



‘Pompen als het waait’

Een onderzoek naar flexibel pompen voor het Twentekanaal

M.C. Horstman (s1489607)

BACHELOR CIVIELE TECHNIEK, UNIVERSITEIT TWENTE

In opdracht van Rijkswaterstaat

Bachelor opdracht

Begeleider vanuit de universiteit:

Tweede Beoordelaar:

Begeleider vanuit Rijkswaterstaat:

MSc. J. Schyns

MSc. M. van Essen

MSc. Kees Vlak

17-7-2017

SAMENVATTING

Met 'Pompen als het waait' wordt kort gezegd bedoelt, pompen wanneer er een groot aanbod aan windenergie is op het energienet. De beschikbaarheid van duurzame energie neemt steeds meer toe. Deze duurzame bronnen zijn echter wisselend en dit zorgt op de energiemarkt voor fluctuaties in het aanbod en daarmee ook de prijs van energie. Om de duurzame energiebronnen rendabel te benutten moet er een betere terugkoppeling komen tussen de energievraag en het wisselende aanbod van duurzame energie. Een oplossing voor het fluctuerend aanbod van duurzame energiebronnen is het gebruik maken van flexibel pompen. 'Pompen als het waait' is een project dat is opgezet door de waterschappen wat gebruik maakt van dit principe.

Voor deze bachelorstudie is het doel om te analyseren of het watersysteem genoeg bufferruimte heeft om het principe van 'pompen als het waait' toe te passen. Met bufferruimte wordt de tijd bedoelt dat het waterpeil erover doet om van maximumpeil tot minimumpeil uit te zakken. De onderzoeksvraag luidt: *Wat is de uitzaktijd voor het watersysteem van de Twentekanalen voor situaties waarin watertekort en -overschot heerst, als men het waterpeil maximaal oppompt en laat uitzakken tot het minimum peil?*

Het onderzoek is uitgevoerd aan het Twentekanaal, dat drie verschillende panden heeft. Voor elk pand is de uitzaktijd bepaald. De methodiek voor het bepalen van de uitzaktijd is opgedeeld in twee delen. In het eerste deel is ruwe historische data verwerkt dat als input voor het model gebruikt. Dit is gedaan aan de hand van een waterbalans. In het tweede deel is er nieuwe situaties gesimuleerd. Voor de nieuwe situaties zijn simulaties gedaan met situaties waar een watertekort en -overschot heerst. Daarbij zijn ook nieuwe pompstrategie instellingen bepaald aan de hand van trial & error. Vervolgens komt daar een waterpeilverloop uit, met een bepaalde uitzaktijd. Deze methodiek is samengebracht in een MATLAB-model.

Op basis van uitkomsten van het hydrologisch model komt er sterk naar voren dat de bufferruimte in het watersysteem mogelijkheden biedt voor het toepassen van 'pompen als het waait'. De bevindingen tonen aan dat er voor situaties als watertekort en -overschot er een dusdanige marge in de uitzaktijd zit dat er maar één keer per dag 8 uur gepompt hoeft te worden. Voor extreme watertekorten zal langer en vaker op een dag moeten worden gepompt, maar de uitzaktijd biedt een dusdanige marge dat hierin gestuurd kan worden. Er moet wel een kanttekening gemaakt worden dat bepaalde aspecten effect hebben op de uitkomsten, zoals beperkte metingen en meetfouten in de data.

Voor vervolgstudies is het van belang om naar een beter advies module van de pompstrategie te kijken. Hierbij is de aansluiting op IWP een goede vervolg stap, waarna ook een koppeling gemaakt kan worden naar de energiemarktprijzen. Verder moet er een studie gedaan worden naar de verdere validatie van het model.

Al met al fungeert deze studie als basis waarop voortgeborduurd kan worden voor verder onderzoek naar de toepasbaarheid van 'pompen als het waait' voor de Twentekanalen.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	1
1 Introductie	4
1.1 Onderzoeksdoel	5
1.2 Inkadering	5
1.3 Onderzoeksvragen	5
2 Algemene beschrijving Twentekanalen	6
3 Methode & data	7
3.1 Beschrijving Twentekanaal	7
3.2 Historische data verwerken	8
3.2.1 Beschikbare historische data	8
3.2.2 Omzetten data	8
3.2.3 Bepalen volumeverandering en waterbalans	10
3.3 Nieuwe pompsituatie	11
3.3.1 Simulatie periodes	11
3.3.2 Pompstrategie instellingen	11
3.3.3 Uitzaktijd	12
3.4 Modelbeschrijving	13
4 Resultaten	15
4.1 Historische situatie	15
4.1.1 Gladstrijken waterpeil	15
4.1.2 Waterpeilverloop	16
4.1.3 Pompdebieten	17
4.1.4 Aflaatbieten	19
4.1.5 Schutten	20
4.2 Nieuwe situatie	21
4.2.1 Simulatie periodes	21
4.3 Uitzaktijd	23
4.3.1 Droge simulaties	23
4.3.2 Natte simulaties	26
5 Discussie & aanbevelingen	27
5.1 Interpreteren van resultaten	27
5.1.1 Historische situatie	27
5.1.2 Nieuwe situatie	27
5.2 Limitatie	28
5.2.1 Data	28
5.2.2 Model	28
5.3 Aanbevelingen	29
5.3.1 Data	29

5.3.2	Betere advies module voor pompstrategie	29
5.3.3	Validatie	29
5.3.4	Risico's.....	29
6	Conclusie.....	30
7	Referenties	31
8	Appendices.....	32
A.	Geleverde data	32
B.	Sluiscomplexen.....	33
C.	Resultaten	34
D.	Waterbalans relaties	42

1 INTRODUCTIE

De overheid is op zoek naar oplossingen om de samenleving duurzamer in te richten. Daarbij spelen duurzame energiebronnen, zoals de zon en wind, een steeds grotere rol. De beschikbaarheid van deze bronnen is echter wisselend en dit zorgt op de energiemarkt voor fluctuaties in het aanbod en daarmee ook de prijs van energie. Om de duurzame energiebronnen rendabel te benutten, moet er een betere terugkoppeling tussen de energievraag en het wisselende aanbod van duurzame energiebronnen zijn.

Een oplossing voor het fluctuerend aanbod van duurzame energiebronnen is het gebruik maken van flexibel pompen. Een project dat is opgezet door de waterschappen 'Pompen als het waait' maakt gebruik van dit principe (Berends, Nelen, & Hart, 2015). Als waterland maakt Nederland veel gebruik van gemalen om de verschillende watersystemen te reguleren en het water op het gewenste peil te houden of brengen. Voor het reguleren van het watersysteem wordt water opgepompt wat veel energie vraagt en kostbaar is. Een duurzame oplossing is dan om alleen te pompen wanneer het aanbod van duurzame energie in de markt groot is.

Er zijn verscheidene internationale studies naar flexibel pompen, deze studies betrekken zich voornamelijk tot waterafval zuiveringsinstallaties. De potentie van deze installaties is dat het water over delen van de dag rond gepompt moet worden en daarbij dus afgestemd kan worden op de energiemarkt (Bhaskar, Ph, & International, 2015). Het energie verbruik van deze pompen is 60% groter dan het totale energy gebruik van een grote stad (Walski e.a., 2003). Pomp strategieën zijn daarom van belang om aan de ene kant te besparen op de energie vraag en aan de andere kant de pieken in energie aanbod af te vlakken (Lund, H., & Münster, 2003).

Voor 'pompen als het waait' moeten de watersystemen dan voldoende bufferruimte hebben om het gebruik van gemalen beter af te stemmen op het fluctuerende energie aanbod. Hiervoor is al een pilot gedaan voor het Antwerps kanaal met het Kreekrak gemaal. In het kanaal moet zoet- van zoutwater gescheiden worden. Dit wordt gedaan door water omhoog te pompen om zodoende de zoutprop op zijn plek te houden. Er is gekeken of dit mogelijk is wanneer er uitsluitend wordt gepompt als het energie aanbod hoog is. Volgens deze pilot was dit het geval en resulteerde in 10% afname in energiekosten van het gemaal. (Nelen & Schuurmans, 2016)

Na het succes van het Kreekrak gemaal moet 'Pompen als het waait' nu ook toepasbaar gemaakt worden voor andere systemen, waaronder ook de Twentekanalen. Het verschil met het Kreekrak gemaal is dat het om een peil gereguleerd watersysteem gaat en niet om het reguleren van een zoutprop.

De aanleiding voor dit onderzoek is dat de operators denken dat een dergelijke toepassing van 'Pompen als het waait' niet mogelijk is. Het belangrijkste argument hierbij is dat men denkt dat de marge in het peil van de Twentekanalen te klein is, waardoor schepen dan hinder ondervinden. Er is tot nu toe nog geen onderbouwing beschikbaar voor operators om te zien hoe lang het waterpeil kan uitzakken, voordat er weer gepompt moet worden. Als men een indicatie heeft voor de uitzaktijd van het waterpeil, kan men voorspellen wanneer er gepompt moet worden. Dit is tevens in het belang van de energiemaatschappijen die hierop kunnen inspelen met hun fluctuerend energie aanbod.

Er zijn reeds verscheidene studies gedaan voor het watersysteem van de Twentekanalen om sluiswachters adviezen te geven voor het bedienen en reguleren van het watersysteem (Bruine, 2010) (HAVERKORT, 2015) (van Duin, 2016). Zo is er een studie gedaan naar de waterbalans van het watersysteem van de Twentekanalen, zodat de Twentekanalen opgenomen kunnen worden in een beslissingsondersteunend systeem genaamd Instrument Waterhuishouding Peilgereguleerde watersystemen (IWP) (Bruine, 2010). Dit wordt gebruikt voor de meeste hoofdwatersystemen in Nederland om data te verzamelen en te verwerken tot adviezen voor sluiswachters en ook om beleid mee te voeren (Helpdesk water, 2017). Aan de hand van de waterbalans en de parameterrelaties die zijn opgesteld zijn er vervolgstudies die deze parameterrelaties hebben gebruikt om aanvullende en voorspelende rekenmodellen aan het systeem toe te voegen. Zo is er een kosten-baten analyse uitgevoerd die heeft gekeken naar het optimaal volgen van een advies module, waarbij een afweging wordt gemaakt tussen het halen van een acceptabel peil in het kanaal en het beperken van de inzet van de objecten (pompen, schuiven en kolken) (van Duin, 2016). In tegenstelling tot de voorgaande studie is er bij de kosten-baten analyse een ruwer model voor de

waterbalans gebruikt, waarin onder andere neerslag-afvoermodellen niet worden berekend en meegenomen in de advies module.

Deze studie fungeert als een hydrologische onderbouwing voor het wel of niet toepassen van 'pompen als het waait' op de Twentekanalen. Waar voorgaande studies gefocust waren op het reguleren van het waterpeil, wordt er nu gekeken naar wat er gebeurt met het watersysteem als hiervan af wordt geweken.

De eerste stap voor het toepassen van flexibele energie op de Twentekanalen is om te onderzoeken of er genoeg ruimte in het watersysteem zit om de peilregulatie te veranderen, zodat er alleen in daluren op de energiemarkt gepompt kan worden.

1.1 ONDERZOEKSDOEL

Het doel van de studie is om te bepalen of het watersysteem genoeg bufferruimte heeft om het principe van 'pompen als het waait' toe te passen. Met bufferruimte wordt de tijd bedoeld dat het waterpeil erover doet om van maximumpeil tot minimumpeil uit te zakken. Hierbij is het van belang om te analyseren wat de marge is in de uitzaktijd voor verschillende periodes van watertekort en -overschot. Wanneer voor deze periodes de uitzaktijd afdoende is om 'pompen als het waait toe te passen' dan is dit voor andere periodes zeker mogelijk.

1.2 INKADERING

Dit onderzoek is een deskstudy die, aan de hand van historische gegevens, situaties simuleert met behulp van het programma MATLAB.

Gezien de beperkte omvang van dit onderzoek wordt er niet naar een precieze afstemming gekeken met de energiemarkt. Bovendien is ervoor gekozen om een eigen waterbalans op te stellen en niet te werken met het bestaande IWP-model, omdat dit model maar data van 30 dagen aan historische waarden beschikbaar heeft. Verder is de data-analyse gebaseerd op een beperkt aantal historische jaren, ter bevordering van de uitvoerbaarheid.

De opdrachtgever wil weten of 'pompen als het waait' rendabel is over een heel jaar, daarom wordt er gekeken naar de uiterste waarden van de uitzaktijd over het jaar. Wanneer hier een indicatie voor is, kan er aan de hand daarvan bepaald worden of dit genoeg ruimte biedt om verder te gaan met het project 'pompen als het waait' voor de Twentekanelen.

1.3 ONDERZOEKSVRAGEN

De hoofdvraag is als volgt geformuleerd:

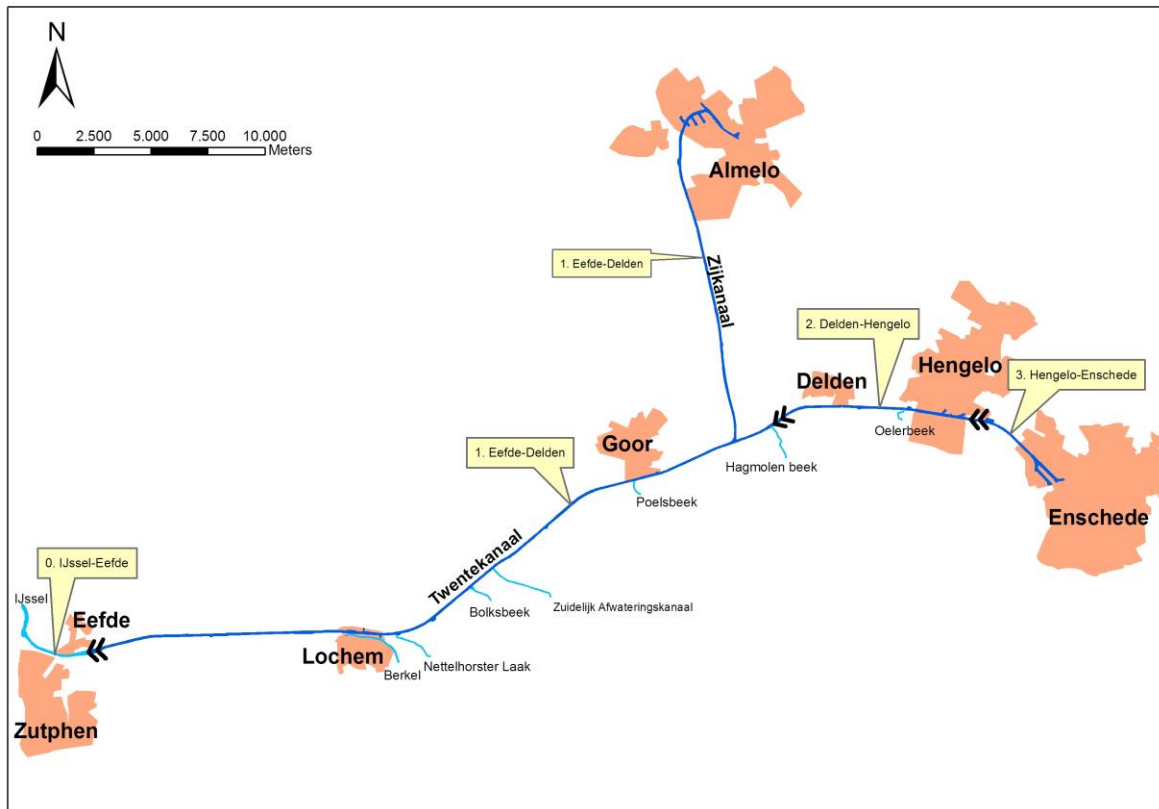
Wat is de uitzaktijd voor het watersysteem van de Twentekanalen voor situaties waarin watertekort en -overschot heerst, als men het waterpeil maximaal oppompt en laat uitzakken tot het minimum peil?

Dit wordt ondersteund door de volgende deelvragen:

1. Hoe kan het watersysteem van de Twentekanalen conceptueel worden beschreven?
 - a. Wat zijn de eigenschappen de verschillende kanaalpanden?
 - b. Welke tijdsperiodes in de historische data kunnen gebruikt worden voor situaties waarin watertekort en -overschot heerst?
 - c. Wat is de netto in- en uitstroom van panden voor de verschillende watervraag periodes?
2. Wat is de tijd dat het waterpeil erover doet om van maximum- naar minimumpeil uit te zakken, voor verschillende watervraag situaties?
 - a. Welke pompstrategie is optimaal voor een zo lang mogelijke uitzaktijd voor elk kanaalpand?
 - b. Wat is de spreiding van de uitzaktijd voor de verschillende water vraag situaties voor ieder pand?

2 ALGEMENE BESCHRIJVING TWENTEKANALEN

De Twentekanalen zijn een belangrijke verbinding voor de grote steden in Twente (Enschede, Hengelo en Almelo). Hoofdzakelijk, omdat er jaarlijks ca. 15.000 schepen van en naar deze steden gaan (Gorssel, 2016), waar Hengelo de belangrijkste bestemming is met de meeste hoeveelheid vervoerde lading. Naast de scheepvaart zijn de Twentekanalen belangrijk voor de wateraanvoer naar de waterschappen Rijn en IJssel en de Vechtstromen. Water wordt onttrokken om aan de waterbehoefte van industrie, het stedelijk gebied, de natuur en vooral de landbouw te kunnen voldoen. Via de sluis Aadorp wordt er water aangevoerd naar het Kanaal Almelo - De Haandrik, waar de waterschappen Drents Overijsselse Delta in hun waterbehoefte worden voorzien.



Figuur 1: Kaart van de Twentekanalen (Nederland, Overijssel, Drenthe, & Groot-salland, 2012)

Figuur 1 illustreert de Twentekanalen met de drie verschillende panden¹. De sluis bij Eefde maakt de verbinding tussen de IJssel en de Twentekanalen. Gedurende het jaar valt er niet genoeg neerslag om de tekorten die ontstaan door verdamping, wegzijging², het schutverlies van schepen, lekverlies en de water afname van de waterschappen te kunnen compenseren. Daarom moet er water vanuit de IJssel verder omhoog de Twentekanalen in gepompt worden. Dit wordt gedaan via de gemalen bij de sluizen Eefde, Delden en Hengelo. Tijdens natte periodes hoeft er niet omhoog gepompt te worden, want dan kan er via de aflaten van de sluizen water naar benedenstroomse panden en uiteindelijk in de IJssel worden afgelaten.

¹ De delen in rivieren en kanalen tussen sluizen worden panden genoemd

² Neerwaartse stroming van (grond-) water door een slecht doorlatende laag.

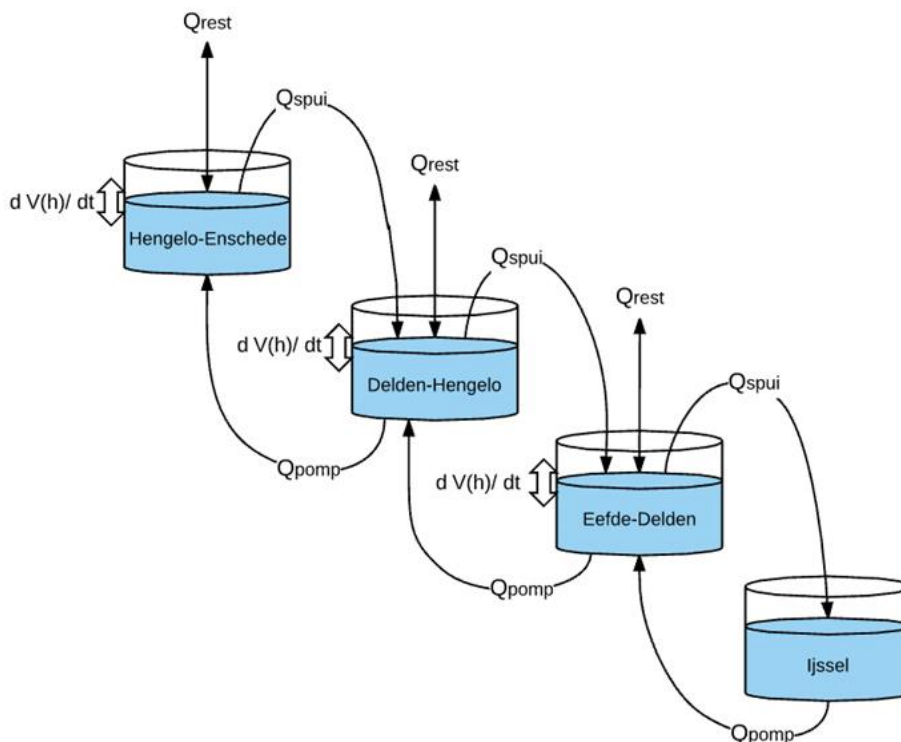
3 METHODE & DATA

De methodiek voor het bepalen van de uitzaktijd is opgedeeld in twee delen. In het eerste deel wordt een methode gegeven voor het verwerken van de historische data. Hiervoor wordt eerst een conceptuele beschrijving gemaakt van het watersysteem in de vorm van een bakjes model. Hierna wordt uitgelegd hoe er aan de hand van relaties de in- en uitstromende debieten zijn berekend. Doormiddel van een waterbalans worden de resterende debieten bepaald.

In het tweede deel worden er nieuwe situaties gesimuleerd. Hiervoor zijn de berekende resterende debieten gebruikt om droge en natte situaties te simuleren. Daarbij zijn ook de nieuwe pompstrategie instellingen bepaald aan de hand van de grenzen van het systeem. Doormiddel van een waterbalans wordt het waterpeilverloop bepaald en de uitzaktijd berekend.

Als laatste worden de twee delen gekoppeld in een conceptueel model. Hier wordt de samenhang van de verschillende methodes uitgelegd en beschreven hoe er tot een MATLAB-model is gekomen.

3.1 BESCHRIJVING TWENTEKANAAL



Figuur 2: Schematische bakjes weergave Twentekanaal

Voor het conceptueel beschrijven van de Twentekanaal is het kanaal geschematiseerd in drie bakjes met water (Figuur 2). Ieder pand vormt een bakje met water waar water in- en uitstroomt. De variabele in- en uitstroom zijn meer dan alleen de drie verschillende pijlen Q_{pomp} , Q_{spui} en Q_{rest} die zijn afgebeeld in de figuur. Echter zijn alle in- en uitstromen gebundeld in deze drie parameters. Het conceptueel model is afhankelijk van deze parameters. Hoe de verschillende in- en uitstromen worden gebundeld zijn tot de parameters wordt beschreven in de volgende paragraaf 3.2.

3.2 HISTORISCHE DATA VERWERKEN

Voor het model wordt gebruik gemaakt van historische data. Aan de hand van de beschikbare historische data is bepaald hoe alle in- en uitstromen van de Twentekanalen zijn gebundeld tot de drie parameters. Met deze drie parameters en de volumeverandering is een waterbalans opgesteld.

3.2.1 Beschikbare historische data

Er worden verscheidene data gemeten voor de Twentekanalen door de Waterschappen. Deze data wordt opgeslagen in LMW een dataprogramma. Hierin zijn de volgende parameters terug te vinden:

- Pomp draaitijd per 10 minuten
- Spui draaitijd per 10 minuten
- Hefhoogte per 10 minuten
- Waterhoogte per 10 minuten/ 1 uur
- Schuttingen per uur

De tabel in appendix A geeft voor ieder pand de beschikbare data weer. Niet alle data is gemeten en digitaal opgeslagen. Sommigen zijn met de hand bijgehouden, zoals voor de draaitijden en de schuttingen. De pomp draaitijd is om de 10 minuten gemeten en geeft een percentage weer hoe lang er tijdens die 10 minuten is gepompt. Dit geldt ook voor de spuitijd. De hefhoogte is de hoogte van de spuischuiven ten opzichte van NAP. De waterhoogte is ook bemeten ten opzichte van NAP. De gebruikte historische data zijn de jaren 2010, 2011, 2012 en 2014. Deze specifieke jaren zijn gekozen, omdat de jaren na 2014 de sluis bij Eefde gerenoveerd is, hierdoor zijn er geen representatieve meetgegevens van de jaren na 2014. Verder ontbraken er meetgegevens voor het jaar 2013 en zijn de jaren voor 2010 niet gemeten met een interval van 10 minuten. Om met deze data een waterbalans op te stellen moeten deze worden omgezet naar debieten.

3.2.2 Omzetten data

Met de pomp draaitijd, spui draaitijd en de hefhoogtes, kunnen de pomp- en aflatdebieten worden berekend. De debieten worden via relaties berekend die ook worden gebruikt voor IWP (Bruine, 2010). De werking en karakteristieken van het pompen en aflaten is voor iedere sluis anders. In de volgende punten wordt er een beschrijving en overzicht gegeven van de sluiscomplexen. Een schematische weergave van de sluiscomplexen is te vinden in appendix B.

Aflaten

Om overtollig water te lozen op de benedenstroomse panden hebben de sluizen Eefde en Delden aflatwerken. Sluis Eefde heeft twee aflatwerken en sluis Delden één aflatwerk. Hengelo heeft geen aflatwerk en moet overtollig water door de sluizen laten spuien.

Het debiet van de aflatwerken is vooral afhankelijk van de hefhoogte van de schuiven, omdat de bovenstroomse waterstanden van de aflatwerken relatief constante waterpeilen zijn en de aflaten werken als volkomen over- en onderlaten. Voor het berekenen van het aflat debiet is de aflatcapaciteit weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Aflatcapaciteiten (Bruine, 2010)

Aflaten	Aflatconstante (m ³ /s/m)
Eefde spuischuif Noord	30,63
Eefde spuischuif Zuid	30,63
Eefde nieuwe Spuischuif	51,94
Delden spuischuif Noord	6,11
Delden spuischuif Zuid	6,11

De enige randvoorwaarde voor een volkomen stroming is dat het waterpeil bij Eefde kleiner moet zijn dan +8,5m NAP. Deze is echter uitzonderlijk en er kan aangenomen worden dat dit niet optreedt.

De bepaling van de aflaten per sluis is gegeven in appendix D. De algemene relatie voor het bepalen van het aflat debiet is als volgt.

$$Q_{aflat} \left(\frac{m^3}{s} \right) = Spuitijd(min) * Hefhoogte(m) * Aflatconstante \left(\frac{m^3}{s} \right) / 10$$

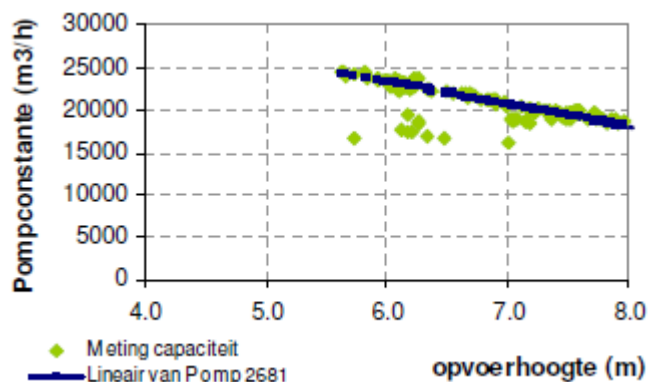
Q_{aflat} zal als parameter gebruikt worden in de waterbalans.

Pompen

Het pompdebiet wordt bepaald aan de hand van de pompcapaciteiten van de gemalen. De gemalen beschikken over drie pompen waar alle pompcapaciteiten constant zijn, behalve de pompen Eefde Noord en Zuid. Hierbij is de opvoerhoogte bepalend voor de pompcapaciteit. In Tabel 2 zijn de pompcapaciteiten gegeven.

Tabel 2: Pompcapaciteiten (Bruine, 2010)

Pomp	Pompconstante (m ³ /s)
Eefde Oud	3,00
Eefde Noord	5,5
Eefde Zuid	5,5
Delden Noord	1,17
Delden Midden	2,47
Delden Zuid	1,17
Hengelo Noord	1,39
Hengelo Midden	1,39
Hengelo Zuid	1,39



Figuur 3: pompcurves Eefde Noord met pompconstante in relatie met de opvoerhoogte (Bruine, 2010)

De pompcapaciteit van de nieuwe pompen (Noord en Zuid) bij Eefde zijn afhankelijk van de opvoerhoogte. Aan de hand van pompcurves is de pompconstante bij een bepaalde opvoerhoogte berekend. Hierbij hoort de volgende formule: $(-2651,5 \times opvoerhoogte + 39188)$ (Bruine, 2010). Deze pompcurve is aan de hand van metingen van de pompdebieten en de opvoer hoogte opgesteld (Figuur 3). Hierbij is daarna de lineaire relatie opgesteld. In Tabel 2 is de gemiddelde waarde als indicatie gegeven. Voor ieder pand is de afzonderlijke relatie gegeven in appendix D.

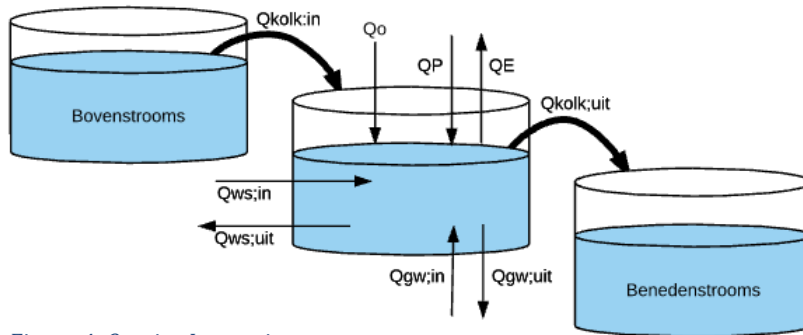
De pompdebieten kunnen berekend worden met de algemene relatie:

$$Q_{pomp} \left(\frac{m^3}{s} \right) = pomptijd(min) * pompconstante \left(\frac{m^3}{s} \right) / 10$$

Hierbij wordt de som van alle pompen per gemaal gebruikt in de waterbalans als Q_{pomp} .

Resterende in- en uitstromen

Naast het aflaten en het pompen zijn er nog een aantal variabele in- en uitstromen over die het watersysteem beïnvloeden. Deze zijn schematisch weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Overige In- en uitstromen

Voorgaande studies wezen uit dat bij het benaderen van de variabelen neerslag(Q_p), verdamping(Q_{ET}), aan/afvoer van de waterschappen(Q_{ws}) en de wegzijging(Q_{gw}) er een sluitfout kon ontstaan van 40% (Bruine, 2010). Dit wil zeggen dat er 40% van de netto in/uitstroom niet overeenkomt met de volumeverandering. Dit heeft verschillende oorzaken, maar een groot deel van de onzekerheid zit in de aannames voor de aan/afvoer van de waterschappen(van Duin, 2016). Daarom wordt er voor de waterbalans gekozen om al deze onzekere variabelen aan een parameter te koppelen Q_{rest} , deze kan zowel positief als negatief zijn.

3.2.3 Bepalen volumeverandering en waterbalans

In Figuur 2 zijn de gedefinieerde parameters Q_{pomp} , Q_{spui} en Q_{rest} weergegeven. Hierbij is ook de volumeverandering als parameter aangeduid. Uit de beschikbare data kan met de waterhoogte(h) en het oppervlakte (A) de volumeverandering over een bepaalde periode(t) als volgt worden berekend:

$$\frac{\Delta V(h)}{\Delta t} = \frac{\Delta h}{\Delta t} * A$$

De meetpunten van de waterhoogtes zijn dicht gelokaliseerd bij de sluizen, waardoor er grote fluctuaties ontstaan door langsvarende schepen. Daarom wordt de gemeten waterhoogte gladgestreken door een bewogen gemiddelde. Hierbij is het gemiddelde van 2 uur voor- en achteruit genomen.

Met de brekende in- en uitstromen en de volumeverandering van de panden kan er een waterbalans worden opgesteld, deze is als volgt:

$$\frac{\Delta V(h)}{\Delta t} = Q_{rest} + Q_{pomp;in} - Q_{pomp;uit} + Q_{spui;in} - Q_{spui;uit}$$

Dit kan herschreven worden met het verschil in pompen van wat erin wordt gepompt ($Q_{pomp;in}$) en eruit ($Q_{pomp;uit}$). Hetzelfde geldt voor het spuien en geeft de volgende herschrijving.

$$\frac{\Delta V(h)}{\Delta t} = Q_{rest} + \Delta Q_{pomp} + \Delta Q_{spui}$$

Omdat Q_{rest} grote onzekerheden bevat wordt deze beschreven door de drie andere bemeeten parameters.

$$\Delta Q_{rest} = \frac{\Delta V(h)}{\Delta t} + \Delta Q_{pomp} + \Delta Q_{spui}$$

Hiermee kan het watersysteem schematisch worden gesimuleerd uit historische data en kan voor verschillende periodes Q_{rest} worden bepaald. Q_{rest} is de belangrijkste forcering van het watersysteem, omdat dit de variabele in- en uitstromen bevat waar niet of nauwelijks mee kan worden gestuurd en wat ervoor zorgt dat het systeem langzaam leegloopt. Q_{rest} is de input voor de verschillende simulaties die gedaan worden met een nieuwe pompstrategie.

3.3 NIEUWE POMPSITUATIE

In deze paragraaf wordt de methode gegeven voor het bepalen voor de nieuwe pompstrategie. Hierbij is er gekeken naar verschillende droge en natte periodes, zodat brekend kan worden wat de marges zijn voor de uitzaktijd. Verder wordt aangegeven hoe de randvoorwaarden zijn bepaald en uiteindelijk hoe er tot een uitzaktijd is gekomen.

3.3.1 Simulatie periodes

Door de jaren heen is de uitzaktijd niet constant geweest. De uitzaktijd is voor natte en droge periodes verschillend. In de zomer is er eerder sprake van een water te kort dan in de winter. Hierdoor zal de uitzaktijd kleiner zijn dan wanneer er een wateroverschot heerst. Daarnaast geldt dat voor sommige periodes in het jaar er ook meer schepen worden geschut dan in andere periodes. Omdat dit de forcerende factoren zijn voor de snelheid waarmee het systeem leegloopt, is er gekeken naar de periodes waarin deze uiterste waarden worden geven. Zoals genoemd in het vorige hoofdstuk worden deze twee forcerende factoren meegenomen in de parameter Q_{rest} .

Voor de simulaties met een nieuwe pompstrategie worden situaties genomen van watertekort en wateroverschot. De Q_{rest} van de periodes waarin deze situaties heersen worden gebruikt als input voor de simulaties.

De periodes zijn bepaald aan de hand van de meteorologische gegevens van het KNMI (Bilt, 2017), tevens worden deze bepaald aan de hand van een data-analyse, door te kijken naar periodes waar er veel of weinig is gepompt/gespuid en naar de schut intensiteit (zie hoofdstuk 4.1.5). De periodes die hieruit volgen staan weergegeven in Tabel 3 in hoofdstuk 4.2.1.

3.3.2 Pompstrategie instellingen

De oude pompstrategie reguleerde het peil rond het streefpeil, dit echter niet het geval voor de nieuwe pompstrategie. Voor het bepalen van de nieuwe pompstrategie is er eerst gekeken wat het systeem doet als er alleen gepompt wordt wanneer het minimum toelaatbaar peil is bereikt en opgepompt wordt tot het maximum toelaatbaar peil. Dit gaf een indicatie van de uitzaktijd en wat de reactietijd van het peil was voordat alle panden weer vol zaten. Hieruit bleek dat er grote verschillen zaten in uitzaktijd en dat het pompen twee dagen duurde. Een pompduur van twee dagen is niet rendabel en zal dus in kleine stukken moeten worden geknipt en over een aantal dagen verspreid moeten worden.

Om hier een goed pomp advies voor te geven is er naar drie pompeigenschappen gekeken: het pompmoment op de dag, de pompduur en de pompfrequentie (aantal keer pompen op een dag). De drie punten worden als volgt beschreven:

- **Pompmoment:** Het pompmoment van de dag moet afgestemd worden met de daluren in energieprijzen. Om dit goed in kaart te brengen zou een aanvullende studie nodig zijn. Wel kunnen er goede aannames gedaan worden op basis van een Quicksan op gemaal Delden. Hierin komt naar voren dat de daluren in energieprijzen tussen 23:00 en 7:00 liggen (HAVERKORT, 2015). Verder op de dag zijn er ook een daluren van 12:30 tot 16:00, echter ligt de energieprijzen wel hoger dan in de nacht. Normaliter fluctueren deze daluren over de dag, maar voor het model wordt dit als vaste waarde genomen. Het pompen zal dus voornamelijk tijdens de nachturen plaats moeten vinden.
- **Pompduur:** De pompduur is ook afhankelijk van de daluren. De nachtelijke daluren hebben een duur van 8 uur. Dus dit betekent dat dit de maximale pompduur zal zijn.
- **Pompfrequentie:** De frequentie hangt af van hoe snel een pand leegloopt. Als een pand onvoldoende water op kan pompen binnen 8 uur om de rest van de dag niet te pompen, zal deze verder op de dag nog een keer moeten pompen.

Doormiddel van trial en error is er gekeken wat een optimale afstelling is van deze drie parameters.

Spuistrategie

Gedurende een jaar moet het systeem ook water aflaten, met name tijdens natte periodes. Hiervoor is gekozen om alleen af te laten wanneer het maximum toelaatbaar peil wordt overschreden. Het is optimaal als er even veel gespuid wordt, als wat er op dat moment in het systeem stroomt. Hierdoor kan het maximumpeil gehandhaafd worden en wordt er zo min mogelijk water verloren. Echter is dit erg lastig te modeleren en te voorspellen, daarom is er gekozen om het water af te laten totdat het water 5cm onder het maximum toelaatbaar peil zit.

Toelaatbaar peil

Door het peil steeds te laten fluctueren tussen het minimum en maximum toelaatbaar peil, is het risico van het overschrijden van het peil groter dan wanneer men het rond het streefpeil reguleert. Daarom is ervoor gekozen om niet exact aan de boven en ondergrens te gaan zitten, maar daar 10% vanaf. Hierdoor kunnen de pompen op tijd aangezet worden om weer opnieuw te pompen.

Pompcapaciteiten

Verder zijn de pompcapaciteiten van de sluizen van belang. De pompcapaciteit moet het pompen van de bovenstroomse sluizen compenseren. De pompcapaciteit voor sluis Eefde bedraagt momenteel gemiddeld 15 m³/s. Echter zal iedere keer wanneer er gepompt gaat worden de maximale pompvermogen gebruikt moeten worden, om zo snel mogelijk het peil weer omhoog te krijgen. In het waterakkoord wordt er gesproken over een maximale pompcapaciteit van 22 m³/s met de nieuwe pompen (Nederland, Overijssel, Drenthe, & Groot-salland, 2017). Gezien er ook rekening gehouden moet worden met de opvoerhoogte, zal deze afgerond worden naar 20 m³/s. Dit is op basis van de pompcurve die ook is gebruikt voor de oude pompen (hoofdstuk 3.2.2).

De pompcapaciteiten van Delden en Hengelo bedragen na renovatie respectievelijk 5,2 m³/s en 6,1 m³/s (Nederland e.a., 2017). De Pompcapaciteiten van sluis Delden zijn groot als die van Hengelo dus als er tegelijk gepompt wordt, compenseert gemaal Delden alleen voor het pand Hengelo-Enschede en kan het pand Delden-Hengelo niet volgepompt worden. Er is gekozen te pompen met een lager debiet bij Hengelo.

3.3.3 Uitzaktijd

Voordat de uitzaktijd bepaald kon worden, moest eerst het nieuwe verloop van het waterpeil berekend worden. In appendix D zijn de relaties voor ieder pand weergegeven voor het bepalen van het waterpeil. Het bepalen van de waterhoogte over de tijd is een iteratief proces, waar er per tijdstap de in- en uitstromen samen met de pompstrategie om worden gerekend naar een verandering in de waterhoogte. Dit wordt gedaan door te vermenigvuldigen met 600, afgeleid uit het aantal seconden waarin de tijdstappen worden genomen (10min). Daarna wordt het debiet gedeeld door het oppervlak(A).

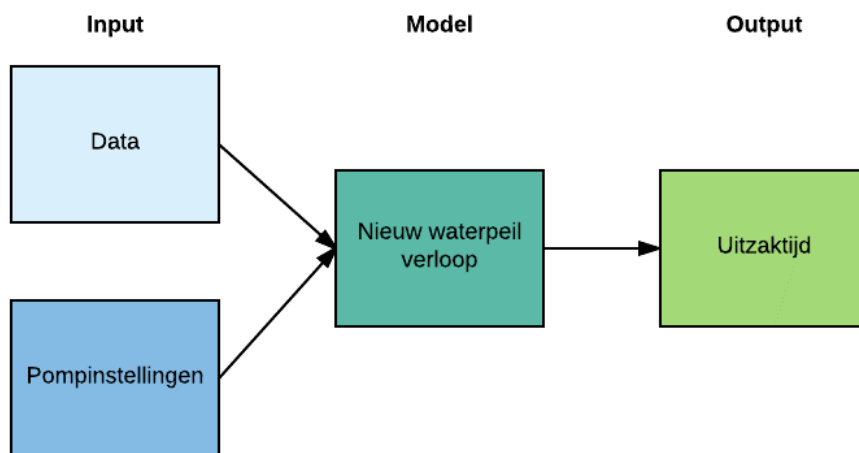
De algemene relatie is als volgt. Waarvoor geldt als $i = 1$ dan is $h_{(i-1)} = h_0$, waarin h_0 de startwaarde is van de oude meetgegevens.

$$h_i = h_{(i-1)} + (Q_{rest;i} + Q_{pomp;i} + Q_{spui;i}) * 600/A$$

Voor het bepalen van de uitzaktijd wordt het aantal tijdstappen geteld dat er niet wordt gepompt. Daarnaast wordt er bijgehouden wanneer er wordt uitgezakt. Voor ieder moment wanneer dit zich voordoet worden de tijdstappen dat er niet wordt gepompt gesommeerd. Dit geeft de uitzaktijd voor iedere keer dat er gepompt wordt.

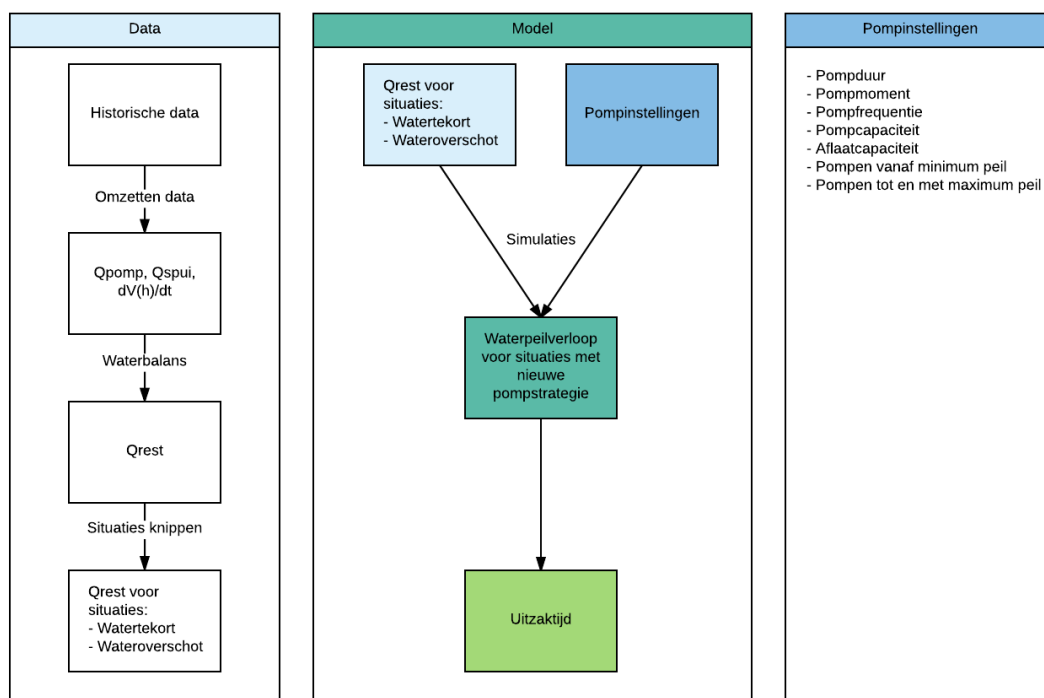
3.4 MODELBESCHRIJVING

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van hoe de verschillende methodes met elkaar samenhangen en een conceptueel model vormen. Met het conceptueel model is een model gevormd in MATLAB.



Figuur 5: Conceptueel model

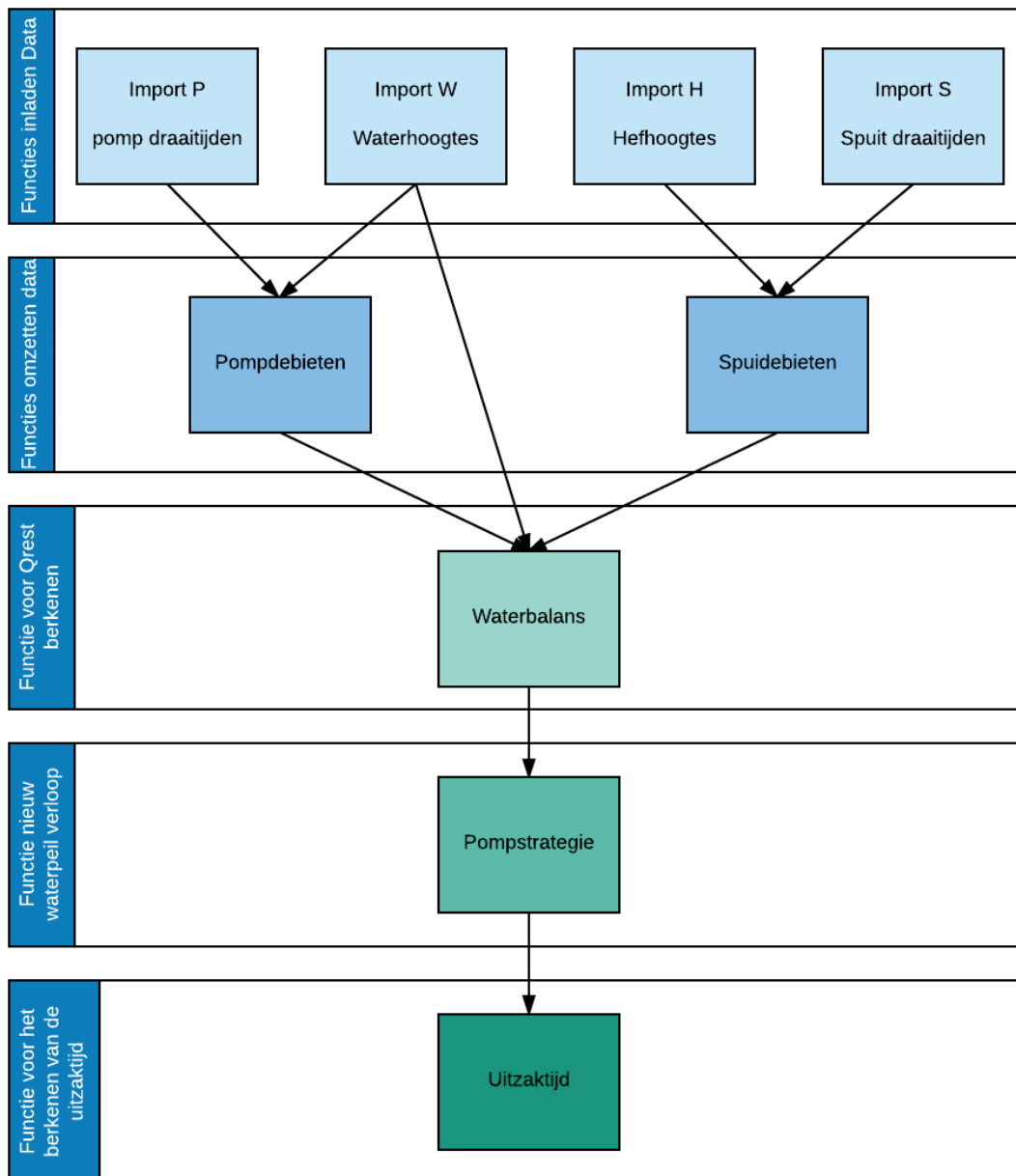
In Figuur 5: Conceptueel model Figuur 5 is het conceptueel model weergegeven. Hierin vormen de data en de pompinstellingen de input voor het model. In het model worden er simulaties gedaan die een nieuw waterpeil verloop geven. Uit het nieuwe waterpeil verloop wordt een uitzaktijd berekend dat de output vormt. Alle onderdelen in het conceptueel model bestaan weer uit aparte processen, zoals is weergegeven in Figuur 6. Het proces Data is beschreven in hoofdstuk 3.2, hierbij wordt de historische data omgezet tot debieten (hoofdstuk 3.2.2). Vervolgens wordt er door het opstellen van een waterbalans Q_{rest} berekend (hoofdstuk 3.2.3). Hierna worden er bepaalde periodes waarin watertekort en -wateroverschot heerst geselecteerd en als input genomen voor het model (hoofdstuk 3.3.1).



Figuur 6: Processen binnen het conceptueel model

De pompinstellingen beschreven in Figuur 6 zijn de variabelen waarmee het model kan worden afgesteld, dit is verder uitgelegd in hoofdstuk 3.3.2. In het model worden er simulaties gedaan met de verschillende situaties van watertekort en -overschot. Hierbij wordt er doormiddel van het iteratieve proces wat beschreven is in hoofdstuk 3.3.3 het waterpeilverloop berekent. Uit dit waterpeil verloop wordt de uiteindelijke uitzaktijd berekend.

Voor de opzet van het MATLAB-model zijn deze stappen gebruikt en onderverdeeld in functies. De structuur in het MATLAB-model is weergegeven in Figuur 7: Functie structuur in MATLAB-model. Hierin wordt in de eerste vier functies de datasets ingeladen. Daarna wordt de data in een volgende functie omgezet. Vervolgens volgt er een functie voor het berekenen van Q_{rest} , waarna er vervolgens met de pompstrategie het nieuwe waterpeilverloop wordt bepaald. Als laatste volgt de functie voor het bepalen van de uitzaktijden



Figuur 7: Functie structuur in MATLAB-model

4 RESULTATEN

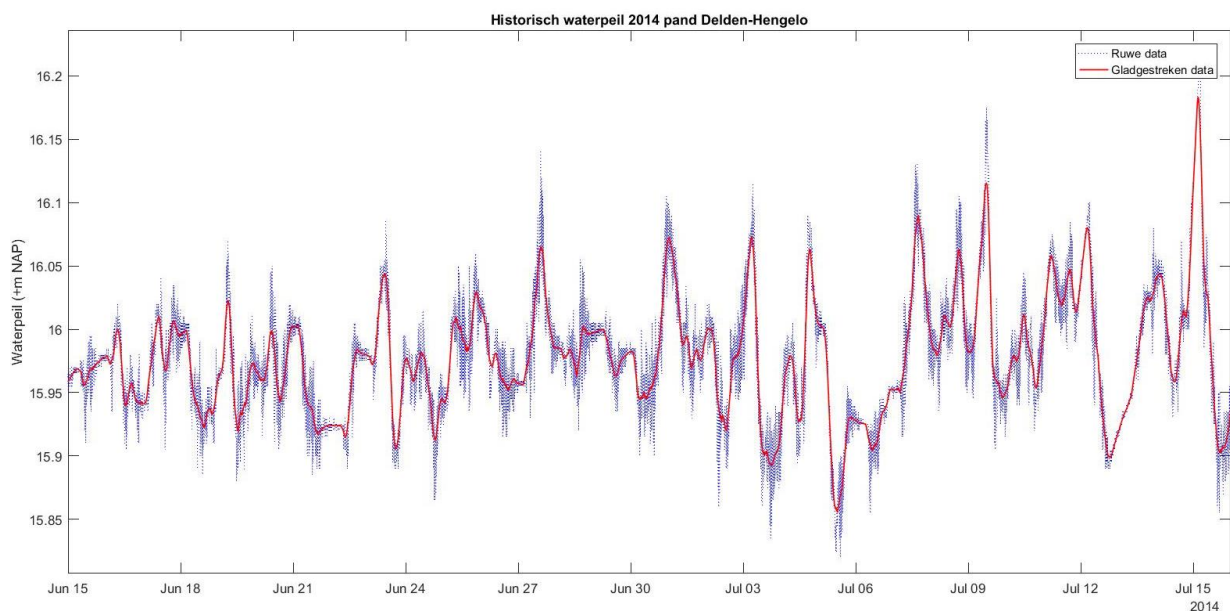
In de resultaten wordt eerst een beeld gegeven van de historische situaties. Hierin worden de waterstanden, pompdebieten en spuidebieten die over de jaren zijn gemeten weergegeven. Daarna wordt de nieuwe situatie geschetst voor de droge- en natte maanden. Hierin zijn het verloop van de waterstanden met bijbehorende pomp- en spuidebieten weergegeven. Vervolgens wordt er een vergelijking gedaan tussen de oude en de nieuwe situatie en als laatste worden de uitzaktijden gegeven.

4.1 HISTORISCHE SITUATIE

De historische situaties worden hier geschetst met hierin het waterpeilverloop, pompdebieten en spuidebieten. Dit om een beeld te schetsen van de manier waarop deze gebruikt zijn voor droge en natte simulaties van de nieuwe pompstrategie. Ook kan er een vergelijking gedaan worden tussen de oude en nieuwe situatie. Voor de simulaties zijn de jaren 2010, 2011, 2012 en 2014 gebruikt zoals genoemd in paragraaf 3.2.1. Ter illustratie is alleen het waterpeilverloop, pompdebieten en spuidebiet van het jaar 2014 weergegeven samen met de jaren die uitzonderlijke trends laten zien. De andere jaren worden weergegeven in appendix C.

4.1.1 Gladstrijken waterpeil

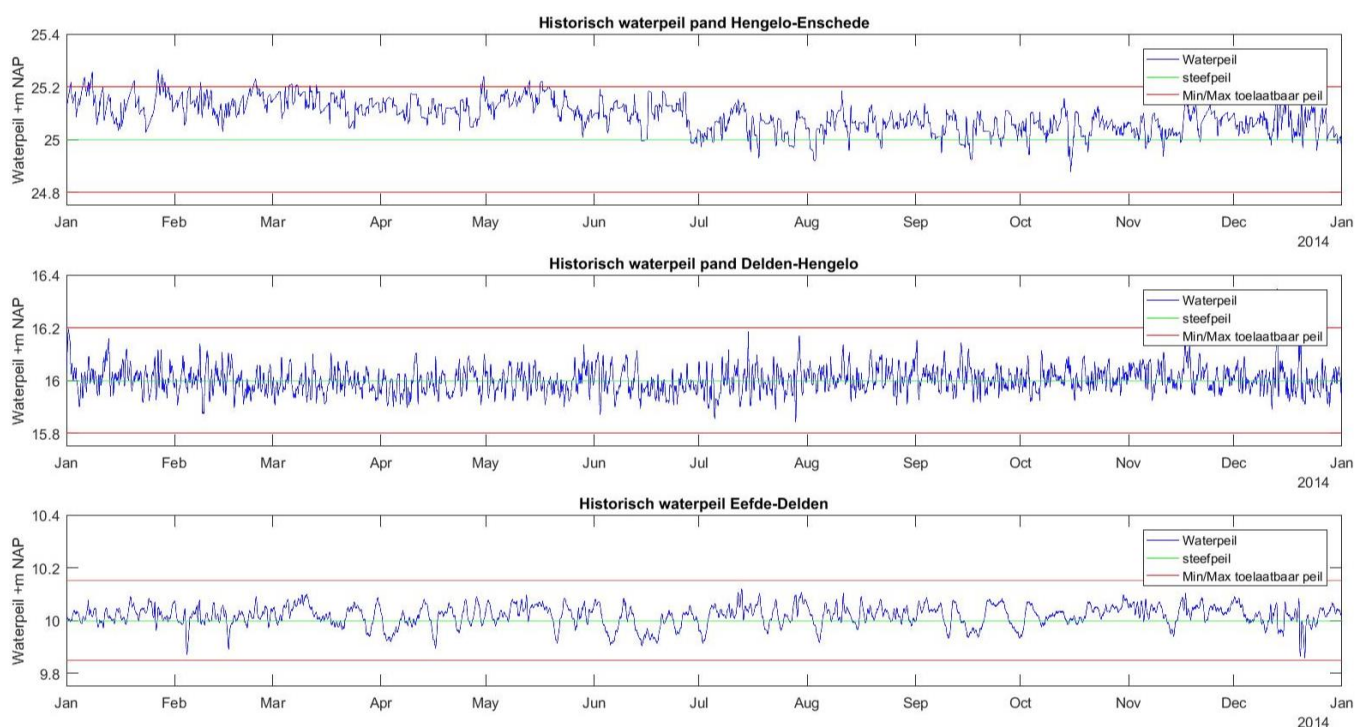
De waterpeilen zoals beschreven in 3.2.3 zijn gladgestreken over 4 uur. Het resultaat is te zien in Figuur 8. Hier is de zomermaand juni en juli weergegeven met de blauwe stippellijn als ruwe data die enorm fluctueert en de rode lijn als gladgestreken waterpeil.



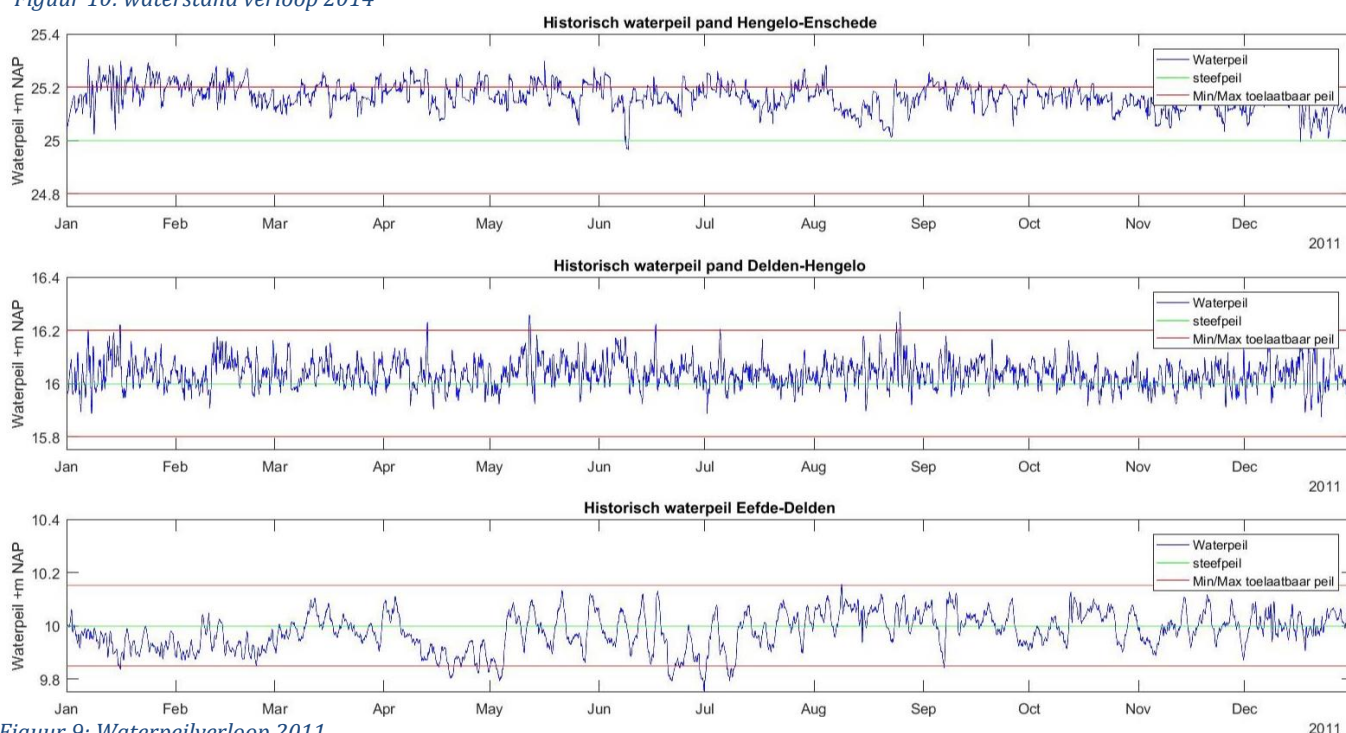
Figuur 8: Gladstrijken waterpeil 2014

4.1.2 Waterpeilverloop

Het waterpeilverloop over het jaar 2014 is weergegeven In Figuur 10. Zoals te zien wordt het waterpeil rond het streefpeil gehouden voor de panden Delden-Hengelo en Eefde-Delden. Verder is te zien aan de frequentie waarmee het waterpeil van pand Delden-Hengelo rond het streefpeil fluctueert, dat er vaker wordt gepompt dan bij de andere panden. Het pand van Hengelo-Enschede zit consequent boven het streefpeil, omdat de operators een buffer willen hebben voor het schutten van schepen. De andere historische jaren vertonen dezelfde trends, met als uitzondering het jaar 2011. Figuur 9 toont het waterpeilverloop van 2011, waar te zien is dat rond begin mei en begin juli het waterpeil bij pand Eefde-Delden onder de ondergrens van het waterpeil zakt.



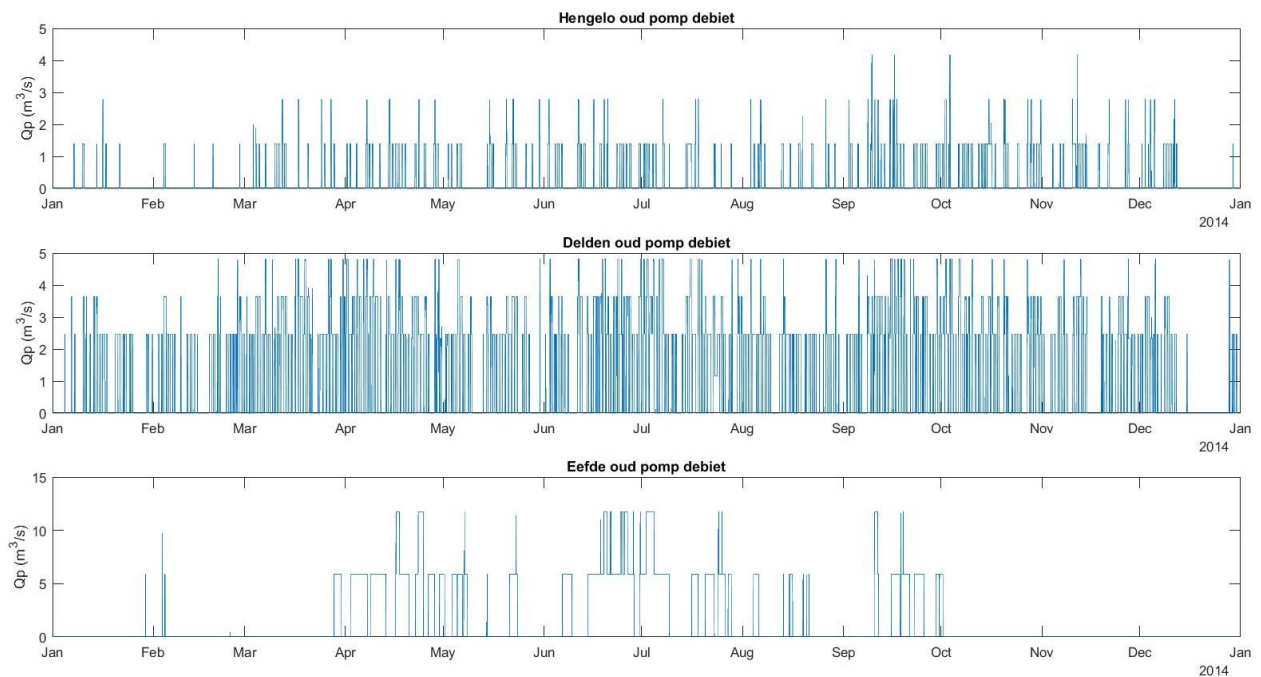
Figuur 10: waterstand verloop 2014



Figuur 9: Waterpeilverloop 2011

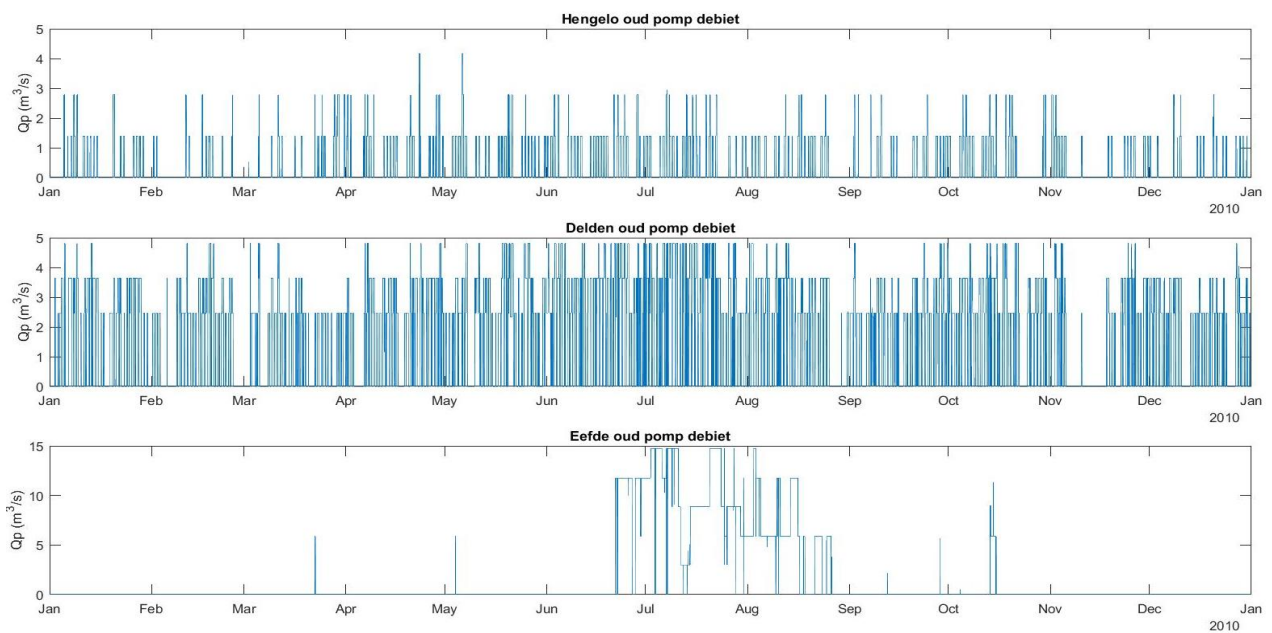
4.1.3 Pompdebieten

Figuur 11 laat de pompdebieten over het jaar 2014 zien. Hierin is te zien dat er heel duidelijk trapsgewijs is gepompt, waarbij er steeds een pomp extra wordt aangezet. In het jaar 2014 wordt een derde pomp niet gebruikt. Dit is echter anders voor de jaren 2010 en 2011.

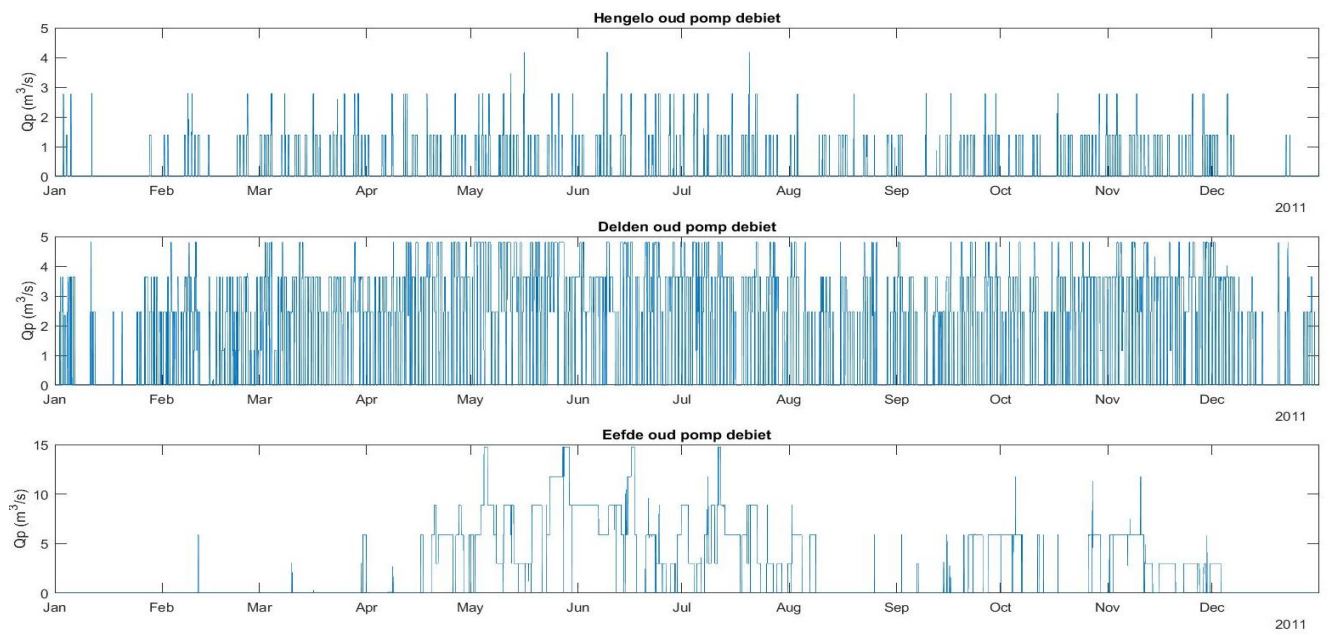


Figuur 11: Pompdebiet 2014

In het jaar 2010 (Figuur 12) is er een korte periode in het jaar gepompt, maar tegelijkertijd ook harder gepompt dan bijvoorbeeld in 2014. In 2011 (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**) wordt er over het hele jaar meer gepompt dan in de rest van de jaren. Dit is te beredeneren, omdat het KNMI dit als een droog jaar heeft aangeduid (KNMI, 2011).



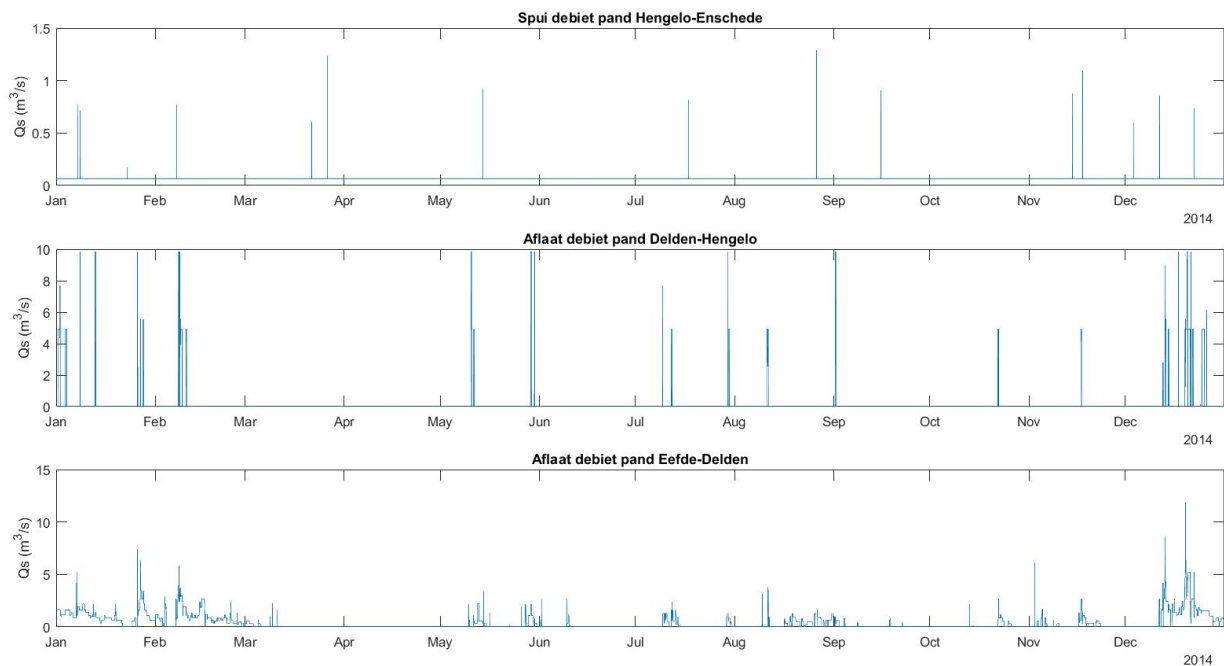
Figuur 12: pompdebiet 2010



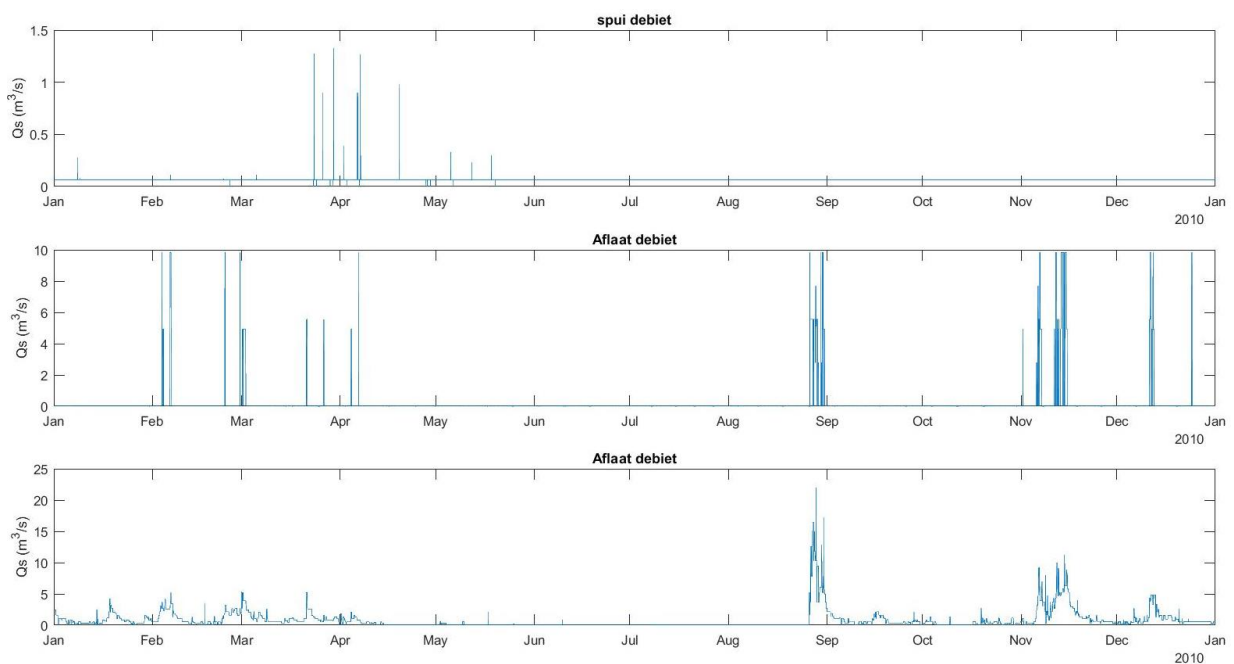
Figuur 13: pompdebiet 2011

4.1.4 Aflaatbieten

Er wordt aanzienlijk minder afgelaten dan dat er gepompt wordt als men naar Figuur 14 kijkt. 2010 (Figuur 15) was een nat jaar wat onder andere te zien is in september met een piek aflaat van 20 m³/s(KNMI, 2010a).



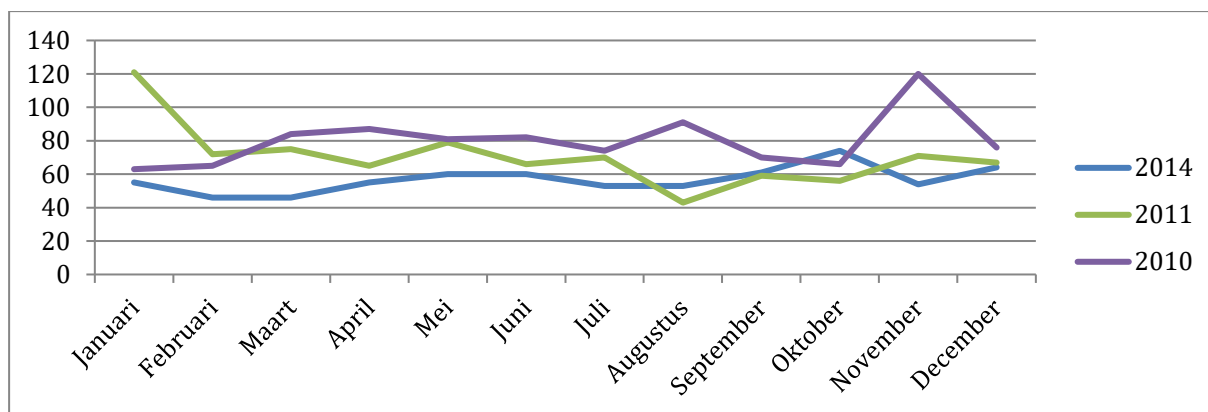
Figuur 14: Aflaten 2014



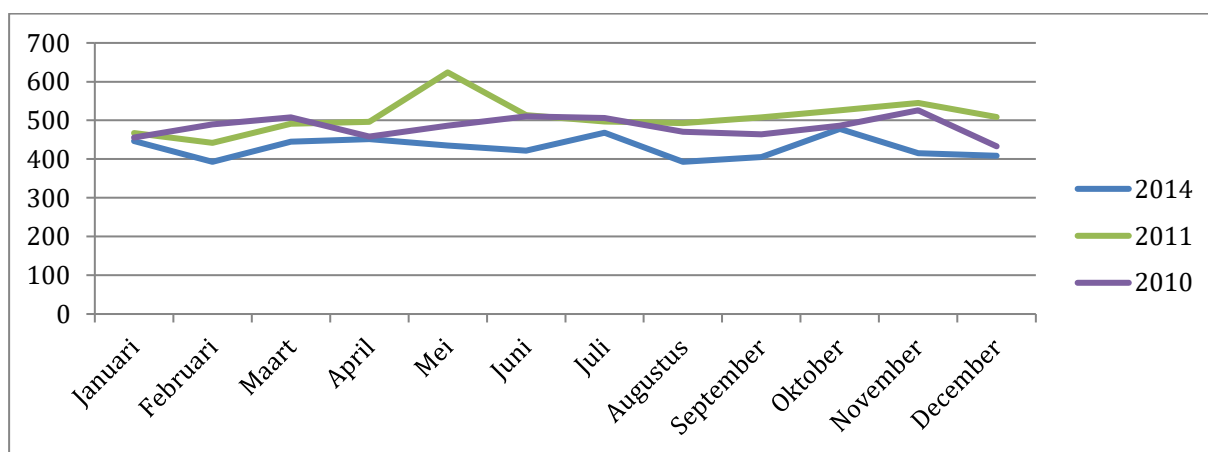
Figuur 15: Aflaten 2010

4.1.5 Schutten

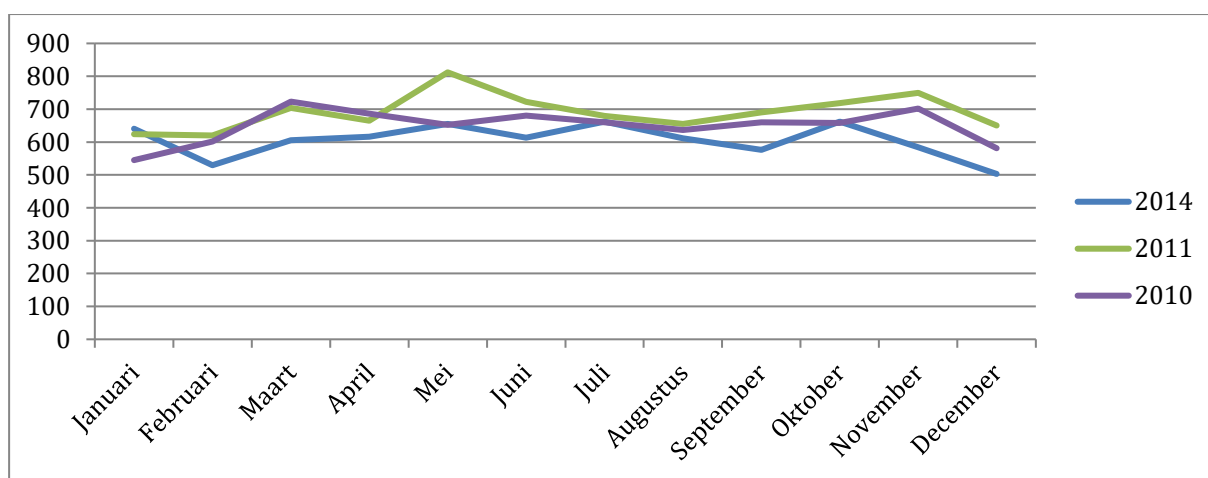
Er is ook gekeken naar het aantal schuttingen per maand. Per pand is gekeken naar de jaren 2010, 2011 en 2014. Het jaar 2012 kon niet worden meegenomen, omdat daar gegevens ontbraken door een defect met de sluisdeuren van Eefde. De sluisen Eefde (Figuur 18) en Delden (Figuur 17) vertonen voor de maand mei een piek in het aantal schuttingen in het jaar 2011. Voor de sluis Hengelo (Figuur 16) is er een piek in de maand november voor de maand 2010. Verder is te zien dat in 2014 minder schuttingen waren dan in de andere jaren.



Figuur 16: aantal schuttingen per maand met westelijke vaarrichting voor sluis Hengelo(Beijk, 2015)



Figuur 17: aantal schuttingen per maand met westelijke vaarrichting voor sluis Delden(Beijk, 2015)



Figuur 18: aantal schuttingen per maand met westelijke vaarrichting voor sluis Eefde(Beijk, 2015)

4.2 NIEUWE SITUATIE

Uit de resultaten van de historische data zijn de periodes gehaald om simulaties te doen met de nieuwe pompstrategie. Hierbij zijn eerst de simulatie periodes bepaald. Daarna zijn de pompinstellingen gegeven en vervolgens het waterpeilverloop en de pompdebieten weergegeven.

4.2.1 Simulatie periodes

De periodes die gebruikt zijn voor de simulaties zijn weergegeven in Tabel 3. De criteria waarvoor de periodes zijn bepaald zijn daarnaast weergegeven. De periodes zijn niet volledige maanden, omdat bepaalde situaties zoals watertekort niet precies over twee maanden heerst, maar bijvoorbeeld over de helft van beide maanden.

Tabel 3: Neerslag periodes

Periode	Schuttingen sluis Delden	KNMI	Pompperiode in (uren) Eefde
Juni – Juli 2010	510	(KNMI, 2010b), Droge periode	704
April – Mei 2011	624	(KNMI, 2011), Droge periode	584
Juni – Juli 2014	468	(KNMI, 2014a), Gemiddeld droge periode	547
Juni – Juli 2012	-	(KNMI, 2012), Gemiddeld droge periode	542
Augustus 2014	393	(KNMI, 2014b), Natte periode	411
Augustus – september 2010	464	(KNMI, 2010a), Extreem Natte periode	143

Pompstrategie instellingen

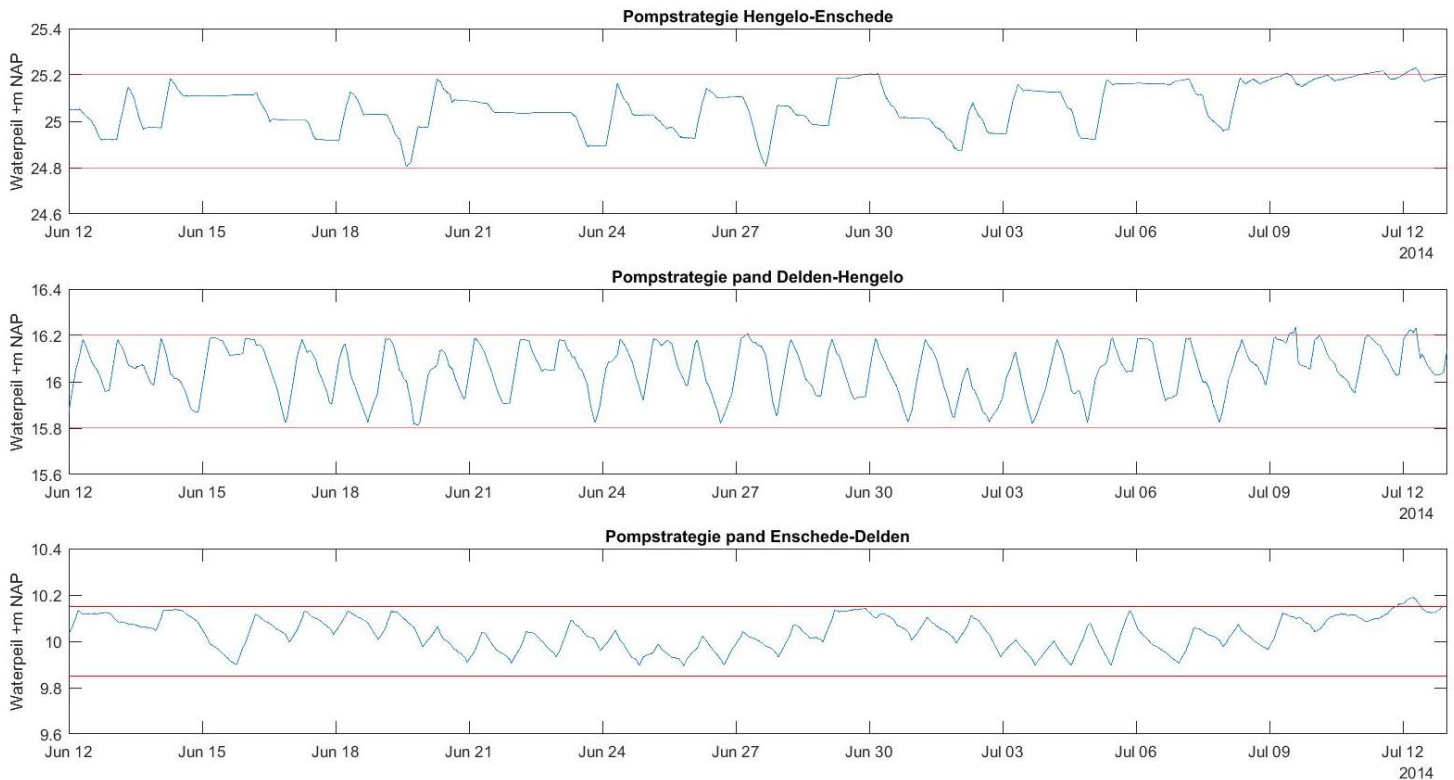
De pompstrategie instellingen zijn de variabelen die gebruikt zijn in het MATLAB-model. Deze zijn weergegeven in Tabel 4. Deze waardes zijn bepaald aan de hand van 'trial and error' en voor ieder jaar hetzelfde gehouden.

Tabel 4: pompstrategie instellingen

Variabelen voor de pompinstellingen	Eefde - Delden	Delden Hengelo	Hengelo Enschede
Pompen vanaf minimum peil (+m NAP)	9,90	15,83	24,81
Pompen tot en met maximum peil (+m NAP)	10,13	16,18	25,18
Pompcapaciteit (m ³ /s)	20	4.8	3
Aflaat (m ³ /s)	50	10	0
Pomp duur (uur)	8	8	6
Pomp frequentie (aantal keer per dag)	1	1	1
Pomp regulatie pomp moment (+m NAP)	10	16,05	24,95
Pomp moment (tijdstip)	23:00	23:00	02:00

Waterpeilverloop

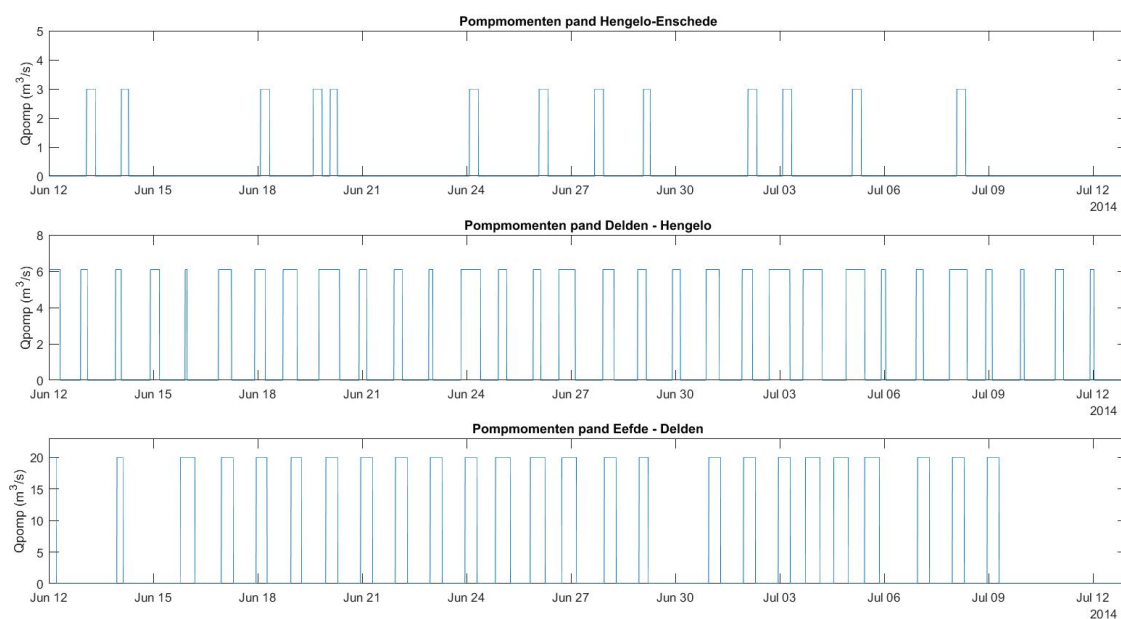
In Figuur 19 is het waterpeilverloop gesimuleerd uit de droge situatie van 2014. Zo is te zien dat het pand Hengelo – Delden, maar een aantal keer het minimum toelaatbaar peil bereikt. Pand Delden – Hengelo zakt regelmatig naar het minimumpeil en pand Eefde – Delden heeft in sommige dagen moeite om het maximum peil te bereiken. Het waterpeilverloop van de andere simulaties zijn weergegeven in appendix C.



Figuur 19: waterpeil verloop met nieuwe pompstrategie, droge simulatie 2014

Pompdebieten

Om een beeld te geven van de pompdebieten gedurende de simulatie periode is Figuur 20 weergegeven. Zo is te zien dat er steeds met een vast interval maximaal gepompt wordt.



Figuur 20: Pompsdebieten tijdens de droge simulatie periode van 2014

4.3 UITZAKTIJD

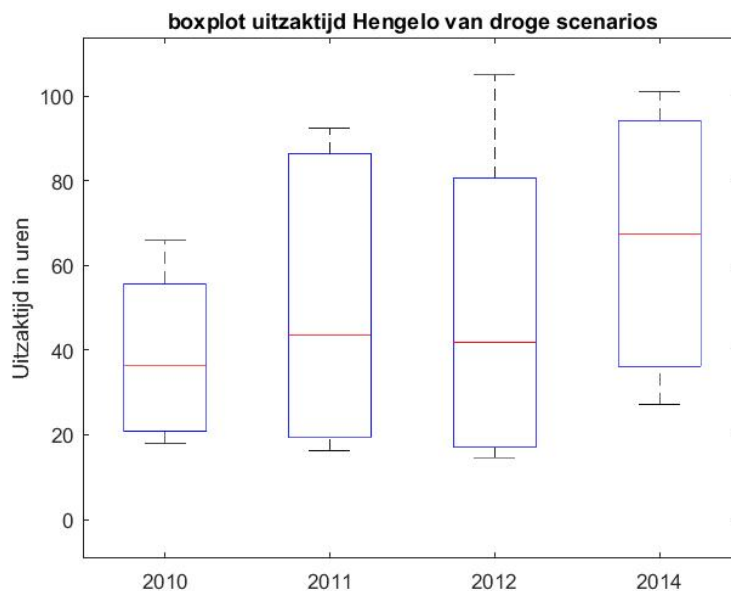
Voor ieder pand zijn de periodes naast elkaar gezet in een boxplot. Er is onderscheid gemaakt tussen droge en natte simulaties. De resultaten van de uitzaktijden worden in box plots weergegeven. Deze zijn echter anders dan een normale box plot. Hier worden alleen het 10^{de}, 25^{ste}, 50^{ste}, 75^{ste} en 90^{ste} percentiel geplot. De uiterste zwarte strepen zijn het 10^{de} en 90^{ste} percentiel. De blauwe box toont het gebied tussen het 25^{ste} en 75^{ste} percentiel en de rode lijn laat het 50^{ste} percentiel zien.

4.3.1 Droge simulaties

De droge simulaties zijn hier per pand gegeven. Ook de gemiddelde simulatie van 2012 is meegenomen en vergeleken met de droge situaties.

Hengelo – Enschede

In Figuur 21 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is de box plot van het pand Hengelo – Enschede te zien. De plot laat zien dat de gemiddelde uitzaktijd rond de 40 uur ligt, alleen het jaar 2014 wijkt hiervan af. De spreiding van 2010 is het kleinst van alle gesimuleerde periodes (Tabel 5). Met een minimale uitzaktijd van 18 uur voor ieder pand, is het mogelijk om maar één keer op een dag 8 uur te pompen.



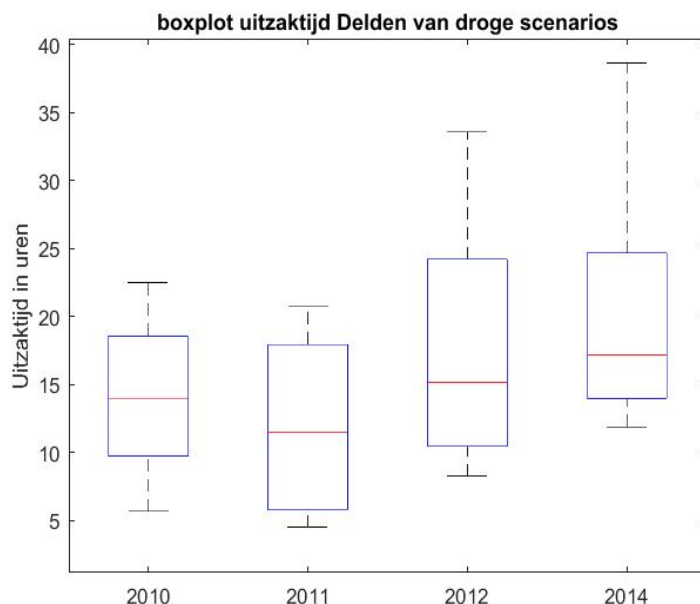
Figuur 21: Droge simulaties pand Hengelo - Enschede

Tabel 5: Standaarddeviatie en gemiddelde van de uitzaktijd voor pand Hengelo - Enschede

Pand		2010	2011	2012	2014
Hengelo_Enschede	σ	19,30	33,46	43.13	29,74
	μ	36,50	43,5	41,83	67,50

Delden – Hengelo

In Figuur 22 is de boxplot van Delden – Hengelo weergegeven. De spreiding is veel kleiner voor dit pand dan voor het boven gelegen pand. De waarden voor de uitzaktijd zijn voor 2011 lager dan de andere gesimuleerde periodes. Het 10^{de} percentiel is voor de eerste twee simulaties rond de 5 uur en voor de andere twee gemiddelde jaren boven de 10 uur. De standaarddeviatie en het gemiddelde worden in Tabel 6 weergegeven. Met deze uitzaktijden zou er ook gekozen kunnen worden om iedere 12 uur te pompen. Dit geeft echter geen langere uitzaktijd, omdat er evenveel tijd op een dag wordt gepompt. Dus voor dit onderzoek is dat minder interessant. Wel zal de spreiding kleiner worden.



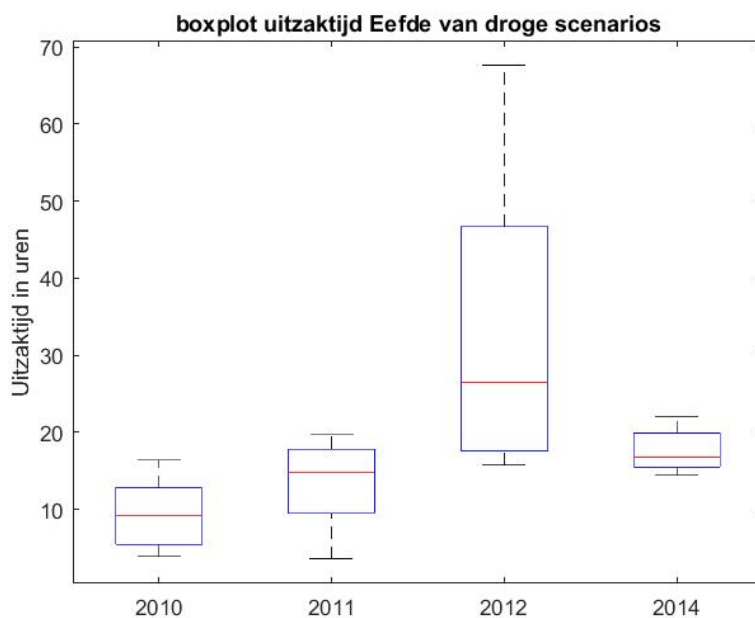
Figuur 22: Droge simulaties pand Delden - Hengelo

Tabel 6: Standaarddeviatie en gemiddelde uitzaktijd voor het pand Delden - Hengelo

Pand		2010	2011	2012	2014
Delden-Hengelo	σ	5,83	6,92	9,71	9,94
	μ	14,00	11,50	15,17	17,17

Eefde – Delden

In Figuur 23 is de boxplot van pand Eefde – Delden weergegeven. Opvallend is hier dat de periode in 2012 afwijkt van de andere periodes. De simulatie periode van 2010 heeft de kleinste uitzaktijden. Dit is te verklaren doordat er met een hogere capaciteit gedurende de hele periode gepompt is voor de historische situatie. Voor deze situatie zou men dus langer moeten pompen op een dag dan 8 uur. Ook voor 2011 is het 10^{de} percentiel te krap voor 8 uur pompen, echter is het gemiddelde wel voordeliger. De simulatie periode van 2014 is een goede situatie om 8 uur op een dag te pompen, hier ligt een kleine spreiding omheen.



Figuur 23: Box plot van de droge simulatie voor pand Eefde - Delden

Tabel 7: standaarddeviatie en gemiddelde uitzaktijd voor het pand Eefde - Delden

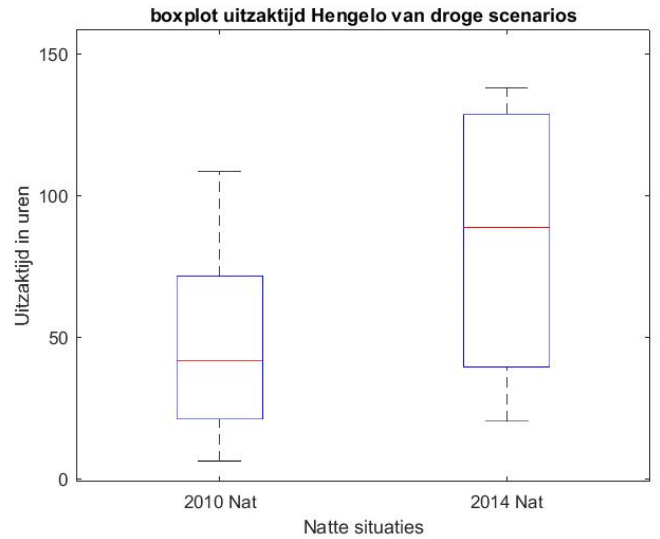
Pand		2010	2011	2012	2014
Eefd-Delden	σ	7,98	5,64	22,52	5,48
	μ	9,17	14,83	26,5	16,75

4.3.2 Natte simulaties

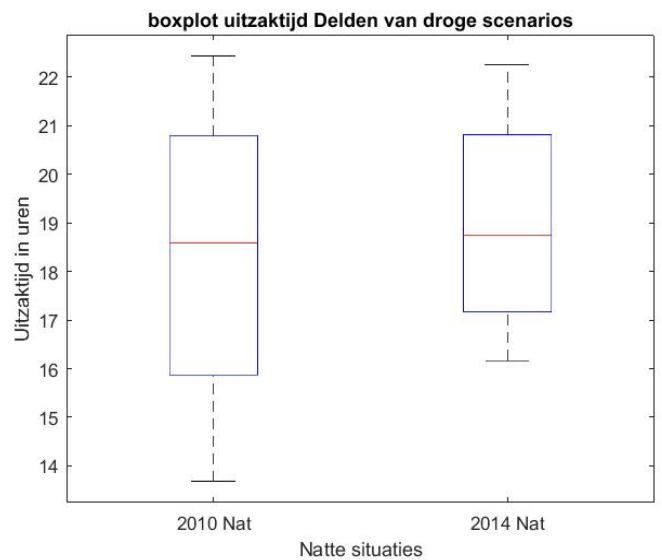
Voor de natte simulaties zijn ook boxplots gemaakt. In vergelijking met de droge simulaties is te zien dat ieder pand een grotere uitzaktijd heeft gekregen. Daarbij is het verschil in de uitzaktijd van het pand Delden – Hengelo (Figuur 24), in vergelijking tot de andere panden, beperkt gebleven. Tijdens de oude pomp situaties komt dit ook naar voren. Er wordt gedurende het hele jaar door gepompt in dit pand, ook in natte periodes. Het pand Hengelo -Enschede (Figuur 24) en Eefde – Delden (Figuur 26) komen op een gemiddelde van rond de 48 uur. In Tabel 8 zijn de standaarddeviaties en de gemiddelden weergegeven van ieder pand. Zoals ook te zien is in de plots is de spreiding groot voor het onderste en bovenste pand. Opvallend is dat het 10^{de} percentiel rond de 18uur ligt.

Tabel 8: statistieken van de uitzaktijden natte simulaties

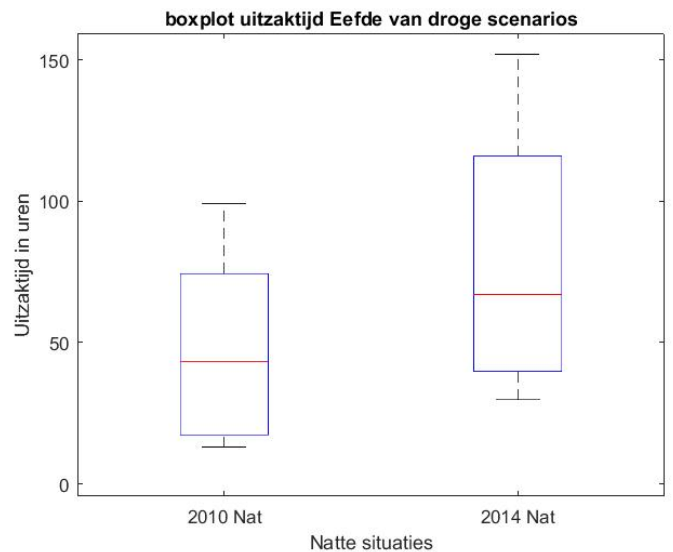
Pand		2010 Nat	2014 Nat
Hengelo - Enschede	σ	55,02	46,01
	μ	41,83	88,75
Delden - Hengelo	σ	6,57	6,16
	μ	18,58	18,75
Eefde - Delden	σ	40,69	46,86
	μ	43,3	67



Figuur 24: Natte situaties pand Hengelo - Enschede



Figuur 25: Natte situaties pand Delden - Hengelo



Figuur 26: Natte situaties pand Eefde - Delden

5 DISCUSSIE & AANBEVELINGEN

Op basis van uitkomsten van het hydrologisch model komt er sterk naar voren dat de bufferruimte in het watersysteem mogelijkheden biedt voor het toepassen van ‘pompen als het waait’. De bevindingen tonen aan dat er voor situaties als watertekort en -overschot er een dusdanige marge in de uitzaktijd zit dat er maar één keer per dag 8 uur gepompt hoeft te worden. Voor extreme watertekorten zal langer en vaker op een dag moeten worden gepompt, maar de uitzaktijd biedt een dusdanige marge dat hierin gestuurd kan worden. Naast deze bevindingen zijn de opvallende resultaten besproken in de volgende paragraaf.

5.1 INTERPRETEREN VAN RESULTATEN

Opvallende trends en verwachte resultaten worden besproken voor de historische situaties en de nieuwe situaties.

5.1.1 Historische situatie

Het waterpeilverloop van 2011, dat rond begin mei en begin juli onder de ondergrens van het waterpeil bij pand Eefde-Delden zakt. Is te verklaren door de droogte die rond deze tijd heeft geheerst (KNMI, 2011) en tegelijkertijd is het aantal schuttingen in deze periode hoog (hoofdstuk 4.1.5). Dit komt ook overeen met de pompdebieten in Figuur 13 die laat zien dat er over het hele jaar meer gepompt wordt dan in de rest van de jaren.

Logischer wijs is er meer afgelaten in de wintermaanden dan in de zomermaanden. 2010 (Figuur 15) was een nat jaar wat onder andere te zien is in september met een piek aflat van $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (KNMI, 2010a).

5.1.2 Nieuwe situatie

Pand Hengelo-Enschede heeft een relatieve grote spreidingen. Dit kan verklaard worden, doordat het pand klein is en zeer gevoelig voor het schutten van schepen. Bovendien fluctueert het aantal schepen per dag, wat zorgt voor een versterkte fluctuatie in de uitzaktijd. Het is opvallend dat het tiende percentiel van alle gesimuleerde periodes rond de 18 uur liggen. Een verklaring hiervoor is dat er tussen 2:00 en 6:00 uur gepompt wordt, wat betekent dat er 18 uur niet gepompt hoeft te worden.

Voor het pand Delden – Hengelo is de spreiding kleiner dan voor de andere panden. Dit is omdat er vaker consequenter gepompt moet worden dan de andere panden. De waardes voor de uitzaktijd zijn in de situatie 2011 lager dan de andere gesimuleerde periodes. Gezien dit aangegeven staat als een extremer droog jaar (KNMI, 2011) is dit een logisch gevolg. Ook het aantal schuttingen ligt aanzienlijk hoger dan de voor rest van de periodes (Figuur 17).

Opvallend is bij pand Eefde – Delden dat de situatie in 2012 afwijkt van de andere periodes. In de historische situatie is te zien dat er niet hard is gepompt in deze periode (zie appendix C voor het jaar 2012), wat verklaard dat het systeem minder snel uitzakt en daardoor een grotere spreiding heeft. Verder heeft pand Eefde – Delden in sommige dagen moeite om het maximum peil te bereiken. Dit is verklaarbaar, omdat dit een groot pand is dat relatief langzamer vol- en leegloopt.

Voor de natte situaties is te zien dat het verschil in de uitzaktijd van het pand Delden – Hengelo (Figuur 24), in vergelijking tot de andere panden, beperkt is gebleven. Dit komt doordat het aantal schuttingen op dit pand relatief gezien het meeste effect heeft, waardoor het peil sneller uitzakt. Het pand Hengelo-Enschede (Figuur 24) en Eefde – Delden (Figuur 26) komen op een gemiddelde van rond de 48 uur, wat betekent dat er in natte scenario's nauwelijks gepompt hoeft te worden. Dit is logisch, omdat dit in de oude situatie ook het geval was.

5.2 LIMITATIE

Niet alle relevante aspecten konden meegenomen worden in dit onderzoek, daarom moet er rekening gehouden worden met de volgende aspecten.

5.2.1 Data

Historische data wordt als input gebruikt voor het model. Deze data heeft invloed op de uitkomst van het model, daarom moet er rekening gehouden worden met dat de data meetfouten kan bevatten. Deze meetfouten bestaan uit handmatige metingen, waarin menselijke onnauwkeurigheden een rol kunnen spelen. Daarnaast is de meetapparatuur voor de waterhoogte naast de sluizen gelokaliseerd, wat enorme grilligheid in het waterpeilverloop veroorzaakt (zie Figuur 8 in hoofdstuk 4.1.1), omdat voorbijvarende schepen van grote invloed kunnen zijn (van Duin, 2016). Verder zijn er weinig meetpunten waardoor dit niet uitgebalanceerd kan worden. Dit wordt enigszins gecompenseerd doordat de waterstand glad wordt gestreken.

Naast dat er meetfouten in de data zitten, zitten er ook onnauwkeurigheden in de relaties voor het omzetten van de data. Hierbij zijn er aannames gedaan voor het bepalen van de pompconstanten en aflatconstanten. Afrondingen in de constanten veroorzaken een systematische fout in het berekenen van de debieten van de in- en uitstromen. Met name de pomprelatie voor gemaal Eefde brengt onzekerheden met zich mee, omdat de opvoerhoogte hier niet constant is. Het zou wenselijk zijn als debieten direct gemeten worden en niet eerst doormiddel van relaties omgezet moeten worden. Daarnaast is er voor het oppervlak dat gebruikt is om de volumeverandering te berekenen, aangenomen dat het een constante breedte heeft over de Twentekanal. Dit is echter niet overal het geval. Deze versimpeling brengt een afrondingsfout met zich mee die relatief veel invloed heeft op Q_{rest} , omdat het verschil in waterhoogte vermenigvuldigd wordt met een enorm oppervlak. Een voorbeeld hiervan is wanneer de breedte met een meter verschilt, kan dit voor 1 centimeter toename in het waterpeil voor een verschil in de volumeverandering van $2.67 \text{ m}^3/\text{s}$ zorgen. Dit zorgt voor een significante fout in de volumeverandering.

Tijdens de jaren die gebruikt zijn als input voor het model, kunnen zich voorvallen hebben voorgedaan die invloed hebben gehad op de meetgegevens. Hierbij kan gedacht worden aan een storing. Meetgegevens kunnen ontbreken in de datasets tijdens deze voorvallen, zonder dat dit expliciet gemeld is bij de data. Daardoor krijg je foutieve meetgegevens.

5.2.2 Model

Naast de data zijn er ook aannames gedaan voor het model. Er is een ruw model gemodelleerd, hierdoor zijn niet alle in- en uitstromen berekend voor het bepalen van de uitzaktijd. Dit hoeft echter geen nadelige gevolgen te hebben, omdat in eerdere studies waar dit wel is meegenomen er sluitfouten ontstonden (Bruine, 2010). Met het ruwe model hoeft hier geen rekening mee gehouden te worden. Desondanks kunnen er minder goed verklaringen worden gegeven voor afwijkende uitkomsten in de uitzaktijd.

Daarnaast zijn de aannames voor de variabele pompinstelling van invloed op de uitkomsten. Er zijn nieuwe pompen geplaatst bij sluis Eefde in 2015 (Nederland e.a., 2017), waardoor de pompconstanten weer verschillen met de historische pompconstanten. Deze pompen hebben een nieuw systeem waardoor de pompdebieten niet berekend kunnen worden. Hiervoor is een aanname gedaan op basis van het maximale pompdebiet en de pompcurve van de oude pompen.

Verder kan maximaal pompen minder rendabel zijn, omdat pompen inefficiënt kunnen worden als men een bepaald debiet overschrijdt (Schaap, Geurts, van den Berg, & Stolk, 2010). Er moet dus rekening gehouden worden met wat wordt verstaan onder efficiënt pompen en in hoeverre en maximaal gepompt kan worden. Maximaal pompen kan ook gevolgen hebben voor de scheepvaart op het gebied van stroming.

5.3 AANBEVELINGEN

Voor vervolgonderzoek zijn de volgende zaken van belang.

5.3.1 Data

Op het gebied van data, kan er aangeraden worden om meer jaren als input te nemen voor het model. Hierdoor kunnen uitschieters gefilterd worden en kan de waterbalans vergeleken worden.

5.3.2 Betere advies module voor pompstrategie

Nu er een indicatie is voor de mogelijkheid om 'pompen als het waait' toe te passen kan er naar een betere advies module voor de pompstrategie gekeken worden. Voor het verbeteren van het pompadvies zou er gekeken kunnen worden naar de richtingscoëfficiënt van de snelheid waarmee het waterpeil uitzakt en deze dan afstemmen op de pompstrategie. Bijvoorbeeld: Als er voor bepaalde richtingscoëfficiënt waarden voorspellingen gedaan kunnen worden voor hoe lang het duurt voordat er weer gepompt moet worden, kan er gestuurd worden op welk tijdstip van de dag er gepompt kan worden. Zo kan men dit afstemmen met de energiemarkt wanneer energieprijzen goedkoop zijn.

Het voorspellen van de uitzaktijden zou in een vervolgstudie geïmplementeerd kunnen worden met IWP in combinatie met de prijzen van de energiemarkt. Hiervoor moet wel eerst een studie gedaan worden naar de precieze voorspellingen die gedaan kunnen worden in de energiemarkt. Daarnaast is het van belang om te weten hoeveel 'pompen als het waait' uiteindelijk zal opleveren aan de hand van een businessmodel en of dit überhaupt genoeg winst genereert.

5.3.3 Validatie

Het model is moeilijk te valideren, omdat er geen andere studies zijn naar de uitzaktijd van de Twentekanalen. Daarvoor wordt er aangeraden om een studie te doen voor het valideren van het model. Daarbij is het ook van belang om de input data te checken. Er zou gekeken kunnen worden naar het meenemen van zoveel mogelijk soortgelijke periodes in historische data, waarna deze vergeleken kunnen worden. Zodat uitschieters eruit gefilterd kunnen worden. De vraag is echter in hoeverre periodes over de jaren echt met elkaar vergeleken kunnen worden, omdat er zoveel veel verschillende variabelen van invloed zijn.

Daarnaast zou er ook een echt experiment gedaan kunnen worden met het watersysteem van de Twentekanalen. Zo zou er per pand gestuurd kunnen worden om binnen bepaald marges het water steeds te laten fluctueren om zo een indicatie te krijgen of de uitzaktijd overeenkomt met het model. Als dit te risicovol is, zou gekeken kunnen worden of de pompstrategie in IWP geïmplementeerd kan worden om zo de uitzaktijden te vergelijken.

5.3.4 Risico's

Tot slot is een risicoanalyse van belang voordat 'pompen als het waait' kan worden geïmplementeerd. Er moet gekeken worden wat de gevolgen en kansen kunnen zijn voor plotselinge regenval, wanneer het waterpeil dan op het maximum peil zit kan dit voor overstromingen en overlast zorgen. Verder zou het maximale pompvermogen van 20 m³/s gevolgen kunnen hebben voor de scheepvaart, zoals ook genoemd in de discussie. Een studie hiernaar is van belang om 'pompen als het waait' te kunnen toepassen.

6 CONCLUSIE

In deze studie naar het watersysteem van de Twentekanalen is onderzoek gedaan naar de uitzaktijd voor situaties van watertekort en -overschot, wanneer men het waterpeil maximaal oppompt en vervolgens laat uitzakken tot het minimum peil.

Hieruit kan worden opgemaakt dat de gemodelleerde uitzaktijd voor ieder pand ruimte biedt om in situaties van watertekort en -overschot het pompen uit te stellen. Daardoor kan er gestuurd worden op het pompmoment en de pompduur van de dag. Met deze tools kan er ingespeeld worden op het flexibele energieaanbod op de energiemarkt.

Al met al fungeert deze studie als basis waarop voortgeborduurd kan worden voor verder onderzoek naar de toepasbaarheid van 'pompen als het waait' voor de Twentekanalen.

7 REFERENTIES

- Beijk, V. (2015). *Voorstel voor gebruik tabel schuttingen t.b.v. waterbalans in Twentekanalen*.
- Berends, T., Nelen, G., & Hart, K. J. De. (2015). Duurzaam energieverbruik: pompen als het wadit.
- Bhaskar, R. K., Ph, D., & International, H. (2015). Energy Savings Strategies in Water and Wastewater, (July).
- Bilt, D. (2017). Het jaar 2016 : zeer warm , zeer zonnig en aan de droge kant, 4–9.
- Bruine, ir. E. P. de. (2010). Deltares Waterbalans en SOBEK-model Twentekanalen deelrapport waterbalansen. *Waterbalans en SOBEK-model Twentekanalen deelrapport waterbalans*, 49.
- HAVERKORT, V. (2015). QUICK SCAN RIJKSWATERSTAAT GEMAAL DELDEN. Rijkswaterstaat.
- Helpdesk water. (2017). IWP. Geraadpleegd van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/water-ruimte/waterkwantiteit/iwp/>
- KNMI. (2010a). *Jaaroverzicht van het weer in Nederland*. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/gegevens/mow>
- KNMI. (2010b). *Maandoverzicht van het weer in Nederland*.
- KNMI. (2011). *Maandoverzicht van het weer in Nederland*. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/gegevens/mow>
- KNMI. (2012). *Maandoverzicht van het weer in Nederland*. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/gegevens/mow>
- KNMI. (2014a). *Maandoverzicht van het weer in Nederland*. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/gegevens/mow>
- KNMI. (2014b). *Maandoverzicht van het weer in Nederland, augustus*. Geraadpleegd van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/gegevens/mow>
- Lund, H., & Münster, E. (2003). Management of surplus electricity-production from a fluctuating renewable-energy source.
- Nederland, D., Overijssel, P., Drenthe, P., & Groot-salland, W. (2012). Waterakkoord Twenthekanalen / Overijsselsche Vecht, (September).
- Nederland, D., Overijssel, P., Drenthe, P., & Groot-salland, W. (2017). Waterakkoord Twenthekanalen / Overijsselsche Vecht.
- Nelen & Schuurmans. (2016). *Rapportage Pilot Duurzaam Waterbeheer*. Utrecht.
- Rijkswaterstaat Oost-Nederland. (1999). *Verkenning Twentekanalen*.
- Schaap, A., Geurts, F., van den Berg, M., & Stolk, N. (2010). *Haalbaarheidsstudie waterkracht sluis Eefde*.
- van Duin, O. (2016). *Onderzoek kosten-baten adviesmodule Twenthekanalen*.
- Walski, T. M., Chase, D. V, Savic, D. a, Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). Advanced water distribution modeling and management. *Alternatives*, 800. Geraadpleegd van <http://www.haestad.com/library/books/awdm/online/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm>

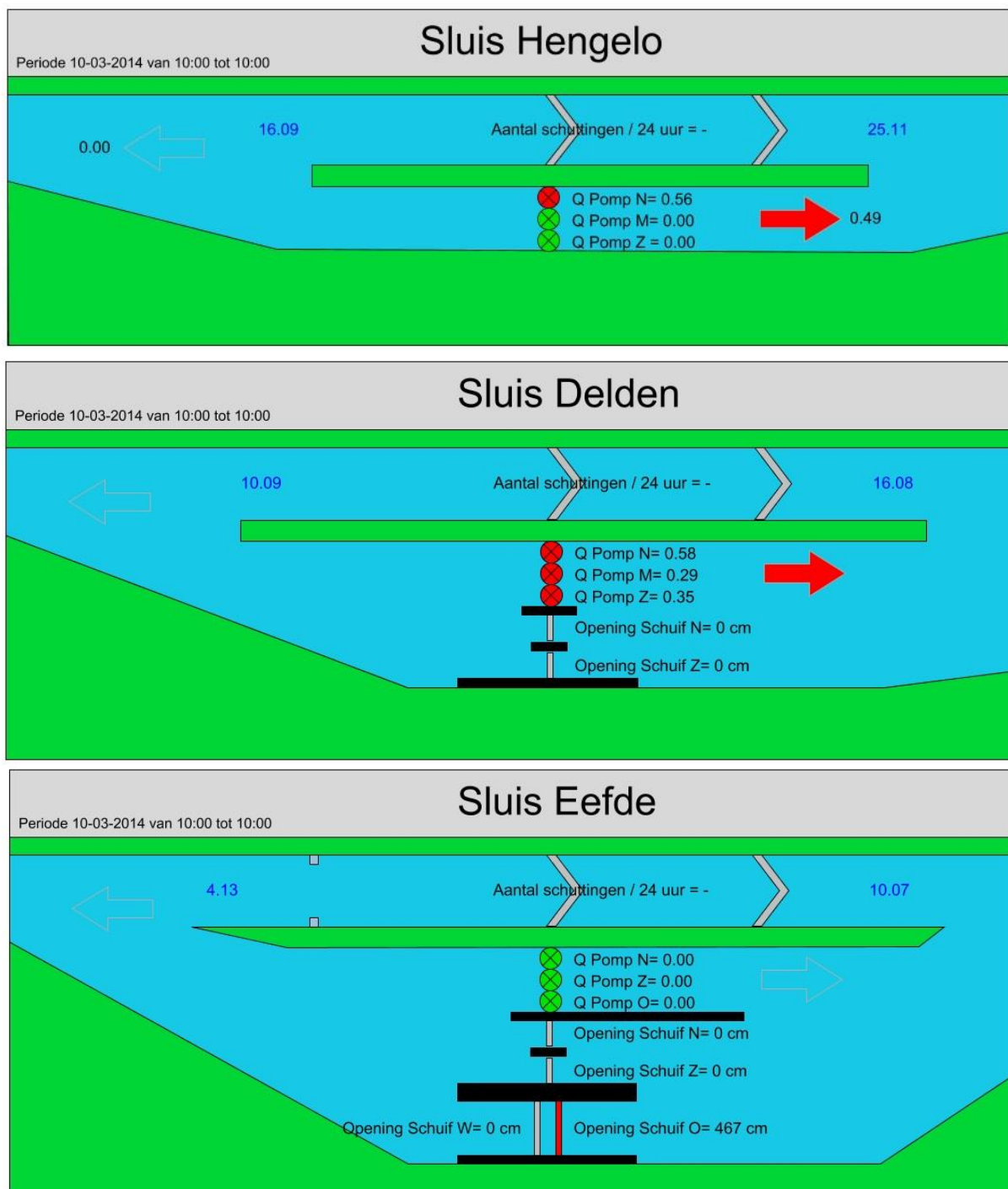
8 APPENDICES

A. GELEVERDE DATA

Sluizen	Naam	Parameter	Eenheid	Tijdstap	Bron
Hengelo	Bovenstrooms sluis	Water hoogte	m	1 u	LMW
	Benedenstrooms sluis	Water hoogte	m	1 u	LMW
	Midden_pomp	Pomp tijd	min	10 min	LMW
	Noord_pomp	Pomp tijd	min	10 min	LMW
	Zuid_pomp	Pomp tijd	min	10 min	LMW
	Hefhoogte sluis deur	Hefhoogte	cm	10 min	LMW
	Schutten van Schepen	Aantal_schuttingen	#	Per uur	NIS
	Lek verlies	Lek verlies	m ³ /s	s	Niet gemeten
Delden	Bovenstrooms sluis	Water hoogte	m	1 h	LMW
	Benedenstrooms sluis	Water hoogte	m	1 h	LMW
	Midden_pomp	Pomp tijd	min	10 min	LMW
	Noord_pomp	Pomp tijd	min	10 min	LMW
	Zuid_pomp	Pomp tijd	min	10 min	LMW
	Hefhoogte sluis deur	Hefhoogte	m	10 min	LMW
	Spuischuif Noord	Sputtijd	%	10 min	LMW
	Spuischuif Noord (halfopen)	Sputtijd	%	10 min	LMW
	Spuischuif Zuid	Sputtijd	%	10 min	LMW
	Spuischuif Zuid (halfopen)	Sputtijd	%	10 min	LMW
	Schutten van Schepen	Aantal_schuttingen	#	Per uur	NIS
	Lek verlies	Lek verlies	m ³ /s	s	not measured
Eefde	Bovenstrooms sluis	Water hoogte	m	1 h	LMW
	Benedenstrooms sluis	Water hoogte	m	1 h	LMW
	Midden_pomp	Pomp tijd	%	10 min	LMW
	Noord_pomp	Pomp tijd	%	10 min	LMW
	Zuid_pomp	Pomp tijd	%	10 min	LMW
	Oude_pomp	Pomp tijd	%	10 min	LMW
	Schuifhoogte Noord	Hefhoogte	m	10 min	LMW
	Schuifhoogte Zuid	Hefhoogte	m	10 min	LMW
	Schuifhoogte Oost	Hefhoogte	m	10 min	LMW
	Schuifhoogte West	Hefhoogte	m	10 min	LMW
Almelo	Waterhoogte TK zijde	Waterhoogte	m	10min	

B. SLUISCOMPLEXEN

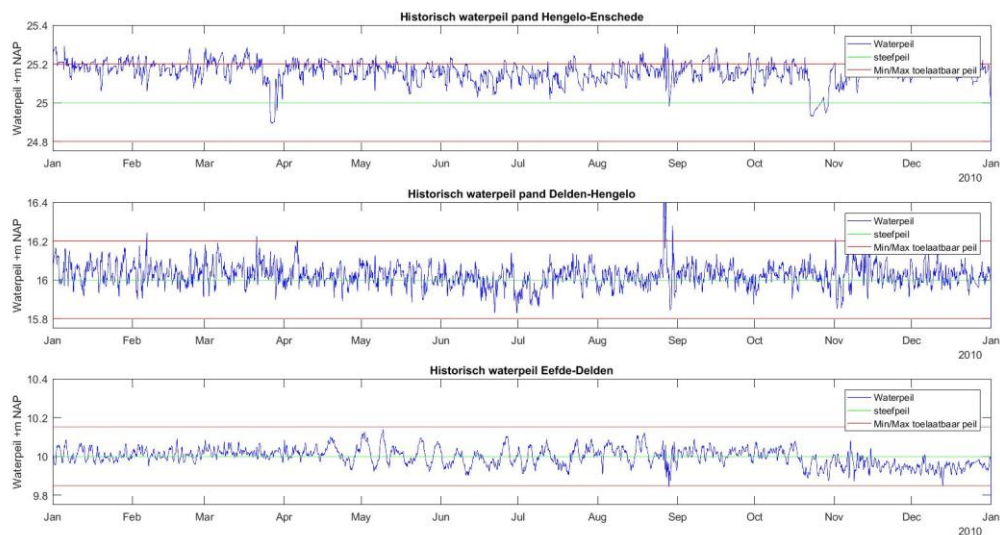
De sluiscomplexen Hengelo, Delden en Eefde zijn hier schematisch weergegeven. De schematische afbeeldingen komen vanuit IWP.



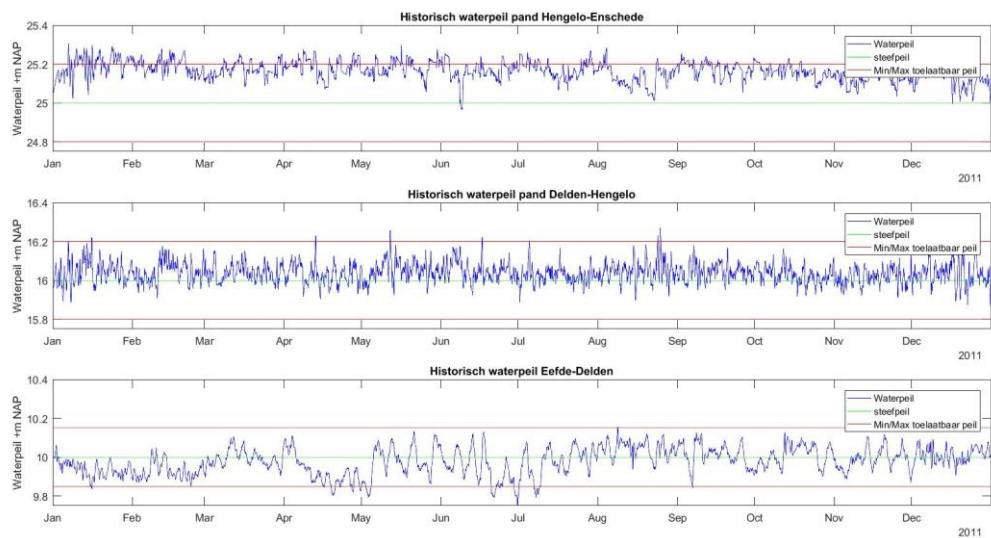
C. RESULTATEN

In deze appendix worden verscheidene grafieken uit het model getoond.

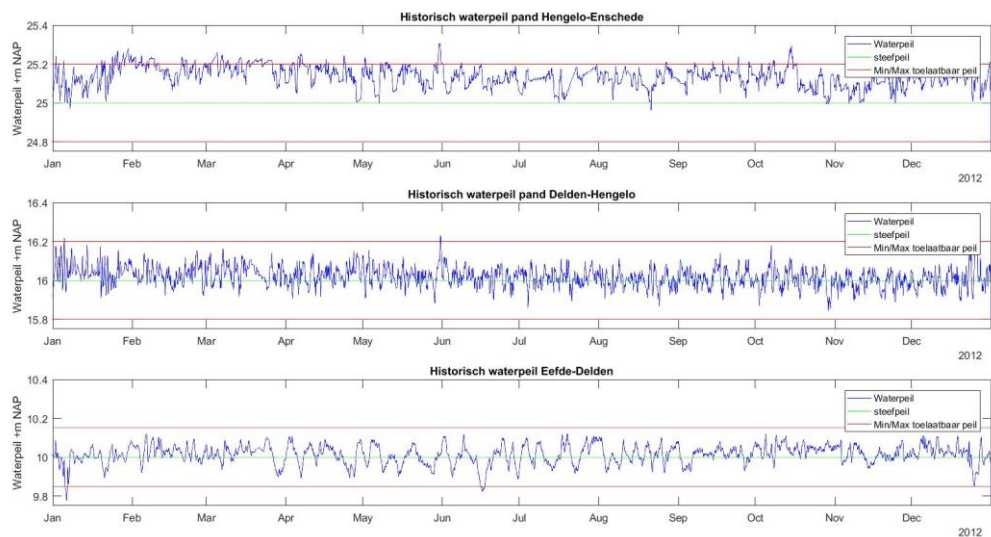
Waterpeilverloop



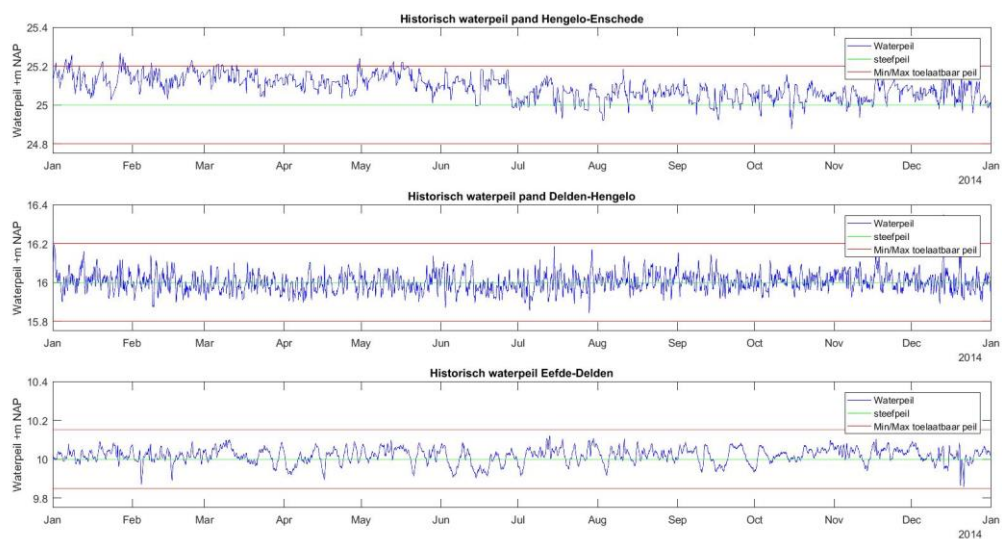
Figuur 27: Waterpeil verloop 2010



Figuur 28: Waterpeil verloop 2011

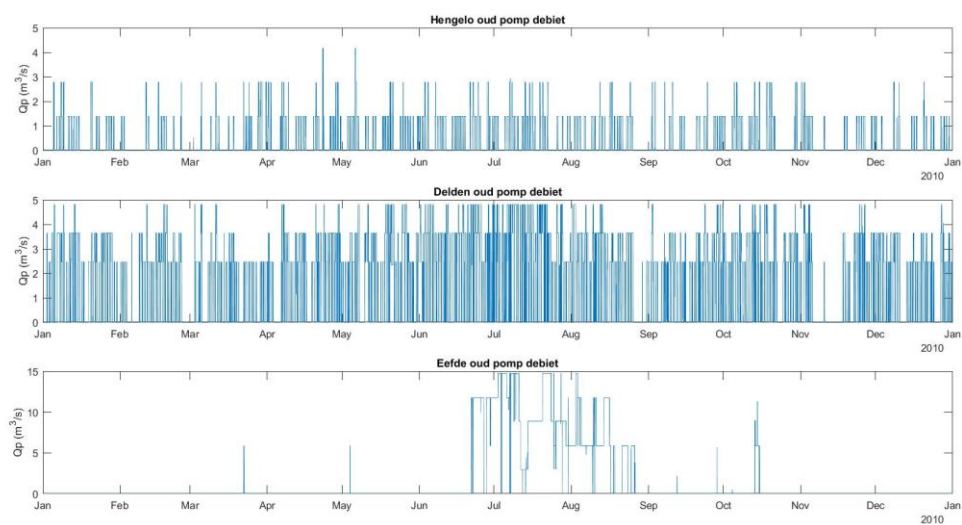


Figuur 29: Waterpeil verloop 2012

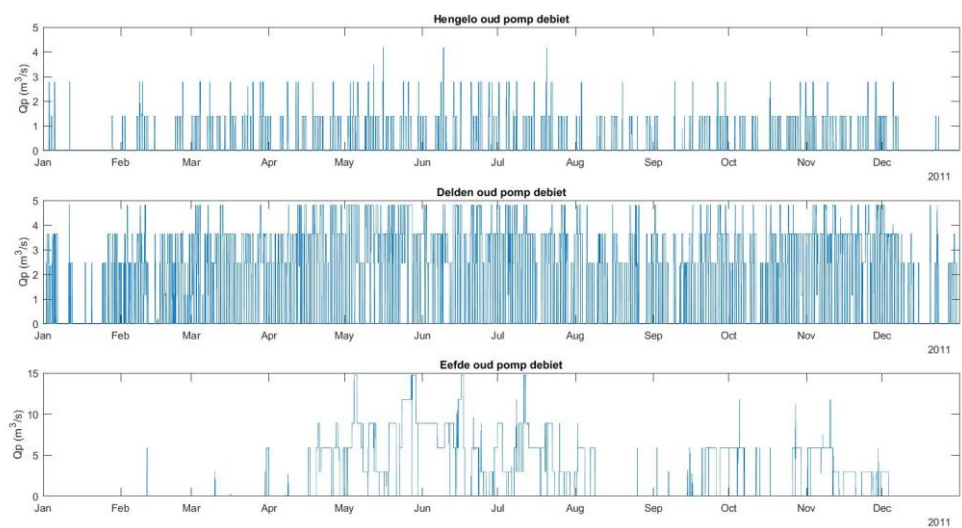


Figuur 30: Waterpeilverloop 2014

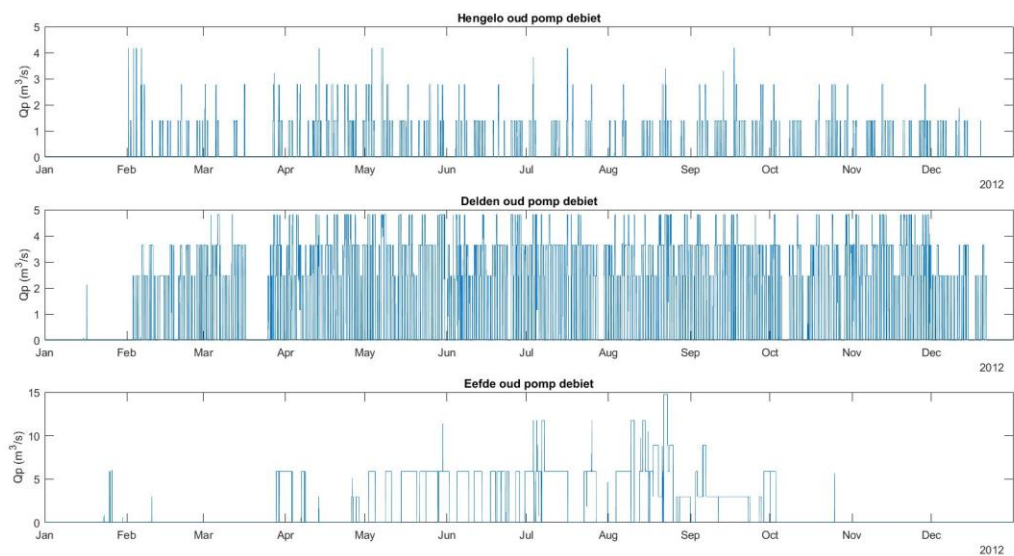
Pompdebieten



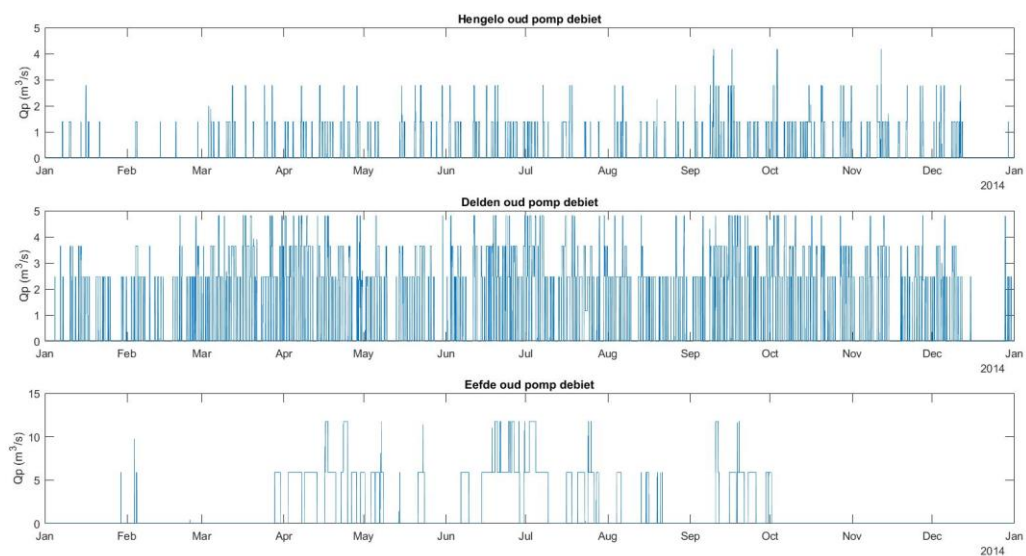
Figuur 31: Pompdebieten 2010



Figuur 32: Pompdebieten 2011

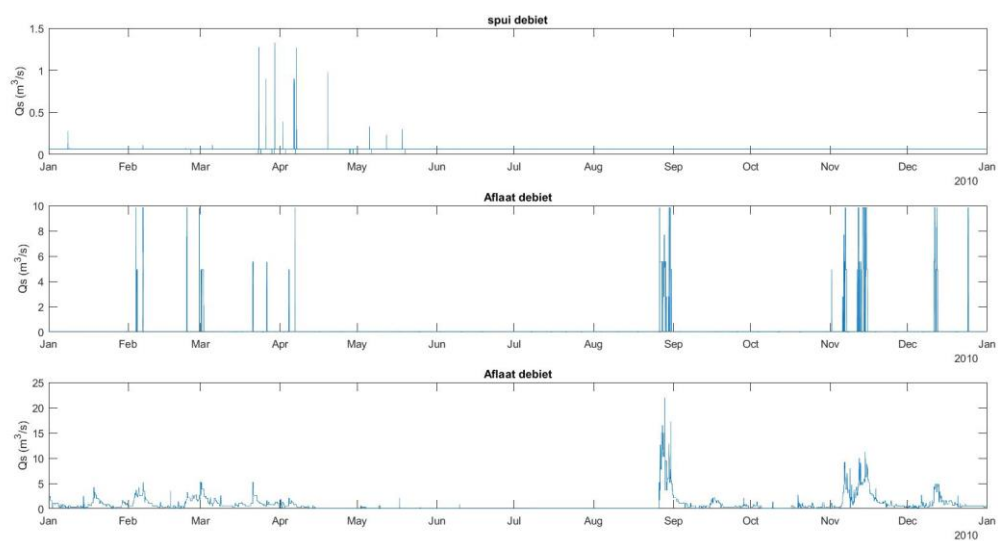


Figuur 33: Pompdebieten 2012

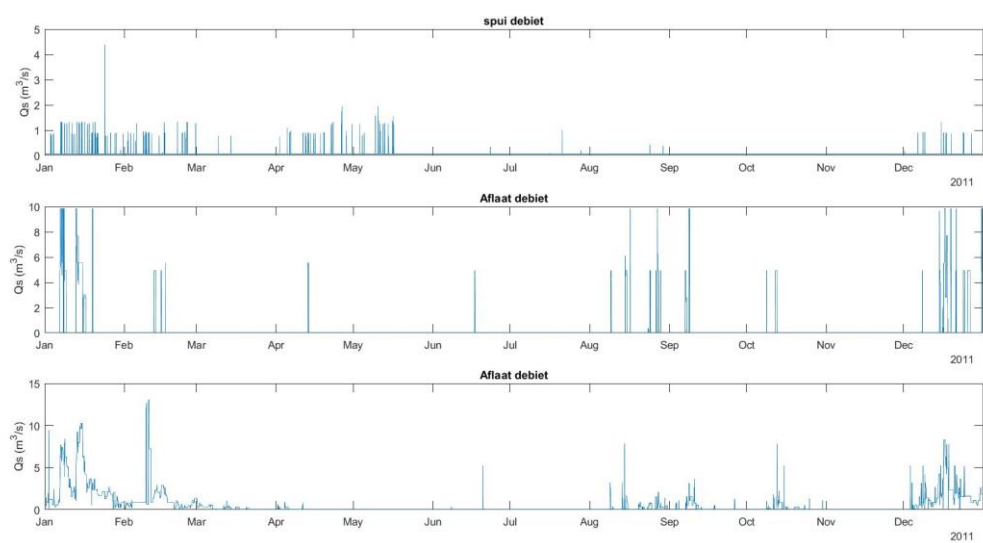


Figuur 34: pompdebieten 2014

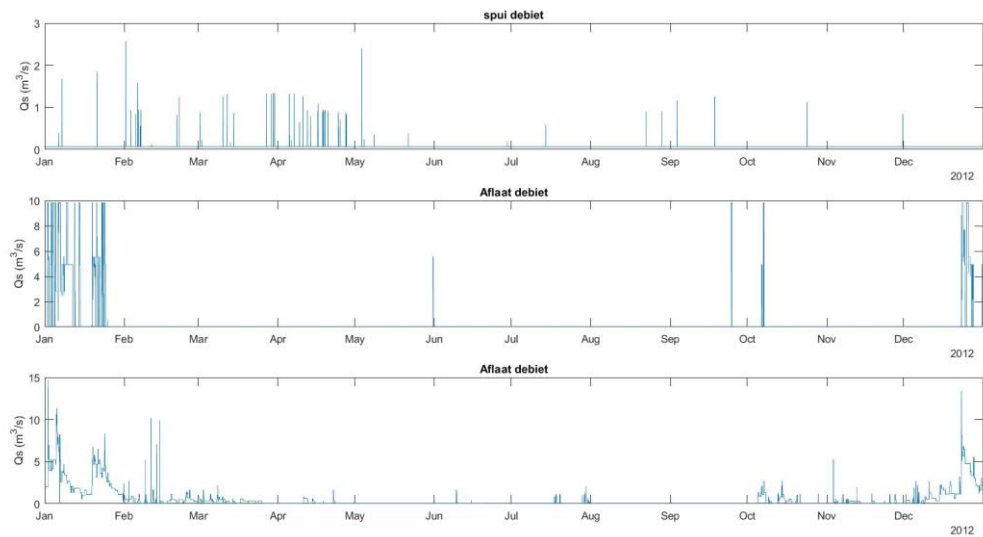
Spuidebiet



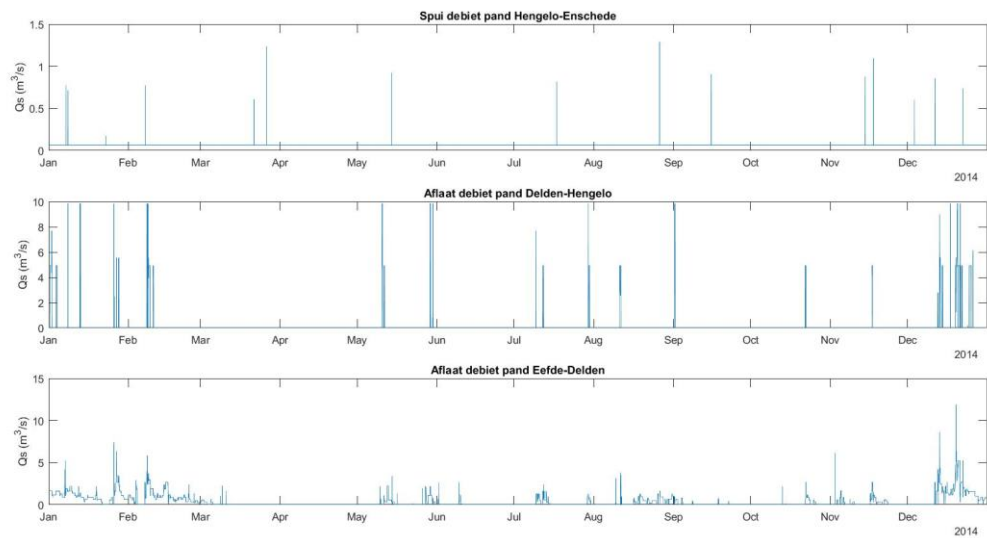
Figuur 35: Spuidebiet 2010



Figuur 36: Spuidebiet 2011

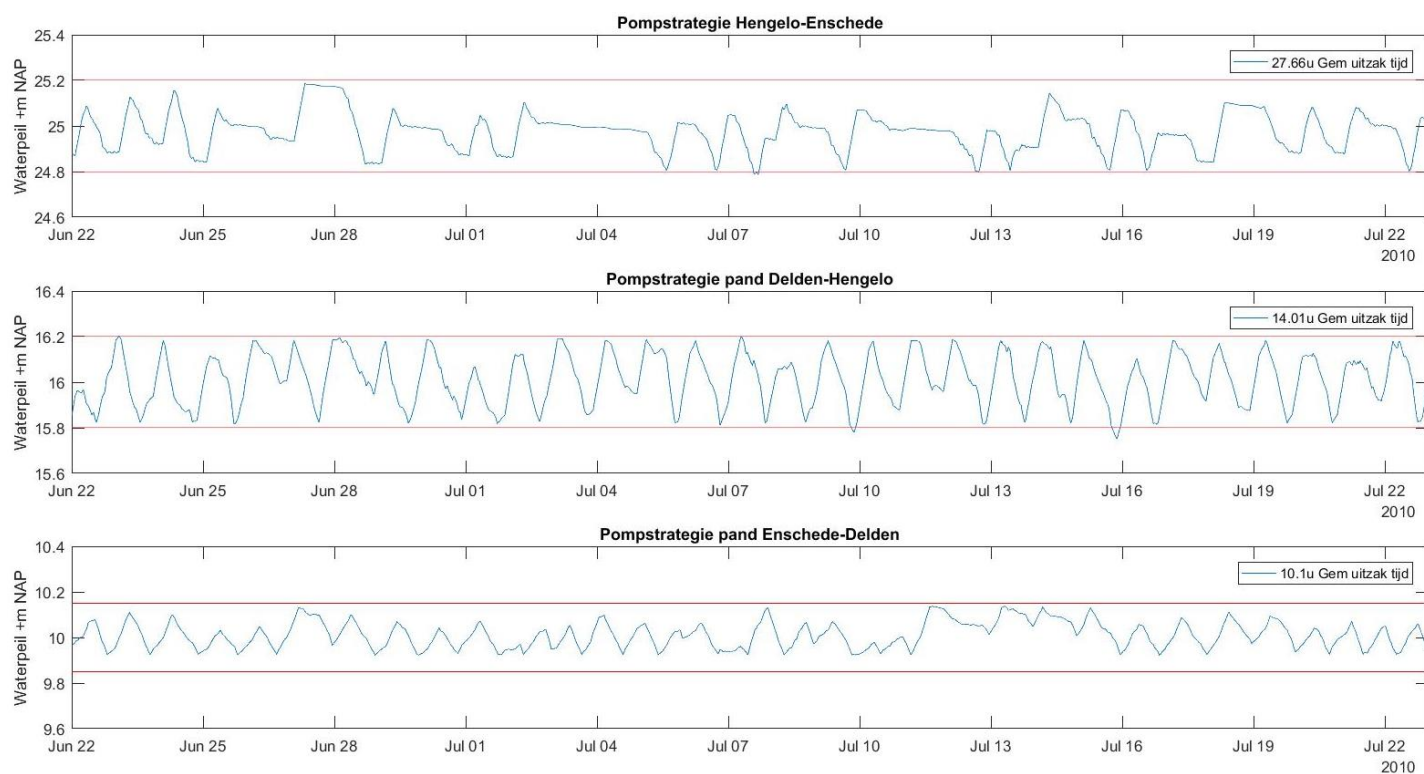


Figuur 37: Spuidebiet 2012

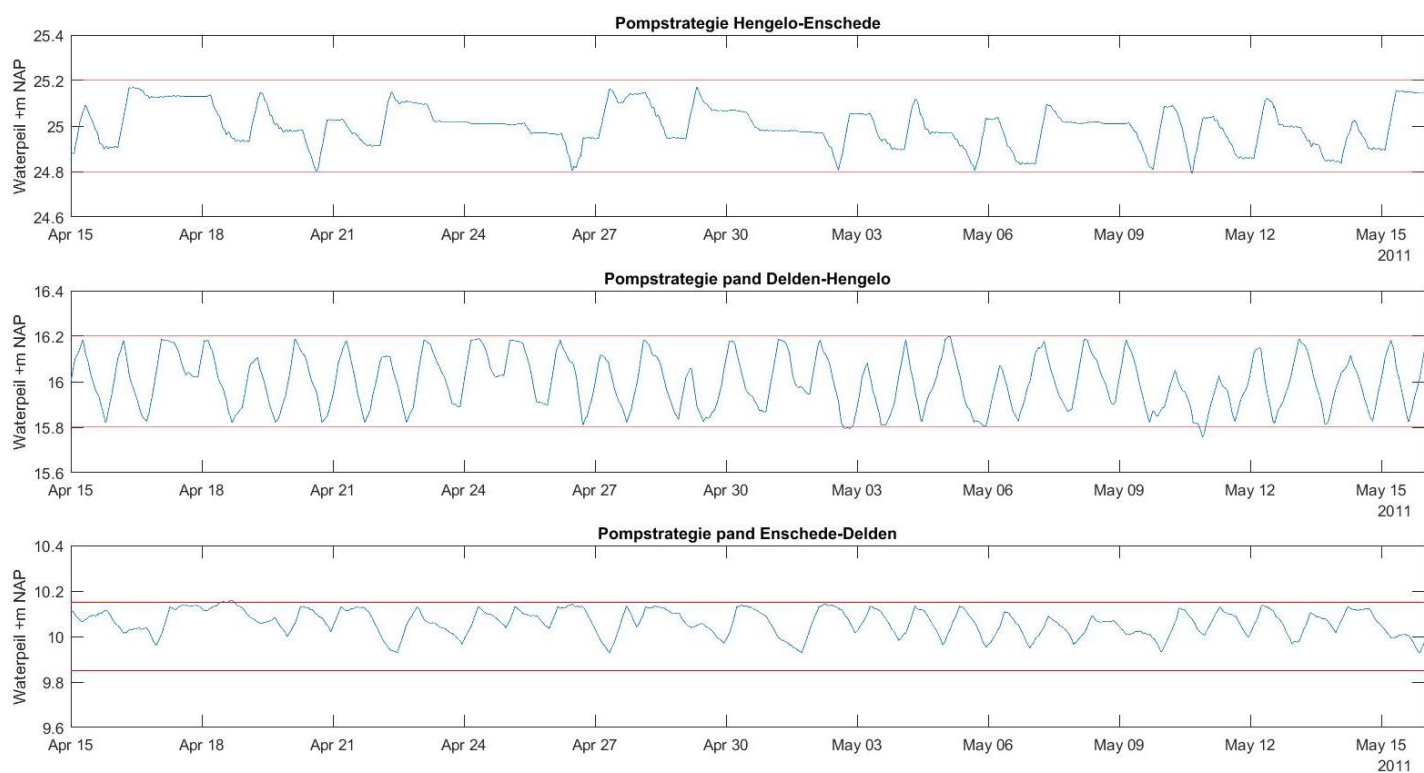


Figuur 38: Spuidebiet 2014

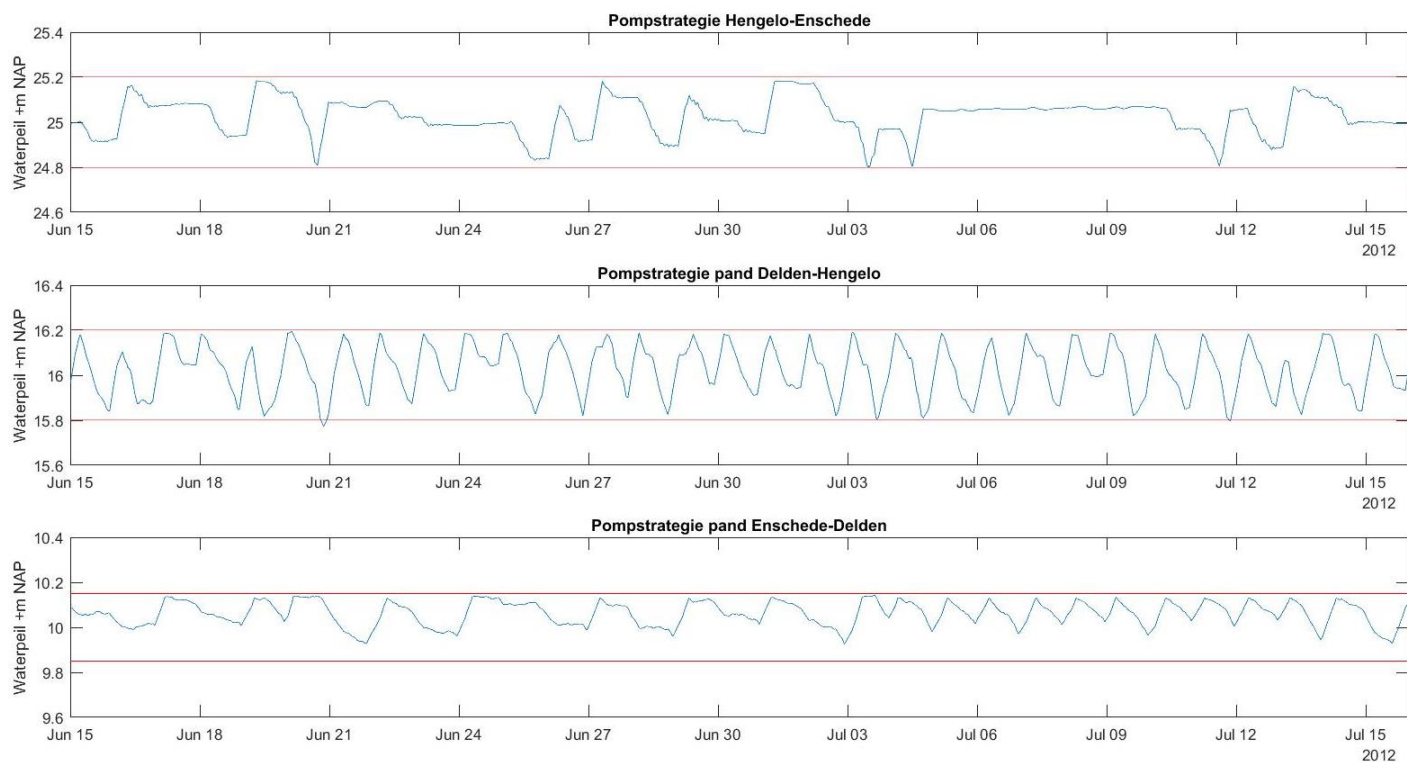
Pompstrategie



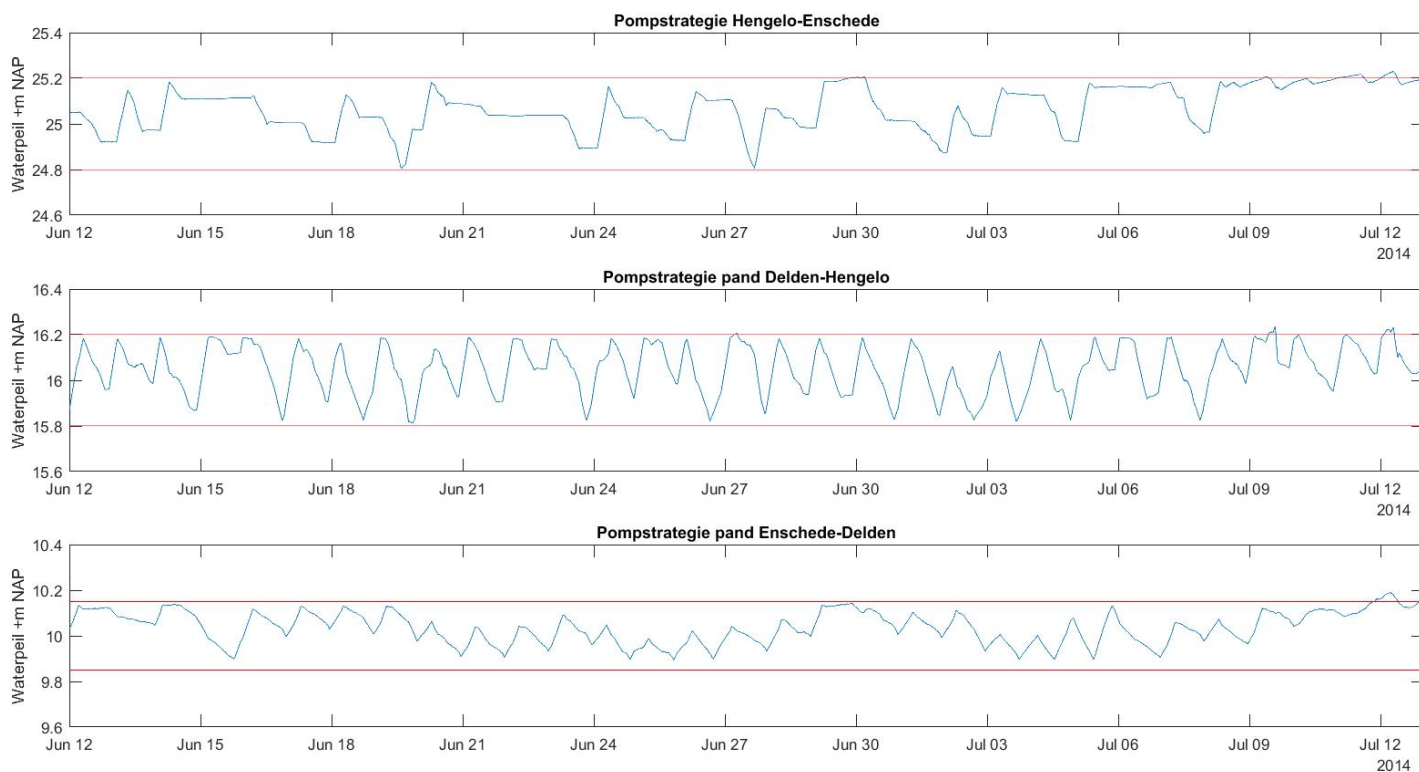
Figuur 39: waterpeil verloop met nieuwe pompstrategie, scenario 2010



Figuur 40: waterpeil verloop met nieuwe pompstrategie, scenario 2011



Figuur 41: waterpeil verloop met nieuwe pompstrategie, scenario 2012



Figuur 42: waterpeil verloop met nieuwe pompstrategie, scenario 2014

D. WATERBALANS RELATIES

Pompen (Bruine, 2010)

Sluis	Pomp	Meting	Relatie
Eefde	Oud	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 10800/10)/3600
	Noord	Draaitijd (per 10min) Beneden waterstand (m NAP) Boven waterstand (m NAP)	Opvoerhoogte (m) = boven waterstand - beneden waterstand debiet (m ³ /s) = (draaitijd x (-2651,5 x opvoerhoogte + 39188)/10)/3600
	Zuid	Draaitijd (per 10min) Beneden waterstand (m NAP) Boven waterstand (m NAP)	Opvoerhoogte (m) = boven waterstand - beneden waterstand debiet (m ³ /s) = (draaitijd x (-2651,5 x opvoerhoogte + 39188)/10)/3600
Delden	Noord	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 4200/10)/3600
	Midden	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 8900/10)/3601
	Zuid	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 4250/10)/3602
Hengelo	Noord	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 5000/10)/3601
	Midden	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 5000/10)/3602
	Zuid	Draaitijd (per 10min)	Debiet(m ³ /s) = (draaitijd x 5000/10)/3603

Totale pompdebiet berekenen

QpH	Totale pomp debiet Hengelo	$Q_{pH} = Q_{pHN} + Q_{pHM} + Q_{pHZ}$
QpD	Totale pomp debiet Delden	$Q_{pD} = Q_{pDN} + Q_{pDM} + Q_{pDZ}$
QpE	Totale pomp debiet Eefde	$Q_{pE} = Q_{pEN} + Q_{pEM} + Q_{pEZ}$

Aflaten (Bruine, 2010)

Sluis	Aflaatwerk	Meting	Relatie
Eefde	Eefde spuischuif noord	Hefhoogte (m) Sputijd (min)	Debiet (m ³ /s) = spuitijd x hefhoogte x 110250 / 3600
	Eefde spuischuif zuid	Hefhoogte (m) Sputijd (min)	Debiet (m ³ /s) = spuitijd x hefhoogte x 110250 / 3600
	Eefde nieuw spuiwerk	Hefhoogte (m) Sputijd (min)	Debiet (m ³ /s) = spuitijd x hefhoogte x 187000 / 3600
Delden	Delden spuischuif noord	Hefhoogte (m) Sputijd (min)	Debiet (m ³ /s) = spuitijd x hefhoogte x 22000 / 3600
	Delden spuischuif zuid	Hefhoogte (m) Sputijd (min)	Debiet (m ³ /s) = spuitijd x hefhoogte x 22000 / 3600
Hengelo	Spuidebiet via kolk	Hefhoogte (m) Sputijd (min)	als 0,04 < spuitijd < 9 dan 4,29 x (hefhoogteN / 10) x 0,5 + (hefhoogteZ / 10) x 0,5 als 0,10 < spuitijd < 0,15 dan 8,58 x (hefhoogteN / 10) x 0,5 + (hefhoogteZ / 10) x 0,5 als 0,16 < spuitijd < 0,21 dan 12,87 x (hefhoogteN / 10) x 0,5 + (hefhoogteZ / 10) x 0,5

Totale spuidebiet berekenen(Bruine, 2010)

Code	Omschrijving	Relatie
QsH	Totale spui debiet Hengelo	$QsH = QsHkolk$
QsD	Totale spui debiet Delden	$QsD = QsDN + QpDZ$
QsE	Totale spui debiet Eefde	$QsE = QsEN + QpEM + QpEZ$

Volumeverandering panden(Bruine, 2010)

Code	Meting	Relatie
QvH	Waterhoogte h in (m)	$QvH = \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta t} * 25000$
QvD	Waterhoogte h in (m)	$QvD = \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta t} * 453900$
QvE	Waterhoogte h in (m)	$QvE = \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta t} * 2544000$

In- en uitstromen(Bruine, 2010)

Code	Omschrijving	Relatie
QHin	Instroom pand Hengelo_Enschede	$QHin = QpH$
QHuit	uitstroom pand Hengelo_Enschede	$QHuit = QsHkolk$
QDin	Instroom pand Delden_Hengelo	$QDin = QpD + QsHkolk$
QDuit	uitstroom pand Delden_Hengelo	$QDuit = QpH + QsD$
QEin	Instroom pand Eefde_Delden	$QEin = QpE + QsD$
QEuit	uitstroom pand Eefde_Delden	$QEuit = QpD + QsE$

Qrest bepalen(Bruine, 2010)

Code	Omschrijving	Relatie
QrestH	Het rest debiet van pand Hengelo-Enschede	$QrestH = QvH - QHin + QHuit$
QrestD	Het rest debiet van pand Delden-Hengelo	$QrestD = QvD - QDin + QDuit$
QrestE	Het rest debiet van pand Eefde-Hengelo	$QrestE = QvE - QEin + QEuit$

Nieuw waterpeil verloop bepalen(Bruine, 2010)

Code	Omschrijving	Relatie
WhH	Simuleren van waterpeilverloop pand Hengelo - Enschede	$h_i = h_{(i-1)} + (Q_{restH;i} + Q_{pompH;i} + Q_{spuiH;i}) * 600/A$
WhD	Simuleren van waterpeilverloop pand Delden - Hengelo	$h_i = h_{(i-1)} + (Q_{restD;i} + Q_{pompD;i} + Q_{spuiD;i}) * 600/A$
WhE	Simuleren van waterpeilverloop pand Eefde - Delden	$h_i = h_{(i-1)} + (Q_{restE;i} + Q_{pompE;i} + Q_{spuiE;i}) * 600/A$