

Slim Malen - Energie besparen?!



Slim Malen - Energie besparen?!

Titel

Slim Malen - Energie besparen?!

Project

1221312-000

Kenmerk

1221312-000-HYE-0039

Pagina's

33

Colofon

Uitgave Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

Auteurs Ivo Pothof, Klaas-Jan van Heeringen, Teresa Piovesan, Tjerk Vreeken, Lefki Loverdou, Jan Talsma, Deltares
Hans Kuipers, Waterschap Zuiderzeeland
Bart van Esch, Klaudia Horvath, TU Eindhoven
Maarten Meijburg, Ruut Schalij, e-Risk Group
Joep Grispen, Thomas Berends, Joeri Verheijden, Jan-Maarten Verbree, Nelen en Schuurmans
Jorn Baayen, Deltares / Kisters NL

Begeleidingscommissie

Margit Akkerman, Pier Schaper, Wetterskip Fryslan
Klaas-Jan de Hart, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Paul Claessens, Waterschap Rivierenland
Hans Kuipers, Cees Bakker, Waterschap Zuiderzeeland
Arne Boswinkel, RVO
Michelle Talsma, STOWA

Trefwoorden

Watersysteembeheer, malen, RTC Tools, Energiemarkt, optimalisatie, energieverbruik, energietransitie.

Slim Malen is een samenwerkingsproject van Deltares, STOWA, RVO, TU Eindhoven, RWS-WVL, Hoogheemraadschappen Hollands Noorderkwartier en Rijnland, Wetterskip Fryslân, Waterschappen Zuiderzeeland, Rivierenland, Scheldestromen, Brabantse Delta, Hollandse Delta, Nelen & Schuurmans, e-Risk Group, Eneco, Delta, Alliander EXE, Actility, XYLEM Water Solutions en Kisters NL.

Meer weten? www.slimmalen.nl.

Copyright

De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

Trefwoorden

Watersysteembeheer, malen, RTC Tools, Energiemarkt, optimalisatie, energieverbruik, energietransitie

Titel
Slim Malen - Energie besparen?!

Project 1221312-000 **Kenmerk** 1221312-000-HYE-0039 **Pagina's** 35

Trefwoorden

Watersysteembeheer, malen, RTC Tools, Energiemarkt, optimalisatie, energieverbruik, energietransitie

Samenvatting




Het Slim Malen project heeft gelopen van maart 2016 tot maart 2019 op initiatief van Deltares, STOWA, Waterschap Zuiderzeeland, TU Eindhoven, e-Risk Group en Nelen en Schuurmans met subsidie van Topsector Water, TKI Deltatechnologie.

Deltares en TU Eindhoven hebben de open-source RTC Tools doorontwikkeld om het energiegebruik en variabele energiekosten effectief mee te kunnen nemen in de geoptimaliseerde sturing van gemalen, uitlaatwerken en andere kunstwerken in watersystemen. Bij deze ontwikkeling is veel aandacht besteed aan de betrouwbaarheid, consistentie en robuustheid van de geoptimaliseerde sturingen. De software is in pilot projecten getoetst door Deltares en Nelen & Schuurmans bij vier waterschappen. Er zijn workshops georganiseerd om de pilot-resultaten te bespreken met hydrologen en peilbeheerders van de pilot-waterschappen.

Om de landelijke impact van slim en duurzaam waterbeheer te kwantificeren heeft e-Risk Group haar scenario-model van de Noordwest Europese energiemarkten (PPS-GEN) uitgebreid met een model-component om flexibiliteit van de inzet van gemalen mee te kunnen nemen in scenariostudies. De bruikbare waterberging komt overeen met een energie-opslag van ongeveer 1700 MWh met een pompvermogen van 200 MW. Hiermee zijn de verwachte kostenbesparingen en de indirecte CO₂ besparing van Slim Malen bij landelijke invoering voor verschillende scenario's gekwantificeerd.

Met het Slim Malen project is een grote stap gezet om duurzamer waterbeheer mogelijk te maken.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	mei 2019	I. Pothof		B. van Vossen		W. Tilmans	
1.0	sept 2019	I. Pothof		B. van Vossen		D. Walstra	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doelstellingen	1
1.2.1 Ontwikkeling toolbox voor aansturen gemalen	1
1.2.2 Gemaal-inzet op energiemarkt	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Huidige praktijk peilbeheer (anno 2016)	3
2.1 Inleiding	3
2.2 ICT-infrastructuur	3
2.3 Pompregingen	4
2.3.1 Feedback regelingen	4
2.3.2 Model-predictive control (MPC)	5
3 Aanpak onderzoek	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Gemaal-inzet energiemarkt	7
3.3 RTC Tools ontwikkeling	10
3.4 Waterschaps Pilots	11
4 Resultaten Gemaalinzet Energiemarkt	13
5 Resultaten RTC Tools	15
5.1 Inleiding	15
5.2 Achtergrond RTC Tools	15
5.3 Innovaties RTC Tools	18
5.4 RTC Tools - functionele uitbreidingen ten behoeve van Slim Malen	19
6 Pilots	21
6.1 Inleiding	21
6.2 Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK)	21
6.3 Waterschap Zuiderzeeland (ZZL)	22
6.4 Wetterskip Fryslân (WSF)	24
6.5 Waterschap Rivierenland (WSRL)	24
6.6 Gebruikersvalidatie eindseminar 14 maart 2019	26
7 Conclusies	27
8 Randvoorwaarden voor Slim Malen	29
8.1 Inleiding	29
8.2 Centraal Sturingsstelsel	29
8.3 Eisen aan de data en modellen	30
9 Referenties	33
9.1 Referenties in de aanvraag	33
9.2 Slim Malen publicaties	33

Bijlage(n)

A Verslag Eindseminar Slim Malen

A-1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De Unie van Waterschappen (UWV) heeft in het voorjaar van 2010 met het Rijk een Klimaatakkoord getekend. In dit akkoord zijn de ambities van de waterschappen voor klimaat en duurzaamheid vastgelegd. Een onderdeel van dit akkoord betreft de doelstelling om 30% energie-efficiency te behalen in de periode 2005-2020. Onder energie-efficiency wordt hierbij verstaan: energiebesparing en inzet van duurzame energie.

RVO, de Unie van Waterschappen en STOWA hebben de intentie om de meerjaren-afspraken energie-efficiency, die nu gelden voor de afvalwaterzuiveringen te verbreden naar het watersysteem. In het watersysteem liggen nog tal van kansen op het gebied van energie-efficiency. Van de waterschappen heeft 75% in de Klimaatmonitor (2014) aangegeven nog niet de energie-efficiency van de gemalen te bewaken.

Gemalen verbruiken na RWZI's de meeste energie in het regionale waterbeheer. Jaarlijks gaat het om 150 gigawattuur – het equivalent van 45 duizend huishoudens. In het project 'Slim malen' wordt gekeken of energie kan worden bespaard. Dat levert de waterschappen behalve geld ook een vermindering van CO₂-uitstoot op.

Waterschappen maken al gebruik van datasystemen om het beste moment te bepalen waarop boezem- en poldergemalen worden aan- en uitgezet. Deze houden rekening met zaken als weervoorspellingen, wateroverschotten en energietarieven (dag-nacht).

Slim Malen gaat een stap verder. Het doel is om ook rekening te kunnen houden met het aanbod schone energie op de energiemarkt, variaties in de opvoerhoogte en het pompendement. Slim Malen moet er voor zorgen dat er minder gemalen hoeft te worden. En als er moet worden gemalen, met optimaal gebruik van het (duurzame) energieaanbod.

1.2 Doelstellingen

In dit onderzoek wordt gekeken hoe in de praktijk Slim Malen vorm kan krijgen. Enerzijds wordt gekeken naar de techniek die Slim Malen mogelijk moet maken. Dit doel wordt bereikt door een ondersteunende toolbox te ontwikkelen als alternatief voor de huidige peilgestuurde regelingen. Anderzijds wordt verkend wat de impact van landelijke invoering van Slim Malen op de energiemarkt is.

1.2.1 Ontwikkeling toolbox voor aansturen gemalen

De eerste doelstelling is de ontwikkeling van een toolbox voor nieuwe regelingen van gemalen met het oog op energie- en eventuele kostenbesparing. Behalve van de hydraulische eigenschappen van de pompen maakt het nieuwe regelsysteem optimaal gebruik van:

- voorspellingen van regenval,
- voorspellingen van buitenwaterniveaus, bv. getijdenbewegingen,
- bergingscapaciteit in het achterland,
- variaties in de kostprijs van energie, bv. dag- en nachttarieven en / of variabele marktprijzen (APX)
- voorkomen onbalans in vraag en aanbod van elektriciteitsvoorziening t.g.v. een toenemend percentage zon- en windenergie.

De ontwikkelde toolbox, een uitbreiding van RTC Tools, wordt toegepast en offline getest op pilot-systemen bij 4 verschillende waterschappen.

1.2.2 Gemaal-inzet op energiemarkt

Een tweede doelstelling van dit project is om de waterschappen van de nodige informatie te voorzien om de beschikbare elektrische gemaalflexibiliteit via samenwerking met energiebedrijven nuttig in te zetten. Door de groei van het aandeel zonne- en windenergie zal in de komende decennia de vraag naar flexibele afname van elektriciteit (demand response) toenemen. De concrete onderzoeksvraag voor deze doelstelling is als volgt:

- Wat zijn de kostenbesparingen en landelijke impact op het elektriciteitssysteem als Slim Malen landelijk uitgerold zou worden?

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een korte beschrijving van de huidige praktijk in het polder- en boezembeheer. In hoofdstuk 3 wordt de opzet van het Slim Malen onderzoek toegelicht. Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten van de scenario's voor gemaalinzet op de APX energiemarkt. Hoofdstuk 5 gaat in op de RTC Tools ontwikkelingen en hoofdstuk 6 op de pilots. Conclusies staan in hoofdstuk 7 en aanbevelingen voor implementatie in hoofdstuk 8.

Dit eindrapport is opgesteld onder redactie van dr.ir. Ivo Pothof en is opgebouwd met behulp van onderstaande publicaties, die door consortiumpartners van het Slim Malen onderzoek zijn opgesteld. Alle publicaties zijn beschikbaar op de Slim Malen Wiki (www.slimmalen.nl).

Publicaties	Auteur(s)
Projectvoorstel Energie en kostenreductie in boezem en polderbemaling	Hans Kuipers (WS ZZL); Bart van Esch (TU/e); Maarten Meijburg (e-Risk); Joep Grispen (N&S); Ivo Pothof, Klaas-Jan van Heeringen (Deltares)
Beschrijving gemaalflex-algoritme	Maarten Meijburg (e-Risk)
Modellering flexibele inzet gemalen in PPSGen	Maarten Meijburg, Ruut Schalij (e-Risk)
Diverse journal papers RTC Tools	Klaudia Horvath, Bart van Esch (TU/e), Jorn Baayen (Deltares/Kisters NL), Teresa Piovesan, Tjerk Vreeken, Ivo Pothof (Deltares)
Pilot rapport HHNK	Thomas Berends, Joeri Verheijden, Jan-Maarten Verbree (N&S)
Pilot rapport ZZL	Thomas Berends, Emiel, Verstegen, Jan-Maarten Verbree (N&S)
Pilot rapport WSF	Tjerk Vreeken, Lefki Loverdou (Deltares)
Pilot rapport WSRL	Jan Talsma (Deltares), Klaudia Horvath (TU/e)

2 Huidige praktijk peilbeheer (anno 2016)

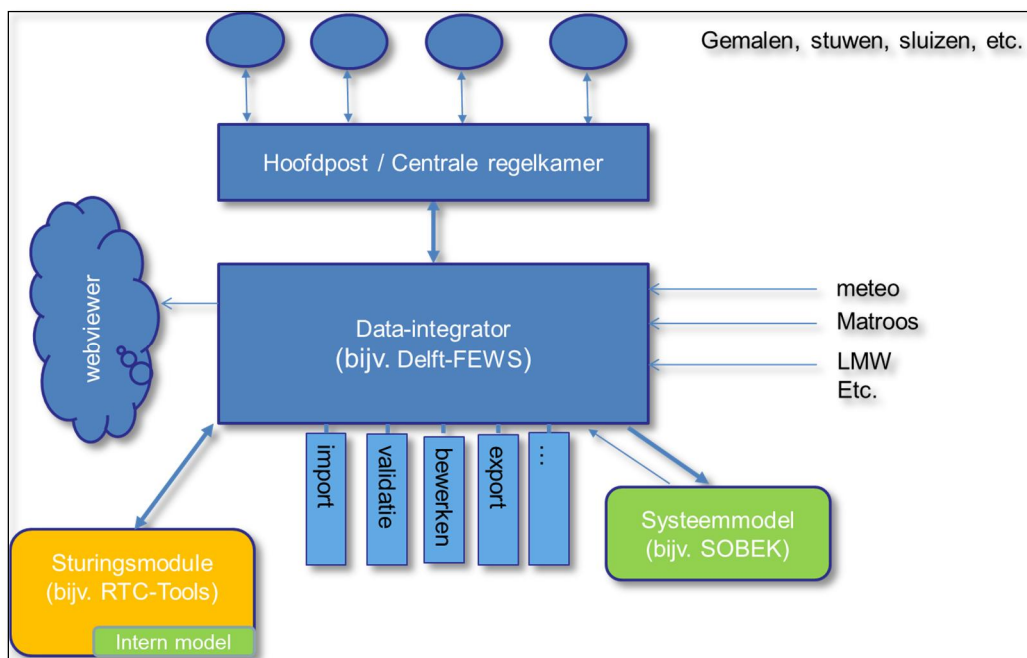
2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een korte beschrijving van de huidige praktijk in het polder- en boezembeheer bij aanvang van het Slim Malen onderzoek. Het gaat hierbij om de beschikbare ICT-infrastructuur en de bestaande regelingen voor pompen, stuwen en inlaatwerken. Deze worden in de onderstaand toegelicht.

2.2 ICT-infrastructuur

Alle waterschappen beschikken over een infrastructuur om vanuit een centrale regelkamer of hoofdpost de gemalen en kunstwerken aan te kunnen sturen. Voor de onderliggende data bestaan verschillende varianten:

- vooral direct gemeten data ten behoeve van het peilbeheer en onderhoud van de verschillende componenten
- uitbreidingen hierop met weerdata en voorspellingsmodellen om hoogwatervoorspellingen te kunnen doen met onderliggende rekenmodellen, die steeds bijgesteld worden met actuele metingen en opnieuw gedraaid worden met nieuwe weersvoorspellingen.



Figuur 2.1: Elementen in een operationeel waterbeheersysteem

2.3 Pompregingen

In boezems en polders wordt in het algemeen een seizoensgebonden streefpeil gehanteerd. Gemalen, spuisluizen en stuwen worden gebruikt om het streefpeil te handhaven binnen een zekere marge. De meeste gemalen en spuien beschikken over een besturingssysteem dat is gebaseerd op de lokale en actuele situatie ter plaatse. Dat wil zeggen dat beslissingen over wel of niet pompen cq. spuien, of het toerental van de pompen, genomen worden op basis van de actuele waterstanden bij dat gemaal of spui.

Dit type besturingen op basis van lokale streefpeilen wordt aangeduid met de term feedback control. Het nadeel van dergelijke regelingen is dat geen rekening kan worden gehouden met de verwachte grootte van het wateraanbod door bijvoorbeeld regenval of variaties in de buitenwaterstand door bijvoorbeeld het getij, tenzij handmatig wordt ingegrepen.

Een meer geavanceerd systeem van feedback control is Model Predictive Control (MPC). In een dergelijk besturingssysteem wordt met een model berekend wat het effect is van een regelstrategie in de (nabije) toekomst. Weersvoorspellingen en andere toekomstige veranderingen, zoals getijvariatie, kunnen hierin worden betrokken.

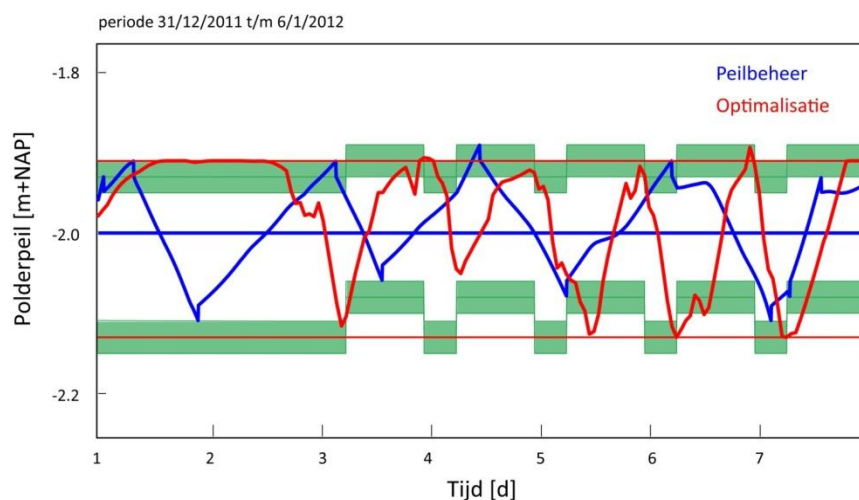
2.3.1 Feedback regelingen

Voor een gemaal wordt een streefpeil gehanteerd en is een minimaal en maximaal polderwaterniveau vastgesteld. Als het maximale peil wordt bereikt, wordt de pomp gestart. Verpompen duurt voort totdat het minimale waterniveau wordt bereikt waarna de pomp wordt stilgezet. Dit is de basis van de peilgestuurde pompreging. In de tijd gezien vertoont het polderpeil hierdoor een typische "zaagtand-structuur".

Als een gemaal over meer dan één pomp beschikt, worden de in- en uitslagpeilen van de pompen verschillend gekozen, zodat een volgende pomp pas gestart wordt als blijkt dat de eerste pomp het wateraanbod niet kan verwerken en het waterpeil blijft doorstijgen. De pompen worden dan na elkaar bij- en afgeschakeld al naar gelang het wateraanbod hiertoe aanleiding geeft.

Als pompen over een toerenregeling beschikken kan hiervan gebruik worden gemaakt om de capaciteit van de pompen aan te passen. Bij bereiken van het inslagpeil wordt de pomp ingeschakeld bij minimaal toerental. Als echter het waterniveau niet zakt maar doorstijgt, zal het pomptoeental (evt. stapsgewijs) worden verhoogd tot het maximale toerental is bereikt.

Een voorbeeld van een peilgestuurde pompreging is de zogenaamde PEB-regeling van Bosman Watermanagement. In deze regeling wordt het minimale toerental berekend met het oog op een zo laag mogelijk energieverbruik. Dit optimale toerental is afhankelijk van het opvoerhoogteverschil over het gemaal. Als het waterniveau niet kan worden gehandhaafd wordt een hoger toerental berekend aan de hand van een doelniveau dat bereikt moet worden op een te kiezen later tijdstip.



Figuur 2.2: Voorbeeld van het “zaagtand”-waterstandsverloop met lagere in- en uitslagpeilen tijdens daluren ('s nachts en in het weekend). In blauw de zaagtand met 1 pomp tegelijk in bedrijf; in rood een geoptimaliseerde variant met meerdere pompen 's nachts in bedrijf om maximaal te profiteren van de lagere nachttarieven.

De marges rond het streefpeil (en daarmee de in- en uitslagpeilen van de pompen) worden vaak variabel ingesteld. Een voorbeeld is een lager in- en uitslagpeil tijdens de nacht dan overdag (Figuur 2.2). Omdat de pompen hierdoor relatief vaker pompen tijdens de nacht zal een lager daluren-tarief leiden tot een verlaging van de energiekosten ([2],[3]). Om dezelfde reden kan een lager energieverbruik worden bereikt als de in- en uitslagpeilen lager worden gekozen tijdens de periode van lage zeewaterstand in een getijdencyclus ([4]).

Een groot nadeel van de huidige feedback pompregelingen is dat geen gebruik wordt gemaakt van schattingen van het wateraanbod in de nabije toekomst. Hierdoor kan niet worden geanticipeerd op een verwachte droge of juist natte periode en kan de buffercapaciteit van het achterland niet optimaal worden benut. Als de beheerder wel geautomatiseerd zou kunnen anticiperen op toekomstige neerslag, dan zou de regeling naar het uitslagpeil toesturen voordat het inslagpeil is bereikt om de verwachte neerslag te kunnen bergen en wateroverlast te voorkomen.

In de meet- en regeltechnologie wordt ook de zogenaamde feed forward control onderscheiden. Hierbij wordt op een actuele systeemvariabele (meting) gereageerd, maar dan gaat het om variabelen die een indicatie zijn voor toekomstige veranderingen. Een voorbeeld hiervan is het sturen op gemeten neerslag en bij hoge neerslagintensiteit alvast beginnen te malen, terwijl de actuele waterhoogte nog niet stijgt. Op deze manier kun je dus al in zekere mate, maar beperkt, anticiperen op toekomstige veranderingen.

2.3.2 Model-predictive control (MPC)

Een meer geavanceerde methode om te kunnen anticiperen op toekomstige neerslag of droogte betreft Model-predictive Control (MPC). Hierbij wordt met behulp van een vereenvoudigd watersysteemmodel een inschatting gemaakt van de toekomstige waterstanden, gegeven de verwachte neerslag en inzet van kunstwerken. Vervolgens wordt de inzet van pompen, gemalen en stuwen bepaald waarbij zo goed mogelijk wordt voldaan aan de sturingsdoelen gedurende de tijdhorizon waarover geoptimaliseerd wordt. Deze sturingsdoelen (bijv. streefpeil handhaven, zo laag mogelijk energieverbruik of -kosten, etc.) worden vertaald in een doelfunctie (ook wel kostenfunctie) die wordt geminimaliseerd. Het

sturingsdoel is bijvoorbeeld om wateroverlast te minimaliseren. Dat betekent dat overschrijding van een maximale waterstand zo veel mogelijk moet voorkomen gedurende de tijdhorizon waarover de voorspellingen beschikbaar zijn. Stel verder dat de tijdhorizon 72 uren beslaat, dan bevat de doelfunctie de optelling van alle waterstandoverschrijdingen gedurende deze 72 uur; vaak worden dergelijke overschrijdingen kwadratisch opgeteld om te verdisconteren dat één grote overschrijding zwaarder weegt dan meerdere kleine overschrijdingen. Het optimalisatie-rekenhart zal met deze doelfunctie de pompen zodanig inzetten dat het laagste uitslagpeil bereikt wordt vlak voordat de neerslag is gevallen, zodat de buffercapaciteit in het watersysteem zo goed mogelijk benut wordt. Op een vergelijkbare manier kan het minimaliseren van watertekort in het watersysteem meegenomen worden in anticiperende MPC regelingen.

De eerste anticiperende MPC regelingen zijn ontwikkeld vanaf 2010. In 2010 is door Deltares een studie uitgevoerd in opdracht van Waterschap Noorderzijlvest en Wetterskip Fryslân. In deze studie werden overstromingsrisico's in kaart gebracht [7], werd de noodzaak van het nieuwe gemaal Lauwersoog aangetoond [11]. Hierin werd de waterafvoer vanuit Groningen, Friesland en Drenthe richting de Waddenzee gemodelleerd met een combinatie van SOBEK (voor de dynamische modellering van de waterwegen) en WANDA (voor de modellering van de gemalen, stuwen en spuisluizen). Op basis van de verwachte wateraanvoer (uit een weersvoorspelling) en de getijdenbeweging van de Waddenzee kunnen hiermee de waterstanden in de polders worden voorspeld. Voor de werking van de gemalen en de sluisen werd de peilgestuurde (feedback) regeling toegepast.

In de volgende stap zijn de modellen SOBEK en WANDA geïntegreerd in een Real-Time Control (RTC) systeem. Samen met weersvoorspellingen voor het verwachte wateraanbod en de getijdenbeweging van de Waddenzee vormde dit de basis voor een eerste MPC systeem ([8],[9]). Een optimalisatie- algoritme wordt gebruikt om de beste regelstrategie te kiezen uit een reeks van mogelijke alternatieven, met als doel om de afwijkingen van de polderpeilen t.o.v. het streefpeil te minimaliseren ([12]). Minimalisatie van energie of energiekosten was geen expliciet doel, maar een secundair gevolg van de betere benutting van de bergingscapaciteit van het poldersysteem. Belangrijk in dit verband is ook dat de pompen in deze studie een vast toerental hadden. Regeling van het toerental om energieverbruik te reduceren werd in dit systeem niet toegepast, maar zou wel perspectief kunnen bieden voor verdere reductie van het energieverbruik.

In de afgelopen jaren zijn verschillende MPC regelingen in het waterbeheer operationeel geworden. Voorbeelden zijn de sturing van gemaal en spuisluizen van IJmuiden (Noordzeekanaal) en de boezemgemalen van Delfland en Noorderzijlvest. Deze MPC regelingen zijn gerealiseerd met eerdere versies van RTC Tools en haar voorloper ControlNext.

In het Slim Malen project is de RTC Tools toolbox uitgebreid om het operationele waterbeheer duurzamer en goedkoper uit te kunnen voeren. In hoofdstuk 3 wordt de onderzoeksaanpak verder toegelicht.

3 Aanpak onderzoek

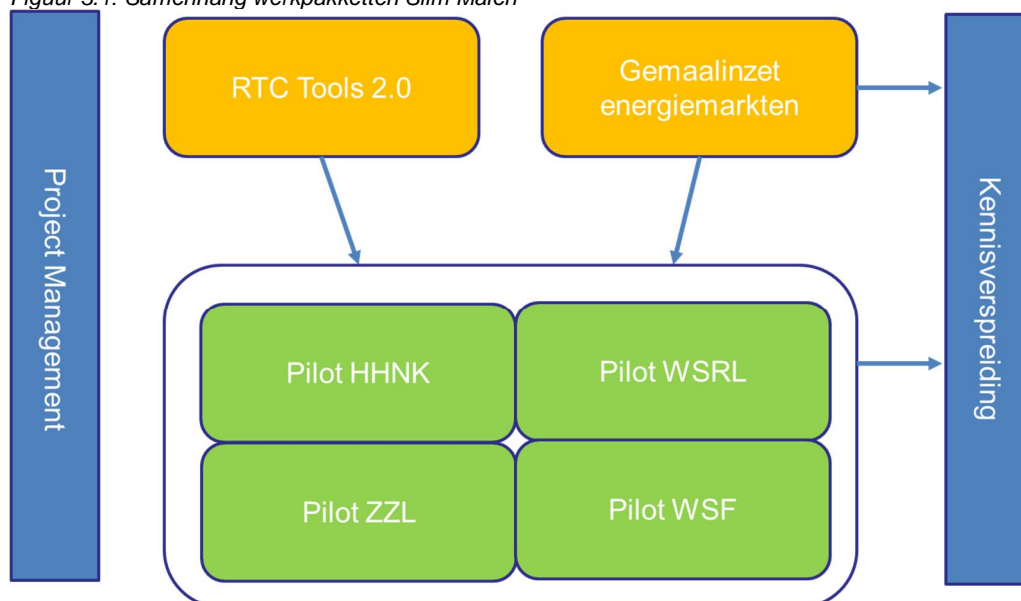
3.1 Inleiding

Het onderzoek is opgesplitst in twee generieke deelonderzoeken en vier pilots, waarin de slimme regelstrategieën zijn toegepast. Naast deze inhoudelijke werkpakketten is er veel aandacht geweest voor kennisdeling en -verspreiding. Het project is verdeeld in diverse werkpakketten, waarvan de belangrijkste resultaten in de volgende hoofdstukken aan bod komen:

- 1) Onderzoek naar gemaalflexibiliteit en de energiemarkt
- 2) Ontwikkeling van tools om gemalen slim te sturen: RTC Tools
- 3) Pilots bij 4 waterschappen
 - a) Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK)
 - b) Waterschap Zuiderzeeland (ZZL)
 - c) Wetterskip Fryslân (WSF)
 - d) Waterschap Rivierenland (WSRL)

De werkpakketten van Slim Malen staan samengevat in Figuur 3.1.

Figuur 3.1: Samenhang werkpakketten Slim Malen



3.2 Gemaal-inzet energiemarkt

Er is een zekere flexibiliteit om gemalen te laten draaien; kortweg gemaalflex. Het ontbreekt nog aan inzicht in de impact op de energiemarkt, als de flexibele inzet van gemalen landelijk gerealiseerd zou worden. Bovendien kan de flexibele gemaalinzet tot een indirecte CO₂ uitstootreductie leiden, omdat de gemalen meer zullen draaien op duurzame zon en wind en minder op elektriciteit van kolencentrales. De omvang van deze indirecte CO₂ uitstootreductie en de impact op de energiemarkt zijn onbekend en de hoofddoelen van dit deelproject.

Hiertoe is het Gemaalflex-algoritme ontwikkeld in het eRisk Group merit order model (Power Price Scenario Generator, PPSGen) van de Noordwest Europese elektriciteitsmarkten (BENELUX, Frankrijk, Groot-Brittannië en Duitsland). PPSGen simuleert de dag-vooruit markten op nationaal niveau op basis van scenario-aannames over o.a. het weer, economische groei en energiebesparingen, ontwikkeling van brandstof- en CO₂ prijzen, conventionele en duurzame productiecapaciteit en de toepassing van nieuwe energietechnieken zoals warmtepompen en elektrisch vervoer. In PPSGen zitten alle electriciteitsbronnen en waterkrachtbuffers, die op deze electriciteitsmarkten actief zijn of zullen zijn in het jaar waarvoor het scenario berekend wordt. Het resultaat van een PPSGen simulatie omvat de verwachte marktprijzen voor elektriciteit op uurbasis gedurende het scenario-jaar en de samenstelling van de electriciteitsmix voor alle uren van het scenario-jaar.

Met PPSGen zijn diverse scenario's uitgevoerd waarmee de economische optimalisatie van de inzet van de beschikbare flexibiliteit van poldergemalen op landelijk niveau op de toekomstige dag-vooruit markten is berekend. Bovendien wordt hiermee inzicht verkregen in de mogelijke duurzame bijdrage (CO₂ besparing) van de landelijke inzet van gemaalflexibiliteit .

Deze analyse is uitgevoerd met de uitgangspunten van twee scenario's voor de Noordwest Europese elektriciteitsmarkten. Deze twee scenario's geven aan hoe de toekomstige electriciteitsvoorziening in Noord-West Europa eruit kan zien. De scenario's zijn gebaseerd op de Nationale Energieverkenning 2017 (NEV2017) van ECN, PBL, CBS en RVO, waarin de verwachte ontwikkelingen van de Nederlandse energiehuishouding worden beschreven bij het vastgestelde en voorgenomen overheidsbeleid.

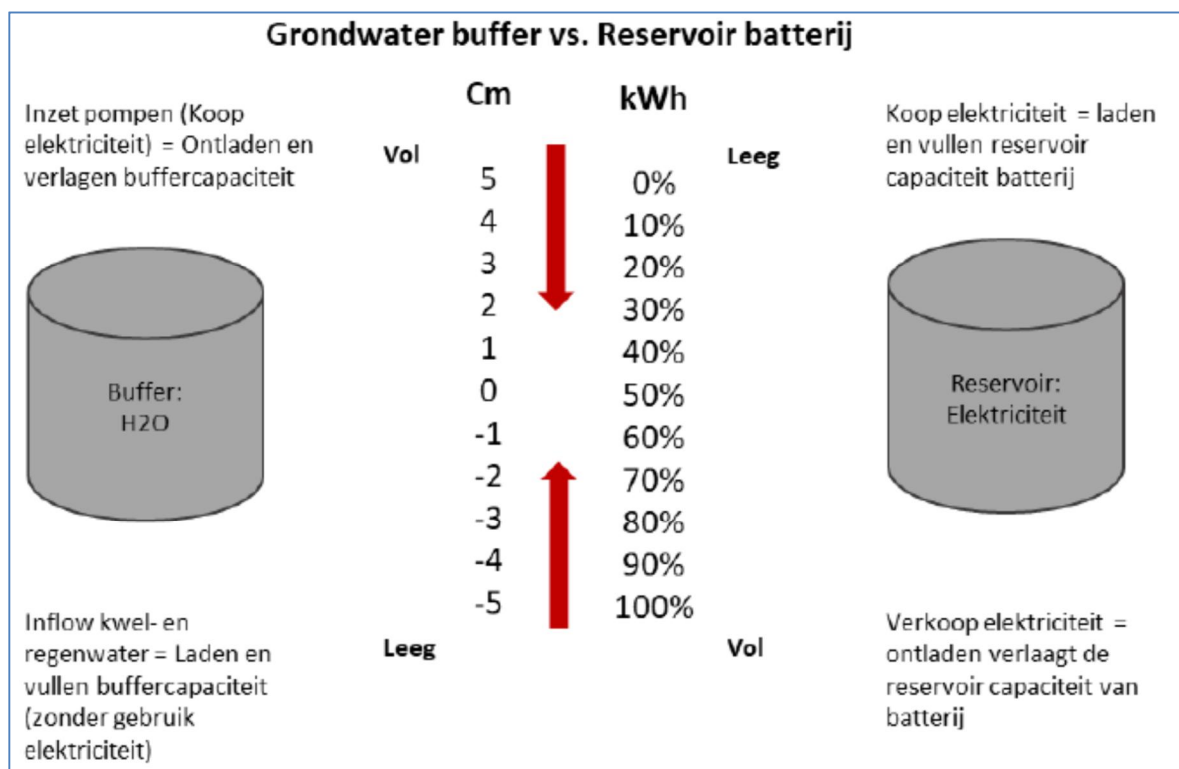
1. Het eerste scenario is gebaseerd op het NEV2017 scenario met voorgenomen beleid.
2. eRisk Group heeft een variant op het NEV2017 scenario gemaakt: het Groen scenario. Dit scenario gaat t.o.v. het NEV2017 scenario uit van de invoering van een minimum CO₂ prijs, 18% hogere gasprijzen, grotere elektriciteitsvraag en graduele uitfasering van kolencentrales.

Voor het NEV2017 en het Groen scenario zijn 2 varianten berekend: één variant met alleen gemaalflex en een tweede variant inclusief andere flexibiliteits-opties, bestaande uit warmtepompen, elektrische auto's, thuisbatterijen en industriële vraagsturing. Dit zijn dus in totaal 4 scenario's met gemaalflexibiliteit. Deze scenario's zijn vergeleken met dezelfde NEV2017 en Groen-scenario's, maar dan zonder de gemaalflexibiliteit (zie hoofdstuk 4).

De modeluitkomsten moeten inzicht geven in de ontwikkeling van de inzetbaarheid van de gemalen (in termen van het gebruik van de reservoirruimte in het watersysteem) en het rendement van de flexibele inzet (in termen van kostenbesparingen/euro's) op de elektriciteitsmarkt in 2020, 2025 en 2030 .

De analyse biedt zowel inzicht in potentiële kosten- en indirecte CO₂ besparingen voor de totale landelijke flexibele gemaalcapaciteit als voor de 18 waterschappen waarop de flexibele gemaalcapaciteit is gebaseerd. De belangrijkste resultaten worden samengevat in hoofdstuk 4.

De gemaalflex wordt gemodelleerd als een opslagmedium en is te vergelijken met een omgekeerde batterij (Figuur 3.2).



Figuur 3.2: Analogie tussen het watersysteem als batterij en een elektrische batterij. Het watersysteem wordt geladen door kwel en neerslag en ontladen door de gemaalinzet. Deze inzet komt overeen met een virtuele elektrische batterij die opgeladen wordt door de gemaalinzet (inkoop elektriciteit) en zonder opbrengst ontladen wordt met het tempo waarin het watersysteem gevuld wordt door kwel en neerslag.

De input data, die zijn gebruikt om het gemaalflex algoritme te runnen, zijn afkomstig van data uit het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) en op basis van onderzoek naar de huidige en toekomstige seizoensvariatie in de kwelbelasting en flexibel gemaalbeheer van waterschappen. De kennis hierover is vergaard door Simon Buijs, MSc student Hydrology aan de Vrije Universiteit van Amsterdam.

Voor het referentiejaar in PPSGen (2012) zijn hydrologische parameters en tijdreeksen op landelijk niveau aangeleverd door Buijs.

Met een toegelaten landelijk gemiddelde waterstandsvariatie van +/- 5 cm bedraagt de beschikbare buffercapaciteit in het watersysteem ruim 1700 MWh. De totaal inzetbare gezamenlijke pompcapaciteit bedraagt ruim 200 MW.

In PPSGen is verder aangenomen dat de ingezette pompcapaciteit met maximaal 50 MW/h mag veranderen, omdat snellere veranderingen in de landelijke gemaal-inzet niet realistisch worden geacht.

Deze data, samen met de eigenschappen en randvoorwaarden van de scenario's, worden in een rekenhart gebruikt om de geoptimaliseerde inzet van de gemalen te bepalen. Het rekenhart van PPSGen minimaliseert de kosten van de inzet. Om te voorkomen dat de optimalisatie van de gemaalflex de markt verstoort, is er een functie, de Market Depth functie, toegevoegd die op basis van de door PPSGen gegenereerde merit order (volgorde van draaiende elektriciteitscentrales) de maximaal toelaatbare inzet capaciteit van de gemaalflex zoekt die niet de markt verstoort. Verder details van het gemaalflex algoritme zijn beschreven in een [memo van e-Risk](#), dat beschikbaar is op de SlimMalen webpagina (www.slimmalen.nl).

3.3 RTC Tools ontwikkeling

Het hoofddoel van dit werkpakket betreft de ontwikkeling van een toolbox voor nieuwe regelingen van gemalen met het oog op energie- en eventuele kostenbesparing. Dit, als alternatief voor de huidige peilgestuurde regelingen. Behalve van de hydraulische eigenschappen van de pompen maakt het nieuwe regelsysteem optimaal gebruik van:

- voorspellingen van regenval,
- voorspellingen van buitenwaterniveaus, bv. getijdenbewegingen,
- bergingscapaciteit in het achterland,
- variaties in de kostprijs van energie, bv. dag- en nachttarieven en / of variabele marktprijzen (APX)
- voorkomen onbalans in vraag en aanbod van elektriciteitsvoorziening t.g.v. een toenemend percentage zon- en windenergie.

De nieuwe regeling is geïmplementeerd in de open-source toolbox RTC-tools van Deltares (RTC-Tools 2.3) en is een doorontwikkeling van de huidige versie van RTC Tools en CONTROLNext. Deze toolbox bevat regel-gebaseerde sturingen (IF-THEN-ELSE regels), feedback controllers en ondersteuning voor anticiperende regelingen, die de sturing op basis van voorspellingen optimaliseert. De internationale term voor dergelijke anticiperende regelingen is Model-Predictive Control (MPC). Ook bevat RTC tools verschillende waterbouwkundige en hydraulische modellen die betrekking hebben op geulstroming, bassins, afstroming van regenwater en grondwaterstroming. Door deze modellen onderling te koppelen, is het mogelijk MPC-regelaars op te stellen voor volledige waterbouwkundige systemen. Een dergelijk systeem bevat een gehele polder met daarin meerdere kanalen, bassins, pompgemalen, stuwen en spuien.

Het vernieuwende van deze toolbox zit niet alleen in het anticiperen op toekomstige omgevingsfactoren (regenval, getij, wind), maar ook in het feit dat de regeling één of meerdere doelen op prioriteit optimaliseert. Hierbij houdt RTC Tools rekening met alle relevante niet-lineariteiten (getij en pompcurves) en discontinuïten (starten/stoppen van pompen; droogvallen van overstorten).

De toolbox maakt gebruik van open source en commerciële optimalisatie-algoritmes (solvers) om het optimalisatieprobleem op te lossen. Het optimalisatieprobleem bestaat uit 3 elementen:

1. De doelfunctie; bijvoorbeeld het minimaliseren van de pompkosten gedurende de tijdhorizon voor de optimalisatie.
2. De beslisvariabelen; bijvoorbeeld de pomptoerentallen en stuwhoogtes voor alle uren van de tijdhorizon.
3. De randvoorwaarden, die de relaties vastleggen tussen beslisvariabelen en de doelfunctie. De model-relaties voor het gedrag van pompen, kanalen en stuwen zijn voorbeelden van randvoorwaarden. Ook tijdreeksen op de systeemranden en tijdreeksen van verwachte energieprijzen zijn randvoorwaarden voor de optimalisatie.

Dit werkpakket is ondersteund door een postdoc bij TU Eindhoven (TU/e), Klaudia Horvath, die de wetenschappelijke onderbouwing van de vernieuwde toolbox heeft verzorgd, en heeft bijgedragen aan implementatie van componenten en aan de uitvoering van de meest complexe pilot bij Waterschap Rivierenland.

3.4 Waterschaps Pilots

In de pilots is onderzocht of de techniek van slim malen toegepast kan worden en welke energiewinst te halen is. De pilots omvatten het uitvoeren van een vergelijkend onderzoek van een drietal sturingsvarianten voor watersystemen van het pilot-waterschap. De varianten die zijn vergeleken zijn:

- 1) de huidige sturing, vaak peilsturing,
- 2) variant met optimalisatie op energiekosten en
- 3) optimalisatie op CO2 emissies.

De analyses zijn zoveel mogelijk uitgevoerd met operationele data van het jaar 2015.

Om de analyses uit te voeren is een instrumentarium opgesteld dat bestaat uit een stand-alone Delft-FEWS applicatie waarbinnen het sturingsmodel het betreffende jaar nabootst. Het sturingsmodel is gebouwd in RTC-Tools en bevat in beperkt detail de kenmerken van het betreffende watersysteem. Het gaat immers niet primair om een perfecte representatie van het watersysteem maar juist om een instrument dat het mogelijk maakt om de verschillen in de sturingsvarianten duidelijk te maken. De verschillende varianten zijn voor het betreffende jaar in een zogeheten hindcast (dus met werkelijke verwachtingen, inclusief alle fouten/onzekerheden daarin) gesimuleerd.

Er zijn pilots uitgevoerd bij 4 waterschappen: Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK), Zuiderzeeland (ZZL), Wetterskip Fryslân (WSF) en Waterschap Rivierenland (WSRL). Voor elke pilot zijn er specifieke aandachtspunten om een goed inzicht te verkrijgen in het toepassingsbereik van Slim Malen in het algemeen en RTC-Tools in het bijzonder.

In pilot bij HHNK is onderzocht wat de potentie is om de pompen die de Wieringermeerpolder bemalen te sturen op minimale energiekosten. Hierbij is voor de aanwezige gemalen in de polder een optimale regeling bepaald aan de hand van energieprijzen, getijde en rendement van de pompen.

In de pilot voor ZZL zijn drie strategieën vergeleken te weten:

- Minimalisatie energiekosten
- Minimalisatie energieverbruik
- Benutten lokaal beschikbare duurzame energie

Voor de laatste strategie is gewerkt met de aanname dat de duurzame energie wordt opgewekt door een lokaal geplaatste windturbine. Winddata van het KNMI wordt gebruikt om de hoeveelheid opgewekte energie te bepalen.

Het specifieke aandachtspunt voor de pilots bij WSF zit in het optimaliseren van verschillende typen pompen op energiekosten: een regulier gemaal met centrifugaalpomp (Liesluis) en het vijnzelgemaal van Sappetil.

In de pilot bij WSRL ligt het aandachtspunt bij de integrale gebiedsregeling van het Linge stroomgebied. Hierbij is voor de aanwezige gemalen in het systeem een optimale regeling bepaald aan de hand van energieprijzen, getijde en rendement van de pompen. In deze studie is de hele Linge gemodelleerd, samen met de 13 stuwen en de vier hoofdgemalen. Aan- en afvoer vanuit de polders en de achterliggende gebieden zijn uit neerslag-afvoermodellen gesimuleerd. De optimalisatie is gedaan aan de hand van de APX energie prijzen van 2013 ivm beperkte databeschikbaarheid voor 2015.

4 Resultaten Gemaalinzet Energiemarkt

In dit hoofdstuk worden de hoofdconclusies van de scenariostudie met PPSGen besproken. Er zijn 4 scenario's doorgerekend met gemaalflexibiliteit, die steeds vergeleken zijn met dezelfde scenario's, maar dan zonder gemaalflexibiliteit:

- NEV2017 zonder andere flexibiliteitsopties (warmtepompen, elektrische auto's, thuisbatterijen en industriële vraagsturing)
- Groen scenario zonder andere flexibiliteitsopties
- NEV2017 met andere flexibiliteitsopties
- Groen-scenario met andere flexibiliteitsopties

De meest realistische scenario's bevatten uiteraard ook de andere flexibiliteitsopties.

De verschillende scenario's laten kostenbesparingen voor het maalbeheer zien tussen de 20% en 25% en een maximale indirecte CO₂ uitstootreductie van 0 tot 1 Mton CO₂ afhankelijk van het gekozen scenario (zie figuur 4.1). Met indirecte CO₂ reductie wordt bedoeld op de CO₂ uitstootreductie ten gevolge van de flexibele gemaal-inzet, waardoor fossiele centrales minder hoeven te draaien.

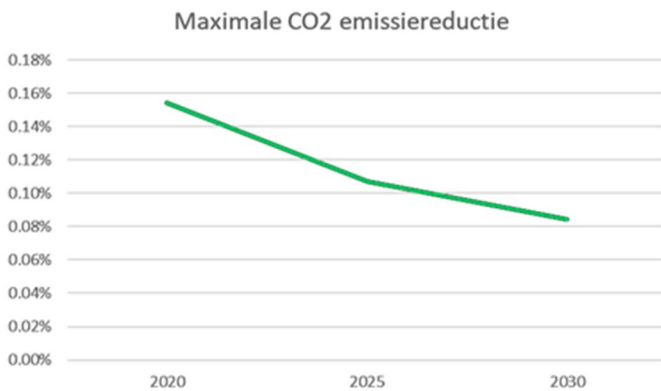
In sommige scenario's worden de gemalen vaker ingezet tijdens piekaanbod van zon en wind, waardoor de CO₂ uitstoot tijdelijk lager is dan in het referentie-scenario. In andere scenario's met veel andere flex-opties in de markt worden de gemalen ook ingezet om energiecentrales door te laten draaien, waardoor de CO₂ uitstoot tijdelijk toeneemt.

De gemaalflexibiliteit heeft hiermee een beperkte, maar niet verwaarloosbare impact op de inzet van de energiecentrales. De grootste uitstootreductie wordt gerealiseerd in het NEV2017 scenario zonder andere flexibiliteits-opties in de markt.



Figuur 4.1: Gemiddelde kostenbesparing volgens PPSGen van het NEV2017 en Groen-scenario met andere flex-opties.

De scenario's voor de ontwikkeling van de energiemarkt laten zien dat landelijke invoering van Slim Malen bij de waterschappen tot een indirecte CO₂ uitstootreductie leidt, afhankelijk van het gekozen scenario. Deze indirecte besparing heeft te maken met het feit dat je meer op zon en wind gaat malen en minder op kolencentrales. De verwachte indirecte CO₂ besparing bedraagt 38 kton CO₂. Dat is weliswaar slechts 0.12% van de nationale CO₂-emissie (zie figuur 4.2), maar wel ruim 80 procent van de huidige CO₂-uitstoot voor het maalbeheer (46 kton).



Figuur 4.2: Maximale CO₂ uitstootreductie volgens PPSGen scenario's

De CO₂ en kostenreductie zijn ter indicatie verdeeld over de waterschappen op basis van het energieverbruik voor de bemaling volgens de Klimaatmonitor 2016 en de studie met het Nationaal Hydrologisch instrumentarium (NHI) door Simon Buijs. In het NEV2017 scenario inclusief andere flex-opties wordt een landelijke kostenbesparing gevonden van 1,79 M€, die indicatief verdeeld is over de waterschappen op basis van hun bijdrage aan het totale energieverbruik voor het maalbeheer van 139 GWh; zie Tabel 1. In het Groen-scenario loopt de landelijke besparing op 2,34 M€

Tabel 1: Verwachte kostenbesparing per waterschap (per jaar) in de scenario's inclusief andere flex-opties.

Nr.	Waterschap	Bijdrage GWh	% Bijdrage	NEV mln. €	Groen mln. €
2	Wetterskip Fryslân	12,21	8,7%	0,16	0,20
8	Vallei en Veluwe	2,22	1,6%	0,03	0,04
9	Rivierenland	8,08	5,8%	0,10	0,14
11	Hoogheemraadschap Amstel	7,62	5,5%	0,10	0,13
12	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	17,78	12,7%	0,23	0,30
13	Hoogheemraadschap van Rijnland	13,79	9,9%	0,18	0,23
14	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden	3,99	2,9%	0,05	0,07
15	Hoogheemraadschap van Delfland	5,32	3,8%	0,07	0,09
23	Scheldestromen	6,86	4,9%	0,09	0,11
25	Brabantse Delta	3,53	2,5%	0,05	0,06
33	Hunze en Aa's	6,63	4,8%	0,09	0,11
34	Noorderzijlvest	3,17	2,3%	0,04	0,05
37	Zuiderzeeland	32,99	23,6%	0,42	0,55
38	Aa en Maas	1,99	1,4%	0,03	0,03
39	Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard	6,25	4,5%	0,08	0,10
40	Hollandse Delta	5,86	4,2%	0,08	0,10
41	Vechtstromen	1,30	0,9%	0,02	0,02
Totaal		139,60	100%	1,79	2,34

5 Resultaten RTC Tools

5.1 Inleiding

Om gemalen slim aan te sturen is software nodig. RTC Tools (Real Time Control) is zo'n software tool waarmee gemalen aangestuurd kunnen worden. Dit hoofdstuk geeft enige achtergrondinformatie over RTC Tools en de belangrijkste ontwikkelde functionaliteit in RTC Tools om Slim Malen mogelijk te maken. Graag aangeven waarom gekozen is voor RTC Tools (iets van uniek? Of zijn er ook andere tools?)

5.2 Achtergrond RTC Tools

In het algemeen onderscheiden we twee methodes om de sturing van kunstwerken te bepalen:

- Feedback control
- Model predictive control (MPC).

Feedback control is een sturing op de actuele situatie. Onder bepaalde condities worden de bijhorende sturingsregels uitgevoerd zoals bijvoorbeeld het starten van een pomp op minimaal toerental zodra het inslagpeil is bereikt. Feedback control kan meestal in vorm van een beslisboom worden gestructureerd en kan met een reeks van if-then-statements worden gemodelleerd. Software-pakketten zoals SOBEK 3 en D-Hydro ondersteunen feedback control.

MPC bepaalt de sturing (control) voor een bepaalde (voorspel-)periode (prediction) met gebruik van een model van het watersysteem. Model predictive control gebruikt optimalisatietechnieken om het sturingspatroon te vinden dat het beste past bij de beheersdoelen (bijvoorbeeld streefpeil, maximum debiet, minimum debiet of minimaal energieverbruik). Technisch gezien wordt met model predictive control een wiskundig probleem opgelost dat bekend staat als een minimalisatieprobleem met (ongelijkheids-) randvoorwaarden.

Een wezenlijk verschil tussen deze twee technieken is dat feedback control alleen naar het actuele tijdstip kijkt. MPC kijkt naar meerdere tijdstappen in de toekomst, bijvoorbeeld 48 uur. Daarmee is het mogelijk op toekomstige ontwikkelingen, die binnen de voorspelhorizon liggen, te anticiperen. Door te anticiperen op een groot neerslagvolume kan de beheerder bijvoorbeeld wateroverlast voorkomen, doordat de pompen al gaan draaien ruim voordat het inslagpeil bereikt is ("voormalen"). Nu anticiperen de beheerders vooral op basis van hun eigen ervaring. MPC is een geavanceerde ondersteuning voor de beheerders om beter onderbouwd te anticiperen op kort-termijn veranderingen in het watersysteem.

Verder zoekt MPC naar een optimaal sturingspatroon voor de voorspelde situatie, terwijl feedback-control-regels van tevoren moeten zijn bepaald en daarom minder goed gebruik maken van de beschikbare sturingsruimte, zoals de berging in het watersysteem of de beschikbare pompcapaciteit.

RTC-Tools is door Deltares ontwikkeld om de techniek "model predictive control" toepasbaar te maken. Bij de ontwikkeling van RTC-Tools ligt de nadruk op de operationele context. Tabel 5.1 bevat nadere informatie over het softwareproduct RTC-Tools.

Een RTC-Tools-model bestaat uit drie lagen:

- De hydraulische laag. Deze laag bevat een watersysteemmodel, dat wil zeggen een schematisatie van het hydraulisch systeem. In principe is het watersysteemmodel vergelijkbaar met hydraulische modellen op basis van bijvoorbeeld SOBEK. Omdat met dit model wordt geoptimaliseerd moet het hydraulisch model naast waterstanden en debieten ook de afgeleide naar de sturingsvariabelen (bijv. pompdebiet, klepstand van sluisdeuren, kruinhoogte van stuwen) berekenen. RTC-Tools gebruikt daarom het Open-Source-pakket Modelica voor het watersysteemmodel. De afgeleides worden door Modelica automatisch berekend, en RTC-Tools bevat een bibliotheek met objecten waarmee een watersysteemmodel in Modelica kan worden opgezet.
- De optimalisatielaag. In deze laag worden de sturingsdoelen gespecificeerd, en samen met het hydraulisch model wordt een optimalisatieprobleem opgezet, wat hieronder verder toegelicht wordt. Het RTC-Tools-rekenhart zorgt voor de communicatie met het watersysteemmodel (Modelica).
- De data laag bevat tijdreeksen voor het watersysteemmodel, waaronder neerslag-afvoer-reeksen, randvoorwaarden zoals bijvoorbeeld de getijdenvariatie of maximale pompdebieten en sturingsdoelen zoals het totale energieverbruik over de optimalisatiehorizon. De modeluitvoer hoort ook bij de data laag. RTC-Tools ondersteunt twee dataformaten: CSV en FEWS-PI.

De hydraulische laag in RTC Tools heeft een ander doel dan een hydraulisch simulatiemodel. Het doel van een simulatiemodel is om alle waterstanden en debieten in het complete model zo goed mogelijk te simuleren. Het doel van de hydraulische laag in RTC Tools is om de sturende componenten (pompen, stuwen, schuiven) zo goed mogelijk in te stellen binnen een beperkte rekentijd. Daarom is de schematisatie van de hydraulische laag veel eenvoudiger dan de schematisatie van een simulatiemodel, terwijl de belangrijkste karakteristieken voor het systeemgedrag (bijv. de waterstand-bergingsvolume-relatie) wel correct worden gemodelleerd.

Voor het project “slim malen” zijn de wezenlijke elementen in het watersysteemmodel de pompen, de stuwen en schuiven, naast het systeem van waterlopen en bergingsgebieden. De sturingsvariabelen zijn de toerentallen van alle aanwezige pompen en de posities van stuwen en schuiven. Deze worden in de optimalisatielaag bepaald, met behulp van het watersysteemmodel. Het watersysteemmodel heeft randvoorwaarden nodig voor de voorspelhorizon. Deze zijn afkomstig uit berekeningen met een hydrologisch model (neerslag-afvoer-processen) of zijn bekend uit andere voorspellingen (zeewaterstanden).

Binnen de optimalisatie worden de pomptoerentallen en stuwposities (sturingsvariabelen) voor de komende periode (48 uur) zo bepaald dat een doelfunctie wordt geminimaliseerd. In dit geval zal de doelfunctie bestaan uit het totale energieverbruik of de totale energiekosten (of een combinatie daarvan) in de komende periode. De randvoorwaarden waaraan op elk moment moet worden voldaan zijn bijvoorbeeld de marges waarbinnen de polderpeilen zich moeten bewegen en de grenzen van de toegestane werkgebieden waarbinnen de werkpunten van de pompen moeten liggen.

De regeling werkt dan als volgt. Op basis van de actuele polderpeilen en de verwachtingen voor regenval, getijdenbeweging en energietarieven worden met behulp van RTC-Tools de optimale toerentallen van alle pompen en de fases waarin de sluisen moeten worden geopend voor de komende periode (bijv. 48 uur) berekend. Het resultaat van de berekening is het toerental over de tijd voor elkemaal, de stuwposities en de openingsstanden van elke spuisluis over de tijd. Idealiter staan de sluisen open gedurende laagtij, en wordt alleen gebruik van pompen gemaakt als de spuicapaciteit niet voldoende is, en dan bij voorkeur zo dat de

pompen zo lang mogelijk bij lage opvoerhoogtes pompen en gebruik gemaakt wordt van tijden met lage energieprijzen. De pompen en sluisen worden vervolgens aangestuurd op basis van deze berekening. Zodra een nieuwe weersverwachting voorhanden is (meestal na 1 of 2 uur) wordt de berekening herhaald en wordt de pompregeling aangepast. Op deze manier wordt het einde van het “48 uren-venster” nooit bereikt maar schuift het vooruit in de tijd. Deze techniek staat bekend als “receding horizon” en zorgt ervoor dat de onzekerheid van de voorspelling wordt gereduceerd.

Een RTC-Tools-model kan als systeemcomponent worden geïntegreerd met een willekeurig data-integratie-platform zoals FEWS, dat bij de meeste waterschappen operationeel is. De samenhang tussen de hoofdcomponenten in een operationeel waterbeheersysteem is weergegeven in Figuur 2.1 in hoofdstuk 2.

Het is van belang om een onderscheid te maken tussen het interne rekenmodel binnen RTC-Tools en een gedetailleerd hydraulisch model. Een anticiperende regeling heeft een zo eenvoudig mogelijk model van het systeemgedrag nodig, dat snel genoeg kan draaien om in de optimalisatie van de regeling mee te draaien; daarom heeft een RTC-Tools-model vaak een lagere resolutie dan een gedetailleerd hydraulisch model.

Naast het watersysteemmodel binnen RTC-Tools-model kan in het operationele waterbeheersysteem een gedetailleerd model zijn opgenomen, waarmee waterstanden, stroomsnelheden en de waterkwaliteit in alle uithoeken van het beheersgebied real-time weergegeven kunnen worden. De resultaten van de RTC-Tools optimalisatie kunnen dan ter verificatie in het gedetailleerde model ingevoerd worden in een geautomatiseerd proces. Het detailmodel is geen noodzakelijk onderdeel van het operationele systeem; het snelle eenvoudige interne model van de hydraulische laag in RTC Tools is wel noodzakelijk in het operationele systeem met een anticiperende regeling.

Onderstaand meer informatie over RTC Tools.

Tabel 5.1: Overzicht software-product RTC-Tools

Software-product	RTC-Tools 2
Doelstelling	Optimalisatie van sturing in watersystemen
Beschikbaarheid Code	Open Source
Ontwikkelaar	Deltares (lead) en Open-source-community
Leverancier van releases	Deltares, contactpersoon: Ivo Miltenburg (ivo.miltenburg@deltares.nl of rtc-tools@deltares.nl)
Licentie	LGPL (source code), Deltares license agreement voor gebruik in operationele systeem
Meest recente versie	RTC-Tools 2.2 (2019)
Website	https://www.deltares.nl/en/software/rtc-tools/
Documentatie	https://rtc-tools.readthedocs.io/en/latest/index.html
Download	https://www.deltares.nl/en/software/rtc-tools/#download
Publicatie	Schwanenberg, D.; Becker, B. P. J.; Xu, M. (2015): The Open RTC-Tools Software framework for Modeling Real-Time Control in Water Resources Systems. Journal of Hydroinformatics 17 (1), 130–148. DOI 10.2166/hydro.2014.046

5.3 Innovaties RTC Tools

Er zijn twee vernieuwende elementen in RTC Tools in het Slim Malen project ontwikkeld:

1. De optimalisatie kan worden uitgevoerd op meerdere doelen, die op volgorde van prioriteit gerangschikt worden.
2. De relevante niet-lineariteiten en discontinuïteiten in de sturingsvariabelen (pompen, stuwen, sluizen) kunnen op een robuuste wijze worden meegenomen in de optimalisatie.

Meerdere niveaus van doelfuncties kunnen worden gedefinieerd en kan er een prioritering in de regeling voor de inzet van poldergemalen en andere kunstwerken opgegeven worden. Wateroverlast heeft eigenlijk altijd de hoogste prioriteit. Dit betekent dat als eerste de overschrijding van de operationele bandbreedte in het waterpeil wordt geminimaliseerd. Hierna wordt de eventuele noodzakelijke overschrijding van de bandbreedte als een randvoorwaarde opgelegd voor de optimalisatie van prioriteit 2 (bijvoorbeeld minimalisatie van energieverbruik). Het grote voordeel van optimalisatie op prioriteiten is dat er geen wegingsfactoren nodig zijn om ongelijksoortige doelen, zoals waterveiligheid en energieverbruik, te combineren.

Een belangrijk deel van het Slim Malen onderzoek was gericht op het zo goed mogelijk meenemen van het pompgedrag (energetisch correct) en het gedrag van stuwen en schuiven. Er is functionaliteit toegevoegd om pompen met vast en variabel toerental te modelleren, inclusief het toegelaten werkgebied, rendementseffecten en daarmee het energieverbruik in elk werkpunt. Hiermee wordt het energieverbruik correct meegenomen in de geoptimaliseerde sturing van de pompen. Ook de modellering van regelbare stuwen is verbeterd, zodat de waterberging optimaal benut kan worden.

Deze modellen van pompen en stuwen moeten aan bepaalde wiskundige eisen voldoen (convexiteit) om in operationele watersystemen gebruikt te kunnen worden. Dit onderzoek is in nauwe samenwerking tussen de RTC Tools ontwikkelaars bij Deltares en de postdoc bij TU/e uitgevoerd. De postdoc bij TU/e heeft onder andere verschillende modelvereenvoudigingen met elkaar vergeleken en daaruit geconcludeerd dat de modellering, die expliciet rekening houdt met het starten en stoppen van pompen tot 10% lager energieverbruik leidt in vergelijking met een eenvoudiger model; verdere details zijn beschikbaar in Water Resources Research (zie Tabel 5.2).

Tabel 5.2: Overzicht van wetenschappelijke output Slim Malen

Conference/journal	Samenvatting / presentatie / wetenschappelijk artikel
Conferentie EGU General Assembly 2017, Wenen	Samenvatting EGU2017 - A water management decision support system contributing to sustainability.pdf
Conferentie SimHydro 2017, Nice (Fr) Journal publicatie La Houille Blanche	Artikel SimHYDRO2017 - CATEGORIZATION OF TRAPEZOIDAL OPEN CHANNELS BASED ON FLOW CONDITIONS_horvath_ref.pdf Wetenschappelijk artikel Klaudia Horvath, , Bart P.M. van Esch, Jorn Baayen, Ivo Pothof (2018), Categorization of trapezoidal open channels based on flow conditions for the choice of simple models. La Houille Blanche, Vol. 4, 2018, p. 56-64.

	(republication of conference paper)
Conferentie HydroInformatics 2018, Palermo	Artikel Horvath, K. et al. (2018), Model-predictive control of a river reach with weirs, Proceedings of 13th Int. Conf. on Hydroinformatics, HIC2018, 1 - 6 July, Palermo
Journal publicatie Water Resources Research	Artikel Horvath, K., van Esch, B., Vreeken, D., Pothof, I., Baayen, J. (2019), Convex modelling of pumps in order to optimize their energy use, Water Resources Research 55, Vol. 3, p. 2432-2445. https://doi.org/10.1029/2018WR023811 .
IFAC Workshop CMWRS2019, Delft	Klaudia Horváth, Bart van Esch, Ivo Pothof, Tjerk Vreeken, Jan Talsma, Jorn Baayen (2019), Closed-loop model predictive control with mixed-integer optimization of a river reach with weirs, 1 st IFAC Workshop on control methods for water resources systems (CMWRS2019), 19-20 September, Delft (in review)

Dankzij dit onderzoek kunnen de operationele optimalisaties met RTC Tools zodanig geformuleerd worden dat de optimalisatieproblemen de gewenste eigenschappen hebben voor toepassing in operationele waterbeheersystemen:

- 1) Robuustheid: er wordt altijd aan de systeem-randvoorwaarden voldaan (fysica, capaciteiten, etc.)
- 2) Geldigheid: de optimalisatie wordt zodanig opgezet dat er altijd een geldige oplossing wordt gevonden.
- 3) Kwaliteit: de gevonden operationele sturing minimaliseert de doelfunctie.
- 4) Stabiliteit: kleine aanpassingen in de randvoorwaarden leiden tot kleine verschillen in de gevonden sturing. Deze eigenschap is essentieel voor het vergroten van het vertrouwen in deze vorm van beslissingsondersteuning.
- 5) Deterministisch: met dezelfde startoplossing wordt steeds deze oplossing gevonden. Er zit geen stochastische component in het rekenhart van de optimalisatie.
- 6) Begrensde tijd: een oplossing wordt gevonden binnen een vooraf gestelde tijdlimiet.

5.4 RTC Tools - functionele uitbreidingen ten behoeve van Slim Malen

Binnen het project Slim Malen is gewerkt aan de verder uitbreiding van RTC Tools om de drempel naar operationeel gebruik verder te verlagen. Onderstaand worden de functionele uitbreidingen binnen RTC Tools toegelicht. De effecten van de uitbreidingen en innovaties op de bruikbaarheid van RTC Tools komen aan bod in hoofdstuk 6 Pilots.

RTC Tools is uitgebreid met variabele tijdstappen zodat de rekenintensieve mixed-integer methodes zo veel mogelijk gebruikt kunnen worden. Hiermee kunnen richting het einde van de tijdhorizon grotere tijdstappen gehanteerd worden. Dit betekent voor Slim Malen dat de totale tijdhorizon voor de optimalisatie langer wordt en het toepassingsbereik voor Slim Malen toeneemt.

Aan de kant van de interface is Modelica gekoppeld aan RTC Tools om de bouw, uitbreiding en aanpassing van optimalisatie-modellen te vereenvoudigen. Verder zijn specifieke weergaves van de resultaten ontwikkeld om de beheerder inzicht te verschaffen in de geoptimaliseerde sturing. Tijdens de workshops met de pilot-waterschappen is gebleken dat

de gelijktijdige weergave van waterpeil, pompdebiet, pomptoerental en energieprijis het gewenste inzicht in het peilbeheer geeft.

Alle uitbreidingen van RTC Tools zijn beschikbaar gemaakt voor de [Open source code van RTC Tools 2.3](#) en in de [RTC Tools documentatie](#); zie Tabel 5.1.

6 Pilots

6.1 Inleiding

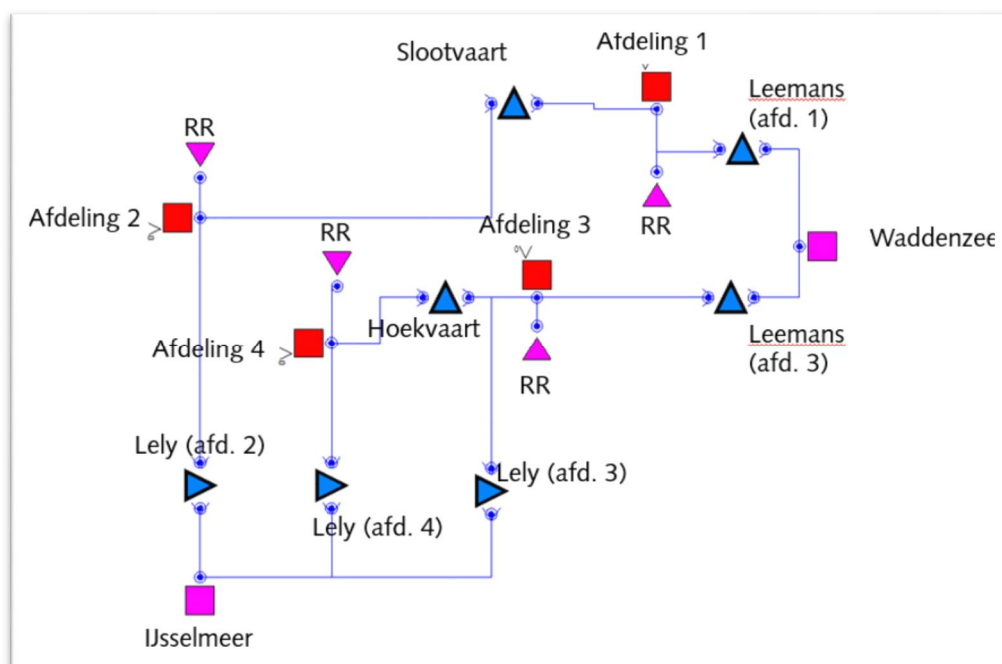
In de pilots is getoetst of de ontwikkelde kennis om Slim Malen in de praktijk toe te passen werkbaar is. De pilots bij HHNK en ZZL zijn uitgevoerd door Nelen & Schuurmans. De pilots bij WSF en WSRL zijn uitgevoerd door Deltares. De navolgende paragrafen bevatten de samenvattende resultaten per pilot. Uitgebreide rapportages over de pilots zijn beschikbaar op www.slimmalen.nl.

6.2 Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK)

In pilot bij HHNK is onderzocht wat de potentie is om de pompen die de Wieringermeerpolder bemalen te sturen op minimale energiekosten. Het RTC Tools model is hiervoor in overleg met HHNK stapsgewijs uitgebreid. Het uiteindelijke model beschrijft de situatie van de Wieringermeer met 4 afdelingen, buitenwater (Waddenzee en IJsselmeer) en de pompen Leemans en Lely (Figuur 6.1).

Het SOBEK neerslagafvoermodel is gebruikt om voor 2015 de neerslag op te drukken. De pompen zijn als fixed-speed pompen gemodelleerd. Een belangrijke randvoorwaarde is om binnen de peilbandbreedtes te blijven om vervolgens te optimaliseren op prijs en duurzaamheid.

Uit de vergelijking tussen metingen (waarin gemaal Lely niet actief meedraait) en optimalisatie (waarin alle gemalen vrij gekozen kunnen worden) blijkt dat de kosten voor het malen in de optimalisatie 29% lager uitvallen. Deze winst volgt voornamelijk uit een reductie in het energieverbruik (16%) en het sturen op de dynamische energieprijzen APX.



Figuur 6.1 Schematisatie van de Wieringermeerpolder in RTC-Tools

Het rendement van de pompen van Leemans is toegenomen doordat de QH-relatie is meegenomen in de regeling. Deze vergelijking konden we niet maken voor gemaal Lely omdat daar geen debietmetingen voor zijn. De rektijden zijn bovendien acceptabel voor operationele toepassing, waarmee de Slim Malen aanpak een interessante verbetering biedt ten opzichte van het huidige peilbeheer.

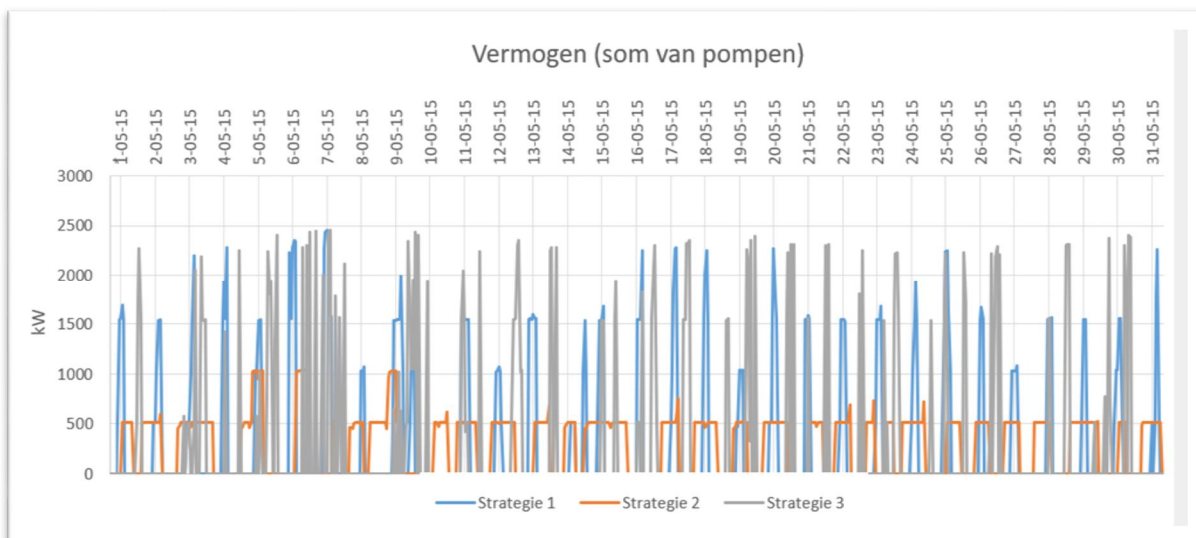
6.3 Waterschap Zuiderzeeland (ZZL)

Voor Zuiderzeeland is de Noordoostpolder gemodelleerd. Voor de Noordoostpolder is alleen het gemaal Buma gemodelleerd, dat verbonden is met het IJsselmeer. De neerslag is meegenomen door het opstellen en koppelen van een neerslagafvoermodel voor 8 (deel)gebieden. De optimalisatie-doelstellingen zijn minimalisatie van kosten, minimalisatie energieverbruik en maximalisatie van gebruik van duurzame energie, indien een windmolen geplaatst zou worden. Voor dit laatste onderdeel is de aanname gedaan dat de duurzame windenergie-productie vertaald kan worden van KNMI-data naar een tijdreeks van de windproductie, die vervolgens gratis beschikbaar is voor het gemaal.

Drie scenario's zijn met elkaar vergeleken. Sturing op:

- 1) energiekosten,
- 2) energieverbruik,
- 3) lokaal beschikbare duurzame energie.

De verschillende strategieën leiden tot duidelijke verschillen in de pompinzet. De optimalisatie op energieverbruik laat de pompen langer draaien op een lager vermogen (Figuur 6.2).



Figuur 6.2 Inzet van pompen in de verschillende scenario's over de maand mei. Strategie 1 optimaliseert energiekosten, strategie 2 het energieverbruik en strategie 3 optimaliseert ook op energiekosten, maar geeft voorrang aan de lokale opwek van een windmolen.

In alle scenario's blijft de waterhoogte binnen de gestelde bandbreedte. De verschillen in energieverbruik zijn klein. Het grootste verschil tussen de scenario's is 150 MWh op een totaal van orde 4000 MWh. De kosten zijn wel ongeveer 50% minder bij sturing op duurzame energie. Dit heeft te maken met de aanname dat de windmolen de elektriciteit gratis levert. De helft van

het energieverbruik van gemaal Buma kan hiermee geleverd worden door een windmolen met een capaciteit van 3 MW.

De resultaten van de scenario's zijn besproken met direct betrokkenen van Zuiderzeeland. Hieruit kwamen een aantal vragen en opmerkingen naar voren:

- Rol van de energiesector in flexibele gemaalaansturing?
- Creëren van draagvlak binnen verschillende organisaties
- Aansturing op basis van kosten of CO2-reductie?
- Verschillende prijssignalen voor aansturing (APX, ENDEX)
- Risico's in het watersysteem die ontstaan bij een geoptimaliseerde sturing, die richting waterpeilen stuurt aan de bovenkant van de marge in het peilbesluit.

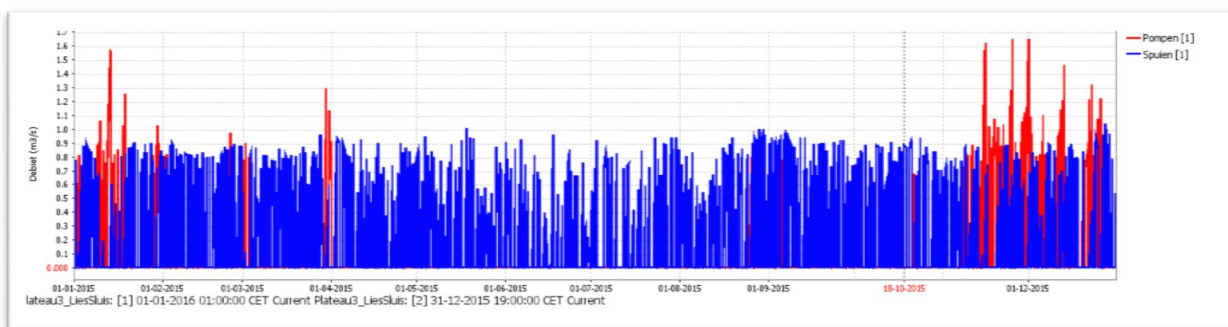
Bij deze analyse is ook gekeken naar het aantal pompschakelingen. Het werkelijke aantal pompschakelingen bedroeg ruim 600. Bij de optimalisatie op energiekosten en op lokale opwek loopt dit aantal schakelingen op naar ruim 900 respectievelijk ruim 1300. Alleen de optimalisatie op energieverbruik, waarbij de pompen langer draaien op lager vermogen, leidt tot beduidend minder schakelingen dan de meting: namelijk 225 schakelingen.

Overall is de conclusie dat het technisch mogelijk is om slim malen vorm te geven. De verschillende belangen moeten daarin wel tegen elkaar worden afgewogen. De optimalisatiedoelen moeten daarom aansluiten op de beleidsdoelen van het waterschap.

6.4 Wetterskip Fryslân (WSF)

Het specifieke aandachtspunt voor de pilots bij WSF zit in het optimaliseren van verschillende typen pompen op energiekosten. De planning was om hiervoor 8 tot 12 losse gemalen in de pilot op te nemen. Maar bij het verzamelen van de data bleek dat van slechts 2 gemalen voldoende data beschikbaar is om de optimalisaties te kunnen modelleren en uitvoeren. Dit zijn 2 gemalen met verschillende pomptypes: vijzelgemaal Sappetil en axiaal pomp-gemaal Liessluis.

De resultaten over 2015 laten zien dat het energieverbruik van gemaal Liessluis ruim 50% lager ligt dan in de gesimuleerde referentie-situatie, waarin de regeling gemodelleerd is met WANDA. Deze grote besparing wordt vooral veroorzaakt doordat veel meer gebruik gemaakt wordt van spuien bij laag water (Figuur 6.3).



Figuur 6.3 Inzet van pompen (rood) en sluizen (blauw) bij Liessluis in het jaar 2015.

De resultaten voor Sappetil laten een besparing zien op de energiekosten van 17% ten opzichte van de gesimuleerde referentie-situatie. Dit verschil wordt vooral veroorzaakt doordat rekening gehouden wordt met de variabele energieprij. De variabele energieprij speelt in de referentiesituatie geen enkele rol.

Tijdens de bespreking van de resultaten met WSF werden verder de volgende conclusies getrokken :

- Balans tussen complexiteit van het sturingsmodel en de kostenbesparing. Meer complexiteit brengt misschien meer besparingen, maar ook meer investering. Het hangt van het (deel)systeem af welke oplossing de voorkeur verdient.
- Bij WSF is er veel nadruk op de vermindering van CO₂ uitstoot.
- De resultaten van deze Slim Malen pilot kunnen parallel lopen aan de besluitvorming over verruiming van peilbesluiten bij WSF. Extra flexibiliteit geeft meer ruimte voor optimalisatie en dus minder energiegebruik en lagere kosten.

6.5 Waterschap Rivierenland (WSRL)

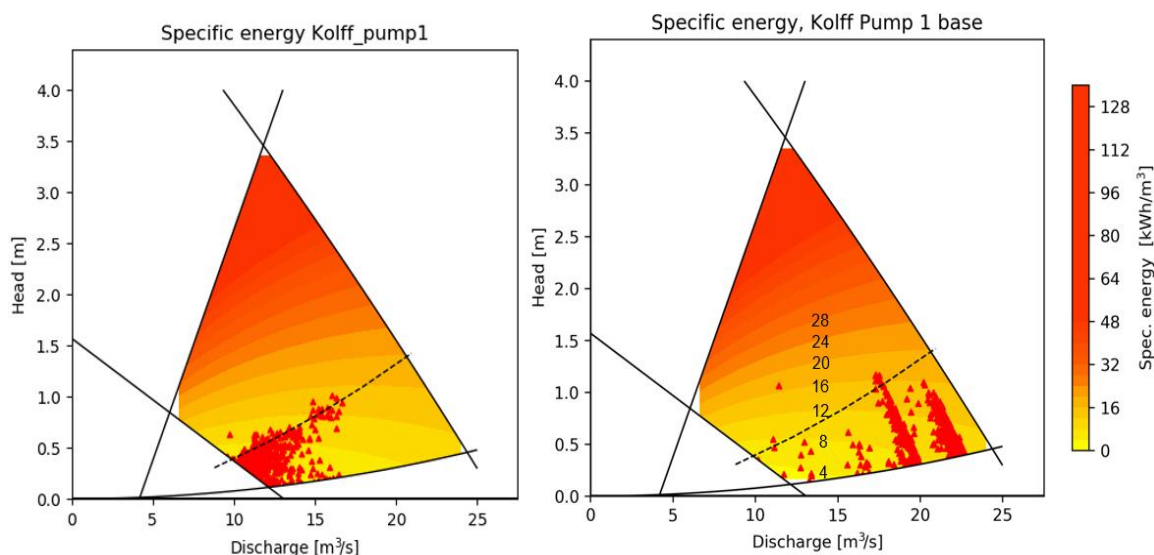
In de pilot bij WSRL ligt het aandachtspunt bij de integrale gebiedsregeling van het Linge stroomgebied. Op voorhand was voorzien dat de complete integrale gebiedsregeling voor het hele Linge hoofdsysteem uitdagend zou zijn. Daarom is samen met WSRL besloten om het model in eerste instantie op te splitsen in twee optimalisatie-modellen: voor de boven-Linge (met de stuwen) en Beneden-Linge (met het Beuningen-gemaal en Kolff-gemaal). Beide modellen zijn afzonderlijk getest voor kortere tijdperiodes.

Met het gebruik van een commercieel rekenhart (Gurobi) voor de optimalisatie is het complete model over 2013 geoptimaliseerd en vergeleken met een simulatie van de huidige regeling over dezelfde periode.

Het Kolffgemaal is een dieselgemaal, waardoor de kosten via de dieselprijs direct aan het energieverbruik en de draaiuren gekoppeld zijn. In het stroomgebied van de Linge kan het gebruik van RTC-Tools leiden tot besparing van 73% in energieverbruik en tot 80% in kosten.

Deze besparingen zijn mogelijk door het gebied integraal, energie- en kostenefficiënt te sturen. Op basis van de analyse van de resultaten worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Meer gebruik maken van elektrische gemalen. In dit verband is het belangrijk dat voor het Van Beuningen Gemaal een lokale regeling ontworpen wordt;
- Meer malen met laagtij, en dus met lagere opvoerhoogtes (zie Figuur 6.4);
- Meer malen met lage kosten van elektriciteit (via Van Beuningen);
- Meer malen met een hoog rendement van de pompen (zie Figuur 6.4);
- Meer gebruik maken van buffering van water in de Boven-Linge door meer water via vrij verval in te laten en minder water via de pompen bij Pannerling in te laten.



Figuur 6.4 Pompwerkpunten en Specifieke energie (kWh/m^3) voor pomp 1 van Kolffgemaal in 2013 voor het geoptimaliseerde model (links) en het referentie-model (rechts). De begrenzing van het werkgebied wordt bepaald door het minimale en maximale pomptoeental en een minimaal rendement van 50%. De stippellijn toont de werkpunten met het hoogste pomprendement.

De conclusie is dat WSRL veel kan profiteren van een Beslissingsondersteunend systeem gebaseerd op RTC-Tools, in termen van kosten maar ook energie (en CO2) besparing.

In de bespreking van de resultaten met WSRL kwamen de volgende aandachtspunten naar voren:

Wat zijn de consequenties van meer pompschakelingen en wat zijn eventuele extra kosten (start/stopkosten, onderhoud, etc...)?

- De pompen draaien in de optimalisatie vaak op een relatief laag toerental tegen de cavitatie-lijn (rechterraand van werkgebied). Wat zijn de consequenties voor de pompen om op deze werkpunten te draaien?

- De toegelaten bandbreedte voor waterstanden moet scherp bekeken worden in relatie tot het peilbesluit. Soms is een hogere minimale waterstand nodig om water in te kunnen laten richting achterliggende gebieden.
- Hoe kan het effect van wind meegenomen worden in het sturingsmodel?

6.6 Gebruikersvalidatie eindseminar 14 maart 2019

De belangrijkste resultaten en andere initiatieven zijn 14 maart 2019 gepresenteerd tijdens het eindseminar Slim Malen. Waterschappen kunnen jaarlijks **tot 70 procent** energie besparen bij polder- en boezembemaling door gebruik te maken van slimme sturingsystemen. Daarmee brengen ze ook hun CO₂-emissie flink terug.

De landelijke energiebesparing van het invoeren van slim malen schatten de onderzoekers in op **30 procent** van het totale jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de waterschappen voor bemaling. Dat komt overeen met 45 GWh. Minder energieverbruik levert direct een behoorlijke CO₂-besparing op. Bij de huidige energiemix (met 0,5 ton CO₂-uitstoot per 1 MWh geproduceerde/benodigde stroom) komt deze uit op 22,5 kton CO₂ per jaar op een totale uitstoot van 46 kton (Klimaatmonitor 2016). Doordat er bij landelijke invoering van Slim Malen meer water verpompt wordt op zon en wind en minder op kolen, is er ook sprake van een indirecte CO₂ besparing; deze besparing kan zelfs oplopen tot 38 kton, zo blijkt uit de scenariostudie voor de gemaal-inzet op de energiemarkt. Veel deelnemers van het eindseminar gaven aan het einde van de dag aan dat ze snel werk willen maken van Slim Malen. Alle presentaties, opnames en een verslag zijn beschikbaar via <https://www.stowa.nl/nieuws/slim-malen-opti-malen> en <https://www.slimmalen.nl>. Het verslag is ook opgenomen in Bijlage A.

7 Conclusies

De potentiële energiebesparing van het landelijk invoeren van Slim Malen bedraagt minimaal 30 procent van het totale jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de waterschappen voor bemaling. Dat komt overeen met 45 GWh. Minder energieverbruik levert direct een behoorlijke CO₂-besparing op. Bij de huidige energiemix (met 0.5 ton CO₂-uitstoot per 1 MWh geproduceerde/benodigde stroom) komt deze CO₂ besparing uit op 22,5 kton CO₂ per jaar. De totale CO₂-uitstoot van de waterschappen voor het watersysteembeheer bedroeg in 2016 volgens de Klimaatmonitor 46 kton CO₂ in 2016.

De scenario's voor de ontwikkeling van de energiemarkt laten zien dat landelijke invoering van Slim Malen bij de waterschappen ook tot een indirecte CO₂ uitstootreductie leidt, afhankelijk van het gekozen scenario. Deze indirecte besparing heeft te maken met het feit dat je meer op zon en wind gaat malen en minder op kolencentrales. De verwachte indirecte CO₂ besparing bedraagt 38 kton CO₂. Dat is weliswaar slechts 0.12% van de nationale CO₂-emissie, maar wel ruim 80 procent van de huidige CO₂-uitstoot voor het waterbeheer en ongeveer anderhalf keer zo groot als de directe CO₂-besparing.

De gemiddelde verwachte kostenbesparingen t.o.v. de huidige APX prijzen bedragen 20% tot 25%.

De pilots laten zien dat aanzienlijke besparingen haalbaar zijn door de operationele sturing te optimaliseren. De energiebesparing neemt toe van 5% bij ZZL tot 70% bij WSRL. Naarmate de omstandigheden variabelere zijn (getijdewater, bergingsmogelijkheden) is er meer ruimte voor de optimalisatie en stijgen de energiebesparingen. De kostenbesparingen variëren tussen 30% en 80%.

8 Randvoorwaarden voor Slim Malen

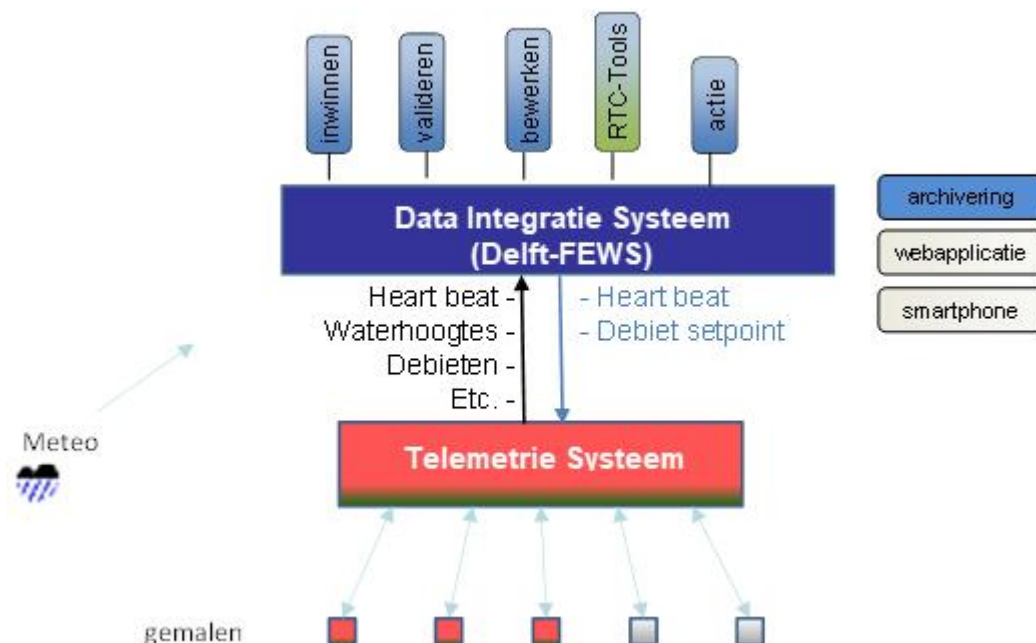
8.1 Inleiding

Om Slim Malen succesvol in te kunnen voeren zal er aan een aantal randvoorwaarden moeten worden voldaan bij de waterschappen. Ten eerste is een nauwe samenwerking nodig tussen de operationele waterbeheerders en de ontwikkelaars van de het operationele waterbeheersysteem om ervoor te zorgen dat de beheerders vertrouwen krijgen en houden in het nieuwe operationele systeem. De technische stappen in onderstaande paragrafen worden daartoe in nauwe samenwerking uitgevoerd.

8.2 Centraal Sturingsysteem

Op hoofdlijnen zijn er twee componenten die op orde moeten zijn c.q. gemaakt moeten worden, waarna het Slim Malen sturingsconcept toegepast kan worden:

- Het Data Integratie systeem (bijvoorbeeld Delft-FEWS)
- Het Telemetrie systeem.



Figuur 8.1: Systeemoverzicht Slim Malen

De operationele omgeving (Delft-FEWS) is de algemene interface naar de eindgebruiker. Het draagt zorg voor:

- het verzamelen van alle benodigde data (van het telemetrie systeem en andere bronnen)
- validatie/bewerken van data
- draaien van modellen (zoals SOBEK RR) om de benodigde input van het sturingsmodel (RTC-Tools) te bepalen
- periodiek geautomatiseerd draaien van het RTC model

- Verzenden (wanneer het systeem operationeel draait) van een nieuwe sturingsactie voor elk van de gemalen naar het telemetriesysteem

Het telemetrie systeem draagt zorg voor :

- Communicatie van en naar de onderstations

De volgende zaken zullen op orde moeten zijn om slim te kunnen malen:

- 1) De koppeling tussen het telemetrie systeem en het data integratie systeem zal gerealiseerd moeten zijn
- 2) De benodigde gegevens (actuele situatie) zal met de juiste frequentie beschikbaar moeten komen voor het data integratie systeem, waarbij de acceptabele vertraging afhangt van de toepassing; dat wil zeggen op welke frequentie het sturingsmodel draait en op welke tijdsresolutie input data noodzakelijk is.
- 3) Beide componenten moeten via een 'heartbeat' signaal van elkaar weten dat ze online en beschikbaar zijn. Op het moment dat de communicatie wegvalt zal het telemetrie systeem op lokale sturing terug moeten kunnen vallen.

8.3 Eisen aan de data en modellen

Het data integratie systeem (voor Slim Malen) bestaat op hoofdlijnen uit data inwin, bewerking en validatie modules, operationele voorspel modellen en het sturingsmodel. De volgende aspecten zijn daarvoor van belang:

- 4) Modules om data uit verschillende bronnen in te winnen, te valideren en bewerken.
 - a) Bij veel modellen en bij sturingsmodellen in het bijzonder is de volledigheid van data van groot belang
 - b) Er zal aandacht besteed moeten worden om de gebruikers de kwaliteit van de data te laten controleren, aanvullen en corrigeren.
 - c) Automatische controle, inter- en extrapolatie van meetdata zullen in een operationeel systeem nodig zijn om de data op te werken naar een niveau dat geschikt is voor de verschillende operationele modellen.
- 5) Operationele voorspelmodellen voor de hydrologie en hydraulica van het watersysteem.
 - a) Operationele modellen zijn bij een deel van de waterschappen al beschikbaar in het kader van de hoogwaterbeheersing. Soms zijn deze modellen alleen betrouwbaar te gebruiken in situaties met hogere waterstanden, grote neerslag en hoge afvoeren.
 - b) De onderliggende modellen dienen voor Slim Malen uitgebreid te worden, zodat de modellen in alle omstandigheden (droogte, lage grondwaterstanden, etc.) betrouwbaar gebruikt kunnen worden.
 - c) De output van deze modellen leveren typische randvoorwaarden en "forcings" op voor het sturingsmodel.
- 6) Het sturingsmodel (RTC Tools optimalisatie model) zal gedefinieerd moeten worden, met prioriteiten in het waterbeheer, waarbinnen op energie geoptimaliseerd kan worden.
 - a) Voor een beschrijving van de verschillende lagen van het RTC-Tools model wordt verwezen naar paragraaf 5.2. Het gaat hierbij om de ontwikkeling van de hydraulische laag (intern model), de optimalisatie laag (doelen, randvoorwaarden) en de data laag (benodigde input, output, koppeling met data integratie systeem). In eerste instantie

zal dit in een Stand Alone variant ontwikkeld moeten worden, zoals voor de pilots in Slim Malen is gedaan. Belangrijke keuzes, die gemaakt moeten worden (toepassing specifiek) zijn:

- i) Complexiteit schematisatie (incl noodzaak voor convexe benadering van bepaalde vergelijkingen)
 - ii) gewenste voorspellingsduur
 - iii) tijdsresolutie optimalisatie
 - iv) frequentie van optimalisatie runs
 - v) terugval mechanisme (wat als het model niet draait/er geen data is, etc)
- b) Voor model validatie is het aan te raden om een bepaalde historische periode in samenhang met de operationele voorspelmodellen te simuleren. Hiermee kunnen vervolgens ook de besparingen gekwantificeerd worden en de effecten van de optimalisaties op het gehele watersysteem worden getoetst. Deze stap is uitgevoerd bij de pilots in ZZL en HHNK, waar deze operationele modellen al beschikbaar waren.
 - c) Een belangrijk onderdeel is het bepalen van de interactie/feedback tussen de gebruiker en het model. Zowel aan de zijde van het sturingsmodel, als aan de data integratie component (Delft-FEWS) zullen acties ondernomen moeten worden om de gebruiker input van het model, prioriteiten, doelen, etc aan te kunnen laten passen, en inzicht te geven in de resultaten (en hoe deze tot stand zijn gekomen).
 - d) Als de voorgaande stappen met succes zijn doorlopen, dan kan er proefgedraaid worden, waarbij de beheerder de voorgestelde optimale sturing moet accorderen.
 - e) Als ook deze stap succesvol is doorlopen, dan kan de sturing operationeel toegepast worden, waarbij de beheerder alle processen bewaakt en kan ingrijpen bij incidentele omstandigheden. Idealiter kan het waterschap zelfstandig (kleine) aanpassingen doorvoeren in de operationele optimalisatie; bijvoorbeeld extra randvoorwaarden specificeren als er onderhoud wordt gepleegd op gemalen of andere elementen in het watersysteem, of bijvoorbeeld het draaien met een bepaalde regime keuze, op basis waarvan bepaalde randvoorwaarde voor het sturingsmodel aangepast worden.

9 Referenties

9.1 Referenties in de aanvraag

- [1] Arcadis, 2014, *Klimaatmonitor Waterschappen 2014*, Unie van Waterschappen, Den Haag
- [2] van Esch, B.P.M., 2012, *Studie Energiebesparing Gemaal Altena*, WPT2012-11-2, Waterschap Rivierenland
- [3] van Esch, B.P.M., 2014, *Gemaal Altena – Studie naar de energiebesparing in 2013*, Waterschap Rivierenland
- [4] Vijlbrief, J., 2012, *Optimalisatie regeling poldergemalen en suatiesluizen*, rapport I-47, Waterschap Scheldestromen
- [5] Eneco, 2010, *Watersysteem als elektriciteitsbuffer – Haalbaarheidsonderzoek*, Eneco b.v., DHV b.v.
- [6] Antea groep, 2015, *Energiebesparing 5 vijzelgemalen*, projectnummer 275726, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
- [7] J. Gooijer, 2011, *Innovation in regional water management based on Delft-FEWS, OpenMI & Real-Time Control*, Waterschap Noorderzijlvest
- [8] Schwanenberg, D. (Deltares), 2012, *Adjoint Modeling Framework for Real-Time Control of Water Systems*, Reservoir System Modeling Technologies Conference, Febr. 21-22, 2012 Portland, Oregon
- [9] Schwanenberg, D., Becker, B., Schellekens, J., 2013, *Recent Advances in RTC-Tools and OpenStreams*, Deltares
- [10] Sukkar, G.F.J., Bosma, A.J., Rommens, C.J.M. (Tauw), Kuipers, H. (Waterschap Zuiderzeeland), 2013, *Energie-aspecten poldergemalen waterschap Zuiderzeeland*
- [11] Becker, B., Dahm, R., van Heeringen, K., Goorden, N., Kramer, N., Kooij, K. (Deltares), Gooijer J. (Waterschap Noorderzijlvest), Jansen, J. (Wetterskip Fryslân), 2012, *Op zoek naar een optimaal ontwerp voor een groot uitwateringsgemaal in het Lauwersmeer*, H2O juni 2012, pp. 11-13
- [12] Dekens, B., 2013, *Gradient-based hybrid Model Predictive Control using Time Instant Optimization for Dutch regional water systems*, MSc Thesis, TU Delft.
- [13] Kempen, K.T., 2013, *Efficient Polder Drainage*, BSc Thesis, TU Eindhoven.
- [14] Nelen & Schuurmans, Sturen op energie; acteren op de APX markt, N&S rapport P0134 in opdracht van HHNK, afdeling Watersysteem, 15-09-2015.

9.2 Slim Malen publicaties

- [15] Klaudia Horvath, , Bart P.M. van Esch, Jorn Baayen, Ivo Pothof (2018), Categorization of trapezoidal open channels based on flow conditions for the choice of simple models, *La Houille Blanche*, Vol. 4, 2018, p. 56-64
- [16] Horvath, K. et al. (2018), Model-predictive control of a river reach with weirs, *Proceedings of 13th Int. Conf. on Hydroinformatics, HIC2018*, 1 - 6 July, Palermo
- [17] Horvath, K., van Esch, B., Vreeken, D., Pothof, I., Baayen, J. (2019), Convex modelling of pumps in order to optimize their energy use, *Water Resources Research* 55, Vol. 3, p. 2432-2445. <https://doi.org/10.1029/2018WR023811>
- [18] Klaudia Horváth, Bart van Esch, Ivo Pothof, Tjerk Vreeken, Jan Talsma, Jorn Baayen (2019), Closed-loop model predictive control with mixed-integer optimization of a river reach with weirs, 1st IFAC Workshop on control methods for water resources systems (CMWRS2019), 19-20 September, Delft.

A Verslag Eindseminar Slim Malen

Verslag van het symposium 'Slim Malen: de nieuwe standaard?', op donderdag 14 maart 2019 in Amersfoort. Organisatie: STOWA

Slim malen = opti-malen!



Waterschappen kunnen jaarlijks tot 70 procent energie besparen bij polder- en boezembemaling door gebruik te maken van slimme sturingssystemen. Daarmee brengen ze ook hun CO₂-emissie flink terug. Dat is de belangrijkste uitkomst van het project ‘Slim Malen’. Tijdens een drukbezocht slotsymposium werden de belangrijkste resultaten toegelicht.

Door: Bert-Jan van Weeren

Slim malen. Het komt er kortgezegd op neer dat je minder maalt en, als je toch moet malen, dat doet in perioden dat er veel, vooral duurzame stroom beschikbaar is. Op dat moment profiteer je van het grotere stroomaanbod en de daarmee gepaard gaande lagere stroomprijs. Je maakt hierbij onder meer gebruik van de rek in de berging van het watersysteem, en zoekt het meest geschikte moment (= laagste stroomprijs) uit om je polders en boezems leeg te malen, aldus Slim-Malenonderzoeker Ivo Pothof van Deltares. Maar slim malen is zoals gezegd ook minder malen. Ook dat is een kwestie van timing. Door bijvoorbeeld te pompen bij laag tij, in plaats van bij opkomende vloed, hoef je veel minder hoogteverschil te overbruggen. De pomp rendeert beter en hoeft minder lang te draaien om dezelfde hoeveelheid water te verpompen.

De energiebesparing en bijbehorende CO₂-winst spreken veel waterschappen aan, bleek uit het betoog van Heemraad Ton Leijten van Waterschap Zuiderzeeland. Waterschappen worden volgens hem als eerste geconfronteerd met de negatieve gevolgen van klimaatverandering en moeten zich mede om die reden hard maken om een wezenlijke bijdrage te leveren aan de energietransitie. Waterschap Zuiderzeeland is volgens Leijten al in 2022 energieneutraal. Onder meer door slimmer te malen, gemaal Vissering op Urk zeer duurzaam te vernieuwen en door deelname in een windmolenpark.

Goede afzet

Slim malen, zo bleek tijdens dit symposium, speelt in op de toenemende beschikbaarheid van schone wind- en zonenergie en de daarmee ontstane onbalans op de energiemarkt. Er is energiebedrijven en netbeheerders veel aan gelegen een goede afzet te vinden voor deze ‘overtollige energie’. Opslagssystemen zijn tot dusver erg duur (accu's) en nieuwe energieconcepten als Power-to-Gas (waarbij elektrische energie wordt omgezet in, en kan worden opgeslagen als waterstof) zijn nog volop in ontwikkeling. In het project Slim Malen is door e-Risk berekend dat de energetische ‘opslagcapaciteit’ in het watersysteem gelijk staat aan 1700 MWh. Dit vraagt enige uitleg. Als je de volledige waterbergingscapaciteit van je

systemen gebruikt, heb je 1700 MWh aan elektriciteit nodig om het volledig leeg te pompen. Het is als het ware een omgekeerde batterij. Opslag van deze omvang in elektrische batterijen zou minimaal 150 miljoen eurokosten, aldus de onderzoekers.

Minder energie, minder CO₂

De potentiële energiebesparing van het invoeren van slim malen schatten de onderzoekers in op 30 procent van het totale jaarlijkse elektriciteitsverbruik van de waterschappen voor bemaling. Dat komt overeen met 45 GWh. Minder energieverbruik levert direct een behoorlijke CO₂-besparing op. Bij de huidige energiemix (met 0.5 ton CO₂-uitstoot per 1 MWh geproduceerde/benodigde stroom) komt deze uit op 22,5 kton CO₂ per jaar. De totale CO₂-uitstoot van de waterschappen voor het watersysteembeheer bedroeg in 2016 volgens de Klimaatmonitor 46 kton CO₂ in 2016.

En dan is er ook nog de indirecte CO₂-besparing, aldus Maarten Meijburg. Deze indirecte besparing heeft te maken met het feit dat je meer op zon en wind gaat malen en minder op kolencentrales. Bij landelijke invoering van Slim Malen wordt een indirecte besparing verwacht van 38 kton CO₂, zo blijkt uit de scenario-studie voor de ontwikkeling van de energiemarkt, die e-Risk binnen het Slim Malen project heeft uitgevoerd. Dat is weliswaar slechts 0.12% van de nationale CO₂-emissie, maar volgens Meijburg en onderzoeker Pothof betreft het wel ruim 80 procent van de huidige CO₂-uitstoot voor het waterbeheer en het is anderhalf keer zo groot als de directe CO₂-besparing.

Veiligheid voor alles

Wat heeft het project slim malen uiteindelijk opgeleverd, behalve mooie energie- en klimaatcijfers? Er is een bestaande open source toolbox verder ontwikkeld die waterschappen kunnen inzetten voor operationele sturing (RTC tools 2.3). Toolontwikkelaar Klaudia Horvath vertelde in een speciale workshop meer over wat er zich precies onder de motorkap van 'RTC tools' afspeelt. Het RTC-instrumentarium kan nu op basis van informatie over onder meer waterstanden, neerslagverwachtingen, energieprijzen en getijdenbewegingen beslissingsondersteunend advies aan operators. Een aanwezige wilde van onderzoeker Ivo Pothof weten of de veiligheid wel blijft gewaarborgd als je gebruik gaat maken van dergelijke complexe sturingssystemen. Ton Leijten, bestuurder bij Zuiderzeeland, had dat eerder die dag ook als harde randvoorwaarde gesteld. Ivo Pothof kon de aanwezigen geruststellen. Volgens hem is de veiligheid ten minste zo goed geborgd, en misschien wel beter, als bij handmatige regeling omdat 'de waterstandsgrenzen hard in het regelsysteem staan, die mogen niet worden overschreden.' Klaas Jan de Hart die een Slim-Malenpilot bij Hollands Noorderkwartier heeft begeleid, viel hem bij: "Je ziet in de praktijk niet dat peilen stijgen, maar juist dat ze lager uitvallen."

Geen black box

René van der Zwan van het Hoogheemraadschap van Rijnland bracht in zijn presentatie over het door Rijnland ontwikkelde integrale-sturingssysteem (waarin ook RTC tools wordt gebruikt) nog een ander belangrijk aandachtspunt ter sprake: de toenemende complexiteit van integrale-sturingssystemen. Dat vraagt volgens hem meer kennis en kunde van operators. Een dergelijk systeem moet bovendien op draagvlak kunnen rekenen van diezelfde operators. Dat betekent dat het systeem geen *black box* moet zijn waarvan niemand de logica van de beslissingen meer begrijpt en daardoor mogelijk de adviezen van het systeem terzijde gaat schuiven: "Je moet kunnen zien welke doelen/uitgangspunten zijn meegenomen en welke weging heeft plaatsgevonden." Het systeem van Rijnland maakt dit visueel, liet Van der Zwan zien.

Diverse sprekers gingen in op de inkoop van energie, waaronder de eerder genoemde energiespecialist Maarten Meijburg. Het uitgangspunt bij Slim Malen is dat waterschappen daarbij geheel of gedeeltelijk afstappen van een vast contract en daarvoor in de plaats flexibel energie inkopen op de energiemarkt (de APX: Amsterdam Power EXchange). Hoe je de verdeling precies maakt, is afhankelijk van het risico dat je wilt nemen. Maar wat je ook doet, ga in ieder geval in gesprek met je leverancier en geef hen maximaal inzicht in de benodigde hoeveelheid energie die je op korte en langere termijn nodig hebt, aldus Meijburg.

Energiebedrijven moeten aan de netbeheerder namelijk tot 24 uur vooruit ieder kwartier aangeven hoeveel energie ze op het net zetten en eraf halen. Als dat niet met elkaar strookt, betalen ze een zogenoemde onbalansboete. Die boete wentelen ze af op hun (groot)gebruikers via een onbalanspremie. Hoe meer inzicht je als grootgebruikers de leverancier kunt geven in je energiebehoefte, hoe lager deze opslag zal uitpakken. Het vereist van de waterschappen dat ze hun energiebehoefte voor de komende 24 u helder in beeld moeten hebben. Dit lukt ze steeds beter.

Pilotstudies

In het Slim-Malenproject zijn vier pilotstudies uitgevoerd: bij Hollands Noorderkwartier (gemaal Leemans/ Wieringermeerpolder), bij Zuiderzeeland (drie boezemgemalen), bij Wetterskip Fryslân (gemalen Liessluis en Sappetil) en Rivierenland (Lingegebied hoofdsysteem). Deze pilots zijn tijdens deze dag kort toegelicht. Meer informatie hierover vindt u op de website www.slimmalen.nl en in de presentaties hierover op stowa.nl (agenda/agenda archief). De algemene conclusie is dat waterschappen zelfs met relatief eenvoudige regelsystemen aansprekende resultaten kunnen boeken. Bovendien vereist de invoering van (eenvoudige) systemen vaak weinig investeringen, maar je hebt er wel direct profijt van, zoals Ben Staring uiteenzette in zijn presentatie over APX-sturing bij Waternet. De investeringen in complexere systemen lopen in de tonnen. Maar de kostenbesparingen zijn van dezelfde orde, aldus Pothof.

De exacte hoogte hangt af van de mate waarin waterschappen nu al iets doen aan centrale regeling en de daarvoor benodigde infra hebben aangelegd. De pilots zelf leverden energiebesparingen op die uiteenliepen van 5 tot 70 procent. De grote verschillen worden verklaard door de variatie in de omstandigheden (getij e.d.) in het betreffende watersysteem. Waar je gebonden bent aan zeer strakke peilen, heb je bijvoorbeeld veel minder speelruimte.

Groene golf

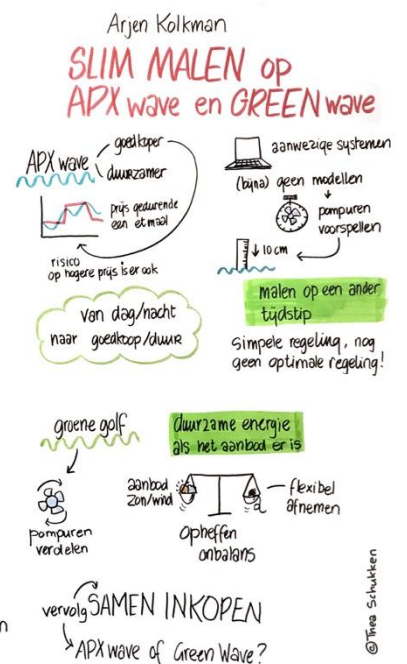
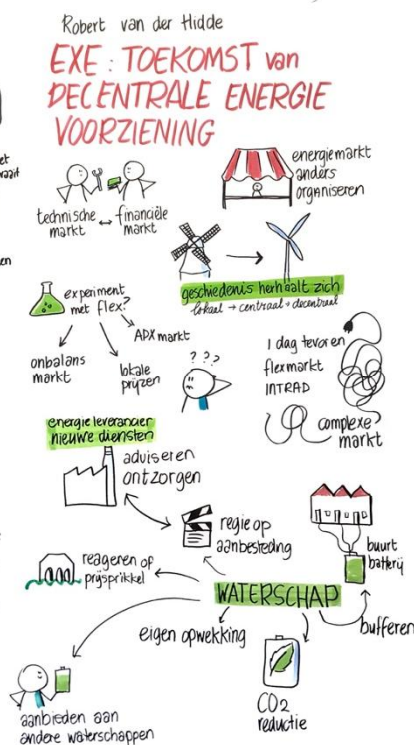
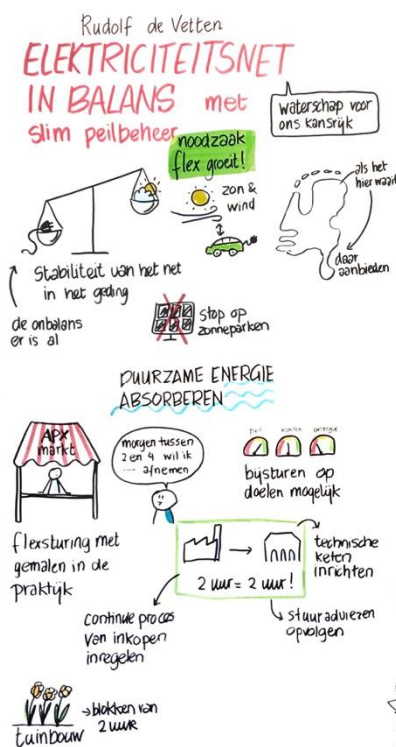
Tot slot: draait het bij slim malen nu vooral om kosten of om duurzaamheid? Dat hangt vooral af van de keuze die je als waterbeheerder maakt. In de tijdens deze dag getoonde voorbeelden draaide het vooral om kostenbesparing, met als 'bijvangst' minder CO₂-emissie. Maar volgens spreker Arjen Kolkman (Hunze en Aa's) kun je ook heel goed slim malen op 'de groene golf'. Hierbij optimaliseer je je bemaling eerst en vooral vanuit duurzaamheid; je maakt zoveel mogelijk bij het hoogste aanbod aan groene energie. Of gebruikt daarvoor je eigen groen opgewekte elektriciteit uit zon of wind. Dan is je bijvangst minder kosten.

Michelle Talsma van STOWA, die de dag had geopend, sloot hem ook af. Dat gebeurde met een korte enquête. Bemoedigend was dat de meeste aanwezigen na afloop van deze dag aangaven dat ze snel werk willen maken van slim malen, als ze al niet bezig zijn met enige vorm van slimme sturing. Op de vraag waar nu bij de aanwezigen de behoeften lagen, kwamen uiteenlopende antwoorden: van de powerpoint presentaties van deze dag (zie onder), een overzichtelijk rapport (is aanstaande) en concrete aanknopingspunten om ermee aan de slag te gaan tot vergelijking tussen APX-optimalisatie en Groene Golf optimalisatie.

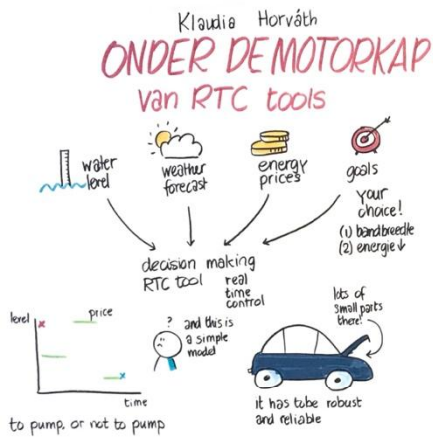
Slim Malen & de Green Deal Energie

Slim Malen is een onderzoeksproject in het kader van de Green Deal Energie uit 2016 tussen overheid en waterschappen om in 2025 CO₂-neutraal te werken. Dagvoorzitter Michelle Talsma was namens STOWA trekker van de aan de Green Deal verbonden kennisontwikkeling: "Slim Malen is een belangrijk project in de Green Deal. Het gaat namelijk niet alleen over energieopwekking, ook energiebesparing moet aandacht krijgen, want wat je niet gebruikt hoeft je ook niet op te wekken." Alle kennis uit het project wordt beschikbaar gesteld via de website www.slimalen.nl en via een open source toolbox.

Tekeningen workshopronde 1



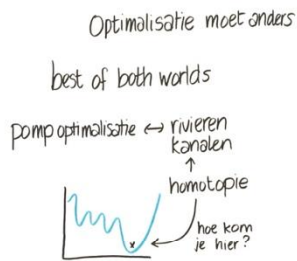
Tekeningen workshopronde 2



OPTIMIZATION (convex)



Jorn Baayen
VAN POMPEN naar RIVIEREN en KANALEN



Ivo Pothof, namens Ivo Miltenburg
hoe blijft DE BEHEERDER in CONTROL?



