kunnen van invloed zijn op het resultaat, maar wordt niet verder behandeld:

Drukmeter

De opvoerhoogte buiten het gemaal is in veel gevallen onbekend, net als de wrijvingsweerstand (zie volgend kopje). Dit kan ondervangen worden door het drukverschil te bepalen met een drukmeter op de uitgaande leiding van het gemaal. Wanneer deze drukmeter aanwezig is, kan dit dus precies worden uitgelezen en hoeven er geen aannames worden gemaakt over opvoerhoogten, wrijvingsweerstand etc.. Helaas zijn er geen werkende drukmeters aanwezig in het onderzochte gebied, waardoor de invloed van deze parameter niet kan worden onderzocht.

Diameter en lengte afvoerende leiding: Friction Loss

De diameter en lengte van de afvoerende leiding en de ruwheid van het oppervlak aan de binnenkant hiervan hebben invloed op de wrijvingsweerstand op het water. Naarmate de wrijving groter wordt, zal het debiet afnemen ten opzichte van het vermogen van de pomp.

Met name de ruwheid van de leiding is in praktijk moeilijk te bepalen. De lengte van leidingen tot het volgende lozingspunt is in veel gevallen lastig te bepalen en in dit onderzoek niet bekend. Om deze reden wordt deze variabele niet direct in het model opgenomen, maar kan dit verdisconteerd worden in een empirische overdruk in de leiding. Indien aanwezig kan een drukmeter meer informatie geven over deze gegevens.

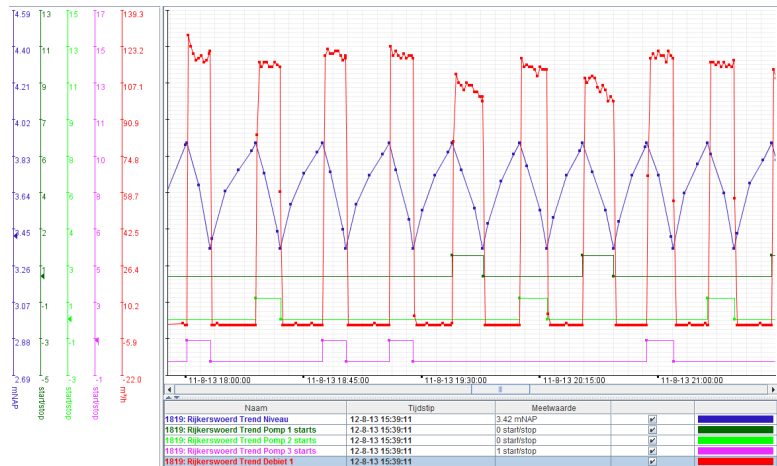
Variabele pompefficiëntie

De efficiëntie van een pomp is niet constant. De verhouding tussen het mechanische vermogen op de as van de pomp en het hydraulische vermogen op het water verandert met de opvoerhoogte. In praktijk is dit verschil bij kleine opvoerhoogteverschillen echter gering. Daarnaast is de efficiëntiecurve moeilijk als formule te formuleren, mede omdat hiervan geen parameters bekend zijn. Om de berekening van de relatie tussen opvoerhoogte en capaciteit te vereenvoudigen, wordt de efficiëntie constant verondersteld. De praktijk leert dat deze doorgaans tussen 60% en 70% ligt.

3.Data

Data acquisitie

In elk gemaal worden metingen uitgevoerd middels diverse sensoren. Deze metingen worden door een Programmable Logic Controller, kortweg 'PLC', op bepaalde tijdsintervallen of bij bepaalde gebeurtenissen gelogd, verzameld en verstuurd naar een hoofdpост. Van daaruit is de data op te vragen met H2gO. Hierin worden schematisaties en gegevens van het gemaal opgenomen (afbeelding 1) en zijn alle beschikbare meetreeksen op te vragen in rapporten en grafieken (afbeelding 3).



Afbeelding 3: grafiek uit H2gO met waterstand (blauw), debiet (rood) en aan- of uit staan van pompen.

Voorwaarden voor locatiekeuze

Gemalen moeten aan een aantal voorwaarden voldoen om geschikt te zijn voor vergelijking van verschillende methoden. Allereerst moeten de volgende meetgegevens aanwezig zijn:

- waterniveau in de put
- in- en uitschakeltijdstippen van de pompen
- debietmetingen in de uitgaande leiding door een debietmeter (P1)

Data moet voldoende frequent gelogd worden om de trend van een afzonderlijke pompcyclus weer te geven. Met name tijdens het pompen moet voldoende zichtbaar zijn wanneer de pomp optoert, wanneer maximale capaciteit bereikt wordt en wanneer de waterstroom tot stilstand komt na het uitschakelen van de pomp.

Verder moeten de volgende gegevens beschikbaar zijn:

- De putdimensies moeten exact bekend zijn
- De (dynamische) opvoerhoogte moet bekend zijn
- Het vermogen van de pomp en de bijbehorende efficiëntie, bij voorkeur in de vorm van een prestatiecurve (zie bijlage 4: *voorbeeld prestatiecurve*).

Voor dit onderzoek wordt data gebruikt van de volgende rioolgemaal van gemeente Arnhem, gemeente Rijssen-Holten en Platform Water Vallei en Eem:

gemalen	
Arnhem "Molenbeke"	Amersfoort "Kabof"
Arnhem "Rijkerswoerd"	Rijssen-Holten "Twenhaarsveld"
Arnhem "Kampeercentrum"	Rijssen-Holten "Veenweg"
Arnhem "Gelderse Rooslaan"	Rijssen-Holten "Drostenstraat"

Van elke locatie worden metingen gebruikt van circa één maand. De meetfrequentie verschilt per gemaal, waardoor datasets verschillende lengtes hebben. Per locatie levert een maand een dataset van 20.000 tot 200.000 metingen. Deze ruime periode moet een representatieve steekproef geven van alle gemeten data. Om de invloed van de leeftijd van de gemalen te controleren, worden datasets gebruikt uit 2012 en 2013 voor een split-sample test.

Zuivere data

Soms komt er een storing voor in de verzonden data. In de meeste gevallen betreft dit het in- en direct weer uitschakelen van de pomp zonder dat er in die tijd een debiet of waterstand gemeten wordt, zoals in de laatste regels van tabel 1. Dergelijke storingen worden uit de te valideren datasets verwijderd, omdat dit het model onterecht negatief beïnvloedt. Het doel van dit onderzoek is de bepaling van nauwkeurigheid van modellen en niet de bepaling van kwaliteit van data. Daarom is het geoorloofd de data te zuiveren van fouten.

Interpoleren

Meetreeksen worden in veel gevallen niet tegelijk gelogd. Zo kan het voorkomen dat de waterstand alle paar minuten wordt gelogd en het debiet alleen wanneer de pomp aan staat. Ook kan het voorkomen dat de ene reeks een paar seconden of minuten eerder wordt gelogd dan de andere, zie voorbeeld hiernaast.

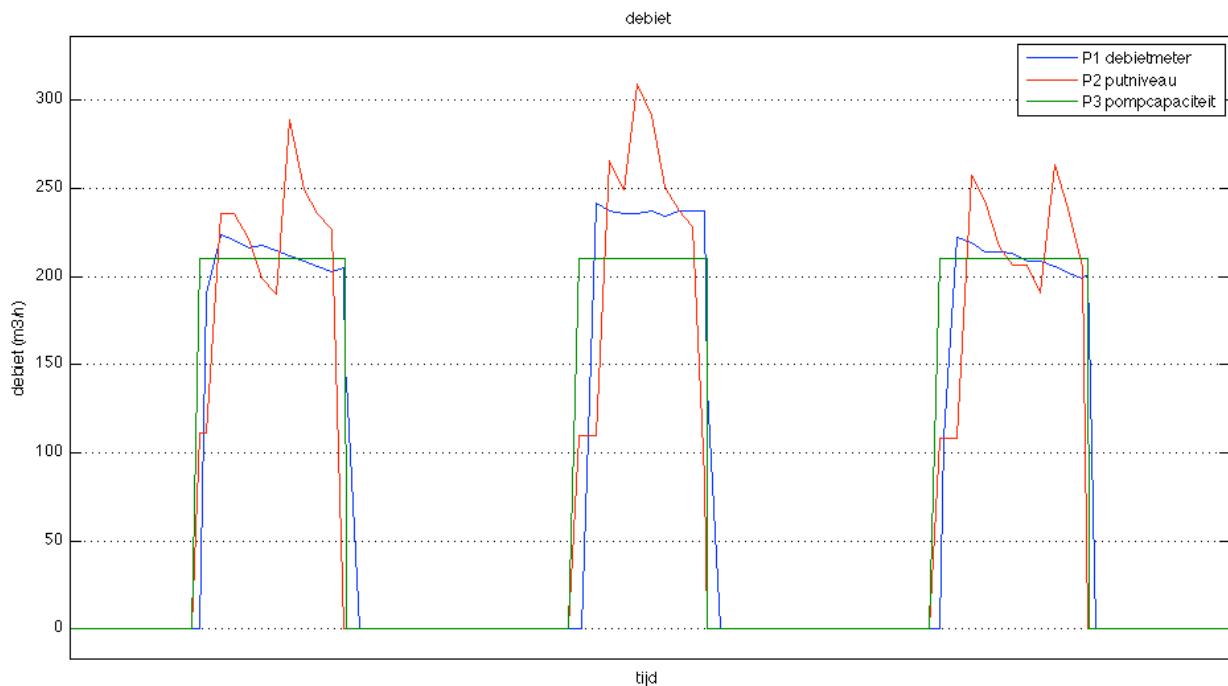
Om de verschillende datareeksen toch met elkaar te kunnen verrekenen zonder dat verschuivingen of gaten in de data voorkomen, moet de data op bepaalde tijdstippen worden geïnterpoleerd. Hiervoor worden alle tijdstippen gebruik, waarop één of meer reeksen gelogd zijn.

niveau	debiet	pomp
5.00	0.0	
6.00		
	1.0	1.0
	3.0	
	9.0	
5.40	9.0	
	9.0	
5.20	9.0	
	9.0	
5.00	0.0	0.0
		1.0
		0.0
		1.0
		0.0

Tabel 1: Voorbeeld van meetreeksen die niet gelijktijdig gelogd worden

4. Validatie

De nauwkeurigheid van de P2 en P2.1 methode op basis van het waterniveau in de put, en de P3 en P3.1 methode op basis van pompspecificaties worden bepaald door het gemodelleerde debiet te vergelijken met de P1 methode, op basis van de debietmeter. Een voorbeeld hiervan wordt gevisualiseerd in afbeelding 6.



Afbeelding 6: voorbeeld van debiet volgens P1 (blauw), P2 (rood) en P3 (groen) bij gemaal 'Rijkerswoerd'.

Om tot een werkbaar resultaat te komen, moeten alle vergelijkingen samengevat worden. Vergelijkingen tussen de verschillende methoden kan op verschillende manieren, met verschillende uitkomsten. Het koude resultaat kan op volgende manieren geïnterpreteerd worden.

4.1. Interpretatiemethoden

Hoe moet het model gevalideerd worden?

Het valideren van een model is het proces van demonstreren dat een gegeven locatie-specifiek model in staat is om "voldoende accuraat" simulaties te maken, waarbij "voldoende accuraat" kan variëren per project doel (Refsgaard, 1997). Om de accuraatheid van een model aan te tonen, bestaan verschillende statistische methoden. Moriasi et al. (2007) bevelen de volgende methoden aan en geven hiervoor ook classificaties aan verschillende scores: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS) -ook bekend als Relative Volume Error (RVE)- en RMSE-observations standard deviation ratio (RSR).

Nash-Sutcliffe Efficiency

De Nash-Sutcliffe coëfficiënt (NSE) is een genormaliseerde statistische methode die de relatieve grootte bepaald van de residuele variantie vergeleken met de variantie van de gemeten data (Nash & Sutcliffe, 1970). De Nash-Sutcliffe coëfficiënt wordt als volgt beschreven:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}$$

Hierin is Y_i^{obs} de gemeten waarde op tijdstip i , Y_i^{sim} de gemodelleerde waarde op tijdstip i en Y^{mean} het gemiddelde van de gemeten data en n het totale aantal metingen.

NSE reikt van $-\infty$ tot en met 1. $NSE = 1$ geldt als optimale waarde waarbij er geen verschil is tussen gemeten en gemodelleerde waarden. Een waarde van $NSE = 0$ betekent dat het model even goed voorspelt als de gemiddelde gemeten waarde. $NSE < 0$ betekent dat de gemiddelde gemeten waarde een betere voorspelling is dan het model, wat een onacceptabele modelprestatie aangeeft. Waarden tussen 0,0 en 1,0 kunnen over het algemeen als acceptabele modelprestatie beschouwd worden (Moriasi et al., 2007).

De NSE is door het kwadrateren van verschillen bijzonder gevoelig voor extreme waarden. Het gebruik van NSE wordt aanbevolen door onder andere Moriasi et al. (2007), ASCE (1993) en Legates & McCabe (1999). Het is een veel gebruikte methode waardoor veel informatie beschikbaar is over gerapporteerde waarden (Moriasi et al., 2007). De NSE-score geeft dus een goede indicatie in hoeverre het model een bepaalde trend volgt, bijvoorbeeld of er een bepaalde opstartvertraging is. Het belang hiervan zal verschillen.

Relative Volume Error (RVE)

De Relative Volume Error meet de gemiddelde neiging van het model om groter of kleiner te zijn dan de gemeten data (Gupta et al., 1999). In andere literatuur zoals Moriasi et al. (2007) wordt het ook 'percent bias', kortweg PBIAS genoemd. De Relative Volume Error wordt als volgt beschreven:

$$RVE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})}$$

RVE reikt in principe van $-\infty$ tot ∞ waarbij $RVE = 0$ als optimale waarde geldt. $RVE = 0$ betekent dat er *gemiddeld* geen afwijking is tussen het model en de gemeten data. Een positieve waarde houdt een overschatting van de gebeurtenis in, terwijl een negatieve waarde een onderschatting van de gebeurtenis inhoudt.

Het gebruik van RVE wordt aangeraden door ASCE (1993) en Moriasi et al. (2007). Het is een veel gebruikte methode om fouten te kwantificeren in waterbalans modellen en het is eenvoudig uit te breiden voor andere toepassingen (Moriasi et al., 2007). Verder geeft de RVE slechte modelprestaties duidelijk aan (Gupta et al., 1999). De RVE-score is erg nuttig wanneer vooral gemiddelden of (dag)totalen bepaald moeten worden en in mindere mate een bepaalde trend.

RMSE-observations standard deviation ratio (RSR)

Een andere veel gebruikte indicator voor modellen is de wortel uit de gemiddelde kwadratische afwijking (RMSE = Root Mean Square Error). Een waarde van $RMSE = 0$ is hierin een perfecte simulatie (Moriasi et al., 2007). Waarden van minder dan de helft van de standaarddeviatie van de gemeten data kunnen beschouwd worden als een indicatie van een betrouwbaar model (Singh et al., 2004). Op basis van aanbeveling door Singh et al. (2004) is de gestandaardiseerde statistische methode "RMSE-observations standard deviation ratio" (RSR) ontwikkeld door Moriasi et al. (2007), waarbij de RMSE gedeeld wordt door de standaarddeviatie van de gemeten data (Moriasi et al., 2007). RSR wordt als volgt beschreven:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - y_{isim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - y_{mean})^2}}$$

RSR biedt het voordeel ten opzichte van RMSE dat waarden genormaliseerd zijn en gerapporteerde waarden dus uitwisselbaar zijn. Dit maakt classificatie van waarden mogelijk (Moriassi et al., 2007). Het theoretische bereik van RSR gaat van 0 tot ∞ , met 0 als optimale waarde.

Model prestatie classificaties

Moriassi et al. (2007) rapporteren de classificaties 'Very Good', 'Good', 'Satisfactory' en 'Unsatisfactory' voor NSE, RVE en RSR voor verschillende scores, samengevat in onderstaande tabel.

Performance Rating	NSE	RVE (%)	RSR
Very Good	0,75 - 1,00	+/- 10	0,00 - 0,50
Good	0,65 - 0,75	+/- 10 - 15	0,50 - 0,60
Satisfactory	0,50 - 0,65	+/- 15 - 25	0,60 - 0,70
Unsatisfactory	< 0,50	> +/- 25	> 0,70

4.2. Algemene prestaties van ontwikkelde modellen

De P2, P2.1, P3 en P3.1 methode zijn bij alle gemalen toegepast voor zover daarvoor de nodige input beschikbaar was en de prestaties volgens NSE, RVE en RSR zijn in bijlage 3: *Resultaten* opgenomen. De gemiddelde uitkomsten en de standaard afwijkingen onder de gemalen zijn hieronder weergegeven.

Het is belangrijk om onzekerheden in parameters te scheiden van onnauwkeurigheden veroorzaakt door het model. Om die reden worden de parameters 'oppervlakte' en 'aanvoer' voor de P2 methoden, 'capaciteit' voor de P3 methode en 'vermogen' en 'opvoerhoogte' voor de P3.1 methode gekalibreerd. Het kalibreren gebeurt door deze parameters aan te passen totdat het maximale resultaat voor NSE, RVE en RSR behaald wordt. Deze methode geeft een theoretisch kader van het maximale resultaat dat met de aanwezige data en de ontwikkelde methoden te behalen is, onafhankelijk van de ingestelde parameters.

P2

Hieronder volgen de gemiddelde resultaten en de standaardafwijkingen voor de P2 methoden. Het volledige overzicht van alle afzonderlijke gemalen staan in bijlage 3: *Resultaten*.

P2.0 ongekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Gemiddeld	-0,2538	0,0758	1,0660
Standaard afwijking	0,8287	0,4288	0,3631

Het model presteert bij alle gemalen onvoldoende voor een accurate simulatie. Enkel de gemalen uit Rijssen-Holten (Twenhaarsveld, Veenweg, Drostenstraat) komen op een voldoende tot zeer goed RVE uit, wat mogelijk met de relatief eenvoudige vorm van de put te maken heeft. Opvallend is de zeer grote spreiding in zowel NSE als RVE, wat betekent dat de afwijking op enkele plaatsen groot is. Oorzaak hiervan kan de meetfrequentie zijn (zie hoofdstuk 4.3) of een onregelmatige aanvoer gedurende de pompcyclus. Er is geen consequente over- of onderschatting vast te stellen.

P2.0 gekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Gemiddeld	0,1624	0,0510	0,8509
Standaard afwijking	0,7108	0,0753	0,3602

Het kalibreren van de modellen heeft een enorme invloed op het resultaat. Alle drie meetwaarden worden aanzienlijk verbeterd, waarbij vooral de spreidingsmaat in RVE in het oog valt. Alle gemalen presteren hier goed tot zeer goed. Dit is te verklaren doordat de maatvoering van veel putten en kelders zeer beperkt in kaart zijn gebracht, wat een grote onnauwkeurigheid geeft. Nauwkeurige maatvoering is dus zeer aan te bevelen.

P2.1	NSE	RVE	RSR
Gemiddeld	-0,3580	0,0998	1,0948
Standaard afwijking	0,9777	0,3019	0,4312

De P2.1 methode met een variabele instroom is geen verbetering ten opzichte van de P2.0 methode met een constante (gekalibreerde) instroom. Wanneer er echter niets bekend is over de instroom, kan deze methode wel een aanknopingspunt geven voor een geschatte grootte.

P3

Hieronder volgen de gemiddelde resultaten en de standaardafwijkingen voor de P3 methoden. Het volledige overzicht van alle afzonderlijke gemalen staan in bijlage 3: *Resultaten*.

P3.0 ongekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Gemiddeld	0,0488	-0,2748	0,8594
Standaard afwijking	0,9526	0,2777	0,5155

Het model presteert zeer wisselend per gemaal, uiteenlopend van zeer slecht (Arnhem Kampeercentrum) tot zeer goed (Amersfoort Kabof), afhankelijk van de kwaliteit van de aangeleverde parameters. Er is een consequente overschatting waar te nemen in de RVE. Over het algemeen lijkt deze methode beter te presteren dan de P2 methode.

P3.0 gekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Gemiddeld	0,2495	0,0397	0,7990
Standaard afwijking	0,5740	0,0553	0,3434

Na kalibratie is er een duidelijk verbetering zichtbaar in zowel NSE als RVE. De spreidingsmaat is bij alle meetwaarden sterk afgenomen. Alle gemalen komen tot een goede tot zeer goede RVE, terwijl NSE en RSR in de meeste gevallen onvoldoende blijft. Arnhem Rijkerswoerd en Amersfoort Kabof komen op alle metingen uit op zeer goede resultaten, waarbij Kabof dat ongekalibreerd ook al deed.

P3.1	NSE	RVE	RSR
Gemiddeld	0,6357	0,0061	0,5662
Standaard afwijking	0,2824	0,0363	0,2414

De P3.1 methode is slechts bij vier gemalen getoetst (Molenbeke, Rijkerswoerd, Kampeercentrum en Kabof), omdat voor deze methode zeer specifieke data nodig is die niet overal voorhanden is. Over het algemeen komt deze methode tot goede resultaten, al is er geen verbetering zichtbaar ten opzichte van de gekalibreerde P3 methode.

4.3. Theoretische validatie bij verschillende scenario's

Welke scenario's zijn te onderscheiden die van invloed kunnen zijn op de uitkomst van het model?

Modellen kunnen beïnvloed worden door scenario's waarmee niet direct rekening wordt gehouden in het model. Bepaalde variabelen worden niet of slecht gemodelleerd of de gegevens zijn niet toereikend. Ook kan de kwaliteit van data het resultaat beïnvloeden. Het is belangrijk om scenario's te onderscheiden die van invloed kunnen zijn op het model en om inzicht te krijgen in het gevolg dat een bepaald scenario kan hebben op de uitkomst van het model. Hieronder volgen een aantal scenario's.

Capaciteitsverlies door slijtage

Naarmate de pompen meer bedrijfsuren gemaakt hebben, zullen ze steeds meer aan slijtage onderhevig zijn. Een mogelijk gevolg hiervan is dat het vermogen na verloop van tijd afneemt en niet meer overeenkomt met de opgegeven specificaties. De nauwkeurigheid van het P3 model kan dus tijdafhankelijk zijn. Een split-sample test moet uitwijzen of er een capaciteitsafname door slijtage op langere termijn plaats vindt. Dit wordt getoetst door data van de debietmeter over een zo groot mogelijke periode te vergelijken. Voor de meeste gemalen betreft dit data van medio 2012 als vroege sample en medio 2013 als late sample. Om de steekproef representatief te houden wordt data van een hele maand verzameld, waarin enkele honderden pompcycli voorkomen.

Van elke afzonderlijke cyclus wordt het maximale debiet geregistreerd. Niet elke cyclus zal exact hetzelfde maximale debiet registreren. Om de invloed van variatie te beperken, wordt daarom gekozen om het gemiddelde maximale debiet van alle pieken als maatstaf te nemen voor die maand. Per gemaal wordt het verschil tussen twee samples in verhouding tot de tussenliggende periode bekeken om een inschatting te maken van mogelijk capaciteitsverlies.

Met de huidige data blijkt het vrijwel niet mogelijk om het 'absolute' maximale vermogen van een pomp te bepalen. Per cyclus is er een grotere spreiding in het gemeten debiet dan een eventueel capaciteitsverlies zou zijn. Daarnaast draaien sommige frequentiegeregelde pompen niet altijd op maximaal vermogen om zo energie te besparen. Capaciteitsverlies door slijtage is daarom niet te bepalen wanneer er onvoldoende data aanwezig is over bijvoorbeeld stroomverbruik of toerental. Voorts zijn de oudste datasets slechts één tot anderhalf jaar oud. Om de gevolgen van slijtage goed in beeld te krijgen, is waarschijnlijk een grotere tijdsperiode nodig.

Samenloop van pompen

De meeste rioolgemalen hebben twee of drie pompen die in een normaal scenario altemnerend werken. In het geval van hoogwater zullen bij sommige gemalen twee pompen tegelijk werken om de capaciteit te maximaliseren. Hierdoor zal de belasting op het leidingsysteem hoger zijn dan normaal en het rendement per pomp lager zijn, waardoor het vermogen van elke pomp afzonderlijk niet zomaar opgeteld kan worden. Het is belangrijk om te weten hoeveel de capaciteit in totaal toeneemt. Indien alle gemalen ongeveer even veel in capaciteit toenemen, zou men een multiplicator aan het debiet voor enkel bedrijf kunnen toevoegen. Indien de capaciteitstoename sterk verschilt, zal voor elk gemaal afzonderlijk bepaald moeten worden wat de capaciteit bij samenloop is.

De capaciteitstoename bij samenloop wordt gecontroleerd door het maximale debiet, geregistreerd door de debietmeter, gedurende de samenlooperperiode te vergelijken met een afvoerpiek bij enkelvoudig bedrijf direct voor en na de samenloop. Door het tijdsverschil tussen twee cycli zo klein mogelijk te houden, wordt zo goed mogelijk rekening gehouden met vergelijkbare condities van pompen en andere invloeden. Samenloop komt slechts enkele keren per jaar voor, vaak gedurende een vrij korte tijd. Daarom is er maar weinig data hieromtrent aanwezig.

De capaciteit van het gemaal bij het inschakelen van een tweede pomp wordt verhoogd met 60 (Molenbeke) tot 92 (Kabof) procent. Door deze grote spreidingsmaat is het verstandig om een apart debiet te specificeren voor dit scenario, zoals bij de P3 methode behoort te gebeuren.

Opmerkelijk is dat dit scenario vrijwel niet te simuleren is volgens de P2 methode. Dit is te verklaren door het feit dat er slechts een tweede pomp geactiveerd wordt wanneer de put zich binnen korte tijd zeer snel vult, zoals bij een zeer hevige

regenbui. Tijdens het pompen zal de aanvoer in de meeste gevallen ook zeer groot blijven, waardoor het niveau in de put slechts langzaam daalt. De P2 methode zou hieruit opmaken het debiet juist lager is dan normaal omdat het geen rekening kan houden met de hoge aanvoer.

Meetfrequentie

Over het algemeen neemt de nauwkeurigheid van een model toe naarmate metingen frequenter gedaan worden, omdat een gedetailleerder beeld kan worden gegeven. Het zeer frequent doorsturen van data is echter kostbaar, waardoor een economische afweging moet worden gemaakt hoe vaak data gemeten en verstuurd wordt.

Bij een voldoende grote steekproef kan data met verschillende meetfrequenties vergeleken worden om te bepalen hoe groot de invloed op de nauwkeurigheid van het model is.

Lage logfrequentie

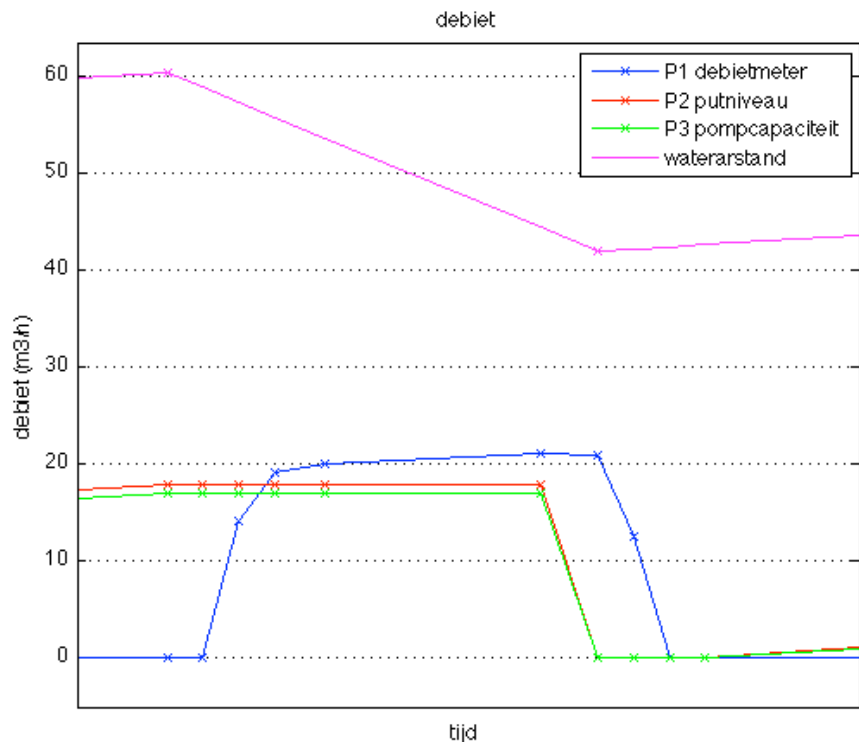
Bij gemalen in de gemeente Rijssen-Holten wordt het waterpeil slechts gelogd op het in- en uitslagpunt van de pomp. Het verloop hiertussen wordt volledig lineair geïnterpoleerd.

Door de constant veronderstelde daalsnelheid is er voor de P2 methode geen mogelijkheid om het optoeren van de pomp te simuleren. In werkelijkheid neemt het debiet na de start geleidelijk toe voordat het maximum bereikt wordt, terwijl het model direct op vol vermogen begint (zie afbeelding 7). Het model zal hierdoor een overschatting maken.

Een andere opmerkelijkheid is dat de waterstroom niet direct ophoudt wanneer de pomp stopt. Door het "Siphon effect" van een stroom

water in een luchtvrije buis, wordt er nog enig water aangezogen voordat de waterstroom tot een halt komt. Waarschijnlijk daalt het water in de put dus nog iets verder dan het opgegeven uitslagpunt, wat echter niet meer gemeten wordt. Hierdoor geeft het model geen waterstroom aan en zal het model een onderschatting maken.

Beide fenomenen heffen elkaar hier gemiddeld redelijk op, waardoor een goed RVE resultaat mogelijk is. De trend ziet echter een verschuiving in de tijd, wat terug te zien is in slechte NSE en RSR uitkomsten. Men kan er echter niet vanuit gaan dat het optoeren aan het begin en het Siphon effect aan het einde elkaar altijd precies neutraliseren.



Afbeelding 7: debiet bij lage niveau-meetfrequentie (gemaal "Veenweg").

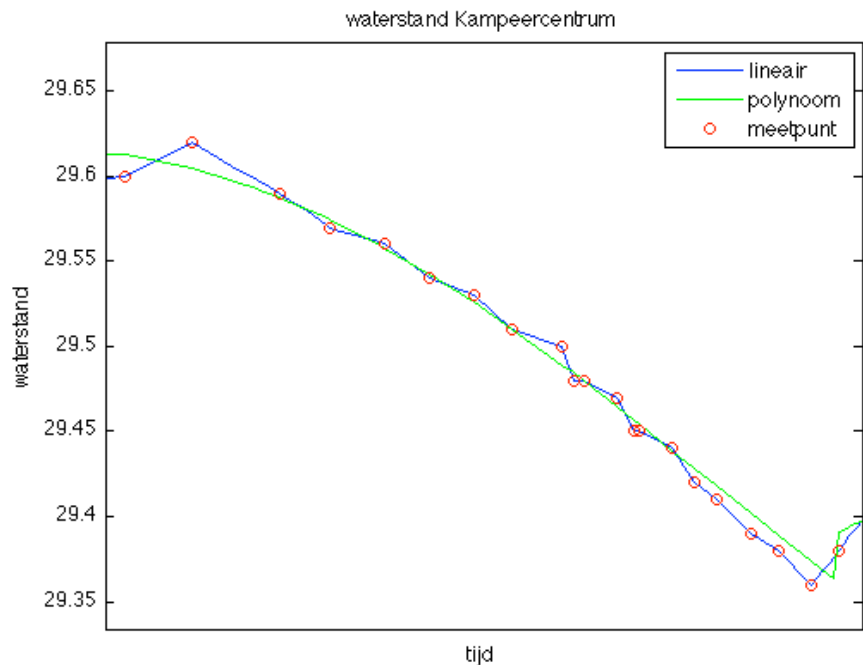
Hoge logfrequentie

Een hoge logfrequentie zorgt voor een beter resultaat van het model. “Kabof” logt bijvoorbeeld één keer per minuut en komt, in combinatie met nauwkeurige specificaties van de pompen, tot een zeer goed resultaat. Bij een nog hogere frequentie ontstaat het nieuw probleem zoals bij gemaal “Kampeercentrum” het geval is, waar de waterstand alle vijf seconden gelogd wordt.

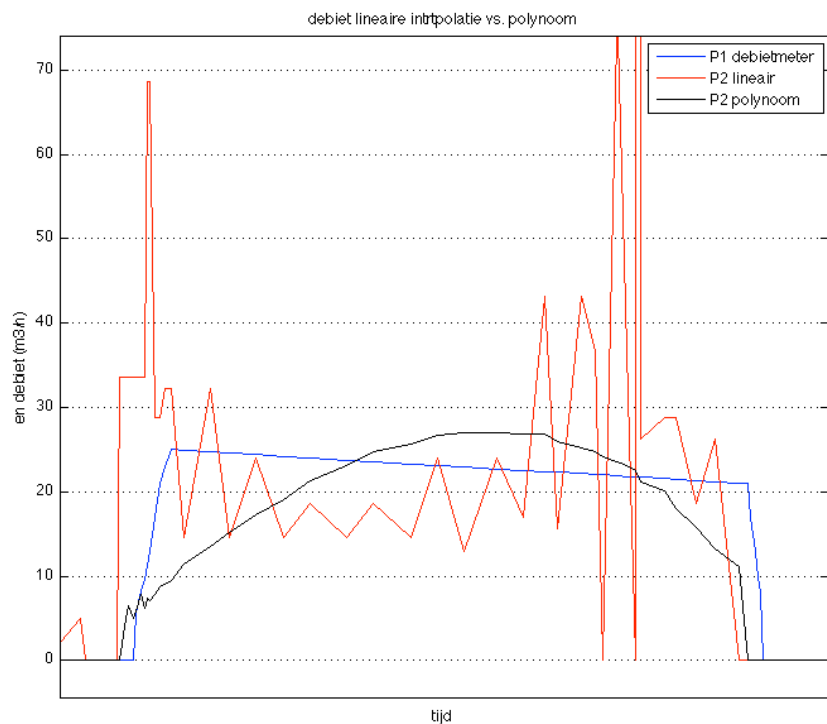
Niveaumetingen worden afgerond op centimeters. Wanneer de daling tussen twee metingen erg klein is door de hoge frequentie, kan deze afronding erg grof uitvallen. Bij gemaal “Kampeercentrum” komt het bijvoorbeeld voor dat er soms zo snel achter elkaar gelogd wordt, dat het niveau in die tijd minder dan een centimeter is gedaald, waardoor twee keer dezelfde waarde wordt gelogd. Een volgende waarde kan weer een daling van één of twee centimeter laten zien, om vervolgens weer een zelfde waarde te noteren. Daarnaast komt het ook voor dat een volgende waarde ineens een centimeter hoger gelogd wordt, mogelijk door kleine golfjes in het water. In de logdata ontstaan op deze manier “trapjes” van snel dalen, langzaam dalen, gelijk blijven en stijgen (afbeelding 8).

Het debiet volgens de P2 methode is in principe een afgeleide vorm van de niveaumetingen. Wanneer de niveaumeting uit “trapjes” bestaat, zal de debietberekening telkens hevig uitslaan tussen te hoge en te lage waarden (afbeelding 9). Wanneer men enkel kijkt naar het totaal of het gemiddelde van een cyclus (RVE), is het resultaat redelijk nauwkeurig. De trend is echter helemaal niet te volgen.

Een passende oplossing is een benadering met polynomen om de het niveau te bepalen, in plaats van lineaire interpolatie. Hierbij wordt een vloeiende lijn getrokken die zo goed mogelijk door alle meetpunten



Afbeelding 8: niveaudaling lineair geïnterpoleerd (blauw) en benaderd met een polynoom (groen) (gemaal “Kampeercentrum”).



Afbeelding 9: P2 debiet op basis van lineaire interpolatie (rood) en polynome benadering (zwart) (gemaal “Kampeercentrum”).

gaat volgens de kleinste kwadratenmethode (afbeelding 8). Deze methode is, in tegenstelling tot interpolatie, niet gevoelig voor kleine verstoringen en geeft daardoor een veel “zuiverdere” afgeleide (afbeelding 9) en daarmee een betere benadering voor het debiet. Dit blijkt ook uit de testresultaten, weergegeven in onderstaande tabel en in bijlage 3: *Resultaten*. De NSE en RSR gaan van een onvoldoende naar een zeer goed resultaat.

Het gebruik van een benaderingsmethode is dus zeer geschikt om de nauwkeurigheid te verhogen, echter is de berekening ervan redelijk complex en kan het veel rekenkracht kosten. Er zal een economische afweging moeten worden gemaakt of het verstandiger is om deze methode te gebruiken of de logfrequentie te verlagen.

P2 (gekalibreerd)	NSE	RVE	RSR
Kampeercentrum lineair	0,1431	-0,0586	0,9257
Kampeercentrum polynoom	0,7514	0,0292	0,4986

4.4. Onbekende scenario's

De volgende scenario's zijn niet gevalideerd:

Temperatuur en viscositeit van afvalwater

Het pompvermogen wordt gespecificeerd bij een bepaalde temperatuur en voor een bepaalde vloeistof, doorgaans 40 graden Celcius en voor schoon water. De temperatuur van het water en de installatie kunnen over het jaar flink verschillen. Daarnaast is afvalwater sterk vervuild, wat de viscositeit van het water beïnvloedt. De grootste schommeling in viscositeit wordt in praktijk veroorzaakt door hevige regenbuien die het afvalwater “verdunnen”.

De praktijk zal hier dus afwijken van de opgegeven specificaties, wat de onnauwkeurigheid van het P3 model vergroot. Er is geen data aanwezig over de temperatuur of de samenstelling van de vloeistof. De invloed hiervan op de uitkomst van het model kan dus niet getoetst worden.

Meerdere gemalen pompen tegelijk in de zelfde leiding

In enkele gevallen sluiten meerdere gemalen aan op de zelfde afvoerende leiding en pompen deze ook tegelijk. Net als in het geval van samenloop is de belasting op het leidingsysteem hoger dan normaal, waardoor de maximale capaciteit niet gehaald kan worden. In het geval dat een gemaal veel groter en krachtiger is dan het andere, zal het kleinere gemaal het water helemaal niet meer kunnen wegpompen of kan het zelfs voorkomen dat het water terug stroomt naar het kleinere gemaal. Dit lijkt onder andere voor te komen bij gemalen in Leusden-Zuid waar debietmeters soms negatieve debieten registreren. In praktijk wordt dit probleem doorgaans voorkomen door (bal)keerklappen in de leiding. Om de invloed van dergelijke complexe leidingsystemen te bepalen, is gedetailleerde kennis nodig van het leidingsysteem. Dit is in veel gevallen niet voorhanden waardoor dit scenario niet verder wordt uitgelicht in dit onderzoek.

Merk en type pomp

Afhankelijk van het merk, type of soort pomp kan het pompproces anders verlopen. Een pomp heeft bijvoorbeeld een zekere tijd nodig om op te toeren voordat het het maximale vermogen wordt bereikt. De tijd die hiervoor nodig is kan per pomp verschillen. Wanneer de steekproef groot genoeg is, kan een conclusie volgen of er onderscheid te maken is in het pompproces tussen diverse typen of soorten pompen. Helaas is de steekproef in dit onderzoek te klein om hier uitspraken over te doen.

5. Conclusies

In dit onderzoek zijn een aantal methoden ontwikkeld waarmee het debiet van een rioolgemaal gemodelleerd kan worden. De nodige input en implementatie zijn gegeven en de nauwkeurigheid van de methoden zijn onderzocht door ze te vergelijken met metingen van een debietmeter.

In deze conclusie volgt het antwoord op de laatste en belangrijkste onderzoeksvraag:

Hoe betrouwbaar en nauwkeurig zijn de ontwikkelde methoden om debieten te bepalen op basis van andere metingen?

Methode P2, gebaseerd op het waterniveau in de put, scoort met aangeleverde specificaties bij vrijwel alle gemalen onvoldoende op zowel NSE, RVE als RSR. Er is een grote spreiding in resultaten te zien, maar geen consequente over- of onderschatting. Kalibreren van de parameters (putdimensies en aanvoer) verbetert de score aanzienlijk, met name de RVE, maar in veel gevallen blijven de NSE en RSR onvoldoende. De meetfrequentie van het waterpeil is van grote invloed op het resultaat. De beste resultaten werden behaald bij een meetfrequentie van één keer per minuut. Zowel hogere als lagere frequenties verminderen de nauwkeurigheid.

Methode P2 blijkt erg gevoelig te zijn voor onzekerheden in putdimensies en aanvoer. Deze onzekerheden zijn lastig in kaart te brengen doordat putten vaak zeer onregelmatig van vorm zijn en daardoor moeilijk perfect op te meten zijn. De schatting van de aanvoer is niet met zekerheid vast te stellen doordat deze niet tijdens het pompproces gemeten kan worden, anders dan met een debietmeter in de aanvoerende buis. Dat zou natuurlijk aan het doel van het onderzoek voorbij gaan.

Methode P2.1 maakt de wateraanvoer variabel per cyclus, in tegenstelling tot P2. Dit blijkt geen verbetering in nauwkeurigheid op te leveren ten opzichte van methode P2. Wel biedt P2.1 een mogelijkheid om een redelijke schatting te maken van de wateraanvoer wanneer hiervoor geen andere schattingen bekend zijn. Voor de P2.1 methode is het nog noodzakelijker dat de oppervlakte in de put op elke hoogte bekend is. Elke fout hierin komt dubbel terug in de berekening van het debiet, namelijk direct in de peildaling en indirect bij het berekenen van de aanvoer aan hand van de peilstijging. Waarschijnlijk wordt het tegenvallende resultaat van P2.1 dan ook door deze onnauwkeurigheid veroorzaakt.

Methode P3, gebaseerd op pompgegevens, geeft een wisselend resultaat per gemaal afhankelijk van de aangeleverde specificaties, uiteenlopend van zeer slecht tot zeer goed voor alle meetwaarden. Er is een consequente overschatting waar te nemen. Over het algemeen lijkt deze methode beter te presteren dan de P2 methode. Na kalibratie van de capaciteit is er een duidelijke verbetering zichtbaar, al blijven NSE en RSR in veel gevallen onvoldoende. Capaciteitsverbetering door samenloop wisselt sterk per gemaal en dienen dus gespecificeerd te worden. De wisselende resultaten in ongekalibreerde toestand zijn te wijten aan slecht ingestelde capaciteitsparameters. Het achterblijven van NSE en RSR scores wordt in veel gevallen veroorzaakt doordat het optoeren en het 'Siphon effect' niet in het model zijn verwerkt.

Methode P3.1 komt over het algemeen tot goede resultaten, al is er geen verbetering zichtbaar ten opzichte van de gekalibreerde P3 methode. Evenals de P2.1 methode is de P3.1 methode wel een goed uitgangspunt wanneer bepaalde parameters niet bekend zijn. De capaciteit, zoals gebruikt in de P3.0 methode, is berekend op basis van vermogen (in principe bekend bij de fabrikant) en de opvoerhoogte, waarmee de P3.1 methode feitelijk ten grondslag ligt aan de P3.0 methode. Het pompvermogen en de opvoerhoogte moeten dus in alle gevallen bekend zijn om een P3 methode te gebruiken. Wanneer het economischer blijkt om vervolgens een constante capaciteit aan te houden, is dit even goed bruikbaar als een variabele capaciteit.

Kalibratie heeft een grote invloed op het resultaat, wat spreekt voor het belang van correcte parameters. Door grote onzekerheden in parameters is het af te raden om de P2 methoden te gebruiken. Mits het vermogen van pompen en de opvoerhoogte (inclusief verliezen door wrijvingsweerstand) bekend zijn, zijn beide P3 methoden wel geschikt om ten minste gemiddelden of (dag)totalen te bepalen.

6. Aanbevelingen

6.1. Resultaten gebruiken

Op grond van de resultaten van dit onderzoek blijkt dat de P2 methoden, op basis van het waterniveau in de put, een grotere onzekerheid met zich dragen die bovendien moeilijker te kalibreren zijn dan de P3 methoden. Het is daarom verstandiger om de P2 methoden niet te gebruiken om debieten te modelleren en zich op verdere ontwikkeling van de P3 methoden te concentreren.

Mits juist gekalibreerd is de P3 methode goed in staat om het totale verpompte volume te bepalen. Indien enkel een totaal of gemiddeld volume over een periode van een aantal cycli belangrijk is, biedt de P3 methode voldoende uitkomst als alternatief voor een debietmeter. Wanneer men echter zeer tijdspecifieke informatie wil over het debiet, zal de P3 methode door tijdsverschuivingen ontoereikend zijn. In dat geval is een debietmeter noodzakelijk.

Het kalibreren van de pompcapaciteit is erg belangrijk voor een betrouwbaar resultaat. Een praktische manier om dit te doen is door een put met een bekende hoeveelheid afvalwater te vullen en vervolgens te meten hoe lang het duurt om deze hoeveelheid weg te pompen. Hieruit kan worden afgeleid hoeveel water per tijdseenheid wordt afgevoerd en wat dus de capaciteit van de pomp in die specifieke situatie is.

6.2. Resultaten verbeteren

Na dit onderzoek blijkt dat er redelijk wat variatie zit in het maximale debiet per cyclus, geregistreerd door de debietmeter. Waarschijnlijk wordt er in veel gevallen niet op vol vermogen gepompt en kan het vermogen daardoor verschillen. Dit maakt het moeilijk om capaciteitsverlies op lange termijn te bepalen, maar ook wordt hiermee een nieuwe onzekerheid bloot gelegd voor de P3 methoden. Hier zal de capaciteit bij de P3 methode en het vermogen bij de P3.1 constant worden verondersteld, wat dus niet het geval is. Tevens kan dit de gemiddelde overschatting van de P3 methode verklaren.

Mogelijk bestaat er een relatie tussen het energieverbruik en het vermogen van de pomp. Als vervolg op de P3 en P3.1 methoden zou een methode ontwikkeld kunnen worden waarbij een het energieverbruik van de pomp in de vergelijking wordt meegenomen om de variatie in vermogen te ondervangen en de nauwkeurigheid te verhogen. Nog beter zou het zijn om directe data over het toerental van een pomp in het model te verwerken.

7. Bronnen

- ASCE. (1993). *Criteria for evaluation of watershed models*. J. Irrigation Drainage Eng. 119(3): 429-442.
- Booij, M. J. (2011). *Inleiding Waterbeheer collegedictaat*. Enschede: Universiteit Twente.
- Booij, M. J. (2012). *Inleiding Waterbeheer Modelleerlijn collegedictaat*. Enschede: Universiteit Twente.
- Borah, D. K., Bera, M. (2004). *Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications*. Trans. ASAE 47(3): 789-803.
- Fox, R. W., Pritchard, P. J. & Mc Donald, A. T. (2010). *Introduction to Fluid Mechanics* (zevende druk). Hoboken: John Wiley & Sons Inc.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., Yapo, P. O., (1999). *Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration*. J. Hydrologic Eng. 4(2): 135-143.
- Kanters B.V., *Persleiding Rijkerswoerd*. Terborg.
- Legates, D. R., McCabe, G. J. (1999), *Evaluating the Use of "Goodness-of-Fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation*, Water Resour. Res., 35(1), 233-241
- McNally. *Pump, centrifugal pumps, PD pumps, seals & mechanical seals data*. <http://www.mcnallyinstitute.com>.
- Messelaar, A. J. M. (2011). *Programma van Eisen Implementatie regionaal meetprogramma afvalwatersystemen Vallei en Eem*. Projectgroep Meten en Monitoring Platform Water Vallei en Eem.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007), *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*, Transactions of the ASABE, 50 (3), 885-900.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*, Journal of Hydrology, 10 (3), 282-290.
- Refsgaard, J. C. (1997). *Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models*. J. Hydrology 198(1): 69-97
- Singh, J., Knapp, H. V., Demissie, M. (2004). *Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT*. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
- Steehouder, M. et al. (2006). *Leren Communiceren* (vijfde druk). Groningen: Wolters-Noordhoff.

8. Bijlage

8.1. Bijlage 1: Voorbeeld datasheet

Onderstaande tabel is een voorbeeld van 30 logs van de datasheets die uit H2gO als .csv geëxporteerd worden en in MATLAB geladen worden. De gebruikte datasheets zijn tussen 20.000 en 200.000 logs. Kolom 1 bevat de datum, kolom 2 de tijd, kolom 3 het niveau in de put (mNAP), kolom 4 het debiet (m³/u). Kolom 5, 6 en 7 geven het in- en uitschakelmoment van de pompen aan.

datum	tijd	niveau(mNAP)	debiet(m ³ /u)	pomp 1	pomp 2	pomp 3
01-01-13	00:00:22	8.26		0.0		
01-01-13	00:00:26	8.26				
01-01-13	00:00:32				1.0	
01-01-13	00:00:33	8.26				
01-01-13	00:04:35		38.0			
01-01-13	00:05:26	8.16				
01-01-13	00:07:50	8.1			0.0	
01-01-13	00:09:35		0.0			
01-01-13	00:10:26	8.15				
01-01-13	00:14:35		0.0			
01-01-13	00:15:26	8.23				
01-01-13	00:19:35		0.0			
01-01-13	00:20:26	8.31				
01-01-13	00:24:35		0.0			
01-01-13	00:25:12	8.4		1.0		
01-01-13	00:25:26	8.4				
01-01-13	00:29:35		23.0			
01-01-13	00:30:26	8.37				
01-01-13	00:34:35		23.0			
01-01-13	00:35:26	8.33				
01-01-13	00:39:35		23.0			
01-01-13	00:40:26	8.29				
01-01-13	00:44:35		23.0			
01-01-13	00:45:26	8.27				
01-01-13	00:49:35		22.0			
01-01-13	00:50:26	8.24				
01-01-13	00:54:35		22.0			
01-01-13	00:55:26	8.22				
01-01-13	00:59:35		22.0			
01-01-13	01:00:26	8.22				

8.2. Bijlage 2: Script

Het script bestaat uit drie delen. In deel één wordt data ingeladen, geïnterpoleerd en worden uit de datamatrix concrete vectoren gemaakt. Verder worden hier diverse parameters ingevuld voor elke locatie. In deel twee worden bewerkingen op de vectoren uitgevoerd waarmee het debiet uiteindelijk berekend wordt. In deel drie worden de resultaten gecontroleerd.

Tussen de code staan waar nodig opmerkingen met nadere uitleg. Daarnaast staat achter (bijna) elke regel uitleg in het groen.

Deel 1: data laden & fitten

Als voorbeeld worden hier de gekalibreerde parameters van locatie 'Arnhem Rijkerswoerd' gebruikt.

```
% inladen data
S = importdata('databestand.csv');
data = S.data;
date = S.textdata;

% bestand als structure laden
% data in numerieke matrix plaatsen
% datum + tijd in cell array plaatsen

z = length(data);
% lengte van meetreeksen

% parameters per locatie
opp1 = 25;
opp2 = 32;
opp3 = 34;
opp4 = 37;
opp5 = 40;
opp6 = 46;
opp7 = 50;
opp8 = 60;
opp9 = 66;
opp10 = 70;

constante_instroom = 37;
% constant veronderstelde instroom (m3/h)

vermogen_1 = 22.0;
vermogen_2 = 22.0;
vermogen_3 = 22.0;
% vermogen pomp 1 (kW)
% vermogen pomp 2 (kW)
% vermogen pomp 3 (kW)

cap1 = 210;
cap2 = 210;
cap3 = 210;
pomp_eff = 0.67;
% theoretische capaciteit pomp 1 (m3/s)
% theoretische capaciteit pomp 2 (m3/s)
% theoretische capaciteit pomp 3 (m3/s)
% efficiëntie pomp (hydraulisch/mechanisch vermogen)

inschakel = 3.90;
uitschakel = 3.35;
% hoogte inschakelpunt (mNAP)
% hoogte uitschakelpunt (mNAP)

pomphoogte = 3;
opvoerhoogte = 24.5;
% hoogte pomp-as (mNAP)
% opvoerhoogte vanaf pomp-as (m)

% dagen en tijdstippen in aparte cell array's zetten
day = date(2:end,1);
time = date(2:end,2);

% vectoren met metingen maken
niveau = data(:,1);
debiet = data(:,2);
pomp_start = data(:,3:5);
% Niveau in put (mNAP)
% debiet volgens debietmeter (P1)
% Start/Stop pompen

% juiste tijdsintervallen maken
t = datenum(day,'dd-mm-yy') + datenum(time,'HH:MM:SS') - datenum('0:0','HH:MM');
```

Datenum('dd-mm-yy') maakt van datum in cell array een numerieke waarde (double) gelijk aan aantal dagen sinds 01-01-0000.

Datenum('HH:MM:SS') maakt van tijd in cell array een numerieke waarde (double) gelijk aan aantal dagen (tijd in decimalen). 6:00 uur is dus 0.25 dagen) sinds 01-01-0000 tot het tijdstip op 01-01 in uitgevoerde jaar.

Datenum('0:0','HH:MM') dient ter correctie van dubbele dagen van 01-01-0000 tot 01-01-<uitvoerjaar>.

't' is een dus numerieke vector met tijdstippen in dagen sinds 01-01-0000.

Metingen zijn 'scattered data'. Locaties zonder waarde (NaN) moeten geïdentificeerd en geïnterpoleerd worden.

```
% indices met NaN vinden
iddebiet = find(~isnan(debiet));           % indices met waarde vinden
idniveau = find(~isnan(niveau));          % indices met waarde vinden
idpomp   = isnan(data(:,3:5));            % true-false matrix maken

% op indices met NaN interpoleren
debiet = (interp1(t(iddebiet),debiet(iddebiet),t,'linear'));
niveau_i = (interp1(t(idniveau),niveau(idniveau),t,'linear'));

%pomp AAN/UIT interpoleren
pomp_start_i = pomp_start;                % nieuwe matrix maken

for n=1:3
    if idpomp(1,n) == 1
        pomp_start_i(1,n) = 0;            % maak startwaarde 0 als die NaN is
    end
end

for m = 1:3
    for n = 2:z
        if idpomp(n,m) == 1
            pomp_start_i(n,m) = pomp_start_i(n-1,m); % vervangen door laatst bekende
        end
    end
end

samenloop = find(sum(pomp_start_i) > 1); % bepaal indices met meer dan één actieve pomp
```

Polynomen

In onderstaande code wordt de polynoom berekend voor niveaumetingen met hoge frequenties. De polynoom wordt berekend voor het interval van een complete vul- en pompcyclus, waarbij deze gereset wordt zodra één van de pompen uit gaan (vector “zero”).

Deze code kan onderaan deel 1 “data laden & fitten” worden toegevoegd.

```

pompen = (data(:,3:5));
zero = sort([find(pompen(:,1)==0) ; find(pompen(:,2)==0) ; find(pompen(:,3)==0)]); % Alle indices waar een pomp
% uitschakelt worden bepaald

polynoom = 0*ones(1,z);

s = 1; % startindex voor berekening polynoom
for i = zero % eindindex is wanneer de pomp uitschakelt

    c = polyfit(t(s:i),niveau_i(s:i),4); % coëfficiënten voor polynoom worden vastgelegd. Een vierde graads
    % polynoom blijkt goede resultaten te geven.
    polynoom(s:i) = polyval(c,t(s:i)); % op alle logtijdstippen worden punten toegewezen die op de
    % polynoomlijn liggen

    s = i; % een nieuwe startindex wordt vastgelegd
end

```

Deel 2a: Modelbewerkingen (P2)

Hieronder volgt de algemene code voor de P2 methoden. Daarna volgen de aanvullende code voor respectievelijk de P2.0 en de P2.1 methode als vervolg op de algemene code.

```

verschil_niveau = diff(niveau_i); % verschil waterstand (m)
interval = diff(t)*24; % verschil tijd (h)

```

Een nieuwe reeks met oppervlakten wordt aangemaakt op basis van het waterniveau in de put. Wanneer het waterniveau op een bepaald tijdstip boven een bepaalde hoogte komt, wordt een nieuwe oppervlakte, zoals gedefinieerd in deel 1, toegewezen aan dat tijdstip.

```

niv = linspace(uitschakel, inschakel, 11); % Het niveauverschil tussen uit- en inschakelpunt wordt verdeeld in 10
% "lagen" die een afzonderlijke oppervlakte krijgen

opp(1:z) = opp1;
opp(find(niveau_i >= niv(2))) = opp2;
opp(find(niveau_i >= niv(3))) = opp3;
opp(find(niveau_i >= niv(4))) = opp4;
opp(find(niveau_i >= niv(5))) = opp5;
opp(find(niveau_i >= niv(6))) = opp6;
opp(find(niveau_i >= niv(7))) = opp7;
opp(find(niveau_i >= niv(8))) = opp8;
opp(find(niveau_i >= niv(9))) = opp9;
opp(find(niveau_i >= niv(10))) = opp10;

```

P2.0

Gebruik onderstaande code als aanvulling voor de P2.0 methode:

```

debiet_instroom = constante_instroom;

debiet_p2 = opp(1:z-1)' .* -verschil_niveau ./ (interval) + debiet_instroom;
iddeb = find(verschil_niveau > 0); % wanneer niveau stijgt
debiet_p2(iddeb) = 0; % wordt het debiet 0

```

Debiet_p2 is de vector met debieten volgens de P2.0 methode.

P2.1

Gebruik onderstaande code als aanvulling voor de P2.1 methode.

Tijdens het pompen stroomt er ook water in de put. Omdat het water daalt kan deze niet gemeten worden en moet hiervan een schatting gemaakt worden op basis van de stijgsnelheid voor het pompen.

```

debiet_instroom = opp(1:z-1)' .* verschil_niveau ./ interval; % vector met instroomdebiet maken

% als niveau in het begin al daalt, wordt deze op 0 gezet omdat hiervan geen instroom geschat kan worden

if debiet_instroom(1) < 0
    debiet_instroom(1) = 0;
end

% Schatting op basis van de gemiddelde stijgsnelheid gedurende de voorafgaande vulperiode

s = 2; % startindex voor berekening gemiddelde instroom
for i = 2:z-1
    gem_debiet_instroom(i) = mean(debiet_instroom(s:i)); % vector met gemiddelde instroom over periode s:i
    if verschil_niveau(i) < 0 % bij daling in put
        gem_debiet_instroom(i) = gem_debiet_instroom(i-1); % blijft gemiddeld instroom debiet gelijk aan laatste positieve
        % waarde
        debiet_instroom(i) = gem_debiet_instroom(i); % actueel "negatief" debiet (want waterstand daalt) wordt
        % vervangen door positief gemiddeld debiet
    end
    if verschil_niveau(i-1) < 0 & verschil_niveau(i) >= 0 % bij nieuwe stijging
        s = i; % berekening gemiddelde instroom wordt nieuw gestart
    end
end

% berekenen debiet
debiet_p2 = opp(1:z-1)' .* -verschil_niveau ./ (interval) + debiet_instroom;
iddeb = find(verschil_niveau > 0); % wanneer niveau stijgt
debiet_p2(iddeb) = 0; % wordt het debiet 0

```

Debiet_p2 is de vector met debieten volgens de P2.1 methode.

Deel 2b: Modelbewerkingen (P3)

Hieronder volgt de algemene code voor de P3 methoden. Daarna volgen de aanvullende code voor respectievelijk de P3.0 en de P3.1 methode als vervolg op de algemene code.

P3.0

Gebruik onderstaande code voor de P3.0 methode:

```

debiet_p3 = pomp_start_i(:,1) .* cap1 + pomp_start_i(:,2) .* cap2 + pomp_start_i(:,3) .* cap3;

debiet_p3(samenloop) = 190;

```

Debiet_p3 is de vector met debieten volgens de P3.0 methode.

P3.1

Gebruik onderstaande code voor de P3.1 methode

```

% waterkolommen berekenen
suction_head = niveau_i - pomphoogte;           % waterkolom voor aanzuiging
discharge_head = opvoerhoogte;                  % waterkolom voor afvoer
pump_head = discharge_head - suction_head;       % netto waterkolom

% capaciteit/debiet per pomp berekenen
cap1 = vermogen_1 .* 1000 ./ (pump_head .* 9810) .* 3600 .* pump_eff;
cap2 = vermogen_2 .* 1000 ./ (pump_head .* 9810) .* 3600 .* pump_eff;
cap3 = vermogen_3 .* 1000 ./ (pump_head .* 9810) .* 3600 .* pump_eff;

% totale debiet berekenen
debiet_p3 = pomp_start_i(:,1) .* cap1 + pomp_start_i(:,2) .* cap2 + pomp_start_i(:,3) .* cap3;

```

Debiet_p3 is de vector met debieten volgens de P3.1 methode.

Deel 3: Controle

Door interpolatie zijn de eerste en laatste paar waarden niet altijd bekend van een aantal reeksen. Daarom is het handig om een onderzoeksperiode te specificeren waarbij de eerste en laatste paar waarden buiten beschouwing worden gelaten.

```

% onderzoeksperiode
m = 50;                                     % begin index
n = z-50;                                  % eind index

% Nash-Sutcliffe coefficient
NS_p2 = 1 - sum((debiet_i(m:n) - debiet_p2(m:n)).^2) ./ sum((debiet_i(m:n) - mean(debiet_i(m:n))).^2);
NS_p3 = 1 - sum((debiet_i(m:n) - debiet_p3(m:n)).^2) ./ sum((debiet_i(m:n) - mean(debiet_i(m:n))).^2);

if NS_p2 > 0.75
    status_nsp2 = genvarname('Very_Good');
elseif NS_p2 > 0.65 & NS_p2 < 0.75
    status_nsp2 = genvarname('Good');
elseif NS_p2 > 0.50 & NS_p2 < 0.65
    status_nsp2 = genvarname('Satisfactory');
else
    status_nsp2 = genvarname('Unsatisfactory');
end

if NS_p3 > 0.75
    status_nsp3 = genvarname('Very_Good');
elseif NS_p3 > 0.65 & NS_p3 < 0.75
    status_nsp3 = genvarname('Good');
elseif NS_p3 > 0.50 & NS_p3 < 0.65
    status_nsp3 = genvarname('Satisfactory');
else
    status_nsp3 = genvarname('Unsatisfactory');
end

% Relative Volume Error
RVE_p2 = sum(debiet_i(m:n) - debiet_p2(m:n)) ./ sum(debiet_i(m:n));
RVE_p3 = sum(debiet_i(m:n) - debiet_p3(m:n)) ./ sum(debiet_i(m:n));

if abs(RVE_p2) < 0.10
    status_RVEp2 = genvarname('Very_Good');
elseif abs(RVE_p2) < 0.15 & abs(RVE_p2) > 0.10
    status_RVEp2 = genvarname('Good');
elseif abs(RVE_p2) < 0.25 & abs(RVE_p2) > 0.15
    status_RVEp2 = genvarname('Satisfactory');
else
    status_RVEp2 = genvarname('Unsatisfactory');
end

```

```

if abs(RVE_p3) < 0.10
    status_RVEp3 = genvarname('Very_Good');
elseif abs(RVE_p3) < 0.15 & abs(RVE_p3) > 0.10
    status_RVEp3 = genvarname('Good');
elseif abs(RVE_p3) < 0.25 & abs(RVE_p3) > 0.15
    status_RVEp3 = genvarname('Satisfactory');
else
    status_RVEp3 = genvarname('Unsatisfactory');
end

% RMSE-observations standard deviation ratio
RSR_p2 = sqrt(sum((debiet_i(m:n)-debiet_p2(m:n)).^2))./sqrt(sum((debiet_i(m:n)-mean(debiet_i(m:n))).^2));
RSR_p3 = sqrt(sum((debiet_i(m:n)-debiet_p3(m:n)).^2))./sqrt(sum((debiet_i(m:n)-mean(debiet_i(m:n))).^2));

if RSR_p2 < 0.50
    status_RSRp2 = genvarname('Very_Good');
elseif RSR_p2 > 0.50 & RSR_p2 < 0.60
    status_RSRp2 = genvarname('Good');
elseif RSR_p2 > 0.60 & RSR_p2 < 0.70
    status_RSRp2 = genvarname('Satisfactory');
else
    status_RSRp2 = genvarname('Unsatisfactory');
end

if RSR_p3 < 0.50
    status_RSRp3 = genvarname('Very_Good');
elseif RSR_p3 > 0.50 & RSR_p3 < 0.60
    status_RSRp3 = genvarname('Good');
elseif RSR_p3 > 0.60 & RSR_p3 < 0.70
    status_RSRp3 = genvarname('Satisfactory');
else
    status_RSRp3 = genvarname('Unsatisfactory');
end

% tabel maken
resultaat(1,:) = [cellstr('methode') cellstr('NS_Waarde') cellstr('NS_Status') cellstr('RVE_Waarde') cellstr('RVE_Status')
cellstr('RSR_Waarde') cellstr('RSR_Status')];
resultaat(2:3,1) = cellstr(['p2'; 'p3']);
resultaat(2:3,2) = num2cell([NS_p2; NS_p3]);
resultaat(2,3) = cellstr(status_nsp2);
resultaat(3,3) = cellstr(status_nsp3);
resultaat(2:3,4) = num2cell([RVE_p2; RVE_p3]);
resultaat(2,5) = cellstr(status_RVEp2);
resultaat(3,5) = cellstr(status_RVEp3);
resultaat(2:3,6) = num2cell([RSR_p2; RSR_p3]);
resultaat(2,7) = cellstr(status_RSRp2);
resultaat(3,7) = cellstr(status_RSRp3);

disp(' '), disp('                                MODEL PERFORMANCE'), disp(' '), disp(resultaat)

% plotten
figure(1)
plot(t(m:n), debiet_i(m:n), '-b', t(m:n), debiet_p2(m:n), '-r', t(m:n), debiet_p3(m:n), '-g')
grid on
title('debiet')
xlabel('tijd')

```

8.3. Bijlage 3: Resultaten

In onderstaande tabellen zijn alle resultaten van alle geteste gemalen weergegeven voor alle methodes.

P2 ongekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Molenbeke	0,5757	0,2786	0,6514
Rijkerswoerd	0,3491	0,5267	0,8060
Gelderse Rooslaan	-0,3531	0,6516	1,1632
Kampeercentrum	-1,592	-0,6333	1,6100
Kampeercentrum polynoom	0,3549	-0,3531	0,8032
Twenhaarsveld	0,1468	-0,0672	0,9237
Veenweg	-0,8594	-0,1787	1,3636
Drostenstraat	-1,3652	0,0339	1,5379
Kabof	0,4592	0,4238	0,7354
Gemiddeld	-0,2538	0,0758	1,066
Standaard afwijking	0,8287	0,4288	0,3631

P3 ongekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Molenbeke	0,5644	-0,0592	0,6600
Rijkerswoerd	0,7189	-0,1384	0,5302
Gelderse Rooslaan	-0,7761	-0,5593	1,3327
Kampeercentrum	-1,173	-0,5916	1,4741
Kabof	0,9100	-0,0257	0,2999
Gemiddeld	0,0488	-0,2748	0,8594
Standaard afwijking	0,9526	0,2777	0,5155

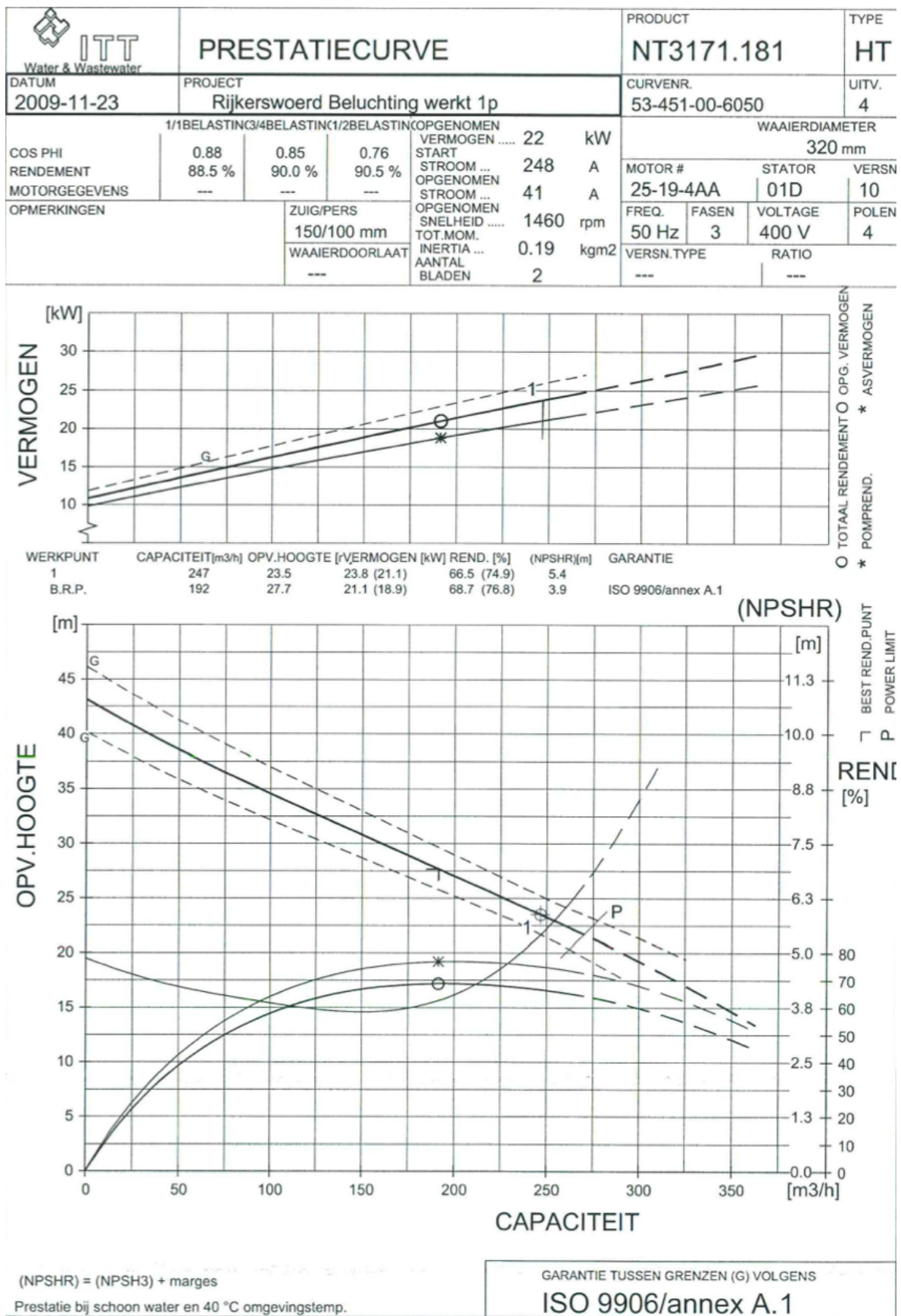
P2 gekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Molenbeke	0,6528	0,1480	0,5892
Rijkerswoerd	0,6520	0,1456	0,5899
Kampeercentrum	0,1431	-0,0586	0,9257
Kampeercentrum polynoom	0,7514	0,0292	0,4986
Twenhaarsveld	0,1965	-0,0227	0,8964
Veenweg	-0,5101	0,0084	1,2289
Drostenstraat	-1,2525	0,0762	1,5008
Kabof	0,6659	0,0815	0,5780
Gemiddeld	0,1624	0,051	0,8509
Standaard afwijking	0,7108	0,0753	0,3602

P3 gekalibreerd	NSE	RVE	RSR
Molenbeke	0,6459	0,1342	0,5951
Rijkerswoerd	0,7813	0,0319	0,4677
Gelderse Rooslaan	0,2423	0,0117	0,8705
Kampeercentrum	0,3291	0,0638	0,8191
Twenhaarsveld	0,2382	-0,0588	0,8728
Veenweg	-0,4410	0,0568	1,1706
Drostenstraat	-0,7178	0,0615	1,3106
Kabof	0,9182	0,0164	0,2859
Gemiddeld	0,2495	0,0397	0,799
Standaard afwijking	0,574	0,0553	0,3434

P2 gekalibreerd + var. DWA	NSE	RVE	RSR
Molenbeke	0,6363	0,1408	0,6031
Rijkerswoerd	0,6505	0,1413	0,5912
Kampeercentrum	-1,9371	-0,5858	1,7138
Kampeercentrum polynoom	-0,2750	-0,4757	1,1292
Twenhaarsveld	0,2065	-0,0258	0,8908
Veenweg	-0,4827	0,0306	1,2177
Drostenstraat	-1,3043	0,0757	1,5180
Gemiddeld	-0,358	-0,0998	1,0948
Standaard afwijking	0,9777	0,3019	0,4312

P3 var. opvoerhoogte (gekalibreerd)	NSE	RVE	RSR
Molenbeke	0,6075	0,0212	0,6265
Rijkerswoerd	0,7608	-0,0457	0,4891
Kampeercentrum	0,2570	0,0381	0,8620
Kabof	0,9174	0,0107	0,2874
Gemiddeld	0,6357	0,0061	0,5662
Standaard afwijking	0,2824	0,0363	0,2414

8.4. Bijlage 4: Voorbeeld prestatiecurve



8.5. Bijlage 5: Voorbeeld bouwtekening

Dwarsdoorsnede van waterkelder en droge pompopstelling gemaal 'Gelderse Rooslaan'. Dit betreft een gemaal met een zeer complexe vloer waarvan de oppervlakte van elke hoogte laag moeilijk te bepalen is. Niet alle gemalen hebben een dergelijk complexe vloer.

